

# EL RUIDO DE IMPACTO EN FORJADOS

por Higinio Arau Puchades  
Dr. Ciencias Físicas  
Especialidad Acústica

## 1. INTRODUCCION

La creciente demanda de confort frente al ruido, por parte de los propietarios e inquilinos de viviendas, hace que las Autoridades públicas de la Comunidad Europea incrementen su actividad reglamentaria, publicando la normativa precisa, que permita lograr el máximo grado de bienestar para los ocupantes de la vivienda, a la vez que el aseguramiento de la calidad de los productos y materiales que componen los edificios.

En dicha línea, el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España inició, en el año 1981, su tarea de regulación del ruido en las viviendas, mediante la publicación de la Norma Básica de la Edificación "Condiciones acústicas en los Edificios".

En lo que sigue, someteremos exclusivamente el tema del ruido de impacto en forjados a un profundo análisis, con objeto de que los Arquitectos y Técnicos que participan en el proyecto y construcción de los edificios, conozcan los principios físico-acústicos que influyen en el fenómeno del impacto, y sepan en todo momento establecer o dictaminar las soluciones complementarias que determinan la solución idónea para cada caso constructivo, o simplemente adoptar la mejor disposición constructiva que permita asegurar el óptimo grado de eficacia de los elementos horizontales de separación entre viviendas frente al ruido de impacto.

No obstante, queremos remarcar que la resolución del tema del aislamiento del ruido de impacto no puede desvincularse de los temas del aislamiento a ruido aéreo y de la resistencia mecánica del forjado, debido a que todos ellos determinan el trinomio que podemos denominar de intimidad de la vivienda respecto a las colindantes.

Así, un elemento constructivo horizontal debe soportar las cargas de uso que determinan el ambiente propio de cada hogar, a la vez que debe proporcionar el aislamiento acústico aéreo y de impacto adecuado para que el desarrollo de la actividad vivencial de éste no interfiera en grado sustancial en el clima de confort de los habitantes vecino colindantes.

## 2. GENESIS DEL RUIDO DE IMPACTO EN EL FORJADO

Cuando cae un objeto sobre el suelo de una habitación se produce una fuerza de percusión que depende de la masa  $m$  del cuerpo, y de la altura  $h$  de caída. Si a su vez esta caída se produce rítmicamente con un período  $T_r$ , o una frecuencia  $f_r=1/T_r$ , entonces obtenemos una excitación mecánica semejante a la de las pisadas, que ponen en vibración a la losa estructural de separación entre viviendas, con una fuerza  $F_n$ , que determinada por Fourier, es:

$$(1) \quad F_n = (2m/T_r) (2gh)^{1/2}$$

( $g$  es la aceleración de la gravedad)

### 1. INTRODUCCION

### 2. GENESIS DEL RUIDO DE IMPACTO EN EL FORJADO

### 3. COMPORTAMIENTO DE UN SUELO ESTRUCTURAL FRENTE AL RUIDO DE IMPACTO

### 4. MEDIDAS CORRECTORAS COMPLEMENTARIAS PARA MEJORAR EL NIVEL DEL RUIDO DE IMPACTO NORMALIZADO DE UN FORJADO

### 5. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DE INTERES

### 6. CONCLUSION

### 7. BIBLIOGRAFIA

Así, la fuerza de excitación producida, es proporcional a la masa del cuerpo que genera el impacto, a la raíz cuadrada de la altura de caída y de la frecuencia  $f_r$  con que se producen las sucesivas colisiones.

La norma UNE indica que las mediciones del ruido de impacto se realicen con la máquina de martillos estandarizada o máquina de impactos, en la que  $m=0.5$  Kg,  $T_r=0.1$  s y  $h=0.04$  m, lo cual implica que ésta desarrolle una fuerza de amplitud  $F_n=8.86$  N  $\approx 0.9$  Kp.

¿Cuál sería la fuerza transmitida al suelo por un niño de 50 Kg., que realizando ejercicios en su casa, salta rítmicamente con una frecuencia  $f_r$  de 1 salto cada dos segundos desde una altura de 5 cm.? En este caso el resultado sería:

$$F_n=49.5 \text{ N} \approx 5 \text{ Kp}$$

Sea ahora el caso de un niño que jugando con una bola maciza y dura, que pesa 30 gramos, la deja caer desde 50 cm del suelo con una cadencia de 0.5 impactos por segundo, ¿Cuál sería la amplitud de la fuerza transmitida al suelo en este caso?. El resultado es:

$$F_n=0.094 \text{ N} \approx 0.0096 \text{ Kp}$$

Como vemos la fuerza transferida es unas cien veces inferior a la que proporciona la máquina de impactos y unas quinientas veces más pequeña que la que produce el niño saltando.

Así, cualquiera que sea el valor de la fuerza del impacto transmitida al forjado, se producirá una deformación del material, en el área que ocupa el cuerpo que cae, desplazándolo de su posición de equilibrio, hasta que las fuerzas elásticas de recuperación del forjado lo retornen a su posición inicial, arrastrando en su movimiento de vaiven a las partículas de material de las áreas contiguas, que obedecerán al mismo tipo de movimiento periódico, de forma que lo único que en realidad se transmite en el forjado es la deformación inicial producida por el impacto.

La onda de deformación o de vibración originada, se propaga a una velocidad longitudinal que depende de la naturaleza del material que compone la losa estructural, siendo su valor función del módulo de elasticidad dinámico  $E$  y de la densidad  $\rho$  del material:

$$(2) \quad c_L=(E/\rho)^{1/2}$$

Así por ejemplo tenemos que el acero tiene una velocidad de propagación de 5000 m/s, el hormigón de 3000 m/s y la madera dura de 1500 m/s. Es por esta razón que cuanto mayor sea el módulo de elasticidad a igualdad de densidad del material, obtendremos una mayor velocidad de propagación del sonido en el material.

Tenemos como conclusión, que el impacto sobre un forjado produce:

1. Una deformación que se manifiesta en forma de flexión, que desplaza al material de las áreas vecinas.
2. Las partículas de material solicitadas a moverse, lo hacen sólo en una cantidad infinitesimal alrededor de su posición de equilibrio, a causa de las fuerzas elásticas restauradoras.
3. La única energía que progresa, es la causada por la perturbación del impacto, que se manifiesta como una vibración en la losa que se traslada a una velocidad particular para cada material.
4. Todo el forjado se pone en vibración y se comporta como una fuente de generación de ruidos aéreos.

