

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SILENCIADOR DE TÚNELES URBANOS

DESIGN AND INSTALLATION OF A SILENCER FOR URBAN ROAD TUNNELS

ALFREDO GARCÍA GARCÍA. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático del Departamento de Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia. agarciag@tra.upv.es

RESUMEN: Ante el importante incremento de ruido que se produce en las proximidades de las bocas de los túneles urbanos, las actuaciones para la protección acústica del entorno de las mismas se deben centrar en unos tratamientos que compensen esos aumentos, para uniformizar los niveles de ruido a los del resto de las vías de acceso. Hasta ahora las medidas atenuadoras más empleadas consisten en la utilización de revestimientos fonoabsorbentes para los paramentos laterales de las trincheras de acceso al túnel, prolongándolos hacia su interior, y en la extensión de pavimentos fonoabsorbentes sobre todas las superficies de tránsito de vehículos del tramo. Siendo el túnel de la avenida Dr. Pesset Aleixandre en Valencia el que presentaba mayores incidencias acústicas en su entorno, se decidió actuar aplicando las medidas conocidas y, además, desarrollar complementariamente algún sistema o dispositivo que redujera aun más los niveles acústicos en los alrededores de las bocas del túnel. Por todo ello, se planteó, diseñó, proyectó e instaló un nuevo dispositivo silenciador de túneles urbanos en las dos bocas del túnel mencionado, procediendo a su seguimiento experimental, verificando la efectividad acústica en su primera implementación en una de sus bocas.

PALABRAS CLAVE: TÚNELES URBANOS, RUIDO, TRATAMIENTOS ACÚSTICOS, PAÑELES ANTIRUIDO

ABSTRACT: In the light of the amplification of noise produced in the vicinity of urban tunnel mouths, the noise reduction action for the same should be focused on conditioning treatment which offsets this amplification in order to bring noise levels down to that of the rest of the access roads. The most widely employed acoustic measures to date have consisted of noise reduction and soundproofing panelling on the side walls of the access ramps and the tunnel itself, together with the extension of sound absorbent pavements throughout the entire vehicle transit area. The road tunnel on the Avenida Dr. Pesset Aleixandre in Valencia (Spain) was subject to particular noise propagation and it was subsequently decided that in addition to the application of the more traditional noise reduction measures, a supplementary system or device should also be developed to further reduce the acoustic levels in the vicinity of the tunnel mouths. As a result, a new urban tunnel silencer arrangement was planned, designed and installed at the two entrances to the tunnel. The pilot system has been monitored at one of the entrances and the silencer has subsequently proved effective.

KEYWORDS: URBAN TUNNELS, NOISE, ACOUSTIC TREATMENTS, NOISE CONTROL PANELS

1. MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DEL RUIDO

Para luchar contra el ruido del tráfico en los entornos urbanos queda destacado por la OCDE (1995) que "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 me-

1. NOISE REDUCTION MEASURES

In the attempt to reduce traffic noise in towns, the OECD (1995) stated that "There is no doubt that in urban and highly built-up areas, the best solution, in terms of both acoustics and space, is to pass the road through a tunnel. In this way the environment will not be affected by the road or the traffic on the same, though this does come at additional

... el medioambiente no queda afectado por la carretera o por el tráfico que circula por ella. Por otro lado, esta solución es costosa 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.”.

Además, en dicho Informe se insiste en las ventajas acústicas de un túnel urbano, ya que, “permite reducir considerablemente el número de personas expuestas al ruido, ...”. Pero en cambio, “en los alrededores de una boca de túnel los residentes reciben un ruido específico con un alto nivel y un tiempo de reverberación prolongado, que a menudo causa la impresión de ruidoso y así las quejas aparecen” (Takagi et al., 2000). El Informe de la OCDE insiste en el principal problema acústico que presentan los túneles: “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 o 100 m de la entrada del túnel para encontrar un nivel normal de ruido. Este nivel, como se ha demostrado en experiencias realizadas, se puede reducir forrando los muros del túnel con materiales absorbentes.”.

Por tanto, es de destacar el incremento de ruido que se produce en las proximidades de las bocas de los túneles, puesto que en el interior de los mismos se reverbera el ruido generado, tendiendo a salir aumentado hacia el exterior por las trincheras finales (“efecto túnel”). Además en estas últimas se produce otro fenómeno de reflexión en las paredes, conocido como “efecto tolva”, que también hace aumentar los niveles de ruido que se perciben en el entorno de los accesos a las zonas cubiertas. Por tanto, las actuaciones para la protección acústica de los túneles urbanos se deben centrar en unos tratamientos que compensen esos incrementos acústicos que se concentran en las proximidades de las bocas de los mismos.

Takagi et al. (2000) proponen para paliar este problema que antes de la construcción es necesario predecir correctamente el nivel de ruido para un túnel con las medidas adecuadas para contrarrestar el ruido que se acumula dentro de él y se irradia hacia fuera de las bocas. Para ello, en su ponencia presentan un modelo práctico de cálculo para esta irradiación de ruido que se basa en un balance de energía acústica dentro del túnel, suponiendo dos fuentes imaginarias: una es una fuente puntual que representa el sonido directo procedente de un vehículo en el túnel, y la otra es una fuente superficial que representa el sonido residual con múltiples reflexiones entre las paredes del túnel. Este modelo también se puede aplicar con tratamiento absorbente en las paredes del túnel. Los modelos anteriores de predicción presentaban muchas limitaciones de aplicación o cierta imprecisión en sus predicciones.

cost. ... The problems of gas emissions are important inside the tunnel and near the tunnel mouths and, what is more, tunnels require lighting, ventilation and drainage”.

The report further underlines the acoustic advantages of urban tunnels and states that these “considerably reduce the number of people exposed to noise...” However, “residents living in the vicinity of tunnel mouths receive specific high intensity noise and prolonged reverberation time which frequently creates an impression of noisiness and this then gives rise to complaints” (Takagi et al. 2000). The OECD report places particular emphasis on the main acoustic problem of tunnels: “The noise problem at tunnel entrances has not received the attention it requires. However, the noise levels at these points are higher than on roads or in open air and it is only when removing to at least 50 to a 100m away from the tunnel entrance that one may find normal noise levels. It has already been proved by recent experience that these levels can be reduced by lining the tunnel walls with absorbent materials”.

The amplification of noise occurring in the vicinity of tunnel mouths is caused by the reverberation of noise within the tunnel which then amplifies as the noise leaves the tunnel through the cuttings or ramps (“tunnel effect”). This is further heightened at the tunnel mouth by the reflection of the noise on the side walls of the ramps in an effect known as the “funnel effect” which also amplifies the noise levels received in the approach ramps to the covered tunnels. As such, the noise reduction measures for town tunnels should then focus on treatments which compensates this noise amplification concentrating in and around tunnel mouths.

In an attempt to offset this problem, Takagi et al. (2000) proposed that correct tunnel noise level predictions be made, prior to the construction of the tunnel, in order to verify the noise accumulating within the tunnel and that emitting through the tunnel mouths. In his paper, Takagi presented a practical calculation model for this noise emission based on the balance of acoustic energy within the tunnels and where taking two imaginary sources: one point source representing the direct sound from a vehicle within the tunnel and another, surface source, representing the residual sound with multiple reflection between the tunnel walls. This model may also be applied with soundproofing treatment on the tunnel walls. However, these prediction models have a restricted scope of application and the forecasts are somewhat imprecise.

The most widely employed noise reduction methods to date (OECD, 1995) consist of absorbent or soundproofing panels on the side walls of the

Hasta ahora las medidas atenuadoras más empleadas (OCDE, 1995) consisten en la utilización de revestimientos fonoabsorbentes para los paramentos laterales de las trincheras de acceso al túnel, prolongándolos 50 m hacia su interior, ya que su efecto es asintótico con la longitud revestida, siendo despreciable para longitudes mayores (Alegre y Clairbois, 1988; García et al., 1998), en cuanto a la reducción del ruido exterior al túnel. Los resultados logrados con este tipo de actuaciones oscilan entre 1 y 2 db de reducción del nivel equivalente medio de presión acústica.

