

Reducción del ruido en el entorno de las carreteras



OC
serie monografías

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN CARRETERAS Y TRANSPORTES
ROAD TRANSPORT RESEARCH

Reducción del ruido en el entorno de las carreteras

INFORME REALIZADO POR UN GRUPO
DE CIENTÍFICOS EXPERTOS DE LA OCDE



Ministerio de Obras Públicas, Transportes
y Medio Ambiente
Dirección General de Carreteras

OCDE

Organización de Cooperación y Desarrollo Económico

1995

ORGANIZACION DE COOPERACION Y DESARROLLO ECONOMICO

En virtud del artículo 1.º de la Convención, firmada el 14 de diciembre de 1960, en París, y entrada en vigor el 30 de septiembre de 1961, la Organización de Cooperación y de Desarrollo Económico (OCDE) tiene como objetivo el promover políticas que conduzcan a:

- Realizar la mayor expansión posible de la economía y del empleo con una progresiva mejora del nivel de vida de sus países Miembros, manteniendo la estabilidad financiera, contribuyendo de esta forma al desarrollo de la economía mundial.
- Contribuir a una mayor expansión económica, tanto en los países Miembros como en los países no miembros, en aras del desarrollo económico.
- Contribuir a la expansión del comercio mundial sobre una base multilateral y no discriminatoria conforme a las obligaciones internacionales.

Los países Miembros fundadores de la OCDE son: Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza y Turquía. Los siguientes países se han adherido posteriormente, en las siguientes fechas: Japón (28 abril 1964), Finlandia (28 enero 1969), Australia (7 junio 1971), Nueva-Zelanda (29 mayo 1973) y México (18 mayo 1994). La Comisión de las Comunidades europeas participa en los trabajos de la OCDE (artículo 13 de la Convención de la OCDE).

También disponible en francés e inglés, con los títulos:

LA RÉDUCTION DU BRUIT AUX ABORDS DES VOIES ROUTIÈRES
ROADSIDE NOISE ABATEMENT

© OCDE 1995

Traducción al español de textos en francés y/o inglés,
versiones oficiales de esta publicación.

Las solicitudes de reproducción o de traducción totales
o parciales de esta publicación deberán dirigirse a:

M. le Chef du Service des Publications, OCDE
2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16, France.

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Obras Públicas, Transportes
y Medio Ambiente

I.S.B.N.: 84-498-0173-7

NIPO: 161-95-136-7

Depósito Legal: M-38805-1995

Imprime: RAYCAR, S.A.

Diseño cubierta: Carmen G. Ayala

Impreso en papel ecológico

El Programa se centra en la investigación en materia de carreteras y de transportes teniendo en cuenta el impacto de los efectos intermodales sobre el sistema de transportes terrestres en su conjunto. Está orientado hacia un punto de vista tecno-económico con el fin de resolver los problemas claves del transporte identificados por los países Miembros. El Programa cuenta con dos principales líneas de actuación:

- La evaluación a nivel internacional de investigaciones y políticas en materia de carreteras y de transportes por carretera para dar a los gobiernos Miembros y a las organizaciones internacionales gubernamentales un soporte científico en la toma de decisiones.
- La transferencia de tecnología y el intercambio de información por medio de dos base de datos: el sistema de Documentación Internacional de Investigación en la Carretera (DIRR) y la Base de Datos Internacional de la Circulación y los Accidentes de Carretera (BICAR).

Su misión es la de:

- Desarrollar una investigación innovadora por medio de la cooperación y el trabajo en red a nivel internacional.
- Empezar análisis políticos conjuntos y preparar estudios tecnológicos sobre problemas cruciales del sector del transporte por carretera.
- Promover intercambios de informaciones científicas y técnicas en el sector del transporte y contribuir a la transferencia de la tecnología sobre carreteras, tanto en los países Miembros de la OCDE como en los no miembros.

Las actividades científicas y técnicas incluyen:

- La investigación en materia de infraestructuras.
- El tráfico por carretera y el transporte intermodal.
- Las interacciones medioambiente/transporte.
- La investigación en materia de seguridad vial.
- La planificación estratégica de la investigación.

N.º DIRR 131921

El estudio realizado por un Grupo de expertos de la OCDE examina el estado actual de los conocimientos y las experiencias nacionales referentes a las técnicas de reducción del ruido, tanto para las carreteras existentes como para las futuras. *Los dos primeros capítulos describen el ámbito del estudio, los trabajos en desarrollo y los límites admisibles de ruido según las distintas normas nacionales vigentes en la actualidad.* El Capítulo 3 “Evaluación y medida” se centra en los métodos de medida y los modelos matemáticos aplicados tanto a las infraestructuras nuevas como a las existentes. El Capítulo 4 “Diseño y actuaciones anti-ruido” se refiere a las estructuras de la infraestructura (puentes, terraplenes, túneles), a la concepción de nuevas estructuras y a la transformación de las existentes. “Los pavimentos silenciosos” son presentados en el Capítulo 5, que evalúa su eficacia, fiabilidad y durabilidad desde los puntos de vista, ambiental y de la seguridad. El Capítulo 6 referido a “Las pantallas acústicas” evalúa los diferentes tipos de pantallas, utilizados en los países de la OCDE, considerando los aspectos estéticos, ambientales y paisajísticos. El Capítulo 7 denominado “Integración y costes de las medidas” discute las cuestiones relacionadas con la implantación de las medidas adoptadas y las metodologías de evaluación de costes de las técnicas de reducción del ruido, simples y/o combinadas. El Documento proporciona un punto de vista multidisciplinar, útil para los ingenieros dedicados a la carretera y a los profesionales del medioambiente, sirviendo de base para una planificación estratégica de planes y programas en las que hay que considerar el binomio carretera/medioambiente.

Clasificación:	Medioambiente
Código:	15
Palabras clave:	Pantalla acústica, nivel sonoro, previsión, ruido, circulación, regulación de tráfico, medida, modelo matemático, legislación, carretera, contacto neumático-calzada, capa de rodadura, coste.

	<i>Página</i>
NOTA DE SINTESIS	9
El problema del ruido producido en la carretera	9
Normas a adoptar	9
Cuestiones técnicas.....	12
Estructura del documento.....	12
Necesidad de cooperación internacional.....	13
1. INTRODUCCION.....	15
1.1. Motivo y finalidad del estudio	15
1.2. Descripción del documento	16
2. PRACTICAS ACTUALES Y LIMITES DE RUIDO.....	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Parámetros utilizados para describir la exposición de la población al ruido de la circulación y fijar los límites admisibles	23
2.3. Criterios generales sobre los cuales se basan las normas....	26
2.4. Aspectos económicos y financieros	29
2.4.1. Acciones sobre los vehículos.....	30
2.4.2. Acciones sobre las carreteras y los edificios	30
2.4.3. Coste social del ruido.....	33
2.5. Conclusiones.....	34
2.6. Bibliografía	35
3. EVALUACION Y MEDIDA	37
3.1. Campo de aplicación y utilización de los métodos de medición y precisión	37
3.2. Métodos de previsión del ruido.....	39
3.2.1. Modelos matemáticos del ruido producido por el tráfico	41
3.2.2. Análisis de modelos de cálculo.....	48

3.3.	Métodos de medición del ruido producido por el tráfico.....	50
3.3.1.	Metodologías	50
3.3.2.	Instrumentos de medición.....	51
3.3.3.	Tiempo e intervalos	52
3.3.4.	Puntos de medición.....	53
3.3.5.	Métodos de medición en el interior de los edificios...	54
3.3.6.	Métodos de medición para la evaluación de la eficacia de las pantallas acústicas.....	54
3.4.	Conclusiones	57
3.5.	Bibliografía	61
4.	DISEÑOS Y ACTUACIONES ANTI-RUIDO.....	63
4.1.	Clarificar las necesidades de control del ruido y decidir prioridades.....	63
4.2.	Diferentes medidas para controlar el ruido.....	64
4.2.1.	Medidas físicas aplicadas a la carretera y su entorno	64
4.2.2.	Regulación del tráfico	81
4.2.3.	Reducción del ruido en su origen	81
4.3.	Recomendaciones	84
4.4.	Bibliografía	85
5.	PAVIMENTOS SILENCIOSOS.....	87
5.1.	Control del ruido a través de la pavimentación	87
5.1.1.	Introducción	87
5.1.2.	Generación del ruido de contacto neumático-calzada.	88
5.1.3.	Propagación del ruido de contacto neumático-calzada	89
5.1.4.	Pavimentos silenciosos	90
5.2.	Métodos de medida del ruido de contacto neumático-calzada	100
5.3.	Dimensionamiento, ejecución y gestión de los pavimentos silenciosos	106
5.3.1.	Influencia de las características superficiales de los pavimentos	107
5.3.2.	Experiencias en algunos países de la OCDE	110
5.3.3.	Gestión y conservación del asfalto poroso drenante.	117
5.4.	Bibliografía	121
6.	LAS PANTALLAS ACUSTICAS.....	125
6.1.	Introducción.....	125
6.2.	Consideraciones acústicas	126
6.2.1.	Principios y mecanismos	127
6.2.2.	Consecuencias en la planificación y el diseño	127

6.2.3.	Consecuencias en la elección de los materiales	129
6.3.	Consideraciones estéticas	130
6.3.1.	Efectos visuales	130
6.3.2.	Efectos sobre los automovilistas	131
6.3.3.	Aspectos de pantallas	131
6.3.4.	Graffiti.....	131
6.3.5.	Resumen.....	132
6.4.	Otras consideraciones no acústicas.....	132
6.4.1.	Participación del público	132
6.4.2.	Seguridad	132
6.4.3.	Mantenimiento	133
6.4.4.	Drenajes	134
6.4.5.	Cimentaciones de pantallas	135
6.5.	Tipos de pantalla anti-ruido	135
6.5.1.	Pantallas naturales	137
6.5.2.	Pantallas artificiales	139
6.5.3.	Criterios de evaluación.....	139
6.5.4.	Costes	143
6.6.	Informaciones nacionales relativas a las pantallas anti-ruido	146
6.6.1.	Australia.....	146
6.6.2.	Austria.....	148
6.6.3.	Dinamarca.....	151
6.6.4.	Finlandia	152
6.6.5.	Italia	153
6.6.6.	Japón	157
6.6.7.	Países Bajos.....	157
6.6.8.	Noruega	160
6.6.9.	España.....	162
6.6.10.	Estados Unidos	164
6.7.	Conclusiones.....	166
7.	INTEGRACION Y COSTES DE LAS MEDIDAS	169
7.1.	La integración de los sistemas de protección.....	169
7.2.	Completamentaridad de las pantallas acústicas y de los pavimentos drenantes.....	171
7.3.	Aspectos económicos	171
7.3.1.	Costes de los pavimentos anti-ruido.....	172
7.3.2.	Elementos de comparación con los costes de otros sistemas especializados de protección acústica.....	174
7.4.	Bibliografía	177
8.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y NECESIDADES DE INVESTIGACION.....	179
8.1.	Puntos de vista nacionales	179

8.2. Diferencias entre los sistemas para las carreteras nuevas y existentes	180
8.2.1. Construcciones nuevas	180
8.2.2. Carreteras existentes	185
8.3. Recomendaciones finales	186
8.4. Investigaciones en marcha e investigaciones necesarias.....	188
8.4.1. Prácticas actuales y límites de ruido.....	188
8.4.2. Evaluación y medida	189
8.4.3. Concepción y gestión anti-ruido.....	192
8.4.4. Pavimentos silenciosos	193
8.4.5. Pantallas acústicas	193
8.4.6. Investigación futura	196
 LISTADO DE PARTICIPANTES.....	 197

EL PROBLEMA DEL RUIDO PRODUCIDO EN LA CARRETERA

La evaluación y el control del impacto de las infraestructuras (carreteras) en el medio ambiente son cuestiones relativamente recientes para los planificadores, constructores y gestores de las carreteras. La diversidad de los efectos y de los factores a considerar, ha sido descrito de manera general en un estudio precedente de la OCDE realizado en 1994, titulado “La Evaluación del Impacto de las Carreteras en el Medio Ambiente”. El presente documento trata de una molestia a la vez muy conocida y muy difusa, el denominado “ruido de la carretera”. El ruido afecta directamente a la calidad de vida, principalmente en las zonas de gran densidad de población donde existe un gran volumen de tráfico. Sus orígenes y su propagación dependen de la interacción entre tres factores:

- los vehículos: tipo, número y velocidad;
- la estructura de la carretera: su concepción, construcción y materiales;
- el medio próximo al sistema carretera-entorno, sus componentes y receptores, por ejemplo, las características de los edificios y el número de habitantes.

El ruido de la carretera es un fenómeno complejo, esencialmente, en razón de los efectos sensoriales que produce sobre los seres humanos, lo que explica la relatividad de ciertos componentes, unido, igualmente, al hecho de la dificultad que entraña el medirlo físicamente. Su intensidad varía con la distancia que separa la fuente del receptor y el contexto ambiental en el cual se propaga. A pesar de esta dificultad, su impacto en el medio es el menos difícil de evaluar, teniendo en cuenta la gran experiencia práctica adquirida.

A nivel internacional, las reglamentaciones y normas existentes definen, principalmente, la forma de determinar las propiedades acústicas de los materiales así como la metodología para medir los niveles sonoros producidos por los vehículos. Sin embargo la gestión global y el control del ruido en particular, en el caso de las carreteras, están peor definidas; hay numerosos puntos de vista diferentes ya sea desde el lado de los métodos de evaluación como de las reglamentaciones implicadas.

NORMAS A ADOPTAR

Una de las características específicas del control del ruido de la carretera reside en el problema de la responsabilidad. En efecto, las personas respon-

sables del ruido de las carreteras no son las propietarias/autoridades encargadas de la infraestructura como en el caso del ferrocarril, sino los propios usuarios motorizados. Esto significa que ninguna acción inmediata puede ser tomada para determinar quien tiene la responsabilidad de reducir el nivel de ruido en ausencia de una apropiada legislación. En el caso de nuevas carreteras, se pide sistemáticamente a las empresas constructoras que se aseguren de que los niveles de ruido queden reducidos al mínimo. Sin embargo en lo que concierne a las carreteras existentes no se pide siempre a la Administración de Carreteras que reduzca los niveles de contaminación acústica existentes. Se puede igualmente añadir, que en el caso de carreteras ya construidas la responsabilidad de la contaminación acústica es, frecuentemente, atribuida al constructor que ha construido los “receptores” (inmuebles, casas). Esto sucede:

- en zonas donde la carretera ya estaba construida;
- cuando la protección acústica es inadecuada - en términos de aislamiento al ruido, de orientación con respecto a la carretera y de exposición de fachadas.

El tercer elemento, los vehículos, debido al tamaño y carácter internacional del mercado automovilístico, están sometidos a una extensa reglamentación sobre las emisiones acústicas. Hay que resaltar las diferencias existentes entre los vehículos ligeros y los pesados (motor y elementos auxiliares). Con respecto al ruido de rodadura, la interacción entre neumático y calzada no puede ser objeto de una completa reglamentación, dentro del marco de una legislación sobre los vehículos, en razón de las diferencias sustanciales que existen en la calidad de las superficies de rodadura.

En lo que concierne a la legislación aplicable al control del ruido de la carretera, los países más avanzados en este terreno, distinguen siempre dos problemas distintos asociados a:

- infraestructuras existentes;
- infraestructuras nuevas.

Para las carreteras existentes es necesario, ante todo, delimitar la extensión del problema. Las acciones a tomar quedan determinadas en relación con dos diferentes categorías de límite del ruido, a saber: durante el día y durante la noche. Los niveles máximos aceptables son más altos para las carreteras existentes que para las nuevas infraestructuras. En casi todos los países, los límites están asociados a las actividades humanas, dado que el concepto que se baraja es que varias carreteras y sus zonas de impacto constituyen una entidad territorial y por tanto, se requiere la definición de límites específicos para la zona.

Una nueva infraestructura puede mejorar la zona adyacente dando una cierta fluidez al tráfico de las carreteras existentes. No hay ninguna duda, de que al menos en ciertas carreteras el impacto acústico se debe esencialmente, a las condiciones de congestión del tráfico. Así, la construcción de nuevas carreteras puede aportar ventajas desde el punto de vista ambiental, gracias

a un mejor reparto de los flujos de tráfico sobre la red y al nivel de utilización de los diferentes sistemas de transporte. Si esto se cumple, el problema del ruido debe ser descrito y cuantificado de manera adecuada, en particular cuando las evaluaciones de impacto ambiental son exigidas para carreteras nuevas. Desde este punto de vista es importante evitar indemnizaciones injustificadas; las ventajas (reducción), obtenidas en la red existente, no deberían ser utilizadas para justificar la aceptación de un impacto más elevado por una nueva ordenación, si la única razón argumentada es que los receptores afectados son de diferente naturaleza. En todos estos casos es necesario evaluar igualmente la alternativa cero.

Con respecto a las estrategias a largo plazo, hay que resaltar lo importante que es adoptar medidas preventivas por medio de una planificación urbana eficaz, organización y gestión del tráfico, así como por medio de un control de los sistemas de transporte.

Existe una gran diversidad de acercamientos legales al problema del ruido:

- Algunos países han identificado una metodología correctora y/o procedimientos ex-post apropiados para “corregir” el nivel acústico de la zona próxima a la infraestructura. Esto significa que si el procedimiento establecido ha sido respetado, los resultados obtenidos en términos de protección al ruido han sido automáticamente aceptados (“acercamiento analítico”).
- Otros países, sin embargo, exigen una evaluación numérica de los resultados obtenidos gracias a la utilización de procedimientos aceptados o facultativos (“acercamiento experimental”).

Obviamente, el segundo acercamiento es más complejo. En efecto, para obtener la precisión deseada de las medidas del ruido, es necesario realizar las evaluaciones en el lugar, tarea que resulta difícil, implica incertidumbres y es costosa.

Desde el punto de vista económico existen dos fuentes principales de financiación de la reducción del ruido:

- impuesto sobre los carburantes, lo que produce un ingreso regular;
- recursos especialmente destinados a ello, por las Administraciones.

Estos recursos se aplican únicamente a las carreteras existentes. Los gastos unidos a la reducción del ruido en las nuevas carreteras son internalizados en los costes de construcción y por tanto son soportados por las Administraciones de Carreteras. Las dos fuentes de financiación mencionadas anteriormente pueden aplicarse para mejorar el nivel del ruido a:

- acciones centralizadas para una mejora escalonada sobre la base de programas a largo plazo;
- actuaciones específicas sobre las zonas más contaminadas.

Para concluir, es difícil definir normas internacionales para la reducción del ruido, dado que tanto los valores culturales como los políticos varían de un país a otro.

Se han conseguido progresos importantes en la reducción de la generación del ruido en la fuente. Diferentes acciones se han adoptado tanto en los vehículos como en elementos de la carretera, por ejemplo:

- *Los pavimentos* han alcanzado, hoy día, niveles de calidad que eran impensables sólo hace algunos años;
- *Las pantallas* reflectantes y absorbentes son cada vez más eficaces;
- *Las acciones combinadas* de estos dos tipos de medidas, han sido muy eficientes desde el punto de vista de la reducción del ruido.

Desgraciadamente las tecnologías utilizadas son costosas. Es necesario un mantenimiento continuo sin el cual su eficacia quedaría reducida. Esto adquiere una gran importancia en el caso de los pavimentos.

En lo que respecta a las carreteras el camino a seguir queda trazado claramente para alcanzar un control preciso de la contaminación producida por el ruido. Las directrices quedan definidas en el capítulo 8.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En primer lugar, se define el fenómeno “ruido”. En el estudio figura una definición mínima de términos científicos que sirven de base para la comprensión del fenómeno a controlar.

A continuación se presenta una descripción detallada de las diferentes obligaciones, reales y legales, existentes en los países de la OCDE, con diferentes criterios de evaluación relativos, tanto al ruido, como a los costes sociales que del fenómeno se derivan. Sobre una base mayoritaria se proponen límites aceptables para el ruido producido en las infraestructuras, existentes y nuevas, durante el día y la noche. Como en otros factores, que afectan al medio ambiente, es preferible obtener una reducción global del ruido sobre el conjunto del territorio afectado, antes que evaluar de manera precisa si los valores límites recomendados han sido, o no, alcanzados.

El documento presenta la manera en que el ruido es medido en los distintos países, y examina los futuros desarrollos potenciales sobre la materia. Métodos de medida y modelos de previsión son herramientas indispensables para el diseño de las estructuras anti-ruido y para la evaluación de los resultados obtenidos.

El estudio prevé posibles acciones y medidas técnicas eficaces que pueden ser tomadas para reducir el ruido:

- en la fuente,
- en su propagación.

En primer lugar se discuten las medidas que podrían ser tomadas para reducir la difusión del ruido en la infraestructura. Otras medidas que no afec-

tan directamente a la infraestructura —planificación urbana, etc.— son también estudiadas.

Pavimentos poco ruidosos y pantallas acústicas son tratadas de manera especial, dado que representan las medidas anti-ruido más corrientes utilizadas en las infraestructuras. Estas son medidas que pueden ser fácilmente integradas en las carreteras o adoptadas modificando ciertas características de estas. En el documento, se estudian en primer lugar por separado, examinando a continuación el efecto combinado de su utilización. Los aspectos económicos de estos medios suplementarios de protección son igualmente evaluados.

La última parte del documento presenta conclusiones y recomendaciones del Grupo de Expertos. En este contexto se comparan las medidas que en materia de lucha contra el ruido han sido adoptadas en los países Miembros, así como, el procedimiento global para obtener mejoras en la materia que nos ocupa, que queda presentada en una forma resumida. Las nuevas carreteras son tratadas por separado. Las recomendaciones finales se refieren a las reglas a adoptar haciendo hincapié en los límites del ruido, las medidas unidas a la planificación urbana y al diseño de las carreteras.

La formación profesional y la educación universitaria sobre el tema de la reducción del ruido deben ser incrementadas.

El documento termina con un inventario tanto de programas de investigación en curso como de aquellos que deberían ponerse en marcha.

NECESIDAD DE COOPERACION INTERNACIONAL

Existe una gran variedad de puntos de vista para reducir el ruido de la carretera. Los aspectos metodológicos y legislativos desempeñan un papel importante. Existen soluciones técnicas específicas con el necesario Know-How. La cooperación futura en este terreno podría contribuir a establecer las medidas prácticas y económicas más aconsejables. Tales indicaciones presentarían un beneficio inmediato para los países menos avanzados y podrían igualmente constituir una ayuda no despreciable para otras naciones.

1. INTRODUCCION

1.1. MOTIVO Y FINALIDAD DEL ESTUDIO

El ruido producido por la circulación es la molestia más frecuentemente citada por las personas que viven cerca de las carreteras. El ruido de la carretera, es cada vez más elevado en los países Miembros de la OCDE, debido al crecimiento continuo del transporte por carretera. Principalmente el transporte nocturno, que es una de las principales causas de molestia, como lo demuestran las frecuentes denuncias de las personas: recientemente, en Suiza, un referendum popular ha dado lugar a la prohibición durante diez años a partir de 1994 de la circulación de camiones por las carreteras principales en el período nocturno.

La tabla siguiente indica la evolución del número de personas expuestas a diferentes niveles del ruido:

Cuadro 1.1. Población francesa expuesta al ruido causado por la carretera				
Leq 8h-20 h (en fachada exterior)	1985		2010 (estimación)	
	%	Millones habitantes	%	Millones habitantes
< 55 dB(A)	46,4	17,0	49,5	18,8
55-65 dB(A)	37,2	13,7	40,2	15,2
>65 dB(A)	16,4	6,1	10,3	3,9

Está claro que el ruido no es la única molestia del tráfico vial. Un profundo estudio sobre el impacto producido por la carretera ha sido el tema de un reciente informe realizado por el Programa de Investigación en Transporte por Carretera de la OCDE titulado «La Evaluación del Impacto de las Carreteras sobre el Medio Ambiente» (1994).

La adopción de la normativa sobre la mejora de la calidad acústica exigible a los motores de los vehículos tiene una repercusión lenta en la reducción de los niveles del ruido. Las leyes que afectan a la movilidad y a la velocidad tienen consecuencias negativas en el plano económico y son difíciles de hacer respetar. Por lo tanto, es necesario poner en marcha, a corto plazo, una serie de técnicas que permitan reducir el ruido, tanto para las carreteras nuevas como para las carreteras existentes que representan el origen de los principales problemas a resolver.

La gente que vive en la proximidad de las carreteras percibe cada vez más los problemas asociados al ruido. Sin embargo, hoy día, pocas personas de los países de la OCDE están dispuestas a aportar sus propios recursos económicos para combatir esta molestia, generalmente considerada como un problema que debe ser resuelto «por los otros»: fabricantes de coches, propietarios o gestores de carreteras, el Estado. Esta percepción varía de un país a otro, dada la gran diversidad de reglamentos, límites y sistemas de financiación, como el descrito en el capítulo 2 de este documento.

La importancia dada a este problema varía individual y colectivamente, es interesante estudiar los diferentes puntos de vista sobre las limitaciones y niveles del ruido:

- Algunos países tienen límites muy severos, basados en criterios médicos y consideran que el conjunto de un territorio debe ser tratado, utilizando los mismos criterios que los adoptados para el interior de las viviendas, y que una exposición prolongada al ruido del tráfico produce efectos patológicos graves.
- Otros países, más pragmáticos, regulan de una manera razonable, la energía sonora global que afecta a las zonas que deben ser protegidas en un intervalo de tiempo dado.

Hay que resaltar que reglamentos demasiado severos no siempre conducen a medidas de protección eficaces ya que puede darse el caso de que sea técnicamente imposible alcanzar los niveles exigidos; mientras que otros reglamentos, que pueden parecer más permisivos, pueden conducir a la realización de amplios programas de reducción del ruido en las proximidades de las carreteras. Todo esto justifica, ampliamente, la cooperación internacional que se da en este estudio, y que, después de haber analizado las prácticas habituales y las investigaciones realizadas en diferentes países, da suficientes elementos de elección, tanto para llevar a cabo correctos métodos de medida y previsión de niveles sonoros, como para adoptar límites que pueden ser aceptados técnicamente. Muchos de los niveles de ruido propuestos o impuestos por algunos países, no pueden ser alcanzados en la práctica, aunque se realicen grandes inversiones económicas.

Indicando criterios de medidas del ruido —unidades, duración y lugar— es posible comprender la evaluación del problema que significa el ruido, incluso para los no especializados en el tema. Se puede entonces proponer métodos del control del ruido (con sus costes relativos), tanto para la adopción de medidas específicas —tales como pavimentos silenciosos, y pantallas acústicas— como para adopción de acciones más extensas sobre la infraestructura en su conjunto.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO

La principal tarea del grupo de expertos, ha sido la de seleccionar las informaciones que influyen principalmente sobre las técnicas que impiden la

difusión del ruido, como las pantallas anti-ruido, las unidas a la emisión y a la difusión del ruido, como los pavimentos, así como la combinación de los dos tipos. El grupo de expertos ha introducido estos grandes dos temas dentro de un contexto mucho más amplio que clarifica el complejo fenómeno del ruido de la carretera, incluyendo su evaluación y reducción. Las palabras clave de la DIRR son: ruido; pavimentos silenciosos; pavimento; barreras anti-ruido; medida del ruido; límites del ruido; modelos matemáticos del ruido.

Se ha demostrado que la reducción del ruido a lo largo de las carreteras no queda exclusivamente unida a medios técnicos especializados, como los pavimentos silenciosos o las pantallas acústicas ya sean reflectantes o absorbentes, sino que está igualmente unida a una serie de acciones que pueden quedar reagrupadas de la siguiente forma:

- criterios para la regulación de las emisiones acústicas;
- medidas sobre vehículos y tráfico;
- medidas sobre componentes de la infraestructura, excluyendo el pavimento y las pantallas;
- medidas sobre los edificios y zonas colindantes.

Después de haber revisado las reglamentaciones y los límites vigentes en los diferentes países de la OCDE (capítulo 2), en el capítulo 3 se facilitan criterios que permiten evaluar el ruido tanto en términos de previsión (para los ruidos que no existen todavía) como en términos de medida. A continuación el documento describe las acciones citadas en el párrafo anterior (capítulo 4) incidiendo sobre las posibles sinergias potenciales.

El exámen de los métodos utilizados para predecir y medir el ruido constituye uno de los aspectos más complicados para los no especialistas: un análisis de los datos obtenidos, junto con la bibliografía disponible, facilita criterios útiles para la futura comprensión del problema en función de las opciones elegidas. En resumen como muestran los capítulos 2 y 3 existen 3 puntos de vista diferentes para abordar el problema de reducción del ruido:

- Algunos países (Holanda, EE.UU., Noruega) controlan la reducción del ruido por medio de reglamentos que evalúan el ruido con modelos matemáticos de predicción, y, aplicando tratamientos selectivos, sin que, generalmente, se realicen medidas dado que éstas son extremadamente variables y sus resultados dependen de las condiciones y del contexto en el momento de la medida.
- Otros países (Alemania, España, Francia, Italia), por el contrario, tienen un punto de vista más numérico basado en la realización de medidas, aunque también utilizan modelos de previsión.
- Existen también países que adoptan soluciones intermedias.

Todos los sistemas son igualmente válidos, sin embargo los mejores resultados se alcanzan combinando los métodos. El sonido no es una entidad que se pueda medir en absoluto, es necesario especificar el lugar de la medida así

como las condiciones locales. Los datos sobre los criterios a adoptar quedan fijados en el capítulo 3 que discute con detalle los métodos de medida y compara sus objetivos y eficacia.

Como se ha mencionado anteriormente, el capítulo 4 informa sobre las técnicas no especializadas que permiten reducir el ruido. Este capítulo es el más importante para el diseño de nuevas infraestructuras, dado que constituye la base para la adopción de las medidas más racionales de reducción del ruido.

Diferentes efectos se producen según sea el diseño de la carretera (túneles, desmontes, terraplenes y viaductos), y en su concepción no hay que olvidar el medio por el que la infraestructura discurre, teniendo en cuenta la vegetación.

Conviene igualmente, no olvidar las medidas de protección aplicadas sobre los edificios adyacentes, en particular en el caso en que el coste de la adopción de medidas de protección a lo largo de la carretera sea más elevado que el originado por las instalaciones que permitan controlar las capacidades de recepción sónica del edificio.

Los capítulos 4 y 5 contemplan los tipos de medidas especializadas:

- calzadas silenciosas;
- pantallas acústicas construidas con diferentes materiales y diseños.

La utilización de pavimentos silenciosos, se ha extendido gracias a los pavimentos bituminosos drenantes y a las capas de rodadura finas y de baja emisión acústica. Sin embargo quedan numerosas cuestiones sobre estos pavimentos que necesitan ser discutidas:

- distinción entre carreteras urbanas e inter-urbanas;
- clasificación desde el punto de vista acústico de los diferentes materiales;
- problemas asociados a la medida de su eficacia;
- sistemas de mantenimiento y materiales utilizados (durabilidad de las reducciones acústicas).

Por lo que respecta a las pantallas, la información de que se dispone es todavía más exhaustiva y el estudio propone criterios de clasificación unidos:

- a los materiales;
- a la eficacia acústica (aislamiento/absorción del sonido);
- a los sistemas de construcción;
- al impacto visual.

El capítulo 7 está dedicado a la evaluación de las diferentes soluciones combinando unas con otras. Basándose en las informaciones recogidas, se dan las oportunas directrices para optimizar las soluciones concretas a los diferentes problemas planteados, es decir, se tiende a compatibilizar distintas soluciones, evitando las duplicaciones de esfuerzos y costes. Este capítulo trata

igualmente de los costes basándose en los datos proporcionados por los capítulos precedentes. Se puede de esta manera construir una carretera «poco ruidosa» integrando los diferentes medios técnicos disponibles, pero cada caso debe ser estudiado cuidadosamente dado que no siempre es posible sumar todos los efectos correctores.

La discusión sobre la investigación (incluida en el capítulo 8) está dirigida a poner al día los aspectos comunes de los distintos tipos de medidas de reducción del ruido y a facilitar informaciones útiles para una mayor utilización de los tratamientos potenciales. Las investigaciones en marcha están unidas a los diferentes puntos de vista que se le ha dado al control del fenómeno ruido:

- Algunos países (generalmente los nórdicos) dan prioridad al aspecto sociológico del ruido y sus investigaciones van dirigidas hacia los efectos que se producen sobre la población en diferentes situaciones.
- Otros países buscan soluciones unidas al aspecto físico del problema y lo estudian en términos numéricos como son el medir, controlar y evaluar el ruido.

Las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del documento son expresadas, así mismo en el capítulo 8.

GLOSARIO

El dB(A) una unidad de medida

Mientras que el nivel de un sonido que se presume constante es correctamente expresado en decibelios (dB), es necesario señalar que las legislaciones en vigor, en diferentes países, utilizan diferentes tipos de decibelios en función del ruido considerado. El ruido producido por el desplazamiento de los vehículos en la carretera se mide en «decibelio A»; la «A» significa que el nivel de ruido es recogido por un micrófono que lo filtra y ajusta de la misma manera que el oído humano filtra y ajusta el sonido que recibe. Es importante anotar que esta elección está totalmente justificada para las medias y altas frecuencias. En algunas ocasiones el lector podrá encontrar expresiones de niveles acústicos de la forma dB(C), esto se refiere a otro tipo de filtro.

Suma de decibelios

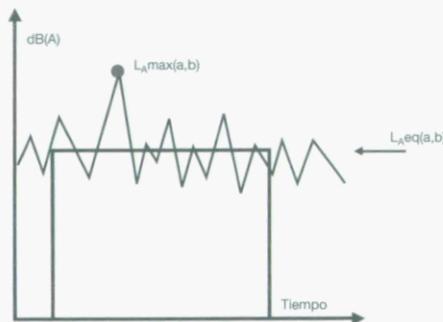
La medida de las unidades del sonido son más complejas que por ejemplo las unidades de medida lineal, mientras que se pueden sumar directamente dos longitudes, no es posible realizar la misma operación con dos niveles sonoros, dado que la escala de decibelios es logarítmica y no lineal. La suma de dos sonidos del mismo origen y nivel produce un nivel total superior en 3 dB(A) a uno de ellos: 70 dB(A) más 70 dB(A) es igual a 73 dB(A). Si uno de los niveles es inferior a otro en más de 10 dB(A) en su suma su influencia será despreciable: 70 dB(A) más 60 dB(A) es igual a 70 dB(A).

Un índice para caracterizar el sonido L_{eq} y L_{Aeq}

Los sonidos generados por el flujo de los vehículos son fluctuantes: por tanto es necesario poderlos caracterizar de una manera simple para poder predecir el nivel de molestias asociado. El indicador utilizado es el L_{eq} . Corresponde a un nivel, estimado constante, de la presión acústica para la que la cantidad de energía acústica emitida, durante un período fijo de tiempo sería la misma que la de un ruido real y fluctuante. Existe L_{eq} para un minuto, una hora, un día, etc. Normalmente y dado que se utiliza el filtro de ponderación «A» se escribe L_{Aeq} . El número entre paréntesis que sigue al L_{Aeq} indica el período durante el cual el nivel de sonido equivalente ha sido medido. Otras unidades unidas al sonido pueden ser:

- L_{max} que indica el nivel de ruido máximo producido durante un período de tiempo.
- L_{10} nivel de ruido sobrepasado durante el 10% del tiempo considerado.
- L_{90} nivel de ruido sobrepasado durante el 90% del tiempo considerado.

Figura 1.1



Cuadro 1.2. Ejemplos de niveles de ruido en dB(A)

Presión acústica	Nivel de presión sonora db(A)	Sensación acústica	Ejemplos
$< 2 \cdot 10^{-5}$	<0	No audible	Cámara anecoica
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Umbral de audibilidad	Test de audiometría
$6,3 \cdot 10^{-5}$	10	Muy silenciosa	Estudio de grabación
$2 \cdot 10^{-4}$	20		Grutas
$6,3 \cdot 10^{-4}$	30	Silenciosa	Dormitorio
$2 \cdot 10^{-3}$	40		Oficina tranquila
$6,3 \cdot 10^{-3}$	50	Moderada	Oficina
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Molesta (para un trabajo intelectual)	Conversación a 1 metro
$6,3 \cdot 10^{-2}$	70	Moderadamente desagradable	Calle peatonal-taller de confección
$2 \cdot 10^{-1}$	80	Desagradable	Estación de tren
$6,3 \cdot 10^{-1}$	90	Umbral de peligro si se soporta más de 8 horas al día	Taller con maquinaria
2	100	Muy fuerte	Maquinaria de laminado
6 · 3	110	Los gritos no son audibles	
20	120	“Sordera”	
63	130	Umbral de dolor	Avión despegando

El ruido del tráfico medido en $L_{Aeq}(24h)$, en medio urbano, está comprendido en 55 y 75 dB(A). el ruido nocturno en campo abierto, sin ruido de animales, medido en $L_{Aeq}(8h)$ es del orden de 35-40 dB(A).

2. PRACTICAS ACTUALES Y LIMITES DEL RUIDO

2.1. INTRODUCCION

Este capítulo examina las políticas actualmente seguidas en los países de la OCDE para el control del ruido de la circulación, esencialmente bajos sus aspectos normativos. El conjunto de la información ha sido interpretado a partir de criterios homogéneos encaminados a obtener orientaciones comunes que sirven de base para las futuras recomendaciones de la OCDE.

Se han resaltado los siguientes puntos:

- Parámetros utilizados para describir la exposición de la población al ruido de la circulación y fijar los límites admisibles (sección 2.2).
- Criterios generales sobre los que se fundamentan las normas (sección 2.3).
- Gestión económica y financiera de la política anti-ruido (sección 2.4).

2.2. PARAMETROS UTILIZADOS PARA DESCRIBIR LA EXPOSICION DE LA POBLACION AL RUIDO DE LA CIRCULACION Y FIJAR LOS LIMITES ADMISIBLES

Del análisis realizado para la elaboración de este documento y de las conclusiones de otros informes OCDE (1), se desprende que el ruido producido por la circulación rodada es considerado por la población como un problema ambiental importante. Desde un punto de vista general, los estudios más recientes no indican que se haya producido ninguna mejora a la situación existente hace diez o quince años. En cuanto a los niveles medidos y considerando los aspectos subjetivos o sociales, el problema se vuelve más complejo: por ejemplo, las últimas investigaciones del INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) (2) indican que en Francia el porcentaje de la población que se considera seriamente molestada por el ruido de circulación ha pasado del 25% en 1976 al 31% en 1986. Un estudio italiano (3) indica que en 1992 el 22% de la población consideraba el ruido del tráfico como un problema a resolver con carácter de urgencia, mientras que en 1986 este porcentaje no era más que el 10,6%. Por otro lado en Holanda los datos más recientes muestran una sensible mejora a lo largo de las autopistas, mientras que para las carreteras urbanas la situación ha variado muy poco como muestra el cuadro 2.1. Las cifras del cuadro 2.1 tienen en cuenta las acciones adoptadas para disminuir el ruido (pantallas, aislamiento de fachadas, pavimentos silenciosos) así como el aumento del tráfico. Una tendencia similar se ha observado en Dinamarca.

Cuadro 2.1. Evolución del número de personas molestas por el ruido de la carretera en Holanda

	Personas molestas (%)		Personas muy molestas (%)	
	1988	1993	1988	1993
Autopistas	59	47	21	12
Carreteras urbanas	46	48	12	10

Se desprende claramente, en todo caso, de todas las investigaciones y estudios realizados hasta el presente, que el ruido de la circulación, con sus niveles habituales de emisión, no representa ningún riesgo inmediato para la pérdida de audición. Sin embargo se ha demostrado que provoca importantes molestias no auditivas que pueden ser reagrupadas como siguen (4):

- Perturbación de actividades: en primer lugar las que conciernen a la comunicación; en segundo lugar, las que implican trabajo y concentración; en tercer lugar, las concernientes al descanso;
- Molestia general que puede, a veces, producir problemas psicossomáticos, como el stress o incluso desembocar en desórdenes psiquiátricos cuando el individuo es particularmente sensible al ruido.

Todas las políticas del control del ruido hacen referencia a estos efectos y, desde un punto de vista general, se puede decir, que la perturbación de las actividades queda controlada por medio del establecimiento de límites en el interior de los edificios mientras que las molestias son controladas por medio de límites en el exterior (fachadas).

Figura 2.1. Molestias debidas al ruido producido por la circulación en Francia.

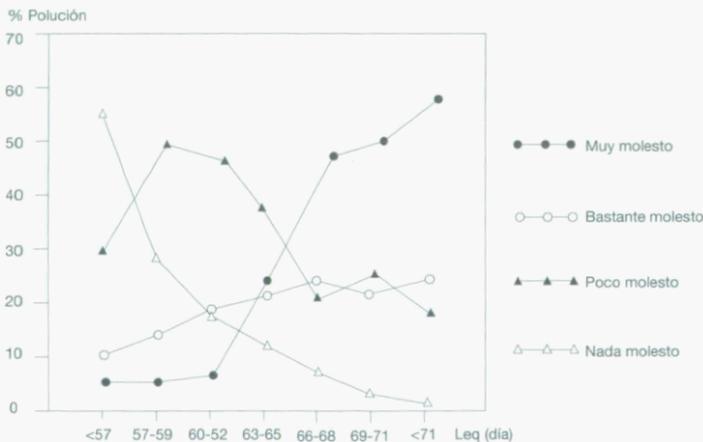
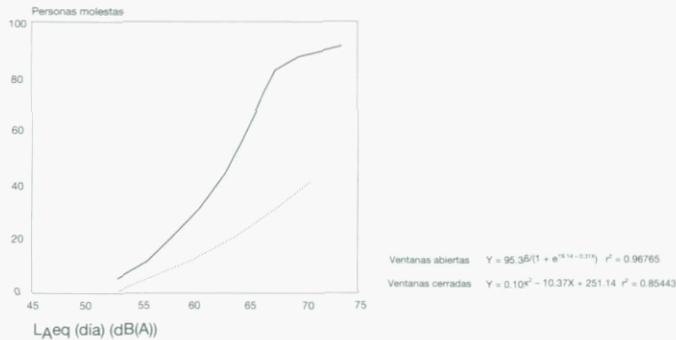


Figura 2.2. Molestias debidas al ruido producido por la circulación en Módena (Italia).



Debe quedar clara la importancia que representa la elección de los parámetros empleados para describir la perturbación y la molestia. En efecto, en primer lugar, si los parámetros elegidos son verdaderamente representativos de la susceptibilidad humana, todas las acciones anti-ruido serán percibidas positivamente y apoyadas por la población; en segundo lugar, será posible fijar límites de exposición del ruido sopesando los aspectos económicos y técnicos junto al umbral de molestia previamente examinado y fijado. (Este último punto será de nuevo tratado en la sección 2.3 donde se abordan los aspectos económicos y financieros).

El examen de la situación de los diferentes países de la OCDE permite extraer las conclusiones siguientes:

- El filtro “A” corresponde a la curva de ponderación más frecuentemente utilizada para la evaluación de los ruidos ambientales. Las características de la ponderación “A” se corresponden con la sensibilidad del oído humano, es decir, a la atenuación de las frecuencias superiores a 8 KHz e inferiores a 200 Hz.
- El nivel acústico continuo equivalente, el Leq es el indicador más frecuentemente utilizado para descubrir “la perturbación”: todos los países que tienen en cuenta límites interiores (en el interior de las habitaciones) hacen referencia a valores expresados en Leq. El nivel acústico continuo equivalente se define como el nivel de ruido constante (hipotético) que se habría producido durante la duración de la medida, con la misma energía que el ruido real intermitente o variable en el tiempo. En Leq siempre tiene que hacer referencia al tiempo de medida.
- En lo que a la molestia respecta, como se ha indicado precedentemente, se hace referencia a los niveles exteriores en fachada. En este caso, la situación exterior no es tan homogénea como en el caso de la perturbación interior. Numerosos países utilizan el Leq, sin embargo otros muchos utilizan el L10, el Lmax o el L50 (Inglaterra, Australia, Nueva Zelanda, EE.UU. y Noruega). Los niveles estadísticos (L10, L50) son definidos como

el nivel acústico en dB(A) sobrepasado durante el 10 y el 50 por ciento, respectivamente del período de medida considerado.

- En general no se compara el ruido de la circulación más que con valores umbrales; Italia y Australia constituyen una excepción y aplican un “criterio diferencial”, es decir se compara el ruido real de la circulación con el ruido ambiental (ruido de fondo).
- Se observan importantes discrepancias en lo referente a los períodos de medida: alrededor de 60 por ciento de los países toman dos valores uno de día y otro de noche con una diferencia constante entre los valores de día y de noche de 10 dB(A). Otros utilizan un valor único. Hay que resaltar que en razón de los usos característicos de la carretera, la adopción de límites separados conduce, frecuentemente, a una imposición redundante o a situaciones anómalas.

Este punto particular será el objeto de investigaciones psico-acústicas complementarias con el fin de obtener una mejor comprensión de los fenómenos implicados (ver capítulo 8).

Para concluir este apartado se puede recordar la conclusión de un estudio recientemente realizado por el INRETS para la Comisión de las Comunidades Europeas (5): “proponemos utilizar el Leq para describir el ruido aplicando una ponderación complementaria en ciertas situaciones específicas en función de las fuentes y de la naturaleza del ruido”. Este concepto ha dado lugar a un nuevo estudio, realizado en Italia, que evalúa la utilización de la escala de ponderación “C” para el ruido de la carretera, cuyo tráfico tenga un porcentaje alto de vehículos pesados o en situaciones en que de forma continua se produzcan frenazos seguidos de aceleraciones.

2.3. CRITERIOS GENERALES SOBRE LOS CUALES SE BASAN LAS NORMAS

Los países de la OCDE parecen haber adoptado dos políticas diferentes para la atenuación del ruido de la circulación: una que denominaremos “voluntarista” y otra que llamaremos “planificadora” basada en actuaciones a largo plazo realizadas bajo un control centralizado.

La primera consiste en la descentralización de las actividades, esporádicas intervenciones en las situaciones más críticas (identificadas a partir de quejas individuales), campañas de información al público destinadas a promover su correcto comportamiento, incentivos para que los fabricantes de automóviles los hagan más silenciosos, incentivos y control del mercado automovilístico (ayudas económicas y mayor libertad para la utilización de vehículos silenciosos). Países como Australia, Francia (“Ciudad-Piloto” y “eliminación de puntos negros”), Italia (programas realizados entre 1989-1992 por el Ministerio de Medio Ambiente), Alemania, España y Estados Unidos pertenecen a esta categoría.

El segundo punto de vista se caracteriza por la realización de planes a largo plazo dirigidos a que la exposición, en general, al ruido, en el interior de los

edificios, quede por debajo de los límites autorizados preestablecidos: estos programas son generalmente dirigidos por un organismo central que se ocupa tanto de la medida a adoptar en las carreteras como en los edificios (pantallas acústicas y ventanas). Países como Austria, Dinamarca, Finlandia, Holanda, Noruega y Suiza pertenecen a esta categoría, ejemplos de esta política son el Danish Action Plan on Transport for the Environment and Development (100.000 casas expuestas a menos de 65 dB(A), de aquí al año 2010), la declaración del Parlamento Austriaco (65 dB(A) durante el día 55 dB(A) durante la noche para todas las carreteras federales antes del año 2003), el segundo Plan estructural holandés para el tráfico y transporte (en el año 2010, el número de casas con más de 55 dB(A) medidos durante veinticuatro horas, en fachada, será solamente la mitad de las que existían en 1986) y la Ordenanza Federal Suiza de 1986 (cumplimiento de límites legales en 2002).

Es muy difícil demostrar con argumentos de peso cuál es el método más eficaz: se puede observar como la política “voluntarista” puede a menudo conducir a un status de actuaciones “in situ”, mientras que el punto de vista “planificador” obliga a la realización de acciones importantes cuyo coste económico es muy elevado. Cuando se adoptan las políticas “planificadoras” para realizar las actuaciones necesarias, los recursos económicos son habitualmente obtenidos por medio de impuestos aplicados a los carburantes (Suiza y Holanda), de tal forma que se dispone de unos ingresos que son más o menos proporcionales a los niveles de ruido de la circulación. Por el contrario la política “voluntarista” se fundamenta en los recursos económicos del Estado, que pueden variar de un año a otro en función de consideraciones económicas o políticas. Parece que tanto las reglamentaciones y las políticas anti-ruido son más respetadas e implementadas cuando una partida económica específica se destina a la reducción del ruido y los procedimientos para la obtención de los recursos financieros necesarios, han sido previamente establecidos.

Examinando la situación en los diferentes países de la OCDE, se puede decir que los límites quedan siempre diversificados en función de la tipología del uso del suelo o de las actividades humanas: las categorías van desde un mínimo de tres (Alemania, para carreteras y edificios existentes) a un máximo de dieciocho (Italia, para los diferentes tipos de carreteras con los edificios existentes). Un punto importante es que algunas normas (Italia, Japón y, en cierta medida, Holanda), dan a la carretera y a una banda estrecha del territorio que la rodea una categoría específica a la que se le asigna unos límites específicos; en este caso las carreteras quedan clasificadas en función del número de carriles, o de su tráfico.

En el caso de Italia “la zona influenciada por la carretera” tiene una anchura fija. En el modelo japonés “la zona” queda identificada por los edificios que “dan” a la carretera mientras que según las normas holandesas la anchura varía en función del número de carriles y del uso del suelo (zonas rurales o urbanas).

Un punto de vista interesante y original se utiliza en Australia, más concretamente en Nuevo Gales del Sur y en Queensland, donde, para las nuevas

carreteras, el ruido ambiental existente en la zona es el límite establecido y no puede ser superado.

No existe una diferencia explícita entre autopistas, autovías, carreteras nacionales, carreteras locales, vías urbanas, (ciudades pequeñas, medianas, grandes), anillos de circunvalación, etc; sería necesario tener en cuenta este punto en un futuro y considerar las diferencias sustanciales que existen entre los diferentes tipos de carreteras mencionados. Las medidas correctoras aplicables son igualmente diferentes según el lugar donde se apliquen: en zona urbana muy edificada por ejemplo, no se pueden utilizar pantallas o diques de tierra pero es fácil actuar sobre la circulación; la situación se invierte completamente en el caso de autopistas y autovías.

Casi todas las normas distinguen entre carreteras y edificios existentes o no (criterio de prioridad), asignando un valor umbral adecuado a cada una de las diversas combinaciones posibles; los límites son bastante diferentes variando desde un mínimo de 5 dB(A) a un máximo de 15 dB(A). Para las carreteras y edificios nuevos a las normas se les da generalmente el carácter de obligatorias, mientras que para las carreteras y edificios existentes éstas son sólo indicativas (la actuación no es obligatoria, se pueden obtener excepciones, los límites son considerados como valores tendenciosos, etc...).

Para decidir si una actuación debe realizarse, se procede comparando el límite admisible con el “nivel de ruido existente”. Métodos prácticos (medidas) y analíticos (cálculos) pueden ser utilizados para evaluar este nivel de ruido existente. Los dos métodos presentan las ventajas e inconvenientes que quedan resumidos en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Comparación de los procedimientos prácticos y analíticos		
	Procedimiento práctico	Procedimiento analítico
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ● Buena estimación de las condiciones reales existentes. ● Resultados objetivos. ● Comprobación final de los resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Fácil normalización. ● Costes razonables. ● Facilidad de utilización.
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> ● Costes elevados. ● Tiempo empleado. ● Necesidad de personal experto. ● Influencia de los parámetros atmosféricos. ● Aplicables solo en lugares ya existentes 	<ul style="list-style-type: none"> ● Estimación de una situación ideas. ● Incertidumbre en la precisión.

Aunque de una forma no muy explícita, es posible alcanzar un consenso común para fijar los límites admisibles. En primer lugar, parece que prácticamente todos los países han realizado investigaciones psico y socioacústicas

con el fin de correlacionar, lo mejor posible, las perturbaciones y molestias con los parámetros medidos. Basándose en lo anterior los límites han sido fijados en función de los criterios siguientes:

Para los valores de noche se ha elegido un nivel de ruido interior comprendido entre 35 y 40 dB(A) que no perturba el sueño. Este valor ha sido mantenido de tal forma que en ciertos casos ha sido “traspasado” hacia fuera del edificio, obteniendo un valor límite exterior que considera el aislamiento producido por las ventanas cerradas.

Para los valores de día se ha buscado el valor que se corresponde con un porcentaje comprendido entre el 10-25% de personas muy molestas por el ruido. Este valor es el que se estima debe ser el nivel continuo equivalente en dB(A) medido en fachadas (ver figuras 2.1 y 2.2 sobre los estudios realizados en Francia e Italia). Este nivel ha sido considerado como valor “base” a aplicar a zonas de calidad media y, además, se dan otros dos valores para zonas de peor o mejor calidad. Posteriormente, el concepto de prioridad ha sido aplicado para clasificar las situaciones de carreteras y edificios existentes (ver cuadro 2.6).

2.4. ASPECTOS ECONOMICOS Y FINANCIEROS

Los aspectos económicos y financieros tienen una gran importancia en la medida en que pueden ser determinantes en el resultado final de las políticas anti-ruido. Es evidente que una reducción correcta del ruido tiene que tener en consideración un análisis de rentabilidad. Cuando se habla de costes se puede contemplar dos tipologías específicas:

- costes de prevención e intervención para llevar el nivel de contaminación sonora a los límites aceptables;
- coste social pagado por la población, unido a una política de la no-intervención por parte de las autoridades.

Estas dos cuestiones se analizan en los apartados siguientes, comenzando por el análisis de los costes asociados y las acciones encaminadas a la reducción del ruido producido por la circulación.

Cuando se implantan leyes sobre el control y reducción de la contaminación sonora producida por el ruido de circulación rodada, es importante examinar preliminarmente las implicaciones económicas que se puedan derivar de su aplicación, examinando previamente todas las soluciones que son técnicamente viables.

Considerando que la OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda un límite de ruido de 65 dB(A) en el día y que los niveles medidos en las zonas ruidosas son de orden de 70-75 dB(A), se observa que el nivel de ruido es superior en 5-10 dB(A) al nivel aconsejado, para obtener la reducción del ruido que se desea, es necesario, que se intervenga sobre:

- *Las fuentes*, gracias a vehículos nuevos más silenciosos o mejorando los vehículos existentes.

- *Las infraestructuras*, gracias a la instalación de pantallas acústicas, pavimentos silenciosos, túneles, etc.
- *Los edificios*, mejorando la estanqueidad de las fachadas, tejados y especialmente ventanas.

2.4.1. Acciones sobre los vehículos

En lo que concierne a los vehículos (coches particulares, autobuses y camiones) es posible referirse a los resultados de un estudio específico realizado en 1983 por la Comisión de las Comunidades Europeas (8) (9). En él aparece que el coste suplementario necesario para reducir de 5 a 10 dB(A) la emisión del ruido para homologación de vehículos es el siguiente orden:

- del 2 al 5 por ciento de su coste para vehículos ligeros;
- del 5 al 9 por ciento de su coste para vehículos pesados.

Si estos datos se aplican al parque de vehículos rodados en los países de la OCDE (año 1991: 353 millones de vehículos ligeros y 93 millones de vehículos pesados con un precio medio de venta de 15.000 y 50.000 US dólares respectivamente y considerando que la renovación completa del parque de vehículos se efectúa cada decena de años, llegamos a obtener un coste de 51 millares de dólares por año. Esta estimación, aunque grosera, nos es muy útil para estudiar este problema.