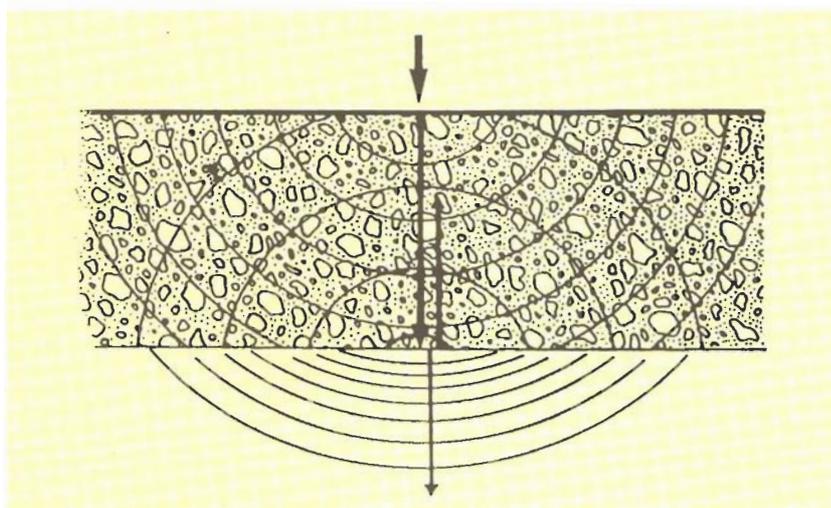


Figura 1: Mecanismo de propagación de la vibración y generación de ruido por impacto en un forjado.

De este modo, la vibración del forjado se transmite al espacio receptor subyacente poniendo en movimiento las partículas de aire que son las que ahora trasladarán la perturbación a través del espacio aéreo receptor, creándose por tanto un ruido aéreo inducido, ver figura 1.

5. La energía comunicada por el impacto sobre el suelo, tiene la desventaja de ser más fuerte que la energía correspondiente a un ruido aéreo, siendo por tanto mucho más difícil atenuarla suficientemente para que no resulte molesta.

6. Otro grave inconveniente del ruido de impacto frente al ruido aéreo, es que mientras el segundo sólo perturba a las habitaciones inmediatamente próximas al local de excitación, el primero puede oírse en todo el inmueble, a causa de la propagación de la energía por vías secundarias repartiéndose a través de todos los elementos constructivos solidarios rígidamente a la estructura inicialmente excitada.

En resumen podemos decir, que cuando se produce un impacto sobre la cara superior de un elemento constructivo horizontal se generan unas ondas de vibración que se propagan rápidamente por todo el material, de modo que cuando la energía llega a la cara inferior del elemento horizontal, una parte es reflejada y reenviada a la cara superior y el resto de la energía es transmitida al aire próximo. Así, el aire sometido a una agitación periódica produce un ruido aéreo que se conoce como ruido de impacto.

Cuando el nivel de ruido producido en una habitación es debido al funcionamiento de la máquina de impactos sobre un forjado, éste se denomina entonces "Nivel de ruido de impacto normalizado  $L_n$ ". Su valor, que se expresa en decibelios, se determina a partir del nivel medio de la presión acústica medida en el local subyacente  $L_i$ , y las unidades de absorción del recinto, o área de absorción equivalente  $A$ , mediante la siguiente expresión:

$$(3) \quad L_n = L_i + 10 \log (A/A_0)$$

donde  $A_0$  es un área de absorción equivalente de referencia que vale  $10 \text{ m}^2$  y  $A$ , el área de absorción equivalente, que se calcula a partir de la medida del tiempo de reverberación  $T$ , en segundos, por aplicación de la fórmula de Sabine:

$$(4) \quad A = 0.163 V/T$$

donde  $V$  es el volumen del local subyacente receptor del ruido, expresado en metros cúbicos.

Sustituyendo ahora la expresión (4) en la (3), sabiendo que existe un tiempo de reverberación asociado a la absorción de referencia  $A_0$  dado por la ecuación:

$$A_0 = 0.163 V/T_0$$

Así, resulta que el nivel de ruido normalizado, que escrito de distinto modo lo llamaremos estandarizado, es el siguiente:

$$(5) \quad L_{nt} = L_i - 10 \log(T/T_0)$$

Donde  $T_0 = 0.5$  s, es un valor de referencia que se obtiene frecuentemente en habitaciones.

### 3. COMPORTAMIENTO DE UN SUELO ESTRUCTURAL FRENTE AL RUIDO DE IMPACTO

Suelos de este tipo son cualesquiera de los usados en la construcción, tales como los forjados descritos por la norma básico NBE-CA 88 : De hormigón armado unidireccional con bovedilla cerámica, con bovedilla de hormigón, sin bovedilla; el reticular de hormigón armado; con bovedilla cerámica, sin bovedillas; y las losas de hormigón armado, todos ellos acabados, o no, con recubrimientos duros, sean de baldosa o terrazo, parquet sobre mortero, láminas duras fijadas al forjado, etc.

En este caso I.L. Vér [1] y Heckl-Rathe [2] descubrieron independientemente, uno del otro, que el aislamiento acústico normalizado  $R$ , medido en dB y el nivel de ruido de impacto normalizado  $L_n$ , obedecen la siguiente expresión:

$$(6) \quad R + L_n = 43 + 30 \log f, \text{ (dB)}$$

donde  $f$  es la frecuencia en Hz que normalmente se expresa en bandas de octava. Fórmula que sólo es válida para losas gruesas como las de los forjados citados anteriormente, y que es independiente de la rigidez de la losa estructural que define al forjado.

Recordemos aquí el punto 3.3.1 de la Norma Básica que dice:

"El nivel de ruido de impacto normalizado  $L_n$  en el espacio receptor subyacente, considerado un aislamiento al ruido aéreo  $R$  del elemento separador horizontal, se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$(7) \quad R + L_n = 135 \text{ dB (A)}$$

Como es fácil ver esta expresión es coincidente con la dada en (6) si consideramos que la frecuencia  $f$  es:  $f = 1166$  Hz, lo que quiere decir que estamos operando en la banda de octava de 1000 Hz, cuyo valor prácticamente coincide con el de la curva de ponderación A, es decir cuando los valores se expresan en dB(A).

A su vez en el artículo 14 la citada Norma Básica impone, para los elementos horizontales de separación de propiedades o usuarios distintos, un aislamiento mínimo a ruido aéreo  $R$  de 45 dB(A) y que el nivel de ruido de impacto normalizado  $L_n$  sea como máximo de 80 dB(A).

De lo que se deduce que el valor que debe cumplirse según la parte dispositiva legal de la Norma Básica es:

$$R + L_n = 125$$

con la condición de que  $R$  sea igual como mínimo a 45 dB(A).

¿Existe pues una contradicción entre el articulado de la ley y la formulación física allí expuesta? ¿Qué sucede con los 10 dB(A) que el legislador mantiene a su favor?