Además, para que el efecto reductor de los paneles no se vea enmascarado por el ruido de rodadura en las calzadas de superficie del entorno de las bocas del túnel e igualmente extender su beneficio acústico a todo el tramo, se emplea una pavimentación fonoabsorbente en todas las superficies de tránsito de vehículos del tramo. La tendencia actual para el desarrollo de pavimentaciones urbanas acústicas se encamina hacia el empleo de mezclas bituminosas porosas y microaglomerados discontinuos con tamaño máximo del árido reducido, no mayor de 10 mm, no siendo muy diferente su comportamiento en cuanto a la reducción del ruido que posibilitan (García et al., 1999).

En general, las reducciones de los niveles de ruido aportadas por este tipo de pavimentaciones oscilan entre 2 y 4 db para ámbitos urbanos (Bar y Delanne, 1993; García et al., 1999; Herman et al., 2000). En cambio, Wayson (2000) concluye sorprendentemente, del análisis de un cuestionario realizado por la mayoría de los departamentos de transporte de EE.UU., que por término medio sin una reducción de ruido garantizada de 3,9 db no tiene sentido cambiar una pavimentación convencional por otra acústica.

Otras soluciones que se han empleado, aunque solamente para falsos túneles, cerrados o semicubiertos, han sido diferentes tipos de cubiertas o tableros sobre las calzadas con cuatro funciones: reducción del efecto barrera, control de la luminosidad interior, control de la ventilación y reducción del ruido (Yamamoto, 1984; OCDE, 1995; Picheti y Brero, 1995; Ota et al., 2001). Su empleo sobre las bocas de los túneles ha sido muy escaso, ya que según afirman Ota et al. (2001) *"su principal función es generalmente en relación a la iluminación de la entrada como alternativa a la iluminación artificial"*, despreciando su posible función acústica.

2. SITUACIÓN ANTERIOR DEL TÚNEL DE LA AV. DR. PESSET ALEIXANDRE

El túnel de la avenida Dr. Pesset Aleixandre en Valencia presenta una longitud cubierta importante, de unos

approach ramps to the tunnel and extending the panelling 50 m inside the tunnel, as the effect of the same is asymptotic with the cladded length and is negligible for greater lengths (Alegre and Clairbois, 1988; Garcia et al., 1998) in terms of the noise reduction outside the tunnel. This type of panelling provide a 1 to 2 db reduction of the average equivalent level of acoustic pressure.

In order to prevent the noise reducing effect of the panels from being smothered by the rolling noise on the road surfaces at the portals and to increase the acoustic benefits throughout the entire section, sound absorbent road paving has been employed throughout the entire stretch of the tunnel and portals. The current means of providing acoustic control of road surfaces is geared towards the use of porous bituminous mixes and micro surfacing with limited aggregate size of no greater than 10 mm, which both tend to offer the same scale of noise reductions levels (Garcia et al. 1999).

The reduction in noise levels produced by this type of road surface usually ranges between 2 and 4 db in urban surroundings (Bar and Delanne, 1993; Garcia et al., 1999; Herman et al., 2000). However, from the results gathered from a questionnaire conducted among the majority of the transport departments in the US, Wayson (2000) surprisingly concludes that if guaranteed noise reductions of 3.9 db cannot be obtained there is generally no reason for changing a conventional road surface for an acoustic one.

Other solutions used in false and intermittent tunnels and half-covered roads have employed different types of deck and covers for four main reasons: reduction of the sweep effect, internal lighting control, ventilation control and noise reduction (Yamamoto, 1984; OECD 1995; Pichetti and Brero, 1995; Ota et al., 2001). These solutions have not been widely employed at tunnel mouths as, in accordance with Ota et al., (2001) *"their main function is generally to provide illumination at the entrance of the tunnel as an alternative to artificial lighting"*, which undermines their possible acoustic function.

2. PRIOR STATE OF THE TUNNEL ON THE AVENIDA DR. PESSET ALEIXANDRE

The Tunnel on the Avenida Dr. Pesset Aleixandre in Valencia has a considerable covered length of 500m and receives a continuous flow of traffic with some 60,000 vehicles passing through the tunnel each day. It is also necessary to add the traffic of some 30,000 vehicles per day which pass on the outside lanes



Foto 1. Boca Este: Detalle de las Vigas/ Photograph 1. East mouth. Details of cross beams.

500 m, y soporta una elevada intensidad de tráfico, con unos 60.000 vh/d. Además en sus dos bocas hay que añadir el tráfico que sigue su recorrido en superficie por las calzadas laterales, con unos 30.000 vh/d adicionales. Todo ello, unido a la reducida separación entre fachadas de edificios justo en los tramos de acceso al túnel (30 m), hace que los niveles de ruido ambiental en el entorno de las rampas del túnel sean muy elevados, ya que las bocas del mismo arrojan al exterior una importante energía sonora que se genera en su interior y tiende a salir hacia el exterior por los dos extremos reverberada y aumentada.

Cuando se proyectó y construyó el túnel no se le incorporó ningún tratamiento acústico para reducir el ruido generado en el mismo, como por otra parte era habitual en todo este tipo de obras. Pero en cambio, de una forma singular, si se le dotó en sus dos bocas exteriores de un emparrillado de vigas prefabricadas de hormigón transversales, en prolongación del techo del túnel hacia la trin-

converging around one of the tunnel mouths. This together with the restricted clear space between the building façades and the tunnel ramps (30 m) means that the ambient noise levels around the access ramps are very high as the tunnel mouths release much of the sound energy produced inside the tunnel and this tends to reverberate and amplify on being discharged through the portals.

As is common practice in this type of structure, no acoustic treatment to reduce tunnel noise was incorporated when the tunnel was designed and built. However, in a somewhat unusual fashion, the outside of the two tunnel mouths were provided with a framework of prefabricated concrete cross beams which extend out from the tunnel roof towards the ramps. The two sides of the beams are grooved to receive rectangular prefabricated concrete panels or louvers which have a slight pitch and spacing in order to graduate the light and help drivers' pupils

chera exterior, con ranuras en las dos caras laterales de las vigas para alojar paneles rectangulares prefabricados de hormigón con una ligera inclinación y cierta separación, para producir un efecto gradual de transición luminosa que ayudara a los conductores a adaptar sus pupilas con cierta suavidad y comodidad.

Al estar los paneles alojados por gravedad en las ranuras enfrentadas entre cada dos vigas sucesivas, sin ningún tipo de sujeción adicional, algunos impactos que se produjeron en las vigas de los accesos al túnel por exceso de altura de algún vehículo respecto al gálibo disponible, provocaron la caída de algún panel sobre la calzada al moverse alguna viga y abrirse la separación entre algunas de ellas, dejando en el vacío los paneles del vano afectado.

Estas situaciones de peligro obligaron a tomar la decisión de la retirada total de los paneles de hormigón, pero en cambio se mantuvieron en su posición las vigas (Foto 1). Las vigas tienen una anchura de 55 cm y un canto de 50 cm, con una longitud próxima a los 15 m. La separación entre ejes de vigas es de 3 m, pero no exacta en todos los vanos por los golpes que debieron sufrir, que provocó el desplazamiento de alguna de ellas. Las ranuras inclinadas unos 70° presentan una anchura de 5 cm, con igual profundidad, y un arranque situado a unos 20 cm de la base de la viga. El plano que conforman las vigas acompaña a la rampa de acceso de cada una de las bocas, por lo que está más deprimido junto al dintel de las mismas.

En la boca este hay 7 vanos con diferente número de ranuras en cada vano: en los tres primeros desde el dintel hay 42 parejas de ranuras enfrentadas, en el cuarto y quinto vano hay 30 parejas, y en los dos últimos hay 23 parejas de ranuras. Esto supone que había en su día 232 paneles de hormigón, con mayor densidad o proximidad cuanto más cerca de la parte cubierta, para así lograr la variación progresiva de luminosidad.

En la boca oeste había 9 vanos con diferente número de ranuras en cada vano: en los tres primeros desde el dintel hay 42 parejas de ranuras enfrentadas, en los tres vanos centrales hay 30 parejas, y en los tres últimos hay 23 parejas de ranuras. Esto supone que había en su día 285 paneles de hormigón, con mayor densidad en la cercanía a la parte cubierta, como en la boca este.

3. DISEÑO DEL SILENCIADOR

Teniendo en cuenta la disposición original de los paneles de hormigón descritos para lograr una variación suave de la intensidad luminosa recibida por los ojos de los conductores, apoyados en las vigas de hormigón actualmente existentes en ambas bocas del túnel, y teniendo

gradually adjust to the light with a certain degree of comfort.