2.4.2. Acciones sobre las carreteras y los edificios

Se puede realizar el mismo análisis considerando las acciones que deben ser aplicadas tanto a las carreteras como a los edificios.

Si se utilizan los datos que nos proporcionan las referencias (10), (11), (12) y (13) se obtienen las cantidades reflejadas a continuación, teniendo en cuenta tan sólo las inversiones necesarias para respetar un límite de día de 65 dB(A) y en el caso de Alemania de 65 dB(A) por el día y 55 dB(A) por la noche:

Alemania (conjunto de carreteras)	=	60.000 US\$/km
Francia (conjunto de carreteras)	=	27.000 US\$/km
Holanda (carreteras en zona edificada)	=	16.000 US\$/km
Suiza (conjunto de carreteras)	=	28.000 US\$/km

(Los datos que figuran en las referencias 10,11,12 y 13 han sido actualizados para 1994 aplicando una tasa media de inflación del 3 por ciento).

Todos los datos presentados son estimaciones basadas en estimaciones teóricas y estadísticas; una evaluación posterior, obtenida del Programa Suizo de Ordenación de las Carreteras Nacionales, da un coste comprendido entre 42.000 y 59.000 US\$/km.

Si tomamos como valor medio (35.000 US\$/km) y la longitud del conjunto de la red de carreteras de todos los países de la OCDE obtenemos los costes siguientes:

Conjunto de carreteras de la OCDE	437 millones de US\$
Conjunto de autopistas de la OCDE	4,8 millones de US\$

Como en el caso de las inversiones necesarias para la “mejora” del vehículo, hay que señalar que los datos presentados hasta el momento no sirven más que para dar una idea de la importancia del problema y que los puntos siguientes deben tenerse en cuenta:

- Estas actuaciones se basan en estudios realizados durante el final de la década de los años 70 y no tienen en cuenta el progreso técnico alcanzado, que permite reducir el coste de las acciones anti-ruido: si se observa el cuadro 7.4 del capítulo 7 por ejemplo, se puede ver como cambia la situación según que se decida utilizar un pavimento clásico o uno silencioso (eufónico u optimizado).
- Cada país tiene unas características específicas que influyen enormemente en los costes; en los países fríos, por ejemplo, parece difícil adoptar, por problemas de hielo, pavimentos drenantes mientras que una política de mejora del aislamiento de las ventanas serviría también a los objetivos de los programas de ahorro de energía; en los países cálidos esta situación es justamente la inversa.

Hay que observar, igualmente, las diferentes situaciones que se producen en términos de población existente alrededor de la red de carreteras y del tamaño característico de las aglomeraciones urbanas.

Considerando todos estos factores, se puede decir que el coste medio citado de 35.000 US\$/km puede variar en una horquilla de +/- 50 por ciento.

Incluso con esta limitación relativa a la hipótesis de “bajo coste”, es evidente que en una política realista anti-ruido, es necesario contar con una planificación a largo plazo para que sea eficaz. En Suiza, por ejemplo, el programa relativo a las carreteras fija como fecha para alcanzar sus objetivos el año 2003, y en Holanda, la ley sobre la reducción del ruido programa acciones hasta el año 2010.

Otro punto interesante, es examinar en que medida las inversiones en las políticas anti-ruido están influenciadas por los niveles tomados como objetivo (umbrales de alarma). Según las referencias (10), (11), (12) nos podemos referir a los valores dados en los cuadros 2.3, 2.4 y 2.5.

Aunque estos valores sean aproximados, queda claro que la elección de los límites puede afectar de una manera muy importante al impacto económico total de las medidas anti-ruido.

Teniendo en cuenta esta consideración, hay que resaltar que los estudios que intentan correlacionar las molestias con el nivel del ruido no parecen ser muy precisos ni estar al día; esto conduce a considerar el ruido de la circulación

como un problema homogéneo, sin establecer la diferencia, por ejemplo, entre carreteras urbanas (principales y secundarias) y autopistas o, entre condiciones de circulación fluida y pausada.

Cuadro 2.3. Estimación de la inversión necesaria para reducir el ruido en las carreteras existentes en Alemania (1994)*

Límite del Leq(día)/Leq(noche)	Coste (Millones de US \$)
80/70	473
75/65	3.350
70/60	10.645
65/55	30.975

* Estimación reactualizada a partir de datos de 1980 (13) y referidos a 486.000 km. de carretera.

Cuadro 2.4. Estimación de la inversión necesaria para reducir el ruido en la construcción de carreteras nuevas en Alemania (1994)*

Límite del Leq(día)/Leq(noche)	Coste (Millones de US \$)
65-70-75/55-60-65	485
60-65/50-55	858

* Estimación reactualizada a partir de datos de 1980 (4).

Cuadro 2.5. Estimación de la inversión necesaria para reducir el ruido en todas las carreteras de Suiza (1994)*

Límite del Leq(día)/Leq(noche)	Coste (Millones de US \$)
750	149
70	683
65	962

* Estimación reactualizada a partir de datos de 1979 (10).

Es posible que investigaciones más precisas, nos permitan conocer las diferencias entre los países, así como, las distintas sensibilidades hacia los distintos tipos de ruido de la circulación. La mayor parte de las normas parecen basadas en criterios obtenidos de investigaciones psicosociales realizadas hace 15-20 años. Sería interesante comprobar si las conclusiones obtenidas en los años 70 son válidas en la actualidad o si se han producido cambios que sería necesario contemplar, (mayor sensibilidad a la contaminación acústica o por el contrario adaptación).

Queda también la cuestión de averiguar si los niveles de ruido equivalente o los niveles de ruido máximo son los mejores indicadores de las molestias debidas al ruido, o si sería necesario realizar una verdadera medida de la perturbación inducida por el tráfico, teniendo en cuenta el hecho de que las personas perciben la circulación como un “todo”, lo que significa que la contaminación no queda limitada tan sólo al ruido, sino que afecta igualmente a la calidad del aire, la seguridad y el paisaje. En Noruega, por ejemplo, el “Traffikk og miljø” es favorable a esta visión global.

2.4.3. Coste social del ruido

Se entiende por coste social del ruido, el precio soportado por la población, como consecuencia de las políticas de “no-intervención”. Es evidente que en este caso los estudios y análisis son todavía más difíciles, ya que es necesario evaluar, en términos económicos, los daños producidos por el ruido, tanto a los bienes materiales (inmobiliarios, parques, zonas edificables), como a las personas (stress, enfermedades, disminución de productividad en el trabajo).

Los métodos de evaluación más frecuentemente utilizados son:

- La evaluación eventual o el análisis obtenido de estudios estadísticos sobre el número de individuos dispuestos a pagar para disfrutar de un medio ambiente de mejor calidad desde el punto de vista acústico.
- El análisis de la influencia de la contaminación acústica sobre algunos indicadores de mercado, basados esencialmente en los valores que se obtienen en el mercado inmobiliario (compra, venta y alquiler).
- El análisis de jurisprudencia, analizando los juicios en los que las sentencias han acordado indemnizaciones a los que habían soportado molestias o daños producidos por el ruido.
- El análisis de los gastos realizados por los individuos para la protección acústica de las fachadas de los edificios.

La síntesis de los estudios referenciados como (14), (15), (16), (17), (18), permiten sacar las siguientes conclusiones:

- En Alemania, el consenso para tener un medio ambiente más silencioso, considerando el ruido de la carretera, haría necesario que se invirtiera entre 0,75 y 0,85 millones de US dólares al año.
- Analizando los estudios realizados desde 1980, se obtiene una tasa media de depreciación del inmobiliario del orden del 1% por año. Sobre la base de datos análogos, se ha calculado que en Francia los apartamentos situados en las zonas urbanas de ciudades de más de 50.000 habitantes se han depreciado en un valor de 20 millones de US dólares, suponiendo que la depreciación se produce a partir de niveles de ruido de día de 60 dB(A).

Es necesario insistir en el hecho de que estas estimaciones no son más que aproximaciones groseras. Como prueba de ello se puede observar que el

orden de magnitud de los daños soportados es el mismo que el de los remedios a aplicar. Este punto es de vital importancia para planificar correctamente las estrategias de lucha contra la contaminación acústica.

2.5. CONCLUSIONES

Se pueden proponer las siguientes conclusiones:

- El L_{Aeq} puede ser considerado como el descriptor “fundamental” de la exposición de la población al ruido de la circulación rodada pero en condiciones particulares es necesario realizar estudios complementarios (por ejemplo, hay estudios que están investigando la conveniencia de aplicar el filtro de ponderación C cuando el porcentaje de vehículos pesados es muy alto). Cuando el tráfico es escaso los índices L_{max} o L_{10} pueden ser útiles.
- Es preciso conocer las correlaciones entre molestia y perturbación antes de proponer umbrales de ruido admisibles, en la medida en que las implicaciones económicas y técnicas son muy importantes.
- Las políticas anti-ruido deben contemplar acciones a largo plazo, así como una previsión financiera bien definida para obtener los recursos económicos suficientes.
- Una visión integrada es necesaria (vehículos, carreteras, pantallas, edificios) para alcanzar soluciones técnicas realistas y para poder controlar los gastos.
- El concepto de prioridad debe ser cuidadosamente examinado distinguiendo:
 - la construcción de carreteras nuevas o la reforma de carreteras existentes en la proximidad de construcciones existentes;
 - la construcción de nuevos edificios o la reforma de edificios existentes en la proximidad de una carretera existente;
 - las carreteras y construcciones existentes.

Cuadro 2.6. Niveles aceptables propuestos (L_{eq})

Niveles aceptables (Límites en fachadas*)			
L_{Aeq} (día)		L_{Aeq} (noche)	
Carretera nueva	Carretera existente	Carretera nueva	Carretera existente
60 +/- 5	65 +/- 5	50-55	55-60

* Si técnicamente no es posible alcanzar el límite fijado en la fachada o si no es económicamente justificable, es indispensable el garantizar un nivel de ruido en el exterior de los edificios de 40-50 L_{Aeq} (día) y 35 L_{Aeq} (noche).

Teniendo en cuenta el nivel actual de conocimientos técnicos y las implicaciones económicas de las políticas coercitivas del ruido originado por la circulación, se pueden proponer algunas indicaciones generales siguientes, relativas a los límites de aceptabilidad a medio plazo (objetivos para los años 2005-2010) ver cuadro 2.6. Los límites relativos al nivel del ruido propuesto por la OCDE son coherentes con los establecidos por la Comisión de la Unión Europea (CCE-DGXI) ver cuadro 2.7.

Cuadro 2.7. Límites que aseguran una protección satisfactoria a las personas expuestas al ruido (según la CCE, DGXI)

L_{Aeq} (Límites en fachadas)			
L_{Aeq} (día)		L_{Aeq} (noche)	
Carretera nueva	Carretera existente	Carretera nueva	Carretera existente
57/68	65/70	47/58	57/62

2.6. BIBLIOGRAFIA

1. OECD (1991). Lutter contre le bruit dans les années 90. OECD, Paris.
2. MAURIN, LAMBERT, ALAUZET (1988). Enquête nationale sur le bruit des transports en France. Rapport INRETS n° 71, Bron.
3. IPA-CENSIS (1993). I comportamenti Ambientali Autostrade 3/93. Rome.
4. BERTONI, FRANCHINI, LAMBERT (1994). Gli effetti del rumore dei sistemi di trasporto sulla popolazione. Pitagora Editrice. Bologna.
5. INRETS (1994). Study related to the preparation of a communication on a future EC noise policy. LEN Report N° 9429 Bron.
6. MINISTERIO DELL'AMBIENTE (1988). Programa triennale per la tutela ambientale 1989-1991. Rome.
7. WHO (1980). Environmental Health Criteria 12: Noise. Genève.
8. COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES (1983). Perspective de réduction du bruit des véhicules routiers. Rapport EUR 8573 EN. Bruxelles.
9. CCMC (1990). Estimation of the economic and technical consequences of a further reduction in permissible motor vehicle noise levels. Rapport N° 20/80. Bruxelles.
10. DEPARTEMENT FEDERAL DE L'INTERIEUR (1979). Valeurs limites d'exposition au bruit du trafic routier. Commission fédérale. Berne.
11. MINISTERIE VAN VOLKSHUISVESTING (1988). Noise Abatement in the Netherlands. La Haye.
12. BAR (1979). Protection contre le bruit et la pollution - Coût des protections en France. CETUR.

13. CETUR (1981). Coopération franco-allemande dans le domaine routier. Rapport CETUR 1981.
14. LAMBERT (1986). Nuisances sonores et coût social de l'automobile. RTS n° 11.
15. IRT/CERNE (1982). L'impact du bruit et de la pollution émis par la circulation automobile.
16. WEINBERGER (1992). Gesamtwirtschaftliche kosten des larms in Deutschland. Larmbekämpfung 39.
17. ALEXANDRE, BARDE (1987). Transportation noise reference book. Butterworth and Co Ltd.
18. ECHO BRUIT (1992). Coût social du bruit en Allemange.

3. EVALUACION Y MEDIDA

El objetivo de este capítulo es dar una visión general de los métodos actualmente empleados en los países miembros de la OCDE.

Los métodos de previsión y medición deben utilizarse para cuantificar el impacto del ruido a lo largo del proceso de toma de decisiones, que abarca desde la primera fase de la planificación hasta el diseño final y detallado de las medidas anti-ruido. Por lo tanto, las decisiones se toman durante el proceso de evaluación, de acuerdo con los resultados derivados de estos métodos.

La evaluación de los niveles de ruido producido por el tráfico puede llevarse a cabo a través de dos formas distintas: medición y previsión. Los métodos de medición consisten en la toma de medidas directas del ruido mediante instrumentos acústicos, como son los sonómetros. Los métodos de previsión se basan en el conocimiento de las teorías de la emisión y propagación del sonido, éstas permiten calcular los niveles de ruido a través de la simulación de situaciones reales o predecibles mediante modelos matemáticos o físicos. Frecuentemente, se combinan los métodos de previsión y medición para proporcionar una mejor o simplemente más operativa evaluación. En la práctica actual, dos características determinan la calidad de un método:

- su validez, lo que significa la precisión de los resultados obtenidos; y
- su operatividad, en términos tanto de tiempo como de costes económicos.

3.1. CAMPO DE APLICACION Y UTILIZACION DE LOS METODOS DE MEDICION Y PREVISION

La evaluación cuantitativa de los niveles de ruido producido por el tráfico es la base sobre la que se apoyan las políticas de control del ruido. Los instrumentos de medición son necesarios para detectar los niveles de ruido existentes, para evaluar, en los procesos de planificación, el impacto de dicho ruido producido por la circulación; así como para determinar la eficacia de las medidas anti-ruido.

Los métodos de medición son únicamente relevantes cuando se aplican a situaciones existentes, mientras que los métodos de previsión pueden utilizarse tanto para las situaciones existentes como para las que se planifiquen.

Desde el punto de vista técnico, los métodos de previsión son mejores para determinar el nivel del sonido derivado del tráfico rodado. Sus menores costes y su mayor fiabilidad nos indican que deberían preferirse a la hora de proceder a la evaluación del ruido. De hecho, pueden desarrollarse un gran

número de escenarios al utilizar un método de cálculo que introduzca intensidades del tráfico, varios tipos de firmes, posición y número variable de puntos de recepción, y distintos diseños de medidas de amortiguación del ruido.

Por el contrario, los resultados de los métodos de medición sólo proporcionan información sobre una situación que viene determinada por una serie de condiciones específicas y el momento en que se toman las medidas.

El tráfico y las condiciones atmosféricas varían con el tiempo. Por lo tanto, sólo pueden compararse mediciones estrictamente simultáneas, a menos que se consideren las correcciones pertinentes. Además, es necesario emplear mucho tiempo para medir una serie de puntos relativamente reducida, mientras que los métodos de cálculo determinan con rapidez los niveles sonoros en zonas extensas.

Los métodos de medición se emplean principalmente para determinar los niveles de ruido antes de la construcción de las carreteras, con el objeto de predecir el incremento de nivel que se producirá posteriormente. Es obvio que se deben emplear métodos de medición cuando no se prevea la consecución de resultados aceptables mediante los métodos de cálculo estandarizados. Estos, en particular, ofrecen poca fiabilidad cuando se desconoce la influencia de otros factores, como son emisiones de ciertos vehículos y algunos tipos de pavimentos y superficies. Además, en los métodos de cálculo no se tienen en cuenta las condiciones complejas de la propagación del ruido, sino que se tiende a simplificar sus escenarios de propagación.

Los métodos de medición también se emplean para determinar la eficacia de las pantallas acústicas, comparando los niveles obtenidos antes y después de levantar la pantalla. Asimismo, los métodos de medición, se emplean para estudiar la precisión de los niveles previstos por el cálculo.

Los métodos de previsión han demostrado ser de una gran utilidad, algunos de ellos se han aplicado en una amplia gama de situaciones afectadas por el ruido. Sin embargo, cuando se aplica cualquier método de previsión existente, tropieza con una serie de restricciones derivadas de la limitada disponi-

Cuadro 3.1. Funciones de medida y previsión del ruido

	Modelos matemáticos de previsión	Acciones	Medida
Carreteras nuevas	● Previsión del ruido.	● Construcción.	● Control de las previsiones.
Carreteras existentes	● Previsión en caso de ensanche de la carretera.	● Ensanche.	● Control de las previsiones.
	● Previsión en caso de realización de protecciones.	● Protección contra el ruido.	● Control de las previsiones.

bilidad de los diferentes escenarios (e.j.: sólo se toman en consideración ciertos tipos de estructuras viales). También existen restricciones provenientes de los umbrales de confianza que son parte del modelo de simulación (e.j.: algunos modelos imponen umbrales en la velocidad de los vehículos).

Por lo tanto, para conseguir una adecuada evaluación, deberá considerarse la validez de cada método de previsión, teniendo en cuenta los tipos de escenarios de simulación y umbrales de confianza de cada variable.

Como consecuencia de la reducción de la emisión de ruido, debido a la política de control, de los Países Miembros de la OCDE, los métodos de previsión deben contrastarse y modificarse, de forma continuada, con el fin de adaptar los niveles teóricos de emisión a los reales que vayan cambiando.

A pesar de los beneficios técnicos y a la tendencia general en favor del empleo de métodos de previsión, los métodos de medición difícilmente pueden sustituirse por los de cálculo, cuando se requiere una evaluación del ruido en situaciones como aquéllas que conllevan procedimientos legales (e.j.: apelaciones de la comunidad al gobierno, en relación con los efectos de la contaminación producida por el ruido).

3.2. METODOS DE PREVISION DEL RUIDO

Se han desarrollado, en distintos países, métodos de previsión de niveles de ruido producidos por el tráfico. En algunos países, determinados métodos de previsión son adoptados o promovidos oficialmente por las autoridades responsables de la explotación del suelo y del diseño de la amortiguación del ruido. En estos casos, las normas condicionan los algoritmos de cálculo a utilizar en el método y el tipo de resultado que se debe obtener.

Generalmente, en países donde existen métodos oficiales se permite el empleo de otro modelo de previsión, siempre que el usuario demuestre que los resultados obtenidos son similares a los que se consiguen con el método oficial.

Los diversos métodos de previsión del ruido, caracterizados por diferentes niveles de detalle y fiabilidad, pueden clasificarse en tres grupos básicos:

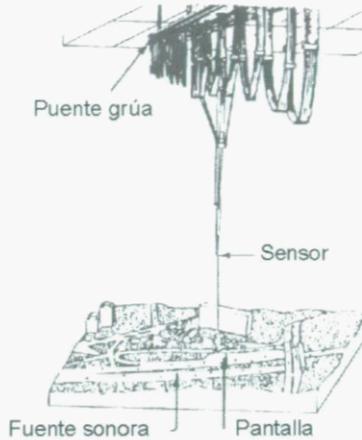
- **Métodos manuales basados en ábacos, tablas o ecuaciones analíticas simples**

Estos métodos se utilizan en una primera evaluación, y se aplican a situaciones sencillas. Una fórmula general de cálculo permite determinar el nivel de ruido producido por el tráfico, mientras que los ábacos y las tablas se emplean para la consideración de los factores de corrección, derivados de diferencias topográficas u otras condiciones. La mayoría de estos métodos son versiones simplificadas de modelos matemáticos más complejos.

- **Modelos físicos reducidos. Maquetas (Figura 3.1)**

Los métodos de simulación que utilizan modelos reducidos permiten reproducir con gran detalle situaciones espaciales muy complejas. Sin embargo,

Figura 3.1. Modelo físico reducido. Maqueta.



los modelos reducidos son extremadamente costosos en términos tanto de financiación como de medios, ya que requieren la construcción de un modelo reducido “ad-hoc” y precisan un equipo experimental altamente sofisticado.

- **Simulaciones numéricas mediante el cálculo automático**

El uso de programas informáticos permite llevar a cabo previsiones en la mayoría de los escenarios topográficos. Estos programas son capaces de evaluar los fenómenos acústicos de propagación, reflexión y absorción. El detalle y la precisión de sus resultados dependen tanto de la complejidad del modelo como de la calidad de los datos de entrada.

Salvo cuando se emplea un modelo reducido, lo que apenas ocurre, la previsión del ruido producido por el tráfico se realiza mediante la utilización de fórmulas matemáticas. Estas fórmulas resultan tanto de consideraciones teóricas como empíricas que involucran potencia acústica de emisión y ciertas atenuaciones. La complejidad de los procesos de cálculo, especialmente si se persigue un cierto grado de precisión, requiere el empleo de programas informáticos, para reducir el tiempo empleado en el cálculo.

Todos los modelos tienen en cuenta parámetros que representan las diferentes variables implicadas. En todos los casos, los parámetros reproducen las fuentes sonoras (parámetros de tráfico), condiciones topográficas, incluyendo aquéllas de la calzada, situación de los puntos de recepción, atenuaciones causadas por el aire y el suelo. Las influencias meteorológicas no se consideran en la mayoría de los modelos de previsión existentes.

La estructura general de los modelos matemáticos es la siguiente:

1. Descripción topográfica del lugar, definiendo la ubicación de los puntos receptores, características absorbentes del terreno, presencia de obstáculos naturales o artificiales, etc.

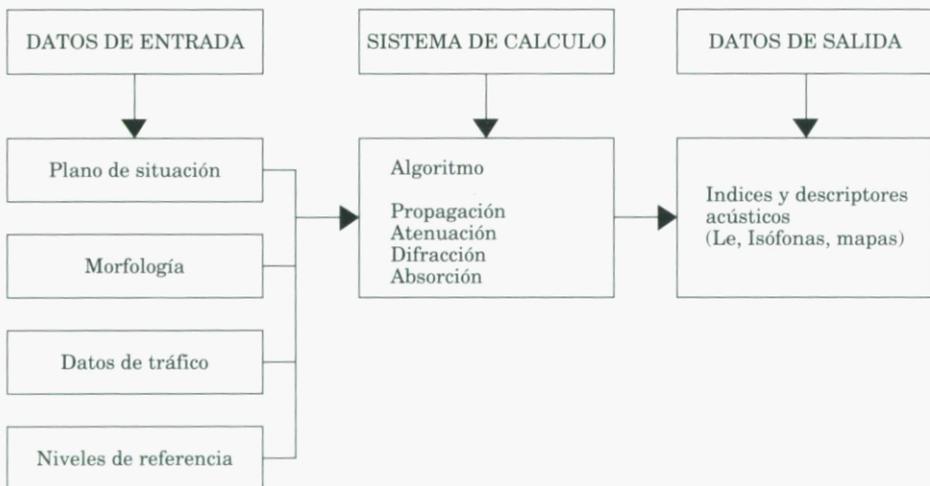
2. Definición de las fuentes de emisión (carretera, ferrocarril, etc.), perfil longitudinal, secciones, estructuras (plataforma a nivel o elevada, túneles, viaductos, desmontes, etc.).
3. Caracterización acústica de las fuentes (flujo de tráfico, velocidad media, tipo de vehículos, etc.).
4. Análisis de la difusión del sonido en su propagación. Es necesario tener en cuenta la atenuación debida a la distancia, la absorción del suelo, las reflexiones y difracciones provocadas por los obstáculos y la absorción acústica del aire.
5. Salida de resultados.

3.2.1. Modelos matemáticos del ruido producido por el tráfico

Las fórmulas de cálculo que figuran en los modelos de previsión son muy similares. Esquemáticamente, se obtiene, experimentalmente un nivel de ruido de referencia correspondiente al nivel producido por un único vehículo circulando en condiciones normalizadas a una distancia de referencia y este dato se incorpora a la fórmula como un valor constante. Este valor es corregido mediante factores que tienen en cuenta la influencia de los tipos de vehículos, el número, la velocidad media, el tipo de pavimento, la absorción del suelo, la sección de la carretera, el efecto pantalla producido por los obstáculos, etc. El número y el valor de estos factores, varía de un modelo a otro.

Las Autoridades Estatales **Australianas** de la Carretera emplean el método de previsión CoRTN (Department of Transport Welsh Office Calculation of Road Traffic Noise, 1988) para la evaluación del ruido originado por el tráfi-

Figura 3.2. Organigrama de los modelos de previsión.



co. Este método de previsión se ha adaptado para ser utilizado en diversos paquetes de software. Se utiliza en las fases de planificación/diseño de la construcción de nuevas carreteras y para determinar las características de las pantallas acústicas. La conveniencia del modelo CoRTN se comprueba de forma continua mediante la comparación entre mediciones y previsiones.

Existe otro modelo desarrollado por la Comisión Australiana de Estudios de Carreteras, "Australian Road Research Board" (ARRB), que supone la previsión de niveles de ruido en intersecciones señalizadas. Sin embargo, su ámbito es realmente limitado.

En **Austria**, la evaluación de las inmisiones de ruido se realiza a través de un método de cálculo austriaco desarrollado en 1983, que tiene carácter oficial. El nivel sonoro equivalente horario se predice para el día y la noche según la fórmula siguiente:

$$L_{eq} = L_g + 10 \log MSV_L + K_R + K_S + K_F + K_L + K_G + K_K - K_E - K_W - K_H$$

donde

L_{eq}	Nivel sonoro equivalente en dB.
L_g	32 dB(A) (valor básico para tramos sin ningún tipo de construcción y difusión libre del sonido, en una distancia de 25 m contados desde la línea de referencia).
MSV_L	Intensidad horaria de vehículos.
K_R	Factor de corrección por influencia de reflexiones.
K_S	Factor de corrección por la frecuencia del tráfico pesado.
K_F	Factor de corrección por el tipo de pavimento.
K_L	Factor de corrección por la pendiente longitudinal del tramo considerado.
K_G	Factor de corrección por la velocidad estándar.
K_K	Factor de corrección por la influencia de los cruces.
K_E	Factor de corrección por la distancia al eje de la carretera.
K_W	Factor de corrección por longitud efectiva del tramo de carretera.
K_H	Factor de corrección por el efecto de apantallamiento de los obstáculos.

En Austria, el cálculo puede basarse en otro modelo, sólo si se realiza una comparación entre sus resultados y aquéllos obtenidos utilizando el método austriaco, en al menos un punto importante de inmisión dentro del área estudiada.

Las autoridades públicas de **Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia** adoptaron oficialmente un modelo nórdico de cálculo del ruido originado por el tráfico rodado. Este método se emplea en la planificación de la explotación del suelo, la ordenación y regulación del tráfico y el diseño de la amortiguación del ruido.

El modelo tiene la siguiente estructura:

$$L_{Aeq} = L_{Aeq10m} + LV + LN + LTF + LAV + LM + LK + LF$$

- L_{Aeq} Nivel sonoro equivalente.
- L_{Aeq10m} Nivel sonoro de referencia medio a una distancia de 10 metros del centro de la calzada.
- $L(I)$ – Factores de corrección.

Se utilizan factores de corrección en ángulos de incidencia menores de 180° , pantallas amplias, inclinación de la carretera, distancias cortas, reflexiones simples y múltiples y atenuación por edificación de baja densidad.

El modelo incluye una fórmula de comparación para determinar el nivel máximo de ruido, L_{Amax} , que es independiente de la velocidad del vehículo y de la intensidad del tráfico.

Basado en este modelo se adoptó en 1990, en todos los países nórdicos, el programa de ordenador NBSTÖY. Este programa sólo evalúa un punto cada vez. El modelo noruego difiere de los otros métodos nórdicos en un punto: 3 dB(A) son sumados a los niveles de ruido obtenidos en fachada cuando se trata del cálculo del nivel sonoro en las proximidades de una pared, y este último valor es el que sirve de referencia para aplicar la normativa vigente. En Dinamarca, los resultados en campo libre son los que sirven de referencia para aplicar la normativa. Existe un nuevo modelo, denominado TSTÖY, aún en fase de desarrollo (en AUTOCAD), cuyo objetivo es tomar algunos puntos, sobre el propio terreno y digitalizarlos, adecuando el modelo informático a los datos medidos.

En general, el modelo NBSTÖY da valores concordantes con los valores medidos, aunque, en algunos casos los niveles estimados son superiores a los reales. No obstante, este modelo no refleja con total exactitud la adopción de medidas técnicas de atenuación de ruido como la influencia de las capas de rodadura del firme, la disminución de la velocidad en ciudades por debajo de 50 Km/hora o la utilización de estructuras específicas que se comportan como pantallas acústicas. El cálculo del nivel máximo, ha sido, a su vez, objeto de críticas por no dar valores representativos de los niveles máximos reales. Se espera que al final de 1995 exista una nueva versión del modelo.

Noruega ha desarrollado, un modelo de PC (VSTÖY) basado en una simplificación del NBSTÖY, para una evaluación general y aproximada en la que se ha simplificado especialmente el suelo. Este modelo puede ser usado para elaborar una base de datos sobre ruido.

En **Alemania**, el documento llamado “Directivas para la protección del ruido en las carreteras” (R.L.S. 90) publicado por el Departamento de Construcción de Carreteras del Ministerio Federal de Transportes, da un método de previsión de los niveles de ruido producidos por la circulación y un método de dimensionamiento de pantallas acústicas. El método R.L.S. permite el cálculo del nivel equivalente expresado en dB(A) en función de los datos de circulación y de la metodología de la zona estudiada. Propone dos métodos de cálculo distintos llamados “A” y “B”. El procedimiento A no se aplica más que a las zonas rectilíneas de la carretera en las que el efecto de los obstáculos o las desviaciones del tráfico son despreciables. El procedimiento B se aplica al resto de situaciones.

El método R.L.S. es un procedimiento de cálculo integrado fácil de introducir en ordenador. Los niveles calculados son, en general, superiores a los que se obtendrían experimentalmente (midiendo) y su uso es de gran utilidad para la previsión de niveles sonoros en los estudios de impacto ambiental así como para el predimensionamiento de las pantallas acústicas.

Italia no posee modelos de previsión oficiales del ruido producido por el tráfico. Se han aplicado distintos métodos a determinados estudios y proyectos. En la mayoría de los casos se han empleado métodos oficiales de otros países, aunque también se están utilizando algunos métodos desarrollados en Italia por diferentes equipos de investigación.

La Sociedad Autostrade creó en 1990 el modelo "Modello Inquinamento Rumore Autostrade" (M.I.R.A.), con el propósito de contar con un modelo adecuado de previsión del ruido en áreas adyacentes a infraestructuras tales como autopistas de peaje o desvíos urbanos. Es un modelo semi-empírico basado en el americano. El modelo se estructura en dos partes principales: i) determinación del nivel de referencia y correcciones posteriores según la intensidad del tráfico, y ii) determinación de la difusión acústica al receptor. Este modelo ha sido adaptado para incluir emisiones generadas por la particular distribución italiana de los vehículos en la corriente de circulación, así como tipos específicos italianos de pavimentos.

El cálculo se realiza por separado para tres clases de vehículos (ligeros, medios y pesados) y los resultados finales se obtienen sumando los niveles de cada clase. La principal fórmula de cálculo es:

$$(L_{eq})_i = (L_0)_E_i + 10 \log [(N_i \pi d_0) / (T.V_i)] + \text{Factores de Corrección}$$

- $(L_{eq})_i$ Nivel equivalente horario para cada clase de vehículo.
- $(L_0)_E_i$ Nivel sonoro de referencia medio para cada clase de vehículo.
- N_i Número de vehículos de la clase "i" (vehículos por hora).
- d_0 Distancia de referencia a la que se determina $(L_0)_E$.
- T Tiempo de referencia (1 hora).
- V_i Velocidad media para vehículos de la clase "i".

En los factores de corrección se tienen en cuenta la distancia entre la carretera y el observador, la absorción del terreno, el efecto de reflexión de los obstáculos, la contribución de los diferentes tramos de la carretera y los efectos de apantallamiento.

El método de cálculo IPSE, utilizado también en Italia, es un modelo de previsión del ruido producido por la circulación derivado del Modelo Ambiental australiano, "Environmet Noise Model" (E.N.M.). Este método se pone en práctica mediante técnicas de trazado, y se basa en un banco de datos que describe la situación italiana del tráfico y de las condiciones de la carretera. El modelo tiene en cuenta los efectos del viento y suelo, la difracción sobre los obstáculos y las propiedades de absorción del sonido de los pavimentos. El modelo puede conectarse con programas de diseño gráfico (AUTOCAD).

Otro método de previsión, el COSA & NICOLI, se emplea en situaciones de circulación urbana. El elemento de cálculo en este método es el SEL (Single Event Level), y el L_{eq} se calcula de acuerdo con los valores SEL de 5 categorías de vehículos.

En Japón, la evaluación del ruido producido por el tráfico se realiza calculando el valor medio del nivel de presión sonora, L_{50} . El cálculo se basa en una fórmula de previsión y sólo se puede aplicar cuando los vehículos viajen por las carreteras a velocidades casi constantes. Las carreteras deberán ser totalmente lisas, en terraplén, en excavación sin laderas o elevadas. Actualmente se ensayan o crean métodos de simulación y métodos de estimación de pasos elevados a distintos niveles, carreteras en desmonte, bocas de túneles, etc.

La fórmula de previsión empleada por el método es la siguiente:

$$L_{50} = L_w - 8 - 20 \log l + 10 \log (\pi/d - \tanh 2\pi l/d) + \alpha_d + \alpha_i$$

con $L_w = 86 + 0.2V + 10 \log (a_1 + 5a_2)$

L_{50}	Valor medio del nivel de presión sonora en el punto de cálculo.
L_w	Nivel medio de energía generado por un vehículo.
V	Velocidad media (km/h).
N	Volumen medio de tráfico (vehículos por hora).
d	Distancia media ($d=1000 V/N$).
a_1	Porcentaje de vehículos pequeños.
a_2	Porcentaje de vehículos grandes.
l	Distancia mínima de la fuente sonora al punto de cálculo.
α_d	Valor corregido por disminución de la difracción.
α_i	Valor corregido de acuerdo con diversos factores.

En **Holanda**, la “Normativa sobre Medida y Cálculo del Ruido producido por el Tráfico”, dictada por el Ministro de Vivienda, Planificación y Medio Ambiente, proporciona dos métodos de cálculo: El Método de Cálculo Estándar 1, “Standard Calculation Method 1” (SCM1), y el Método de Cálculo Estándar 2, “Standard Calculation Method 2” (SCM2). Estos documentos especifican que es preferible utilizar métodos de cálculo para situaciones nuevas cuando no se pueden realizar medidas o en situaciones en que las medidas van a quedar invalidadas debido a condiciones meteorológicas.

SCM1 se utiliza, sólomente, para determinar niveles de ruido en situaciones muy específicas. En términos generales, SCM1 puede utilizarse en situaciones en donde no exista aislamiento, y la carretera no presente variaciones importantes en su aspecto y en los datos del tráfico; este método se emplea en casos relativamente sencillos con pocos puntos de observación. Es utilizado, frecuentemente, en la elaboración de planes, cuando lo que se desea es tener, rápidamente, una “impresión” acerca del impacto del nivel sonoro en un lugar determinado.

SCM2 es un método más sofisticado utilizado en trabajos de mayor envergadura, o cuando es necesario calcular el efecto del aislamiento. El nivel sonoro

ro equivalente se obtiene sumando, energéticamente, los valores obtenidos en cada banda de octava.

En **España**, no existe fórmula de aplicación general o modelo matemático de previsión del ruido originado por el tráfico. En cada estudio debe especificarse y describirse la metodología empleada. Las fórmulas que se utilizan normalmente, son parecidas a la fórmula de cálculo en tejido abierto del método francés "Guide du bruit des transports terrestres", e.j.:

$$L_{eq} = 20 + 10\log(Q_{vl} + EQ_{vp}) + 20\log V - 12\log(d + l_c/3) + 10\log(\theta/180)$$

donde

- L_{eq} Nivel de presión sonora equivalente en dB(A).
- Q_{vl}, Q_{vp} Número de vehículos ligeros y pesados.
- E Factor de corrección por equivalencia entre vehículos ligeros y pesados.
- v Velocidad en km/h.
- d Distancia del borde de la carretera.
- l_c Anchura de la carretera.
- θ Angulo de visión.

Cuadro 3.2. Valor del factor de equivalencia E

Pendiente de la rampa	r ≤ 2%	r = 3%	r = 4%	r = 5%	r ≥ 6%
Autovía	4	5	5	6	6
Carretera	7	7	10	11	12

La velocidad es la velocidad media de todo el tráfico, (velocidad superada por el 50% de todos los vehículos durante el periodo de observación). Para carreteras con una mediana muy ancha el estudio debe dividirse, y el resultado final será la suma (acústica) de los resultados parciales.

En relación con los modelos de programas matemáticos, el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente a través del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) ha venido aplicando desde 1992, los modelos franceses MICROBRUIT (CETUR) y MITHRA (C.S.T.B.), aunque no existe un método oficial de cálculo.

En **Suiza**, las Autoridades Federales de Ensayo de Materiales, "Federal Material Testing Authorities" (EMPA), han desarrollado un programa de evaluación del ruido producido por el tráfico, SrL-86, a requerimiento de la "Federal Environmental Protection Office". El modelo informático se compone de un modelo topográfico y de otro modelo acústico. El primero utiliza polígonos, como vectores de información. Estos polígonos contienen datos de localización de la carretera, obstáculos y topografía.

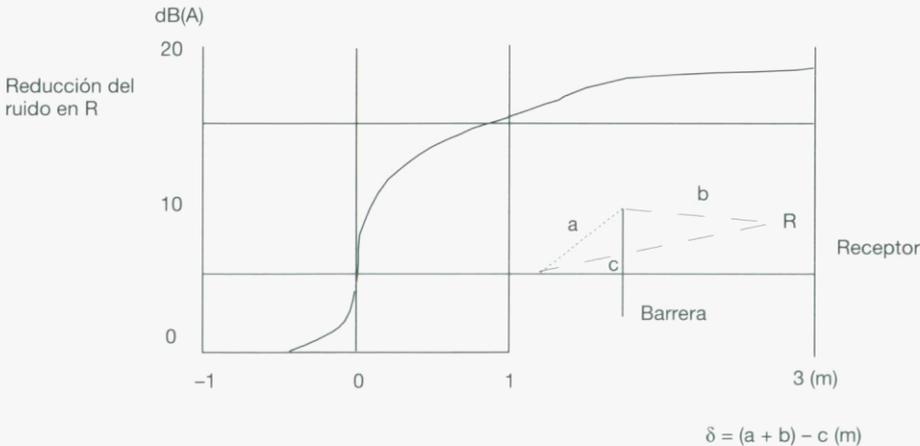
En **Estados Unidos** “The Federal High Administration” (FHWA) ha desarrollado y difundido un modelo de previsión del ruido producido por la circulación, el “FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model”, empleado por todos los Organismos Estatales de Autopistas de los Estados Unidos. Sin embargo, se puede utilizar cualquier método de previsión del ruido producido por el tráfico, siempre que su metodología esté en consonancia con la del modelo de la FHWA. El cálculo se hace por separado para tres clases de vehículos (ligeros, medios y pesados). El nivel final se obtiene sumando los niveles de las distintas clases. Este modelo de la FHWA se ignora la atenuación debida a los gradientes térmicos, los vientos y la absorción atmosférica y, normalmente no considera las reflexiones múltiples de las ondas sonoras.

Existe un software informático basado en el modelo de la FHWA: STAMINA 2.0, programa de previsión del ruido originado por la circulación, y OPTIMA, programa complementario para diseñar pantallas acústicas. El resultado indica el nivel sonoro de cada receptor y el ruido de cada tramo de carretera. Gráficamente, es una representación en planta y alzado; habiéndose realizado conexiones con sistemas de CADD.

En **Inglaterra** el método C.R.T.N. (Calculation of Road Traffic Noise) desarrollado en 1975, permite la evaluación y la previsión del nivel estadístico L10, tanto para una hora determinada “base” como para el período comprendido entre las 6 h y las 24 h. Este método de cálculo, subdividido en numerosas ecuaciones y gráficos, se puede aplicar a receptores situados a menos de 300 m de la carretera, y cuando la velocidad del viento sea inferior a 2 m/s.

El nivel L10 se puede transformar en el L_{Aeq} por alguno de los métodos sugeridos por varios autores. En la mayoría de los casos es suficiente con res-

Figura 3.3. Reducción del ruido aportada por la pantalla debido a la mayor distancia del camino recorrido por el sonido.



tar 3 dB(A) del nivel L10 para obtener el correspondiente LAeq con un margen de error inferior a 2 dB(A) en el 95% de los casos. El método, ha sido, recientemente, actualizado para extender su campo de aplicación a pequeños flujos de vehículos y para obtener una previsión más fiable, las configuraciones inhabituales como las carreteras en trinchera o la presencia de pantallas acústicas a ambos lados de la carretera.

El método precisa determinar el nivel L10 en un punto de referencia situado a 10 metros del borde de la carretera. Este nivel de referencia se corrige, a continuación, teniendo en cuenta la pendiente de la carretera y la tipología de la capa de rodadura. Otras correcciones complementarias son realizadas en función de los principales factores que influyen en la propagación del sonido, como son, la atenuación acústica debida al efecto distancia, la absorción acústica del suelo, el ángulo visual entre la fuente y el receptor.

Por encargo de la **Comisión de la Unión Europea**, un grupo de investigadores del “Laboratorium voor Akoestic en Warntegeleiding” de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) ha preparado un documento titulado “Guía para el cálculo del ruido de tráfico”. El documento final, describe los métodos utilizados para calcular los niveles de ruido producido por el tráfico, tanto en zonas urbanas como en campo abierto. Los niveles estimados pueden expresarse en $L_{A,eq}$ y el L10 dB(A) y se obtienen mediante la utilización de gráficos y nomogramas de entradas múltiples.

Los resultados obtenidos utilizando este método han sido evaluados como sigue:

- Para receptores próximos y situados entre 2 y 4 metros de altura, el procedimiento da, en general, resultados más altos que los obtenidos experimentalmente.
- Para alturas superiores a 5 m los resultados obtenidos son inferiores a los que se obtendrían realizando la medida, probablemente porque, con el receptor a esta altura, la hipótesis, de reducción por el ángulo visual, no se cumple.

3.2.2. Análisis de modelos de cálculo

Un método de previsión del ruido producido por el tráfico ha de ser capaz de obtener niveles de ruido, cualquiera que sean las condiciones de emisión y propagación. Además, debe proporcionar resultados suficientemente representativos de los niveles de ruido reales existentes. El logro de estos objetivos depende de los dos procesos de evaluación siguientes:

- Evaluación de los niveles de emisión del ruido debidos a la intensidad del tráfico.
- Evaluación de la atenuación del ruido entre la fuente y el punto de recepción.

El cálculo de los niveles de la emisión del ruido derivado de la intensidad del tráfico, se basa generalmente en los niveles de ruido producidos por diferen-

tes categorías de vehículos, a una distancia prefijada, en condiciones de propagación en campo abierto. Los niveles en los puntos de recepción se calculan según las leyes de la propagación acústica, estimando la atenuación entre la fuente y el receptor.

Los niveles de emisión son datos que hay que incluir en los métodos. Estos niveles se han obtenido llevando a cabo mediciones del ruido en diferentes países para sus diversos tipos de vehículos. Sin embargo, una larga serie de variables, junto con un tipo de vehículos, determinan el nivel global de emisión (tipo de pavimento, características de la dinámica de la intensidad del tráfico, pendiente de la carretera, etc.). Además, incluso teniendo en cuenta esas condiciones, los niveles de emisión calculados pueden resultar erróneos ya que los niveles de referencia no consideran la antigüedad y estado de conservación de los vehículos.

Sería necesario realizar un gran esfuerzo, para formar bases de datos, que fueran revisadas y puestas al día permanentemente, conteniendo los niveles de emisión de ruido de referencia para todas las categorías de vehículos, todos los tipos de pavimentos y condiciones de circulación y que permitirían a los usuarios de los métodos de previsión el seleccionar, en cada situación, los datos de emisión a introducir. Además, serían necesarias mejoras relativas a la distribución espacial de fuentes sonoras en la plataforma de la carretera (es decir varias líneas con diferentes tipos y números de vehículos frente a líneas simples con tráficos mixtos).

En relación con la atenuación de la propagación de la energía acústica, los métodos ofrecen poca fiabilidad a la hora de evaluar las pérdidas de energía acústica producidas por el efecto suelo y por la presencia de obstáculos. Los métodos de previsión generalmente se emplean para calcular los niveles sonoros que son más altos que aquéllos que se obtienen experimentalmente, ya que muestran una visión muy limitada de los tan complejos fenómenos de atenuación. Los niveles medidos para puntos de recepción próximos a la fuente son, por regla general, más bajos que los previstos porque no se tiene en cuenta el efecto de apantallamiento creado por la circulación de los vehículos a lo largo de las múltiples vías. También se han apreciado notables diferencias entre los niveles medidos y los previstos en puntos de recepción distantes, en donde es muy destacada la atenuación del sonido causada por el efecto suelo. La presencia de obstáculos y las complejas condiciones topográficas con frecuencia producen desviaciones apreciables en los niveles calculados. Todos estos efectos representan el punto más débil de la mayoría de los métodos de previsión.

Los programas de informática más utilizados para la previsión del ruido producido por el tráfico, ofrecen muchas posibilidades de cálculo. En un período de tiempo relativamente corto, se pueden realizar previsiones para un gran número de puntos de recepción, con diferentes hipótesis de tráfico y pantallas acústicas. Sin embargo, a pesar del gran esfuerzo de las técnicas informáticas por incorporar variables espaciales, los programas de previsión existentes no han conseguido superar por completo los obstáculos topográficos, a menos que el usuario utilice estos obstáculos como tipos de pantallas tipifi-

cadadas. Este factor descalifica definitivamente la aplicación de estos métodos a la evaluación de impacto ambiental en zonas extensas, en donde las condiciones topográficas no son tan claras como se requeriría, para la precisión de los métodos de previsión.

Los modelos matemáticos de evaluación del ruido en zonas urbanas, BURGESS, GRIFFITHS, LANGDON, COSA & NICOLI, etc. se han desarrollado de acuerdo a las teorías acústicas de propagación del sonido en campos semi-resonantes. Con estos modelos se suelen obtener resultados con un bajo índice de precisión, ya que las condiciones de emisión y propagación del sonido no se pueden simular fácilmente en zonas urbanas. Algunos de estos métodos se han aplicado con éxito en condiciones concretas, pero siempre deben emplearse con cuidado.

3.3. METODOS DE MEDICION DEL RUIDO PRODUCIDO POR EL TRAFICO

Como hemos mencionado antes, desde un punto de vista técnico, los métodos de cálculo se prefieren normalmente a los de medición cuando se trata de evaluar el ruido producido por el tráfico. Organizaciones nacionales e internacionales regulan los métodos de medición utilizados para determinar las características acústicas específicas de los materiales, que integran las pantallas anti-ruido o las fachadas. La capacidad fonoaislante y fonoabsorbente de los materiales se calcula mediante ensayos realizados en cámaras sin resonancia (principalmente ISO-140, ISO-717 e ISO-354), ya que las mediciones en campo abierto no han demostrado ser eficaces, ni los resultados precisos. Los métodos descritos en este capítulo tan sólo se refieren a mediciones en campo abierto de niveles de ruido debidos al tráfico rodado, para un cierto número de puntos comprendidos en una zona determinada. Hay una sección que se dedica a mediciones para la evaluación de la eficacia de las pantallas acústicas. (Ver Capítulo 5.)

3.3.1. Metodologías

Las mediciones se realizan fundamentalmente con los siguientes propósitos:

- determinar los niveles de ruido en una zona para la identificación de situaciones no deseadas,
- comparar las variaciones del entorno en los niveles de ruido,
- comparar los niveles antes y después de la construcción de la carretera, y
- estimar la eficacia de las medidas anti-ruido aplicadas.

Lugares, períodos de medición y métodos seleccionados dependen del objetivo perseguido y del campo de aplicación. Por ejemplo, cuando ha de procederse a la evaluación de una zona extensa, la selección de los intervalos de medición y de los puntos de estudio afecta notablemente al carácter de los resultados obtenidos.

Deberían realizarse análisis de las variaciones del tráfico, así como estudios de la distribución territorial de las actividades, con el fin de seleccionar aquellos puntos en donde se vaya a medir. El objetivo de estos análisis es optimizar el tiempo empleado en medir y a la vez obtener resultados precisos y representativos.

La medición del ruido es un proceso complicado, que requiere tiempo e instrumentos acústicos especiales. Además, se deben observar ciertas precauciones para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones. Estas precauciones son las siguientes:

- Procedimientos y métodos adecuados de ensayo.
- Revisar regularmente los instrumentos (se recomienda una revisión por año).
- Calibración de los instrumentos antes y después de su uso.
- Asegurar que las condiciones atmosféricas no afecten a los instrumentos.
- Registrar las condiciones atmosféricas durante el ensayo (velocidad del viento, humedad, etc.) para aceptar o rechazar los resultados.
- Evitar llevar a cabo mediciones bajo condiciones excepcionales (lluvia, nieve o hielo).

3.3.2. Instrumentos de medición

El valor L_{eq} , expresado en dB(A), es el parámetro más importante y frecuentemente utilizado en la evaluación del ruido producido por el tráfico rodado. Los sonómetros integradores son los equipos de medición preferidos ya que permiten obtener directamente este valor. El ruido originado por el tráfico rodado varía a lo largo del tiempo, por lo que los instrumentos más útiles son aquellos sistemas preparados para una medición continua de L_{eq} . En realidad, existe una amplia gama de instrumentos acústicos diseñados para realizar mediciones largas y cortas, portátiles o no, que proporcionan un gran número de índices del ruido (L_{eq} , MaxL, MinL, L_N , SEL, Histogramas y otros). Estos instrumentos pueden ser útiles, incluso en el proceso de tratamiento de datos. Los equipos deben seleccionarse según el objetivo perseguido en la medición, por lo que es importante asegurar que los instrumentos sean válidos para su uso al aire libre.

Los sonómetros se clasifican, atendiendo a su grado de precisión, en tres clases diferentes. La clasificación IEC 651 (International Electrotechnical Commission Standard 651) se emplea generalmente para determinar los requisitos que deben reunir los sonómetros. Dependiendo de los objetivos de las mediciones se recomienda o exige una clase u otra. Para mediciones de carácter general se utilizarán los instrumentos de la Clase 2, mientras que para evaluaciones detalladas, será necesaria la utilización de los instrumentos de la Clase 1.

3.3.3. Tiempo e intervalos

Los niveles de ruido debidos al tráfico rodado varían espacial y cronológicamente. Deben emplearse técnicas de muestreo estadístico a fin de obtener una definición precisa del medioambiente acústico de una zona determinada. Es necesario distinguir entre mediciones realizadas para una evaluación aproximada y aquéllas que se realizan para una evaluación detallada de aspectos específicos. Las últimas son necesarias cuando, en determinadas situaciones, se requiere el establecimiento de niveles de ruido precisos; cuando ha de evaluarse la eficacia de las acciones anti-ruido y, finalmente, cuando las mediciones han de realizarse en puntos de referencia importantes.

Se eligen diferentes intervalos dependiendo de los objetivos perseguidos y de las características de la circulación. En la elección de los períodos de medida existen varias tendencias:

- Encontrar las horas de mayor tráfico y medir para obtener el valor medio de ese período.
- Medir durante el tiempo correspondiente al paso de, al menos, un cierto número de vehículos ligeros y/o pesados y considerar los resultados obtenidos como la energía sonora característica de la carretera.
- Medir durante largos períodos (más de 24 horas).

Como regla general, los períodos de medición deben ser tan largos como sea necesario para conseguir un buen conocimiento de la evolución del ruido durante un día, una semana o una estación, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas de la zona. Por lo tanto, el tiempo de medición no tiene límite. Sin embargo, como deben realizarse con frecuencia estudios y evaluaciones en cortos períodos de tiempo, la mayoría de las normas nacionales han fijado mínimos intervalos de tiempo para medir, que dependerán del propósito de la evaluación.

El método de medición nórdico NORDEST (Dinamarca, Noruega, Finlandia y Suecia) recomienda un intervalo mínimo de 15 minutos o de 500 vehículos circulando durante el día. Los niveles nocturnos normalmente se calculan partiendo de mediciones obtenidas durante el día, sobre la base de los datos que proporciona la intensidad del tráfico. En U.S.A. son típicos los períodos de 15 minutos de tiempo en la hora de más ruido; no obstante, se realizan mediciones de hasta 24 horas en caso de existir disconformidad, en un determinado lugar, o si no se dispone de la información necesaria para identificar la hora de más ruido. En Austria, el tiempo de medición depende de la distribución del tráfico, siendo el período característico, un intervalo de 30 minutos. En Holanda, el intervalo mínimo es de 10 minutos o de 100 vehículos que circulen al tiempo. En Japón, para condiciones típicas de ruido debe realizarse al menos una medición durante cada uno de los siguientes períodos: mañana, mediodía, tarde y noche.

Sin embargo, cuando no se conoce la distribución de la circulación, deben hacerse mediciones de hasta 24 horas para evaluar adecuadamente el L_{eq} del día y los niveles de ruido nocturnos. Si se conocen los datos de circulación,

pueden seleccionarse intervalos más breves, pero el período de medición mínimo aceptable es de 15 minutos. La evaluación del ruido producido en las carreteras, que sufre importantes variaciones estacionales de intensidad de tráfico, debe realizarse teniendo en cuenta niveles de ruido estacionales altos.

3.3.4. Puntos de medición

El número y situación de los puntos de medición necesarios para identificar el sonido medioambiental de una zona, depende del tipo de mediciones que se vayan a realizar. Los criterios de selección pueden resumirse en dos generales:

- Seleccionar puntos en donde sea probable que el ruido del tráfico pueda perturbar a la población, y
- Seleccionar los puntos que sean representativos de las diferentes situaciones y condiciones de la zona.

El primer criterio se relaciona principalmente con la identificación de puntos negros y con la cuantificación del nivel de ruido en las zonas donde se construyen carreteras y éstas son transitadas. En estos casos, los puntos seleccionados deben representar las condiciones de exposición al ruido del mayor número posible de personas. Los puntos importantes no son necesariamente aquéllos que presentan niveles de ruido más elevados, sino que son los puntos exteriores de los edificios que están más cerca de la carretera, tomados a diferentes alturas. Las mediciones han de hacerse fuera de los edificios, a una distancia de 1 ó 2 metros de aquellas fachadas que están más cerca de la carretera. Si los puntos están situados en frente o muy cerca de una ventana, se debe indicar si las medidas se han tomado con las ventanas abiertas o cerradas, para poder evaluar el efecto de reflexión. La Figura 3.4 muestra algunas posiciones posibles de los puntos de medición.