Pensamos que lo que pretende el legislador, cuando se supere un  $L_n = 80$  dB(A), es que debe exigirse, al sistema constructivo elegido, como mínimo un nivel de ruido de impacto normalizado  $L_n$  diez decibelios inferior al que se determina mediante la expresión (7), a partir del  $R$  calculado en base de la ecuación (2) del anexo 3 de la Norma Básica. Lo que implícitamente quiere decirnos el legislador es que entonces será preciso introducir un aislamiento contra el impacto que de forma complementaria se añada al sistema constructivo que hayamos propuesto.

Para determinar la veracidad de los resultados que pueden calcularse a través de la expresión (7) emitida por la Norma Básica analizaremos el problema desde otro ángulo de visión físico.

En el año 1971, I.L. Vér [3] demostró que para forjados de hormigón, el nivel de ruido de impacto normalizado puede calcularse mediante las siguientes expresiones:

1. Para hormigón denso ( $\rho=2300 \text{ Kg/m}^3$ )

$$(8) \quad L_n = 32.5 - 30 \log h + 10 \log(\sigma \text{ rad}/\eta)$$

donde:  $h$  es el espesor de la losa en metros.  
 $\sigma \text{ rad}$  es el factor de radiación del sonido, que para frecuencias superiores a la crítica del forjado es  $\sigma \text{ rad}=1$   
 $\eta$  es el factor de amortiguamiento.

2. Para hormigón baja densidad ( $\rho=600 \text{ Kg/m}^3$ )

$$(9) \quad L_n = 47 - 30 \log h + 10 \log(\sigma \text{ rad}/\eta)$$

En la figura 2 mostramos un nomograma de cálculo del  $L_n + 10 \log(\eta/\sigma \text{ rad})$  en función del espesor  $h$  para los dos casos citados.

Calculemos ahora el  $L_n$  que obtendríamos para el caso de una losa de hormigón denso de 25 cm. de espesor.

La masa unitaria vale  $m=\rho h=575 \text{ Kg/m}^2$  y supondremos un valor típico del amortiguamiento  $\eta=0.005$ . Sustituidos estos valores en la expresión (8), o a través del gráfico de la figura 2, se deduce:

$$L_n + 10 \log(h/r \text{ rad}) = 50.5$$

que implica que  $L_n=73.5 \text{ dB}$

Calculando ahora el aislamiento al ruido aéreo  $R$ , a través de la ecuación (2) anexo 3 de la Norma Básica, tenemos:  $R=59.22 \text{ dB(A)}$ , y determinando  $L_n$  a partir de la expresión (7) obtenemos:  $L_n=75.7 \text{ dB(A)}$ , valor que difiere ligeramente respecto al que hemos obtenido mediante la ecuación (8). Esto prueba que los valores de  $L_n$  que se calculen en base a las ecuaciones dadas en la norma son aproximadamente correctos.

Hay que destacar que la Norma Básica dice explícitamente que los valores de aislamiento al ruido aéreo y al de impacto se determinarán mediante ensayo, y sólo en ausencia de éstos se podrán calcular mediante las ecuaciones propuestas.

No obstante, con respecto a la citada tabla 3.7 de la norma cabe hacer una observación relativa a la diferencia existente entre la masa de algunas de las soluciones de solado indicadas, con las reales correspondientes a la ejecución en obra.

En este sentido estimamos más ilustrativa la tabla que a continuación exponemos, en la que para cada valor de masa unitaria del forjado, más solado y guarnecido de techo, se da el aislamiento a ruido aéreo  $R$  y el nivel de ruido de impacto  $L_n$ .

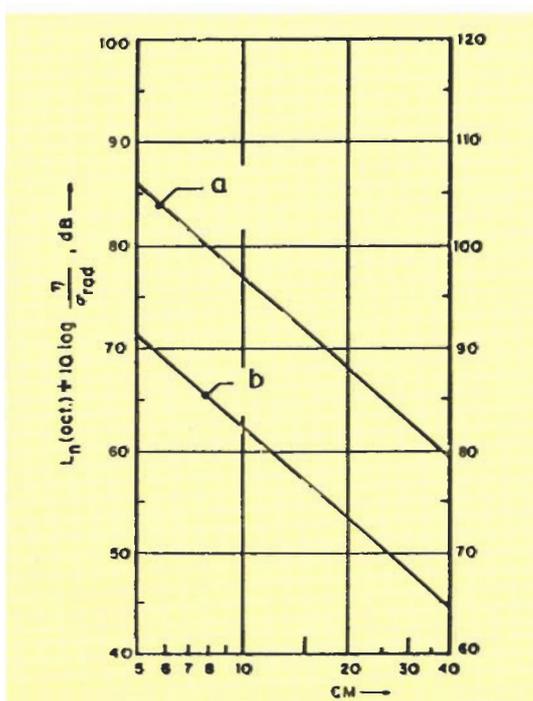


Figura 2.  
 $L_n$  en función de  $h$   
 a) para hormigón denso  
 b) para hormigón baja densidad

TABLA 1

Masa unitaria total del forjado más solado y guarnecido de techo(Kg/m <sup>2</sup> )	Aislamiento a ruido aéreo R dB(A)	Nivel de ruido de impacto Ln dB(A)
250	46.0	89.0
260	46.7	88.3
270	47.3	87.7
280	47.8	87.2
290	48.4	86.6
300	48.9	86.1
310	49.4	85.6
320	49.9	85.1
330	50.4	84.6
340	50.9	84.1
350	51.4	83.6
360	51.8	83.2
370	52.2	82.8
380	52.7	82.3
390	53.1	81.9
400	53.5	81.5
410	53.9	81.1
420	54.2	80.8
430	54.6	80.4
440	55.0	80.0
450	55.3	79.7
460	55.7	79.3
470	56.0	79.0
480	56.4	78.6
490	56.7	78.3
500	57.0	78.0

Debido a que con los cantos de forjados más usuales (de 20 cm a 25 cm) se obtiene un nivel de ruido de impacto Ln (según la masa del solado) alrededor del límite de los 80 dB(A), es preferible utilizar soluciones complementarias; más eficaces y menos costosas que el aumento de espesor del forjado por encima de las necesidades estructurales.

#### 4. MEDIDAS CORRECTORAS COMPLEMENTARIAS PARA MEJORAR EL NIVEL DEL RUIDO DE IMPACTO NORMALIZADO DE UN FORJADO

Para evitar que el ruido aéreo creado por impacto sea molesto, es necesario reducir la cantidad de energía transmitida al aire.

Un primer método consiste en reducir la cantidad de energía suministrada al suelo. Para esto es suficiente situar sobre la cara superior del suelo un material elástico flexible.