As the louver panels are simply set in the grooves of adjacent pair of beams and do not have any additional fastening, any possible collision with the overhead beams by a vehicle exceeding the permitted clearance height would cause the panels to drop onto the road as the spacing between the beams would open up and the panels would simply drop out.

This hazardous situation led to the total removal of the concrete panels, though the beams were left in position (Photo 1). The beams are 55cm wide by 50 cm deep and are around 15 m long. The beams were originally set 3 m apart but this spacing has since altered as a result of occasional collisions which has moved a certain number of beams. The 70° sloping grooves are 5cm wide and 5 cm deep and run up to 20 cm from the end of the beam. The plan of the beam structure runs up the access ramps to the two mouths and is, subsequently set lower at the lintel abutting the same.

At the eastern mouth of the tunnel there are 7 spans with a different number of grooves in each span; in the first three spans running from the edge lintel, there are 42 pairs of facing grooves; in the fourth and fifth span there are 30 pairs; and in the final two spans there are 23 pairs of grooves. This would have meant that there were originally 232 concrete louver panels which would vary in density as they approached the covered area of the tunnel in order to provide a gradual variation in the luminosity.

At the western mouth there are 9 spans with varying numbers of grooves in each span: in the first three spans there are 42 pairs of faced grooves; in the three central spans there are 30 pairs; and in the three final spans there are 23 pairs. This would have meant that there were originally 285 concrete louver panels which, in the same manner as at the eastern entrance, varied in density on approaching the covered area of the tunnel.

3. DESIGN OF THE SILENCER

The arrangement of concrete louvers resting on cross beams had been originally designed to adjust the driver's eyes to the change of light on entering the tunnel. The fact that these cross beams still remained at both ends of the tunnel together with recent advances in the reduction of urban traffic noise by means of special road surfaces and by



Figura 1.
Boceto con la
Disposición de
los Paneles/
*Figure 1. View
of panel
arrangement.*

en cuenta que en los últimos años se han estado desarrollando investigaciones relacionadas con la reducción del ruido del tráfico urbano, tanto en el ámbito de las pavimentaciones con propiedades acústicas, como de la protección acústica de los túneles con el revestimiento de sus paramentos con paneles fonoabsorbentes, se ideó la posibilidad de sustituir los antiguos paneles de hormigón por unos paneles que desempeñaran una función acústica, diseñándolos de tal forma que fueran fonoabsorbentes (Figura 1).

Así, teniendo en cuenta la proximidad y paralelismo de las caras de los paneles una vez dispuestos en las ranuras, como estaban los de hormigón, se obliga a la mayor parte de la energía sonora que procede del interior del túnel a tener que atravesar el emparrillado de paneles, provocando reflexiones entre las caras de los paneles, que teniendo éstas perforaciones y materiales y elementos adecuados en el interior del panel se puede lograr un importante efecto reductor del ruido generado, disminuyendo los niveles de ruido en el entorno de las bocas del túnel.

Una vez alumbrada la idea fundamental se pasó al desarrollo de la misma, teniendo en cuenta dos premisas adicionales fundamentales, complementarias a la función acústica:

noise reducing panels on the side walls, gave rise to the idea of substituting the old concrete louvers by panels with acoustic properties designed to absorb the noise (figure 1).

In view of the proximity and parallel nature of the louver faces once set in the grooves, this meant that the majority of the sound energy released from within the tunnel would have to pass under this framework of louvers and would rebound off the faces of the same. As the louver panels were perforated and included suitable inner materials, this meant that the noise levels would be reduced around the tunnel mouths.

Once this basic concept had been established the project was more fully developed in accordance with two essential premises in addition to the acoustic function of the same:

- *Safety. The solution had to be completely safe and ensure that no panel could possibly fall onto the road, as had occurred in the case of the concrete louvers.*
- *Appearance. The structure has to be integrated within an urban road infrastructure and fit in with the general urban aesthetics of the area.*

- La seguridad de la solución, con relación a garantizar que nunca pueda llegar a caer ningún panel sobre la calzada, como ocurrió con los de hormigón.
- La estética de la solución, al tenerse que integrar dentro de una infraestructura del viario urbano, además de poder contribuir a la ornamentación general urbana de la zona.

Con todos los objetivos planteados y teniendo en cuenta los condicionantes existentes, se planteó el diseño de un panel silenciador metálico lacado, de forma rectangular, con un bastidor perimetral en perfil omega y sendas chapas laterales perforadas para permitir la introducción de parte del ruido al interior del panel, donde una lámina de lana mineral y dos cámaras de resonancia separadas por una chapa lisa y ciega, rigidizadora y reflectante, se encargaran de lograr una adecuada reducción de dicha energía acústica.

El panel se encastra por gravedad entre dos ranuras de las caras laterales de las vigas de hormigón existentes, enfrentadas entre sí, quedando dispuesto con la misma inclinación de éstas, y paralelos con todos los demás paneles del vano correspondiente y del resto del emparrillado.

La altura de los paneles se propone variable dentro de cada vano y entre diferentes vanos, entre 60 cm y 100 cm, para generar unas olas progresivas que aumentan su altura máxima conforme el vano está más próximo al dintel de entrada. Así se logran varios objetivos:

- Se dispone de mayor superficie fonoabsorbente y menor separación entre paneles donde más energía acústica sale del túnel, junto al dintel.
- Se vuelve a facilitar la transición luminosa que permitiesen los paneles previos de hormigón.
- Se compensa el mayor desnivel existente entre las vigas y el dintel, conforme nos aproximamos a él.
- Se favorece el encauzamiento del tráfico entrante y saliente del túnel hacia sus paramentos derechos con la evolución de las ondas, según el sentido de circulación.

Para garantizar la seguridad de que ningún panel pueda caer sobre la calzada se prevé la unión de todos los paneles de una misma fila o vano mediante dos cables de acero inoxidable que enhebran por sus dos extremos superiores a cada uno de los paneles, haciéndolos pasar por sendas armellas. De esta forma, dándole una pequeña tensión a los cables, anclándolos en los paramentos laterales de hormigón, se consigue que si uno o varios paneles se descolgaran fortuitamente quedarían inmediatamente suspendidos del resto de los paneles de la hilada.

La definición geométrica exterior de cada panel puede verse en la Figura 2. Hay que tener en cuenta que

In accordance with these objectives and the existing conditions, a rectangular, lacquered steel, silencer panel was designed with a surrounding clasp frame and perforated side plates to allow the placing on the lower exposed panel face of a mineral wool matting and two resonance chambers separated by a flat, stiffening and reflector plate. The new panel was expected to provide a suitable reduction of the acoustic energy produced within the tunnel.

The louver panels were housed in the two opposing channels set in the side faces of the existing concrete beams and remained set at the same angle as the same, and parallel to all the other panels within the same span and framework.