Cuando las actividades humanas se realizan en zonas abiertas (jardines, senderos, campos de deporte, etc.), los puntos de medición deben situarse donde se prevea obtener los niveles de ruido más elevados. El micrófono se debe colocar al menos a 1,5 metros por encima del suelo.

Figura 3.4. Situación de puntos de medición cerca de las fachadas.



El segundo criterio se aplica tanto a situaciones existentes como preoperacionales y se relaciona con la distribución espacial de los niveles de ruido de la zona. Por ejemplo, el diseño de planos acústicos o la comprobación de los resultados de las previsiones. La selección de puntos representativos conlleva la determinación de “sectores homogéneos”, que incluyan carreteras y puntos de recepción. En la práctica, el procedimiento más eficaz consiste en dividir la zona en sectores, en donde la emisión de sonido pueda considerarse constante, y donde las características topográficas no experimenten cambios importantes. Los puntos de medición se fijan para cada sector, de forma que los niveles de ruido se puedan deducir a partir de los resultados obtenidos de las mediciones.

No obstante, resulta muy difícil diseñar metodologías universales de medición del ruido en el exterior. Situaciones diferentes requieren diferentes metodologías. Como regla general, se acepta que la utilización de intervalos mínimos diseñados para situaciones estándar conocidas, pueda no ser suficiente para lograr una adecuada evaluación, cuando esos intervalos se aplican a otras situaciones, lo que constituye, desafortunadamente, la práctica más común. La selección de los puntos de medición depende de los objetivos del estudio y de las condiciones de emisión y propagación del ruido dentro de la zona.

Para calcular los niveles estándar diurnos y nocturnos se suelen corregir los resultados obtenidos en las mediciones. Los métodos aportan fórmulas para compensar las diferencias de las condiciones del tráfico y del tiempo de referencia L_{eq} . Estas correcciones se realizan empleando los datos de la circulación.

3.3.5. Métodos de medición en el interior de los edificios

Se trata de determinar el nivel sonoro en el interior de un edificio para conocer el aislamiento de los muros exteriores y verificar si, en el interior, se cumplen las normativas a aplicar. Cuando se realizan medidas en el interior de un edificio, éstas deben hacerse simultáneamente en el interior y el exterior (cerca de la ventana). Esto impone la utilización de un analizador de dos vías o de dos instrumentos de medida del nivel sonoro.

Algunos países (Noruega, Holanda, etc.) han desarrollado métodos de cálculo para la evaluación de niveles de ruido interiores. Están fundados en la reducción del ruido a partir de datos como la ventilación, el volumen de la habitación, el estado de las ventanas desde el punto de vista acústico, etc. Los coeficientes de aislamiento de los diferentes elementos de la fachada son tomados en ficheros de datos accesibles a los programas informáticos.

3.3.6. Métodos de medición para la evaluación de la eficacia de las pantallas acústicas

Una pantalla anti-ruido debe ser estanca en el plano acústico. Las propiedades de los materiales o paneles que constituyen una pantalla pueden ser testados en cámara anecoica y obtener, de esta forma, el aislamiento acústico,

siguiendo las normas ISO 140 y ISO 717, y la absorción acústica según la norma ISO 54. No obstante, la eficacia de una pantalla depende de sus propiedades finales, una vez que está construida. Los elementos y procedimientos de construcción (unión entre estructuras, juntas de dilatación, elementos de apoyo, etc...) van a determinar la eficacia de la pantalla, tanto como las propiedades acústicas de los materiales y paneles.

La eficacia de la pantalla acústica se determina midiendo la atenuación de ruido dada por la pantalla. En algunos países la eficacia de las pantallas se ensaya por medio de un ensayo especial de “pérdida de inserción simulada”.

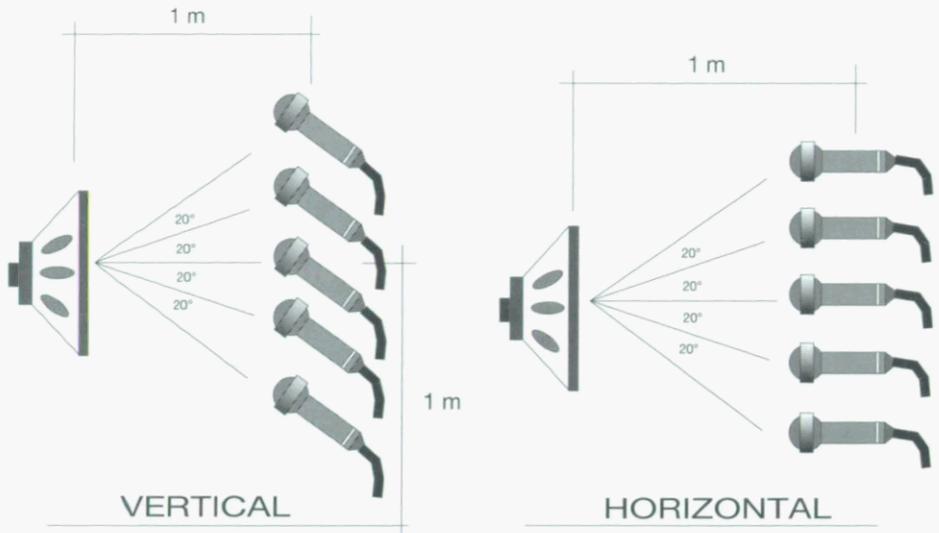
La diferencia de ruido debido a la pantalla (o pérdida por inserción) es la diferencia de niveles de ruido antes de levantar la pantalla y menos el nivel de ruido en el mismo lugar después de su construcción. Si se pudieran construir pantallas acústicas instantáneamente, sería posible determinar fácilmente la pérdida por inserción y ésta sería la diferencia entre las mediciones realizadas “antes” y “después”. Sin embargo, debido al tiempo que se necesita para construir una pantalla, surgen nuevos factores para los que han de hacerse correcciones. Estos factores incluyen cambios en los volúmenes y calidades de tráfico, velocidad, niveles de emisión, y suelo. La pérdida por la inserción de la pantalla debe tomar en consideración estos factores; para este fin se emplean micrófonos en los puntos de referencia. Dependiendo de las circunstancias del lugar, los micrófonos se colocarán delante, encima o al final de la pantalla. Para determinar la pérdida por la inserción de la pantalla, a lo largo de una carretera, en donde todavía no se hayan construido una barrera, se realizan mediciones simultáneas en los puntos de referencia. Se llevan a cabo dos tipos de mediciones: unas se realizan antes de construir la pantalla y otras después. Si fuera necesario, debido a un cambio en las condiciones iniciales, se realiza un ajuste en las mediciones de referencia y la pérdida por inserción de la pantalla se calcula restando las mediciones realizadas “después” de las realizadas “antes”.

El procedimiento para determinar la pérdida por inserción de una pantalla a lo largo de una carretera nueva o ya existente, donde la pantalla haya sido construida, utiliza una combinación de mediciones realizadas “después” y de resultados obtenidos a través de un método de cálculo. Se realizan mediciones para calibrar el modelo de cálculo. Los lugares de referencia se utilizan de nuevo para dichas mediciones. Una vez completada la calibración, se calcula el nivel de ruido “anterior”. La pérdida por inserción se determina entonces tomando la diferencia entre el “antes” calculado y los niveles de ruido medidos “después”.

Finalmente, se redactará un informe sobre las mediciones, que deberá incluir información relativa al lugar donde se hayan realizado, características materiales y geométricas de la pantalla, intensidad de tráfico e instrumentos acústicos utilizados.

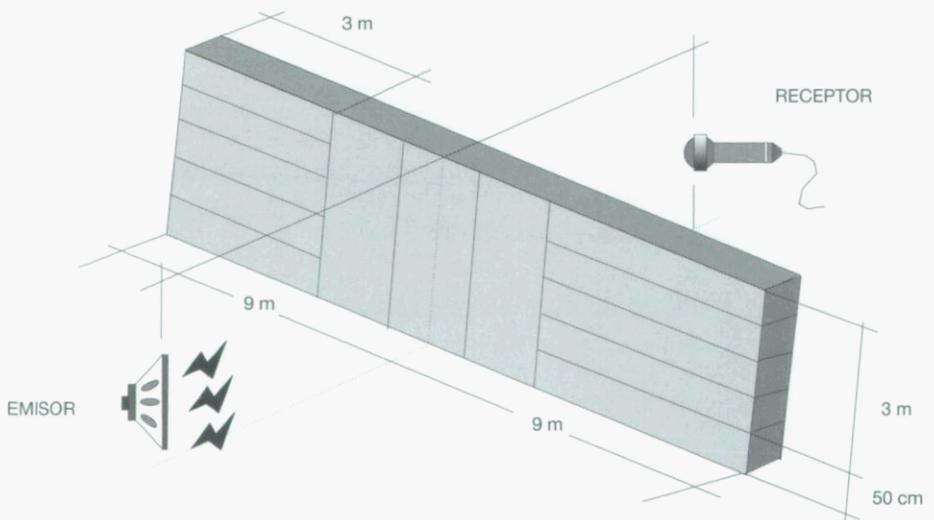
Los ensayos de simulación de la pérdida por inserción se realizan sobre una pantalla de dimensiones normalizadas en una zona plana muy reflectante (es decir cemento liso, hormigón bituminoso no poroso, o análogo), sin obstáculos

Figura 3.5. Determinación de la directividad de la fuente.



reflectantes alrededor del lugar del ensayo. En todos los casos, la naturaleza del suelo debe quedar descrita con precisión en el informe del ensayo. La velocidad del viento durante las medidas no debe superar los 2 metros por segundo.

Figura 3.6. Medida en campo libre.



Como fuente sonora se utiliza un altavoz de diametro inferior o igual a 0,15 m. Sus características direccionales deben medirse en el lugar y figurar en el certificado de ensayo.

Se utiliza una pantalla de dimensiones normalizadas (se sugiere 18 m de largo y 3 m de alto) con el borde inferior apoyado sobre una capa de arena, para asegurar la estanqueidad de la zona de cimentación; los eventuales soportes de otros elementos estructurales de la pantalla deben instalarse en la misma posición que en su uso normal.

Se utilizan dos ensayos diferentes:

1. *Medida de la pérdida de inserción:* Se trata de medir la atenuación dada por la pantalla en condiciones estándar, poniendo, eventualmente, en evidencia los efectos de los dispositivos especiales que modifican la atenuación por difracción (borde superior en forma de T, guías de ondas, etc.). Para este ensayo, la fuente sonora se coloca a una distancia de 3 metros de la pantalla y a una altura de un metro. El receptor se coloca a 25 m de la pantalla y sucesivamente a alturas de 1 m y de 2,5 m. El eje que une fuente-receptor debe pasar por el centro de la pantalla. Las medidas deben ser efectuadas con y sin pantalla, los valores de pérdida de inserción se obtienen por diferencia entre las dos medidas.
2. *Medida del aislamiento acústico:* El objetivo de este ensayo es el de evaluar el aislamiento acústico dado por la pantalla en condiciones estándar, poniendo, eventualmente, en evidencia los efectos negativos de las juntas, puentes acústicos, huecos acústicos, etc. Este ensayo no puede sustituir a la evaluación de la capacidad de insonorización (ISO 140 y ISO 717). En este ensayo, la fuente y el receptor están, cada uno, colocados a 1m de distancia de cada lado de la pantalla. El eje fuente-receptor debe pasar por el centro de la pantalla. Las medidas se efectúan con y sin pantalla, siendo el valor del aislamiento el obtenido por diferencia entre las dos medidas.

En Francia, se ha puesto a punto un ensayo, para calcular la capacidad de aislamiento y absorción acústica de las pantallas realizadas. Este ensayo, llamado método por impulsos (AFNOR S 31-089) es un ensayo que se realiza sobre el terreno y permite la determinación de las cualidades acústicas de una pantalla completa (el ensayo en cámara anecoica sólo permite determinar las propiedades acústicas de los paneles o de los materiales).

3.4. CONCLUSIONES

Existe cierta incertidumbre a la hora de evaluar el grado de perturbación que provoca el ruido del tráfico a la población. Sin embargo, es necesaria la evaluación cuantitativa de los niveles de ruido del tráfico, para realizar un análisis objetivo del impacto del ruido, en las zonas que rodean las infraestructuras viales. Esta evaluación se hace sobre la base de los resultados obtenidos mediante la previsión y/o de los métodos de medición. Se prefiere la utilización de métodos de previsión porque permiten simular una gran variedad de

situaciones, y además pueden aplicarse al proceso de planificación. Los métodos de medición se emplean, sobre todo, para evaluar una situación existente, que pueda determinarse a través de la toma directa de datos.

Los métodos de previsión deben ser fiables y operativos. La fiabilidad de los resultados descansa, no sólo en lo adecuado de las fórmulas matemáticas que constituyen la estructura teórica del modelo, sino también en una selección adecuada de los datos de entrada. Para un estudio detallado del ruido, el usuario debe tomar decisiones acertadas a fin de garantizar una correcta simulación. El usuario antes de aplicar el método debe establecer las intensidades del tráfico, los tipos de pavimentos y suelos, las propiedades acústicas de las pantallas, las condiciones de propagación, etc. Con frecuencia, se realizan evaluaciones incorrectas debido a una errónea selección de los datos a pesar de las recomendaciones sugeridas por el método y el uso de programas de ayuda en la toma de decisiones.

Los métodos han de considerar todas las situaciones posibles y calcular el nivel del ruido con un buen grado de precisión. Para confirmar la precisión de los resultados, las mediciones se realizan para ser comparadas con las previsiones. Los métodos de previsión desarrollados por los Países Miembros de la OCDE, han demostrado en mayor o menor medida, su fiabilidad en situaciones estándar. No obstante, todos ellos se deben mejorar para realizar cálculos más apropiados de determinados elementos. Con frecuencia, los viaductos, túneles, obstáculos, terreno y otros no se emplean correctamente en los modelos de cálculo.

Las fórmulas de cálculo principales son similares para todos los métodos. Las diferencias surgen cuando se calculan niveles de emisión de ruido, o cuando se introducen correcciones para los efectos de atenuación. Todos estos métodos son semi-empíricos, lo que significa que las fórmulas teóricas se combinan con resultados experimentales. En este sentido, los métodos se basan en una gran número de datos sobre el ruido obtenidos de técnicas de medición del sonido. Estos datos se relacionan con la potencia de emisión de los vehículos, características de absorción de los pavimentos, materiales y terreno, difracción del sonido sobre los obstáculos, influencia de las condiciones atmosféricas, etc.

Los modelos informáticos resultantes de estos métodos, normalmente no permiten el cambio o adaptación de parte de los datos de referencia. Esta es la razón por la que los modelos diseñados para un país determinado (lo que significa determinados tipos de vehículos y de condiciones de circulación) puedan no resultar fiables al utilizarlos en otros países. Sería muy interesante permitir a los usuarios acceder a estos datos. De esta manera, los datos de emisión y otros más podrían modificarse para adaptar el cálculo a las condiciones específicas de cada país. En cualquier caso, ha de ser continuo el proceso de actualización de los datos de entrada, especialmente respecto de la emisión del ruido de los vehículos.

Por otra parte, los modelos informatizados presentan una falta de definición en cuanto a los datos de entrada topográficos. Los cambios experimentados

en la topografía, la textura del terreno, las características geométricas de las pantallas y muchos otros, son con frecuencia despreciados o considerados incorrectamente. Se espera que el desarrollo de programas 3-D pueda ayudar de forma importante a mejorar los programas de cálculo del ruido producido por el tráfico.

Desde un punto de vista práctico, la conexión entre los programas de previsión con los de diseño gráfico (AUTOCAD o similares) ha demostrado ser muy útil para el procedimiento tanto de entrada como de salida de datos. Un punto digitalizado en un formato corriente, debería ser introducido sin dificultad en los programas de previsión, sin problemas de compatibilidad. Por otra parte, una conexión con un programa de diseño gráfico aumenta considerablemente las posibilidades de transmisión y comunicación de la información.

Los métodos de medición se basan en la adquisición directa de datos del sonido utilizando instrumentos específicos. Hoy en día, existe una gran variedad de sonómetros y sistemas que resultan adecuados para este propósito. Normas nacionales e internacionales determinan la calidad de los instrumentos atendiendo a su grado de precisión.

Es muy importante destacar que las mediciones sólo son relevantes cuando se aplican a situaciones habituales. Estrictamente, los resultados de las mediciones se relacionan sólo con el lugar y el tiempo en que se toman las medidas. En consecuencia, la mayoría de los métodos de medición incluyen fórmulas y parámetros para adaptar sus resultados a las condiciones estándar.

La medición del ruido es una técnica que puede desarrollarse en campo abierto o que puede ser controlada en cámaras sin resonancia. Estas últimas mediciones, que se orientan a la determinación de las características acústicas de los materiales, son reguladas por normas internacionales. Las mediciones en campo abierto se realizan en condiciones reales y constituyen las técnicas de medición básicas para la evaluación del ruido producido por el tráfico.

Los métodos de medición tradicionales se centran en la selección de los intervalos de tiempo y de los puntos de medición. Los diferentes intervalos de medición se eligen dependiendo del objetivo del caso en estudio. La tendencia es estudiar el nivel del ruido, a lo largo de períodos de hasta 24 horas, para efectuar una adecuada evaluación diurna y nocturna.

Cuando se conoce la intensidad del tráfico a lo largo del día, los intervalos pueden acortarse y se pueden corregir los resultados mediante fórmulas matemáticas. El intervalo mínimo de medición normalmente utilizado es de 15 minutos. Incluso en estas circunstancias, se recomienda realizar mediciones a largo plazo, al menos en un punto dentro de la zona.

Los puntos de medición han de seleccionarse según el tipo de actividades humanas que se desarrollen en el lugar de estudio. Los lugares preferidos son aquéllos en donde se espera que se alcancen niveles máximos y que tenga lugar una actividad humana o que ello sea probable.

Cuando se determina la eficacia de las pantallas acústicas, el cálculo se hace mediante la sustracción entre los niveles de ruido medidos “antes” y “después” de la construcción de la pantalla. Es necesario tomar medidas simultáneamente en un punto de referencia, contando con el campo de protección que ofrece la pantalla para controlar los cambios en la emisión y propagación del ruido. Si se detectan variaciones en las condiciones, se deben hacer correcciones en el cálculo.

Los métodos de evaluación, ya sean de previsión o de medición, deben utilizarse cuidadosamente: El ruido producido por el tráfico varía en el espacio y en el tiempo. Los procedimientos de medición y los métodos de cálculo recogidos en las normas nacionales pueden considerarse como garantía mínima para una correcta evaluación. Sin embargo, la validez de estas técnicas no es la misma para todas las situaciones. Los usuarios de estos métodos han de conocer su ámbito de aplicación y su precisión. Asimismo deben seleccionar los métodos adecuados, atendiendo al objetivo que se quiera lograr en la evaluación.

Cuadro 3.3. Comparación de métodos de evaluación del nivel del ruido

Criterios	Medidas	Ecuaciones y curvas	Cálculo	Programas informáticos	Maquetas
Precisión en utilización normal dB (A)	± 1,5	± 3		± 2	± 2
Resultados	Para un instante dado	Simposis de resultados	Para un punto particular Optimización	En todas formas Optimización	Completo pero sin optimización
Duración	tanto como sea necesario	1 día	1 día *	2 semanas *	2 meses
Flexibilidad Estudio de variantes Reajustes			Bastante buena	Buena	Bastante buena
Coste	Medio	Muy bajo	Bajo	Medio	Muy alto
Valor pedagógico	Bueno	Bueno	Mediocre	Malo	Muy bueno

* En una zona dada, la evaluación del ruido por programas informáticos es más rápida que por un simple método de cálculo; pero en general, los programas informáticos se aplican a zonas amplias, lo que explica que el tiempo necesario, para un programa informático, se haya estimado en dos semanas.

3.5. BIBLIOGRAFIA

1. BARRY T.M. and J.A. REAGAN (1978). FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model. FHWA-RD-77-108, Washington DC.
2. C.E.T.U.R. Guide du bruit des Transports Terrestres. Prévision des niveaux sonores. CETUR, 92200 Bagneux, France.
3. CLIFFORD R. BRAGDON. Noise Pollution. University of Pennsylvania Press.
4. DEPARTMENT OF TRANSPORT AND WELSH OFFICE (1988). Calculation of road traffic noise. HMSO, London.
5. KURZE (1988). Prediction methods for road traffic noise. Seminar on road traffic noise. Grenoble, France.
6. NELSON, P. (1987). Transportation noise. Butterworths & Co. Borough Green, Sevenoaks, Kent TN 158 PH, United Kingdom.
7. NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION. NBSTÖY, Brukerveileder for NBSTÖY 4.0. Oslo, Norway.
8. NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION. VSTÖY. Oslo, Norway.
9. NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION. TSTÖY. Oslo, Norway.
10. TOBUTT and NELSON (1990). A model to calculate traffic noise levels from complex highway cross-sections. Report RR245, Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, United Kingdom.
11. NATURVARDsverket (1989). Beräkningsmodell för vägtrafikbuller. Naturvardsverket Förlag Distributionen, Box 1302, 171 25 Solna, Sweden.
12. MINISTER OF PUBLIC HOUSING, PHYSICAL PLANNING AND ENVIRONMENT (1982). Measurement and calculation prescription noise load inside buildings. Staatscourant 1982, nr 228, The Netherlands.

4. DISEÑOS Y ACTUACIONES ANTI-RUIDO

4.1. CLARIFICAR LAS NECESIDADES DE CONTROL DEL RUIDO Y DECIDIR PRIORIDADES

La adopción de medidas en la lucha contra el ruido puede ser mejorada si en los lugares en los que hay que actuar se ha realizado, previamente, un estudio de las condiciones acústicas existentes. En los informes de numerosos países (España, Suiza, Holanda, Noruega) se afirma que la existencia de estos estudios evitará la generación, en el futuro, de nuevos problemas ambientales asociados al ruido y, asegurará la correcta adopción de las medidas a tomar para reducir el número de personas afectadas.

Esto constituye un punto de partida adecuado para mejorar la situación de las zonas que están particularmente afectadas y decidir las prioridades de actuación. Esta medida permite, igualmente, comprobar los resultados de las diferentes medidas correctoras adoptadas. Disponiendo de una base de datos sobre las personas afectadas por el ruido se pueden realizar previsiones sobre la situación existente y evaluar el efecto de las medidas aplicadas. La creación de bases de datos sobre el ruido se está empezando a realizar en numerosos países. Estas pueden, por ejemplo, estar unidas a modelos de distribución del tráfico y/o a parte de los métodos destinados a suministrar información sobre los efectos de las diferentes medidas correctoras.

Los criterios con los que los diferentes países juzgan la necesidad de mejorar la situación relativa al nivel del ruido, varían. Pero todos coinciden en que hay que considerar el factor ruido antes de que comience la construcción de las nuevas carreteras. Igualmente, el problema que representa el ruido debe evitarse en el caso de la construcción de nuevos edificios en las proximidades de las carreteras, sin embargo, parece ser que este es un tema menos prioritario que el que constituyen las actuaciones en las nuevas carreteras. Varios países han, además, expuesto que los problemas del ruido deben ser encauzados y resueltos, no solo en el caso de la construcción de nuevas carreteras, sino que también hay que introducir medidas correctoras en el caso de las carreteras existentes. La red actual de carreteras, en los países de la O.C.D.E., está bastante completa, y las carreteras nuevas no constituirán más que una pequeña parte de aquélla. Es necesario, pues, aportar mejoras a lo largo de las carreteras existentes si se quiere llegar a una reducción significativa del número de personas expuestas al ruido. Países como, Holanda, Suiza, Austria, Noruega y Japón desarrollan programas especiales de "atenuación del ruido" para mejorar la situación a lo largo de las carreteras existentes.

Cuando se ponen en marcha medidas de reducción del ruido, deben tenerse en cuenta, además de las cuestiones acústicas, otras consideraciones. Una de ellas es el aspecto estético cuya importancia varía de un país a otro.

La práctica indica que existen discrepancias sobre cual, de los diferentes usos del suelo, es el más sensible al ruido, y al que, por tanto, se debe priorizar en la actuación. En general son las zonas habitadas las más necesitadas de una solución. Un estudio sobre las diferentes funciones de las zonas expuestas al ruido a lo largo de las carreteras proporciona una base sólida, a partir de la cual, se pueden decidir prioridades.

No existen reglas internacionales que permitan fijar estos “criterios” de decisión de prioridades ya que están basados, esencialmente, en valores culturales y políticos.

4.2. DIFERENTES MEDIDAS PARA CONTROLAR EL RUIDO

Para asegurar una mayor eficacia de las medidas tomadas contra el ruido, es necesario realizar de antemano una planificación urbana adecuada y organizar y reglamentar el transporte. Existen numerosos medios de reducir el ruido o de sistematizar los diferentes tipos de medidas. En Italia, existen dos tipos de medidas contra el ruido: de protección activa y de protección pasiva. Las de protección activa son medidas para reducir el ruido en el origen (acción sobre el vehículo y la calzada). Las medidas de protección pasiva están concebidas para reducir el ruido durante su propagación, es decir, durante su trayectoria entre el origen y el receptor (pantallas anti-ruido, túneles artificiales, etc.). Las diferentes medidas a adoptar, para controlar el ruido, las hemos basado en:

- 4.2.1. Medidas físicas aplicadas a la carretera y/o su entorno
- 4.2.2. Regulación del tráfico
- 4.2.3. Reducción del ruido en el origen

Este capítulo trata de la descripción de medidas físicas aplicadas a la carretera y/o su entorno, y nos hemos centrado, principalmente, en el estudio de los aspectos técnicos que resultan más eficaces para combatir el ruido. La descripción detallada de calzadas silenciosas y pantallas acústicas se tratará en los capítulos 5 y 6.

4.2.1. Medidas físicas aplicadas a la carretera y su entorno

Las medidas físicas de reducción del ruido aplicadas a la carretera o a su entorno, deben estar incluidas en los planes de ordenación del territorio, con objeto de lograr su optimización y evitar la aparición de nuevos problemas. Las medidas contra el ruido deben aplicarse junto con otras que solucionen otros problemas ambientales generados, o que pueden generarse, por la carretera o el tráfico que lleva asociado.

Las carreteras y su entorno próximo tienen diferentes formas y funciones (ver fig. 4.1) lo que se traduce para los usuarios en una calidad del medio ambiente muy variable. Es importante que las carreteras se adapten a su en-

Figura 4.1. Diferentes factores físicos y funcionales deben ser considerados a la hora de poner en marcha las medidas anti-ruido.



torno y que éste sea tenido en cuenta a la hora de adoptar medidas de reducción del ruido.

Estas medidas, así como sus impactos se describen en los párrafos siguientes.

Realización de nuevas carreteras

A veces, la construcción de una nueva carretera puede eliminar o reducir el problema del ruido existente en una zona en la que un número importante de personas están expuestas al mismo, aunque por regla general la decisión de la realización de esta nueva construcción no se toma por criterios acústicos y obedece a otras consideraciones juzgadas más importantes, como puede ser la mejora de un acceso.

A veces, esta nueva construcción puede aumentar los niveles sonoros en zonas sensibles al ruido. Con objeto de que estos problemas no ocurran, es necesario analizar la situación de la zona desde las fases de planificación y diseño de la nueva carretera.

En la última década, la mayoría de los países se han esforzado en considerar el factor del ruido antes del comienzo de la construcción de una nueva carretera. Esto significa que antiguos conceptos han sido revisados para tener en cuenta los problemas derivados de la contaminación acústica, incluso si esto implica la adopción de más amplias y más costosas soluciones.

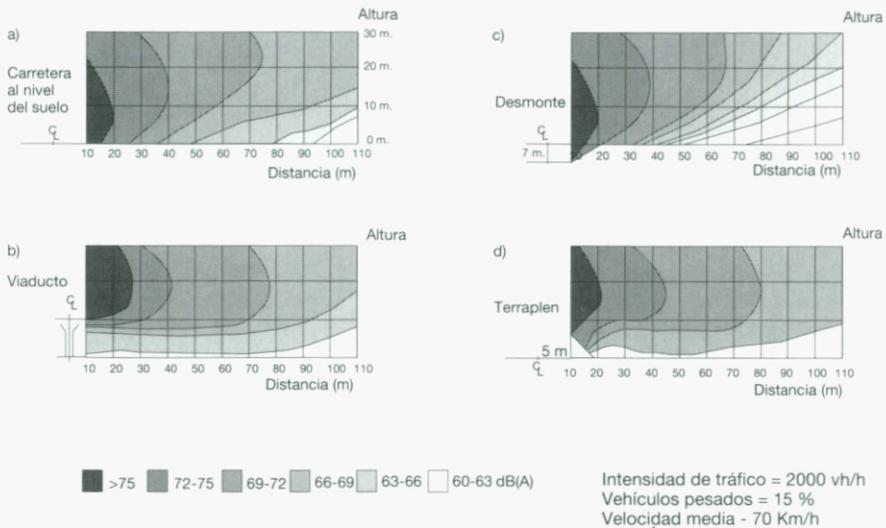
Concebir el diseño de la carretera y su implantación en el terreno basándose en la atenuación del ruido, conduce a buenos resultados. El trazado y la situación de la carretera en relación con el terreno dan diferentes grados de reducción del ruido. A continuación se da una descripción de los resultados que se pueden obtener.

A la hora de construir una carretera, las Autoridades deben considerar, además, otros factores, como son: la contaminación del aire, las vibraciones, los costes, la seguridad y la obstrucción visual. Antes de la construcción, debe estudiarse la relación coste/beneficio, y llevar a cabo un análisis de las consecuencias que se deriven de las medidas adoptadas.

El diseño de la carretera y su relación con el terreno

Las carreteras que discurren a la misma cota que el terreno pueden armonizar con el paisaje, pero no constituyen una buena solución en cuanto a la reducción del ruido (figura 4.2.a), salvo, si en el terreno existente entre la carretera y el receptor, la onda del ruido es interceptada. Las carreteras en terraplén, en trinchera, sobre viaducto o bordeadas por montículos de tierra son más eficaces para reducir el ruido que las carreteras que discurren al mismo nivel del terreno. El nivel del ruido disminuye cuando la distancia entre el receptor y la carretera aumenta. La figura 4.2 muestra como se propaga el ruido de la circulación.

Figura 4.2. Influencia del trazado de la carretera sobre el ruido.

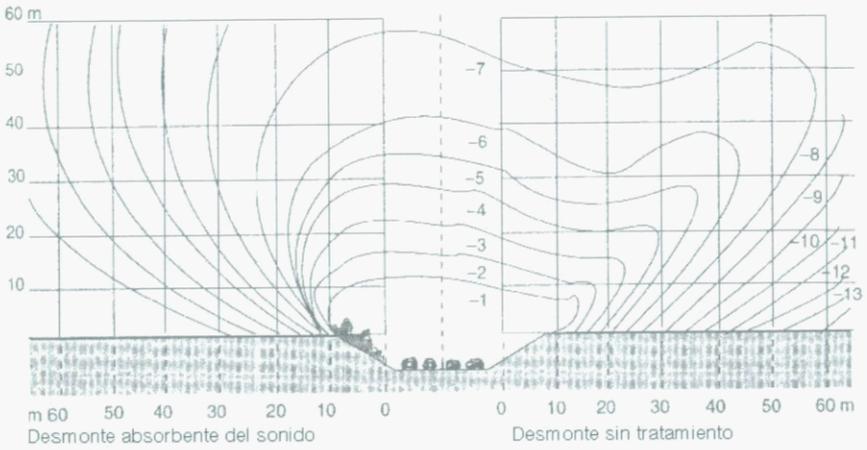


Sea cual fuere la configuración general, los viaductos, las trincheras, los terraplenes y los túneles, tienen un papel a desempeñar en la armoniosa construcción de nuevas infraestructuras de transporte. La elección de cualquiera de estas alternativas de trazado es una cuestión compleja y es frecuente que la decisión se dicte al margen de consideraciones de coste, y sólo por las características del terreno.

Las carreteras en trinchera (figura 4.2.c) son bastante eficaces para reducir el ruido. En comparación con las carreteras que están al mismo nivel del terreno, en las que su trazado va en trinchera el ruido puede disminuir de 5 a 10 dB(A) en función de la profundidad de la construcción.

No obstante, para llegar a obtener una importante reducción del ruido es necesario prever paredes, de terreno blando, a ser posible plantadas de matorrales y árboles, de forma que ofrezcan protección a las poblaciones vecinas. La pendiente de las paredes debe ser lo más elevada posible para asegurar la máxima eficacia. En medio urbano y zonas edificadas esta medida es costosa y difícil de aplicar, requiere soluciones técnicas para solucionar el drenaje del agua y en los costes hay que considerar el transporte de tierras. La naturaleza del suelo y del terreno tienen igualmente su importancia. Las pantallas anti-ruido situadas en la cima de las trincheras (Capítulo 6), pueden aumentar el efecto reductor del ruido y pueden, igualmente, para un objetivo de reducción de niveles sonoros previamente fijado, constituir una solución más económica. En zonas rurales es donde las carreteras en trinchera son una solución mejor y más rentable desde el punto de vista de la relación coste/eficacia.

Figura 4.3. Disminución del ruido producido en una carretera en trinchera.



Las *carreteras en terraplén* son, igualmente, desde el punto de vista acústico, más eficaces que las que están en la misma cota que el terreno (figura 4.2). La altura del terraplén debe rebasar los 2,5 m. Si existen tierras sobrantes esta solución resulta muy económica, y al igual que sucede con las carreteras en trinchera, el talud (pared) debe ser absorbente. Esta solución es más eficaz en zonas rurales que en zonas urbanas. Para aumentar la reducción del ruido, se pueden construir pantallas en lo alto del talud, aunque esta solución no es muy estética.

Carreteras en túneles

No hay ninguna duda que, en zonas urbanas y densamente edificadas, la mejor solución, tanto desde el punto de vista acústico, como del espacio disponible, es hacer pasar la carretera por un túnel. Además de esta forma, el medioambiente no queda afectado por la carretera o por el tráfico que circula por ella. Por otro lado, esta solución es costosa y comporta un riesgo de impacto durante las fases de construcción y de explotación. Los túneles pueden, igualmente, provocar en los usuarios una sensación de claustrofobia. Los problemas de escape de gases son importantes en el interior del túnel y en la proximidad de las bocas, y además, los túneles necesitan sistemas de iluminación, de ventilación y de drenaje. La ventaja del túnel radica en que las necesidades de espacio son mínimas y evita el efecto de “corte” característico de las grandes infraestructuras de transporte. Numerosos factores indican, sin embargo, que no es siempre fácil construir túneles debido a la topografía, al estado del suelo, al drenaje del agua y a la reglamentación técnica correspondiente.

Un túnel es con frecuencia costoso y lleva asociados unos gastos de mantenimiento considerables. La experiencia de Noruega nos indica que el valor de un túnel es muy variable. En zona urbana, un túnel de dos carriles (en roca dura) cuesta alrededor de 10 millones de dólares por kilómetro; un túnel de cuatro carriles, alrededor de 15 millones y un túnel de seis carriles, alrededor de 30 millones de dólares. En zonas suburbanas el coste de un túnel de dos carriles es de alrededor de 5 millones de dólares por kilómetro. En Australia, los costes son más elevados: alrededor de 130 millones de dólares por kilómetro en un túnel en Melbourne (Australia). Los bajos costes en Noruega se deben a la utilización de una tecnología muy avanzada.

Los gastos de mantenimiento son, igualmente, muy variados y con frecuencia bastante elevados, en particular cuando se requiere equipos especializados. Para un túnel de cuatro carriles con dos “tubos”, varían de 50.000 a 300.000 dólares por kilómetro y año, y para un túnel de seis carriles de 65.000 a 600.000 dólares.

Gracias a las nuevas tecnologías, en una zona edificada, un túnel realizado en una roca dura puede ser una solución mejor y, en algunos casos, más económica que una carretera convencional a la que se le añada la indispensable protección contra el ruido. Esta solución permite reducir considerablemente el número de personas expuestas al ruido, en particular en las grandes áreas urbanas. Se ha desarrollado una buena tecnología que ha permitido dar soluciones satisfactorias tanto desde el punto de vista económico como práctico. Noruega parece incluso estar a punto de resolver los problemas de contaminación utilizando torres de ventilación y reduciendo el polvo que proviene del túnel. En el “túnel de Oslo” hay un seguimiento de las emisiones a través de un centro de control y el aire se mantiene “puro” gracias a los 80 potentes ventiladores que están instalados en cada uno de los 2 “tubos” paralelos por los que

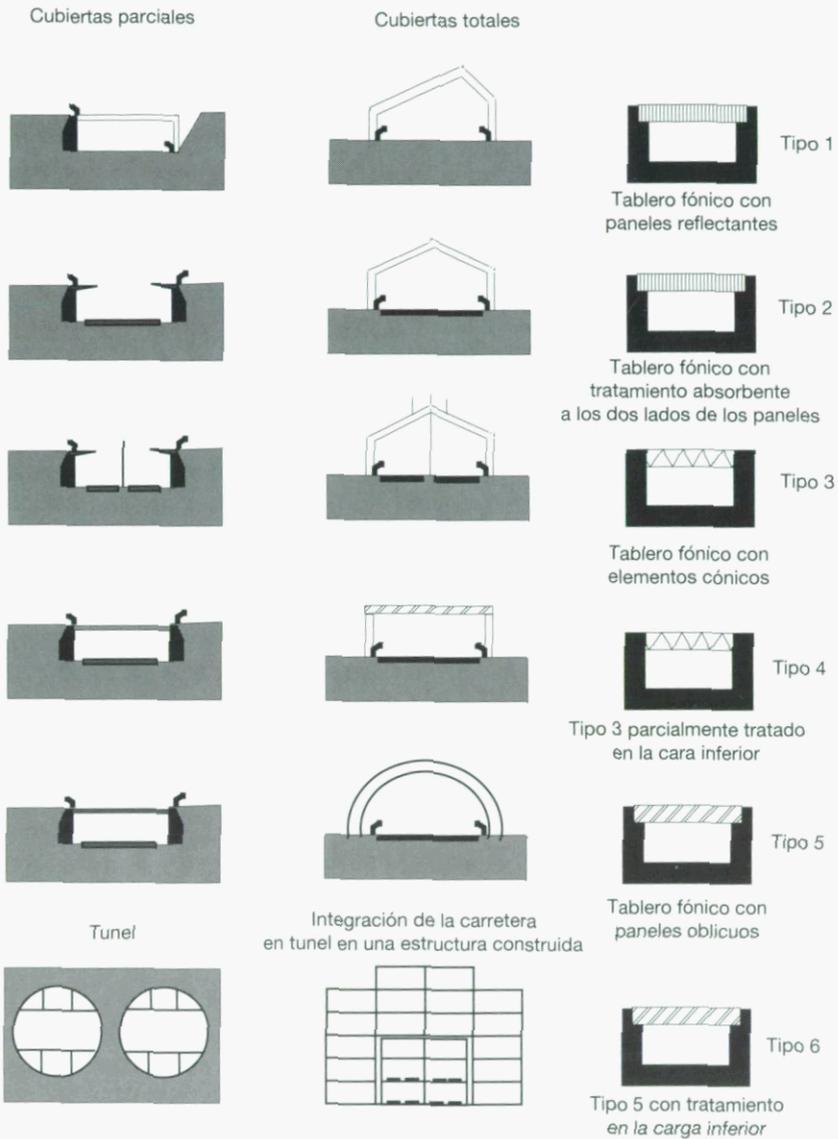
pasan 3 carriles. Estos ventiladores se ponen automáticamente en marcha en el momento en el que el nivel de contaminación llega a un umbral previamente fijado. Se ha introducido igualmente una técnica de retención de polvo a través de filtros electrostáticos. Se suprime así de un 80 a un 90% de partículas. Actualmente se está perfeccionando un tipo de conversión catalítica de los gases de combustión liberados en el túnel. Los resultados de estos ensayos parecen prometedores.

Los túneles en terreno blando (falso túnel) constituyen otra alternativa para cumplir los requisitos medioambientales. Se trata de una operación costosa pero que en zonas de elevada densidad de población donde la circulación es intensa y el vecindario muy sensible al ruido, puede ser una buena solución. La cubierta completa de la carretera, contribuye, igualmente, a atenuar el efecto de “corte” que esta produce. La construcción de estos túneles es más económica que la de los perforados en roca y en diferentes ciudades importantes del mundo se ha adoptado esta alternativa, que a su vez ha servido para reducir otros “costes ambientales” que la construcción de carreteras trae consigo, como la contaminación atmosférica, la seguridad vial, etc. En Holanda, la experiencia indica que el coste estimado de la cubierta de una autopista con dos vías de tres carriles es, aproximadamente, de 50 millones de dólares por km. En Noruega, para construcciones en falso túnel, se estiman unos valores de, 10-15 millones de dólares por km. para una carretera de dos carriles, y de 30-50 millones de dólares por km. para una compuesta por seis carriles.

Figura 4.4. Falso túnel en zona suburbana.



Figura 4.5. Diferentes tipos de cubiertas (ref. 1).



Fuente: Krell (52)

Los costes de mantenimiento son ligeramente más bajos que para un túnel perforado pues el sistema de drenaje es más sencillo.

El problema del ruido a la entrada de los túneles no ha recibido demasiada atención. Sin embargo, el nivel sonoro es allí más elevado que en una carretera a cielo abierto, y hay que alejarse al menos 50 ó 100 mts. de la entrada del túnel para encontrar un nivel normal de ruido. Este

nivel, como se ha demostrado en las experiencias realizadas en Italia, Japón, Austria, Suiza y Noruega, se puede reducir forrando los muros del túnel con materiales absorbentes. El ángulo que forman la entrada y el receptor es, desde el punto de vista acústico, igualmente importante.

Las carreteras en falso túnel pueden realizarse con todo tipo de cubiertas o con tableros fónicos (ver figuras 4.5 y 7.3).

Carreteras en viaducto

Los países de mayor experiencia en la construcción de carreteras en viaducto, para reducir ruidos, son Japón e Italia. Los viaductos constituyen un eficaz medio para reducir el ruido si esta misión es contemplada en la fase de su diseño, y especialmente si están contruidos con paneles laterales sólidos sin juntas o con juntas selladas en el momento de su construcción. El efecto “pantalla”, que es más eficaz en estas carreteras elevadas que en las carreteras a nivel del suelo, depende de la altura de los paneles y está relacionado con la altura y la distancia a la que se encuentra el observador. En Italia se ha demostrado que una pantalla acústica puede integrarse satisfactoriamente en el diseño de un viaducto, incluso desde el punto de vista estético. Una especie de barrera de “seguridad” puede, asimismo, instalarse obteniéndose un buen rendimiento acústico como lo demuestra el denominado viaducto “ecotécnico” (ver fig. 4.6).

Figura 4.6. Viaducto ecotécnico realizado en Italia.

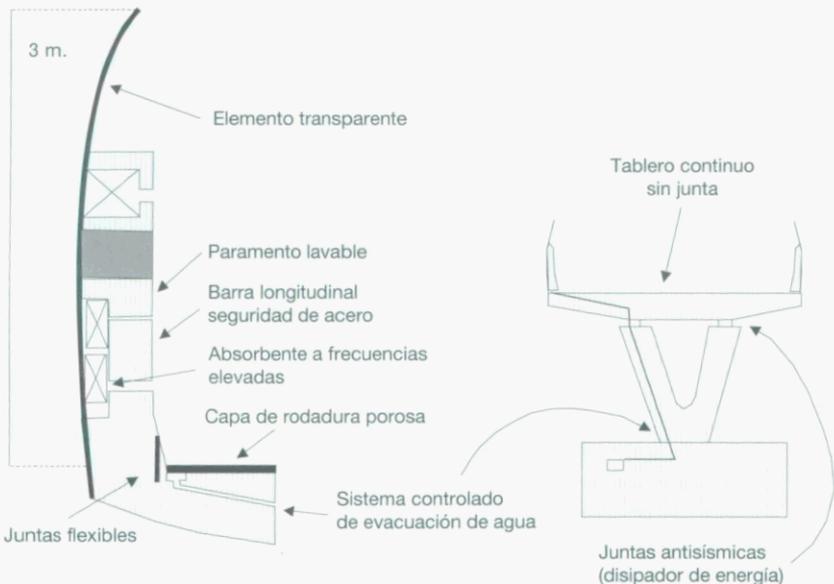
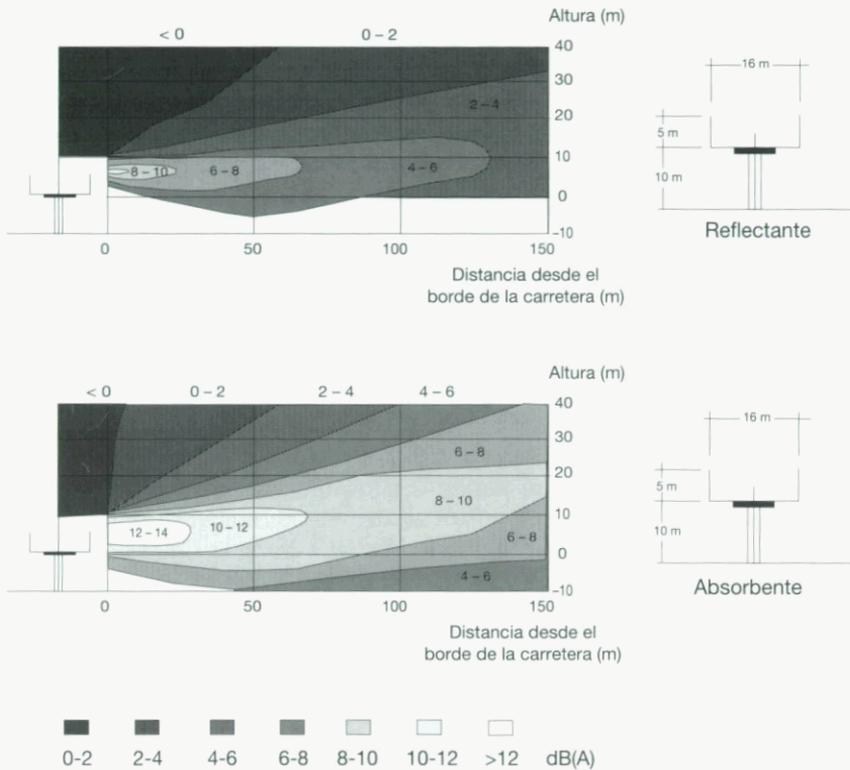


Figura 4.7. Reducción del ruido sobre un viaducto con paredes laterales absorbentes y reflectantes.



También en Italia se ha demostrado que los viaductos son más eficaces para reducir el ruido si son diseñados con un perfil transversal en forma de cajón rectangular, en lugar de con vigas autoportantes, con juntas de expansión más estrechas y paredes laterales sólidas. Las paredes laterales de hormigón pueden estar formadas de materiales absorbentes. Si sobre la parte superior de las paredes del viaducto, y a lo largo de todo él, se colocan paneles, que incluso pueden transparentes, el efecto de reducción del ruido aumenta, aunque hay que controlar las posibles reflexiones que estos elementos pueden producir (ver fig. 4.7).

Los costes de construcción de un viaducto son altos y prácticamente del mismo orden que los de un túnel. Sin embargo, los costes de mantenimiento son mucho más bajos pues no hay gastos derivados de la ventilación, iluminación, drenaje, etc.

Desde un punto de vista estético, estas construcciones son difíciles de integrar en una zona edificada o urbana. Varios países opinan que es difícil construir viaductos en armonía con el paisaje y no existe unanimidad en la ponderación que se le debe dar a la integración de la carretera en

éste. Algunos países como Italia y Japón permiten que la carretera domine el paisaje, mientras que en otros como Austria y Noruega, la opinión pública considera que la carretera debe relegarse a un segundo lugar y se debe priorizar el paisaje.

Utilización del espacio circundante de la carretera

Es importante conocer la forma en que la carretera interacciona con el espacio adyacente para poder controlar el ruido. En algunos países las autoridades locales han introducido normas que impiden la construcción de viviendas en zonas afectadas por el ruido. En Dinamarca, por ejemplo, el ruido de la circulación vial se tiene muy en cuenta en las decisiones locales y municipales de urbanismo. Desde 1980 todas las viviendas están edificadas en zonas donde el nivel de ruido es inferior al límite permitido actual (55 dB(A)). Sin embargo existen algunas excepciones sobre todo en las zonas de elevada densidad de población, y se han dictado normas relativas al nivel de ruido tolerable en el interior de los edificios así como a la disposición de las habitaciones, de manera que los salones y los dormitorios estén orientados hacia el lado más silencioso. Las autoridades imponen igualmente que el edificio sirva de pantalla entre la carretera y su entorno próximo y alrededores.

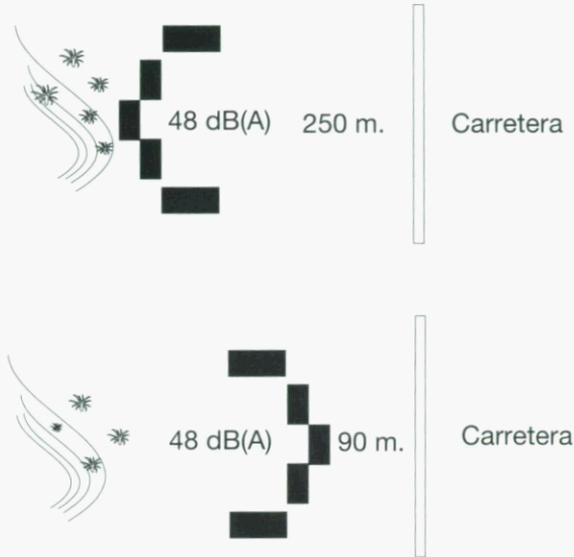
Numerosos países han tomado conciencia de que todavía gran número de personas están expuestas al ruido por la ausencia de control en las zonas de nueva construcción y buscan la forma de atenuarlo. En Holanda se exige no situar las habitaciones sensibles al ruido de cara a la carretera. Esto se aplica a los dormitorios, salones y cocinas americanas.

Zonas de atenuación (zonas tapón)

Varios países están introduciendo una “zona de atenuación” entre las áreas sensibles al ruido y las autopistas o carreteras. En Japón estas “zonas de atenuación” han sido establecidas a lo largo de carreteras de una cierta anchura y en vías importantes próximas a lugares residenciales. Con frecuencia es difícil conciliar los intereses económicos y la conservación de una distancia suficiente entre la carretera y las edificaciones. En determinados países, incluyendo EE.UU., las autoridades responsables de las carreteras deben utilizar fondos del Estado para adquirir las tierras o los derechos de urbanización a fin de evitar que se construyan nuevas casas en las proximidades de la carretera. Cuando ya existen edificaciones en la “zona de atenuación” planificada, la situación es aún más difícil. En Finlandia las casas situadas en las nuevas “zonas de atenuación” son compradas y demolidas.

Es posible disminuir la superficie de la “zona de atenuación” si se tienen en cuenta los problemas del ruido desde el diseño y construcción de los edificios. Estos pueden servir de “zona de atenuación” para el espacio situado detrás de ellos (ver fig. 4.8). En campo abierto, donde únicamente

Figura 4.8. Efecto de la disposición de la edificación sobre el nivel del ruido.



es la distancia la que hace que disminuya el nivel de ruido, es posible que estas zonas no tengan las suficientemente dimensiones para lograr una reducción satisfactoria de los niveles acústicos. Las dimensiones dependen del número de vías, del nivel de tráfico y del límite de velocidad local establecido, y varían de 50 a 600 mts. Los diques de tierra, se ha comprobado, que son muy efectivos cuando se sitúan en las “zonas de atenuación”. En Holanda, Italia y Japón se ha comprobado, igualmente, que los edificios pueden constituir una “zona de atenuación” eficaz (la edificación continua/ininterrumpida funciona como pantalla entre la carretera y el receptor). Con frecuencia se construye, con este fin, una fila continua de garajes o locales industriales (Fig. 4.9).

Los edificios de oficinas pueden igualmente hacer de “zona de atenuación” (tapón) para las zonas residenciales situadas detrás de ellos, pero estos deben estar colocados de manera continua a lo largo de la carretera.

La vegetación constituye otra posible pantalla en una “zona de atenuación”. El ruido puede reducirse de 3 a 8 dB(A) pero sólo si la franja de vegetación tiene una anchura de 30 a 80 mts. y es de gran densidad tanto a nivel del suelo como en altura. En los lugares donde el viento se dirige hacia las zonas afectadas, la vegetación puede contribuir a disminuir, a la vez, los efectos del viento y del ruido (Medidas realizadas, han demostrado que en zonas “anchas” el nivel del ruido puede reducirse de 5 a 7 dB(A). Esta solución es buena cuando la vegetación existe previamente. Los setos realizan un efecto acústico muy débil (0,1 dB(A)

Figura 4.9. Una fila continua de garajes puede constituir una barrera anti-ruido.



por metro de ancho) y no deben ser plantados para reducir el ruido sino, sólomente como barrera visual.

Reutilización de zonas afectadas por el ruido

Las zonas en las que el nivel del ruido es elevado y su reducción a niveles aceptables es difícil de conseguir, por la aplicación de medios físicos, se pueden dedicar a otros usos distintos al de la vivienda. Este cambio de uso del suelo corre el riesgo de ser muy lento si para ello es necesario comprar los terrenos y los edificios a lo largo de la carretera.

Instalaciones a lo largo de la carretera

En la mayoría de los países no existe legislación sobre las mejoras que en lo que concierne a las condiciones acústicas, habría que adoptar a lo largo de las carreteras existentes, sin embargo un número determinado de éstos, juzgan prioritario reducir el nivel del ruido en los edificios ya construidos. Esto se puede realizar de diferentes formas, y a continuación se describen algunos de los métodos más corrientes. en los párrafos siguientes.

Pantallas acústicas (ver cap. 6)

La construcción de pantallas acústicas es una buena solución, utilizada por muchos países, para reducir el ruido producido, tanto por las nuevas

carreteras, como por las ya existentes. Este tipo de protección se utiliza, sobretodo, en carreteras que se encuentran a una cierta distancia de los edificios, con el fin de evitar el efecto de obstrucción visual, y en el caso de zonas de alta densidad de edificación. En este último caso, las pantallas que presentan el aspecto de cerca ajardinada compacta tienen muy buena aceptación (caso de urbanizaciones). Desde el punto de vista estético debe procurarse que se integren en el entorno al que deben proteger. En el caso de edificios altos, hay que tener en cuenta que las pantallas acústicas sólo protegen la zona situada en su “sombra” y, por tanto, los pisos superiores no quedan protegidos.

Las pantallas pueden diseñarse de diferentes formas, según el lugar donde vayan a ser construidas. Los aspectos estéticos y de integración en el paisaje pueden, en alguna oportunidad, entrar en conflicto con las condiciones acústicas que deben cumplir. Se ha dado el caso de que distintas Autoridades han prohibido la instalación de pantallas en orden a conservar las vistas o no estropear la estética del paisaje.

Dado que la vegetación casi siempre aporta un efecto visual positivo, las pantallas verdes (recubiertas de vegetación) pueden constituir otra alternativa. Estas han sido acogidas favorablemente en Holanda, sin embargo en Finlandia y Noruega su implantación no ha sido satisfactoria, debido a sus condiciones climáticas.

Para proteger pequeñas zonas en las carreteras en las que no es posible instalar largas pantallas acústicas, una solución eficaz puede ser la construcción de pantallas aisladas (locales). Este sistema está especialmente recomendado en lugares donde la instalación de pantallas largas está condicionada por razones financieras o estéticas y cuando se trata de proteger edificios dispersos situados en zona rural. Los edificios, también se comportan como una pantalla y proporcionan un cierto confort acústico en su zona de “sombra”.