Un segundo método el de la losa flotante, consiste en provocar una discontinuidad perpendicular a la dirección de recorrido de las ondas de vibración mediante la interposición de un material resiliente.

Estudiemos con mayor detalle las soluciones propuestas:

##### 1. Recubrimiento elástico flexible

Sea el caso de una superficie elástica y flexible colocada sobre el suelo.

La presencia de esta capa produce un cambio en la forma del pulso de la fuerza de impacto, y por tanto se produce una reducción de la potencia mecánica comunicada a la losa que depende de la rigidez dinámica del material es dada por la siguiente expresión:

$$(10) \quad s = E A_h / h$$

donde:  $A_h$  es el área de impacto.  
 $h$  es el espesor de la capa resiliente no comprimida.  
 $E$  es el módulo dinámico.

A causa del efecto muelle de la capa elástica, se produce la aparición de una frecuencia de resonancia  $f_0$ , que adquiere el siguiente valor, [3]:

$$(11) \quad f_0 = 1/2\pi (A_h/m)^{1/2} (E/h)^{1/2}$$

En la figura 3 mostramos un gráfico de selección del módulo  $E$  de un material elástico en función de la frecuencia de resonancia que se desee obtener.

Con ello obtenemos, según [2] y [3], que la reducción del nivel de impacto  $\Delta L_n$ , o índice de mejora de  $L_n$ , debido a la capa resiliente es:

$$(12) \quad \Delta L_n = 40 \log f/f_0$$

A través de esta ecuación se deduce que por debajo de  $f/f_0=1$  la mejora del nivel de ruido de impacto respecto de la losa desnuda es cero o incluso negativa, produciendo una amplificación del impacto, pero por encima de  $f/f_0=1$  la mejora, o el aislamiento de impacto, se incrementa en una relación de 12 dB por octava.

Así entonces, la fórmula válida para calcular el nuevo nivel de ruido de impacto normalizado, cuando se ha interpuesto una capa elástica sobre el suelo será en lugar de la expresión (6) la que a continuación escribimos:

$$(13) \quad R+L_n = 43 + 30 \log f - 40 \log f/f_0$$

De forma paralela, la fórmula (7) propuesta por la Norma Básica, la podemos escribir:

$$(14) \quad R+L_n = 135 - 40 \log f/f_0$$

considerando en este caso que la frecuencia  $f$  considerada sea la de la octava de 1000 Hz.

Según M.S. Auzou,[4], existen cuatro categorías de revestimientos de suelos valorados de mejor a peor, que a continuación citamos:

#### Categoría nº1

- Caucho sintético sobre espuma (curvas 1,2,3 y 4)
  - Moqueta con arpillera (curva 5)
  - Moqueta sola (curva 6)
  - Moqueta fibrosa con y sin arpillera (curvas 7 y 8)
  - Revestimiento plástico sobre plástico expandido (curva 9)
  - Pelo de vaca sobre arpillera (curva 10)
  - Losa flotante lisa (curva 11) (\*)
- (\*) este tema se tratará después.

#### Categoría nº2

- Plásticos sobre fieltro (curvas 12 y 13)
- Fibras vegetales trenzadas (curva 14)

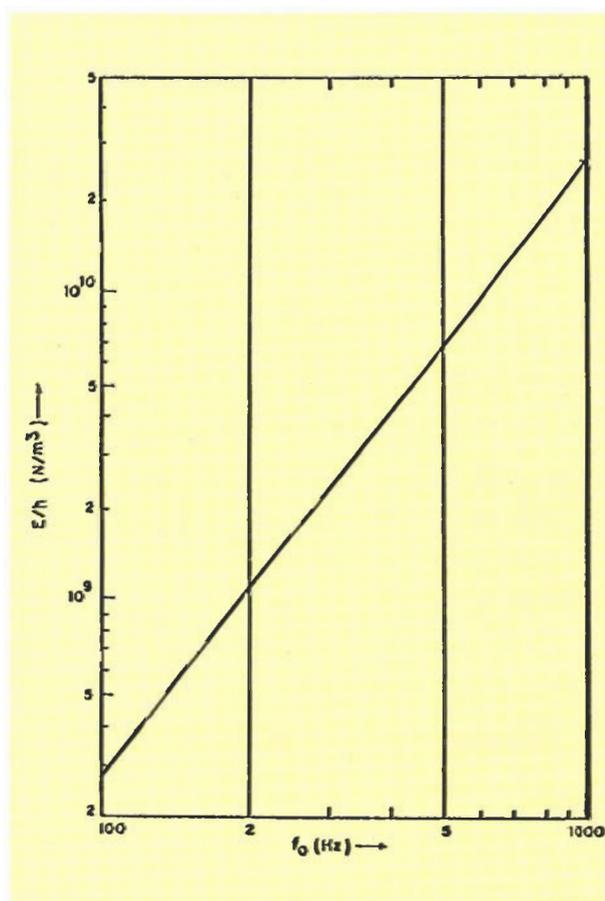


Figura 3.  $E/h$  en función de  $f_0$

- Pelo de vaca (curva 15)
- Plástico ligeramente expandido sobre yute (curva 16)
- Aglomerado de corcho y latex (curva 30)

**Categoría nº3**

- Plástico sobre yute (curva 17)
- Plástico sobre fieltro (curvas 18 y 19)
- Baldosas de gres y parquet sobre aglomerado de corcho y latex (curvas 31 y 32)

**Categoría nº4**

- Baldosas plásticas (curva 20)
- Linóleos (curvas 21 y 22)
- Parquet encolado (cuva 23)
- Arpillera (curva 24)
- Láminas de plásticos (curvas 25,26 y 27)
- Baldosas de gres (curvas 28 y 29)

En las figuras 4 a 8 mostramos los resultados de los análisis del índice de mejora del ruido de impacto, de las muestras anteriormente enumeradas, obtenidos experimentalmente por el citado autor.