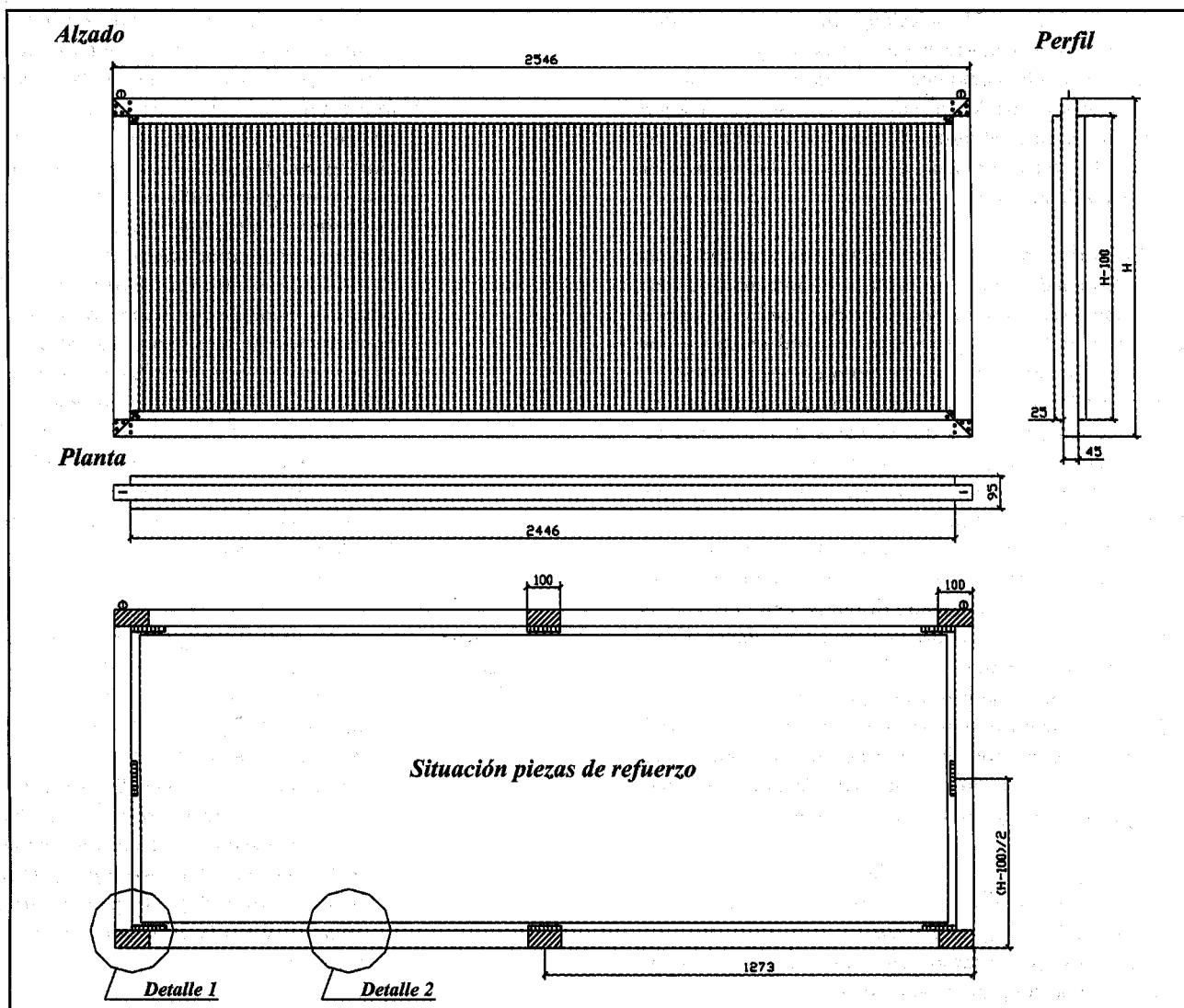
The height of the panels was varied between 60 cm and 100 cm within individual and adjacent spans in order to create progressive waves with increased maximum height on approaching the entrance lintel. This height difference was established for various reasons:

- To provide a greater surface area of noise reducing panelling and to reduce the panel spacing nearer the entrance to the tunnel and nearer to the source of acoustic energy.*
- To provide a gradual transition of light in the same manner as the earlier louvers.*
- To offset the gradually increasing drop in height between the beams and the tunnel lintel.*
- To channel the developing sound waves of entering and departing vehicles towards the nearside walls in accordance with the direction of the traffic.*

In order to ensure that none of the panels could fall onto the road, all the panels within the same span were to be fixed by two stainless steel cables which were threaded through ring hooks set on the outer ends of each panel. On slightly stressing the cables and anchoring these to the concrete side walls of the ramp, it was then ensured that if one of the panel should come loose it would immediately be held by the other panels in the same string.

The outer shape of the panel is shown in Fig. 2. As the panel was to be set at a slant with the perforated steel plate placed uppermost, it was seen that the noise would enter the panel but that it would also be exposed to water. As such, the lower flat plate, in addition to serving as an acoustic reflector and panel stiffener, also serves to protect the mineral wool matting and to drain off the rain water entering the panel, through perforations set within the plate.

Figura 2.
Definición
Geométrica del
Panel
Silenciador/
Figure 2. Plan
and elevations
of the silencer
panels.



con la inclinación del panel por la chapa perforada superior entrará el ruido, pero también al agua. Por ello la chapa lisa y ciega interior hace la función de reflectante acústico, rigidizadora del panel y drenante, para escurrir el agua de lluvia que penetre en el panel, protegiendo igualmente la lana mineral y evacuando el agua con diversas perforaciones en la parte inferior.

En la Figura 3 puede contemplarse una vista tridimensional de un tramo del borde del panel, con el detalle seccionado de su constitución, destacando los diferentes elementos del panel, empleando para su montaje diversos junquillos interiores. Las partes fundamentales del panel silenciador son las siguientes:

- El bastidor perimetral de acero galvanizado y lacado de 2 mm de espesor, con un perfil omega de anchura total 100 mm y una profundidad total de 75 mm.

Figure 3 shows a three-dimensional cross-section of the edging frame to the panel and the different component parts of the same together with the various internal mouldings. The main parts of the silencer panels are as follows:

- 2 mm thick lacquered and galvanized edging frame, with a 100 mm wide omega shape section and overall depth of 75 mm.
- Two 1 mm thick lacquered and galvanized flat, perforated steel plates set on both sides of the panel to interiorize the external noise, with a 33.8% punched surface area.
- A 1 mm thick U-shaped galvanized steel section set within the frame, with a flat, unexposed inner face, and serving as a stiffener and to reflect noise penetrating the

- Dos chapas lisas y perforadas en ambas caras del panel, para permitir la interiorización de parte del ruido exterior, de acero galvanizado y lacado, de 1 mm de espesor, con un porcentaje de punzonado del 33,8%.
- Un cajón en "U" de chapa de acero galvanizado de 1 mm dispuesto dentro del bastidor, con su cara interior lisa y ciega, con una función rigidizadora y reflectante del ruido que penetra en el interior, quedando en medio de dos cámaras de resonancia de 26,5 y 16,5 mm de profundidad. Además, teniendo en cuenta la inclinación del panel, por la chapa perforada superior entrará el ruido, pero también al agua. Por ello la chapa interior hace también una función drenante, protegiendo igualmente la lana mineral y evacuando el agua con diversas perforaciones en la parte inferior del bastidor. La chapa está doblada en sus partes superior e inferior, para así recoger y proteger la lámina de lana de roca y acodalar toda la estructura metálica interiormente. Lateralmente ataca el perfil del bastidor perimetral por su parte interior. Las características de la chapa constitutiva son idénticas a la chapa anterior descrita, pero sin las perforaciones, ni el lacado.
- Una panel rígido de lana mineral de roca basáltica de 50 mm de espesor y una densidad mínima de 70

interior. The section is set between two resonance chambers of 26.5 and 16.5 mm depth. As a result of the panel's pitch, noise enters the panel but it is subsequently subject to the entry of rain water through the perforated upper plate. As such, the lower plate serves to protect the mineral wool matting and to drain off the water through perforations set in the lower part of the frame. The plate is bent at the upper and lower parts in order to house and protect the rock wool matting and to provide internal support to the entire structure. The sides of the plate abut the inside face of the edging frame. The characteristics of the inner plate are identical to that of the plate described above though without the perforations and lacquering.

- A 50 mm thick, stiff rock wool panel with a minimum density of 70 kg/m³, set within the box section and lying against the perforated lower plating. The panel is provided with fireproof covering on its exposed face consisting of a black glass wool layer which protects the rock wool against erosion, moisture and disintegration.
- Six large reinforcing mouldings for the assembly of the four straight side sections of the edging