Aislamiento de fachadas

Cuando no es posible redistribuir las habitaciones en las viviendas de forma que los dormitorios y el cuarto de estar den hacia el lado silencioso, el aislamiento de las fachadas es otra posible solución para reducir el ruido en el interior de los edificios. Este método, que consiste en sustituir las ventanas, aislar los muros e instalar un sistema de ventilación en el edificio a proteger, es utilizado en gran número de países en zonas densamente pobladas cuando no es posible adoptar otra solución, y no obstante, sólo sirve para cumplir normativas de niveles sonoros en el capítulo referente a “interiores”. En EE.UU. los colegios son los edificios priorizados en cuanto a aislamiento de fachadas se refiere, mientras que en la mayor parte de los países europeos se aíslan las fachadas destinadas tanto a viviendas como a edificios públicos.

La sustitución de ventanas normales por ventanas aislantes (cristal triple y cuádruple) permite reducir hasta 44 dB(A) el nivel de ruido, pero

para poder alcanzar esta reducción es necesario mejorar el aislamiento de los muros y del techo si, como sucede en las casas de madera, su resistencia es insuficiente.

El aislamiento de fachadas es un método muy utilizado para mejorar los niveles sonoros en situaciones ya existentes. En Austria, Japón, Holanda, Dinamarca, Suecia y Noruega se han invertido sumas importantes en tales mejoras. En el caso de adoptarse esta medida por iniciativa privada los propietarios reciben, con frecuencia, subvenciones o devoluciones de parte de su inversión. La cantidad reintegrada o el porcentaje de las subvenciones concedidas, varían de un país a otro, siendo, en la mayor parte de los casos, los servicios de carreteras los que se encargan de aportar los fondos, aunque también es cierto que existen algunos municipios que suministran una ayuda financiera parcial. La razón por la que estas medidas no están totalmente subvencionadas es que se estima que los ocupantes de las viviendas sobre las que se actúa obtienen otras ventajas adicionales como son, un mejor aislamiento térmico, menos costes de mantenimiento, una revalorización del inmueble, etc.

Los gastos de aislamiento dependen de la superficie y de como los edificios han sido construidos. Si sólomente deben sustituirse algunas ventanas, el coste será menor que si es necesario, aislar uno o varios muros, o instalar sistemas de ventilación. Otra variable importante, a considerar en el cálculo del coste, es el nivel de reducción del ruido que se desea alcanzar. El coste puede variar desde 2.000 dólares para un apartamento hasta 50.000 dólares para una vivienda unifamiliar aislada.

Los gastos de mantenimiento corren a cargo del propietario, y no disponemos de ningún dato a este respecto.

La mayoría de los países recomiendan que en el interior de las viviendas, debe haber un nivel equivalente de ruido, en medidas realizadas durante 24 horas, de 37 a 40 dB(A), tras la labor de aislamiento. Las normas austríacas dan recomendaciones específicas sobre la reducción exigible al elemento "aislante" en función del nivel de ruido existente en el exterior (ver cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Recomendaciones específicas relativas a la atenuación del ruido por medio de ventanas aislantes, en Austria	
Nivel del ruido en el exterior	Reducción de ruido exigida
< 70 dB(A) durante el día < 60 dB(A) durante la noche	38 dB(A)
> 70 dB(A) durante el día > 60 dB(A) durante la noche	44 dB(A)

El inconveniente que este procedimiento presenta es que la protección contra el ruido disminuye considerablemente cuando se abren las ventanas, y dado que es importante que las viviendas se ventilen suficientemente, es necesario, frecuentemente, prever la instalación de una ventilación “auxiliar”. Para esto, en algunos casos, se han instalado ventiladores con silenciadores pero la experiencia ha demostrado que se bloquean al cabo de cierto tiempo. El mejor método es la ventilación forzada o mecánica. En Austria se devuelven los gastos de instalación de ventilaciones “silenciosas” que renuevan el aire, y por tanto lo mantienen fresco, en los dormitorios. La ventilación puede instalarse igualmente en la parte baja de las ventanas (fig. 4.10).

En algunas viviendas la construcción de una nueva fachada (galería acristalada) puede ser mejor solución que la realización del aislamiento completo de la fachada, descrito anteriormente. Como regla general, se puede decir que esta medida es la mejor solución en el caso, de una renovación completa de la vivienda, o en el de nueva construcción y se ha aplicado en países como Dinamarca, Noruega y Holanda.

Materiales absorbentes del sonido para diferentes estructuras

A lo largo de una carretera el sonido se refleja en los muros de hormigón, en las estructuras de apoyo, etc. Forrar de material absorbente las superficies duras contribuye a reducir la reflexión del ruido. Las autoridades japonesas han instalado con buenos resultados, paneles absorbentes, sobre la superficie de las paredes de carreteras en trinchera, en la entrada de los túneles y sobre las fachadas de los edificios. Austria tiene igualmente alguna experiencia en este tema. La experiencia obtenida hasta este momento nos indica que es necesario desarrollar buenas técnicas de mantenimiento y fijar normas relativas a la estética.

Figura 4.10. Dos tipos diferentes de sistema de ventilación en fachada.



Figura 4.11. Aislamiento de fachada de una vivienda existente con una galería acristalada.

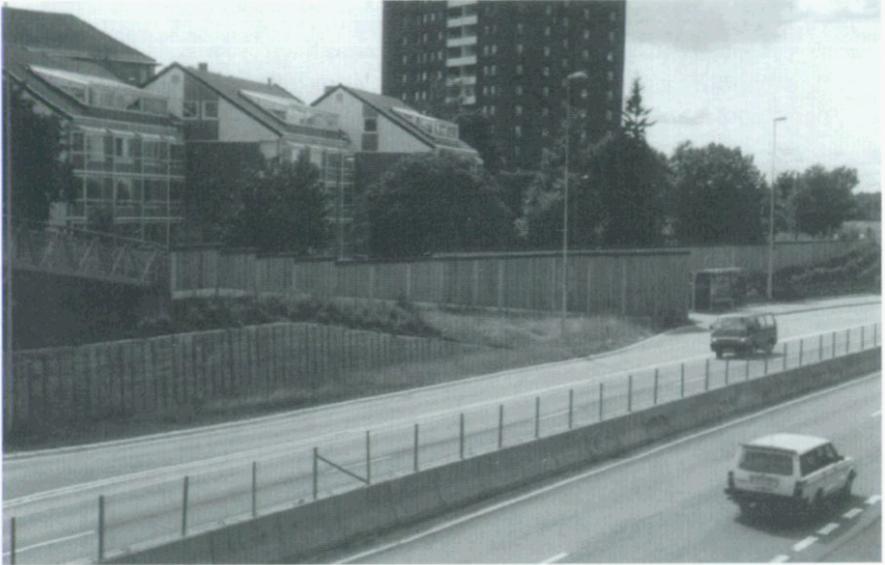
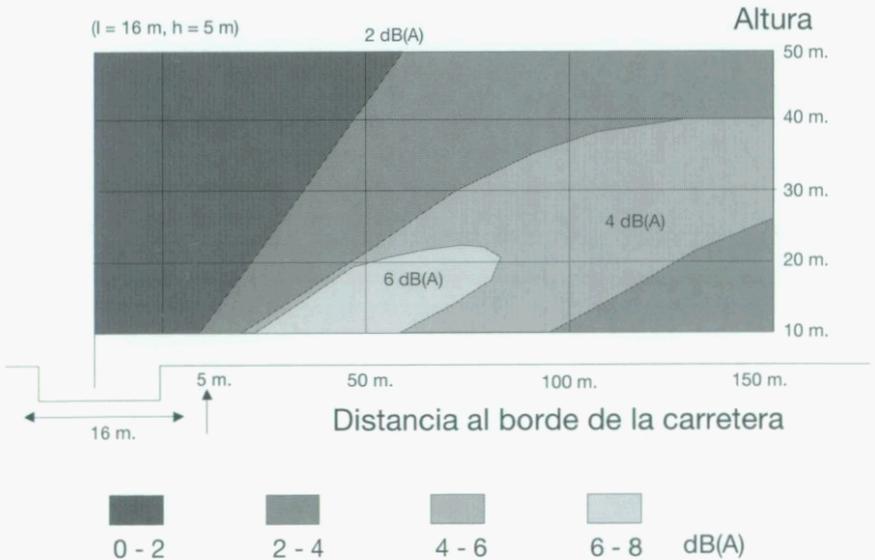


Figura 4.12. Reducción del ruido en un tramo en trinchera con muros verticales absorbentes (comparado con un tramo en trinchera no tratado, ref. 1).



4.2.2. Regulación del tráfico

La regulación del tráfico incluye, por ejemplo, calles con un único sentido de circulación, el cierre completo de ciertas calles a la circulación de automóviles, etc., con el fin de canalizar el tráfico lejos de zonas sensibles al ruido o, por lo menos, reducir su flujo. Los anillos de circunvalación, de zonas urbanas, puede considerarse que constituyen una medida eficaz, ya que ofrecen la posibilidad, siempre y cuando la planificación urbana vaya en la misma dirección, de disminuir el tráfico en el interior de la zona considerada.

Los vehículos que producen más ruido son los vehículos pesados. Controlar o alejar este tipo de tráfico de las zonas sensibles al ruido es un sistema eficaz de reducir este problema. En Austria y Holanda se han establecido itinerarios reservados a vehículos pesados con resultados positivos. Asimismo en Holanda se han colocado pantallas y diques a lo largo de los grandes ejes nacionales, estimándose que se ha realizado una inversión de, aproximadamente, 240 millones de dólares.

Favoreciendo un tráfico más fluido (a la vez, más regular y más lento), se puede obtener una reducción de 2 a 5 dB(A) (Leq-24 h.) en las vías urbanas. En Holanda, el gobierno central ha decidido que las autoridades locales (Municipios) que consigan, mediante la implantación de medidas control de tráfico, reducciones de 3 dB(A) o más en Leq(24h.) medidos en el exterior de las viviendas, recibirán una subvención.

Algunas ciudades de Europa, para restringir el tráfico que accede a las zonas urbanas, están experimentando con la aplicación de distintos tipos de medidas, ya sea de una forma conjunta o separada, como son: medidas de tipo fiscal (peaje en todos los accesos a la “gran” ciudad, impuestos, etc.), mayores inversiones en transporte público, mejora de las condiciones de desplazamiento de peatones y ciclistas. Todas ellas contribuyen a reducir los niveles sonoros, pero su efecto solamente será noticable cuando se combinen con otro tipo de medidas.

Tanto los mapas de aforos como los medioambientales, de tráfico, realizados exclusivamente en zonas urbanas, tienen por fin el concentrar tráfico en las zonas menos sensibles al ruido. Contribuyen a la toma de decisiones para reducir el tráfico en zonas sensibles al ruido y permiten, de esta forma, disminuir el número de personas afectadas. Las soluciones basadas en la regulación del tráfico, pueden igualmente contribuir a reducir los presupuestos dedicados a otras medidas, tales como el aislamiento de fachadas, hasta un 30%.

4.2.3. Reducción del ruido en su origen

La fuente emisora de ruido, en el caso que nos ocupa, es el vehículo. A velocidades bajas predomina el ruido del motor, mientras que a velocidades altas, domina el ruido debido a la rodadura. Controlar el ruido en su origen es la mejor solución para todos los agentes implicados en el problema, aunque hay que tener en cuenta que el ruido no puede nunca suprimirse por com-

**Cuadro 4.2a. Síntesis de medidas destinadas a reducir el ruido
Zonas construidas / zonas abiertas**

	Acción Anti-Ruido	Carreteras / edificios existentes				Carreteras / edificios nuevos			
		Eficacia	Viabilidad	Durabilidad	Coste	Eficacia	Viabilidad	Durabilidad	Coste
I	Carreteras en trinchera	***	**	****	**	***	****	****	**
	Carreteras en terraplen	**	**	****	**	**	****	****	***
	Túneles en roca	****	*	****	*	****	**	****	*
	Falsos-Túneles	****	**	****	*	****	***	****	*
	Viaductos	***	**	****	*	**	***	****	*
	Zona de amortiguación	***	*	****	*	**	*	****	**
	Zona de amortiguación con pantallas	****	**	****	**	****	***	***	**
	Rehabilitación de zonas sensibles	****	***	***	**	****	**	***	***
	Pantallas acústicas	**	**	**	***	***	***	**	***
	Pantalla acústica aislada (local)	*	****	**	****	*	****	**	****
	Aislamiento de fachadas	***	***	***	***	***	***	***	**
	Material absorbente del ruido	*	**	**	***	*	****	**	**
II	Gestión del tráfico	**	***	***	***	***	***	***	***
	Itinerarios especiales para vehículos pesados	**	***	***	***	***	***	***	***
	Fluidez del tráfico	**	**	**	***	**	***	**	***
	Incremento del transporte público	*	***	**	**	Igual que para las carreteras existentes			
III	Vehículos más silenciosos por homologación	**	**	**	***	Igual que para las carreteras existentes			
	Pavimentos silenciosos	**	**	*	***	**	****	*	***
	Neumáticos silenciosos	**	**	*	****	Igual que para las carreteras existentes			
	Control del ruido de vehículos en circulación	**	**	**	****	Igual que para las carreteras existentes			

Eficacia

Viabilidad

Durabilidad

Coste

** = mala

* = mala

* = mala

** = muy elevado

*** = media

** = media

** = media

** = elevado

**** = buena

**** = buena

**** = buena

**** = medio

**** = muy buena

**** = muy buena

**** = muy buena

**** = muy bajo

**Cuadro 4.2b. Síntesis de medidas destinadas a reducir el ruido
Zonas suburbanas / campo abierto**

	Acción Anti-Ruido	Carreteras / edificios existentes				Carreteras / edificios nuevos			
		Eficacia	Viabilidad	Durabilidad	Coste	Eficacia	Viabilidad	Durabilidad	Coste
I	Carreteras en trinchera	**	**	****	**	***	****	****	***
	Carreteras en terraplen	**	**	****	**	**	****	****	****
	Túneles en roca	****	*	****	*	****	***	****	**
	Falsos-Túneles	****	**	****	*	****	****	****	**
	Viaductos	**	**	***	*	**	***	****	*
	Zona de amortiguación	**	*	***	**	**	****	***	***
	Zona de amortiguación con pantallas	****	*	****	**	****	*	****	***
	Rehabilitación de zonas sensibles	****	**	***	**	****	**	***	**
	Pantallas acústicas	**	**	**	**	***	***	**	***
	Pantalla acústica aislada (local)	*	****	**	****	*	****	**	****
	Aislamiento de fachadas	***	***	***	****	***	**	***	***
	Material absorbente del ruido	*	**	**	***	*	***	**	***
II	Gestión del tráfico	**	**	***	***	***	****	**	***
	Itinerarios especiales para vehículos pesados	**	*	***	***	**	***	***	****
	Fluidez del tráfico	**	**	**	**	**	***	**	***
	Incremento del transporte público	*	*	**	**	Igual que para las carreteras existentes			
III	Vehículos más silenciosos por homologación	*	*	**	**	Igual que para las carreteras existentes			
	Pavimentos silenciosos	**	**	*	**	**	****	*	****
	Neumáticos silenciosos	*	*	*	**	Igual que para las carreteras existentes			
	Control del ruido de vehículos en circulación	*	**	**	****	Igual que para las carreteras existentes			

Eficacia * = mala
Viabilidad * = mala
Durabilidad * = mala
Coste * = muy elevado

** = media
** = media
** = media
** = elevado

*** = buena
*** = buena
*** = buena
*** = medio

**** = muy buena
**** = muy buena
**** = muy buena
**** = muy bajo

pleto, y que existen además una serie de problemas derivados del tráfico que no se resuelven con la aplicación directa de medidas de control del ruido en los vehículos.

Toda tentativa para reducir, de forma **significativa**, el ruido del motor requiere el desarrollo de nuevas tecnologías. Aunque, actualmente es posible reducir un poco los niveles (alrededor de 5 dB(A)), especialmente en el caso de vehículos pesados, no se llegará a una reducción notable sin una nueva tecnología de motor. Esto debe ser un objetivo a largo plazo y los tratados y normativas internacionales pueden desempeñar un papel importante para alcanzar, lo antes posible, esta nueva tecnología. Actualmente unos países fijan normas más severas que otros. En Austria, por ejemplo, sólo se autoriza a los vehículos pesados más silenciosos (ruido < 80 dB(A)) a cruzar los Alpes de noche y se han introducido límites de velocidad (60 km/h) para conseguir disminuir el ruido.

Para llegar a vehículos menos ruidosos se puede introducir un impuesto sobre los mismos en función del ruido que emite el motor. De esta forma, los más silenciosos resultarán más baratos. Sin embargo, aún consiguiendo disminuir el ruido del motor, queda el de rodadura, producido por el contacto existente entre el pavimento de la calzada y el neumático del vehículo. Con objeto de reducir este ruido, en algunos países se ha experimentado con distintos tipos de pavimentos y neumáticos (ver capítulo V), prestando, sobre todo, una especial atención a los firmes silenciosos. Asimismo, los beneficios de la utilización de las ruedas “silenciosas” parecen ser potencialmente altos, no obstante es necesario investigar este tema y fijar nuevas normas, incluso internacionales, que regulen los neumáticos de los vehículos.

4.3. RECOMENDACIONES

La elección y la aplicación de las diferentes medidas para la reducción del ruido varían, naturalmente, de lugar a lugar, de problema a problema y de país a país. Los métodos utilizados dependen de la situación física, de las posibilidades financieras, de la aceptación política y, también, de los valores culturales en los que se fundamentan las tomas de decisión.

El cuadro 4.2. presenta una síntesis sobre la eficacia, la viabilidad, la durabilidad y el coste de diferentes medidas anti-ruido descritas en este capítulo. Aquéllas a las que se asocia mayor número de asteriscos pueden considerarse como las mejores soluciones.

El denominador común en cada uno de los casos es la necesidad de considerar el diseño y la implementación de las diferentes medidas como una parte dentro de un plan global, de forma que se evite la aparición de nuevos problemas. La mejora de los niveles sonoros debe ser un objetivo contemplado en todo plan global destinado a tratar los problemas medio ambientales generados por la carretera y el tráfico que lleva asociado.

Las diferentes tipologías de carreteras y los distintos usos a los que se destina el terreno próximo a éstas deben ser compatibles, tanto desde el punto de

vista funcional como del paisajístico, y esta consideración es importante a la hora de tomar medidas para la reducción del ruido. Por ejemplo, una autovía desempeña, claramente una función de transporte; ésta ha sido diseñada para vehículos que circulan a velocidades altas y por tanto la existencia de una amplia zona “abierta” alrededor suyo es mejor solución, desde el punto de vista acústico, que reducir la velocidad o colocar altas pantallas anti-ruido a cada lado de la carretera. Una calle en una ciudad, sin embargo, tiene una doble función, una de transporte y otra de acceso local. En este caso, la velocidad de circulación de los vehículos es baja y los edificios están próximos a la calle, por lo que los mejores métodos de reducción del ruido son los que se orientan hacia la regulación del tráfico o hacia actuaciones sobre los edificios situados al borde de la vía.

Los problemas de ruido no aparecen sólo a lo largo de las autopistas, sino que se presentan igualmente a lo largo de las vías de acceso a las grandes ciudades o en carreteras menos importantes y, sobre todo, cuando los edificios se han realizado cerca de la carretera o de la calle.

Las zonas adyacentes a las carreteras tienen diferentes funciones o usos, siendo algunas son más sensibles al ruido que otras. Una zona industrial tolerará más ruido que una zona residencial o una escuela, por lo que esto deberá tenerse en cuenta. La función y la forma de la carretera y sus alrededores deben ser analizados antes de poner en práctica medidas para reducir el ruido.

4.4. BIBLIOGRAFIA

1. NELSON, P. (1991). *Transportation Noise Reference Book*. Transport Research Laboratory Department of Transport. Crowthorne.
2. BEYER, E. (1982), *Konstruktiver Lärmschutz, Forschung und Praxis für Verkehrsbauten*. Beton-Verlag. Bonn.
3. VEGDIREKTORATET, MILJØSTYRELSEN (1983). *Prosjektering af boligbebyggelse I støjbelastede byområder, Eksempelsamling*. Copenhage.
4. CONFERENCE EUROPEENE DES MINISTRES DES TRANSPORTS (1990). *Politique des transports et l'environnement*. CEMT, session ministérielle. Préparée en collaboration avec l'OCDE. París.
5. NORDISK VEGTEKNISK FORBUND, UTVALG 64, MILJØE (1988). *Vakre veger uten støyproblem*. Oslo.
6. MARSTEIN, A. (1992). *Basic values for establishing the limits of human toleration of road traffic which vary different urban areas*. Compte rendu de l'Eurosymposium de Nantes sur “La maîtrise du bruit routier en milieu urbain” Nantes, 12-15 mai 1992. LCPC. París.
7. AMUNDSEN, I. et A. MARSTEIN (1988). *Vegtrafikkstory med hovedvekt på planleggingskriterier for støyavskjerming på lang sikt*. Public Roads Administration. Oslo.

8. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION ENGINEERING AND SINTEF TRANSPORT ENGINEERING (1994). *Efficient and environmentally, friendly freight transport*. Compte rendu de la conférence, Vision Eureka, Lillehammer 14-16 juin 1994.
9. HANSSON, H.E. (1990). *Design of a composite wheel*. INTROC 1990, Göteborg.
10. SANDBERG, U. and J.A. EJSMONT (1990). *Tyre/road noise from an experimental composite wheel*. INTROC 90, Göteborg.
11. CETUR (1981). *Bruit et formes urbaines - Propagation du bruit routier dans les tissus urbains*. Bagneux.

5.1. CONTROL DEL RUIDO A TRAVÉS DE LA PAVIMENTACION

5.1.1. Introducción

El ruido percibido por las personas que habitan las proximidades de las infraestructuras de carreteras, depende, como ya se ha mencionado anteriormente, de la potencia acústica emitida por los vehículos y de diversos fenómenos que afectan a las ondas sonoras en su propagación hacia el receptor (amplificación y/o atenuación).

La potencia acústica emitida por el flujo de la circulación depende del número y del tipo de vehículos y de las condiciones de conducción. De hecho, ya sean pesados o ligeros, los vehículos contribuyen a la formación de ruidos de intensidades diferentes, a distintas frecuencias, dependiendo de: 1) su perfil aerodinámico (rozamiento con el aire), 2) ruido de su grupo moto-propulsor (ventilador, caja de cambio, motor, bloque cilindro, el tubo de escape ...) y 3) ruido de contacto neumático-calzada.

Este último tipo de sonido, debido a los trabajos realizados por la industria automovilística para controlar los efectos de los dos primeros¹, es, actualmente, el principal origen de ruido emitido por los vehículos de todas clases, incluso a velocidad moderada (60 km/h), y está estrechamente ligado a la naturaleza del pavimento, en su relación con las condiciones de conducción. La figura 5.5. permite establecer una somera estimación según se encuentre uno en medio urbano o en autopista.

El ruido de contacto neumático-calzada es superior en 2-4 dB(A) a los otros ruidos producidos por la circulación de vehículos ligeros y pesados, rodando respectivamente a velocidades superiores a 50 km/h y 80 km/h.

La percepción del ruido de contacto neumático-calzada está fuertemente influenciada por el pavimento de la calzada, según los mecanismos representados en la figura 5.1: en el punto de contacto neumático-calzada, hay una acción de generación y otras acciones de amplificación y de propagación sobre los que el pavimento puede tener una influencia muy importante.

El análisis individual de estas diferentes acciones que se traducen en la percepción del ruido (es decir, que molestan a los que se encuentran en su proximidad), se ha llevado a cabo de diferente forma en los distintos países de

¹ El nivel de emisión del ruido ha sido reducido estos últimos años, alrededor de 10 dB(A) para los camiones, y de 7 dB(A) para los automóviles particulares.

Figura 5.1. Composición del ruido de contacto neumático-calzada.

<p>FACTORES LIGADOS A LA CARRETERA</p> <ul style="list-style-type: none"> Megatextura _ Macrotextura _ Microtextura _ Tamaño y forma de los áridos _ Propiedades físicas de los áridos _ Temperatura _ 	<p>GENERACION</p>	<p>FACTORES LIGADOS AL NEUMÁTICO O AL VEHICULO</p> <ul style="list-style-type: none"> _ Tipos de neumáticos _ Tipos de vehículos _ Velocidad del vehículo _ Temperatura del neumático _ Presión del neumático _ Condiciones de conducción
<ul style="list-style-type: none"> Reflexiones múltiples entre la carretera y la parte inferior de la carcasa de los vehículos _ Efecto diedro _ Absorción acústica durante la propagación _ vehículo-receptor Condiciones climáticas _ 	<p>PROPAGACION Y AMPLIFICACION</p>	<ul style="list-style-type: none"> _ Dirección de las fuentes del ruido _ Interacción de las fuentes _ Condiciones de conducción _ Superficie del neumático

RUIDO DE CONTACTO NEUMÁTICO-CALZADA

la OCDE. En este capítulo intentaremos examinar y comparar los resultados obtenidos con objeto de establecer una síntesis de los efectos basados en los conocimientos adquiridos, lo que parece bastante prometedor desde el punto de vista de control del ruido vial. La bibliografía y las referencias se presentan cronológicamente al final del capítulo.

5.1.2. Generación del ruido de contacto neumático-calzada

Los mecanismos de generación del ruido neumático-calzada están estrechamente ligados a las características de superficie del pavimento, que interacciona con el neumático, conforme a la figura 5.2. Estos son: vibraciones radiales, resonancias del aire y mecanismos de adherencia.

Las vibraciones radiales se deben a las irregularidades de las superficies de rodamiento, sus longitudes de onda están próximas a las del radio principal de la zona de contacto que queda influenciado por la mega-textura del pavimento (50 mm -100 mm) (ver figura 5.4).

Estas vibraciones transmitidas a través de la suspensión del vehículo, excitan los fenómenos de resonancia: 1) en el interior del habitáculo, que refleja, así, las irregularidades de la mega-textura del pavimento, y 2) en el exterior, entre la capa de rodadura y la parte inferior del vehículo.

Figura 5.2. Mecanismos de generación del ruido de contacto neumático-calzada.

Vibraciones radiales

- Impacto de la goma sobre la carretera
- Impactos de las asperezas de la carretera sobre la huella del neumático

Resonancia del aire

- Resonancia del tubo de escape
- Resonancia de HELMHOLTZ
- Mecanismo de comprensión/escape de aire

Mecanismos de adherencia

- Adherencia y ruptura de adherencia --> vibraciones tangenciales
- Ruptura de contacto goma/capa de rodadura

Las resonancias del aire se producen por mecanismos más complejos que intervienen en el contacto neumático-calzada y se producen a medias y altas frecuencias.

Se supone que el mecanismo que está ligado a la “adherencia” neumático-calzada, incluye las secuencias (ciclos) de contacto/separación de las dos superficies, así como la acción de adherencia efectiva y de separación de los elementos aislados de caucho y pavimento. Estos mecanismos generan las vibraciones tangenciales del neumático. El ruido creado por estos mecanismos queda representado en la figura 5.3., teniendo como origen S1.

Los componentes espectrales del ruido emitidos en el origen S1 están situados a la vez dentro de las bajas y altas frecuencias del espectro. Sin embargo, como la energía a altas frecuencias es superior, ésta decrece en función de las irregularidades de la calzada, como lo muestra la figura 5.4.b.

5.1.3. Propagación del ruido de contacto neumático-calzada

El ruido efectivo hacia el exterior queda indicado por S2. Se genera como en S1, pero enseguida se amplifica por el efecto HORN (también llamado de

Figura 5.3. Mecanismos de propagación del ruido de contacto neumático-calzada.

Propagación en el campo próximo

- Efecto “Horn” (diedro) (amplificación)

Propagación en el campo lejano

- Directividad de las fuentes
- Efectos de difracción
- Absorción acústica



S1 = Fuente de ruido
S2 = Ruido amplificado

trompeta o diedro), y por otros mecanismos indicados en la figura 5.3. Rápidamente es percibido de forma atenuada por los receptores situados alrededor de la carretera.

El efecto diedro resulta de la reflexión de las ondas sobre los lados del diedro formado por las superficies del neumático y de la carretera, delante y detrás de la zona de contacto.

Durante su propagación, desde las fuentes al receptor, el sonido puede controlarse aprovechando las propiedades de absorción acústica de los pavimentos.

Se identifican tres efectos distintos:

- reducción de la amplificación del efecto diedro y la absorción del ruido emitido desde las fuentes mecánicas;
- reducción de la reflexión de las ondas sonoras entre la parte inferior del vehículo y la capa de rodadura de la calzada;
- absorción de ondas sonoras generadas por el ruido neumático-calzada y que se propagan en el espacio existente entre el vehículo y el receptor.

Según esto, se comprende mejor cómo los pavimentos pueden actuar sobre el ruido neumático-calzada así como sobre los otros ruidos generados por la circulación. Pueden tener un efecto sobre la generación del ruido neumático-calzada (S1) en razón de las vibraciones inducidas en los neumáticos por los defectos de unión de la carretera (en cuanto a las mega y macro estructuras) y sobre su amplificación S2, en razón de las resonancias del aire (efecto diedro).

Los pavimentos pueden igualmente ejercer una influencia sobre la absorción local o global de todos los sonidos emitidos (figura 5.4): la absorción global señala la atenuación de todas las ondas sonoras, generadas por el conjunto de fuentes y reflejadas numerosas veces entre la parte inferior de los vehículos y la capa de rodadura de la calzada (fenómeno de reflexiones múltiples), mientras que la absorción local se debe a la atenuación del efecto diedro, y actúa sobre S2. Estos dos tipos de absorción se deben a la superficie y a la estructura interna del pavimento. Las ondas sonoras que golpean estas estructuras absorbentes, son atenuadas por las reflexiones múltiples en el interior de los huecos residuales que contienen.

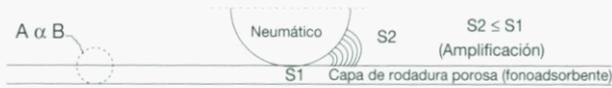
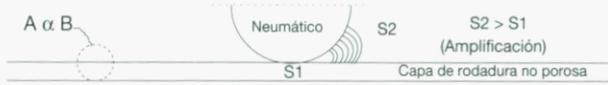
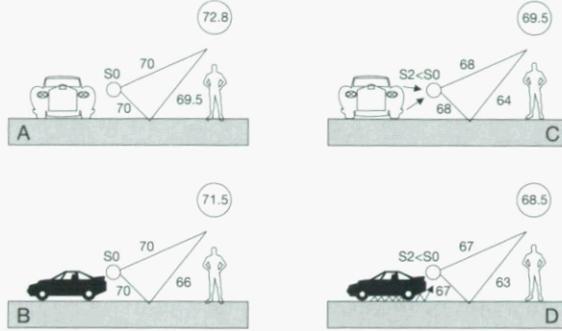
5.1.4. Pavimentos silenciosos

Al final de los años 70 y como resultado del desarrollo de los métodos de medida de la energía acústica y de la comparación de rendimientos de los pavimentos en este terreno (ver la sección 5.2) el conocimiento de los fenómenos que producen estos efectos se ha incrementado regularmente y ha conducido a la adopción reciente, en prácticamente todos los países de la OCDE, de diferentes medidas relacionadas con el diseño, materiales y técnicas de ejecución de los pavimentos dirigidas a reducir el ruido de contacto neumático-calzada.

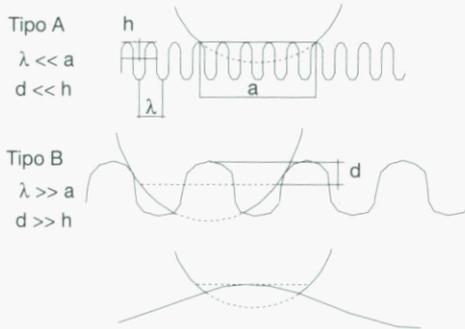
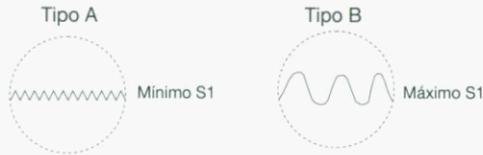
Figura 5.4.

a. Pavimento tradicional ($\alpha = 10\%$)

Pavimento silencioso ($\alpha = 60\%$)



b. Características de las superficies



El pavimento puede actuar reduciendo S1 o S2, obteniéndose la máxima eficacia combinando ambos efectos

Por otra parte, además de un mejor rendimiento del neumático, existe una gran variedad de capas de rodadura de calzadas, aplicadas por las Direcciones de Carreteras, desde la mitad de los años 80, que ha permitido una reducción considerable, tanto de la generación como de la amplificación del ruido.

Las capas de rodadura deben ser elegidas de forma que aseguren una buena capacidad portante, una adherencia y un confort de rodamiento indispensables para la seguridad, así como para reducir de una manera óptima el ruido generado. Una capa de rodadura se escogerá, por tanto, comparando los niveles de rendimiento acústico que se pueden alcanzar haciendo variar las características de las micro-, macro-, y mega-estructuras, obtenidas utilizando mezclas, económicamente diversificadas de forma que se asegure, la drenabilidad y la seguridad requeridas, desde la fase de diseño de la calzada.

Todos los países han llevado a cabo largas investigaciones antes de llegar a las soluciones descritas en este capítulo. Todos partieron del análisis comparativo de los ruidos generados al borde de la vía por los diferentes tipos de calzada existentes (hormigón, asfalto, losas de hormigón) utilizando métodos de comparación de su rendimiento acústico.

La figura 5.5. muestra los niveles medidos al borde de la vía y en el interior de los vehículos en relación con los diferentes tipos de pavimentos analizados.

Figura 5.5. Variación del nivel del ruido de contacto neumático/calzada en función del tipo de pavimentación.



* Incluyendo tratamientos "Shell grip" (Reino Unido) y gripoad (F, D, I)

Más que valores específicos, los países de la OCDE proporcionan gamas o rangos variados. Esta variedad es debida a la falta de homogeneidad de las fuentes sonoras, así como a la extrema diversidad estructural de los pavimentos. Lo importante es evaluar las posiciones relativas de estas gamas o rangos, y en particular, los sonidos medidos en los bordes de la calzada que tienen en cuenta los efectos de absorciones globales y locales.

Se puede así ver que las calzadas con revestimiento asfáltico-poroso (igualmente llamadas drenantes o absorbentes de sonido) están entre las de mejor rendimiento acústico.

Existe, igualmente, una reducción del ruido en capas de rodadura finas y regulares o cuando los valores que caracterizan la mega y la macro textura son bajos, lo cual lleva consigo una reducción de las deformaciones locales de los neumáticos. Esto se puede conseguir utilizando áridos de pequeño tamaño, con granulometrías abiertas y micro tapices o tapices finos. Este tipo de pavimento, que reduce el ruido inducido por las vibraciones de los neumáticos, tiende a aumentar rápidamente la componente debida a la resonancia del aire (tiene un efecto de absorción del sonido despreciable), aunque presenta aún valores de adherencia altos.

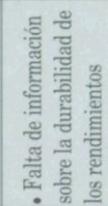
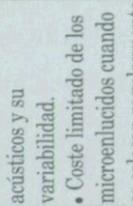
El pavimento de asfalto drenante fue el primero identificado como superficie silenciosa y la investigación acústica ha llevado a optimizar su eficacia. Desde el principio ha sido introducido con objeto de reducir y atenuar el ruido emitido. La eficacia global de los pavimentos drenantes está fuertemente influenciada por sus propiedades de absorción acústica, así como por las características de la macro-textura resultante del tamaño de los áridos y por el proceso de construcción del pavimento.

El ruido de contacto neumático-calzada provocado por las vibraciones a bajas frecuencias, puede quedar atenuado reduciendo la macro-rugosidad durante el proceso de apisonado.

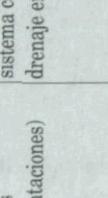
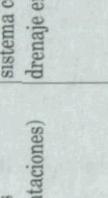
Cuando se construyen superficies asfálticas porosas, el mayor o menor éxito en la obtención de una superficie de áridos lisa (a través del apisonado) y de baja macro-rugosidad, va a determinar la reducción del ruido de rodamiento, (debido a las vibraciones de los neumáticos a frecuencias bajas) y del ruido en el interior de los vehículos. El grado de porosidad resultante de la composición y de la ejecución del pavimento, va igualmente a determinar la reducción de las resonancias del aire que producen el bombeo del mismo, con los anteriormente mencionados efectos de una reducción de la emisión de sonido a altas frecuencias y la absorción global y local de cualquier sonido emitido, así como una muy deseable eliminación de las proyecciones de agua originadas por los neumáticos en tiempo lluvioso.

Numerosos estudios han demostrado que la conservación a largo plazo de la porosidad, depende del rendimiento de los materiales (granulometría, tipo y porcentaje del ligante...) de las condiciones de circulación (velocidad, tipos y porcentajes de vehículos...) y de las operaciones de mantenimiento (proceso de descolmatado de los huecos, mejora del drenaje lateral). A pesar de su eficacia acústica, los revestimientos drenantes no se pueden aplicar en todos los

Cuadro 5.1. Pavimentos silenciosos de carretera

TIPOS DE ESTRUCTURA Y EFECTOS ANTI-RUIDO	FACTORES ANTI-RUIDO	OTRAS FUNCIONES O CARACTERÍSTICAS	PAISES	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA (HZ)	PROBLEMAS DE CONSTRUCCION	OBSERVACIONES DE MANTENIMIENTO	NOTAS
<p>A. Superficie de microtextura</p>  <p>Silencioso respecto de las emisiones S; pocas vibraciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> Hormigón bituminoso fino y muy fino con granulometría Tratamiento superficial por micro-enlucido a base de resina «epoxy» (griproad y Spraygrip) 	<p>Buena resistencia al deslizamiento (alta adherencia)</p>	<p>Dinamarca, Francia, Reino Uni., Italia, Suecia</p>	<p><700; 700-1.250; >1250</p> <p>0 0,1 0,1 0 0,2 0,35</p>	<p>Debe recubrir pavimentos de gran regularidad</p>	<p>Falta de información sobre la durabilidad de los rendimientos acústicos y su variabilidad.</p> <p>Coste limitado de los microenlucidos cuando se colocan regularmente</p>	<ul style="list-style-type: none"> Es recomendable para uso de vías urbanas y también en rotondas circulares y desviaciones Las características de absorción acústica pueden obtenerse con la ayuda de áridos porosos
<p>B. Pavimentos poroso de espesor medio</p>  <p>Reducción de la amplificación por efecto «gravilla»</p>	<ul style="list-style-type: none"> Hormigón bituminoso drenante con espesor delgado (3 a 6 cm) con porosidad variable (20-28%) con betún puro o preferentemente con betún modificado 	<p>Buena permeabilidad que puede igualmente conservarse en carreteras de gran velocidad</p>	<p>Todos los países europeos</p>	<p>Buena absorción para medias frecuencias (500-1200Hz) en función del espesor 0,2 0,45 0,60</p>	<p>Debe colocarse sobre pavimentos clásicos impermeabilizados</p>	<p>Eficacia acústica a largo plazo si la porosidad no se degrada rápidamente</p> <p>Coste medio</p> <p>Buena capacidad de drenaje con vacíos residuales > 20%</p> <p>Son necesarias operaciones de limpieza con objeto de conservar la porosidad</p> <p>Durante el invierno se necesitan tratamientos y sales especiales para fundir - a nieve</p>	<ul style="list-style-type: none"> Uso muy extendido en carreteras de alta velocidad Las cualidades acústicas pueden reforzarse con pantallas Uso en tramos inclinados en inversión

Cuadro 5.1. Pavimentos silenciosos de carretera

TIPOS DE ESTRUCTURA Y EFECTOS ANTI-RUIDO	FACTORES ANTI-RUIDO	OTRAS FUNCIONES O CARACTERÍSTICAS	PAÍSES	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA (HZ)	PROBLEMAS DE CONSTRUCCION	OBSERVACIONES DE MANTENIMIENTO	NOTAS
<p>C. Pavimento poroso de espesor medio o fuerte</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Hormigón bituminoso poroso y hormigón poroso en una o varias capas (siendo la porosidad creciente de arriba hacia abajo) 	<p>Buen rendimiento en cuanto a la reducción del ruido de contacto neumático/calzada, pero utilizado sobre todo cuando se busca un efecto de «depósito» o almacén de agua.</p>	<p>Dinamarca Francia</p>	<p>0,2 0,5 0,65 (15 cm) 0,2 0,5 0,65 (50 cm)</p>	<p>Necesita un sistema de drenaje en la base (al nivel de las cimentaciones)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Válido a largo plazo Coste inicial elevado Necesidad de un sistema complejo de drenaje en profundidad 	<ul style="list-style-type: none"> Usado solo en casos muy justificados debido a la necesidad de reducir el tamaño de las redes de drenaje (debido a los altos costes)
<p>D. Calzada eufónica</p>  <p>Reducción de la amplificación (S2) por el efecto «gravilla»</p>	<ul style="list-style-type: none"> Hormigón bituminoso poroso y hormigón de cemento armado continuo con resonadores 	<p>Buena durabilidad</p>	<p>Italia</p>	<p>0,60 0,45 0,45</p>	<p>Necesita un sistema de drenaje en la base (al nivel de las cimentaciones)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Coste inicial elevado 	<ul style="list-style-type: none"> Estado experimental Conceptualmente muy bueno para el tráfico pasado de mercancías

casos para atenuar el ruido del tráfico, puesto que ciertos aspectos asociados a su utilización (durabilidad, colmatado de poros, mantenimiento en invierno) van, a veces, a acarrear dificultades; en tales casos es posible utilizar otros pavimentos silenciosos como, por ejemplo, los tapices delgados.

Estudios recientes y la investigación aplicada permiten comprender mejor el comportamiento de los micro-tapices, de cara al ruido del tráfico. Estos permiten una optimización de las emisiones de ruido a bajas frecuencias y a medias y altas frecuencias al ofrecer una micro-textura con irregularidades superficiales del orden de pocos milímetros, que no deforman los neumáticos y reducen la presión del aire atrapado, asegurando una buena adherencia¹.

El cuadro 5.1 es una síntesis de los elementos aportados por los expertos del Grupo, relativos a los diferentes pavimentos silenciosos, es decir a los que reducen y/o absorben el ruido de contacto neumático-calzada. (Se tratará de los costes en el capítulo 7).

Como se ha visto, la emisión del ruido depende esencialmente de la textura de la capa de rodadura. La capacidad de atenuar este fenómeno (S1) es sobre todo característica de los pavimentos tipo A. Este pavimento con una capa de rodadura de fuerte microtextura (2 a 3 cm de espesor) permite, principalmente, limitar el ruido emitido. Cuando es permeable, no absorbe los sonidos correspondientes a frecuencias más sensibles (800 - 1200 Hz). En caso de que se prevea que esto puede suceder se pueden utilizar los otros tipos de pavimentos (tipos B, C, D). La absorción sonora está generalmente concentrada en la capa superior salvo en el caso de los pavimentos tipo C y D para los cuales las capas inferiores contribuyen igualmente a la absorción del sonido siempre y cuando la porosidad interna sea buena.

Pavimentos tipo A

Los pavimentos tipo A, utilizados en Alemania (Piedra Mástico-Asfáltica-SMA), en Francia (0/6 Béton Bitumineux Très Mince-BBTM y Béton Bitumineux Ultra-Mince-BBUM), e Italia (delgados tapices y carreteras de fuerte adherencia) se obtienen extendiendo simplemente una sobrecapa de microtextura superficial sobre un pavimento tradicional flexible, rígido o semirrígido. Este tipo de pavimento interesa particularmente a las zonas urbanas o carreteras que soportan una circulación limitada de mercancías y que generan ruido en bajas frecuencias. Se caracterizan por una porosidad nula o reducida (huecos residuales < 2 mm), y las mezclas son de granulometría abierta.

Los pavimentos de tipo A pueden igualmente estar constituidos por una capa de rodadura del tipo de “fuerte-adherencia” o “shell-grip”, conteniendo un porcentaje de áridos porosos con proyecciones pequeñas pero de gran resistencia, o por tapices finos o ultrafinos.

¹ Numerosos países (Italia, Alemania, Francia) prevén la utilización de micro tapices como capas de recarga sobre pavimentos porosos que se han vuelto deslizantes, preservando así parcialmente la absorción sonora.

Para este tipo de pavimento los valores mínimos del coeficiente de absorción acústica son respectivamente de 0.0, 0.1 y 0.1 para los intervalos de frecuencia de 0-700 Hz, 700-1250 Hz y 1250-2000 Hz, salvo en el caso de mezclas compuestas por áridos porosos con granulometría abierta, para los que estos valores suben a 0.0, 0.2 y 0.35. (Los métodos de medida del coeficiente de absorción se presentan en la sección 5.2).

Pavimentos tipo B

El segundo tipo de pavimento, el tipo B, es el más extendido en los países de la OCDE (con porcentajes muy variables de huecos residuales). Este tipo se califica como de espesor medio con alta macro-porosidad (3-8 cm grosor). Está formado por una capa de rodadura constituida por una mezcla bituminosa drenante/absorbente del sonido, preparada con ligantes de tipo normal o de tipo polímeros con huecos residuales del orden de 1 a 10 mm no representando menos del 20% del volumen de la capa (macroporosidad interna).

Las mezclas bituminosas porosas aminoran el ruido de tres maneras diferentes:

1. Minimizando la generación del ruido neumático-calzada, gracias a:
 - La reducción de fenómenos vibratorios debidos al aplanamiento de los áridos en superficie cuando se construye el pavimento.
 - La reducción del fenómeno de resonancia del aire gracias a la porosidad impidiendo así la presurización del aire retenido.
2. Atenuando la amplificación provocada por el efecto diedro en el contacto neumático-calzada ya que los pavimentos de mezcla porosa limitan este efecto.
3. Por medio de una “Mayor” atenuación basada en la diferencia en la propagación del sonido entre un pavimento reflectante y uno absorbente.

Además de sus propiedades acústicas y fotométricas, este tipo de pavimento permite eliminar eficazmente el agua de lluvia (reduciendo así el riesgo del deslizamiento sobre el agua) y, por lo tanto, reduce las proyecciones de agua, característica muy apreciada por los conductores, lo cual explica su éxito.

El coeficiente de absorción acústica de este tipo de pavimento es bastante bueno dependiendo de su espesor (hasta 0,8) para las frecuencias comprendidas en el intervalo de 500 a 1200 Hz. De hecho, en los tres intervalos: 0-700 Hz, 700-1250 Hz y 1250-2000 Hz, alcanza respectivamente los valores mínimos de 0.00, 0.20, y 0.55, susceptibles de llegar a 0.2, 0.45 y 0.6 en función del espesor, de la cantidad y de la calidad de las cavidades comunicantes, así como de la granulometría de áridos superficiales que tiene una influencia sobre el ruido producido S1.

Los pavimentos tipo-B se usan en los Servicios de Carreteras con objeto de reducir el riesgo potencial del deslizamiento sobre el agua. Con la circulación,

los pavimentos porosos se colmatan, lo que reduce significativamente su capacidad de drenaje y, por lo tanto, su rendimiento acústico. Otros problemas de gestión son mencionados en la sección 5.3. así como las soluciones para remediarlos.

Pavimentos tipo-C

El tercer tipo de pavimento, el tipo C, estudiado y probado a gran escala en Alemania, y más recientemente en Francia, es de alto o medio espesor, (hasta 50 cm), con una fuerte macroporosidad. Para este tipo de pavimento la reducción del ruido es debida a la existencia de una o más capas de hormigón bituminoso o de cemento. El coeficiente de absorción acústica depende del grosor, en la medida en que el pavimento más espeso puede ser eficaz sobre el conjunto de intervalos de frecuencia (100-5000 Hz); se utiliza este tipo de pavimento sobre todo por su capacidad para la evacuación de agua.

Para los pavimentos de mezcla porosa, la atenuación del ruido de contacto neumático-calzada se debe a la optimización de la geometría de la capa superficial; esto implica el uso de un árido de baja rugosidad, orientado longitudinalmente y de un tamaño máximo de 11 mm, o incluso es mejor de 8 mm; en el caso contrario, los huecos del pavimento no pueden absorber todo el ruido desarrollado.

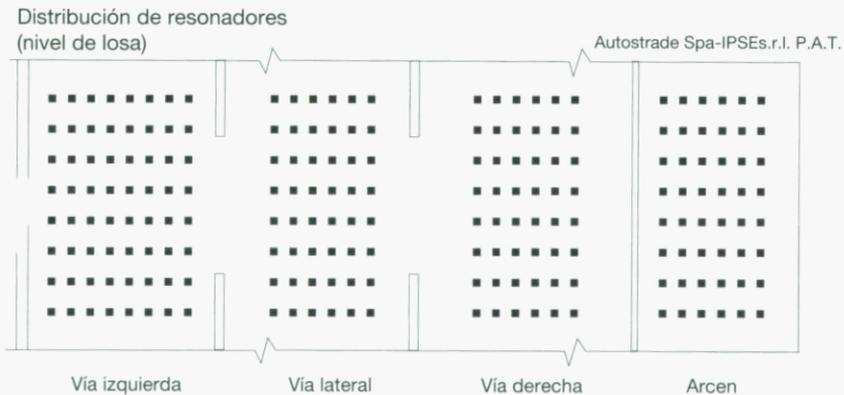
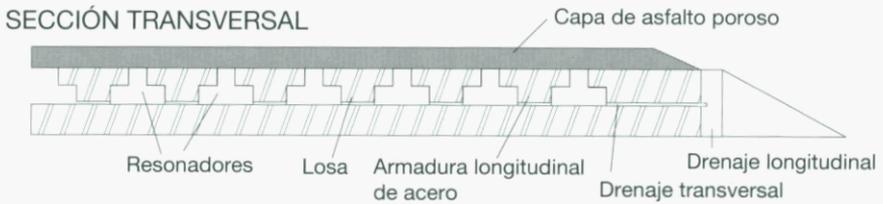
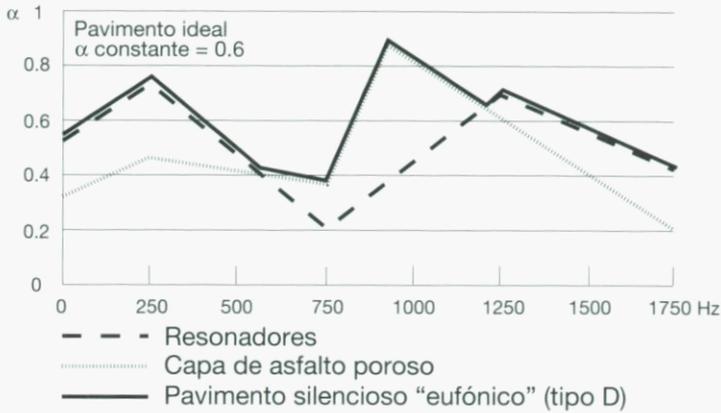
Es oportuno insertar aquí ciertas observaciones relativas a los pavimentos de mezcla en general. Junto a lo que se puede disminuir utilizando hormigones porosos, hoy se pueden obtener reducciones considerables del ruido de contacto neumático-calzada gracias a técnicas de construcción y tratamientos superficiales relativamente simples, dirigidos a optimizar la geometría de la capa de rodadura. Para este fin se dispone de materiales nuevos, principalmente de mezclas cuyo tamaño máximo de los áridos es reducido, morteros polímeros modificados y revestimientos epoxy.

Pavimentos tipo-D

El cuarto tipo de pavimento, el tipo D, llamado “pavimento eufónico” es una versión mejorada del pavimento compuesto polifuncional recientemente desarrollado e introducido en la red de autopistas italiana. Está formado por una capa de rodadura de mezcla porosa (presentando características de drenaje y de absorción del sonido) de 40 a 60 mm de espesor que recubre una losa de hormigón de armadura continua con resonadores de alrededor de 500 cm³ cada uno, repartidos sobre el conjunto del pavimento de la forma indicada en la sección transversal y en planta de la figura 5.6.

Para este tipo de pavimento, el coeficiente de absorción del sonido en los tres intervalos de frecuencia de 0-700 Hz, de 750-1250 Hz y de 1250-2000 Hz, alcanza los valores siguientes: 0.6, 0.4 y 0.7 obtenidos gracias a la superposición de los efectos producidos, a la vez, por la capa superior y las cavidades,

Figura 5.6. Coeficiente de absorción acústica de pavimentos eufónicos.



que influyen en la absorción del sonido en las bajas frecuencias (ver diagrama de la figura 5.6).

Hasta el momento se han realizado estudios y modelos reducidos sobre este tipo de pavimento pero la experimentación a escala real mostrará cuál es el rendimiento que se puede alcanzar, teniendo en cuenta todos los problemas

de construcción. Se espera obtener una absorción acústica más constante en las diferentes frecuencias que la obtenida en las fases de experimentación.

Dado que el ruido del tráfico proviene, en su mayor parte, del rodamiento del neumático sobre el pavimento, queda justificado el interés por reducir este efecto. De hecho se ha demostrado que la atenuación global potencial podría corresponder a una reducción del 50% de la velocidad media del tráfico o a una reducción del 90% del volumen de tráfico o, incluso a la instalación de una pantalla anti-ruido de 2,5 mts de altura. En particular, además de la reducción del ruido neumático-calzada (hasta 5-6 dB(A)) las calzadas cuya capa de rodadura y/o estructura presenten las mejores características anti-ruido pueden igualmente reducir 2 dB(A) el ruido del tubo de escape y el del motor. Las atenuaciones más notables se producen en las medias y altas frecuencias, es decir, entre 500 y 1600 Hz.

Se comprende claramente la importancia de disponer de pavimentos capaces de mejorar la absorción acústica a bajas frecuencias si se considera que una reducción de 5 a 6 dB(A) en esta gama de frecuencias corresponde aproximadamente al efecto que se obtendría duplicando la masa superficial de fachada o multiplicando por cuatro la distancia entre la edificación expuesta y la carretera. Por este motivo, es de gran importancia acelerar la investigación y el desarrollo de los pavimentos tipo D de absorción acústica, que constituyen actualmente la solución más prometedora del problema.

5.2. METODOS DE MEDIDA DEL RUIDO DE CONTACTO NEUMATICO-CALZADA

Además de una descripción resumida de los métodos de medida del ruido utilizados y de sus limitaciones, se encontrará en esta sección una breve exposición sobre ciertas experiencias de optimización de las características de las superficies de las carreteras llevadas a cabo por los países de la OCDE más interesados en el control del ruido del tráfico.

El método de medida del ruido global emitido por un vehículo se ha sometido a las normas ISO (International Standards Organisation) 362 (1981) y 7188 (1985) que hacen referencia a las condiciones de máxima emisión en medio urbano. El método es el siguiente: sobre la carretera, utilizando un micrófono colocado de una manera preestablecida, bajo condiciones meteorológicas controladas, se efectúan dos medidas del ruido, de cada lado de un vehículo en aceleración rápida a partir de una velocidad fijada (50 km/h en la norma ISO 7188). De esta forma, la industria automovilística ha podido aportar modificaciones al vehículo de cara a limitar su contribución a la contaminación sonora, respetando las reglamentaciones CEE/ONU. Ha sido así posible limitar el ruido producido por el sistema de propulsión a bajas velocidades.