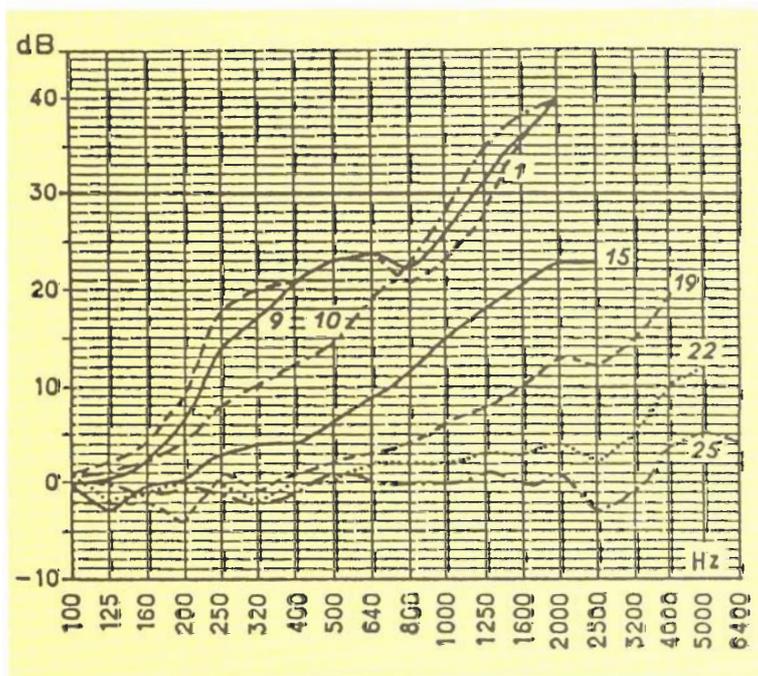


Figura 4 : Ordenadas: índice de mejora del impacto Ln, abscisas: frecuencia Hz

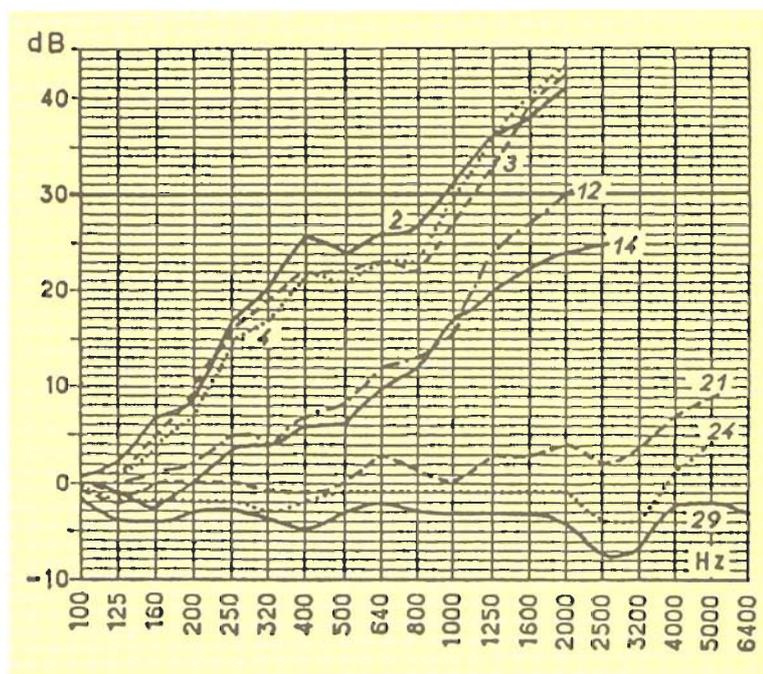


Figura 5 : Ordenadas: indice de mejora del impacto Ln, abscisas: frecuencia Hz

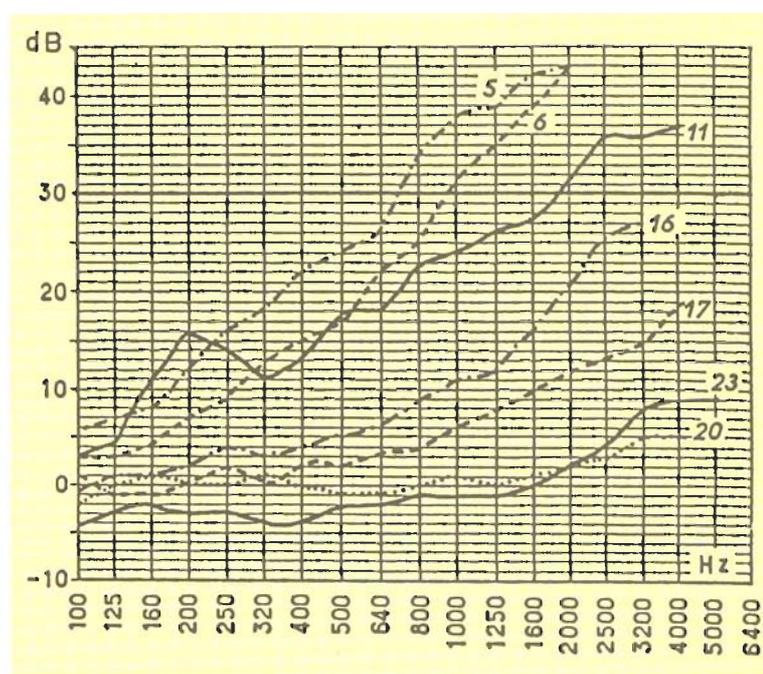


Figura 6 : Ordenadas: indice de mejora del impacto Ln, abscisas: frecuencia Hz

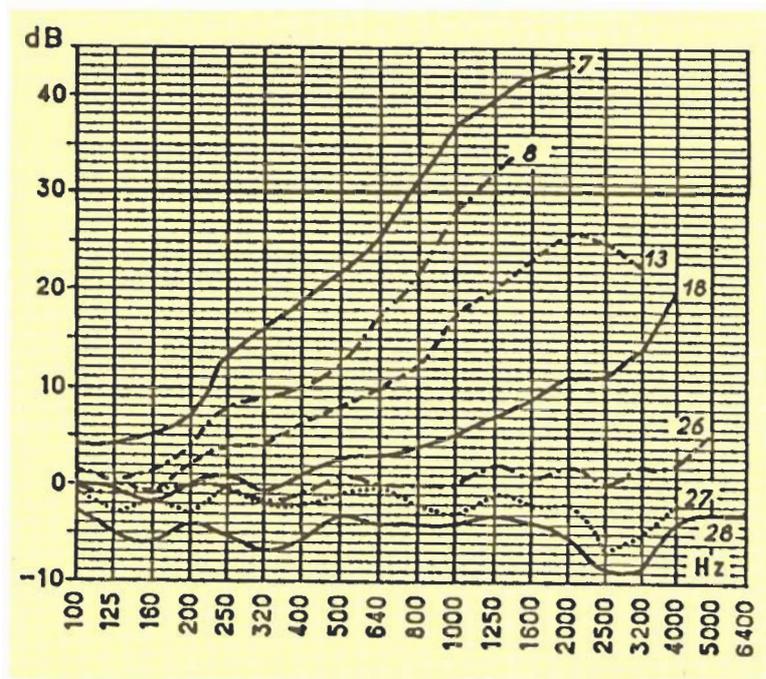


Figura 7 : Ordenadas: índice de mejora del impacto Ln, abscisas: frecuencia Hz

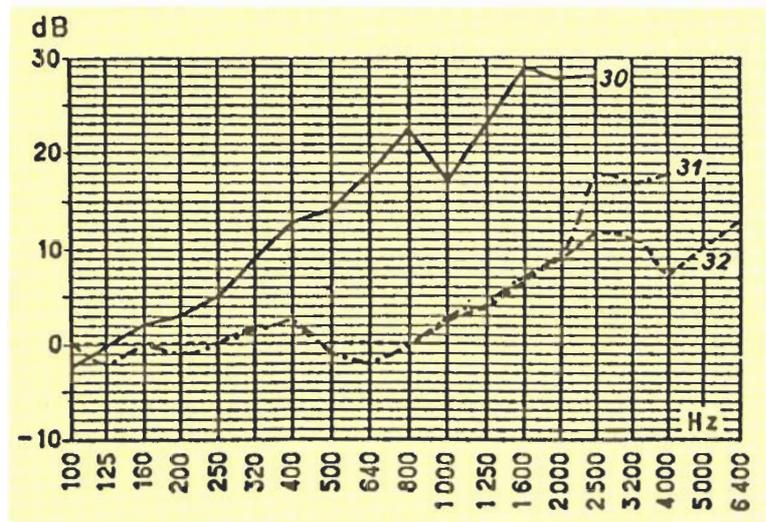


Figura 8 : Ordenadas: índice de mejora del impacto Ln, abscisas: frecuencia Hz

Como resultado obtenemos para los revestimientos ensayados la siguiente clasificación en orden a su mejora, o aislamiento, al ruido de impacto:

#### CATEGORIA Nº1

Indice de mejora del ruido de impacto Ln			
REVESTIMIENTO Nº	Baja frecuencia 100/320 Hz	Frecuencia media 400/1200 Hz	Alta frecuencia 1.6/3.2 KHz
1	9	26	38
2	9	28	40
3	8	25	40
4	7	26	41
5	11	30	42
6	6	24	40
7	8	34	41
8	4	26	34
9	6	27	38
10	4	28	39
11	10	20	32

#### CATEGORIA Nº2

Indice de mejora del ruido de impacto Ln			
REVESTIMIENTO Nº	Baja frecuencia 100/320 Hz	Frecuencia media 400/1200 Hz	Alta frecuencia 1.6/3.2 KHz
12	2	13	28
13	2	14	24
14	1	12	23
15	1	10	22
16	2	8	22
30	3	17	28

#### CATEGORIA Nº3

Indice de mejora del ruido de impacto Ln			
REVESTIMIENTO Nº	Baja frecuencia 100/320 Hz	Frecuencia media 400/1200 Hz	Alta frecuencia 1.6/3.2 KHz
17	0	4	12
18	0	4	11
19	-2	4	12
31	0	2	10
32	0	1	12

#### CATEGORIA Nº4

Indice de mejora del ruido de impacto Ln			