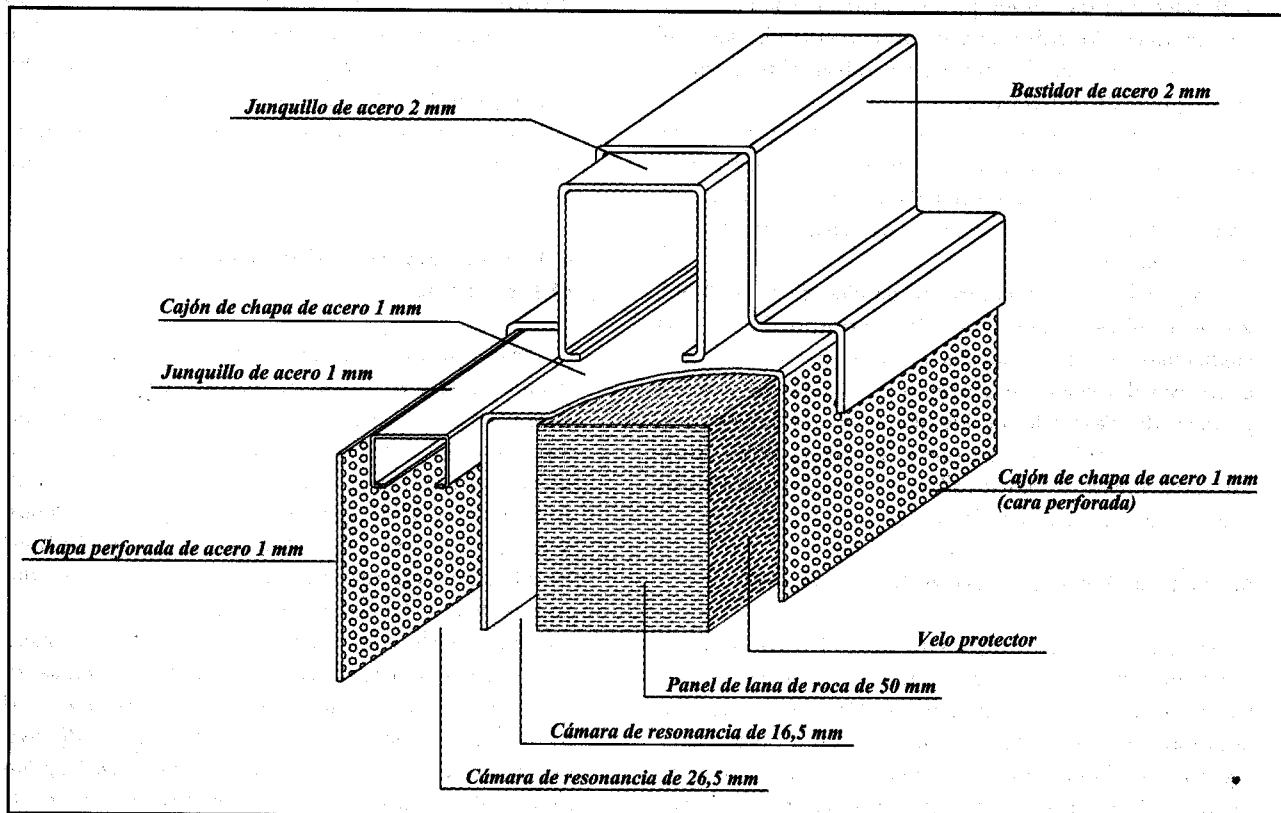


Figura 3.
Constitución
del Panel
Silenciador/
Figure 3.
Section of
silencer panel.

kg/m³, colocada dentro del cajón anterior y junto a la chapa perforada que queda en posición inferior. El panel lleva un recubrimiento incombustible por su cara vista, a base de un velo negro de lana de vidrio textil, que lo protege del ataque de la erosión y humedad, y evita el desfibramiento.

- Seis junquillos de refuerzo grandes para el ensamblaje de los cuatro perfiles rectos laterales del bastidor, conectados entre sí en inglete, con conexiones a base de seis remaches de acero inoxidable.

- Diez junquillos pequeños para acodalar y encajar los elementos interiores del panel.

- Dos armellas de sustentación situadas en los extremos de la parte superior del bastidor, de acero inoxidable de 5 mm de diámetro.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

La ejecución de las obras de actuación acústica sobre el túnel de la avenida Dr. Pesset Aleixandre de Valencia y su entorno se desarrollaron entre los meses de mayo y julio de 2001. Consistieron en la fabricación y colocación de los paneles previamente diseñados sobre ambas bocas del túnel, el revestimiento lateral de los muros de las trincheras de acceso prolongándolo 50 m hacia dentro del túnel a base de chapas de acero grecadas y perforadas, y el extendido de nuevas pavimentaciones asfálticas con características fonoabsorbentes sobre la calzada del túnel y las calzadas laterales del mismo, además del resto de las avenidas de acceso al túnel.

También se aprovechó la obra para el adecentamiento y ornamentación del túnel, así como para la mejora de la seguridad vial con la colocación de barreras de seguridad metálicas tubulares, tanto en las aceras laterales, como en la mediana.

En paralelo a todo el proceso de ejecución, se diseñó y ejecutó el seguimiento acústico correspondiente, con mediciones del ruido sistemáticas en los alrededores de la boca este del túnel. Se procedió a la programación en paralelo del desarrollo de las diferentes actuaciones previstas y las mediciones de ruido correspondientes, para así poder lograr la individualización de las efectividades acústicas logradas con cada una de ellas.

4.1 Fabricación y Colocación de los Paneles

La fabricación de los paneles se realizó en taller mediante la realización previa de todos sus elementos constitutivos para su posterior ensamblaje. Una vez los paneles eran fabricados en taller se transportaban a obra, disponiéndolos apilados con una clasificación previa por alturas ajustada al orden de colocación en cada hilera. Esta

frame, connected in mitres and joined by six stainless steel rivets.

- Ten smaller mouldings to house and anchor the internal components of the panel.

- Two 5mm diameter stainless steel holding hooks set on the outer face of the edging frame.

4. INSTALLATION OF THE SILENCER

The noise reduction and conditioning work on the tunnel on the Avenida Pesset Aleixandre in Valencia was carried out from May to July 2001. The previously designed panels were manufactured and placed at both tunnel mouths, and perforated and fretted steel plate cladding was set on the side walls of the access ramps and extended 50m within the tunnel. A new asphalt road surface with sound absorbing properties was laid within the tunnel and on the lateral flanking roads to the same as well as on all the tunnel approach roads.

The work also included a facelift to the tunnel and improved road safety by the placing of tubular crash barriers on both the sides and median of the tunnel.

In association with the remodelling works, a noise monitoring system was designed and installed in order to take systematic noise recordings at the east mouth of the tunnel. The system was programmed to monitor the development of the different conditioning works and to measure the corresponding noise levels, in order to individualize the acoustic effects achieved by each treatment.

4.1. Manufacture and installation of the Panels

The component parts of the panel were manufactured and the panels were subsequently assembled in a workshop. Once the panels had been manufactured and assembled they were transported to site and stacked according to height and in order of placement in each span. The stage was of utmost importance as it optimized installation and reduced possible damage to the panels during the handling of the same.

The panels were raised in groups by a crane and deposited face down on the beams close to their final position. Each panel was moved by hand by two workmen with the aid of a tool with two prongs which allowed the panel to be raised by the ring hooks set on each end, and then carried to its

fase era de gran importancia para optimizar la colocación y minimizar los posibles daños a los paneles por sus desplazamientos.

La colocación propiamente dicha se llevaba a cabo sustentando mediante grúa varios paneles para depositarlos sobre las vigas en posición tumbada y cerca del lugar de colocación definitiva. Cada panel era movido a mano por dos operarios, utilizando un útil con dos garras para colgar el panel por las dos armellas dispuestas en sus extremos, y así poder llevarlo y encajarlo en las ranuras enfrentadas correspondientes.

Previamente se había dispuesto en la base de cada ranura el elemento de apoyo necesario y después de encajar el panel por gravedad se sellaba el espacio entre el mismo y la ranura de las vigas. Una vez estaban colocados todos los paneles de cada hilera se procedía a enhebrarlos mediante dos cables de acero inoxidable a través de las armellas, fijándolos mediante plazas de anclaje en los muros de hormigón laterales.

4.2 Seguimiento Experimental Acústico

Para la comprobación experimental de la efectividad atenuadora del ruido de los paneles, éstos se dispusieron progresivamente, completando dos hileras cada noche de trabajo, para así poder medir el ruido a la mañana siguiente en las mismas condiciones que el día anterior. Como campo experimental se utilizó la boca este. De esta forma, no sólo se obtenía la reducción total, sino la progresión de su efecto, que puede ser muy importante para la evaluación del número de vanos o filas de paneles que sean necesarios y eficientes.

Así, se colocaron sucesivamente las siguientes partes: hileras 1 y 2, hileras 3 y 4, hileras 5 y 6, hilera 7; posteriormente se ejecutó el panelado de los muros laterales mediante paneles fonoabsorbentes habituales hasta 50 m dentro del túnel, y finalmente se extendió una pavimentación fonoabsorbente mediante mezcla porosa en el túnel (PA-10) y microaglomerado discontinuo en las calzadas de superficie (SMA-11).

