

## Acústica



Esta rama de la física, denominada acústica, se ocupa de estudiar el sonido, otra de las formas de manifestarse la energía, en directa relación con el hábitat humano.

En ese sentido hay que reconocer que si no se trata de un proyecto directamente vinculado con las expresiones acústicas, tal como podría serlo un teatro o un auditorio etc., en general el aspecto del tratamiento acústico merece menor atención que otros temas como los relativos al campo hidrófugo o térmico.

Sin embargo, la contaminación sonora que padece el hombre de nuestro tiempo, especialmente en las grandes ciudades, hace que el cuidado del manejo del sonido o del ruido, que no es más que un sonido en general poco agradable, requieran un estudio serio y responsable en el momento de diseñar un edificio.

Hemos hablado de tratamiento acústico, pues como se verá en este capítulo, no solo se debe analizar el control de transmisión del sonido a través del aire y entre diversos espacios, sino que existen diversos fenómenos adicionales, que también participan de las variables que un arquitecto tiene que manejar en su diseño del hábitat.

Vayamos entonces, como primer paso, a descubrir qué es el sonido y qué características presenta como energía con la cual convive el ser humano.

### ***El sonido como un movimiento oscilatorio armónico***

El ejemplo prototípico de un movimiento oscilatorio armónico harlo conocido es el del péndulo, que se esquematiza en la figura 4.1.

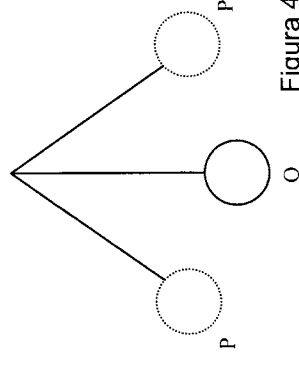


Figura 4.1

Si se tiene un péndulo en reposo, tal como en la posición "O", y se lo aparta de esa posición, trasladándolo a la posición "P", se observará que se genera un movimiento de vaivén, que es un arco de circunferencia con centro en el punto de suspensión, que hace que sucesivamente vaya ocupando las posiciones P, O, P' en forma repetida.

El movimiento oscilatorio se produce como resultado de la fuerza de gravedad aplicada al cuerpo del péndulo. Este cumple un **movimiento oscilatorio armónico**. Movimiento en cuanto hay una partícula material que se mueve, oscilatorio por cuanto se repite cíclicamente el mismo movimiento y armónico porque se produce igual cantidad de veces en una unidad de tiempo.

El péndulo recorre el camino PP' alternativamente en uno y otro sentido. Si "O" es el punto medio de ese recorrido, se llama **amplitud** del movimiento vibratorio, a la distancia  $OP = OP'$  o sea a la mayor separación del punto de su posición de equilibrio.

Se dice que el péndulo ha efectuado una vibración, cuando ha recorrido el camino PP' y P'P (ida y vuelta); y se da el nombre de **frecuencia** al número de vibraciones que se efectúan en un segundo. Por su parte se llama **período** del movimiento oscilatorio, al tiempo que tarda el mismo en efectuar una vibración u oscilación completa.

La frecuencia y el período de la oscilación de un péndulo dependen del largo de la barra que une su cuerpo con el punto de sujeción. Si la longitud aumenta, se observa que la frecuencia disminuye, o sea, las vibraciones son menos rápidas y el período es mayor.

Veamos como funciona equivalentemente el fenómeno del sonido, cuando la partícula móvil es una molécula de aire, o de otro material cualquiera y su oscilación está producida por una fuente emisora de ruido.

Todo medio natural (sólido, líquido o gaseoso) es en realidad una agrupación de partículas vinculadas elásticamente y en ese medio, cada una de esas partículas tiene la posibilidad de efectuar ciertos desplazamientos en torno a su posición media.

Por lo tanto, si se provoca un estado oscilatorio en una de las partículas del medio elástico, dicho estado oscilatorio se transmite con iguales características y en forma ordenada al resto del medio circundante.

Es en esas condiciones que se genera en el medio considerado un estado oscilatorio, que se propaga a partir del punto de perturbación original, y con una velocidad de transmisión perfectamente determinada.

Un ejemplo fácilmente verificable y que todo observador habrá visto en su vida, es el que se produce al arrojar una piedra en una superficie de agua quieta, como en un estanque. Se puede observar en ese caso, que se producen una serie de ondas en la superficie, a partir del punto de

perturbación original, que presentan la forma de frentes de onda concéntricos, y que se propagan radialmente en todas direcciones.

Imaginemos que ese mismo fenómeno se produce en un espacio tridimensional, cual es el caso del aire. Tendremos allí una serie de esferas virtuales que se dilatan y se contraen oscilatoriamente por variaciones alternadas, consecuencia de una fuente que les imprimió ese movimiento original.

Esa fuente resulta en nuestro caso de estudio, el emisor de sonido, que provocará en su entorno y en las partículas del aire, en todas direcciones, radialmente y bajo la forma de frentes de ondas esféricas concéntricas, un estado oscilatorio armónico.