La reglamentación existente impone la limitación del ruido en su conjunto, incluyendo el producido por el contacto neumático-calzada. Esta limitación se lleva a cabo gracias a la armonización de las reglamentaciones o recomendaciones nacionales existentes relativas a los métodos de medida desarrollados según los métodos ISO anteriormente mencionados, y que consisten en

Figura 5.7. Medidas de absorción acústica con ayuda de la máquina RIMA.



medir el ruido con el vehículo lanzado y con un remolque. El objetivo de los estudios e investigaciones en curso es desarrollar un método que permita distinguir la componente del ruido imputable exclusivamente al pavimento, para desarrollar el control de la calidad acústica de éste. En consecuencia, poder clasificar los pavimentos en el plano acústico según consideraciones científico-técnicas más que empíricas, válidas en cualquier condición medio-ambiental.

Entre los numerosos métodos utilizados en los países de la OCDE empleados para medir el ruido de contacto neumático-calzada, destacan: el método estadístico del “vehículo aislado” (Reino Unido, Alemania, Francia, Dinamarca, Noruega, Suecia e Italia), el método del “vehículo controlado” (Francia y Alemania), el método del “remolque” (Austria, Portugal, Alemania, Suecia, España e Italia). Este último método se combina con medidas de absorción acústica global. También se debería mencionar en relación a las medidas de absorción del ruido producido por la carretera, el empleo de una fuente de sonido normalizada, utilizada en Italia, principalmente para clasificar los pavimentos y comprobar su funcionamiento (ver figura 5.7). El actual Grupo de Trabajo ISO ha acabado usando solamente el método del “vehículo aislado”. Se ha demostrado que el método del “remolque” junto con el coeficiente

de absorción acústica puede ser correlacionado con el método del “vehículo aislado”, para vehículos ligeros.

Es, precisamente, la contribución de estos últimos métodos, desarrollados reciente y simultáneamente a la generalización de los pavimentos porosos, lo que ha servido de base para la aproximación racional del control del ruido del tráfico gracias a los pavimentos de carretera (y no solamente a los pavimentos porosos), demostrando que un procedimiento único de medida no puede responder a la diversidad del conjunto de las necesidades.

El ruido debido al paso de los vehículos sobre una calzada se mide en dB(A) en los laterales de la carretera, determinando así el ruido emitido por el tráfico, tal y como se produce bajo condiciones específicas de circulación, o por medio de un remolque de medida, con o sin medidas de absorción del pavimento; estos dos últimos procedimientos permiten determinar el ruido de la interacción neumático-calzada independientemente del ruido del motor, del escape o de otras partes del vehículo (ver cuadro 5.2 sobre los métodos de medida de la emisión del ruido sobre los pavimentos, con las ventajas y desventajas de cada técnica de medida).

En el primer caso, se aprecian dos tipos de medida distintos: el primero, conocido bajo el nombre de “vehículo aislado”, se llama así porque las medidas se efectúan sobre un número estadísticamente significativo de vehículos representativos del conjunto en circulación, eventualmente repartido en categorías preestablecidas (tales como ligeros, medios y pesados), así como en función de las condiciones de circulación o de las velocidades respectivas.

Este procedimiento necesita la instalación de micrófonos durante mucho tiempo (el suficiente para determinar las condiciones constantes de flujo) y medir niveles de ruido (por ejemplo, la presión acústica) y/o el espectro de frecuencias y grabar simultáneamente las velocidades y los tipos de vehículos que pasan (por ejemplo, el porcentaje de vehículos de mercancías).

El ruido emitido por una categoría de vehículos es, en general, representado por el S.E.L. o el Lmax.

Este método, utilizado en numerosos países gracias a su facilidad de ejecución y al número limitado de técnicos que requiere, presenta algunos inconvenientes. Además de la dificultad de generalización para redes viales heterogéneas en cuanto al tráfico y a los tipos de pavimento, este método necesita la repetición cada cierto tiempo de las medidas, cada una con sus múltiples determinaciones, para considerar la evolución de las características del conjunto de los vehículos y de los neumáticos. Además, hay que tener presente, al hacer la medida, no solamente los efectos de la posible presencia de barreras de seguridad o de superficies no pavimentadas y absorbentes, sino además, las dificultades que hay para distinguir la influencia del tipo de vehículo y de neumático en la clasificación del pavimento que resulta de la aplicación de este método.

El segundo método de medida del ruido de tráfico se llama del “vehículo controlado” e implica el recurrir a una selección de vehículos de ensayo

Cuadro 5.2. Métodos de medida del ruido de contacto neumático-calzada

METODO	Medida del ruido total al paso de un vehículo (vehículo aislado)	Medida del ruido total al paso de vehículos y neumáticos seleccionados (vehículos dirigidos)	Medida del ruido de contacto del neumático - calzada (remolque)	Medida de la absorción acústica
CONDICIONES Y LUGAR DE LA MEDIDA	Lateralmente a la carretera y al aire libre	Lateralmente a la carretera y el aire libre	Sobre el pavimento en el punto de contacto del neumático	En laboratorio y sobre pavimento de carretera
TIPO DE RUIDO	Representativo del tráfico efectivo (coches particulares y vehículos de mercancías)	Representativo de dos vehículos ligeros y de cuatro tipos de neumáticos	Representativo de un neumático de referencia o de 4 o 5 tipos diferentes siguiendo el tipo de remolque	Ruido de tipo impulsión emitido contra el pavimento
RESULTADOS DE LA MEDIDA	Nivel de ruido a una velocidad definida, determinado por regresión	Nivel de ruido a una velocidad definida determinado por regresión	Nivel de ruido a una velocidad definida determinado por regresión	Coeficiente de absorción a frecuencias diferentes
VENTAJAS	Las medidas permiten determinar el ruido percibido en el exterior de la carretera	Las medidas permiten la clarificación de los pavimentos para la circulación de vehículos ligeros	Las medidas permiten aislar el ruido neumático—calzada, teniendo en cuenta las absorciones locales	El método es completamente indispensable en las medidas del ruido de contacto neumático-calzada (remolque)
INCONVENIENTES	Con un número limitado de muestras; la influencia del tipo de tráfico es considerable Con un número de muestras, la influencia del tráfico, se ve reducida pero el trabajo es más pesado No sirve para clasificar los tipos de pavimentos de carreteras (queda afectado por un elevado número de factores)	Carácter laborioso del método debido a la necesidad de disponer de 2 vías libres de todo tráfico No toma en cuenta el ruido de contacto neumático-calzada debido al tráfico de mercancías	No tiene en cuenta la absorción global Normalmente utilizado para medir solamente neumáticos de coches particulares por lo que no toma en consideración el ruido de contacto neumático-calzada relacionado con los vehículos de mercancías	Medida de tipo complementario para definir el carácter ruidoso de un pavimento
PAISES	Reino Unido, Dinamarca, Francia, Italia, Alemania, Noruega y Suecia	Francia, Dinamarca, Italia	Alemania, Portugal, Dinamarca, Suecia, España, Italia, Holanda	Italia y Francia

pasando a una velocidad determinada y equipados con neumáticos característicos. Este método se ha desarrollado como alternativa de los métodos "punto muerto" y "en aceleración" durante una campaña de ensayos llevada a cabo en Francia y Alemania y, después ha sido ampliamente adoptada. Este método que supone la elección de un cierto número de vehículos y neumáticos, particularmente representativos, presenta en la práctica numerosos inconvenientes cuando se aplica sobre tramos con tráfico pesado.

El tercer tipo de medida del ruido, llamado del "remolque". Es un procedimiento móvil que no permite cuantificar más que el ruido de rodadura. La medida se realiza utilizando un remolque cuyas ruedas están encerradas en una cámara anecoica, de cara a eliminar la influencia del ruido de fondo del tráfico circundante. En el interior de esta cámara se instalan numerosos micrófonos colocados cerca de una o varias ruedas; se tiene así uno o varios neumáticos de referencia. A partir de un proyecto de la Universidad de Stuttgart, numerosos laboratorios europeos han llevado a cabo experiencias específicas utilizando este sistema de medida.

En Austria las medidas se efectúan a una velocidad de 100 km/h, y a temperaturas siempre superiores a 10 °C, utilizando un remolque equipado con un micrófono. Este micrófono se coloca 40 cms detrás de una rueda de medida y 10 cms por encima de la superficie del pavimento. La rueda de medida está equipada con un neumático específico (AIPCR, 165R, inflado a 2,3 bars, cargado con 400 kg).

En Finlandia se han realizado recientemente medidas del ruido de rodadura, con vehículos circulando a, velocidades comprendidas entre 60 y 120 km/h (haciendo aumentar la velocidad 20 km/h cada vez) utilizando un sistema instalado sobre un remolque, dotado de un dispositivo de recepción activo durante 10 s., y con neumáticos claveteados, los más corrientemente usados en los países nórdicos durante los largos períodos de invierno.

En España, las medidas se efectúan de manera continua utilizando un remolque con una sola rueda, expresamente aislada del ruido exterior y equipada con tres micrófonos direccionales colocados a 50 cms del eje vertical de la rueda. La utilización de una única rueda permite evitar toda influencia de ruido eventual de otras ruedas sobre el remolque. El espectro de frecuencias obtenido a partir de estos registros se analiza cada 100 metros; de esta forma es posible no sólo comparar los diferentes pavimentos con los diferentes neumáticos de referencia, sino igualmente comprobar estos últimos sobre un pavimento de referencia. Investigadores han comparado los valores obtenidos en el remolque y los obtenidos en medidas anteriores con objeto de correlacionar ambos tipos de medida.

Los resultados obtenidos a partir del método del "remolque" pueden conducir a subestimar la absorción acústica garantizada por los pavimentos porosos. Además, la clasificación establecida de los pavimentos a partir de estas determinaciones, corre el riesgo de estar influenciada por el tipo de neumático en el caso de medida de una rueda única.

Dado que para ciertos pavimentos es esencial conocer el valor de absorción acústica con objeto de determinar el grado de su emisión de ruido, es impor-

tante anotar que con el método del remolque, es igualmente posible tener en cuenta la absorción del pavimento, en las medidas obtenidas utilizando una constante que está en función del tipo de neumático empleado. En fin, conviene señalar que los valores debidos a los principales métodos de medida descritos aquí anteriormente, se correlacionan bastante bien los unos con los otros si los neumáticos utilizados para las medidas son idénticos; por esta razón el método del “remolque” se ha implementado para poder utilizar cuatro o cinco ruedas de medida.

Con el fin de caracterizar las propiedades de absorción sonora de los pavimentos de carretera o coeficientes de absorción acústica, (fracción de energía absorbida cuando la onda sonora se refleja sobre un pavimento) se utilizan a la vez medidas tradicionales en laboratorio y medidas sobre la calzada.

Estas medidas han permitido determinar valores del coeficiente de absorción acústica en función de las frecuencias del espectro sonoro considerado y del ángulo de incidencia de la onda propiamente dicha. De esta forma, se ha obtenido que la curva del coeficiente de absorción se caracteriza por una serie de resonancias cuyas frecuencias forman una progresión aritmética y que la frecuencia y la amplitud máxima y mínima está ligadas a las características físicas de las calzadas tales como el espesor, la porosidad, la resistencia específica al paso del aire y la forma.

A partir de estos elementos, ha sido posible desarrollar una aproximación científica, no simplemente empírica, de la optimización de las propiedades acústicas de las mezclas porosas empleadas para la construcción de pavimentos absorbentes.

Las medidas en laboratorio se han realizado bajo incidencia normal utilizando a la vez un tubo de ondas estacionarias (o tubo “kundt”) con cálculo de coeficientes de absorción acústica para frecuencias comprendidas entre 100 y 800 Hz, y una sala reverberante que mide la absorción acústica en condiciones de campo sonoro difuso.

En lo que concierne a las medidas en carretera, el tipo de medidas de ruido por impulsión desarrollado en Francia tiene la misma finalidad que los métodos de laboratorio, mientras que los otros buscan caracterizar el exceso de atenuación en relación a la incidencia normal y a la distancia provocada por la divergencia de las ondas sonoras.

Además de estos procedimientos y técnicas, Italia ha desarrollado recientemente un equipo llamado “R.I.M.A.” Se trata de un sistema de medida automático montado sobre el vehículo que permite anotar medidas estáticas sobre la carretera, a partir de la técnica impulsiva mencionada anteriormente y considerando el efecto global del pavimento sobre la emisión del ruido debido a la circulación. Esta técnica consiste en generar una señal de corta duración a partir de una fuente específica (altavoz de excitación) y registrar, por medio de los micrófonos, las señales ligadas a la onda directa, a la onda reflejada y a las ondas difractadas sobre los otros obstáculos encontrados. El método aporta así una serie de medidas puntuales incluso en presencia de tráfico, de manera simple y rápida (alrededor de 90 segundos por

medida) y relativo a un espectro de emisión dado (la fuente sonora), permitiendo así comparar los resultados obtenidos en los diferentes lugares.

Los datos que figuran en el cuadro 5.1. relativo a los pavimentos silenciosos han sido obtenidos por este último método. Naturalmente, para evaluar el efecto global del pavimento al borde de la vía, es necesario realizar las medidas igualmente con la fuente "tráfico" que genera el efecto diedro. También se está estudiando actualmente, un procedimiento mixto que mide el ruido de rodadura y la absorción acústica sobre el lugar, gracias a un remolque equipado con numerosas ruedas.

En Austria, se están desarrollando, actualmente, estudios e investigaciones sobre métodos que permitan testar, la impedancia acústica o la absorción. En Holanda, los esfuerzos se dirigen al desarrollo de un método representativo de medida y evaluación de las propiedades acústicas de nuevos tipos de neumáticos.

5.3. DIMENSIONAMIENTO, EJECUCION Y GESTION DE LOS PAVIMENTOS SILENCIOSOS

La reducción efectiva del ruido debida a ciertos pavimentos de carretera, no depende sólomente de la capa de rodadura de referencia empleada para las medidas, sino igualmente de los factores siguientes:

- la fuente sonora considerada;
- el vehículo de ensayo (tipo y velocidad);
- el tipo de neumático;
- la geometría de la carretera (alineación, pendiente positiva o negativa);
- las condiciones meteorológicas.

El rendimiento acústico del pavimento depende del tipo de estructura de ésta, de las características de la mezcla y de su evolución en el tiempo:

- deterioro de la capa de rodadura;
- proceso de relleno de los huecos (colmatado);
- deterioro de la estructura;
- procesos de mantenimiento.

Un grupo especial del ISO ha sugerido utilizar como pavimento de referencia un hormigón bituminoso denso, con textura lisa con un tamaño máximo de áridos comprendido entre 11 y 14 mm. Está por comprobar si este pavimento de referencia, adoptado por numerosos países, va a conducir a un rendimiento acústico con una variabilidad baja que lo haga aceptable.

Antes de examinar la influencia de las características intrínsecas y tecnológicas de la composición de los pavimentos en la reducción del ruido del tráfico, se imponen ciertas observaciones en lo relativo a la composición y a la colocación del pavimento en relación con la influencia de las características superficiales de los pavimentos sobre la emisión del ruido.

5.3.1. Influencia de las características superficiales de los pavimentos

Se puede intervenir en la textura de un pavimento y, por lo tanto, en el ruido que él emite, escogiendo con cuidado el tamaño y la forma de los áridos empleados en la mezcla empleada en la capa de rodadura. A partir de los estudios y de las aplicaciones específicas, el tamaño de los áridos empleados no debería sobrepasar los 8/10 mm. Es preferible limitarse a tamaños máximos de 4/6 mm, dado que limitar el tamaño del árido, es mejor que intentar obtener una onda de alta amplitud para contener el ruido emitido en las altas frecuencias. Es necesario, igualmente, escoger el tamaño y el tipo de los áridos teniendo en cuenta el efecto de "pulido" del tráfico. Ciertos áridos triturados dan buen resultado, incluso en el caso de superficies de gran micro-textura (es decir, texturas con longitudes de onda de 0,1-0,5 mm).

El desgaste del pavimento se traduce en general en un aumento del ruido en altas frecuencias debido al proceso de pulido o del relleno de los huecos de los pavimentos drenantes. Si la totalidad de la superficie del pavimento se deteriora, aumentan las emisiones de ruido en las bajas frecuencias.

Para asegurar la homogeneidad del pavimento de la carretera hay que utilizar áridos de tipo y naturaleza uniformes, y compactarlos con la apisonadora con objeto de asegurar que su orientación no sea aleatoria y que tengan las características superficiales adecuadas.

Los pavimentos silenciosos de los tipos A, B, C y D tienen un rendimiento aceptable en términos de adherencia.

La rigidez excesiva de la calzada que depende de un módulo de rigidez elevado del ligante, parece tener un efecto sobre el ruido. Sin embargo, no se sabe aún bien que efecto se obtiene añadiendo gránulos de caucho al betún.

Se ha indicado anteriormente las razones por las que las capas de rodadura porosas son emisiones de ruido del tráfico. No obstante, es cierto que existen capas de rodadura cuya textura superficial es óptima y que dan buenos resultados en cuanto al ruido de contacto neumático-calzada, no pueden alcanzar los niveles de rendimiento acústico obtenidos con pavimentos porosos optimizados en el plano acústico.

La porosidad no sólo reduce el bombeo del aire y las resonancias, así como el efecto de amplificación acústica (efecto diedro), sino que también contribuye significativamente a la absorción acústica influyendo en las reflexiones acústicas y en la propagación del ruido.

El cuadro 5.3 presenta las diferentes mezclas bituminosas porosas utilizadas en los países de la OCDE. Se considera en general que los pavimentos drenantes de mejor rendimiento contienen áridos cuyo tamaño máximo está comprendido entre 10 y 12 mm y su porcentaje de huecos es del orden del 22 o el 23 %.

La absorción acústica de un pavimento drenante está ligada a la conservación de la porosidad. Esta se preserva gracias al proceso de lavado por el tráfico

Cuadro 5.3. Datos característicos de hormigón bituminosos

Países	Espesor de la capa mm	Contenido en huecos % vol	Tamaño máximo mm	Contenido en piedra % masa	Separación del huso	Calor de hidratación % masa	Índice de penetración mm 10 ⁻¹	Contenido % masa	Convencional o modificado	Seguridad	Ruido	Principio resultados		Cantidad en superficie total m ² 10 ³ (1992)	Notas
												1er 2 ^o m			
APLICACION NORMAL															
Austria	40	≥ 22	11	82	2/8		4.8-6.3	Mod	*	*	84				
Belgica	40	22	14	83	2/7	≤ 2	4-5	conv/ plast/ elast	*	exc.	79	exc.	7500		
España	40	20	10	86	0.63/2.5		≥ 4.5	80% Mod.	*	*	80				Dudas sobre la durabilidad
Francia	30/40	≥ 20	10	88	2/6		4.5-5.5	Mod.	*	*	77		21.000 (15.000 autopista)		Dudas sobre la durabilidad y el mantenimiento invernal
Italia	40	≥ 18	14	88	2/7		5.0-6.5	Mod.	*	*	87		10.000 autopista		La absorción acústica es una característica importante del rendimiento del pavimento
Holanda	50	≥ 20	11	85	2/6	1.3-2.3	4.5	Conv.	*	*	72				Problema de mantenimiento invernal en 78/79

Cuadro 5.3. Datos característicos de hormigón bituminosos (continuación)

Países	Espesor de la capa mm	Contenido en huecos % vol	Tamaño máximo mm	Contenido en piedra % masa	Separación del huso	Calor de hidratación % masa	Índice de penetración mm 10 ⁻¹	Contenido % masa	Convencional o modificado	Seguridad	Ruido	Principio resultados		Cantidad en superficie total m ² 10 ³ (1992)	Notas
												1er	2ºm		
APLICACION EXPERIMENTAL															
Alemania	30-60	≥ 20	8 11	85	2/5		80	≥ 5,0	Mod.		*	79	86		Estado experimental
Dinamarca	40	≥ 16	8	78			100	≥ 4	Conv.	*		73			Interrumpido durante el invierno 78/79. Problema con el mantenimiento del pavimento
Gran Bretaña	50	20	12	82			200 100 70	3.7 5.0	Conv. Mod.		*	< 70	84		Estado experimental Problemas de durabilidad
Grecia			19	82	2/6		80/100	5.0	Mod.			> 86			Realizándose actualmente el primer análisis
Portugal		≥ 20	15					5.0-5.5	Mod.	*	*	90			Realizándose actualmente el primer análisis
Síntesis de las propiedades características	40/50	≥ 16	10/14	85	2/7		≤ 100	≥ 4.5	Polímero Modificado	*	*				

que circula sobre las calzadas mojadas. Además se ha demostrado que cuanto mayor es la permeabilidad del pavimento drenante tras su colocación, más tiempo se mantiene el buen rendimiento. Las cualidades hidráulicas se ven también significativamente favorecidas por la reducción del contenido en arena de la mezcla, radicando en esta limitación el mantenimiento de la integridad de la superficie (pérdida local de material o áridos) así como en la resistencia mecánica al paso de la circulación. Parece que la cantidad de huecos debe quedar limitada al 25% (huecos intercomunicados > 20 %).

En lo que concierne al coeficiente de absorción acústica, la optimización nos lleva a valores elevados para frecuencias comprendidas en el intervalo 500-1500 Hz en las vías rápidas, mientras que en las vías urbanas es preferible que estos valores sean alcanzados para frecuencias más bajas (250-1500 Hz). Además, hay que recordar que en el ancho de la banda de frecuencias influyen:

- el espesor;
- la porosidad y la tortuosidad;
- la resistencia específica al paso del aire.

Experimentalmente, los mejores resultados se han obtenido en vías rápidas con la capa de asfalto drenante de 6 a 8 cms de espesor (Francia, Dinamarca, Holanda). Para las vías urbanas espesores mayores podrían conducir a mejores resultados pero recurrir a pavimentos drenantes en tales casos no es recomendable, debido a la caída brutal del rendimiento provocado por el colmatado de huecos (2 años de media, en Francia y Suecia).

5.3.2. Experiencias en algunos países de la OCDE

En **Australia**, las investigaciones se han centrado en los tipos de capa de rodadura más usados, como los tratamientos en caliente, con tamaños máximos de áridos de hasta 14 mm, los micro tapices bituminosos en frío, las mezclas porosas, los pavimentos de hormigón bituminoso, rígidos y tradicionales. Se ha estudiado sobre todo, el rendimiento de las mezclas porosas haciendo variar el ligante utilizado. Las mezclas porosas y, particularmente, las colocadas, después de la revisión de las especificaciones de 1987 presentan valores inferiores de nivel de ruido. Es interesante destacar que en un intervalo de 10 dB(A) por encima del máximo obtenido para las mezclas drenantes no hay una separación franca entre el hormigón y el asfalto.

En **Austria**, el uso de pavimentos silenciosos, incluyendo no sólo mezclas drenantes sino también tapices finos, tratamientos superficiales en áridos de pequeño tamaño, y hormigones con árido visto, ha llevado al reconocimiento de la necesidad de optimizar el tamaño máximo, la amplitud y las longitudes de onda de la textura superficial.

Los pavimentos porosos, que en Austria han demostrado ser los más eficaces dentro de las técnicas de atenuación del ruido anteriormente mencionadas, deben llevar, según la norma austríaca, áridos con un tamaño máximo de 11

mm. No obstante, los tramos de carreteras construidos con áridos de tamaño máximo de 8 mm han sido los más rentables en cuanto a reducción del ruido, aunque estas carreteras han acabado con graves problemas de durabilidad cuando quedan sometidas a un tráfico importante de mercancías.

En cuanto al ruido de rodadura las medidas llevadas a cabo en Austria sobre hormigones bituminosos tradicionales dan valores de 1,5, 3,5 y 5 dB(A) para las reducciones en cuanto a energía acústica en un conjunto de medidas, a velocidades de 50, 60 y 80 km/h, sin embargo se aprecia que se alcanzan valores de hasta 7-9 dB(A) para medidas aisladas, a pesar de las fluctuaciones debidas a la falta de homogeneidad de las medidas realizadas dadas las diferentes superficies ensayadas. Los ensayos austriacos sobre pavimentos porosos han demostrado reducciones rápidas e importantes del ruido del tráfico, sobre todo al final del primer invierno, a pesar de las dificultades encontradas para limpiar este tipo de calzadas.

Los austriacos han utilizado microtapices (< 25 mm) y tratamientos superficiales basados en resinas epoxy. Los microtapices, que permiten obviar dispositivos de drenaje lateral, se han aplicado en vías urbanas con áridos cuyos tamaños máximos están comprendidas entre 4 y 8 mm, proporcionan reducciones de ruido notables en las altas frecuencias; sin embargo, los tratamientos superficiales han sido aplicados en pavimentos rígidos preexistentes tanto en medio urbano como en campo abierto, las resinas epoxy han sido utilizadas como tales o mezcladas con cemento y áridos de tamaño máximo de 3 a 4 mm.

Otro método que permite conseguir una reducción sustancial del ruido comparado con otros pavimentos de hormigón consiste en colocar una capa de 3-4 cms de espesor constituida por áridos de muy pequeña dimensión (8 mm, con la mayor proporción posible de áridos de tamaño comprendido entre 4 y 8 mm). Al día siguiente de su colocación, el mortero fino existente en superficie, y entre los áridos, es barrido ("hormigón de árido visto"). La superficie correspondiente al tipo A de la figura 5.4, lleva a una reducción máxima del ruido de rodadura.

En **Bélgica**, una investigación sobre el comportamiento con el paso del tiempo de los pavimentos porosos, consistente en hacer el seguimiento de tres tramos experimentales en un período de 52 meses, ha permitido comprobar que el nivel de ruido de una sección de 20 mm de espesor es el doble que el registrado cuando las secciones son de 40 mm.

En **Dinamarca**, se ha prestado una gran atención a los asfaltos porosos, y se ha realizado el seguimiento de tramos de referencia y tramos experimentales (a la vez en una vía urbana y en autopistas) con objeto de determinar las reducciones de niveles sonoros así como el efecto de relleno de los huecos residuales al cabo del tiempo. Las experiencias realizadas en medio urbano, con áridos de tamaño máximo comprendido entre 8 y 12 mm y huecos residuales de 20-23 % y 24 % han dado una reducción del ruido mayor. Con un número de huecos más limitado la reducción del ruido es menor, sobre todo para bajas frecuencias aunque se limita su degradación en el tiempo, en particular con áridos de un tamaño máximo de 12 mm y para bajas frecuencias.

En **Finlandia**, la construcción de pavimentos con capas de rodadura silenciosas es relativamente reciente. Los estudios se han centrado en la comparación de rendimientos de asfaltos porosos, asfaltos tradicionales, pavimentos rígidos y los de tratamiento superficial compuestos de áridos de gran tamaño. Las medidas condicionadas por la presencia de neumáticos claveteados han demostrado que en el caso de betunes modificados con gránulos de caucho, el espectro sonoro se aproxima al de los pavimentos de hormigón. La comparación de las medidas efectuadas antes y después del invierno han mostrado un crecimiento del nivel de emisión sonora.

En **Francia** se han llevado a cabo investigaciones interesantes para justificar la reducción de emisiones sonoras en el caso de calzadas de asfalto poroso, estudiando el bombeo del aire y el efecto diedro, así como para determinar la forma de propagación espacial del ruido en función del tipo de neumático. Los investigadores han estudiado también un algoritmo concebido para describir y predecir los fenómenos del efecto diedro gracias a un modelo de cálculo. Se han realizado numerosas experiencias con objeto de verificar las distintas hipótesis relativas a la optimización de los pavimentos porosos. Entre los parámetros estudiados figuran el espesor (de 3 a 50 cm), las capas aisladas y las multicapas, el tipo de áridos, los ligantes, los aditivos, etc., sobre secciones situadas en vías rápidas y en vías urbanas. Existen actualmente 21 millones de m² de pavimentos drenantes, esencialmente, sobre autopistas (15 millones de m²). La utilización de pavimentos drenantes en vías urbanas se han abandonado tras ensayos infructuosos en París, Lyon y Nantes. La tendencia actual está en no utilizar los pavimentos drenantes con alto contenido en huecos nada más que sobre las vías rápidas y sólo en zonas donde el contenido en partículas que puedan colmatar los huecos esté limitado, lo que da un elevado grado de permeabilidad y aumenta así la duración de esta característica fundamental del rendimiento del pavimento drenante. En vías urbanas, las experiencias en curso demuestran la eficacia de las capas de hormigón bituminoso con micro textura fina y ultrafina. Se espera mejorar la reducción del ruido en términos de Leq a largo plazo en, al menos, 3-4 dB(A), utilizando una mezcla porosa en lugar de los hormigones bituminosos 0-14 mm.

En **Alemania** se han realizado a cabo estudios sobre los tipos de macrotectura, dando como resultado más claro, la obtención de una reducción máxima del ruido de rodadura en pavimentos formados por áridos que poseen un tamaño máximo de 11 mm. Las experiencias han permitido comprobar que las curvas de absorción acústica obtenidas con el tubo de ondas estacionarias (tubo de "kundt") relativas a capas de rodadura que no se diferencian nada más que por el tipo de ligante, son prácticamente idénticas. Además se ha demostrado que un crecimiento en el espesor de la capa de rodadura conlleva un deslizamiento de la resonancia punta, en la curva de absorción acústica, hacia bajas frecuencias. La reducción global en las emisiones del ruido del tráfico en dB(A) es prácticamente independiente del espesor de la capa de rodadura si este espesor varía de 1 a 3 cms.

Además, se ha encontrado una relación de estricta dependencia entre la energía absorbida y el porcentaje de huecos residuales presente en el pavi-

mento; sin embargo incluso un porcentaje de huecos del 25% no es suficiente para aportar una reducción de más de 2 dB(A) de un ruido arbitrario producido radialmente en la calzada. Esta investigación se ha llevado a cabo según los procedimientos de homologación de vehículos con el estudio de emisiones de ruido de rodadura de un automóvil en movimiento con el motor parado, y a velocidad constante sobre dos tipos de pavimentos diferentes, un asfalto poroso con un tamaño máximo de áridos elevado y un pavimento tradicional con una superficie suave. Los resultados indican un espectro energético bajo para el pavimento drenante en las frecuencias superiores a 1000 Hz, mientras que, por debajo de esta frecuencia, predomina el ruido producido por las vibraciones de los neumáticos sobre la carretera.

En Alemania también se ha realizado un seguimiento de secciones experimentales durante 34 meses con el fin de determinar el ruido de rodadura utilizando el método del "remolque". Se ha encontrado que, en función del tamaño máximo de los áridos se producen variaciones de niveles sonoros, obteniéndose una disminución del ruido de rodadura para valores de 11 a 16 mm mientras que para un pavimento poroso con áridos de tamaño máximo 3,5 y 8 mm, hay un aumento del ruido emitido a largo plazo, incluso, si al principio este tipo de pavimento poroso presentaba valores más bajos. Este fenómeno queda explicado ya anteriormente en la parte relativa al método de medida por remolque (Sección 5.2).

Japón es un país que está comprometido desde hace años en la atenuación del ruido debido al tráfico. Desde hace ya algún tiempo, hay un movimiento a favor de la construcción de pavimentos drenantes con vistas a limitar los altos costes de la realización de pantallas anti-ruido. En todos los casos, las experiencias han confirmado que al aumentar las velocidades de circulación de los vehículos, y al aumentar los huecos residuales se obtiene una mayor atenuación del ruido que la obtenida con los pavimentos tradicionales, sin embargo no se puede decir lo mismo en lo que respecta al espesor. Aumentar más allá del 20% el nivel de huecos residuales tiende a ralentizar la degradación de la atenuación del ruido, gracias al uso de betunes modificados.

Se esperan futuros desarrollos para reducir los costes de asfaltos porosos comparados con los asfaltos tradicionales, gracias a contratos especiales de larga duración con las empresas de construcción y a la adopción de especificaciones particulares.

En **Italia**, las investigaciones dirigidas a atenuar el ruido de rodadura por medio de la optimización de pavimentos comenzaron en 1987, simultáneamente a la construcción de la primera calzada de pavimento poroso. Actualmente los pavimentos drenantes absorbentes del sonido cubren más de 10 millones de m² de autopistas en Italia. Se ha intentado adoptar una aproximación metodológica del problema, por medio, en primer lugar, del análisis separado de los diferentes mecanismos y fenómenos que intervienen en la producción del ruido de rodadura, tal como es percibido en el borde de la carretera, y en segundo lugar, gracias a la puesta a punto de técnicas de medida experimentales fiables, en laboratorio o sobre el terreno, de propie-

dades acústicas de pavimentos (para este último caso ver apartado 5.2). La tercera fase actualmente en comprobación a escala real, se dirige a optimizar las características que más influyen en el ruido de rodadura.

En la primera fase, se han efectuado medidas en la carretera para caracterizar las fuentes de ruido, evaluando al mismo tiempo los métodos de medida existentes, utilizados para este fin; en una segunda fase se ha desarrollado una metodología especial para medir el coeficiente de absorción acústica de calzadas con pavimento drenante poroso y absorbente del sonido. Por último, después de haber evaluado la eficacia de estas calzadas ensayadas en cámaras semi-anecoicas, se ha podido dimensionar un pavimento absorbente innovador que ha sido sometido, a continuación, a ensayos en laboratorio por medio de un modelo a escala.

En **Noruega**, en 1988, se construyeron numerosos tramos experimentales para comprobar el comportamiento de ciertos tipo de superficies de carreteras diseñadas para obtener una reducción de las emisiones del ruido de tráfico. En cuanto a los pavimentos asfálticos porosos también, en este país, se ha prestado una especial atención a la granulometría de los áridos y se ha encontrado, que tomando un tamaño máximo de áridos de 11 mm, el contenido en huecos residuales óptimo, desde el punto de vista de mantenimiento a largo plazo de las propiedades acústicas, era del orden del 22-23%. Este diseño combinado con un mayor cuidado en la limpieza de los áridos habría permitido evitar el "pelado" y la consecuente pérdida de material, sobrevenida durante la época invernal; en cuanto a los fenómenos de deslizamiento, las experiencias iniciales han dado unos resultados bastante prometedores, desde el punto de vista acústico, gracias al uso de gránulos de caucho como árido.

El estudio más reciente permite, en ausencia de sistemas eficaces de conservación, el mantenimiento de las principales características de superficie de estos pavimentos, optimizando la composición, la producción y la colocación del pavimento. Uno de los resultados obtenidos es la buena resistencia de los pavimentos al desgaste provocado por los neumáticos, con clavos, tras un período inicial de degradación producido durante el primer verano. En Noruega una gran proporción de vehículos está equipado con neumáticos claveteados durante el invierno, lo que provoca un rápido deterioro de los pavimentos si éstos no están bien dimensionados. Experiencias realizadas simultáneamente con diferentes métodos de limpieza, en pavimentos drenantes, han demostrado que es imposible en razón de los daños provocados por los neumáticos claveteados, restaurar la absorción acústica inicial, aunque se han obtenido resultados positivos en cuanto al desalojo del agua. Por estas razones Noruega no recomienda utilizar los pavimentos porosos. En cuanto a investigaciones análogas dirigidas a la optimización de las características superficiales de los pavimentos rígidos existentes, destinadas a atenuar el ruido, en Noruega se está aún en fase de estudio.

En **Holanda** las experiencias más recientes llevadas a cabo en pavimentos silenciosos se han centrado, principalmente, en pavimentos porosos inicialmente introducidos en el sector vial por razones de seguridad. La técnica de colocación empleada con estos pavimentos consiste en la ejecución de dos

capas distintas, una de 45 mm, compuesta principalmente de áridos de 11/16 mm y una capa superficial de 25 mm con áridos de 4/8 mm. Desde su apertura al tráfico, estos pavimentos drenantes tienen huecos residuales del 26% y el ligante es un betún modificado con gránulos de caucho de 0,15 a 1 mm, equivalente al 16% del peso del ligante.

Las experiencias más recientes (1989-1991) llevadas a cabo con objeto de obtener una mejor absorción del ruido han conducido a pavimentos drenantes con una capa de rodadura de pequeño espesor. Este tipo de pavimento, comparado con sus primeras aplicaciones (1986) y particularmente para las vías periurbanas, ha aportado una mayor reducción del ruido que la obtenida con pavimentos tradicionales (respectivamente, 4 dB(A) y 5 dB(A) a 60 km/h y 120 km/h). Se puede, asimismo, llegar a una mayor atenuación del ruido gracias a una selección adecuada de los neumáticos.

En **España** se utilizan con frecuencia los pavimentos porosos para obtener capas de rodadura silenciosas. Estos pavimentos se están empleando desde finales de los años 80, sobre todo tipo de carreteras y abarcan actualmente 30 millones de metros cuadrados. Las capas de rodadura tienen normalmente 40 mm de espesor, contienen áridos de un tamaño máximo de 12 mm, que al hacerlo pasar por un tamiz de 2,5 mm pasa una cantidad de árido del 10% al 15% y un contenido en filler del 4,5% con más del 20% de huecos residuales.

Los ligantes corresponden en general al 4,5% del peso de los áridos. Los ligantes modificados se utilizan en el 70%-75% de los casos (esencialmente sobre autopistas y carreteras principales); en el 25%-30% restante se utiliza un betún normal de penetración 60/70 mm. Se ha desarrollado un nuevo sistema de dosificación de pavimentos bituminosos porosos a partir del método Cántabro: probetas Marshall se someten a una pérdida de peso debido al rozamiento utilizando un equipo del tipo del ensayo de Los Angeles sin las bolas de acero normalmente empleadas en los ensayos de áridos. Se ha encontrado que después de dos años de servicio, los hormigones porosos que tienen un porcentaje de huecos residuales inferior al 20% tienden a colmatarse, aunque conservan buenos niveles de adherencia.

En España se han desarrollado igualmente, en el marco de un programa de la Comunidad Europea, llevado a cabo con la participación de daneses y alemanes, pavimentos en hormigón poroso, capaces de disminuir el ruido producido por los vehículos.

Además de la verificación de los resultados relativos a estos pavimentos silenciosos, ya confirmada en el marco de experiencias anteriores, conviene destacar los esfuerzos realizados en el estudio de la correlación entre: ruido de contacto neumático-calzada, textura superficial, deslizamiento sobre agua, y adherencia. Basándose en los primeros resultados que parecen indicar la ausencia de toda correlación fiable entre ruido de contacto neumático-calzada y profundidad de la textura, tal como se mide utilizando el ensayo de altura de arena, se busca definir otro índice de textura superficial.

En **Suecia** se ha estudiado el ruido de contacto neumático-calzada utilizando los tres métodos siguientes para medir in situ las propiedades acústicas

del pavimento: “motor parado”, “método del tambor”, y método del “remolque”.

El primero, es decir el de “motor parado”, consiste en la realización de las medidas descritas en las normas de homologación de vehículos equipados con neumáticos, en este caso se aplica a vehículos de ensayo circulando en punto muerto y motor apagado. El método del “tambor” se lleva a cabo en una cámara insonorizada: diferentes neumáticos son probados sobre bancos equipados con rodillos y se mide la emisión del ruido a diferentes velocidades. El método del “remolque” es una medida de la emisión del ruido de contacto neumático-calzada sobre la carretera.

Estas medidas han permitido identificar diferentes operaciones posibles para limitar la emisión del ruido producido por los vehículos, de las cuales se espera una reducción de 10 dB(A) de aquí a veinte años, minimizando así los efectos del aumento previsto del número de vehículos. Además de a los pavimentos, estas medidas se refieren igualmente a los vehículos, a los neumáticos y a los usuarios de la carretera.

En cuanto a los pavimentos drenantes conviene recordar una experiencia llevada a cabo en Suecia: empleando pavimentos con áridos de 12 mm de tamaño máximo y una gama amplia de porcentajes de huecos residuales (20-30%), se ha comprobado que, en un período de cuatro años, la reducción del ruido ha disminuido con el tiempo, en razón, tal vez, del efecto de las estaciones frías, y que la reducción media en cuatro años ha sido de 3 dB(A), con una disminución más importante para el nivel equivalente medio que para los niveles punta del conjunto de vehículos, independientemente del tipo de estos. Además esta diferencia es del mismo orden que la registrada entre pavimentos bituminosos densos recientes y antiguos.

Además se ha comprobado que, cuando el espesor aumenta, la reducción del ruido aumenta igualmente, a pesar de que este efecto disminuye con el tiempo, y que el porcentaje inicial en huecos residuales debería ser superior o igual al 20%, lo que resulta compatible con los requerimientos de durabilidad del pavimento.

En **Suiza** se han llevado a cabo experimentos en numerosos cantones federales para estudiar la atenuación del ruido del tráfico, debido a ciertos pavimentos de carretera, prestando una atención especial a los que presentan un alto porcentaje de huecos residuales. Actualmente están en curso experiencias que apuntan a optimizar los parámetros relevantes con el fin de identificar una gama más amplia de pavimentos silenciosos.

En el caso de calzadas con pavimento drenante esta investigación se ha llevado a cabo con el objeto de mejorar su durabilidad. Las primeras experiencias han dado resultados positivos desde el punto de vista de la absorción acústica, pero la capa de rodadura ha sufrido un deterioro mucho más acelerado que el producido en los pavimentos tradicionales.

En el **Reino Unido**, donde los pavimentos porosos fueron aplicados, por primera vez, principalmente en las pistas de aeropuertos, se dispone de

resultados, de su comportamiento acústico, obtenidos a través de monitorados de larga duración. Estos resultados que parecen optimistas, al menos en condiciones determinadas, indican una reducción del ruido de 3 a 6 dB(A) el primer año, con niveles más altos para los vehículos ligeros que para los pesados. Durante los cuatro años siguientes, la reducción del ruido ha descendido a 4 dB(A), y en los siguientes 5-6 años, se reduce a 3 dB(A), quedando identificado este último nivel tanto para los vehículos pesados como para los ligeros.

En **Estados Unidos** no se ha dado ninguna prioridad al estudio de la interacción neumático-calzada en el plano acústico, en razón del carácter ambiguo y no permanente de la influencia del tipo y la textura del pavimento sobre el ruido emitido. La elección técnico-económica del tipo de pavimento depende de otras consideraciones debido a la dificultad en prever la evolución del estado de las capas superiores de la calzada. Además, la falta de homogeneidad y la naturaleza equívoca de los resultados relativos a la influencia del tipo del pavimento sobre el control de la emisión del ruido no permiten tomar en cuenta este factor en los análisis sobre el ruido del tráfico en general. Sin embargo, los ensayos sobre calzadas de pavimento poroso realizados con betún modificado con gránulos de caucho han confirmado la absorción acústica comprobada en las experiencias europeas.

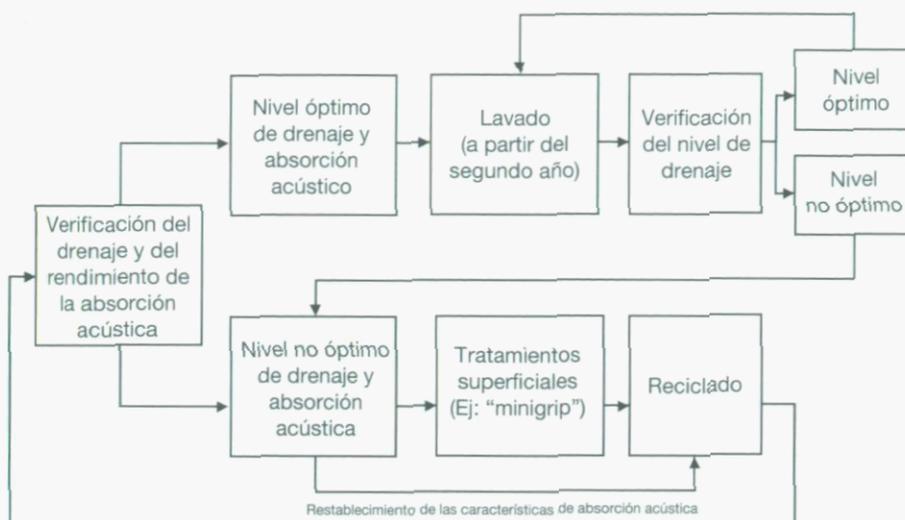
En los Estados Unidos, los estudios sobre la red de carreteras de pavimentos rígidos se han centrado en la utilización de ranuras (juntas) sobre el pavimento espaciadas de 2,5 a 7,6 cms. Se ha demostrado que las calzadas menos ruidosas son aquéllas cuya distancia entre ranuras es menor. Investigaciones recientes han puesto en evidencia que los pavimentos de asfalto son menos ruidosos que los de hormigón de cemento, durante los 5-6 primeros años. Sin embargo, con el tiempo, los pavimentos de hormigón bituminoso aportan una menor atenuación del ruido y son, de hecho, después de 8 a 12 años de servicio, más ruidosos que los pavimentos de hormigón de cemento. Por otra parte, se ha demostrado que los neumáticos con clavos aumentan el nivel del ruido de 2 a 4 dB(A).

Por último, en los Estados Unidos, se indica que los pavimentos con áridos de alto contenido en mastic dan una atenuación del ruido menor que los revestimientos drenantes, incluso si su influencia es específica a frecuencias elevadas (1000-5000 Hz).

5.3.3. Gestión y conservación del asfalto poroso drenante

Considerando el hecho de que el asfalto poroso es la mezcla más utilizada para realizar pavimentos con absorción acústica, conviene presentar un rápido resumen de la forma de optimizar la duración de vida útil de estos pavimentos drenantes y absorbentes por medio de la adopción de una serie de medidas ligadas a la gestión (ver figura 5.8). Estas reglas de gestión implican claramente, la conservación de las funciones de drenaje y de absorción del sonido de los huecos comunicantes de la capa superficial. La función de dre-

Figura 5.8. Organigrama de los modelos de precisión.



Nota: Durante el mantenimiento invernal: 1.- Mayor cantidad de sales para el deshielo
2.- Uso de sales de deshielo viscosas
3.- Operaciones preventivas

naje debe estar dimensionada según las intensidades de lluvia de la zona (medias-fuertes) y según la anchura del drenaje transversal (en el caso de tramos rectilíneos) o inclinado (en el caso de las curvas) de cara a asegurar la durabilidad de la adherencia necesaria para circular con seguridad. Para aumentar las capacidades de evacuación de agua, se puede igualmente actuar sobre el grosor, pero, por razones evidentes, esto sólo se practica en ciertos puntos de la carretera, por ejemplo, en las transiciones entre secciones rectilíneas y curvas, donde la inclinación es insuficiente.

El drenaje interno del agua de lluvia puede quedar reducido o incluso impedido en las condiciones siguientes:

- Porosidad no uniforme en sentido transversal, debida a la manera en que la capa ha sido colocada, con numerosas bandas contiguas (obturación de la zona de junta). Esta ausencia de uniformidad puede igualmente estar provocada por el compactado diferencial ejercido por el tráfico pesado sobre las bandas transversales, frecuentemente por las trazas de las ruedas de los vehículos pesados.
- Colmatado progresivo de los bordes laterales de la calzada debido a la acumulación de materiales oclusivos, al transporte por el agua (desde el interior hacia el exterior), o a la caída de materiales de los terraplenes que bordean la carretera.
- Ausencia, al principio, de áridos de dimensiones convenientes o de la adecuada intercomunicación de huecos resultantes de la granulometría.

Para más detalles sobre las especificaciones se aconseja al lector consultar las numerosas publicaciones disponibles (por ejemplo, el informe de la AIPCR sobre el asfalto poroso drenante).

El ciclo de gestión del asfalto poroso se presenta en la figura 5.8.

Con el fin de conservar la función de drenaje a lo largo del tiempo es necesario a veces realizar operaciones preventivas (en lo posible) o curativas de limpieza de huecos. Los métodos más usados son la limpieza con agua a presión o el uso de un camión de limpieza que barre y aspira (máquina especial que lava la calzada con agua caliente funcionando por una parte a presión y por otra parte por aspiración, quitando así, con el agua, los materiales obstructores finos o solubles). Estas acciones de lavado se realizan periódicamente (a título de información, en Italia cada dos años), a partir del primer o segundo año de explotación, preferiblemente en los arcenes y en el caso de autopistas, sobre la vía lenta. Se aconseja igualmente someter los arcenes a operaciones de lavado cada vez que las operaciones de mantenimiento sobre los terraplenes sean susceptibles de reducir la permeabilidad de esta zona, y antes de que los materiales introducidos puedan consolidarse.

Naturalmente si la falta de porosidad en ciertas zonas está ligada a un porcentaje de huecos residuales o a una obturación longitudinal, la acción de lavado será ineficaz e inútil. La validez de la operación se puede comprobar midiendo la conductividad hidráulica antes y después de la intervención.

La acumulación de la suciedad en largos períodos lleva consigo igualmente, el convertir las operaciones de lavado en inútiles en la medida en que el material que obtura se cimenta y llega a ser imposible de quitar, incluso aplicando las potentes acciones de limpieza descritas anteriormente (esto se produce generalmente después de tres años de la construcción inicial).

Cuando el pavimento drenante se ha colmatado es necesario comprobar los valores de adherencia y de textura superficial. Si el drenaje es total, la superficie puede tener valores de adherencia y de textura reducidas (sobre todo bajo la perspectiva de atenuación del ruido de contacto neumático-calzada). Si, por el contrario, el drenaje es insuficiente, es necesario tener valores superiores de adherencia y de textura, a fin de asegurar el contacto neumático-árido, a pesar de la presencia de la película de agua en superficie.

Por estas razones, puede ser necesaria la intervención para aumentar la rugosidad del revestimiento. Esto se puede realizar por medio de:

- Intervención de tipo mecánico para aumentar la microrrugosidad del árido (con recuperación del abrasivo con objeto de no colmatar los huecos residuales).
- Intervención de tipo recarga, utilizando una micro capa de fuerte adherencia (grip road) que aumenta la textura sin comprometer la función de absorción acústica.

Este último sistema tiene por origen la perfecta continuidad de los huecos internos en la medida en que la energía acústica es mucho más “penetrante”

o, en otros términos, menos viscosa que el aire; la dimensión de los huecos tiene, sin embargo, una influencia sobre la banda de frecuencias acústicas absorbidas. Existe igualmente un efecto debido a la unión de las superficies de pequeños canales en el interior del pavimento, cuyo engarce puede conllevar una mejora de la absorción acústica, aunque, sin embargo, puede tener un contraefecto sobre la función de drenaje.

En cualquier caso, se puede decir que la función de absorción del sonido se mantiene más tiempo que la función de drenaje, incluso algunas veces con una ligera variación positiva seguida de un deterioro en las características de la frecuencia.

La otra característica de los pavimentos porosos, la absorción acústica, se asocia al ruido de contacto neumático-calzada, ligado a la textura superficial del pavimento. Al principio de la utilización del pavimento poroso, existía la tendencia de dar un gran peso a este tipo de atenuación del ruido y, a utilizar áridos “planos” para reducir la generación de ruido, actualmente, se tiende a optimizar la absorción acústica, debido al efecto diedro, sin reducir la micro-rugosidad de los áridos y la macrorugosidad del pavimento, con objeto de compensar la pérdida eventual de la función de drenaje en el tiempo, que convierte así al pavimento, potencialmente más deslizante cuando está mojado. Paralelamente a esta tendencia, se ha buscado optimizar la cantidad de huecos en los pavimentos porosos utilizando pavimentos de granulometría siempre más abierta.

Figura 5.9. Máquina de limpieza (descolmatado) “Hurricane”.



La conservación de la función de drenaje no altera de forma clara la atenuación del ruido. Al principio del tratamiento, si se aumenta la rugosidad, se constatan ciertas reducciones en las frecuencias absorbidas, pero éstas quedan siempre aceptables comparadas con las de los pavimentos de tipo tradicional.

Como se ha indicado anteriormente, al final de la vida útil de la función de drenaje, se debe actuar sobre la rugosidad. El actuar sólomente sobre esta característica lleva implícito el renunciar a las ventajas que se obtienen con la reducción de las proyecciones de agua y de la reducción de niveles sonoros, que en algunos casos puede resultar innecesaria (capa superficial de asfalto poroso lejos de zonas urbanas). De otro modo, es necesario reconstruir las funciones de drenaje y absorción acústica, sustituyendo los materiales utilizados o bien corrigiendo la puesta en obra realizada con anterioridad. En tal caso se puede intervenir con una técnica de reciclado utilizando una máquina de fresado al calor, modificando eventualmente, la granulometría inicial con la adición de áridos; algunos son particularmente recomendables, como las arcillas pre-bituminosas. Como se ha indicado anteriormente, experiencias de este tipo han sido llevadas a cabo en Francia, Países Bajos y, recientemente, en Italia.

Incluso en el caso en que las calzadas de pavimento poroso ofrezcan una máxima capacidad de drenaje, se pueden presentar problemas de gestión en invierno, dado que la sal usada para fundir la nieve, se puede infiltrar en el pavimento o bien no permanecer durante suficiente tiempo sobre el mismo como para eliminar el hielo o la nieve fundida helada. Por esta razón se aconseja para estos pavimentos dosis más fuertes de sal, o el empleo de sales especiales “viscosas”, obtenidas mezclando NaCl y CaCl₂, que permanecen más tiempo sobre la superficie y en el interior del pavimento.

El no tener presente estos últimos consejos no va a producir consecuencias objetivamente peligrosas, pero la formación eventual de hielo en el pavimento poroso puede dar lugar a una calzada potencialmente deslizante, y los conductores de los vehículos de mercancías pueden llegar a detenerse, provocando una ralentización de la circulación. Estas precauciones se pueden evitar si se siguen las indicaciones anteriores o si se aplican en el momento oportuno tratamientos preventivos con sal.

5.4. BIBLIOGRAFIA

1. PIARC, Technical Committee on Surface Characteristics (1979). Etude du bruit résultant de l'interaction des pneumatiques et de la route. Report to the XVIth P.I.A.R.C. World Road Congress, Vienna, September, 1979.
2. PIARC, Technical Committee on Surface Characteristics (1983). Bruit de contact pneumatique-chaussée. Report to the XVIIth P.I.A.R.C. World Road Congress, Sydney, September, 1983.
3. OECD ROAD TRANSPORT RESEARCH (1984). Road Surface Characteristics: Their Interaction and their Optimisation. OECD, Paris.