Para el diseño de las mediciones del ruido se partía de un número máximo de sonómetros disponibles (5) y de las condiciones específicas del entorno de la boca este del túnel. A la hora de decidir sus localizaciones se siguieron los criterios (Trigueros, 1995):

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

Las mediciones del ruido se hicieron en cinco ubicaciones diferentes (Figuras 4 y 5):

final position and set in the corresponding housing channels.

A bearing element was set in the base of each channel and after laying the panel, the space between the panel and the groove in the beams was then sealed. Once all the panels within the same row had been laid, these were tied together by two stainless steel cables which were threaded through the ring hooks and then anchored to the concrete side walls of the ramps.

4.2 Acoustic monitoring tests

In order to verify the effectiveness of the noise attenuating panels, the panels were installed row by row, with two rows being completed by the end of each working day. In this way it was possible to measure the noise levels the following morning under the same conditions as that of the previous day. The east mouth of the tunnel was employed as the test site. As a result of these tests it was possible to observe both the progressive and total noise reduction and this was very important when attempting to evaluate the number of rows of panels which were really necessary and effective.

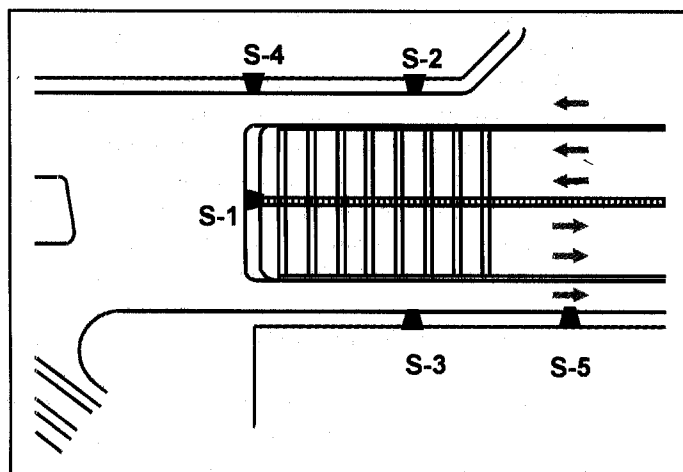
The noise attenuation work was carried out in accordance with the following schedule: rows 1 and 2, rows 3 and 4, rows 5 and 6 and row 7, followed by the cladding of the side walls with standard sound absorbing panels which were extended 50 m within the tunnel. The work was completed with the laying of a sound absorbing pavement consisting of porous asphalt (PA-10) in the tunnel and micro-surfacing (SMA-11) on the surface roads.

The noise monitoring arrangement was designed in accordance with the maximum number of sound level meters (5) available and the specific conditions of the eastern entrance of the tunnel. The sound level meters were arranged in accordance with the following criteria (Trigueros 1995):

- *Selecting points where traffic noise would probably affect the population*
- *Selecting representative points of the different situations and conditions of the area.*

The noise recordings were made at five different points (Figs. 4 and 5):

- *S-1: immediately above the tunnel lintel, on 1.2 m high tripods set at mid-span and 1 m from the edge.*
- *S-2: at the edge of the northern pedestrian walkway, on a 1.2 m tripod, 14 m from the tunnel portal.*
- *S-3: at the edge of the southern pedestrian walkway, on a 1.2 m tripod, 14 m from the tunnel portal.*



- S-1: justo encima del dintel del túnel, en el centro del mismo y a 1 m del borde, sobre trípode a 1,2 m de altura.
- S-2: en el borde de la acera lateral norte, a 14 m del dintel, sobre trípode a 1,2 m de altura.
- S-3: en el borde de la acera lateral sur, a 14 m del dintel, sobre trípode a 1,2 m de altura.
- S-4: en el borde de la acera lateral norte, en la prolongación del dintel del túnel, sobre mástil a 6,25 m de altura.
- S-5: en un balcón del edificio situado al sur, a 29 m del dintel y una altura total, incluyendo el trípode, de 8,5 m.

Así, se muestreaban los resultados en el entorno de la boca del túnel. Lógicamente las mediciones partieron con una toma de datos de referencia en la situación previa, antes de proceder a ninguna actuación, y siempre que se obtenían niveles de ruido se llevó a cabo una monitorización del tráfico a través de las diversas estaciones de aforo existentes en el tramo.

Para decidir el periodo de mediciones de ruido se analizaron previamente los perfiles de evolución horaria del tráfico de dichas estaciones en día laborable, comprobando que siempre se producía un valle estable entre las 10 y las 12 horas, lo que permitiría controlar la variable fundamental que es el tráfico, a pesar de tomar medidas en días diferentes.

4.2.1 Resultados Experimentales

En la Tabla 1 se recogen todos los niveles de ruido medidos en cada uno de los sonómetros y para cada uno de los estadios de ejecución mencionados anteriormente. Igualmente, en la Figura 6 se representa su evolución, para facilitar su interpretación.

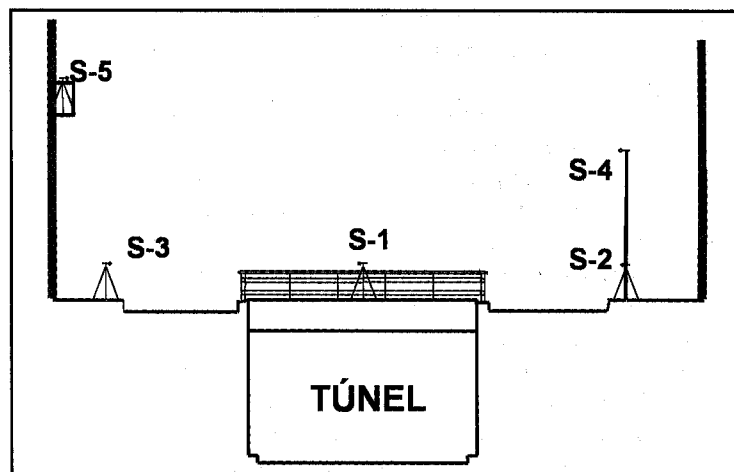


Figura 4.
Localización de los Sonómetros en Planta/**Figure 4.**
Plan arrangement of sound level meters.

Figura 5.
Localización de los Sonómetros en Sección Transversal/**Figure 5.**
Cross-sectional arrangement of sound level meters.

- S-4: at the edge of the northern pedestrian walkway, set on a 6.25 m mast placed 14 m from the tunnel portal.
- S-5: on the balcony of a building, 29 m from the tunnel portal and a total height, including tripod, of 8.5 m.

The results were sampled in accordance with this arrangement at the mouth of the tunnel. The measurements were logically made on the basis of the benchmark data obtained from the previous situation and whenever noise levels were obtained the traffic was monitored by the various measuring stations existing along the section.

In order to establish the noise measurement periods, an analysis was made of the hourly traffic flow curves recorded at the said stations over weekdays and it was seen that there was always a stable trough between 10.00 and 12.00. This then made it possible to control the traffic variable, in spite of the fact that the readings were taken on different days.

4.2.1 Test Results

Table 1 shows the noise levels recorded by each of the sound level meters over each of the aforementioned installation stages. Figure 6 gives the same results in graphic form in order to aid the interpretation of the same.

5. ANALYSIS OF THE SYSTEM

The noise reduction obtained with regards to the situation prior to the conditioning work, has been calculated and is presented in Table 2. It may be seen that the noise reduction obtained by the silencer arrangement varies between 1 and 5.6 db and that the total noise reduction ranges from 4.9 to 11.1 db in accordance with the location of the sound level meters.