Para diferenciar ambos ejemplos, digamos que en el caso de la superficie del agua, las oscilaciones son transversales respecto a las direcciones radiales de propagación, mientras que en el espacio tridimensional, en el caso del aire, son coincidentes con la dirección de propagación. En el primer caso se dice que se trata de oscilaciones transversales y en el segundo, de oscilaciones longitudinales. De este tipo son las ondas sonoras.

Resumiendo podemos señalar que las ondas sonoras son:



- **Mecánicas:** mueven elementos materiales (partículas de aire, agua, etc.), y dada esa característica, constituyen una forma de transmisión de energía que no puede darse en el vacío.
- **Tridimensionales:** Se propagan en todas direcciones y sentidos en forma esférica a partir de la fuente emisora.
- **Longitudinales:** Son coincidentes la dirección del movimiento de las partículas y la dirección de propagación de la onda.

### Parámetros físicos de la oscilación y la propagación

Como en todo movimiento oscilatorio armónico, se tienen los siguientes parámetros fundamentales:

**T - período de la oscilación:**

es el tiempo que dura una oscilación completa y su unidad es el **segundo**.

**f - frecuencia:** es el número de ciclos, oscilaciones o vibraciones en la unidad de tiempo y su unidad es el **Hertz**<sup>12</sup> o **ciclos/seg**.

<sup>12</sup> Herz, Heinrich, (1857-1894), físico alemán, profesor de física en Bonn. Se especializó en estudios sobre la electricidad y la teoría ondulatoria, estableciendo importantes relaciones entre los fenómenos electromagnéticos y ópticos.

Se puede inferir la siguiente relación entre los dos parámetros anteriores  $f = \frac{1}{T}$  siendo la unidad correspondiente a la frecuencia  $\frac{1}{\text{seg}}$  o Hertz

#### A - amplitud de la oscilación:

es la máxima elongación o apartamiento de las partículas respecto de su posición media y por causa de la oscilación introducida. Se vincula a la intensidad, concepto que desarrollaremos unos párrafos más adelante.

#### $\lambda$ - longitud de onda:

es el espacio recorrido por la propagación, a velocidad  $v$  durante un tiempo  $T$  que corresponde al período. Su unidad está dada en medidas de longitud (**m; cm; mm**).

A partir de estos parámetros, podemos caracterizar otros conceptos en la propagación del estado oscilatorio, tales como:

#### $v$ - velocidad de propagación:

es la velocidad con que el estado oscilatorio va alcanzando los diversos puntos respecto del origen de la perturbación.

De acuerdo a la definición de  $\lambda$  y al concepto general de velocidad (espacio con relación al tiempo) se tiene:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{por lo tanto, se deduce} \quad v = \lambda \cdot f$$

La velocidad de propagación de las oscilaciones acústicas en el aire, a presión normal y a la temperatura ambiente, es:

$$v = 334 \text{ m/seg.}$$

Ese mismo valor efectuando un cambio de unidades, equivale a 1224 Km/h, velocidad que incluso tiene un nombre particular **Mach1**, habiendo una gran cantidad de maquinarias creadas por el hombre que la superan. Uno de los ejemplos más conocidos es el avión Concorde, que era capaz de volar al doble de esa rapidez.

En el agua, la velocidad del sonido es aún mayor y en los sólidos todavía más grande. Podemos decir que, en general, la velocidad aumenta con la densidad del medio, pero esta regla tiene excepciones, fundamentalmente en los materiales elásticos.

El siguiente listado, detalla algunos valores standard, referidos a materiales vinculados a la construcción:

| Medio  | Velocidad  |
|--------|------------|
| aire   | 334 m/seg  |
| agua   | 1435 m/seg |
| acero  | 5560 m/seg |
| caucho | ≈50 m/seg  |

#### $W_i$ - potencia:

la amplitud  $A$  de las oscilaciones depende de la potencia  $W_i$ , empleada en producir la perturbación inicial. Esta potencia, al igual que en otras formas de energía, tiene como unidad el Watt (W).

Dicha potencia se distribuye cada vez en frentes de onda sucesivamente crecientes a medida que la perturbación se propaga en el medio.

Por lo tanto, para una dirección de propagación considerada, la potencia por unidad de superficie, cuya unidad es  $\left[ \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \right]$ , va decreciendo a partir de la potencia inicial  $W_i$  en el origen. A medida que un sujeto se aleje de una fuente emisora de sonido, dicho sonido se hará para su percepción auditiva, cada vez más débil.

La potencia por unidad de superficie en consecuencia, resultará inversamente proporcional a la superficie esférica del frente de onda, la cual es proporcional al cuadrado del radio (por aquello de que la superficie de una esfera es igual a  $S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ ). En consecuencia la expresión matemática que relaciona la potencia sonora con el frente de onda es:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Expresado en palabras, puede decirse que para una dirección de propagación determinada, la potencia por unidad de superficie  $\left[ \frac{W_{\text{att}}}{\text{cm}^2} \right]$  decrece en proporción inversa con el cuadrado de la distancia al origen de la perturbación.