4. PIARC. Technical Committee on Surface Characteristics (1987). Road Traffic Noise and Surface Characteristics Optimization. Report to the XVIIIth PIARC World Road Congress, P.I.A.R.C reference 18.01.E, Brussels, September, 1987.
5. DESCORNET, G. (1988). Surface Characteristics Optimisation Criteria. Proceedings of International Road and Traffic Conference on "Road and Traffic 2000", vol. 2, pp. 329-333, Berlin, September 6-9, 1988.
6. DELANNE, Y. (1989). Porous Asphalt Acoustical Optimisation. Proceedings of the International Symposium on "Aménagements routiers et sécurité", Luxembourg, June 14-17, 1989.
7. T.R.B. (1990). Porous Asphalt Pavements: An International Perspective 1990. Proceedings of the T.R.B./P.I.A.R.C. Joint Session on "Porous Asphalt Performance", Transportation Research Record, N. 1265, Washington, 1990.
8. CAMOMILLA, G., M. MALGARINI and R. GERVASIO (1990). Remarks on the Performance of an Extensive Network of Sound-Absorbing Porous Asphalt Pavement. Proceedings of the Annual Meeting of the Transportation Review Board, 1990.
9. BÉRENGIER, M. and J.F. HAMET (1990). Porous Asphalt Acoustical Properties: Sound Absorption Phenomena. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et des Chaussées, vol. 168, July-August 1990. LCPC, Paris.
10. SPRINT. (1991). Bituminous Road Surfacing. Proceedings of the First S.P.R.I.N.T. Workshop Exhibition and Demonstrations on "Technology Transfer and Innovation in Road Construction", Lisbon, April 22-24, 1991.
11. PIARC, Technical Committee on Surface Characteristics (1991). The Interaction Between Road and Motor Vehicle. Report to the XIXth P.I.A.R.C. World Road Congress, P.I.A.R.C. reference 19.01.B, Marrakesh, September, 1991.
12. DESCORNET, G. (1990). Reference Road Surfaces for Vehicle Testing? Roads/Routes P.I.A.R.C. Magazine, n. 272, III, 1990.
13. IVF/LCPC/CETUR (1992). The Mitigation of Traffic Noise in Urban Areas. Proceeding of the Eurosymposium, May 12-15, 1992.
14. SANDBERG, U. (1992). Low Noise Road Surfaces-A State-of-the-Art Review. Proceedings of Eurosymposium on "The Mitigation of the Traffic Noise in Urban Areas", Nantes, May 12-15, 1992.
15. PIPIEN, G. (1992) Chaussées peu bruyantes - Problématique générale. Proceedings of Eurosymposium on "The Mitigation of the Traffic Noise in Urban Areas", Nantes, May 12-15, 1992.
16. VAN MEIER, A (1992). Thin Porous Surface Layers - Design Principles and Results Obtained. Proceedings of Eurosymposium on "The Mitigation of the Traffic Noise in Urban Areas", Nantes, May 12-15, 1992.
17. T.U. Berlin/PIARC/TRB/ASTM/FGSV (1992). Proceedings of the Second International Symposium on Road Surface Characteristics, Berlin, June 23-26, 1992.
18. CAMOMILLA, G., M. MALGARINI and R. GERVASIO (1992). Optimization of Sound Absorption Performances of Porous Asphalt Pavements. Proceedings of the Second International Symposium on Road Surface Characteristics, Berlin, June 23-26, 1992.

19. IRF/FRI (1992). Contribution towards Reduction of Traffic Noise. International Road Federation Working Group on "Interaction of Vehicles, Tyres and Pavement", Paris, March 1992.
20. PIARC (1992). Noise reducing concrete surfaces. Proceedings of a PIARC-Workshop held 24-25 February 1992 in Vienna, Schriftenreihe Strassenforschung, BMwA, 1992.
21. SOMMER, H. (1992). Noise Reducing Concrete Surfaces/State-of-the-Art. Proceedings of a PIARC.-Workshop held 24-25 February 1992 in Vienna, Roads-Routes P.I.A.R.C. Magazine, n.278, III, 1992.
22. SANDBERG, U. (1992). Low Noise Road Surfaces-Design Guidelines. Proceedings of the Second International Symposium on Road Surface Characteristics, Berlin, June 23-26, 1992.
23. PIARC, Technical Committees on Flexible Pavements and Surface Characteristics (1993). Porous Asphalt - Les enrobés drainants. PIARC reference 08.01.B, 1993.
24. SANDBERG, U. (1993). Measuring Method for Comparing Noise on Different Road Surfaces. Status Report ISO/TC43/SC1/WG33. 22 February, 1993.
25. DELANNE, Y. and D. SOULAGE (1993). Etat des connaissances sur les couches de roulement peu bruyantes. November 1993.
26. AUTOSTRADE, SpA (1991). Pavement Maintenance: Performance Tender Technical Specifications. Autostrade Company, Research and Maintenance Central Directorate, January 1991, Rome.
27. AUTOSTRADE SpA (1992). Instructions for Environmental Impact of Road Structures Regarding Acoustical Pollution Control. Internal document of Autostrade Company, Research and Maintenance Central Directorate, prepared for the National Instructions of Environmental Impact of Road and Railway Structures. Rome.
28. AUTOSTRADE SpA (1993). Input for the Pavement Maintenance Via Electronic Programming (M.A.P.P.E. Project): Pavement Program 1994. Internal report of the Autostrade Company, Research and Maintenance Central Directorate, December 1993, Rome.
29. SOMMER, H. (1993). Lärm-mindernde Betonoberflächen (low noise concrete surfaces). Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 415, BMwA, Vienna.
30. LITZKA, J. and W. PRACHERSTORFER (1994). Österreichische Erfahrungen mit Lärm-mindernden Straßendecken (Austrian experiences on low noise pavements). Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 427, BMwA, Vienna.

6. LAS PANTALLAS ACUSTICAS

6.1. INTRODUCCION

En el proceso de diseño de una pantalla acústica, es necesario aplicar los conceptos físicos elementales subyacentes a la reducción del ruido si se quiere que ésta sea acústicamente eficaz, es decir que asegure la disminución deseada del ruido sin estar sobredimensionada. Es necesario igualmente en su diseño tener en cuenta sus características no acústicas como el mantenimiento, la seguridad, la estética, la construcción, el coste, etc. Los criterios principales para diseñar una pantalla acústica quedan resumidos en el cuadro 6.1. Igualmente es muy importante asegurar la participación de la comunidad (público) en las decisiones finales relativas al diseño y a la construcción de las pantallas.

Para que una pantalla anti-ruido sea eficaz, debe ser suficientemente alta y larga para impedir la propagación del ruido hacia el receptor. Las pantallas normales no son muy útiles para las casas situadas sobre una colina que domine la carretera o para edificios cuya altura sobrepase la de la pantalla. Las salidas que permiten el acceso a zonas adyacentes o el cruce de otras calles, anulan su eficacia. En algunas zonas las casas se encuentran muy diseminadas y no permiten la instalación de pantallas anti-ruido a un coste razonable. El rendimiento acústico de una pantalla anti-ruido queda determinado por el lugar de emplazamiento, su anchura, su altura así como sus características de transmisión y de reflexión (aislamiento)/absorción.

Según su forma, las pantallas anti-ruido pueden ser:

- Pantallas (barreras) naturales, como los montículos o diques de tierra;
- Pantallas artificiales, como los muros;
- La combinación de las dos, como los biomuros o las pantallas sobre taludes.

Hay que destacar que la vegetación no proporciona en general nada más que un efecto psicológico ya que sólo aporta una débil reducción de los niveles de ruido de la circulación.

Cuadro 6.1. Principales criterios para el diseño de una pantalla acústica

Consideraciones acústicas

Las cualidades de atenuación del ruido, es decir, la eficacia acústica de la pantalla en términos de reducción de frecuencias y de intensidad sonora, son:

- Una pantalla anti-ruido reduce generalmente los niveles del ruido de 10 a 15 dB(A) en la zona de sombra;
- Una pantalla anti-ruido proporciona una reducción del nivel de ruido insignificante cuando ésta no es lo suficientemente alta para cortar la línea visual entre la calzada y el receptor;
- Al otro lado de esta línea visual para cada metro de altura suplementaria de la pantalla, se obtiene una reducción del nivel de ruido aproximadamente 1,5 dB(A) (con un máximo teórico de 20 dB(A) para el total);
- La longitud de una pantalla anti-ruido debe ser aproximadamente cuatro veces la distancia entre el receptor y la pantalla (para receptores situados a menos de 100 m);
- Una pantalla anti-ruido debe tener una densidad mínima de 20 kg/m².

Consideraciones no acústicas

En el diseño de la pantalla es necesario tener en cuenta:

- La estética, que debe estar en concordancia con su entorno;
- La seguridad vial: Garantizar una buena visibilidad para los automovilistas y una buena resistencia a los choques de los vehículos;
- El mantenimiento (y los costes del mismo) de la pantalla y estructuras adyacentes y las necesidades de drenaje;
- El rendimiento estructural (acciones del viento y del tráfico, estabilidad a largo plazo) y la durabilidad (generalmente de 15 a 20 años);
- Los costes de construcción que dependen del tipo de cimentación necesaria del sistema de construcción en presencia o no del tráfico.

6.2. CONSIDERACIONES ACUSTICAS

Se puede atenuar el ruido ocasionado por la circulación vial, construyendo pantallas anti-ruido entre la calzada y las zonas que la bordean, interfiriendo de manera sustancial en la propagación de las ondas sonoras entre la calzada y el receptor. Estas ondas sonoras se difractan sobre la parte superior de la pantalla creando una zona de sombra detrás de la misma donde los niveles del ruido son débiles. Algunas pantallas pueden reducir los niveles de ruido de 10 a 25 decibelios dB(A). Una disminución de 10 decibelios corresponde a una reducción de la intensidad del ruido vial a la mitad.

6.2.1. Principios y mecanismos

Las figuras 6.1 y 6.2 presentan los principios acústicos claves ligados al diseño de una pantalla anti-ruido y su emplazamiento. Se llama “pérdida por inserción”, a la reducción del ruido debida a la pantalla, medida en el punto de recepción R (ver figura 6.1). Esta pérdida de inserción se debe al aumento del recorrido seguido por la onda de ruido difractada (ver también figura 3.3), al aislamiento de la pantalla en la zona de sombra y a la absorción del ruido por la pantalla.

Igualmente es importante recordar que al colocar una pantalla entre el origen S y un punto R de recepción, la propagación del sonido se realiza por distintos recorridos (figura 6.2). Para optimizar su efecto hay que minimizar cada una de las contribuciones, puesto que éstas son las que contaminan (salvo el efecto “6” que conviene maximizar). Se puede constatar que es imposible definir una pantalla absolutamente óptima. No obstante se puede buscar la mejor adaptada a cada caso particular.

6.2.2. Consecuencias en la planificación y el diseño

La altura y la posición de la pantalla con relación a la calzada son elementos importantes del diseño. A una distancia dada de la calzada, aumentar la altura de la pantalla permite mejorar las características de atenuación. Para evaluar la altura necesaria de la pantalla, de un modo muy general, se puede considerar que un metro de altura suplementaria, conlleva una disminución de 1,5 dB(A), suponiendo que una pantalla que llega justo a la línea de vista (línea recta entre la calzada u origen y el receptor) origina una atenuación de 5 dB(A).

Figura 6.1. Pérdida por inserción debida a la presencia de una pantalla acústica.

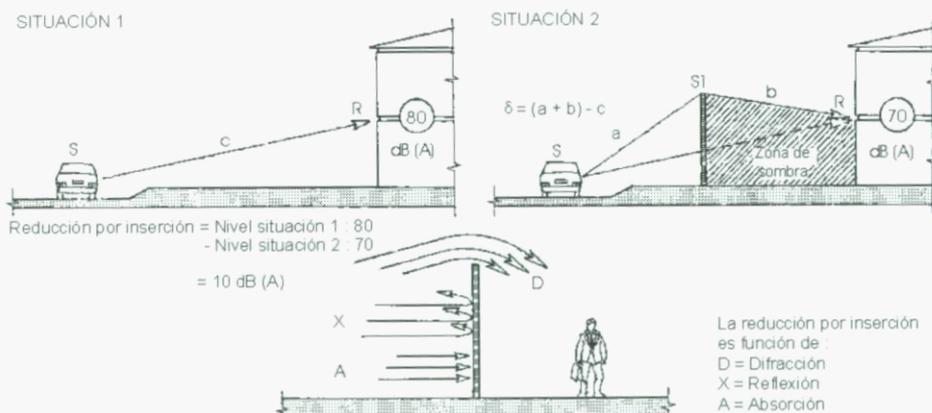
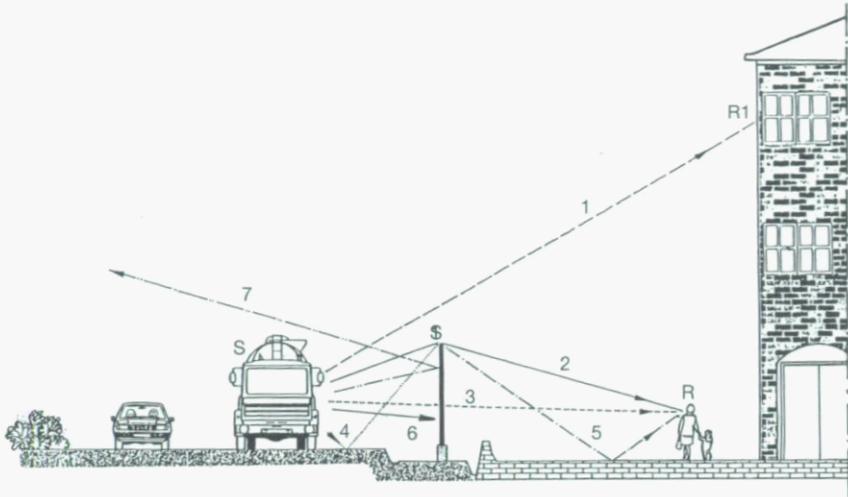


Figura 6.2. Propagación del ruido vial en presencia de una pantalla acústica.



Notas:

1. Onda directa que afecta a puntos más elevados que la línea SA — trayectoria 1
2. Onda difractada sobre la pantalla — trayectoria 2
3. Onda transmitida a través de la pantalla — trayectoria 3
4. Onda reflejada en el suelo y después difractada — trayectoria 4
5. Onda difractada y después reflejada en el suelo — trayectoria 5
6. Onda absorbida por la pantalla — trayectoria 6
7. Onda reflejada en la pantalla — trayectoria 7
8. Onda que, después de múltiples reflexiones entre la pantalla y la fuente, pasa por encima de la pantalla

Para una altura determinada de la pantalla, aproximar ésta a la fuente o al receptor, permite mejorar las cualidades de atenuación. Sin embargo, en la práctica, es conveniente en el diseño observar el entorno con objeto de encontrar un lugar de emplazamiento en una cota más elevada. La figura 6.3. ilustra el hecho de que una pantalla menos alta situada sobre un terreno elevado

Figura 6.3. Emplazamiento de una pantalla anti-ruido.

La pantalla de 3 m da una mayor atenuación del ruido que la de 5 m.



do realiza un efecto de atenuación superior al de una pantalla más alta, y por lo tanto, más cara, colocada más cerca de la carretera.

Si la pantalla es demasiado corta, el ruido de la carretera puede bordear sus extremos y llegar al receptor. Según una regla empírica la pantalla es suficientemente larga si esta medida es cuatro veces la distancia entre ella y el receptor.

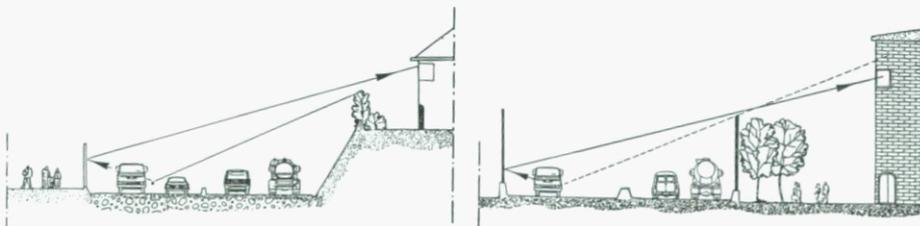
6.2.3. Consecuencias en la elección de los materiales

El sonido puede pasar no sólomente por encima de la pantalla para llegar al receptor, sino que puede igualmente atravesar la misma. Esta transmisión a través de la pantalla depende de factores ligados al material que la constituye (como su peso y su rigidez), al ángulo de incidencia del sonido y a su espectro de frecuencias.

Por regla general, si la pérdida por transmisión a través de la pantalla es superior a la atenuación resultante de la difracción, como mínimo en 10 dB(A), o si la densidad de la pantalla es como mínimo de 25 kg/m², la reducción del ruido debida a la pantalla no se verá sustancialmente afectada por esta transmisión a través de la misma. Igualmente, hay que indicar que las pantallas son más eficaces para las frecuencias elevadas desde el momento en que las longitudes de onda cortas, asociadas a altas frecuencias, son más fácilmente afectadas por objetos sólidos como las pantallas.

La energía sonora se refleja cuando una onda sonora choca con un objeto sólido como una pantalla anti-ruido. La reflexión sobre un muro-pantalla único, hacia el lado opuesto de la calzada será menor de 3 dB(A), puesto que esta única reflexión puede, al menos, doblar la energía sonora. Las múltiples reflexiones de ondas sonoras entre dos superficies planas paralelas (ver figura 6.4), tales como (1) entre pantallas anti-ruido o muros de contención de los dos lados de una carretera, o (2) entre pantallas anti-ruido y los costados de los camiones que circulan, cuando su número es elevado y la distancia entre camiones y pantalla es pequeña, pueden provocar una elevación de los niveles de ruido en un entorno próximo.

Figura 6.4. Reflexiones múltiples del ruido. Problemas derivados de pantallas paralelas no absorbentes.



En Austria se han llevado a cabo estudios que indican un aumento superior a 3 dB(A) en el caso de reflexiones entre las pantallas y los camiones, y en consecuencia cuando hay viviendas situadas al otro lado de la carretera no se emplean nada más que pantallas absorbentes. En otros países, como Estados Unidos, donde los perfiles transversales son más anchos y las distancias entre superficies planas paralelas son superiores, no se han identificado problemas de este tipo. La energía sonora puede igualmente ser absorbida cuando una onda choca con un objeto sólido; las características de absorción de cualquier material están en función de la frecuencia del sonido.

En consecuencia una pantalla anti-ruido se puede diseñar para ser:

- Reflectante, cuando refleja el ruido del lado de donde viene e impide que se transmita a través de la pantalla, aislando, de esta forma, desde un punto de vista acústico, la zona de sombra adyacente;
- Absorbente, cuando se amortigua la onda sonora (en términos de frecuencias), gracias a las reflexiones, interferencias y otros fenómenos que se producen en la pantalla.

Una pantalla absorbente no desempeñará nunca una función aislante si el material que la constituye es demasiado delgado o demasiado ligero. Pantallas absorbentes bien diseñadas son por lo tanto aislantes y reducen las reflexiones múltiples mencionadas anteriormente. Los materiales que se pueden utilizar son muy diversos (ver cuadro 6.3) y se describen en las siguientes partes de este capítulo.

6.3. CONSIDERACIONES ESTÉTICAS

6.3.1. Efectos visuales

Un elemento esencial a tener en cuenta en el diseño de una pantalla acústica es su impacto visual sobre el vecindario inmediato. Es una preocupación importante la relación de escala entre la pantalla y las actividades situadas a lo largo del borde de la calzada. Una pantalla alta en un vecindario donde las casas individuales son bajas y están dispersas podría ser desagradable a la vista. Por otra parte una pantalla alta colocada en las proximidades de los edificios, podría crear sombras nefastas y afectar así el microclima. Una solución a este problema potencial de relación de escala puede ser la realización de pantallas anti-ruido de altura variable permitiendo reducir el impacto visual gracias a arreglos paisajísticos en un primer plano. Estos permitirían así un mejor soleamiento y una buena circulación de aire en la zona residencial. En general, lo ideal es implantar una pantalla anti-ruido a una distancia de las viviendas de alrededor de cuatro veces su altura y de realizar arreglos paisajísticos en sus alrededores para evitar que la pantalla domine el paisaje.

El aspecto visual de las pantallas anti-ruido debe ser cuidadosamente estudiado en función de su entorno. Las pantallas deben, en lo posible, reflejar las características del mismo. Cuando existen elementos arquitectónicos impor-

tantes en su proximidad hay que analizar para el diseño de la pantalla la relación entre los materiales, la textura superficial y el color (por ejemplo, barrera de tipo 8, cuadro 6.3). En otras zonas, en particular, en los alrededores de nudos de carretera o de otros elementos de transporte, se puede considerar acertado que las pantallas anti-ruido tengan una fuerte relación visual en su aspecto físico con los elementos de la calzada. Una buena opción consiste, en usar un color y un tratamiento de superficie coherentes utilizando efectos paisajísticos para mitigar las vistas del primer plano de la pantalla. Es, en general, deseable evitar el exceso de detalles que tiende a reforzar la intrusión visual de la pantalla.

6.3.2. Efectos sobre los automovilistas

Igualmente hay que tener en cuenta el efecto psicológico sobre el automovilista. Las pantallas deben estar concebidas de diferentes maneras con objeto de adaptarse a sus alrededores ya sean medio urbano, medio suburbano o campo abierto y, también, hay que evitar la monotonía al automovilista. A velocidades normales, el automovilista percibe normalmente la forma global de las pantallas, su color y textura superficial. Según la escala de las pantallas un objetivo esencial para que éstas sean visualmente agradables es evitar el efecto de túnel basándose en variaciones importantes en su forma, tipos de materiales y tratamiento de su superficie. El diseño de las pantallas anti-ruido varía considerablemente en función del dimensionamiento de la calzada. Por ejemplo, este diseño va a diferir sustancialmente tanto desde el punto de vista visual como acústico entre una carretera derecha, estrecha y con pocas variaciones en las pendientes verticales, y otra ancha y con variaciones en los alineamientos horizontales y verticales. En el primer caso el diseñador ofrecerá pantallas con diferencias menores en la forma, el tratamiento de superficie y el paisajístico. En el segundo caso, el diseñador tiene la posibilidad de variar el tipo de pantalla, adaptar los taludes al paisaje y recurrir a soluciones más complejas para crear una pantalla visualmente agradable.

6.3.3. Aspectos de pantallas

Tanto en el plano visual como en el de la seguridad, los extremos de las pantallas no deben ser demasiado impactantes. Se puede realizar de numerosas maneras una transición gradual entre el nivel del suelo y la altura requerida para la pantalla. Los extremos de una pantalla pueden estar constituidos por una berma o un terraplén. Igualmente se puede curvar la pantalla hacia atrás dándole una pendiente, disminuir progresivamente su altura y terminarla en un arriate con plantas. Este último concepto debe aplicarse sólo en las zonas donde las condiciones climáticas permiten un crecimiento continuo de la vegetación y en lugares donde los bordes de los arriates estén protegidos contra posibles conflictos con el tráfico vial.

6.3.4. Graffiti

Los graffiti sobre las pantallas anti-ruido pueden presentar problemas. Una solución es el empleo de materiales fácilmente lavables o retocables. Los

arreglos paisajísticos y las plantas en las proximidades de las pantallas pueden igualmente servir para evitar los graffiti, añadiendo calidad al conjunto visual.

6.3.5. Resumen

La concepción estética y la integración de pantallas anti-ruido en el paisaje y en el medio, reviste una importancia especial. En particular lo relacionado con la altura de la pantalla, la elección de material, de la forma, de la estructura y del color de la misma. El éxito del diseño implica un trabajo multidisciplinar, y deben ser consultados arquitectos-urbanistas, arquitectos-paisajistas, ingenieros especialistas en carreteras, en problemas acústicos y en estructuras.

6.4. OTRAS CONSIDERACIONES NO ACUSTICAS

6.4.1. Participación del público

La participación del público es esencial en la planificación y diseño de buenas pantallas anti-ruido. Es importante tener en cuenta los gustos y deseos de los habitantes, puesto que ellos tendrán que vivir habitualmente con la pantalla durante años. Estos pueden no encontrar ninguna ventaja en una pantalla que encuentran desagradable a la vista y en cuya planificación no han participado. Es igualmente conveniente implicar en su diseño a personalidades oficiales y organizaciones de la zona afectada.

6.4.2. Seguridad

Se debe implantar la pantalla anti-ruido fuera de los lugares donde es posible el choque de un vehículo que se salga de la carretera. En los lugares donde existe este peligro, en particular cuando las pantallas anti-ruido se construyen sobre el borde de una carretera existente, las barreras de seguridad pueden colocarse como protección de las pantallas anti-ruido.

Cuando el espacio disponible es limitado, la barrera de seguridad puede construirse delante de la pantalla o integrarse en ella. Los tipos 7 del cuadro 6.3 y las cimentaciones D y E del cuadro 6.2 son ejemplos de esta configuración. Estas protecciones son igualmente eficaces para impedir a los vehículos pesados salirse de la carretera. Hay que decir que estos sistemas de protección han estado sometidos a los tests de resistencia mayor 485 KJoules según la nueva norma del Comité Europeo de Normalización (C.E.N.).

Es necesario tener en cuenta la seguridad cuando se implantan pantallas anti-ruido en la proximidad de rampas de entrada o salida, de puntos de convergencia de rampas o cruces de carreteras. Una pantalla anti-ruido no debe

obstruir la línea visual entre el vehículo sobre la rampa y los que se acercan sobre la carretera principal.

La limpieza de la nieve puede tener una fatal consecuencia sobre la seguridad cuando la nieve fundida se transforma en hielo en la superficie de la calzada o cuando el viento y las corrientes acumulan la nieve sobre las carreteras. Se debe dejar un espacio suficiente para el quita-nieves. Las pantallas anti-ruido no deben hacer sombra sobre la calzada puesto que esto favorecería la formación de hielo. El tratamiento superficial de pantallas tiene también implicaciones en cuanto a la seguridad. Hay que evitar las protuberancias sobre una pantalla situada cerca de una vía de circulación así como los paramentos susceptibles de transformarse en proyectiles en caso de choque.

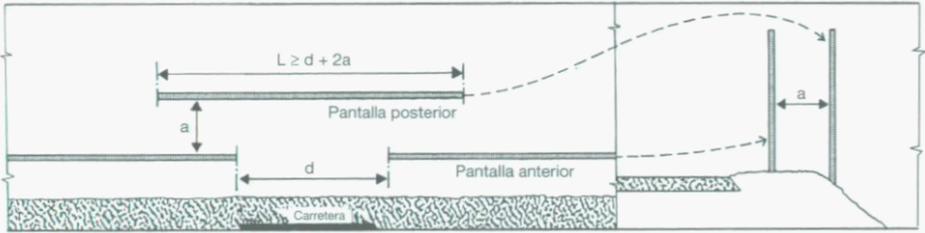
6.4.3. Mantenimiento

Consiste en el mantenimiento de la propia pantalla, el de los arreglos paisajísticos que la rodean, la sustitución de partes de la pantalla deterioradas por impactos de vehículos, la limpieza de la misma y/o la limpieza de los graffitis. En general el mantenimiento de la pantalla es menos costoso si está realizada con materiales no pintados como el acero envejecido, hormigón, madera tratada a presión o madera envejecida naturalmente. Desde el punto de vista visual y de mantenimiento es aconsejable el uso de superficies de hormigón sin más tratamiento, como áridos expuestos y los acabados con un lavado de arena, o con colores integrales o morteros de cemento coloreado, en oposición a las superficies pintadas que, a largo plazo, exigen un mantenimiento continuo. El mantenimiento de los arreglos paisajísticos realizados sobre los bordes de la calzada estará afectado a la vez por la posición de la pantalla y por el tipo de arreglo realizado.

Asegurar un acceso a la parte posterior de la pantalla para el mantenimiento o los servicios de urgencia, haciendo variar la alineación horizontal de la pantalla, puede igualmente dar lugar a un aspecto visual más agradable. En general, los orificios de acceso en una pantalla deben ser concebidos con objeto de evitar que el tráfico no se encuentre bruscamente frente a un muro. Cuando no es una puerta sólida que abre el acceso, se pueden construir muros-pantalla paralelos de un ancho mínimo tres veces la anchura de la abertura, y revestidos de un material absorbente para preservar la eficacia acústica de la pantalla (ver figura 6.5).

Otro elemento a tener en cuenta en cuanto al mantenimiento de las pantallas es la gestión de un stock de materiales para las operaciones de reemplazo. Esto puede suponer un serio problema, sobre todo con la madera o el acero naturalmente envejecidos. Por último, las operaciones quita-nieves pueden afectar el mantenimiento cuando se utilizan como pantallas anti-ruido taludes de tierra. La vegetación sobre los taludes debe resistir los efectos de la sal y otros productos químicos utilizados en las operaciones de quitar la nieve y de la lucha contra el hielo. Los costes pueden aumentar

Figura 6.5. Cabalgamiento de pantallas paralelas.



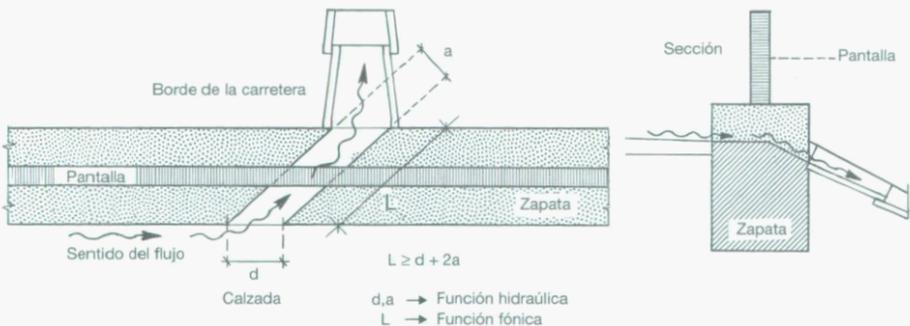
cuando las pantallas altas se encuentran situadas muy cerca de la calzada (no se dispone de un espacio para amontonar la nieve sobre los bordes), y hay que transportar la nieve por encima de la pantalla o llevarla en camiones a otros lugares.

6.4.4. Drenajes

El drenaje del agua a lo largo del borde de una calzada puede encontrarse seriamente afectado por la construcción de una pantalla anti-ruido. La cuestión del drenaje debe examinarse muy pronto, desde la fase de planificación de la construcción. Las estructuras de drenaje deben concebirse para prolongarse bajo las pantallas. No hay que practicar agujeros en las mismas para asegurar este drenaje, pues se puede correr el riesgo de disminuir sustancialmente su rendimiento acústico.

No dan todos los países igual importancia a la pérdida potencial de aislamiento acústico. Algunos, como los Países Bajos, toleran la presencia de aberturas para el drenaje en la parte inferior de la pantalla con objeto de evitar un coste más importante ligado a los drenajes acústicamente cegados. Una solución posible se presenta en la figura 6.6 y se basa en el principio des-

Figura 6.6. Vista en planta de un drenaje acústicamente cegado (los bordes del muro deben ser porosos).



crito en la figura 6.5. La longitud L debe ser superior o igual a dos veces su anchura (a) más la abertura d visible desde la carretera.

Igualmente hay que tener en cuenta las necesidades de agua de la vegetación plantada con fines ornamentales alrededor de las pantallas. Es necesario instalar riego artificial allí donde los sistemas de agua natural y de drenaje no sean suficientes para garantizar el crecimiento de la misma.

6.4.5. Cimentaciones de pantallas

El cálculo de cimentaciones de pantallas debe basarse en teorías establecidas y ensayos probados y, en particular, debe tomarse en consideración:

- Los efectos del viento que afectan la estabilidad de la estructura dada la gran superficie de las pantallas anti-ruido.
- Los asientos diferenciales; al margen del impacto negativo sobre la estética, las juntas en los puntos de contacto entre los elementos de la pantalla pueden reducir los rendimientos de atenuación del ruido.
- Los costes; las cimentaciones pueden tener un peso considerable sobre el coste total, en particular en regiones donde hay mucho viento pueden representar hasta un 30 % del coste del conjunto de la pantalla acústica.

Muchos países han desarrollado soluciones originales para estos problemas. Por ejemplo, en Italia, se fijan soleras o placas para el soporte de las barreras tipo New Jersey, que son móviles cuando reciben un impacto, mediante unos dispositivos dúctiles de anclaje que “controlan” los elementos que pueden elevarse hasta 40 cm.

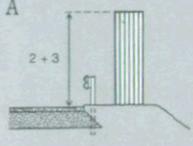
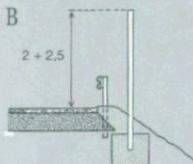
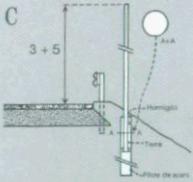
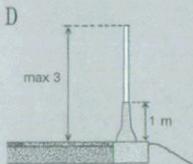
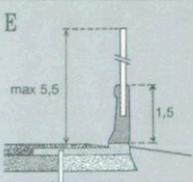
Los Estados Unidos han ideado otra solución mediante cajones rellenos de agua para pilotes en zonas donde el agua subterránea está muy próxima a la superficie del terreno. El método de pilotaje “perforador-molde” fuerza el paso a presión del hormigón al barreno a través de un pasillo interno mientras se realiza la perforación. Cuando el perforador alcanza el fondo del cajón, comienza el bombeo del hormigón, y el perforador continúa en rotación mientras es extraído. De esta manera, el hormigón bajo presión es bombeado dentro del cajón, evitando la entrada de agua. Se colocan a continuación, en el hormigón recién vertido, postes premoldeados a partir de barras reforzadas alargadas.

Los sistemas más ampliamente extendidos son zapatas aisladas (B) y solera continua (D) con variaciones técnicas (tipo C) (ver cuadro 6.2).

6.5. TIPOS DE PANTALLAS ANTI-RUIDO

Diferentes tipos de pantallas anti-ruido han sido utilizados en los países de la OCDE. Se clasifican por tipos y condiciones de uso en el cuadro 6.3.

Cuadro 6.2. Tipos de cimentaciones

Tipo de cimentación	Descripción de las cimentaciones	Tipo de pantalla	Sistema de protección	Lugar de colocación	Coste relativo
<p>A</p>  <p>Sin cimentación</p>	<p>A1. Paneles en zig-zag unidos entre ellos, colocados sobre el suelo; $1 = f(h)$</p> <p>A2. Paneles ligeros con una pequeña suela (30×30 cm)</p>	<p>A1. Paneles pesados en hormigón armado, altura máxima 2,5-3,00 m</p> <p>A2. Paneles ligeros (madera, aluminio) altura < 2,00 m. muros de vegetación integrados</p>	Barreras de metal (o de montañas de tierra)	Nivel del terreno Suelo sólido. Gran espacio lateral	0,1 a 0,4
<p>B</p>  <p>Cimentación sobre zapatas aisladas</p>	<p>Zapatas aisladas de hormigón armado</p> <p>Distancia usual: 3 m</p> <p>Corte adaptado al viento local</p> <p>Altura máxima de la pantalla: 2,00 - 2,50</p>	<p>Paneles ligeros unidos con apoyos de fijación.</p> <p>Posibilidad de usar diferentes materiales en función del lugar donde están emplazados</p>	Barrera de metal	Terraplenes poco elevados ($h < 3,50$ m)	1
<p>C</p>  <p>Cimentación sobre pilotajes en acero</p>	<p>Pilotajes en acero anclados al suelo con apoyo fijado a base de arena y cemento. La profundidad está en función de la altura y los vientos locales</p>	<p>Como para las cimentaciones de tipo B</p> <p>Altura de la pantalla > 3,00 m hasta 4,50 - 5,00</p>	Barrera de metal	Terraplenes al-tos ($h > 3,00$ m) suelo con una baja capacidad portante. Problemas de vientos fuertes	2,0
<p>D</p>  <p>Cimentación por zapata corrida</p>	<p>Zapata corrida en hormigón armado unida a una barrera de seguridad tipo New Jersey por un sistema de anclaje dúctil. Las dimensiones de la zapata están en función del viento (generalmente: $0,60 - 1 \times 0,50$ m)</p>	<p>Paneles aislantes o absorbentes en hormigón armado, incluso sin apoyo de fijación</p> <p>Altura máx. 3,00 m</p>	Barrera de seguridad tipo New Jersey (resistencia a los choques < 485 Kj)	Terraplenes elevados ($h > 3,00$ m) Zonas con vientos de mediana intensidad	1,5
<p>E</p>  <p>Cimentación plana claveteada o zapata</p>	<p>Cimentación plana (o zapatas), conectada al suelo con 12 micropilotes verticales o inclinados 10 grados (clavos). Distancia de 1,50 a 2,00 m. Las zapatas se prefieren para actuaciones en las carreteras ya existentes</p>	<p>Pantallas con paneles ligeros muy altos (5,00 - 5,50 m) descansando sobre barreras New Jersey absorbiendo el ruido de baja frecuencia</p>	Barrera de seguridad tipo New Jersey (resistencia a los choques > 485 Kj)	Terraplenes elevados ($h > 3,00$ m) En el acceso de puentes con pantallas anti-ruido, para una gran seguridad	2,0

6.5.1. Pantallas naturales

Están formadas por una banda de vegetación con un fondo variable de al menos 10 metros (ver figura 6.7), plantada de una forma específica. Las especies de plantas se escogen en función de su:

- altura (hierba, matorral, arbusto, planta)
- tipo de hoja (perenne o caduca)
- compatibilidad con el clima (regiones áridas o húmedas)

Los niveles del ruido vial pueden reducirse gracias a la absorción y a la difusión del sonido por la vegetación (la difusión aumenta la zona de propagación del sonido y una parte de la energía sonora se absorbe por los efectos del suelo, el aire o el rozamiento con las hojas o bien se disipa transformándose en calor). No obstante, la vegetación debe ser muy alta y muy densa para conseguir una reducción física del ruido. La vegetación plantada en el marco de un proyecto de carretera, produce sobre todo un efecto psicológico. Al proteger a los habitantes de la visión permanente de los vehículos en circulación induce igualmente en ellos, un efecto psicológico visual.

En Austria, con la vegetación natural se ha llegado a reducciones del ruido de hasta 3 dB(A) (sin plantas especiales), con 50 a 100 mts. de fondo (espesores menores han producido un efecto puramente psicológico). Italia ha obtenido, utilizando este sistema, reducciones del ruido de 4 a 8 dB(A) en función de las especies, la altura, la intensidad y la situación de la vegetación. Estos resultados se han obtenido mezclando árboles y matorrales plantados en filas de 6 a 7 mts. de espesor paralelamente a la calzada.

Las pantallas naturales se colocan, con frecuencia, sobre taludes (ver figura 6.9). Generalmente los taludes:

Figura 6.7. Pantalla natural. Talud bajo y «biomuro».

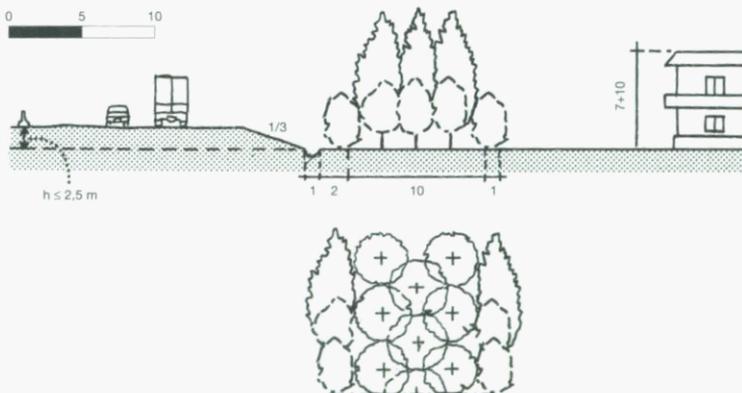
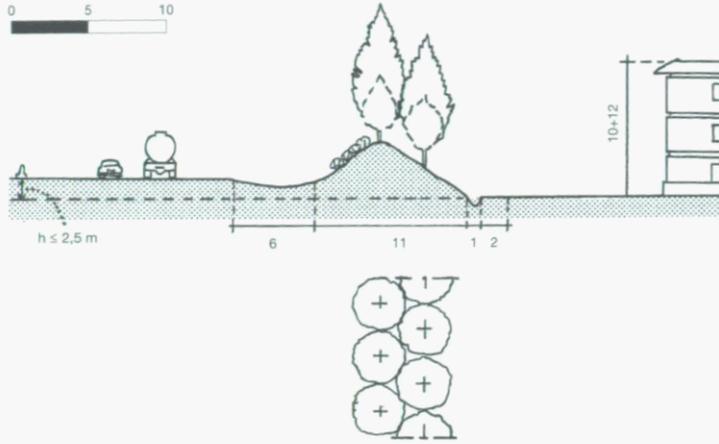


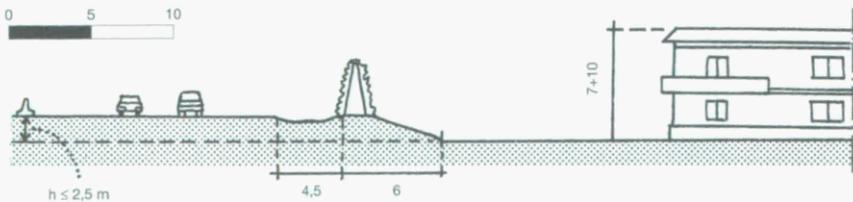
Figura 6.8. Pantalla natural. Talud (con vegetación) cercano a edificios (10-12 m).



- están en general recubiertos de vegetación,
- tienen un aspecto muy natural,
- son, normalmente, agradables,
- permiten un mejor soleamiento (menos sombra),
- aseguran una mejor circulación de aire,
- pueden servir para aprovechar los materiales de escombros excedentes,
- normalmente, no necesitan dispositivos de protección contra los vehículos que dejan la calzada,
- su instalación y mantenimiento son menos caros que en los muros,
- tienen una duración de vida prácticamente ilimitada.

Sin embargo, la construcción de taludes puede exigir una superficie muy extensa de terreno.

Figura 6.9. Pantalla natural. Pantalla de vegetación próxima a pequeños edificios (alrededor de 10 m).



Las pantallas mixtas se obtienen instalando pantallas artificiales (fabricadas en madera u otro material) sobre pantallas naturales o disponiéndolas en lo alto de taludes lo que mejora sustancialmente su calidad de atenuación de ruido. Las pantallas mixtas comprenden igualmente estructuras artificiales concebidas para permitir el crecimiento de hierbas, matorrales, arbustos, plantas trepadoras u otra vegetación que las tapa con el fin de obtener un efecto visual agradable propio de las pantallas naturales. Estas están formadas por estructuras prefabricadas en hormigón, acero, madera, conteniendo un importante volumen de tierra y están con frecuencia equipadas de un sistema de riego.

6.5.2. Pantallas artificiales

Las pantallas artificiales son las típicas pantallas anti-ruido. Su funcionamiento en términos de micro y macro acústica ha sido descrito anteriormente. Una clasificación de las pantallas artificiales se expone en el cuadro 6.3. Se distingue:

- Pantallas con una estructura continua
- Pantallas con estructura discontinua
- Pantallas continuas/discontinuas auto-protectoras
- Pantallas arquitectónicas
- Pantallas totales

Esta clasificación considera únicamente la geometría y la morfología de la pantalla, no tiene en cuenta, sin embargo, los materiales que la constituyen.

Los materiales más comunmente utilizados son el hormigón, la madera y el metal (aluminio o galvanizado, acero pintado conteniendo un relleno de fibras absorbentes) aunque ciertos países utilizan con preferencia la madera e igualmente el metal. Se añade con frecuencia vegetación a las pantallas artificiales (matorrales o plantas trepadoras, de lo cual hay excelentes ejemplos en Japón). Las plantas permiten no sólo mejorar el aspecto estético de la pantalla sino que contribuyen igualmente a absorber las emisiones, partículas y metales pesados que emana el tráfico. Existen por ejemplo plantas “comedoras” de plomo como *qilanthus glandulosus*. Sin embargo conviene podarlas convenientemente para evitar que se dispersen; las plantas pueden convertirse en generadores de ruido por encima de las pantallas lo que reduce su eficacia.

6.5.3. Criterios de evaluación

El cuadro 6.4 presenta un sistema de evaluación utilizado en Italia para la clasificación de pantallas anti-ruido. Los mismos criterios científicos fundamentales se utilizan en Francia, España, Alemania y otros países (ver igual-

Cuadro 6.3. Clasificación de pantallas anti-ruído (Basada en el esquema italiano)

Tipos	Materiales constituyentes	DIMENSION L = longitud min. H = altura min.	Mecanismo acústico (**) I = Aislante A = Absorbente	Lugar de colocación	Eficacia (*) M; B; O IL = dB(A)	+; Ventajas -; Inconvenientes
PANTALLAS NATURALES:						
1. Pantalla-matorral	<ul style="list-style-type: none"> • Plantas • Matorrales • Árboles 	L = al menos 10 m H = 8-9m	A	En un clima adaptado y con suficiente espacio Receptores a baja altura (7-10 m)	M IL = 3-4	+; Aspecto agradable Absorbe los escapes de gases -; Eficacia acústica limitada y variable, según las estaciones
2. Diques de tierra con arbustos	<ul style="list-style-type: none"> • Terraplen y vegetación • Igual material que en 1 	L = 15 - 18 m H = 3 - 4 m	I - A	Como en 1 pero en espacios más grandes. Receptores situados a 7-10 m	B IL = 15-16	+; Como en 1, pero mejor eficacia acústica -; Necesidad de espacio
PANTALLAS MIXTAS						
3. Diques de tierra con arbustos y pantalla integrada artificial	<ul style="list-style-type: none"> • Como en 2, con pantalla en madera, aluminio u otro material 	L = 15 - 18 m H = 9 - 12 m	I - A (mas aislante que 2)	Como 2 Ej. fig. 6.11	O IL = 18 - 20	+; Como en 2, pero mejor -; Como en 2
4. Biomuros o muros con vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • Hormigón, madera o metal conteniendo vegetación 	L = 2-3 m H = 3-4 m	I (A = moderadamente)	Como en 1, con poco espacio y edificios receptores próximos. Posibilidad de una integración artificial Ej: fig.6.18,19,24	B IL = 16 - 18	+; Aspecto agradable en un espacio reducido -; Crecimiento de plantas difíciles. Necesidad de riego

PANTALLAS ARTIFICIALES							
5.	Pantalla continua en línea recta	a) Ladrillos agujereados o elementos prefabricados b) Paneles de hormigón armado c) Paneles de madera con o sin material absorbente d) Paneles de aluminio o acero con material absorbente e) Materiales diversos f) Materiales transparentes (metacrílico, policarbonato)	a. L = 0,5 m H = 2,5 m b. L = 0,35 m H = 3-4 m c. L = 0,30 m H = 2-3 m d. L = 0,3 m H = 4-5 m e. L = 0,5 m H = 3-4 m f. L = 0,5 m H = 3-4 m	I & A (con huecos) I & A I & A A I & A I	Carreteras que necesitan una disminución importante del ruido. Espacios laterales limitados. Medios urbanos e industriales. Ej. = fig.6.12, 14, 25, 26, 27	a) B IL = 15-16 b) B-O IL = 17-19 c) B IL = 18-19 d) O IL = 20-22 e) 0 IL = 15-19 f) B IL = 16-17	+: Buena eficacia acústica. Buena protección contra el fuego -: Intrusión visual para los usuarios de la carretera. Dificultades para el mantenimiento del carril de parada
6.	Pantallas discontinuas	a) Paneles de hormigón armado b) Paneles de aluminio o acero con material absorbente c) Combinación de a) y b) con paneles transparentes	a. L = 1-2 m H = 3-4m b. L = 1,0 m H = 3-4 m c. L = 2,0 m H = 3-4 m	I & A A I & A	Carreteras que necesitan una disminución importante del ruido. Espacio lateral disponible medio. Necesidad de ver el panorama detrás de la carretera. Ej. fig.6.10	a) O IL = 17-18 b) O IL = 18-19 c) O IL = 20-22	+: Como 5 -: Necesita más elevados y costes de mantenimiento más elevados
7. (***)	Pantallas en línea recta continuas/ discontinuas con barrera protectora en su base, anti-choque	a) Paneles de hormigón armado b) Paneles de aluminio, acero o madera c) Combinación de a) y b) con paneles transparentes	como en 5 y 6	Como en 5 y 6 pero con barrera de seguridad utilizada en puentes, carreteras, etc. que no se atraviesan Ej. fig.17.20	como 5 y 6	+: Como 5 más protección para los automovilistas -: Como 5	

Cuadro 6.3. Clasificación de pantallas anti-ruido (Basada en el esquema italiano) Continuación

Tipos	Materiales constituyentes	DIMENSION L = longitud min. H = altura min.	Mecanismo acústico (**) I = Aislante A = Absorbente	Lugar de colocación	Eficacia (*) M; B; O IL = dB(A)	+; Ventajas -; Inconvenientes
PANTALLAS ARTIFICIALES (Continuación)						
8. Pantallas arquitectónicas	Pantallas compuestas con formas y concepción artísticas, en color, formadas por diversos materiales	L = variable (desde 0,5 m a algunos metros) H = variable	I, raramente A	Armonía con el medio	B IL = 14-16	+; En armonía con el medio -; Costes más elevados de construcción y de mantenimiento
9. Pantalla total	Pantalla del tipo 5 c o 5a con tableros fónicos en plástico por encima de la carretera	L = la de la carretera H = 4,5 m	A	Carreteras que necesitan una gran disminución del ruido. Para protección de edificios de numerosas plantas > 15 m Ej. fig. 7.3, 6.28	O IL = 10-25 para los pisos altos	+; Buena protección incluso para los grandes edificios -; Como 5, pero peor

(*) Eficacia M = Media, B = Buena, O = Óptima, IL = pérdida por inserción media, medida en condiciones estándares (10m detrás de la pantalla, a una altura de 1,5 m)
 (**) Aislante es sinónimo de «Reflectante»
 (***) Otra solución es una barrera de seguridad en acero

mente el Capítulo 7). Además se indica el tipo de material utilizado y sus propiedades acústicas, y los ensayos “in situ” para que la pantalla sea aprobada (según las normas establecidas). Se trata de ensayos bajo el impacto de diferentes fuentes sonoras, efectos medios de pérdida de inserción y resultados de “tests” por el método impulsivo. Evaluaciones generales técnico-económicas se llevan a cabo siguiendo condiciones de medida normalizadas con el fin de obtener un conjunto de datos que permiten comparar las pantallas. Datos relativos a una pantalla discontinua de aluminio se dan a título de ejemplo así como una fotografía (tipo 7, cuadro 6.3).

6.5.4. Costes

Los costes dependen de los materiales y del tipo de pantallas. La instalación de una pantalla a lo largo de una carretera existente —es decir en presencia de tráfico, en particular cuando éste no debe alterarse (trabajo de noche, obras de baja rentabilidad en espacios limitados)— tiene también un impacto importante sobre los costes. Esto explica las variaciones del cuadro 6.5 que ilustra las variaciones de los costes de pantallas acústicas en los países de la OCDE.

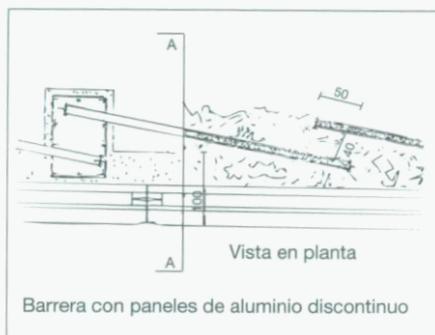
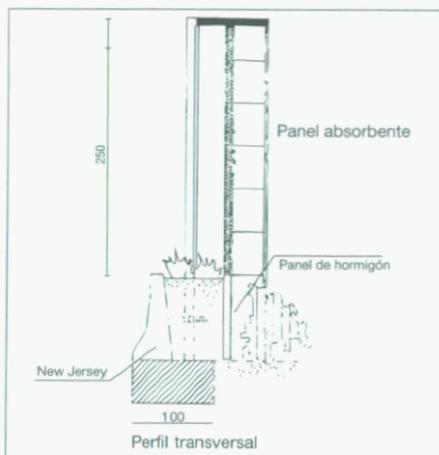
Para las pantallas naturales y los diques de tierra, la adquisición del terreno constituye la parte más importante de los costes, no siendo elevado el de las plantas.

Figura 6.10. Pantalla en aluminio (absorbente) discontinua descrita en el cuadro 6.4 (Italia) (tipo 7b, cuadro 6.3).



Cuadro 6.4. Formulario de clasificación de una pantalla acústica (Italia)
(los datos incluidos aquí se refieren a una pantalla de aluminio
discontinua)

PANTALLA PANTALLA DE ALUMINIO* N.....



- a prueba de ruido
- absorbente del ruido

1. MATERIALES	CHAPA DE ALUMINIO - PANELES ABSORBENTES	
2. DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES	paneles . 2.97 x 0,33	m slabs...x...x
3. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES	peso y espesor de los paneles 16,5..Kg/m ² ..100...mm densidad espesor del material absorbente 100..Kg/m ³ ..60...mm espesor del material no absorbente 1,0 . mm tratamiento de protección	
4. PILOTES	Typo. HEA 140	span -,-3...m
5. DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la corrosión • Resistencia a los choques • Resistencia al fuego • Otros 	NORMA ASTM B 117-90 NORMA NORMA
6. PROTECCION CONTRA LOS VEHICULOS	<input type="checkbox"/> Autoprotegido <input type="checkbox"/> Barrera de seguridad necesaria	
7. TIPO DE CIMENTACION	<input type="checkbox"/> por zapata corrida <input type="checkbox"/> sobre zócalos aislados <input type="checkbox"/> sobre pilotes de acero <input type="checkbox"/> tipo New Jersey <input type="checkbox"/> otros	
8. LUGAR DE COLOCACION	<input type="checkbox"/> puentes <input type="checkbox"/> terraplenes <input type="checkbox"/> desmonte <input type="checkbox"/> terreno llano	
9. IMPACTO SOBRE EL MEDIO	<input type="checkbox"/> bueno <input type="checkbox"/> medio <input type="checkbox"/> malo	
10. FACILIDAD DE MANTENIMIENTO	<input type="checkbox"/> bueno <input type="checkbox"/> medio <input type="checkbox"/> malo	
11. COSTE DE CONSTRUCCION	pantalla sin cimentación Lit/m ² pantalla con cimentación 443.000....Lit/m ²	

* Especificar tipo.

Cuadro 6.4. (continuación)

PANTALLA PANTALLA DE ALUMINIO

N.....

12. PROPIEDADES ACUSTICAS

Test de aislamiento y absorción acústica en una sala

Superficie de panel

sometido al test de absorción..... 1147 m²

Peso por unidad de superficie Kg/m²

Volumen de la sala reverberante 205.8 m³

Superficie total de la sala..... 219.5 m²

Superficie del panel sometido el test, de

aislamiento acústico 7.7 m²

Volumen de las salas de

emisión y de recepción..... 52 m³ 72 m³

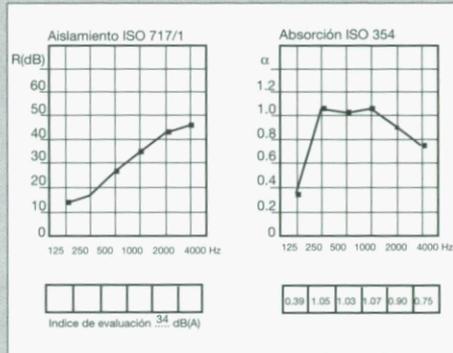
Tiempo de reverberación..... para 1.000 Hz... sec

Superficie de difusión..... m²

Temperatura del aire...26 °C humedad ... 55%

Sonido del ensayo ruido blanco a 1/3 octavo.....