REVESTIMIENTO Nº	Baja frecuencia 100/320 Hz	Frecuencia media 400/1200 Hz	Alta frecuencia 1.6/3.2 KHz
20	0	0	3
21	-1	1	3
22	-1	1	3
23	-3	-2	3
24	-2	-1	-2
25	-1	0	-1
26	-1	0	1
27	-2	-2	-4
28	-5	-4	-5
29	-3	-3	-4

Observemos que los materiales correspondientes a la categoría nº4, formados por superficies duras, apenas introducen mejora alguna del ruido de impacto sobre la losa desnuda, por lo que el nivel de ruido de impacto normalizado en este caso obedecerá a la ecuación (6), o bien a la (7), dada por la norma básica, válida para losas estructurales.

## 2) Método de la losa flotante:

Con objeto de mejorar notablemente el aislamiento del ruido de impacto se utiliza también la solución de construir una losa flotante, separada del forjado por interposición de una capa resiliente que las desolidariza.

Frecuentemente, el material que forma la losa rígida, flotante sobre el material elástico, es la capa de mortero junto con la baldosa, parquet u otro material duro que se pueda fijar como terminación vista del suelo (ver figura 9). El material resiliente se coloca entre la capa de mortero de compresión y el forjado.

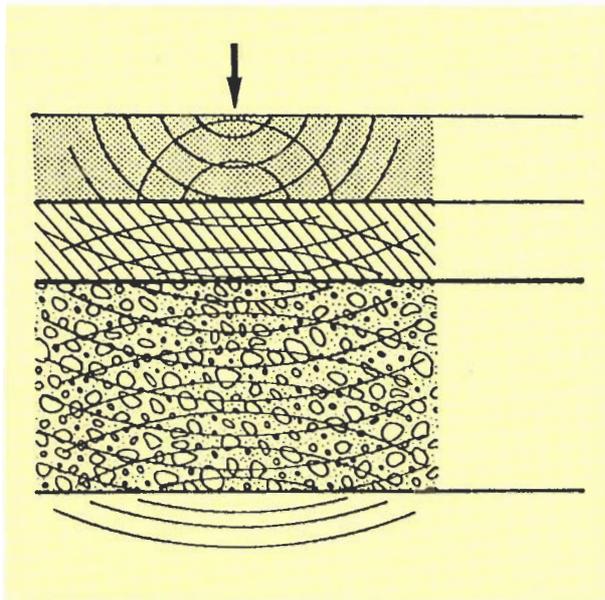


Figura 9. Losa flotante

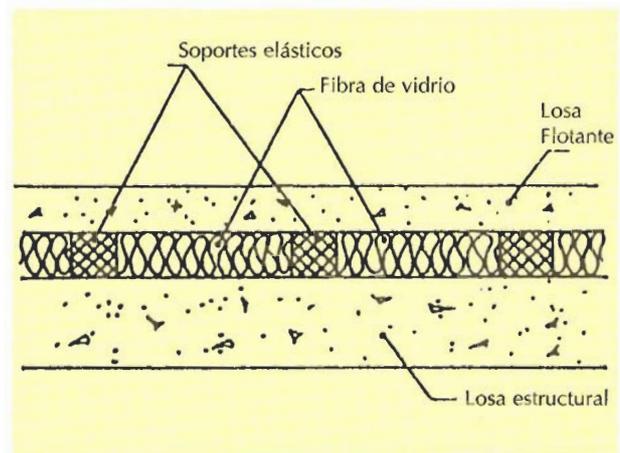


Figura 10. Losa flotante sobre soportes elásticos.

La flotabilidad de la losa puede conseguirse por dos vías:

1. Por interposición de una lámina homogénea elástica debajo de la losa flotante.
2. Por colocación de elementos elásticos individuales repartidos regularmente por todo el área de la losa flotante (ver figura 10).