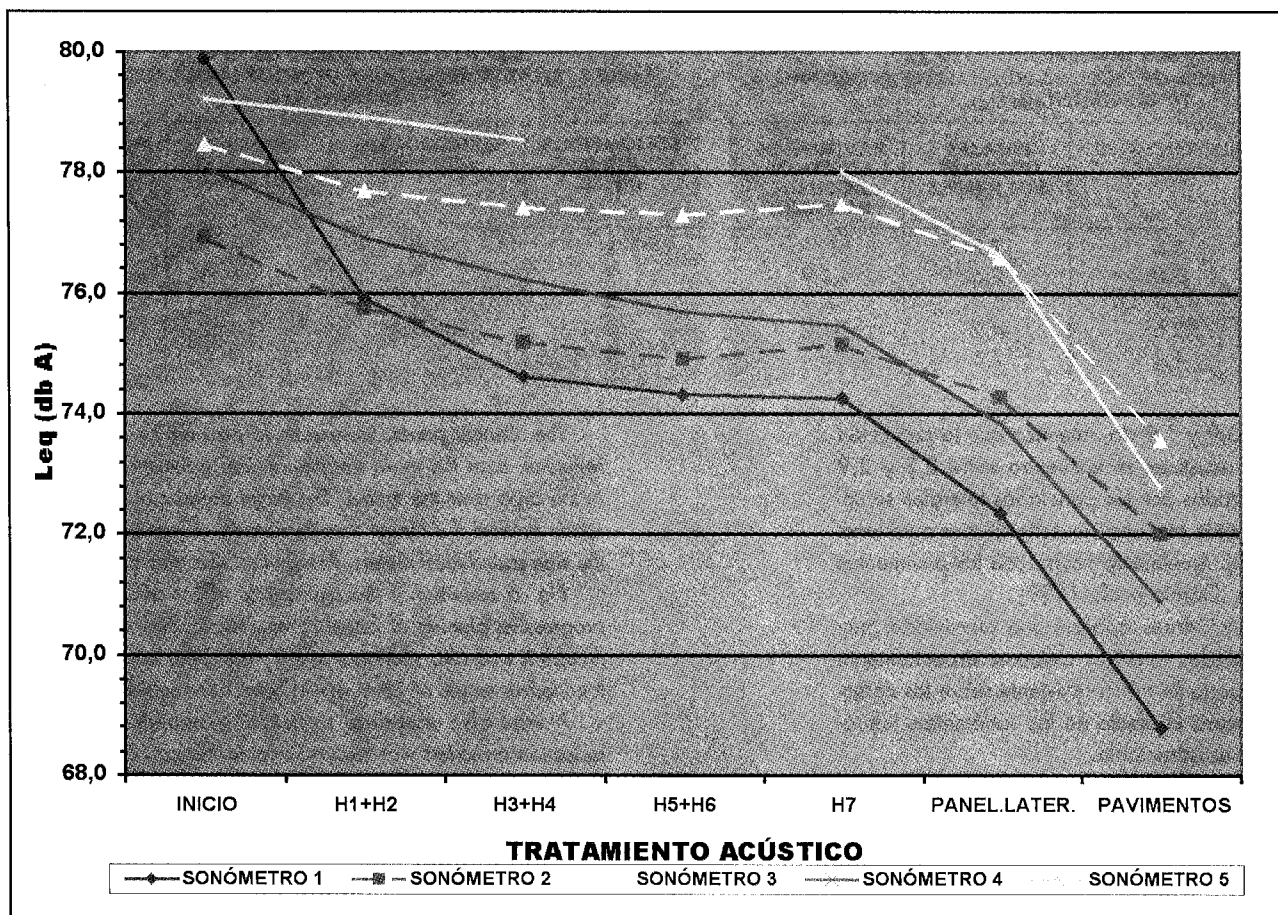


Figura 6.
Evolución de
los Niveles de
Ruido
Equivalentes/
Figure 6.
Development
of equivalent
noise levels.

5. ANÁLISIS DEL SISTEMA

Las reducciones logradas con respecto a la situación inicial se han calculado y presentado en la Tabla 2. Como se observa las reducciones logradas con el dispositivo silenciador varían entre 1 y 5,6 db, mientras que las disminuciones totales oscilan entre 4,9 y 11,1 db, según la ubicación de los sonómetros.

En la Tabla 3 se recogen las disminuciones relativas por etapas, resultando que el efecto de los revestimientos

Table 3 shows the proportional stage-by-stage decreases and from which it may be seen that the side panelling was responsible for noise reduction of between 0.9 and 1.9 db, while the acoustic pavements provided noise reduction ranging from 2.3 to 3.9 db.

The effect of the side cladding coincides exactly with that found in previous tests (García et al., 1998) and this was also seen to be the case with the acoustic road surfaces employed (García et al. 1999).

TABLA 1: RESULTADOS ACÚSTICOS EXPERIMENTALES (LEQ_A)/TABLE 1. ACOUSTIC TEST RESULTS (LEQ_A)

SONÓMETRO SOUND LEVEL METER	INICIO START	H1+H2	H3+H4	H5+H6	H7	PANELES LATERALES SIDE PANELS	PAVIMENTOS PAVEMENT
1	79,9	75,9	74,6	74,3	74,2	72,3	68,8
2	76,9	75,7	75,2	74,9	75,1	74,3	72,0
3	78,4	77,7	77,4	77,3	77,5	76,6	73,5
4	78,1	76,9	76,2	75,7	75,4	73,8	70,9
5	79,2	78,9	78,5		78,0	76,6	72,8

TABLA 2: REDUCCIONES A ORIGEN DE LOS NIVELES DE RUIDO SEGÚN LOS TRATAMIENTOS (LEQ_A)
TABLE 2. REDUCTIONS OF ORIGINAL NOISE LEVELS ACCORDING TO TREATMENT (LEQ_A)

SONÓMETROS SOUND LEVEL METER	SILENCIADORES SILENCERS	PANELES LATERALES SIDE PANELS	PAVIMENTOS ACUSTICOS ACOUSTIC PAVEMENT
1	-5,6	-7,5	-11,1
2	-1,8	-2,6	-4,9
3	-1,0	-1,9	-4,9
4	-2,6	-4,2	-7,2
5	-1,2	-2,6	-6,4

laterales está entre 0,9 y 1,9 db, mientras que la reducción por los pavimentos acústicos se encuentra entre 2,3 y 3,9 db. Los efectos logrados por los panelados laterales se corresponden exactamente con otras investigaciones anteriores (García et al., 1998). Igualmente ocurre con los pavimentos acústicos empleados (García et al., 1999).

Los paneles silenciadores aportan una efectividad muy superior a los panelados laterales clásicos, especialmente sobre el túnel. El importante tráfico existente sobre las calzadas laterales enmascara el efecto en los sonómetros laterales, aunque también es apreciable.

De la observación de la Figura 6 se deduce el efecto asintótico esperado con la colocación progresiva de las hileras de paneles, así como que se podría haber prescindido de la hilera 7, esto es, que con una longitud de emparrillado de unos 18 m es suficiente.

Otro análisis necesario se ha de basar en la proporcionalidad de la efectividad acústica con el coste de cada una de las medidas para reducir el ruido. Teniendo en cuenta los precios de ejecución material facilitados por la empresa constructora y estimados como bastante ajustados a la realidad y las condiciones particulares del desarrollo de la obra, y las mediciones correspondientes a cada unidad, se han obtenido los costes de la Tabla 4 para la boca este del túnel.

Como se puede observar el coste global del nuevo sistema silenciador es igual al del revestimiento lateral, mientras que las pavimentaciones suponen un 70% de dicho coste. Si comparamos estos costes con las reducciones logradas por cada uno de los tratamientos se destaca rápidamente una mayor eficiencia del dispositivo silenciador sobre los revestimientos laterales.

Respecto a los pavimentos cuyo coste es menor, hay que matizar su efectividad acústica mayor con respecto al silenciador en los sonómetros que se encuentran a borde de acera de las calzadas laterales, ya que la mejora del pavimento inmediato repercute directamente en el ruido medido, mientras que el beneficio del silenciador se ve ciertamente enmascarado por el importante tráfico que circula por esas calzadas. También resaltar que en el sonómetro 5, situado

TABLA 3: REDUCCIONES RELATIVAS DE LOS NIVELES DE RUIDO SEGÚN LOS TRATAMIENTOS (LEQ_A)
TABLE 3. RELATIVE REDUCTIONS OF NOISE LEVELS ACCORDING TO TREATMENT (LEQ_A)

SONÓMETROS SOUND LEVEL METER	SILENCIADORES SILENCERS	PANELES LATERALES SIDE PANELS	PAVIMENTOS ACUSTICOS ACOUSTIC PAVEMENT
1	-5,6	-1,9	-3,6
2	-1,8	-0,9	-2,3
3	-1,0	-0,9	-3,0
4	-2,6	-1,6	-3,0
5	-1,2	-1,4	-3,9

The silencer panels were seen to provide far greater noise reduction than the more traditional side panelling, particularly in the area over the tunnel. The large amount of traffic on the roads around the tunnel mouths tended to mask the effect on the side sound level meters, though this was also appreciable.

Fig. 6 shows that the asymptotic effect created with the progressive placing of panel rows was, indeed, as expected, though it was also seen that row 7 was superfluous and that a total louver length of 18 m would have been sufficient.