Laboratorio de ensayo

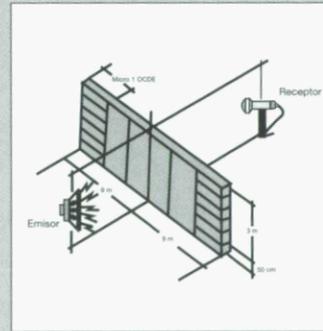


índice de evaluación..34.. dB(A)

Otros métodos de medida

test de campo

f(Hz)	ruido blanco		ruido rosa		ruido del tráfico	
	d1	d2 (25)	df	d2	d1	d2
125		7.5		11.2		7.5
250		6.8		11.0		15.0
500		5.8		19.0		14.
1000		13.3		18.0		24.0
2000		27.0		29.2		33.5
4000		17.7		22.5		31.0
		25.0		23.5		15.8

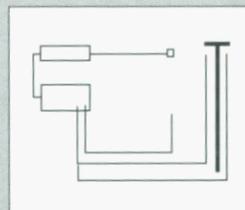


Aislamiento acustico por inserción (ΔL_x)

hx	dx	d1(10)	d2	d3
hf(1.5)		24.3	24.5	25.8
h2		26.1		
h3				

ΔL_x corresponde a la variación del ruido en dB(A) debido a la pantalla, medida a una distancia dx de la pantalla y a una altura hx

Medidas de absorción por método impulsivo



f(Hz)	a	R
125		
250		
500		
1000		
4000		

Cuadro 6.4. (continuación)

PANTALLA	PANTALLA DE ALUMINIO	N.....
13. EVALUACION GLOBAL TECNICO ECONOMICA		
ΔL en las condiciones standars	12,8 dB(A)	
Coste por m ² para una reducción de	1 dB(A) (Lira italiana)	
a) sin cimentación Lit/dB(A)	
b) con cimentación	..34.000 . Lit/dB(A)	

condiciones estándar 10 m

Cuadro 6.5. Costes de pantallas acústicas

TIPO DE PANTALLA	COSTE POR METRO CUADRADO EN (US \$)
Hormigón	75 - 300
Madera	60 - 260 (430 para las absorbentes)
Aluminio o acero (metal)	110 - 240
Acrílico o policarbonato (transparente)	250 - 470
Verde o vegetación (biomuros)	240 - 470
Hormigón con base New Jersey	125 - 220
Barrera ecotécnica por viaducto	190 - 215

** Para una pantalla completa, el tratamiento estético puede hacer aumentar el coste del 20 al 40%*

6.6. INFORMACIONES NACIONALES RELATIVAS A LAS PANTALLAS ANTI-RUIDO

El estudio que sigue a continuación describe las experiencias de varios países en cuanto a pantallas anti-ruido; no pretende, sin embargo hacer una descripción exhaustiva de los usos de estas pantallas en todos los países de la OCDE.

6.6.1. Australia

En Australia la mayor parte de las pantallas anti-ruido se han construido en madera, aunque también se han realizado diques de tierra. Otros materiales han sido probados, tales como la fibra de vidrio, aluminio, acero y hormigón (por ejemplo, hormigón no fino, hormigón Styropor, hormigón armado con fibra de vidrio). De todos estos materiales, es el hormigón armado con fibra de vidrio el que ha parecido más prometedor. Presenta excelentes cualidades de moldeado, resistencia y durabilidad, a la vez que es ligero y económica-

Figura 6.11. Pantalla típica de 2 m en madera (reflectante, tipo 3 - cuadro 6.3) constituida en planchas de pino tratado al CCA de 35 mm de espesor.



mente interesante. Se han realizado pantallas sobre pilas de puentes, así como barreras de seguridad del tipo New Jersey, en hormigón armado con fibra de vidrio.

Las pantallas anti-ruido deben satisfacer las especificaciones siguientes:

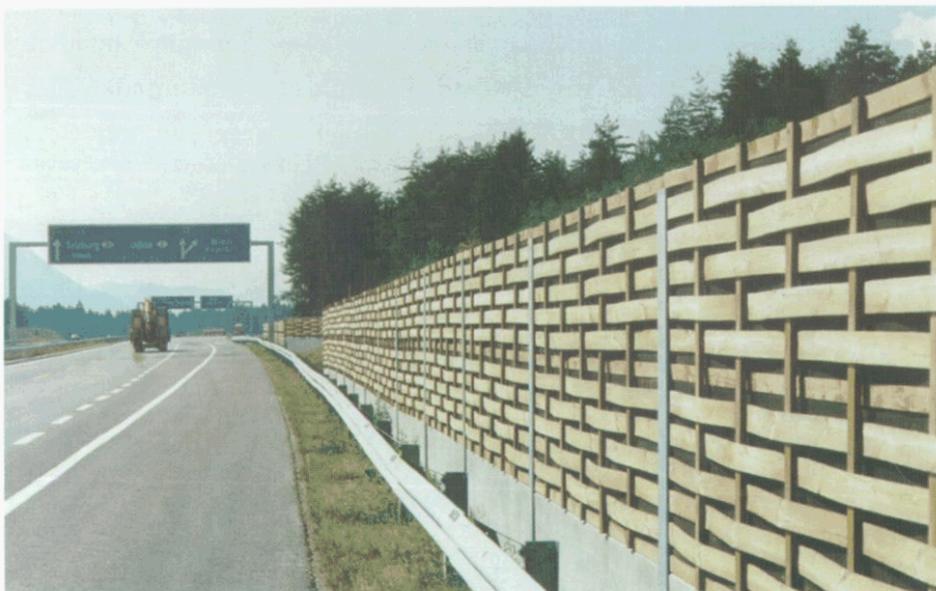
- La pantalla debe resistir al viento allí donde esté implantada.
- Antes de que una pantalla sea formalmente aceptada, sus elementos estructurales deben ser homologados por la Dirección de Carreteras.
- La pantalla debe tener una masa superior a 10 kg/m^2 .
- La pérdida global debida a la transmisión del sonido a través del material de la pantalla no debe ser inferior a 30 dB(A) (se exige un certificado de ensayo realizado por un laboratorio).
- La pantalla no debe presentar ningún agujero o cavidad y debe ser nula la probabilidad de que puedan formarse orificios, permitiendo así el paso del ruido.
- La pantalla debe ser diseñada de forma que no sea reflectante.
- La pantalla debe ser diseñada y construida de manera que el ruido no pueda pasar por debajo.
- La pantalla debe ser aceptable desde un punto de vista estético.

- Además de las condiciones precedentes una pantalla absorbente debe presentar un coeficiente de absorción comprendido entre 0,7 (125 Hz) y 0,9 (500-100 Hz).
- Todos los componentes de una pantalla absorbente deben presentar cualidades de durabilidad física en cuanto a la exposición al sol, al agua, al viento, a la contaminación atmosférica y a las variaciones de temperatura.
- Los materiales absorbentes deben tener cualidades de durabilidad acústica.
- Las exigencias de mantenimiento deben ser mínimas.
- Los materiales absorbentes deben presentar cualidades en relación con la inflamabilidad, combustión y escape de humos suficientes para poder utilizarlos con toda seguridad en la proximidad de una carretera.

6.6.2. Austria

En Austria se han contruido a lo largo de las carreteras federales más de 500 km. de muros, y diques de tierra anti-ruido (de una altura superior a 2 metros). Casi la tercera parte son muros; el resto está compuesto por diques con muros en su parte superior o de fuertes pendientes coronadas de estructuras rellenas de tierra. Los muros han sido en general contruidos a lo largo de tramos existentes (donde el espacio es escaso) y sobre puentes. Mientras que los diques de tierra se han contruido en carreteras de nueva construcción.

Figura 6.12. Pantalla en madera absorbente (tipo 5c - cuadro 6.3).



Los materiales empleados en la construcción de muros anti-ruido son los siguientes: madera (55%), metal (sobre todo aluminio)(20%), hormigón (bloques moldeables)(10%), vidrio (5%), material sintético o vidrio acrílico (5%), barreras de seguridad en hormigón acrílico (5%) y barreras de seguridad en hormigón (New Jersey)(5%).

La concepción artística de las pantallas anti-ruido queda justificada en zonas residenciales y en las afueras de las grandes ciudades. En campo abierto, las plantaciones verdes han demostrado que son una alternativa mejor por su integración en el paisaje. Se han utilizado estructuras pasantes de hormigón moldeado en combinación con enrejados para facilitar el crecimiento de plantas, en las pantallas anti-ruido a lo largo de las carreteras, logrando de este modo una protección frente a sprays salinos, hielo y masas de nieve.

La calidad de las pantallas anti-ruido (conforme al texto alemán ZTV-LSW 88) se analiza según los siguientes criterios: (1) exigencias acústicas, (2) resistencia a la estabilidad y a la deformación, (3) propiedades anti-envejecimiento y anti-oxidación, (4) estabilidad de dimensiones y colores, (5) resistencia al incendio y a los proyectiles de piedra, (6) condiciones de mantenimiento y de reparación, y (7) aspectos relativos a la seguridad vial.

Figura 6.13. Zona residencial: Diseño decorativo de una pantalla (reflectante) en hormigón con paramento en cerámica (Baja Austria) (tipo 8, cuadro 6.3)



Figura 6.14. Pantalla reflectante integrada al paisaje gracias a la utilización de elementos transparentes y de arreglos paisajísticos (Austria) (tipo 5, cuadro 6.3).



Se ha intentado realizar una variación especial con la construcción de un muro en lo alto de los diques de tierra: cubetas de madera de 1 m de altura rellenas de tierra se han fijado en lo alto del talud sin ningún tipo de cimentación tradicional, ahorrando el coste de la cimentación, así como en la adquisición de un cierre suplementario.

Los taludes de fuerte pendiente, (debida a una armadura artificial complementaria), se utilizan cuando el espacio disponible es muy estrecho para un talud de pendiente natural y/o que se desea vegetación. Se ha comprobado que los taludes de fuerte pendiente tienen costes de construcción y de mantenimiento más elevados que los taludes normales y un aspecto más triste en invierno. El hormigón, la madera, el enrejado metálico, los materiales termoplásticos y los neumáticos usados se utilizan para estructuras de sostenimiento de taludes de fuerte pendiente. Hay que prever barreras de seguridad o barreras de hormigón cuando se implanta un talud de fuerte pendiente en la proximidad de una calzada. La experiencia de los diez últimos años ha demostrado que los taludes de fuerte pendiente son difíciles y costosos de mantener y que deben usarse con precaución.

Las barreras New Jersey han sido utilizadas a lo largo de carreteras elevadas con objeto de atenuar el ruido. Estas pueden construirse separadamente, combinadas a otras barreras o con diferentes niveles. Se puede obtener una reducción de 3 a 4 dB(A) con una barrera New Jersey modificada de 1 m. de altura (la altura normal es de 80 cm.). Se utilizan pantallas escalonadas

cuando es necesario una altura superior a 1,5 m. Esto se realiza de dos maneras diferentes:

1) La parte inferior de la pantalla anti-ruido colocada detrás del perfil de la barrera New Jersey queda abierta, permitiendo así el crecimiento de plantas así como rellenar los huecos que haya entre la pantalla New Jersey y la pantalla anti-ruido. 2) El espacio que se encuentra detrás de la pantalla New Jersey se rellena de tierra, y la vegetación puede alcanzar una altura de 80 cm a 1,0 m sobre la carretera. Las pantallas a distintos niveles resultan más caras que las pantallas anti-ruido normales.

6.6.3. Dinamarca

Tanto desde el punto de vista de los automovilistas como el de los habitantes, se da una gran importancia a la calidad visual en la implantación de pantallas anti-ruido. La intrusión visual de pantallas de gran altura se suaviza gracias al uso de colores (las pantallas se recubren de bandas de pintura horizontal con colores oscuros en la parte inferior y más claros hacia la superior), materiales transparentes, inclinación horizontal o vertical de las pantallas en relación a la carretera, o colocación de vegetación de corta altura delante de la pantalla, y de mayor en la parte de atrás, etc.

Cuando la altura deseada para la pantalla es 4 o 5 metros superior al talud, se ha comprobado que es más fácil crear diques de tierra que los muros anti-ruido. Los diques se realizan frecuentemente en medio natural en zonas de poca densidad de población ya que se necesitan espacios relativamente grandes.

Figura 6.15. Pantalla (reflectante) anti-ruido en vidrio (Dinamarca) (tipo 8 y 5 f, cuadro 6.3).



6.6.4. Finlandia

El Gobierno finlandés realiza cada año entre diez y quince kilómetros de pantallas anti-ruido. La mayor parte se construyen en madera. En 1989 el Ministerio de Medioambiente ha publicado un estudio sobre la eficacia de 8 pantallas anti-ruido en el área de Helsinki.

Las medidas han sido efectuadas registrando simultáneamente los niveles de ruido durante 5 minutos en un punto de referencia situado entre 0,7 y 1 metro por encima de la pantalla y puntos concretos (target points) situados entre 2 y 4 metros sobre el suelo, detrás de ésta. Se han utilizado entre uno y tres "targets points" a diferentes distancias de la pantalla. Para las pantallas cortas, la medida se ha efectuado en un punto en el centro. La disminución del ruido al colocar la pantalla se ha determinado como la diferencia entre el nivel de ruido medido en el punto de referencia, y el nivel medido en los target points, corregida por factores como la distancia de éstos a la pantalla, las reflexiones, la forma de la pantalla, y el efecto de atenuación debido al suelo. Estos resultados están contenidos en el cuadro 6.6.

Las pérdidas por inserción varían de 7 a 16 dB(A). Los "targets points" concretos situados cerca de la pantalla (distancia de 13 a 18 metros) indican una pérdida de inserción de 11 a 15 dB(A) para los muros, lo que es una diferencia bastante débil. El cálculo predice pérdidas menores para barreras inferiores de 3 m. de altura y en general pérdidas mayores cuando la altura sobrepasa los 3 m. La mayor diferencia se establece en 4 dB(A) (para los taludes en tierra).

Figura 6.16. Barrera absorbente en mediana de una autopista (largo 440 m., alto 1m.) - Finlandia.



Pantalla en madera de 0,5 m., montantes en acero, de cada lado, listones horizontales en madera sobre planchas verticales, lana mineral para la absorción acústica y en medio contraplaqué erigido sobre elementos de barrera de seguridad en hormigón de 0,5 m. de altura (tipo 7b, cuadro 6.3)

Cuadro 6.6. Comparación de diferentes tipos de pantallas (Finlandia)

Tipo de pantalla	Altura de pantalla (m)	Distancia del target point	Diferencia de ruido (debida a la inserción de la pantalla (db)*)	Atenuación por la pantalla	Efecto calculado **
Elementos en madera apoyados en una base artificial	3+1	13	13/10	13/10	16/10
		37	10/10	12/11	15/12
Elementos en hormigón	2	16	11	11	10
		40	10/10	14/11	11/8
		70	7/8	12/10	10/8
Elementos en madera (ver anexo 1 y 2)	2,7	14	11	11	11
		25	11	12	12
Madera sobre hormigón	3	15	11/9	11/9	13/9
		27	10/9	11/9	13/10
Elementos en madera	2.7	20	10/8	11/8	14/9
		33	10/10	14/11	11/10
Elementos en madera	2.7	17	12/10	13/10	13/10
		50	8/8	11/9	8/8
Elementos en madera apoyados en una base artificial	2+1	18	14/11	15/11	13/10
		50	11/10	14/12	11/9
Diques de tierra	5	25	16/14	17/14	20/178
		43	16/13	18/13	18/16

6.6.5. Italia

Para la construcción de pantallas anti-ruido se utilizan numerosos materiales como el acero, el aluminio, la madera, el hormigón, los policarbonatos, así como cerámicas o materiales refractarios. Las pantallas se clasifican, en general, en función del material que las constituye, y esta clasificación corresponde a la del cuadro 6.3. Se distingue:

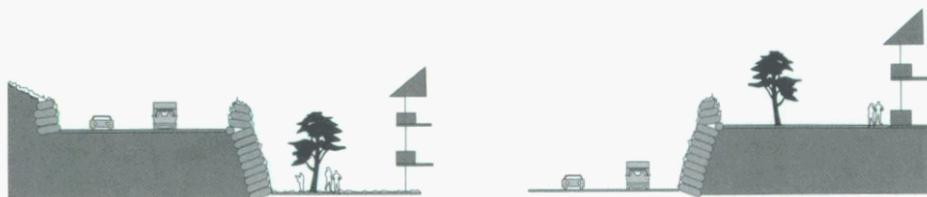
- Pantallas naturales (vegetación), formadas por vegetación especial debida al tipo de especies y su colocación sobre la infraestructura o sus alrededores. Se pueden incluir aquí los movimientos de tierra (taludes anti-ruido)

que, constituyen la base de las pantallas naturales cuando no forman parte integralmente de la estructura.

- Pantallas artificiales, formadas por paneles de diferentes materiales, como hormigón, madera, aluminio, acero y otros materiales plásticos transparentes (por ejemplo, metacrilato y policarbonato), colocados sobre soportes fijados al suelo o a las estructuras.
- Pantallas mixtas, formadas por soportes artificiales (hormigón, acero, madera) que permiten el desarrollo de la vegetación. Numerosos tipos de pantallas mixtas (es decir, una estructura portante artificial cubierta de vegetación), están disponibles en el mercado y se pueden dividir en tres categorías:
 1. Los bio-muros, compuestos por elementos portantes en hormigón, madera u otros materiales, con tierra en la cual se planta vegetación.
 2. Las pantallas de vegetación, formadas por paneles absorbentes artificiales, completamente recubiertos de vegetación.
 3. Muros verdes, compuestos por una estructura artificial en forma de jaula metálica rellena de una mezcla a base de tierra en la cual se planta una vegetación trepadora.

Se da una gran importancia a la elección de la vegetación mejor adaptada en función de diferentes zonas climáticas. Estas especies se escogen no sólo por sus características fitotécnicas - es decir su capacidad para resistir la erosión o el deslizamiento del terreno y a consolidar la tierra gracias a sus raíces - sino también por su resistencia al medio - seco, lluvioso, variable - así como por su aptitud de absorber ciertos agentes contaminantes como: el humo, las partículas, los metales pesados. Esto permite mejorar la acción anti-contaminación de las pantallas anti-ruido.

Figura 6.17. Muro vegetalizado en trinchera (absorbente).
Los biomuros están formados por elementos soportes de hormigón, madera, de otros materiales que contienen tierra, y en cuyo interior se planta la vegetación.



La lista siguiente enumera las plantas usadas en Italia

Norte de Italia (clima lluvioso)

- Acer/Pseudoplatanus
- Tilia Platyphyllos
- Carpinus Betulus
- Fagus Sylvatica
- Quercus Robur

Centro de Italia (clima variable)

- Acer/Pseudoplatanus
- Chalaechiparis Lawsianiana
- Cupressociparis Leylandi
- Populus Berelinensis
- Tilia Platyphyllos
- Quercus Ilex
- Carpinus Betulus
- Fagus Sylvatica
- Quercus Robur
- Pinus Alepensis
- Pinus Pinaster

Sur de Italia (clima seco)

- Cupressociparis Leylandi
- Chamaechiparis Lawsoniana
- Quercus
- Pinus Pinaster
- Eucaliptus Sp.
- Populus Nigra Piramidalis

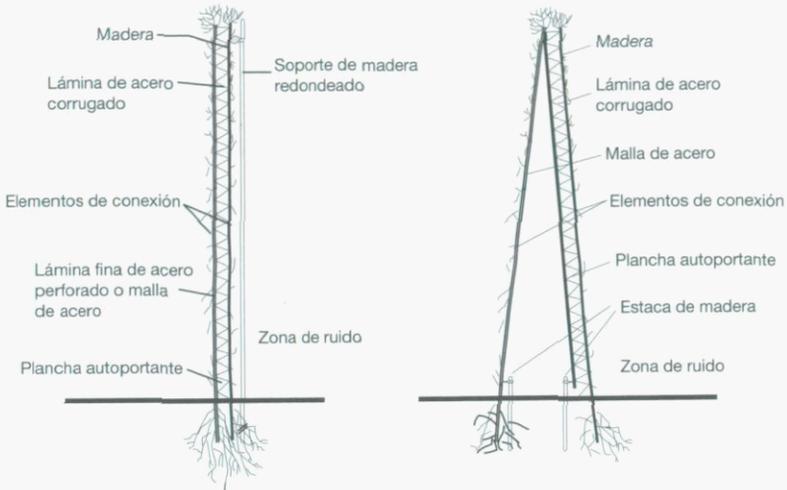
Resulta interesante el seguir las siguientes recomendaciones:

- Siempre es preferible integrar la pantalla natural en el medio con otros elementos naturales, en lo posible.
- Los árboles no deben utilizarse solos, sino que deben ir siempre unidos a arbustos o matorrales para rellenar el espacio de la base de los troncos o entre los mismos árboles como es el caso de los matorrales “cottonaster” que se mezclan con pinos negros de Austria.
- La profundidad de la banda de vegetación mixta no debe ser inferior a 6 ó 7 metros, y su disposición debe de ser tal, que comience tan cerca como sea posible de la fuente sonora (borde de la infraestructura). Esta “proximidad” es relativa, puesto que es necesaria una distancia de 3 a 4 metros como cortafuegos.
- Para conseguir un mejor nivel de protección es posible instalar paneles artificiales que mejoren la homogeneidad de la atenuación del ruido y que funcionen sólo en la primera etapa del crecimiento de las plantas.

Las pantallas artificiales se usan preferentemente en carreteras ya existentes, en las cuales existe un espacio reducido. Esto explica la existencia de las pantallas cuya base está constituida por una barrera de seguridad New Jersey absorbente. Este tipo de pantalla permite:

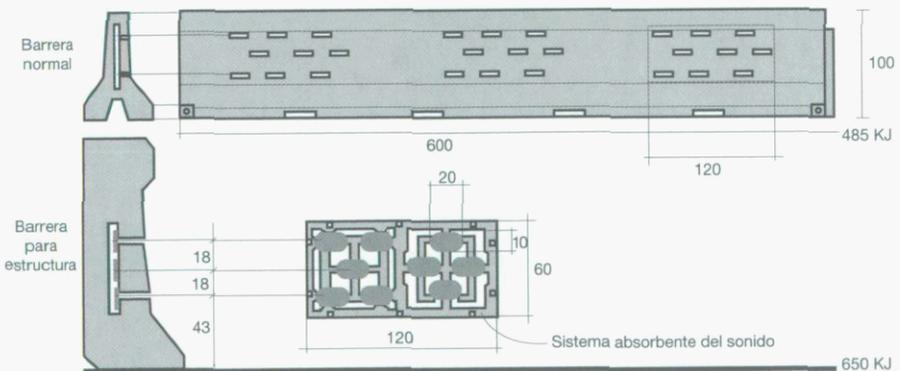
- Una sola estructura para la protección del tráfico y la protección contra el ruido con un basamento tipo New Jersey (tipo 7, cuadro 6.3).
- Una absorción específica del sonido para bajas frecuencias (hasta 250 Hz) con objeto de cumplir las características de absorción asegurada por los paneles que constituyen tales basamentos.

Figura 6.18. Muros verdes prefabricados (absorbentes) - Los muros verdes se componen de una estructura artificial en forma de caja metálica rellena de tierra en la que se planta una vegetación trepadora - Italia (tipo 4, cuadro 6.3).



Como se ha mencionado en el capítulo 4, la protección para el puente de la figura 6.20 ha sido sometida al test de resistencia de 650 KJ. Mientras que una barrera usual se somete al de 485 KJ, la absorción fónica de bajas frecuencias se hace amortiguando ondas sonoras incidentes gracias al uso de “resonadores” colocados para este efecto en el interior de la barrera. Un conjunto de conductos de tamaño apropiado permiten la conexión entre los resonadores y el exterior.

Figura 6.19. Barreras absorbentes de seguridad en hormigón - Italia (tipo 7c, cuadro 6.3).

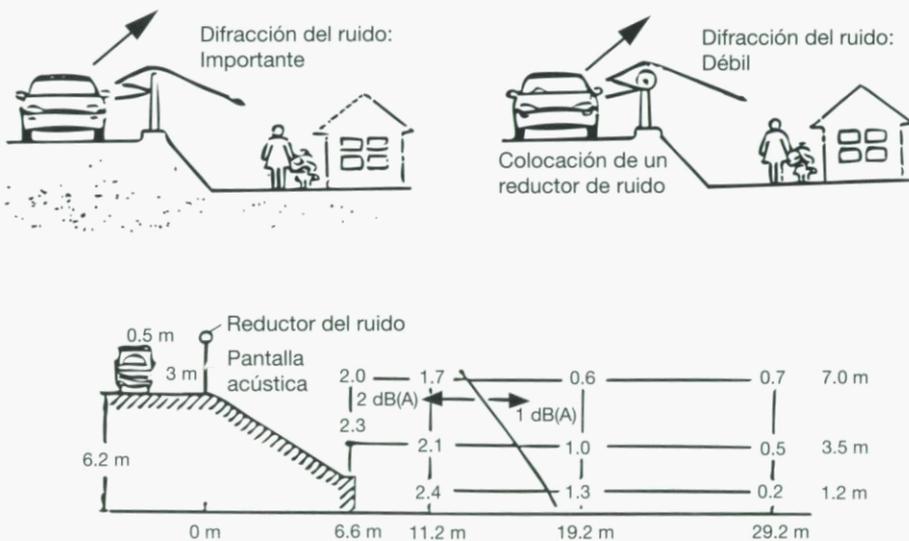


6.6.6. Japón

Más de 200 km. de pantallas anti-ruido se construyen al año en Japón; en 1992, existían 3.100 km. de pantallas. Las primeras eran de hormigón, pero las preocupaciones derivadas de la reflexión del ruido sobre las pantallas de hormigón reflectantes ha conducido a la colocación de paneles absorbentes en las pantallas. Actualmente el tipo de panel más extendido está constituido por lana de vidrio rodeada de una película plástica y recubierto de placas de aluminio.

Una innovación reciente consiste en el “reductor de ruido”. Se trata de un cuerpo que absorbe el ruido, fijado en lo alto de una pantalla con objeto de reducir este sin aumentar su altura. Los “reductores de ruido” están actualmente presentes sobre diferentes autopistas.

Figura 6.20. Efecto de un reductor de ruido. - Japón



La colocación de un reductor de ruido permite una mayor atenuación cerca de la pantalla

6.6.7. Países Bajos

Para prevenir la reflexión del ruido en el otro lado de la carretera, se utilizan pantallas inclinadas con respecto de la calzada. Se están realizando estudios para evaluar el aumento de eficacia obtenida inclinando la pantalla hacia la calzada, utilizando un revestimiento de calzada bituminoso-poroso. La altura de la pantalla se ha limitado a 5 metros, lo que conlleva a una reducción

Figura 6.21. Ejemplo de un reductor de ruido. - Japón



Figura 6.22. Perfil transversal del periférico de Tokio.

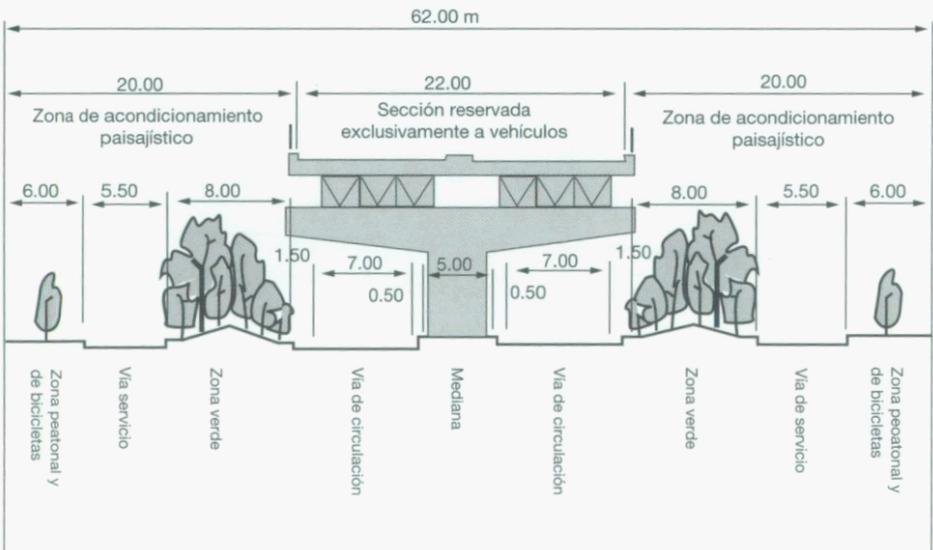


Figura 6.23. Una pantalla con vegetación (absorbente) - Países Bajos (tipo 4, cuadro 6.3).



Figura 6.24. Pantalla de hormigón de absorción alta (absorbente) - Países Bajos (tipo 5b, tabla 6.3).



máxima del ruido del orden de 10 dB(A). Si se desea una mayor reducción se puede realizar una cubierta parcial de la calzada. Esta cubierta se ha construido a lo largo de 1.600 metros.

6.6.8. Noruega

Se encuentran tres tipos de pantallas anti-ruido en sus carreteras, que provienen de la tradición noruega de hacer crecer los setos alrededor de las casas:

1. Una pantalla de "zona" protege un lugar que nada tiene que ver con la función de la carretera. La pantalla forma parte del lugar que protege y no de la carretera.

Cuadro 6.7. Medidas de altura y longitud sugeridas para los distintos tipos de pantallas. (Noruega)

TIPO DE PANTALLA	1	2		3
		SITUACIÓN DE LA PANTALLA		
ALTURA/LONGITUD EXIGIDOS	PANTALLA DE ZONA	a) PANTALLA PARA JARDÍN	b) PANTALLA EN MEDIO URBANO	PANTALLA LOCAL
Longitud máxima con variación Longitud máxima sin variación	1 Km 100 m	500 m 50 m ó max. 3 propiedades	De una casa/ construcción a otra	5-10 m (en prolongación ó separada)
Altura de la pantalla (m)	2-4	1.5-1.8 (2.1)	2-4 (5) adaptada a la construcción	1,5-2,5
Altura de talud (m)	4-5 débil pendiente ó < 3	1-1.5 ó terraplén en dirección casas/ construcciones	-	-
Distancia de la pantalla a las casas/construcciones	≥ 10 m	≥ 7 m	0 m	Agregado a las casas/ construcciones
Distancia mínima de la pantalla al borde de la vía (ver los puntos c, d y e)	10 - 15 m para una longitud de la pantalla ≥ 500 m ó 7-10 m	Sobre la acera	Pantalla al mismo nivel que las casas construcciones	(≥ 3 m)

2. *Una pantalla de “lugar”*, que protege espacios exteriores (jardines, parques, patios), en los casos en los que el espacio y la carretera está integrados el uno en el otro. Las casas están, en general, próximas a la carretera. Si la pantalla forma parte de la vía de servicio, ésta se concibe para integrarse en el espacio de las casas. La pantalla puede levantarse en la prolongación de una fila de casas.
3. *Una pantalla “local”* sólo protege parte del espacio exterior y no asegura la atenuación del ruido al edificio propiamente dicho. La pantalla puede estar unida a la casa directamente o ser independiente.

Las normas y especificaciones relativas a las carreteras en Noruega, las clasifican en diferentes categorías, en función del tipo de carretera y del carácter de su entorno: carreteras principales, carreteras secundarias y vías de servicio, en zonas de fuerte, media o débil densidad de viviendas. El emplazamiento y la altura de una pantalla anti-ruido dependen, a la vez, de sus efectos acústicos y de sus efectos estéticos. Se ha sugerido para los distintos tipos de pantallas, las alturas y longitudes presentadas en el cuadro 6.7.

Figura 6.25. Pantalla en vidrio y madera Lillehammer, Noruega (tipo 5e, cuadro 6.3).



Algunas veces se deja un vacío en la parte inferior de las pantallas anti-ruido de forma que (1) no haya necesidad de instalar un drenaje especial; (2) los pequeños animales puedan circular libremente y (3) que los costes de mantenimiento sean más bajos puesto que no hay contacto entre el suelo y la pantalla. Un estudio acústico sobre estos huecos ha demostrado que una apertura de 20 cm. de ancho disminuye de 1 a 2 dB(A) o más la reducción del ruido por la pantalla.

Se han construido pantallas de casi todos los tipos. Las primeras, realizadas en madera se agrietaron debido a una mala instalación, lo que ha obligado a un mantenimiento importante. El hormigón ha llegado a ser el principal material para las pantallas. Las de hormigón se han revelado como las mejores en términos de mantenimiento, pero ha habido problemas debido a la mala calidad de las cimentaciones, al estancamiento de las juntas entre los elementos de la pantalla y los arreglos paisajísticos. Se han utilizado igualmente pantallas a dos caras en madera con fibra absorbente. Y se han probado también pantallas verdes pero aún están en la fase de prueba debido al rigor de los inviernos y al riesgo de la deshidratación.

6.6.9. España

España utiliza pantallas de hormigón con partes destinadas a retener tierra, haciendo posible el uso de plantas que ocultan sus paredes dando la sensación de pantallas naturales.

La elección de materiales queda condicionada por dos propiedades requeridas: su rendimiento de transmisión de sonido, y las cualidades de absorción en su conjunto.

La norma ISO R-144 se utiliza para definir el índice de aislamiento acústico R y se exige que las pantallas tengan un coeficiente de atenuación en la transmisión igual o superior a 25 dB(A) para el espectro normalizado del ruido del tráfico. En espera de la publicación de una norma europea, se utiliza la norma ZTV -LSW 88, para clasificar las características de absorción. Los principales materiales absorbentes son: la lana mineral y los paneles perforados con una altura de orificio adecuada.

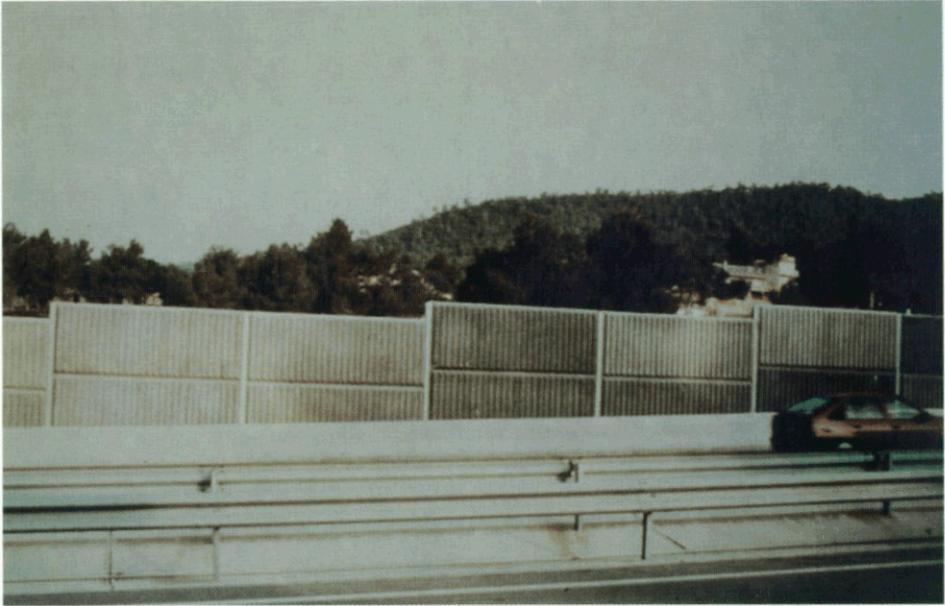
Para evitar los efectos derivados de las reflexiones múltiples, al instalar pantallas a ambos lados de la carretera, se siguen las recomendaciones establecidas por el "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble".

$H > L/5$: La pantalla debe llevar materiales absorbentes.

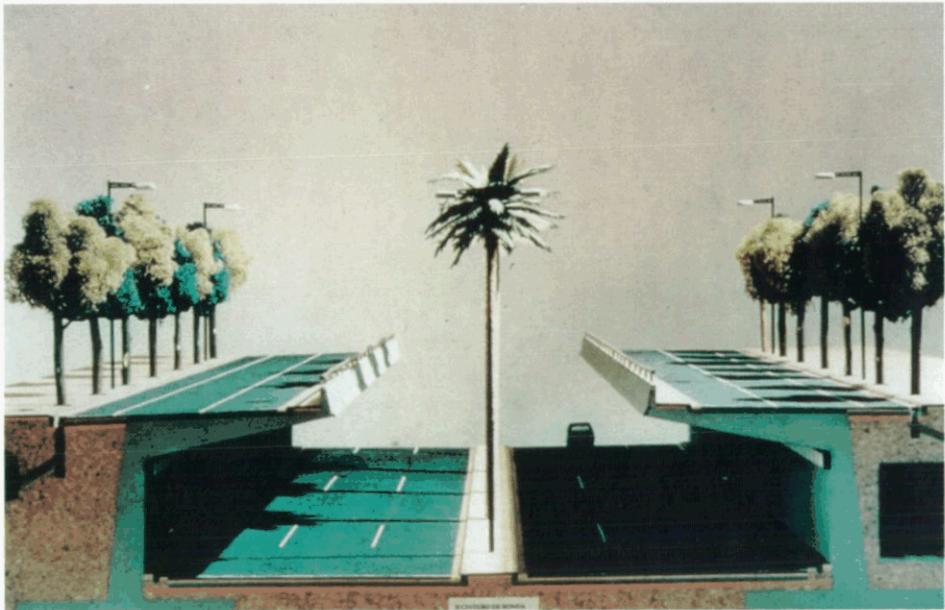
$L/5 > H > L/10$: La decisión de utilizar materiales absorbentes depende del medio y de la posibilidad de dar una inclinación a las pantallas.

$L/10 > H > L/20$: Las pantallas inclinadas son más eficaces que, los materiales absorbentes, por lo que preferentemente, se usan las primeras.

**Figura 6.26. Pantalla artificial - España
(tipo 5d, cuadro 6.3).**



**Figura 6.27. Pantalla artificial: «Pantalla total». España
(tipo 9, cuadro 6.3).**



- H < L/20: La elección de una u otra no afecta al resultado final.
- H = Altura de las pantallas.
- L = Distancia entre las dos pantallas paralelas a ambos lados de la carretera.

6.6.10. Estados Unidos

Al final de 1989 se habían realizado más de 1.160 km. de pantallas anti-ruido.

Casi las tres cuartas partes de pantallas construidas tienen una altura entre 3 y 5 m. La altura media de estas pantallas es de 4 m., y sólo un 3 por ciento son superiores a 6 m. Aquéllas que superan los 9 m. están realizadas en hormigón. Entre los materiales utilizados para la construcción de las pantallas están: el hormigón, la madera, el metal, los taludes de tierra, el ladrillo y la combinación de todos estos materiales. La aparente popularidad de la mampostería, como muestra el cuadro anterior, se debe a que el Estado de California utiliza casi exclusivamente mampostería y ha construido así más de un tercio de todas las pantallas anti-ruido.

Los costes medios por unidad de toda la gama de materiales empleados en las pantallas oscilan entre 110 y 180 \$ por metro cuadrado, excepto para taludes

Cuadro 6.8. Longitud total de pantallas anti-ruido según el tipo de material

Pantallas de un solo material (simples)		Pantallas de varios materiales (compuestas)	
Material	Longitud en Kilómetros	Materiales	Longitud en Kilómetros de materiales
Bloques prefabricados	370	Talud (tierra)/madera	35
Hormigón prefabricado	238	Talud (tierra)/hormigón	31
Talud (tierra solo)	81	Madera/hormigón	27
Madera/sin especificar	63	Hormigón/ladrillo	20
Madera/postes y tablas	59	Madera/metal	12
Hormigón/sin especificar	48	Metal/hormigón	11
Metal/sin especificar	44	Talud (tierra)/bloque prefabricado	11
Madera/goma laminada	40	Hormigón/bloque prefabricado	10
Ladrillo	11	Madera/bloque prefabricado	7
Otros	12	Talud tierra/metal	6
		Talud/Madera/Bloque prefabricado	5
		Talud/Madera/metal	5
		Otros	17
Total	966	TOTAL	197

Figura 6.28. Paneles en hormigón prefabricado, con decorados gráficos adyacentes, en un terreno de juegos (reflectante) - Estados Unidos (tipo 8, cuadro 6.3).



en tierra que tienen un coste medio de sólo 30 \$ por metro cuadrado. Los costes medios por unidad para todos los materiales de pantallas han permanecido constantes de 1986 a 1989, oscilando entre 100 y 280 \$ por metro cuadrado (los taludes en tierra entre 50 y 80 \$ por metro cuadrado). El total de los costes medios por unidad para mampostería y hormigón (materiales empleados en más del 56 por ciento de las pantallas edificadas), son 170 \$ y 140 \$ por metro cuadrado respectivamente. Los costes del metal son comparables a los de la madera (110 \$ por metro cuadrado).

Lo más notable es el aumento espectacular del volumen de construcción de pantallas anti-ruido. El gasto empleado estos dos últimos años, ha triplicado al de los quince años precedentes. La mayor parte de las pantallas han sido construidas en "block shown" y hormigón, con una altura entre 3 y 5 m. y un coste medio que varía entre 140 y 170 \$ por m².

La mayoría de las pantallas construidas en Estados Unidos tienen superficies duras, que reflejan el sonido. Sin embargo, se han construido igualmente pantallas absorbentes cuando existe la reflexión en una pantalla aislada o en pantallas paralelas. Existen también pantallas inclinadas (5-10 grados en relación con la vertical) como variante de pantallas absorbentes para prevenir las reflexiones, enviando las ondas sonoras hacia arriba. Se han realizado pantallas anti-ruido transparentes, construidas a base de paneles de policarbonato, en lugares en los que no interesa impedir la vista del paisaje. La

limpieza periódica de los paneles se ha considerado como una dificultad de mantenimiento.

6.7. CONCLUSIONES

Las pantallas anti-ruido pueden construirse en forma de diques de tierra, muros o muros sobre diques de tierra. Una pantalla anti-ruido permite reducir los niveles de ruido del tráfico vial de 10 a 15 dB(A) en la zona situada exactamente detrás de ésta. La vegetación procura esencialmente un efecto psicológico, reduciendo la molestia del tráfico, pero no aporta más que una débil reducción de los niveles de ruido.

En el diseño de una pantalla acústica, conviene tomar cuidadosamente en cuenta los aspectos siguientes:

- la reducción del nivel del ruido,
- la estética,
- la seguridad,
- el mantenimiento,
- el drenaje,
- los costes de construcción y mantenimiento.

En los países de la OCDE, el coste de construcción de una pantalla varía considerablemente en función de los materiales utilizados - hormigón, madera, metal acrílico o policarbonato, vegetación y New Jersey - y está entre los 60 dólares y los 470 dólares por metro cuadrado.

Una gran importancia debe darse a la estética y su integración en el paisaje y el medio. Esto depende principalmente de la altura de la pantalla, la elección del material, así como la forma, la estructura y el color. Un diseño acertado de una pantalla implica opiniones multidisciplinares, de arquitectos proyectistas, paisajistas, ingenieros especialistas en carreteras, ingenieros acústicos e ingenieros especialistas en estructuras.

Debe asegurarse sistemáticamente la participación de la comunidad en las decisiones relativas al diseño y a la construcción de pantallas.

Los diques de tierra:

- están en general recubiertos de vegetación,
- tienen un aspecto más natural,
- son en general agradables,
- normalmente permiten una mejor soleación (menos sombra) y una mejor circulación de aire que los muros, y
- pueden servir para aprovechar los materiales de desecho excedentes,

- generalmente no necesitan dispositivos de protección contra los vehículos que salen de la calzada,
- son en general menos costosos que los muros en cuanto a instalación y mantenimiento,
- tienen una duración de vida prácticamente ilimitada.

Sin embargo, la construcción de diques de tierra puede exigir una superficie de terreno extensa mientras que los muros ocupan menos lugar y pueden construirse en madera, hormigón, albañilería, metal y otros materiales. Los muros reflectantes aseguran un mejor confort para las personas que habitan detrás, pero pueden aumentar el ruido a lo largo de la carretera, a los automovilistas. La eficacia de muros reflectantes paralelos (a cada lado de la carretera) puede verse comprometida si estos son altos y están próximos entre sí, es decir, en el caso de una carretera estrecha. Los muros reflectantes pueden ser inclinados y reducir o eliminar los problemas de reflexión. Además pueden construirse con paredes absorbentes con objeto de disminuir estas reflexiones.

7. INTEGRACION Y COSTES DE LAS MEDIDAS

7.1. LA INTEGRACION DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION

Un estudio de las diferentes posibilidades de intervención sobre las características de la generación y de la difusión del ruido de la carretera, nos ha convencido de que es siempre posible mejorar el rendimiento acústico de la infraestructura. La verdadera dificultad se presenta en la evaluación del efecto combinado de las diferentes soluciones posibles, dado que hemos visto que los efectos producidos no se suman necesariamente, incluso, aunque parezcan medidas complementarias. Es también importante, evaluar el coste real de la atenuación de la energía sonora producida por el tráfico.

Intentaremos, en este capítulo, dar una respuesta a estas cuestiones, o por lo menos dar algunas indicaciones útiles, insistiendo en el hecho de que los elementos económicos necesarios para realizar la “evaluación” deber ser obtenidos en el marco de una evaluación científica, que responda a numerosos elementos.

No hablaremos de las infraestructuras en túnel o en trinchera que ya se han visto en el capítulo 4, y son por naturaleza “eufónicas” (“silenciosas”). Nos centraremos en las infraestructuras sobre-elevadas o en viaducto. Bajo estas premisas, y para carreteras interurbanas, o en todo caso, alejadas de otras infraestructuras, es posible actuar sobre:

- barreras de seguridad
- pavimentos
- pantallas
- vegetación

Sin embargo en medio urbano, en el caso de una carretera que no pueda ser clasificada como “abierta” (por ejemplo, una calle en “U”, rodeada de edificios), las acciones posibles se centran en actuaciones sobre:

- pavimentos;
- aislamientos de fachadas;
- pantallas (si son compatibles con la utilización de los edificios);

La figura 7.1 ilustra un ejemplo de combinación de los sistemas de protección en una carretera elevada, abierta. Es evidente que los diferentes elementos que contribuyen a la atenuación del ruido, no pueden ser, simplemente, sumados los unos a los otros (capítulo 1).

Figura 7.1. Carretera eufónica (silenciosa).



Los mejores resultados se obtienen utilizando una combinación “calculada” de los diferentes sistemas anti-ruido. Para eso, es necesario utilizar modelos matemáticos. Uno de los problemas de evaluación del efecto combinado de los diferentes sistemas, es el asociado a la modificación del espectro de frecuencias del ruido producido por el contacto neumático-calzada debido a la tipología del pavimento absorbente de ruido utilizado. Los sistemas anti-ruido deben, por tanto, tener en consideración este nuevo espectro.

Es posible intervenir sobre las calzadas en diferentes niveles de control del sonido (ver Capítulo 5), actuando sobre diferentes bandas de frecuencia. Las barreras de seguridad, laterales y centrales, contribuyen a reducir el ruido (en bandas de frecuencia, que pueden ser diferentes o iguales a las del pavimento), gracias a sus características de aislamiento y absorción acústica, asociadas a los huecos que contienen.

A esto, hay que añadir el efecto de la vegetación en los pequeños taludes laterales; se puede obtener una mejor atenuación del ruido insertando las pantallas en la vegetación o colocándolas encima de las barreras de seguridad.

Es necesario resaltar que la disminución del ruido obtenido no es la suma de la reducción que cada medida tomada aisladamente puede aportar, y además la aplicación de cada medida tiene costes diferentes. Sólomente con una cuidadosa combinación de los efectos, teniendo en cuenta los espectros de frecuencia del ruido atenuado, se podrá evaluar con precisión la eficacia de las medidas tomadas. Ante todo es necesario recordar que no todas las reducciones indicadas en la figura 7.1 son “ciertas” y permanentes sin una implantación adecuada:

- La vegetación es efectiva sólomente si no hay interrupciones en los elementos de protección;
- Los pavimentos silenciosos deben ser, convenientemente mantenidos.

Es necesario, igualmente, mencionar que la integración de los diferentes efectos debe ser el tema de una más profunda evaluación; una de las cues-

tiones actualmente, más discutida en los países de la OCDE es la integración de las pantallas artificiales y de los pavimentos drenantes.

7.2. COMPLEMENTARIDAD DE LAS PANTALLAS ACUSTICAS Y DE LOS PAVIMENTOS DRENANTES

En las zonas periurbanas que son, actualmente, donde el empleo de las pantallas es el más pertinente, es posible beneficiarse de la excelente complementariedad existente entre las pantallas y los pavimentos drenantes. Esta optimización de la combinación de pantallas y de la capa de rodadura puede permitir, en algunos casos, una reducción de la altura de las pantallas y por tanto reducir el coste u sino obtener un mayor nivel de reducción del ruido. Naturalmente, si se considera una carretera en “U”, la complementariedad desaparece y es necesario utilizar:

- Calzadas eufónicas (que eliminan todas las frecuencias del ruido de circulación)
- Estructuras (cuando es posible) como falsos túneles, o pantallas con elementos absorbentes colocados por encima de la carretera (como los tableros fónicos descritos en el capítulo 4).

Las soluciones descritas son siempre complementarias, a la banda de frecuencias (en el caso de la calzada eufónica (silenciosa)) y a la zona física que queda protegida (pisos superiores) en el caso de los tableros fónicos. Los avances que se pueden obtener en el caso de esta combinación de sistemas de protección se derivan de la consideración del contenido energético de cada banda del espectro de frecuencias. Esto permite sincronizar las características de la pantalla o del tablero fónico con las del pavimento específicamente utilizado.

Si la capa de rodadura de la calzada reduce los niveles sonoros en las frecuencias medias y altas, es necesario diseñar una pantalla que alcance su eficacia óptima en la banda de las bajas frecuencias. La concepción de tal pantalla, que sea a la vez, eficaz, duradera y de bajo coste, se convierte en un problema de ingeniería acústica combinado con un problema de ingeniería civil. En este documento se pueden encontrar un gran número de soluciones a este tipo de problemas, aunque es de esperar que el número de estas aumente cuando se establezca una correcta metodología de evaluación.

Las barreras de seguridad “ecotécnicas”, las barreras de hormigón con huecos de varios decímetros, los muros de bloques de hormigón, son ejemplos de pantallas cuyos efectos reductores son complementarios con los conseguidos en las bandas de frecuencia afectadas, con los pavimentos drenantes.

7.3. ASPECTOS ECONOMICOS

El punto de vista económico que pretendemos apuntar en este documento, no es, en absoluto, determinista:

- Por una parte, porque los costes evolucionan irregularmente con el tiempo en cada país y porque, refiriéndonos a los valores medios, asociados a las

condiciones de producción e instalación de los “productos”, se encuentran diferencias considerables debidas, sin duda, a los factores locales de cada país.

- Por otra parte, porque las técnicas en cuestión, o bien son innovadores (pavimentos de absorción acústica) o bien sus mercados son de bajo volumen de contratación (pantallas acústicas) y están afectadas por las condiciones de su implantación. Consideremos, por ejemplo, la gran variedad de cimentaciones existentes para la instalación de pantallas con materiales y propiedades acústicas idénticas. La variable coste total queda unida con el contexto “instalación” de la pantalla. Los costes facilitados son únicamente dados a título indicativo, aunque permiten precisar algunas ideas sobre la cuestión.

A pesar de una cierta imprecisión inevitable, se suministran ciertos elementos de los que se dispone, que permiten:

- Identificar la horquilla de pavimentos drenantes-de absorción acústica;
- Dotar de elementos de comparación con el coste de otras técnicas de reducción del ruido de la carretera.

7.3.1. Costes de los pavimentos anti-ruido

En el capítulo 5, se ha examinado la multitud de pavimentos que permiten disminuir el ruido. Es de general aceptación que sólo algunos tipos de pavimentos pueden ser considerados aptos para su utilización en la lucha contra el ruido (pavimentos de macroporosidad de tipo B, C y D; cuadro 5.1). Otros pavimentos (con microtextura) pueden, únicamente ser considerados como pavimentos de débil emisión, dado que su utilización no tiene un impacto significativo en la reducción global del ruido de circulación; es cierto que estos pavimentos actúan en las bandas de frecuencias altas, igual que las pantallas acústicas absorbentes más corrientes. Tiene que quedar claro que ninguna de estas afirmaciones es unánime, pero siempre es posible comprobar el efecto real de las diferentes soluciones en aplicaciones específicas, dejando de lado nuestros comentarios que deben, por otra parte, ser muy genéricos.

Costes de los pavimentos de micro-textura (grano fino)

Dentro de esta tipología, tenemos que considerar un gran número de variables debido, a la composición de la microcapa de rodadura de los pavimentos bituminosos extendidos en caliente (con o sin modificación de betunes) y de los tratamientos superficiales más caros, frecuentemente utilizados en medio urbano, (sobre todo en zonas donde se producen numerosos accidentes). El cuadro 7.1 presenta una serie de costes en dólares USA, valor actualizado, que indican los niveles máximos y mínimos obtenidos a partir de los datos disponibles (miembros europeos de la OCDE).

Como indica el cuadro, los resultados acústicos obtenidos son muy bajos, pero los costes son igualmente moderados, salvo para las capas de rodadura

Cuadro 7.1. Costes de pavimentos de micro textura

Tipo	Espesor (cm)	Reducción en dB(A)	Costes en /m ² (min/max)
Pavimento bituminoso fino con ligante natural	2 - 3	1	2 - 2,5
Microcapa en un pavimento bituminoso con ligante modificado	1,5 - 2	1	3 - 5
Tratamiento superficial con bauxita calcinada y ligante epoxi Shell Grip-Spray Grip (Inglaterra)	0,5 - 1	1 - 2	12,5 - 19
Tratamiento superficial con material inerte artificial y ligante epoxi Griproad (D,I)	0,5 - 1,2	1 - 2	8 - 10,5
Placa de hormigón con árido visto	3 - 4	3 - 5*	2 - 3

* Comparado con el hormigón tradicional.

de gran adherencia, cuyo empleo obedece, en general, a imperativos de seguridad.

Costes de pavimentos bituminosos drenantes utilizados como capa de rodadura

Es interesante centrar la discusión sobre el coste de este tipo de pavimentos, y otros pocos, dado que su gran utilización y difusión permiten obtener una evaluación económica fundada en resultados obtenidos. Otros tipos de pavimentos "micro-porosos", están todavía en estado experimental, de forma que los costes presentados no son más que provisionales (deberán, normalmente, disminuir).

Se constata, desde hace algún tiempo, una disminución del precio de los pavimentos bituminosos drenantes. No consideramos, aquí los tipos más generalizados de alto rendimiento, compuestos por materiales 0/10 inertes de débil abrasión, betunes modificados con elastómeros nobles de 4 cm de espesor y con un contenido de huecos del 20 por ciento, extendidos sobre una capa ligante igualmente, con base de betún modificado. Los datos presentados en los cuadros siguientes se refieren a Francia, sin embargo, estos valores son comparables (ligeramente inferiores) a los de otros países europeos. En 1986 algunos proyectos presentaban costes de 10 \$/m² pero al cabo del tiempo, estos costes han disminuido (ver cuadro 7.2).

Actualmente, los costes son estables (los valores se refieren a trabajos acabados) aunque pueden existir algunas variaciones, unidas a problemas logísticos locales y al tamaño de la intervención. Tanto la dificultad que entraña el obtener materiales inertes como la utilización de elastómeros de mayor calidad, generan costes suplementarios y en estos casos los costes pueden alcanzar 7-8 \$/m². El cuadro 7.3 presenta la distribución estadística del coste de

Cuadro 7.2. Evolución del coste de los pavimentos bituminosos drenantes

Año	1987	1988	1989	1990
\$/m ²	5,5 - 8	5,5	4 - 4,8	4

ejecución soportado por las empresas constructoras de carreteras francesas. En 1992 la horquilla de precios variaba entre 3 y 12 \$/m², teniendo en cuenta, todos los tipos de pavimentos drenantes bituminosos (incluidos los preparados con un ligante ordinario) y todos los tipos de espesor. Adoptaremos, pues, el valor de 6 \$/m² como coste de referencia.

Cuadro 7.3. Distribución estadística del coste de ejecución en una empresa francesa

Coste en \$/m ²	< 4 \$	4 - 6 \$	6 - 8 \$	> 8 \$ (1)
Porcentaje de costes	13%	60%	17%	10%

(1) En sitios especiales: fuertes pendientes y obras experimentales.

El coste de los pavimentos porosos de gran espesor, no ha sido, todavía definido; en algunas aplicaciones francesas (como en el CETE de Lyon), los costes han alcanzado 70 \$/m² pero, en este caso, se produjo una reconstrucción completa del firme y no sólo de la capa superior. En esta actuación se obtuvieron resultados, en cuanto a la absorción, extremadamente buenos, incluso entre 200 y 500 Hz (con espesores superiores a 10 cm).