Para calcular el aislamiento del ruido de impacto obtenido por uso de la solución 1, sigue siendo válida la ecuación (12), donde ahora la frecuencia de resonancia  $f_0$ , que depende de la rigidez dinámica del material elástico por unidad de área,  $s'$ , y de la masa unitaria  $m$  de la losa flotante, vale:

$$(15) \quad f_0 = 1/2 (s'/m)^{1/2}$$

donde:  $s' = E/d_0(1-\delta)$

siendo:  $E$  es el módulo de elasticidad.  
 $d_0$  es el espesor del material elástico sin comprimir.  
 $\delta$  es la deflexión que se produce en el material a causa del peso de la losa.

Y sabiendo que la compresión  $P_n$  de la losa sobre el material elástico es:

$$(16) \quad P_n = F/S = mg$$

resulta que la expresión puede escribirse de la siguiente forma:

$$(17) \quad f_0 = 1/2 (gE/P_n d_0(1-\delta))^{1/2}$$

(g es la aceleración de la gravedad).

A continuación escribimos dos tablas donde indicamos las características elásticas de algunos materiales y sus propiedades que son útiles para su utilización en relación al aislamiento del impacto,[6] .

**TABLA 2: CARACTERISTICAS**

Material	Espesor (cm)	Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Frecuencia resonancia $f_0$ (Hz)
Fieltro	1.8	0.05	0.54	12
	1.6	0.1	1	10
	3.8	0.05	1	11
Fibra de vidrio 4 cm	3.5	0.1	1.6	10
	3.1	0.2	3.2	11
Caucho normal	2.5	0.7	110	37
		3.5	120	18
	7.0	130	14	
Caucho blando	2.5	3.5	31	8
	3.2	1	60	25
	2.2	2	80	25
	1.6	3	160	30
	1.4	4	280	35

**TABLA 3: PROPIEDADES**

Material	Frecuencia de resonancia mínima para 1cm de capa(Hz)	Campo óptimo de de esfuerzo (Kg/m <sup>2</sup> )	Espesor óptimo de la capa de aislamiento de impacto (cm)
Fibra de vidrio	34	300-500	5
Manta de lana de vidrio	21	350-800	2
Panel de lana de vidrio	21	450-2300	2
Fieltro de fibra de vidrio	18	250-800	1.5
Panel de lana de roca	20	1600-5500	1.8
Fieltro de lana de roca	17	350-1000	1.3
Láminas de partículas de corcho	26	200-1000	3

Debido a la gran deformabilidad de los materiales citados en la tabla anterior, es necesario armar la losa flotante para dotarla de rigidez suficiente, además de colocar sobre el material resiliente una capa de madera con una lámina de plástico, con objeto de evitar el contacto del mortero constituyente de la losa flotante con el material elástico, lo que podría ocasionar puentes acústicos.

En la figura 11 se muestra el índice de mejora del impacto  $L_n$  obtenido por interposición de una lámina de polietileno expandido de 3 mm. de espesor entre la capa de compresión y el solado, en un forjado de canto 20 + 3 con bovedilla cerámica.

Este material tiene la ventaja frente a los anteriores, que al ser de muy poco espesor (3 a 10 mm.) y por tanto de poca deformación, no precisa el armado de la losa, constituyendo por tanto una solución económica y bastante efectiva.

Utilizando la técnica de la losa flotante exponemos seguidamente los índices de mejora de distintas soluciones acústicas para el ruido de impacto,[7] :

ELEMENTO	ESPESOR	INDICE DE MEJORA Ln
<b>POLIESTIRENO EXPANDIDO FLEXIBILIZADO</b>	15 mm	18 dB (A)
	20 mm	26 dB (A)
<b>LANA MINERAL</b>	25 mm	25 dB (A)
	30 mm	28 dB (A)
<b>FIELTRO TEXTIL</b>	8 mm	26 dB (A)
	14 mm	28 dB (A)
	23 mm	29 dB (A)

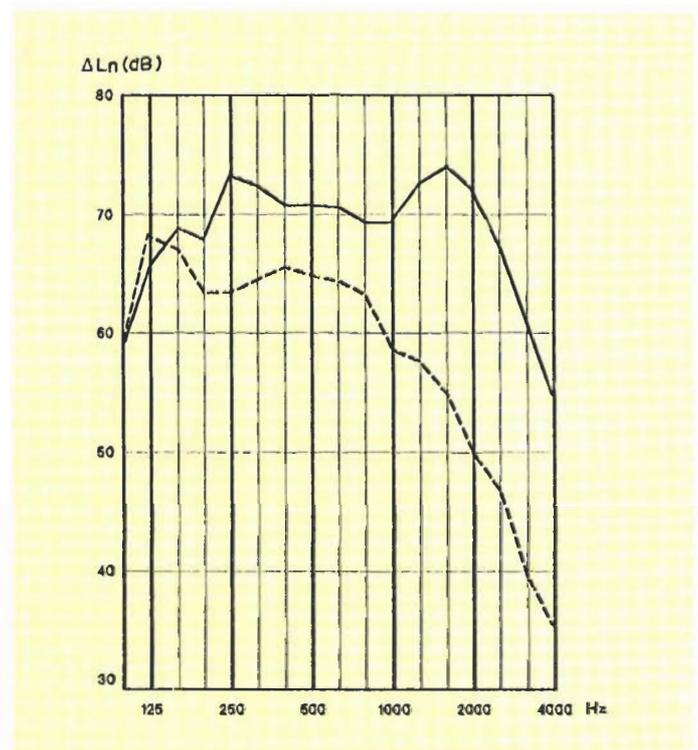


Fig. 11. Nivel Ln antes y después de la colocación del aislante

La vía de solución 2 del problema del impacto por la técnica de la losa flotante, se obtiene mediante la colocación de soportes elásticos entre la losa y la estructura, rellenando los espacios vacíos entre soportes con material poroso de cierta resistencia al paso de flujo de aire, por ejemplo una fibra de vidrio o lana de roca. En este caso el aislamiento al ruido de impacto  $\Delta L_n$  se calcula mediante la siguiente expresión, [3] :

$$(18) \quad \Delta L_n = 10 \log (2.3 C_L h \eta n' \omega^3 / \omega_0^4)$$

donde:  $C_L$  es la velocidad de propagación longitudinal que se calcula mediante la fórmula (2) y que para el hormigón es de 3000 m/s.  
 $h$  es el espesor de la losa flotante en metros.  
 $\eta$  es el factor de amortiguamiento de la losa que para el hormigón vale 0.005.  
 $n'$  es el número de soportes elásticos por unidad de superficie  
 $\omega$  es la pulsación circular:  $\omega = 2\pi f$  siendo  $f$  la frecuencia.  
 $\omega_0$  es la pulsación en la resonancia:  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , siendo  $f_0 = (sn'/m)^{1/2}$ , en la que  $s$  es la rigidez del soporte y  $m$  es la masa unitaria de la losa flotante.