It was also essential to establish whether the noise reduction provided was proportional to the cost of each noise attenuating measure. Table 4 shows the costs corresponding to installation work at the eastern mouth of the tunnel. These costs were calculated in accordance with the unit prices, provided by the contractor and considered to be suitably adjusted to the particular site conditions, and the total area of each acoustic treatment.

From the table it may be seen that the overall cost of the new silencer system is similar to that of the side cladding, while the cost of the pavement came to just 70% of these other systems. When comparing these costs with the noise reductions obtained by each treatment, one may readily observe that the silencer panels were more cost effective than the side cladding.

With regards to the pavement surfaces, in addition to their lower unit and overall price, these also provided greater acoustic effects than the silencer panels in accordance with the recordings of the sound level meters set on the roads flanking the tunnel mouth. This was the case as the improved road surface had immediate and direct repercussions on the recorded

TABLA 4: ESTIMACION DEL COSTE DE CADA TRATAMIENTO ACUSTICO
TABLE 4. ESTIMATED COSTS OF EACH ACOUSTIC TREATMENT

TRATAMIENTO ACÚSTICO ACOUSTIC TREATMENT	PRECIO UNITARIO UNIT PRICE (Euros)	MEDICIÓN AREA (m ²)	IMPORTE COST (Euros)
Panel silenciador/ <i>Silencer panel</i>	124,00	434	46.128,00
Panel lateral/ <i>Side panel</i>	51,00	900	45.900,00
Pavimentación/ <i>Pavements</i>	3,60	9000	32.400,00



en el balcón, no directamente encima de la zona cubierta por el silenciador, es normal que se note mayor reducción por las pavimentaciones que suponen una actuación más amplia.

La eficiencia del silenciador es manifiestamente mejor encima del túnel, desde el dintel hacia atrás, ya que intercepta directamente los mayores niveles de ruido que tienden a salir justo en la expansión de la apertura de la boca. La reducción en esta zona de casi 6 db supone reducir casi a la cuarta parte la energía acústica, o lo que sería similar, que el volumen de tráfico circulante se redujera en la misma proporción.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado el estudio y diseño de un nuevo sistema silenciador de túneles urbanos, conformado por un empujillado de paneles con propiedades fonoabsorbentes, dispuestos sobre las bocas de los mismos.

En la primera implementación que se ha realizado sobre el túnel de la avenida Dr. Pesset Aleixandre de Valencia, se

noise levels, while the benefits of the silencer panels were somewhat undermined by the heavy traffic flow on these surface roads flanking the tunnel. It is also fairly logical that sound level meter 5, placed on a balcony and not directly over the covered panel area, would record a greater noise reduction for the pavement works due to their greater area of application.

The silencer was seen to be more efficient in the area over the tunnel, from the lintel outwards, as the panels directly intercept the amplified noise levels which tend to emerge from the mouth of the tunnel. The noise reduction in this area is almost 6db and implies an absorption of almost a quarter of the acoustic energy. In other words, the silencer produces the same effect as a 25% reduction in traffic flow.

6. CONCLUSIONS

The article considers the study and design of a new silencer system for urban road tunnels, consisting of a grid of sound absorbing panels placed at the tunnel mouth.

The pilot project for this system at the tunnel, on the Avenida Dr. Pesset Aleixandre in Valencia, has shown that

ha comprobado que al localizarlos justo donde sale al exterior la mayor parte de la energía acústica evacuada del interior del túnel y con una configuración de caras paralelas y próximas, la reducción lograda de los niveles de ruido es muy importante, llegando hasta los 5,6 db sobre el dintel del túnel.

Aunque se han ejecutado 7 hileras de paneles silenciadores sobre cada boca, de la progresión observada en la atenuación del ruido se concluye que sería suficiente con 6, es decir, con unos 18 m de longitud de cubrición.

La superficie unitaria resultante de paneles silenciadores ha sido de 1,3 m² por cada m² de cubrición de la boca del túnel. El coste total estimado del dispositivo silenciador es igual al de los revestimientos laterales de los muros, mientras que su efectividad acústica es mucho mayor.

A pesar de que el estudio se ha centrado en los aspectos acústicos, no hay que olvidar las otras ventajas del dispositivo: transición luminosa y estética.

7. AGRADECIMIENTOS

La implementación del sistema silenciador diseñado ha sido posible gracias al apoyo de la Delegación de Circulación y Transportes del Excmo. Ayuntamiento de Valencia, que ha ejecutado la actuación descrita.

La realización de todas las medidas de ruido fue hecha con los medios y el personal del Laboratorio Municipal y del Medio Ambiente del Excmo. Ayuntamiento de Valencia. El diseño de la construcción metálica de los paneles silenciadores contó con el apoyo del Prof. José Ramón Atienza. ■

when placing parallel and closely spaced panels immediately over the external area where the majority of the sound energy emerges from the tunnel, it is possible to obtain a sizeable reduction of noise level of up to 5.6 db in the area immediately over the tunnel lintel.

Seven rows of silencer panels were installed at each tunnel mouth. However, from the progressive noise reduction observed, it was seen that 6 rows or 18 m of panels would have sufficed.

The resulting unit area of silencer panels was 1.3 m² per m² of cover over the tunnel mouth. The total estimated cost of the silencer system was similar to that of the cladding on the side walls, though it was seen to be far more efficient in terms of noise reduction.

Though the study has focused on acoustic aspects, one should not ignore other advantages obtained by the system such as light transition and aesthetics.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The installation of the designed silencer system was made possible by the support of the Transport and Traffic Department of the Valencia City Council who oversaw the project.

All noise measurements were taken with equipment and by personnel from Valencia City Council's Municipal and Environmental Laboratory. The design of the steel construction of the silencer panels was made with the assistance of Prof. José Ramón Alienza. ■

REFERENCIAS

- ALEGRE, D., CLAIRBOIS, J. P. (1988). El problema del ruido en las vías de circulación en trinchera a cielo abierto y en los accesos a los túneles. *Simposio sobre Impacto Ambiental de Carreteras*. San Sebastián.
- BAR, P., DELANNE, Y. (1993). *Réduire le Bruit Pneumatique-Chaussées*. Ed. Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. París.
- GARCÍA, A. et al. (1998). Estudio Experimental de la Atenuación del Ruido del Tráfico en Túneles Urbanos. *IV Simposio sobre Carreteras y Medio Ambiente*, junio 1.998. Asociación Técnica de Carreteras. Málaga.
- GARCÍA, A. et al (1999). Reducción del Ruido del Tráfico Urbano Mediante Pavimentaciones Asfálticas Finas. *Carreteras*, Vol. 105, pp 102 -113.
- HERMAN, LL. A., AMBROZIAK, M. J. AND PINCKNEY, E. (2000). Investigation of Tire/Road Noise Levels for Ohio Pavement Types. *79th Annual Meeting TRB*, January 9th - 13th, 2.000. Washington, D.C., USA.
- OCDE (1995). *Reducción del Ruido en el Entorno de las Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- OTA, Y. et al. (2001). Multi-functional Louvers at Half-covered Roads and Intermittent Tunnels in Urban Areas: Performance and Characteristics. *1st Conference on Urban Road Tunnels*, June 15th, 2.001. Paris, France.
- PICHETTI, P. Y BRERO, G. (1995). Gli Schermi Acustici Totali. *Protezione Antirumore in Ambito Urbano con Edifici Multipiano. Autostrade*, N. 2. aprile-giugno, pp 77 -95.
- TAKAGI, K. et al. (2000). Prediction of Road Traffic Noise Around Tunnel Mouth. *Inter-Noise 2000: The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, August 27th-30th, 2000. INCE. Nice, France.
- TRIGUEROS, J. (1995). Contaminación Acústica. *III Simposio Nacional sobre Carreteras y Medio Ambiente*, junio 1.995. Asociación Técnica de Carreteras. Pamplona.
- WAYSON, R. L. (2000). A Survey of State DOTs Views Regarding Pavement/Tire Noise. *79th Annual Meeting TRB*, January 9th - 13th, 2.000. Washington, D.C., USA.
- YAMAMOTO, K. et al. (1984). Reduction of Road Traffic Noise by Louvers. *InterNoise 84: The 13th International Conference on Noise Control Engineering*, December 3rd-5th, 1984. INCE. Honolulu, Hawaii.