Trabajando con espesores de capa de 10 cm, otras experiencias y aplicaciones han permitido establecer un coste de 16 \$/m². El coste estimado de un metro cuadrado de un pavimento eufónico (silencioso) del tipo D es de alrededor de 70 \$/m².

7.3.2. Elementos de comparación con los costes de otros sistemas especializados de protección acústica

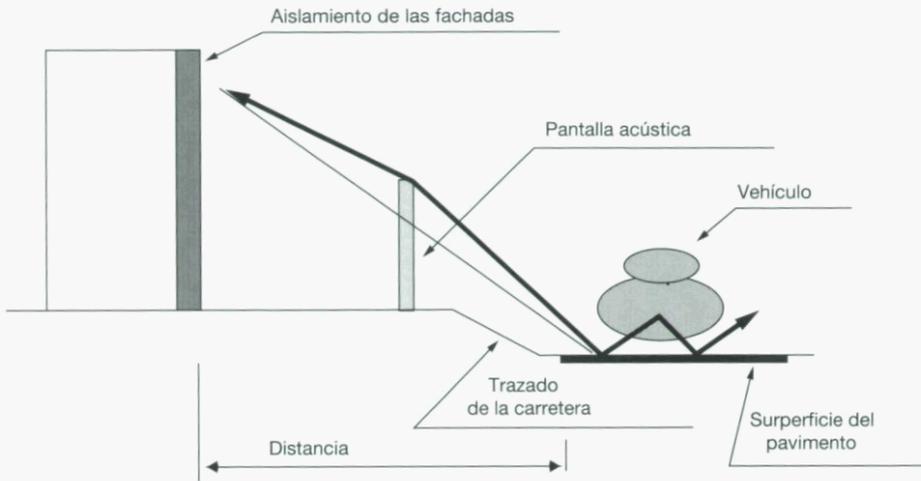
La cadena de producción (y de confinamiento) del ruido, queda indicada en la figura 7.2 que esquematiza las diferentes partes implicadas.

La figura 7.2 indica que es posible actuar sobre todos los elementos de la "cadena acústica", desde la fuente (vehículo) hasta el receptor (habitantes de los edificios situados a lo largo de la carretera).

Coste de los pavimentos

Hemos examinado los costes de los pavimentos que dan reducciones de niveles sonoros del orden de 1 a 2 dB(A) (para los pavimentos microporosos)

Figura 7.2. Cadena acústica.



hasta 3 dB(A) que dan las capas de rodadura drenantes de 4 a 5 cm de espesor, trabajando sobre el espesor y el espaciado de los huecos. Queda claro que a los costes de la puesta en obra es necesario añadir los costes de mantenimiento ya que son diferentes a los de los pavimentos ordinarios. Esto se refiere, concretamente, al problema de la colmatación que se produce en los pavimentos bituminosos drenantes y que hace necesaria, en medio urbano, una limpieza, al menos, cada dos años. Algunos países evitan, por esta razón, el empleo de pavimentos bituminosos drenantes en la medida en que las máquinas especiales utilizadas para esta operación no dan siempre resultados satisfactorios. Se debe pues añadir 1,3 \$/m², actualizado por año, al coste de construcción. Al cabo de ocho años el pavimento bituminoso drenante puede ser reciclado y reutilizado en el mismo sitio con un coste de 5 \$/m², después de esto es necesario reiniciar la limpieza. El coste actualizado de estas operaciones, distribuidos en un período de 16 años, es de 14,85 \$/m².

Aunque se consiguiera una reducción del ruido de 5-7 dB(A), en algunos casos no se aseguraría una protección suficiente dado que las fachadas de los edificios pueden estar sometidas a niveles de ruido que oscilen entre 72 y 83 dB(A) que sería necesario rebajar hasta 65-60 dB(A) (incluso a niveles más bajos en período nocturno). La reducción del ruido que sería necesario obtener sería del orden de 12-18 dB(A) en los casos más frecuentes y de 22-23 dB(A) en los casos difíciles.

Coste y eficacia de otros sistemas de protección

No nos ha parecido oportuno examinar la alternativa consistente en modificar la topografía de la carretera: pasar de un viaducto a un túnel o, incluso, de una plataforma elevada a una en trinchera, sólo por razones acústicas, puede suponer un coste de varios millones de \$ por km, lo que hace que este tipo de elecciones se tomen por motivos políticos y no comerciales. Las

únicas técnicas a evaluar desde un punto de vista económico, son, la construcción de pantallas acústicas y el aislamiento de fachadas.

El coste de una pantalla acústica absorbente o reflectante varía de 600 a 1600 \$ por metro de calzada para la protección de un solo lado de la carretera. Estas variaciones provienen de la altura de la pantalla (3 ó 4 metros) y del coste de la cimentación. Si se hace necesaria la protección de los dos lados de la carretera, el coste se duplica, y queda, por tanto, entre 1200 y 3200 \$/m.

Las pantallas más altas (superiores a 4 metros) son más caras y los costes deben evaluarse caso por caso. Un parámetro útil puede ser el ejemplo de un caso de protección total (eficacia de 15-25 dB(A), obtenido con una *doble fila de pantallas y de tableros fónicos* (elementos que absorben el ruido) colgados por encima del eje de la carretera y que permite proteger los pisos altos de los edificios. En este caso, el coste es de 4500 \$/m.

El aislamiento acústico de fachadas cuesta alrededor de 10.000 \$ por piso (datos franceses). La horquilla está comprendida entre 6.000 \$, necesarios para apartamentos o inmuebles colectivos, con un aislamiento de 30 dB(A), y 1.200 \$ para una casa individual o adosada, para obtener la misma reducción de ruido. Si consideramos que en medio urbano, los edificios tienen al menos tres pisos con una vivienda por piso cada 10 metros de carretera, llegamos a un coste de 3.000 \$ por metro lineal de carretera (para un único lado de la carretera, para los dos el coste sería de 6.000 \$).

El conjunto de estos datos queda resumido en el cuadro 7.4 (que no es más que indicativo y no es aplicable más que en las condiciones citadas en el texto).

Figura 7.3. Protección de los pisos superiores: “Pantalla total”.



Cuadro 7.4. Eficacia y coste de las protecciones acústicas
(Se considera que la vida útil de todos los sistemas es de 15 años)

Tipo de protección acústica	Eficacia media	Coste por metro lineal de carretera	
		Protección de un lado de la carretera \$/m	Protección de los dos lados de la carretera \$/m
Pantalla acústica (con cimentación normal)	6 - 12 dB (A)	600 -1.600	1.200 - 3.200
Pantalla total (tablero fónico) (fig. 7.3.)*	15 25 dB (A)	—	6.600
Capa de rodadura drenante (tipo B) (1) **	3 - 5 dB (A)	—	120 (297) *****
Pavimento optimizado (poroso semigrueso) (tipo C) (1)	5 - 7 dB (A)	—	Inferior a 1.400
Pavimento eufónico (tipo D) (1) ***	5 - 7 dB (A)	—	1.400
Mejora del aislamiento de fachadas			
• Inmuebles colectivos (capítulo VII)	20 - 40 dB(a)	3.000	6.000
• Casas individuales (capítulo IV) ****	5 - 20 dB(A) *****	1.700	3.300
Carreteras en túnel (capítulo IV)			
• túnel de 2 carriles	Protección	—	10.000 - 15.000
• túnel de 3 carriles	total	—	30.000 - 50.000

(1) Valores obtenidos para vehículos aislados, con medidas realizadas a 7,5 m. del eje de la calzada y a 1,20 m. de altura.

* Protección de los pisos superiores (Figura VII-3).

** 2 calzadas de 2 carriles y arcén (10 + 10 metros).

*** Especialmente en frecuencias bajas.

**** Estimado para una casa cada 30 metros.

***** Diferencia entre la ventana normal y la doble ventana.

***** Considerando el coste bianual de lavado, y el coste, de cada 8 años, de reciclado actualizado con una tasa del 7% (sin tener en cuenta la inflación); el dato entre paréntesis indica el coste del pavimento comparable al de otros modos de intervención que en el mismo período de tiempo (15-16 años) no han querido ninguna forma de intervención teniendo costes similares de instalación, (vida útil estimadas para todas: 15 años).

Doble pantalla artificial con tableros fónicos (elementos absorbentes) colocados encima de la carretera.

7.4. BIBLIOGRAFIA

1. BAR, P. and DELANNE (1993). Réduire le bruit pneumatique-chaussée. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y NECESIDADES DE INVESTIGACION

8.1. PUNTOS DE VISTA NACIONALES

Los capítulos precedentes se fundamentan en las informaciones extraídas del análisis de los informes nacionales facilitados al Grupo de Expertos. Este análisis ha permitido extraer los elementos necesarios para evaluar las estrategias de base que en materia de ruido se utilizan en los países de la OCDE. Aunque los puntos de vista nacionales sean relativamente diferentes, se pueden distinguir dos grandes orientaciones.

Se puede considerar que países como Francia o Alemania han tomado conciencia del problema desde hace mucho tiempo, y han establecido reglas de conducta bajo la forma de leyes generales y reglamentos que determinan, no sólo los límites a alcanzar sino, la obtención de la reducción del ruido deseada. Sin embargo, incluso, en este grupo de países, no existe uniformidad, en términos de procedimiento. Algunos países, como Francia, continúan mejorando los procedimientos, aunque son conscientes de los grandes inconvenientes que presentan los métodos técnicos actuales. Los programas de investigación, han, por tanto, sido desarrollados, para resolver estas cuestiones basándose, en un punto de vista científico consolidado.

Otros países, que tienen una gran experiencia en este terreno como, Suiza, Holanda y Austria, consideran que las acciones tomadas para hacer respetar los reglamentos sobre límites de ruido, junto a las medidas adoptadas para su reducción, estrictamente normalizadas, son suficientes. No consideran necesario elaborar grandes programas de investigación. Algunos se quejan de falta de voluntad (común a otros países) a adoptar, medidas protectoras no subvencionadas, o acciones en las que los costes son soportados por personas distintas a las Administraciones de carreteras. A tales iniciativas, a cargo de las autoridades locales o de propietarios privados, no le corresponden, de hecho, más que una pequeña parte de la gama de medidas.

Es sintomático para los países del primer tipo realizar el máximo esfuerzo en la aplicación de reglas científicas para controlar el ruido, definiendo normas de medida, modelos de previsión y nuevos ensayos, para los materiales anti-ruido y las estructuras con una protección total. Por otra parte, los países del segundo tipo, fundamentan sus actuaciones, en metodologías normalizadas y muy precisas que son llevadas a cabo sin realizar la evaluación numérica de los resultados obtenidos. Hay que resaltar, sin embargo, que dichas situaciones se parecen, y no presentan más que pequeñas diferencias en lo que respecta a la naturaleza y al clima así como al medio físico. Este tipo de procedimiento, permite buenas previsiones de costes, aunque el nivel de

rendimiento, verdaderamente obtenido, es incierto. Las razones principales son la falta de seguimiento así como el cambio de las propiedades de reducción del ruido de los equipamientos durante su período de vida, más que la ausencia de una evaluación inicial de la validez de tales acciones.

Finalmente, existe otro grupo de países que están menos avanzados, si se juzga su posición sobre el hecho de que han, o no, adoptado una reglamentación o estrategia general basada en normas establecidas y en fondos específicamente reservados para actuar en esta materia. Estos países tales como España e Italia, razonan de manera científica para la elección de los tratamientos técnicos, y los límites del ruido son definidos de manera pragmática, sobre la base de la experiencia de los países pioneros que han trabajado en este terreno. Los Estados Unidos constituyen un caso aparte: además de que existen tantas situaciones diferentes como Estados los constituyen porque, sobre todo, la reglamentación de los problemas de las comunidades suscitan reacciones muy diferentes. Los Estados Unidos muy avanzados en el plano técnico, fieles a su espíritu liberal no abordan el problema a través de la utilización de límites y planes fijados por la ley. Los países escandinavos constituyen un caso ligeramente diferente. Noruega sigue un método basado en “aproximaciones sucesivas” y se ha fijado unos objetivos a alcanzar en la reducción del ruido que sirven de líneas directrices para la ley sobre la planificación. Para disminuir los “puntos negros”, tanto en las carreteras nuevas como en las existentes, se tienen en cuenta diferentes formas de actuar contra el ruido. Suecia estudia las consecuencias antes de actuar. Dinamarca adopta una situación intermedia. Sin embargo para todos estos países la comparación de los diferentes procedimientos desarrollados y la evaluación de su respectiva posición han proporcionado un fundamento útil, en el que se pueden basar sus futuras políticas nacionales.

8.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS SISTEMAS PARA LAS CARRETERAS NUEVAS Y EXISTENTES

Todos los países están de acuerdo en el hecho de que es necesario distinguir entre los sistemas del control del ruido para las carreteras nuevas y para las existentes.

8.2.1. Construcciones nuevas

Los objetivos generales son reducir tanto como sea posible el impacto del ruido de circulación y optimizar los costes. Para realizar estos objetivos se consideran válidos los principios básicos desarrollados a continuación, y es deseable que el procedimiento de elaboración de los proyectos se desarrolle en cuatro grandes fases:

- a) Un primer enfoque global que permita definir los grandes objetivos en términos de red de transporte, ordenación del territorio, medio ambiente y calidad de vida, financiación y programación.

- b) Un estudio previo, que permita intervenir en la fase de planificación de la infraestructura, en el momento en que se definen las principales características de la carretera y se comparan las diferentes variantes.
- c) La elección del trazado y la determinación de las características del proyecto.
- d) Los estudios de detalle previos a la elaboración de los pliegos de condiciones técnicas para la construcción de la infraestructura.

Cada una de estas fases debe tener una sección dedicada a la contaminación acústica.

Punto de vista global

En el campo acústico, como en otros terrenos, este estudio tiende a dar un diagnóstico de la red existente, así como una comparación de las variantes contempladas. El criterio “ruido” raramente será determinante en estas elecciones estratégicas, pero puede considerarse como un elemento importante de la política de ordenación.

En esta fase, el análisis se apoya esencialmente en los aforos y previsiones de tráfico de la red considerada. Se realiza, una cartografía resumen del ruido emitido por las infraestructuras, teniendo en cuenta su geometría y su tráfico, y si es posible, una apreciación cualitativa de las zonas edificadas y usos del suelo del entorno.

Antes de decidir la solución a adoptar en el plan de desarrollo de una zona, comparando las diferentes variantes, es necesario, no sólo, evaluar de una forma grosera el impacto producido por las diferentes opciones contempladas, sino que hay que asegurarse, igualmente, de su viabilidad y del coste de las eventuales protecciones. En efecto, esto es importante, porque no siempre existe una correspondencia directa entre la amplitud del impacto a compensar y la amplitud de las medidas correctoras a adoptar. De hecho, una variante de trazado, relativamente poco ruidosa —incluso sin medidas de protección— puede, en definitiva, volverse más difícil y costosa a tratar, en el plano acústico, que otra variante más ruidosa (sin protección).

La evaluación del impacto de las opciones estudiadas, no debe olvidar los efectos inducidos en la red preexistente, debido a, un aumento o disminución de los flujos de tráfico, etc.

Estudios previos

En esta fase, es donde es más fácil integrar, en la concepción de la infraestructura (perfiles longitudinal y transversales) las medidas anti-ruido necesarias. Estas medidas no constituyen más que un pequeño sobre-coste, en la medida en que se adoptan cuando el proyecto no está todavía concluido. Si, sin embargo, los efectos del ruido no se tienen en cuenta en esta fase, el pro-

yectista se encontrará, más adelante, con que tendrá que multiplicar las obras de protección acústica, éstas serán más difíciles de insertar en el entorno y su mantenimiento resultará más caro con el paso de los años.

Estos estudios requieren, a priori, una clara definición, de los objetivos a alcanzar, y de la vida media de las estructuras —15 años por ejemplo— que puede variar de acuerdo con la tipología de los receptores a proteger (edificios residenciales, escuelas, hospitales, oficinas) o la naturaleza del generador del ruido más importante. Conviene, igualmente, fijar los criterios de decisión para seleccionar las medidas anti-ruido a adoptar. Se debe dar prioridad al tratamiento de la contaminación acústica en la fuente, con el fin de proteger igualmente los espacios exteriores —públicos o privados— y las fachadas de los edificios. En esta fase, los estudios acústicos se realizan a escala 1/1500 ó 1/2000 con métodos de cálculo simples, frecuentemente se utilizan métodos manuales basados en ábacos o en fórmulas simplificadas. Sólo algunos lugares —relieve difícil, medio urbano...— pueden necesitar escalas más finas y metodologías más sofisticadas.

Elección del trazado

Una vez queda fijado el trazado, se realiza un estudio detallado de su impacto y se eligen los dispositivos específicos de protección acústica. Esto comprende:

- Elección entre protección en la fuente, tratamiento de fachadas o soluciones mixtas.
- Naturaleza y dimensionamiento de las obras de protección (diques de tierra, pantallas, cubiertas): altura, anchura, implantación, características acústicas) en transmisión, en absorción).
- Bases para el tratamiento acústico de fachadas: nivel de aislamiento requerido, tipo de tratamiento (dobles ventanas, cierre de terrazas), consideraciones de ventilación y de confort térmico.

En este punto, los objetivos del estudio son, el de definir geoméricamente las obras y su ubicación, el de fijar todas las medidas necesarias para su realización, el de estimar su coste y el de preparar los datos necesarios para la información pública.

El estudio acústico y el dimensionamiento de las protecciones deben realizarse con la ayuda de métodos previsionales detallados, modelos matemáticos de cálculo en la mayoría de los casos, e incluso recurriendo en los casos más complejos a la modelización física en maquetas a escala 1/2.000 o 1/500. El levantamiento de planos y/u otros estudios geoméricos nos dan los datos de base para conocer el entorno, el uso del suelo, los espacios exteriores expuestos, as fachadas de los edificios así como todo antecedente o particularidad del ordenamiento al borde de la carretera que pudiera afectar a las previsiones y a las reacciones ocasionadas por la propagación del ruido.

Estudios de detalle

Los estudios de dimensionamiento de los dispositivos de protección contra el ruido diseñado en el anteproyecto, deben retomarse a la hora de definir el proyecto definitivo para considerar:

- Las características geométricas definitivas, estudiadas a una escala menor.
- Los documentos y recomendaciones surgidas durante los primeros estudios y el proceso de información pública.
- La necesidad de optimizar los dispositivos de protección.
- Nuevos condicionantes surgidos de los últimos estudios complementarios sobre la estabilidad de las estructuras, los tratamientos arquitectónicos y paisajísticos, etc.

Este es el momento en el que se deben emplear los medios analíticos más fiables, para considerar la complejidad del lugar. Como se expresó anteriormente, estos estudios sofisticados se deben realizar por medio, de modelos matemáticos, o test en maquetas.

Los estudios detallados complementarios se refieren principalmente a los tratamientos arquitectónicos y paisajísticos, a la elección de materiales y estudios de ingeniería civil sobre la estructura portante, a las cimentaciones, al mantenimiento y a la seguridad. Estos estudios deben ser realizados por un equipo compuesto por especialistas en las diferentes materias, bajo la dirección del jefe del proyecto.

Estudio “arquitectónico” de las pantallas acústicas (1)

El estudio arquitectónico debe evitar por una parte, el concebir cada tramo de una pantalla como una actuación particular, que se deba estudiar de una manera especial, y que se pueda dividir a su vez en sub-trozos. Por otra parte, no se recomienda la utilización de colores muy vivos o de adornos muy rebuscados cuyo aspecto estético es, frecuentemente, contestado.

Las dos caras de la pantalla deben ser concebidas de manera muy diferente. Del lado de la circulación, la pantalla es un accesorio de la carretera, y como ésta, tiene naturaleza lineal. No hay que temer, por tanto, el tener una estructura lineal horizontal, y el querer diversificarla tiene el mismo sentido que el querer diversificar la propia calzada. Además, es interesante buscar y encontrar una homogeneidad visual del itinerario en un trayecto largo, y las pantallas pueden contribuir a lograrla.

Del lado externo a la carretera, por contra, la pantalla es vista por los ciudadanos inmóviles y se plantea un problema de animación que debe ser resuelto de una manera simple, por un método que la contemple como un todo

(1) Estas recomendaciones son igualmente aplicables a las carreteras existentes, como se indica más adelante.

que se integra en el conjunto y no por partes unidas “a la fuerza”. Esto constituye la forma de actuar más normal.

En Noruega, por el contrario, aunque se reconoce que las dos caras de la pantalla deben ser tratadas por separado, se considera que el lado que da a la carretera no debe considerarse como una barrera que forma parte de la estructura de la carretera. En este país, por tanto, los diferentes tipos de pantallas se han agrupado en tres categorías: pantalla zonal, pantalla de jardín y pantalla local. Se diferencian en su concepción arquitectónica en función del lugar en que son instaladas y del tipo de forma y de función de la carretera/calle vecina. La pantalla de zona que se utiliza a lo largo de las autopistas en zona suburbana esconde una zona y debe, por tanto, reflejar el aspecto de ésta. La pantalla no es un elemento de la carretera sino que es un componente de la zona. En zona urbana, es donde se utilizan las pantallas de jardín o de ciudad, estas pantallas reflejan las casas y la calle y son, igualmente, un componente del conjunto de la zona.

En un concurso relativo a una pantalla acústica, es aconsejable no especificar más que condiciones arquitectónicas ligeras (materiales, diseño...) y pedir a cada contratista que se asocie con un arquitecto para que redacte una proposición que se adapte a su producto. Un proyecto que esté extremadamente definido en el pliego de condiciones del concurso, obligará a los fabricantes a adaptar sus productos para cumplir el pliego y esto aumentará notablemente los costes. Otra solución consiste en definir el tipo de cimentación para la pantalla y dejar al contratista libertad para que elija los paneles que cumplan las exigencias acústicas del concurso.

Participación pública

El estudio de impacto que fija las obligaciones del Director de la Obra, puede haberse realizado en dos momentos diferentes de la elaboración del proyecto. Lo mejor es que se realice después de haber elegido el trazado, ya que es a partir de ese momento cuando el proyecto está lo suficientemente definido para poder evaluar su impacto y proponer las medidas de protección adecuadas, pero dado que no está definitivamente cerrado, se pueden tener en cuenta las observaciones recogidas en el proceso de participación pública. Es, sin embargo, necesario, asociar a la población a las decisiones llevadas a cabo en las fases precedentes en el marco de una concertación preliminar al proceso de participación pública.

Realizado generalmente en la fase de elección del trazado, el estudio de impacto no puede dar para las protecciones acústicas más que un dimensionamiento muy general. No obstante forma parte del documento que es sometido a participación pública, y por tanto, debe especificar claramente cuales son los objetivos fijados y los tipos de protección proyectados: cubierta, pantalla, protección de fachadas.

Los modelos y las maquetas ofrecen posibilidades en materia de comunicación para facilitar la información a los ciudadanos y mostrarles, de manera

muy concreta, de que forma se traducen los principios y objetivos enunciados a lo largo de estudios anteriores. Su participación puede, por tanto, llegar a ser muy activa y orientar la elección por ejemplo, entre una pantalla alta y un tratamiento de fachada. La implicación de los ciudadanos es la mejor garantía del éxito final de la operación, si esta está basada en una información honesta y rigurosa. Es, en particular, muy peligroso, el dejar creer que las pantallas o los diques de tierra van a eliminar toda molestia o percepción del ruido, el objetivo es, y así hay que hacerlo saber, simplemente, el disminuir esta molestia a un nivel que sea tan compatible como posible con el tipo de habitat considerado. Hay que precisar, igualmente, sobre qué ruidos se actúa y cómo estos se acumulan con los otros ruidos existentes en el ambiente.

Cuando una pantalla debe ser instalada, en las proximidades de las zonas habitadas, ya sea al borde de un espacio público (calle, plaza ...) o privado (jardín), es indispensable asociar a los ciudadanos con el estudio arquitectónico. En caso contrario, el riesgo será tanto verlo rechazado —en particular por las personas cuya propiedad es adyacente a la estructura propuesta— como verlo, incluso, degradado. En conclusión la presentación de este procedimiento busca mostrar que la acción contra el ruido no consiste en sumar diferentes técnicas. Es preferible concebir un proyecto en su conjunto de forma que se asegure la mejor protección acústica posible teniendo en cuenta su integración en el paisaje.

8.2.2. Carreteras existentes

En cuanto a la protección de las carreteras existentes, los países miembros de la OCDE tienen puntos de vista diferentes:

- Algunos consideran que las carreteras existentes deben dejarse en su estado actual;
- Otros consideran que no deben tomarse medidas contra el ruido, más que en el caso de que sufran modificaciones, por ejemplo su ensanche, pero sin actuar contra los niveles de ruido anteriores;
- Existe un tercer grupo que aboga por la realización de programas de reducción de ruido a lo largo de las carreteras existentes. Noruega lo viene aplicando desde hace 15 años y dispone de un presupuesto económico específico para tal fin.

Todos los países están de acuerdo en que si se toman medidas de protección para reducir el ruido en estas carreteras, los límites admisibles de niveles sonoros deben ser menos estrictos que los fijados para las carreteras nuevas. Esto quedó claramente expuesto en las conclusiones del Capítulo II que recomienda límites admisibles para los dos casos.

La principal dificultad para actuar sobre las carreteras existentes —que constituyen el principal problema en la mayoría de los países de la OCDE— es la financiación. Contrariamente a las construcciones nuevas o a los trabajos de ensanche cuyos gastos son cubiertos por fondos establecidos, in-

cluidos las medidas de reducción del ruido, las Administraciones responsables de las carreteras existentes, no disponen de recursos económicos suficientes y tienen, incluso, dificultades para realizar el normal mantenimiento de las carreteras.

Un estudio reciente, realizado por la Unión Europea, prevé, sin embargo, la introducción de nuevos límites de ruido encaminados a eliminar puntos negros. Esto corresponde a un escenario de nivel 1 y se trata de adoptar medidas cuyo objetivo es obtener una mejora acústica. Existen, igualmente, escenarios de nivel 2 y 3: el escenario de nivel 2 da unos límites casi idénticos a los que se recomiendan en este documento y el escenario 3 propone límites ideales que representan un objetivo a alcanzar a largo plazo. Esto podría significar que los obstáculos mencionados anteriormente para lograr la mejora de los niveles acústicos a lo largo de las carreteras existentes fueran superados. Es, por tanto, posible que los países de la Unión Europea puedan tomar medidas en estas carreteras, dando una financiación adecuada que sería soportada por las Administraciones de carreteras de tal forma que integren las medidas contra el ruido en el cuadro de las acciones de mantenimiento que son normalmente ejecutadas.

Un punto de vista global permitiría mejorar las carreteras actuando sobre otros parámetros, no sólo unidos a la disminución del ruido, sino asociados, por ejemplo, a la mejora de la seguridad vial. El Capítulo 4 subraya este punto de vista para cierto tipo de pantallas acústicas y el Capítulo 5, lo pone de manifiesto, para cierto tipo de pavimentos. Es imprescindible considerar tales medidas para, ante todo, eliminar ciertos puntos negros unidos al ruido - quizás con la adopción de límites de ruido más elevados, pero en todo caso inferiores a los que se aplican en la actualidad.

Antes de enunciar las recomendaciones finales, es importante resaltar una conclusión de este documento. Se refiere al mantenimiento en un sentido amplio. En efecto, todas las medidas anti-ruido que se han considerado —con excepción de las unidas a la estructura de la carretera desarrolladas en el Capítulo 4— necesitan una vigilancia y un mantenimiento regular que permita conservar sus propiedades acústicas iniciales. Por tanto, conviene hacer hincapié sobre los métodos más económicos de medida de condiciones acústicas así como sobre el mantenimiento y la restauración de estas propiedades que tienen el riesgo de ser perdidas o comprometidas. Otra conclusión, se refiere a la necesidad de aplicar, de una manera apropiada, las diferentes maneras de reducir el ruido, según la función y el tipo de carretera y el medio que la rodea, como final, se recomienda contar con un equipo de expertos ambientales que puedan tratar estos problemas de la manera más exhaustiva y económica.

8.3. RECOMENDACIONES FINALES

En primer lugar, hay que decir que no todos los países tienen necesidad de aplicar las recomendaciones desarrolladas a continuación y en este docu-

mento. No sólomente un gran número de ellos las han puesto ya en práctica, como se ha mencionado, sino que además una gran parte de estas recomendaciones se deriva del trabajo, pionero, realizado por estos países. El Grupo ha identificado siete recomendaciones:

1. La necesidad de institucionalizar reglas generales sobre los niveles acústicos, que sean aplicables al conjunto de un territorio nacional. Estos niveles deben estar bien definidos, ser operacionales en términos de la metodología de evaluación utilizada y diferenciados, al menos, en dos situaciones: carreteras nuevas y existentes. Para este último tipo de carreteras hay que considerar los límites “puntos negros”. Al mismo tiempo es necesario prever la financiación y la implantación de las medidas.
2. Es importante disponer de un soporte legislativo para los programas de reducción del ruido. Sería necesario prever zonas de protección al ruido en la planificación de las ciudades y para todas las carreteras. En estas zonas, apartamentos o inmuebles sin protección acústica no podrían ser construidos. Dicho de otra forma, deben tener un aislamiento acústico y estar construidos de forma que sirvan de pantalla a otras zonas que deban ser protegidas. En estas zonas, los límites de emisión del sonido deberían ser idénticos que los de las carreteras.
3. Los reglamentos y límites de la contaminación acústica deberían ser revisados periódicamente con el fin de verificar su validez y su aplicación técnica y económica. El progreso y los resultados de los programas de reducción del ruido deben ser tenidos en cuenta.
4. Equipos fijos para asegurar un seguimiento a largo plazo que permita evaluar los resultados de los programas de reducción del ruido, como está indicado en la recomendación anterior, deberían estar integrados en la concepción de la carretera o en secciones específicas.
5. Por tanto, es igualmente necesario, mejorar continuamente los modelos de previsión de la reducción del ruido y los procedimientos de medida del ruido tanto en términos de concepción como de control. Esto puede ser realizado, al menos parcialmente, intercambiando informaciones y adoptando los modelos que son, generalmente, considerados como los más apropiados, como se recoge en el Capítulo 3 y en la bibliografía reseñada.
6. Es preciso incidir sobre la formación de los ingenieros y del personal técnico con el fin de continuar los estudios sobre el desarrollo y el mantenimiento de los sistemas anti-ruido.
7. Se recomienda realizar investigaciones sobre el conjunto de los tratamientos que permitan reducir el ruido en la fuente. Las mejoras y medidas a adoptar en los vehículos han sido discutidas en el Documento. Durante los próximos años se debería actuar, al menos, sobre ciertas partes de los vehículos que son la fuente de los ruidos más “difíciles” de controlar en este momento. Estas actuaciones se refieren a:
 - los neumáticos,
 - los tubos de escape de los vehículos pesados, y
 - los sistemas de aceleración de los vehículos pesados.

La mejora de estos factores permitiría, sin duda, hacer que los métodos más antiguos de reducción del ruido fueran más eficaces y que las medidas de reducción del ruido resultaran, a largo plazo, más económicas.

8.4. INVESTIGACIONES EN MARCHA E INVESTIGACIONES NECESARIAS

Las diferentes materias de investigación se refieren a los temas tratados en los capítulos precedentes. Sin embargo, se puede constatar, de una manera general, que las investigaciones desarrolladas por los diferentes países parecen estar definidas en función de los intereses nacionales en juego. Por ejemplo, en los países nórdicos, el impacto en la sociedad es el factor más importante, y esto se concreta en estudios sobre los efectos sociales del ruido. El punto de vista de los Estados Unidos es programático y se basa en la elaboración y difusión de manuales, mientras que la investigación en Francia y en Italia, es analítica y se centra en los parámetros físicos, la evaluación de los efectos combinados de las diferentes medidas, etc.

Esta parte del documento, no presenta una lista exhaustiva de las investigaciones desarrolladas en los países de la OCDE, sino que intenta aportar una metodología basada en la experiencia de los países más avanzados en ciertos sectores. Conviene prestar una atención particular a la coordinación de estas investigaciones, tanto para evitar la duplicación de los trabajos como para facilitar los resultados obtenidos y que puedan ser utilizados o desarrollados por otros. A continuación se presentan, agrupadas por tipologías y no por países, algunas investigaciones, iniciadas o que deberían iniciarse, con el fin de indicar donde hay que incidir en este tema.

8.4.1. Prácticas actuales y límites del ruido

La mayor parte de los países han fijado límites de la contaminación producida por el ruido. Algunos como Dinamarca, Finlandia y Noruega, realizan nuevos estudios de impacto. En Finlandia, la investigación actual está dirigida a la mejor comprensión de la molestia causada por el ruido, como una componente más de la molestia engendrada por el tráfico de manera general. Noruega ha realizado investigaciones sobre el impacto que el tráfico produce en la salud de la población y su bienestar. Se ha encontrado, por ejemplo, que el porcentaje de personas molestas por el ruido es mayor en las grandes ciudades que en las pequeñas. El estudio ha, igualmente, demostrado que cuando el flujo de tráfico, en el conjunto de una zona, alcanza un volumen importante, el ruido es el factor que las personas consideran como el más molesto. Una reciente investigación médica indica que las personas molestas por el ruido del tráfico están más inclinadas a caer enfermas.

En este contexto, resulta interesante unirse a las siguientes propuestas de investigación realizadas por Dinamarca:

- *Mejoras del medioambiente.* ¿Cómo puede modificarse la legislación sobre la emisión del ruido, con el fin de mejorar el medioambiente?

- *Ajuste de los límites de ruido en función de la evolución del tráfico.* Los valores de los límites son expresados (en Dinamarca) en niveles de ruido continuo equivalente, para 24 horas (LAeq (24)). Esto ha sido decidido en los años 70, cuando se pensaba que el nivel equivalente, representaba de una manera precisa la molestia de la población. Sin embargo, en los años 90, es posible que la distribución del tráfico en un período de 24 horas, haya cambiado, en particular en las autopistas europeas, dado el nuevo mercado europeo. Habrá en el futuro, mayor tráfico de vehículos pesados por la noche, que es cuando las personas duermen y son más sensibles al ruido, sobre todo a las puntas. Por tanto, sería necesario realizar un estudio para analizar la situación con el fin de desarrollar nuevas directivas concernientes al ruido de la carretera.
- *Costes sociales.* El ruido tiene un impacto sustancial sobre los costes sociales del transporte por carretera, que deben ser considerados como componente del coste real del transporte. Sería, pues útil emprender un estudio para evaluar los costes que el ruido del tráfico ocasiona en la sociedad. En este contexto, puede resultar interesante anotar que un modelo informático para predecir el número total de apartamentos y de personas expuestos a diferentes niveles de ruido ha sido desarrollado por Noruega (VSTOY).

Por último, se puede hacer referencia en esta sección al modelo normalizado de la Unión Europea, utilizado ahora en numerosos países para prever la contaminación del aire en un país dado. Un modelo similar podría ser desarrollado para la contaminación acústica que permitiría la comparación de situaciones del ruido de la circulación en diferentes países.

8.4.2. Evaluación y medida

Cada vez, se hace más necesario el contar con modelos fiables porque los métodos actuales de medidas requieren mucho tiempo y, a veces, no se pueden aplicar. Numerosos países de la OCDE están desarrollando investigaciones en este terreno. A continuación se exponen algunos ejemplos. En Estados Unidos se ha desarrollado, en Noviembre de 1991, un Taller para identificar y jerarquizar las necesidades de investigación en materia ambiental en el sector del transporte. El personal de las Administraciones de Carreteras del Estado, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y los expertos en ruido de tráfico han identificado dos temas principales para investigar:

- *Puesta a punto de un nuevo modelo de previsión del ruido originado por el tráfico.*
- *Evaluación, sobre el terreno, de la generación, de la propagación y de la atenuación del ruido del tráfico.*

El contexto del primer tema de investigación —previsión del ruido del tráfico— está unido al hecho de que el modelo actual sobreestima los niveles de ruido en ciertas situaciones. Una corrección de la sobreestimación, aunque sea tan sólo de 1 dB(A), permitiría reducir la altura de las pantallas acústicas

en, alrededor de, 0.6 metros, lo que permitiría ahorrar más de 10 millones de \$ por año. El estudio propuesto implica el desarrollo de tres tareas:

- Examinar las tecnologías existentes; evaluar la validez de estas informaciones, y, dado el caso, determinar la amplitud de las investigaciones suplementarias necesarias.
- Desarrollar/validar los niveles de emisión del ruido de los vehículos ligeros (por bandas de octava) y de los vehículos pesados que circulan por rampas.
- Desarrollar un nuevo procedimiento de previsión del ruido del tráfico y un programa compatible con los ordenadores personales y/o en red. El programa será concebido en forma de subprogramas que permitirán añadir informaciones en el futuro, cuando otras investigaciones estén terminadas. Un subprograma será desarrollado para cada uno de los puntos siguientes:
 - Pérdida de inserción propagación a través de la calzada, del suelo, de los edificios, de la vegetación, y de los efectos atmosféricos.
 - Reflexiones múltiples.
 - Refracciones múltiples.
 - Efectos asociados a la forma de las pantallas.
 - Alturas de las fuentes productoras de ruido.
 - Informatización por bandas de octava.
 - Pantallas absorbentes.

Está previsto desarrollar un manual completo que incorporará puntos, como la pérdida de inserción mínima recomendada para una pantalla, el análisis de la hora más ruidosa y el encorvamiento de los bordes de las pantallas (la duración de este estudio será de 24 meses).

El problema concerniente a *la evaluación sobre el terreno de la generación, propagación y atenuación del ruido del tráfico* indica que la sobreestimación del programa de previsión del ruido del tráfico, es debido en parte a la incertidumbre que existe sobre la generación, la propagación y la atenuación del ruido del tráfico. Una evaluación, más pausada, sobre el terreno, de varios componentes del programa dará, gracias a los ensayos "in situ", datos para el modelo de previsión del ruido, que conducirá a una mejor precisión y previsión de la generación, propagación y atenuación del ruido del tráfico. Los siguientes componentes serán evaluados sobre el terreno y la duración de la investigación será de 48 meses y consistirá en:

- Utilizando los resultados, del examen de las tecnologías existentes, derivados del problema 1 "Desarrollo de un procedimiento de previsión del ruido del tráfico" se realizarán las medidas suplementarias necesarias para evaluar las pérdidas de inserción-propagación a través de los firmes, suelo, edificios, vegetación y efectos atmosféricos.
- Medida del rendimiento acústico de diferentes tipos de pantallas, elegidas convenientemente, situadas a lo largo de las carreteras. Como mínimo, se

realizarán medidas en pantallas paralelas reflectantes y en pantallas absorbentes que tengan un coeficiente mínimo de reducción del ruido (Noise Reduction Coefficient) de 0.8.

- Mejor predicción de la difracción producida en el borde superior de las pantallas; se identificará la altura de las fuentes de emisión de los vehículos y sus niveles de emisión en función de la velocidad, de esta forma se podrá calcular el ruido difractado por cada componente en el nuevo programa de previsión del ruido del tráfico.
- Existe una gran incertidumbre en lo que respecta a la eficacia, con el paso del tiempo, de los beneficios acústicos de los pavimentos de granulometría abierta. Se llevará a cabo un estudio a largo plazo, realizando medidas, para evaluar la degradación del rendimiento acústico que sufren los pavimentos con el paso del tiempo, hasta que la reducción del ruido sea de 1 dB(A) o inferior.

La Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA), tiene en marcha una investigación para intentar resolver los dos problemas enunciados anteriormente. Se ha realizado un examen del conocimiento técnico existente, tanto a nivel nacional como internacional, sobre el ruido de la carretera. Actualmente, un nuevo modelo de previsión del ruido de la carretera con el software asociado se está desarrollando para incorporar los progresos obtenidos en el campo de los niveles de emisión de ruido de los vehículos, así como en, la previsión del ruido del tráfico, el análisis y diseño de las pantallas y la tecnología informática. Este nuevo modelo informático, se espera que esté disponible al final de 1995.

En Suiza, un laboratorio federal (EMPA) responsable de la investigación acústica, está desarrollando, actualmente, un estudio sobre el ruido del tráfico con el objetivo de obtener un modelo informático mejor que el actual. En concreto, se necesita tener mejores predicciones en lo referente al ruido en las ciudades. Tampoco el modelo actual tiene en cuenta las reflexiones. Otro tema de investigación es el referido al *coeficiente de absorción acústica* necesario para un muro o pantalla acústica y su influencia en los costes reales. Sin embargo, no existe un medio fiable para prever el coeficiente de absorción sobre el terreno y el EMPA ha puesto a punto un método de impulsos (eco).

En Francia (Laboratorio de "Ponts et Chaussées"), el programa de investigación sobre los métodos de previsión de la emisión y la propagación del ruido en exteriores consta de:

- *Calibración de las emisiones para diferentes tipos de pavimentos.* Se pretende identificar la potencia acústica de diferentes tipos de vehículos circulando a distintas velocidades sobre diferentes clases de pavimentos desde un punto de vista acústico en función de la velocidad. El método franco-alemán será utilizado para este estudio experimental.
- *Influencia de los efectos meteorológicos en la propagación del ruido neumático/calzada.*

- *Comparación de diferentes modelos de previsión.* Validación de modelos de previsión de diferentes países para 3 ó 4 casos típicos.
- *Cálculo de la interacción pantalla acústica / pavimento silencioso.* Cálculo de medidas combinadas de protección.

8.4.3. Concepción y gestión antiruido

La evaluación del impacto sobre el medio ambiente es una tarea habitual en la planificación de una nueva carretera. Un estudio internacional sobre las diferentes maneras de evaluar el ruido además de interesante, llevaría consigo mejoras en los diferentes métodos utilizados en cada país. Esto podría conducir a una aproximación más estratégica del problema.

Otro problema es el efecto que los diferentes tipos de reducción de ruido tienen sobre las personas. Si se construye una pantalla antiruido, aunque la reducción del ruido sea importante, puede producir efectos negativos en la población, por lo que hay que cuestionarse si es ésta una buena solución. Tal vez existan otros medios de reducir el ruido que tendrían una mejor acogida por parte de la población incluso aunque la reducción del ruido fuera menor. Algunos países han hecho investigaciones a este respecto, utilizando metodologías diferentes. Si los distintos países llegan a conclusiones similares, esto podrá conducir a una mejor comprensión del efecto global de la carretera y del tráfico sobre las personas y sobre el método de reducción de ruido que será más eficaz, teniendo en cuenta la consideración del efecto social.

La investigación propuesta sobre *La molestia de las personas debida al tráfico rodado* estudiará los efectos de los diferentes métodos de reducción del ruido y cuales son los que producen un menor impacto sobre la población. Hasta ahora las investigaciones desarrolladas en los diferentes países han ido encaminadas a intentar comprender como molesta y a qué nivel, el tráfico rodado a las personas. En consecuencia, los objetivos de esta investigación (cuya duración es de 24 meses) serán:

- Definir una misma base de referencia en relación a la molestia en las personas.
- Comparar y analizar las investigaciones en curso.
- Determinar las molestias sobre las personas antes y después de la adopción de una medida correctora.
- Estudiar cómo influyen en la molestia los diferentes tipos de medidas correctoras.

Existe una medida que se ha demostrado eficaz para reducir el ruido, se trata de la puesta a punto y utilización de *ruedas silenciosas*. Los fabricantes de neumáticos están haciendo considerables investigaciones sobre la reducción del ruido. Hoy la demanda de la industria automovilística por los neumáticos silenciosos es muy fuerte. A velocidades elevadas (> 50 Km/h) el ruido de contacto neumático-calzada es más importante que el ruido de emisión de ve-

hículos. El objetivo, por tanto, es reducir las emisiones generadas en la superficie de contacto entre el neumático y la carretera.

Se han realizado numerosas investigaciones en el campo de los pavimentos silenciosos, pero existen otras posibilidades. Las investigaciones realizadas en Suecia por Sandberg han demostrado que un nuevo concepto de rueda podría tener como resultado una mayor reducción de las emisiones de ruido. Serían posibles reducciones de hasta 10 dB(A), lo que representaría una reducción del 90% del ruido emitido por los vehículos. Si esto se realizara, se podría intentar reducir el ruido emitido por otras fuentes. Una reducción de 10 dB(A) es considerable, si se compara esta cifra con los efectos de otras medidas anti-ruido:

- Pavimento de hormigón bituminoso drenante clásico: 2-4 dB(A).
- Doble capa de hormigón drenante: 5-7 dB(A).
- Pantalla acústica diseñada correctamente: 7 dB(A).
- Doble ventana: 30 dB(A).

Actualmente, se sabe que las propiedades de comportamiento de las ruedas de plástico son diferentes de las de las ruedas convencionales. Desarrollos más avanzados en este concepto son recomendados para conducir a una reducción suplementaria de 10 dB(A) en el futuro.

8.4.4. Pavimentos silenciosos

Los pavimentos drenantes que absorben el sonido representan el medio más común de atenuar el ruido. Sin embargo, algunos países dudan en generalizar su aplicación, teniendo en cuenta la falta de experiencia y de investigación. Se dispone de poca información sobre factores como la durabilidad, la eficacia a largo plazo, la seguridad en invierno y la eficacia de la limpieza de las capas drenantes.

En Italia ocho millones de metros cuadrados de pavimentos anti-ruido, el equivalente a 800 Km de carretera, se han ensayado en la red explotada por la sociedad AUTOESTRADE. Los trabajos realizados muestran que los pavimentos drenantes no son eficaces más que para reducir el ruido emitido por los vehículos en frecuencias medias y altas. Es importante encontrar métodos "activos" que permitan atenuar las bajas frecuencias. Los resonadores son utilizados, generalmente para absorber el sonido en bajas frecuencias. Se ha estudiado la posibilidad de incorporar elementos en la capa de base de la carretera para conseguir la absorción del sonido incluso en bajas frecuencias. Los prototipos de estos pavimentos se están analizando actualmente en ensayos de laboratorio.

8.4.5. Pantallas acústicas

Una gran parte de las investigaciones sobre pantallas acústicas es llevada a cabo por empresas privadas. En Suiza y en otros países, laboratorios de ca-

rácter público como el EMPA, realizan ensayos para certificar la calidad de las especificaciones de los productos.

En Italia, la empresa AUTOSTRADE ha realizado ensayos de varios tipos de pantallas (biomuro, pantalla absorbente de madera o de hormigón). Además se han realizado investigaciones más originales relativas a las pantallas vegetales y a las pantallas tipo NeW Jersey con características absorbentes para las bajas frecuencias. Los primeros prototipos de este último tipo de pantallas, que presentan una configuración absorbente limitada a las bajas frecuencias, han dado unos excelentes resultados entre 100 y 500 Hz.

Durante los años 1987 y 1988, se ha llevado a cabo una serie de campañas de medida obteniéndose resultados del comportamiento acústico de diferentes especies vegetales. Los resultados indican que las mejores pantallas para las calzadas elevadas están constituídas, por ejemplo, por una espesa barrera de vegetación arbustiva combinada con varias filas de árboles. En 1990 y 1991, se obtuvieron resultados que indican que las pantallas vegetales extremadamente densas, de alrededor de 9 a 10 metros de espesor (y nunca inferiores a 6-7 metros) pueden proporcionar una reducción del ruido de 3-4 dB(A). Sin embargo, la eficacia de una pantalla de este tipo disminuye notablemente al aumentar la distancia, desapareciendo completamente a partir de 80-100 metros de la carretera. Los ensayos han puesto de manifiesto que una pantalla vegetal filtra proporcionalmente mejor los ruidos de alta frecuencia, lo que provoca que el ruido del tráfico sea menos molesto para un nivel Leq dado. De forma más específica, las investigaciones de laboratorio en curso, realizadas sobre la base de una serie de ensayos en cámara anecoica, están orientadas a la cuantificación de las características absorbentes de ciertas especies utilizadas en las pantallas anti-ruido.

Una segunda serie de ensayos análogos implica medidas específicas sobre muestras de hojas pertenecientes al mismo tipo de planta, mediante métodos de ondas estacionarias. Una comparación de los resultados obtenidos con plantas con y sin hojas muestra que las ramas y troncos no producen virtualmente ningún efecto de absorción, y por lo tanto, el efecto no puede ser debido más que a las hojas. Se ha verificado igualmente la influencia de la densidad de las plantas, encontrándose una relación clara y directa entre esta densidad y la absorción acústica. El inconveniente evidente que presentan las pantallas vegetales es que es preciso esperar un período de tiempo largo para que alcancen su eficacia óptima. Por estas razones, no existen todavía datos acústicos exhaustivos sobre pantallas vegetales concebidas y desarrolladas exclusivamente para la reducción del ruido. En este campo, las prioridades en los Estados Unidos son las siguientes:

- *Transferencia de tecnología en materia de investigación sobre el ruido originado por el tráfico de carretera mediante ayudas a la formación y manuales.*
- *Ruido de carretera. Síntesis de métodos normalizados y recopilación de informes.*

En lo referente al primer tema, los expertos de Estados Unidos consideran que, al cabo de los años, se han realizado investigaciones excelentes sobre ruido de carretera por parte de investigadores pertenecientes a los sectores público y privado. Los resultados de estas investigaciones no han sido, sin embargo, compartidos de manera equitativa. Así, numerosos esfuerzos orientados en la misma dirección han producido importantes sobrecostos para algunas administraciones nacionales. En el caso en que la información ha sido compartida, el resultado se presenta frecuentemente en forma de informes finales cuya distribución ha sido muy limitada, siendo necesaria una significativa interpretación de los resultados. Si estos datos hubieran sido incluidos en los manuales y/o en los documentos de ayuda a la formación, la importante experiencia en materia de ruido de carretera podría haber sido mejor compartida. Esto conduciría a mejorar el diseño de las pantallas anti-ruido y a una mejor formación del personal responsable del desarrollo, construcción y mantenimiento de las pantallas anti-ruido. Esto traducirá igualmente en una economía de tiempo y coste eliminando duplicaciones de esfuerzos.

El proyecto (de una duración de 30 meses) tiene como finalidad la mejora de la transferencia de tecnología entre la comunidad de usuarios. La tarea consiste en poner al día el manual de diseño de pantallas anti-ruido de la Administración Federal de Carreteras (FHWA), la guía de diseño de pantallas anti-ruido de la AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Transporte y Carreteras Estatales) y la síntesis sobre la práctica en materia de pantallas anti-ruido. Esta puesta al día constituirá un documento práctico "Know how" incluyendo una recopilación de opciones de diseño fácilmente accesibles a un diseñador de estructuras con poca o nula experiencia en este campo. Proporcionará detalles de diseño de una serie de pantallas tipo seleccionadas entre las de utilización más frecuente (de madera, metálicas, de hormigón) así como de los nuevos materiales y servirá de guía al diseñador para evitar los errores clásicos que detectan los profesionales experimentados, tales como los conceptos coste/eficacia ligados al diseño de los sistemas de drenaje, y las consideraciones relativas a las necesidades de protección contra incendios y a las facilidades de acceso para el mantenimiento sin una disminución del comportamiento acústico de la pantalla. Se realizará una versión en video del manual de diseño de pantallas anti-ruido de la FHWA, así como una serie de instrumentos de ayuda a la formación que podrán ser distribuidos a la comunidad de usuarios en las zonas de construcción o de mantenimiento de pantallas acústicas.

Dado que las oportunidades para la reducción del ruido en la obra no son a menudo tenidas en cuenta, el segundo proyecto (de una duración de 36 meses) incluirá una síntesis de las prácticas en curso, efectuándose una evaluación profunda y rigurosa de esta síntesis y desarrollando los métodos y documentos indicativos siguientes:

- Depuración y mejora del documento FHWA "Sound Procedure for Measuring Highway Noise".
- Desarrollo y verificación de un instrumento de encuestas para la evaluación de las actitudes, positivas y negativas, con respecto a las pantallas

anti-ruido. Las actitudes que presentan mayor interés son las de la población que reside en las proximidades de la pantalla - por ejemplo, la población más afectada por la intrusión visual de una pantalla es la que más se beneficia de la reducción del ruido. La utilización del conocimiento de los profesionales y de las competencias de los encuestadores en el campo de la sociología es fundamental para evaluar la influencia de todas las variables independientes, evitándose así los sesgos en las encuestas y asegurando un alto grado de fiabilidad estadística.

- Desarrollo de un informe de presentación genérico y flexible para el proceso de participación pública.
- Síntesis, evaluación de las técnicas actuales de reducción del ruido en la construcción de carreteras, y publicación de una lista de especificaciones tipo relativas al ruido de la construcción.

En Dinamarca se realiza un trabajo casi similar, ya que es necesaria información sobre la opinión de la población que reside en las proximidades de las pantallas, así como la opinión de los conductores sobre las mismas. Puede existir una correlación entre las pantallas anti-ruido, el comportamiento de los conductores y la seguridad vial. Investigaciones más avanzadas sobre estos aspectos pueden servir de base para desarrollar directrices de diseño de pantallas anti-ruido.

8.4.6. Investigación futura

El apartado que finaliza las recomendaciones en la sección 8.3 así como las discusiones que preceden, muestran que los caminos abiertos a la investigación del control del ruido son todavía muy amplios. En este contexto, es razonable pensar que el desarrollo de los microprocesadores y de la electrónica pueden conducir a soluciones económicamente válidas para la reducción del ruido producido por el tráfico rodado.

Un ejemplo que puede servir de símbolo de las ideas innovadoras es la utilización de la tecnología "contra-ruido" en la que una específica frecuencia del espectro del sonido es generada para interferir con las emisiones de ruido no deseadas. La investigación en este sector está todavía comenzando y se ocupa más de los fenómenos de vibración que de los fenómenos acústicos como tales, centrándose en los ambientes cerrados más que en los abiertos. No obstante podría, en el momento actual, permitir la obtención de mejoras sustanciales en el control de la contaminación de determinadas fuentes de ruido de los vehículos.

LISTADO DE PARTICIPANTES

Presidente: D. Gabriele CAMOMILLA

AUSTRALIA	D. R. MATTHEWS
AUSTRIA	D. F. ZOTTER
FINLANDIA	D. A. JANSSON
FRANCIA	D. Y. DELANNE D. M. BERENGIER
ITALIA	D. G. CAMOMILLA D. M. LUMINARI D. S. GERVASIO D. ^a P. PICHETTI
JAPON	D. M. ISHIDA D. K. MORI D. T. NAKAMURA D. T. SAITO
HOLANDA	D. R.M. DURA D. C. PADMOS D. H.D. VAN BOHEMEN
NORUEGA	D. ^a A. MARSTEIN
ESPAÑA	D. J. TRIGUEROS RODRIGO D. F. RUZA TARRIO
SUIZA	D. L. FROIDEVAUX
REINO UNIDO	D. P. NELSON
ESTADOS UNIDOS	D. R. ARMSTRONG
OCDE	D. B. HORN D. C. MORIN D. ^a V. FEYPELL

Los Responsables de los Capítulos del Documento han sido: A. Marstein, R. Armstrong, G. Camomilla, Y. Delanne, L. Froidevaux, S. Gervasio, M. Luminari, J. Trigueros. El documento final ha sido coordinado por el Secretariado de la OCDE. La versión española fue supervisada por J. Trigueros.



Ministerio de Obras Públicas, Transportes
y Medio Ambiente
Centro de Publicaciones



P.V.P.: 2.000 ptas.
(I.V.A. incluido)