En base a este sistema, se deduce a partir de la ecuación (18):

1. El  $\Delta L_n$  o índice de mejora del impacto  $L_n$ , aumenta con un incremento del factor de amortiguamiento de la losa flotante.
2. Que para obtener un elevado aislamiento del ruido de impacto es preciso que la frecuencia de resonancia  $f_0$  sea baja, lo que implica que los soportes elásticos deben tener una flecha relativamente grande.

En la figura 12 mostramos un ejemplo de la losa de hormigón sobre un tablero de madera donde ha fraguado y todo ello apoyado sobre el forjado estructural, mediante soportes de caucho.

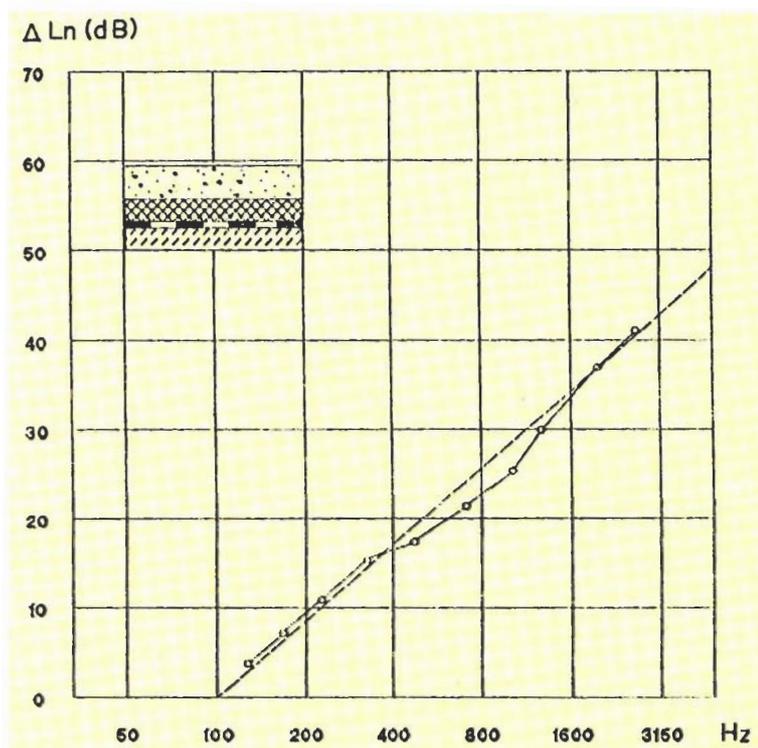


Figura 12. Losa flotante sobre soportes elásticos.

## 5. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DE INTERES

En el tratamiento del aislamiento a ruido de impacto por el sistema de la losa flotante debe tenerse un cuidado especial en los siguientes puntos:

1. El suelo soporte estructural no debe presentar asperezas que puedan deteriorar al material resiliente.
2. Es conveniente que no hayan canalizaciones en el forjado que puedan establecer un puente acústico de éste con la losa flotante. Si necesariamente fuera preciso el cruce de alguna canalización deberá forrarse ésta con un material flexible. (Ver figura 13).
3. Es importante evitar que el mortero blando, que constituye a la losa flotante, penetre en el material resiliente colocado previamente. Debe por tanto interponerse una barrera estanca intermedia que permita además soportar las presiones debidas a la circulación durante el vertido del mortero.
4. El material resiliente debe hacerse sobresalir por los bordes de la losa flotante, de modo que ésta no toque en ningún punto con ninguna pared ni tenga ligazón rígida con la estructura del edificio.
5. La estanqueidad entre la pared horizontal y la banda vertical debe asegurarse con un cubrejuntas.
6. De interesar aumentar el amortiguamiento de la losa de hormigón puede realizarse mezclando en la composición del hormigón algunas resinas sintéticas o materiales similares, como el etilen-vinilo-acetileno.

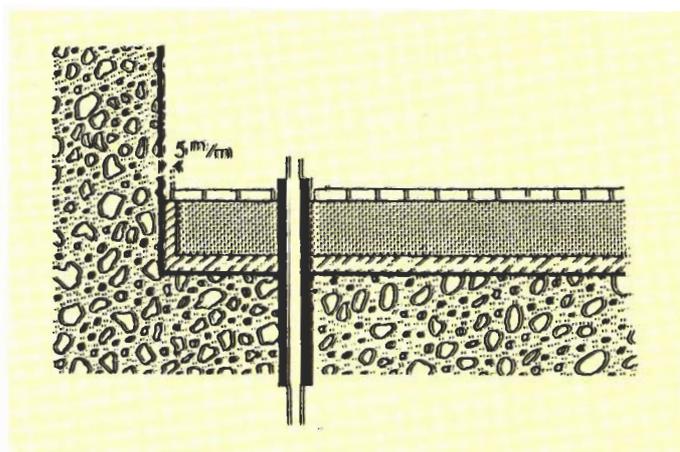


Figura 13. Paso de canalización

## 6. CONCLUSION

En esta comunicación técnica se han esbozado las bases teóricas y prácticas que tratan el tema del aislamiento acústico del ruido de impacto, demostrando que cualquier forjado con masa suficiente cumple el límite de  $L_n \leq 80$  dBA especificado en la norma NBE-CA-88 (independientemente del tipo de bovedilla utilizada y de material duro de revestimiento colocado encima).

No obstante, cuando se supera el límite de  $L_n = 80$  dB(A), y teniendo además en cuenta que posiblemente la Comunidad Europea exigirá el cumplimiento de un  $L_n \approx 72$  dBA o un nivel inferior, resulta entonces prácticamente imprescindible utilizar soluciones de aislamiento complementarias.

Por ello, se han emitido un conjunto de medidas correctoras que mejoran notablemente el aislamiento de ruido de impacto, con objeto de que el Arquitecto o el Técnico especialista pueda conocerlas y seleccionar la más adecuada.

Por último se han dado algunas recomendaciones constructivas de tipo práctico, que deben seguirse rigurosamente si se desea conseguir un resultado satisfactorio.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] I.L. VER (1970) JASA Vol. 50 nº6
- [2] M.HECKL-E.J.RATHE (1963) JASA Vol. 35 nº11
- [3] I.L.VER (1971) JASA Vol. 50 nº4
- [4] M.S.AUZOU (1961) Ann. Inst. Tech. Bat. et Trav. Publics nº167
- [5] L.CREMER-J.GILG (1970) Acústica Vol. 23
- [6] W.FURRER (1964) Room and Building Acoustics and Noise Abatement.
- [7] Soluciones del aislamiento acústico para la construcción.ANDIMA