## - timbre

Entre dos sonidos de igual intensidad e igual frecuencia, el oído puede distinguir cierta diferencia, sobre todo si proviene de cuerpos que están en distintas condiciones. Una nota emitida por un piano o un violín aún con la misma altura, presentan entre ellos cierta diferencia, lo que se expresa diciendo que tienen distinto timbre.

La vibración principal debida al tipo de cuerda, va acompañada de otras vibraciones (proviene del aire de la caja, del entorno del instrumento, etc.). Por lo tanto el "timbre" de un sonido depende de las oscilaciones secundarias que acompañan a la oscilación principal, que es la de mayor intensidad y menor frecuencia.

La sensación sonora de "timbre" se corresponde con la forma de onda de la oscilación. Las diferencias entre tipo de onda y onda, en consecuencia, son las que permiten diferenciar un sonido determinado, surgido de una cierta fuente sonora, de igual sonido surgido de otra fuente. Y ello a pesar de que ambos sonidos posean igual frecuencia e intensidad.

## Oscilaciones de presión - Intensidad y presión acústica

Para el caso de medios fluidos, como en el caso del aire, las oscilaciones longitudinales de las partículas se traducen, para cada dirección de propagación, en una serie alternada de condensaciones y descondensaciones de partículas.

Lo anterior da por resultado en el medio fluido, una serie alternada de compresiones y descompresiones que se propagan, es decir un estado oscilatorio de los valores de la presión media en el fluido.

Por lo tanto, la propagación de las ondas acústicas en el aire pueden considerarse como una propagación de oscilaciones del valor de la presión normal del aire.

La amplitud de las oscilaciones de presión se expresa en las unidades [bar], milibar [mbar] o [ $\mu$  bar] (microbar)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} = 10^6 \frac{\text{din}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \text{ mbar} = 10^{-3} \text{ bar} = 10^{-2} \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} = 10^{-3} \frac{\text{din}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \mu \text{ bar} = 10^{-6} \text{ bar} = 10^{-1} \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{din}}{\text{cm}^2}$$

Recordemos como valor referencial, que la presión atmosférica normal es de 1013 milibares, lo que equivale a 760 mm de columna de mercurio (Hg), 10,33 m de columna de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), y a aproximadamente a  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$

## I - Intensidad del sonido:

Al hablar de la amplitud como parámetro del sonido, dijimos que está directamente relacionado con la intensidad  $I$  de la oscilación acústica. Ampliemos ahora esa idea, señalando que definimos la intensidad  $I$ , a una distancia dada del origen de la perturbación, como la potencia por unidad de área, a dicha distancia. La unidad de intensidad, resulta entonces:

$$\text{INTENSIDAD ACUSTICA} \quad \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}$$

La intensidad de la fuente sonora, en consecuencia puede definirse como la energía (sonora), por unidad de tiempo y por unidad de superficie:

$$I = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} \quad \left( \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \right)$$

la menor intensidad percibida por el oído humano es  $I_0 = 10^{-16} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$

Por su parte la presión acústica  $p$  para una distancia dada del origen de la perturbación depende, para el medio considerado, de la intensidad  $I$ , por lo que suele tomarse como indicación de dicha intensidad:

$$\text{PRESION ACUSTICA} \quad [\mu \text{ bar}] \quad \text{ó} \quad \frac{\text{din}}{\text{cm}^2}$$

## Representaciones gráficas de las oscilaciones

Una oscilación armónica se puede representar por una gráfica sinusoidal que indica los valores de las elongaciones o desplazamientos que sufren las partículas perturbadas en el medio, en función del tiempo.

Los cuatro parámetros fundamentales que son: la longitud de onda ( $\lambda$ ), la amplitud ( $A$ ), la frecuencia ( $f$ ) y el período ( $T$ ), relativos al sonido y que se han ido enunciado previamente, pueden visualizarse en el siguiente gráfico 4.2:

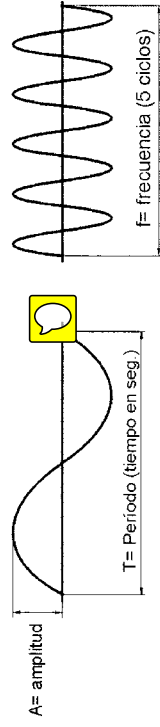
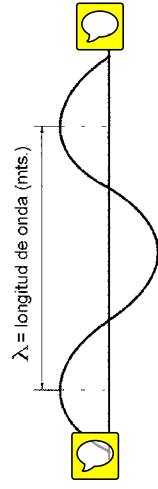


Figura 4.2

Oscilaciones de igual amplitud, pueden tener distinta longitud de onda (o frecuencia), lo que se grafica en la figura 4.3.

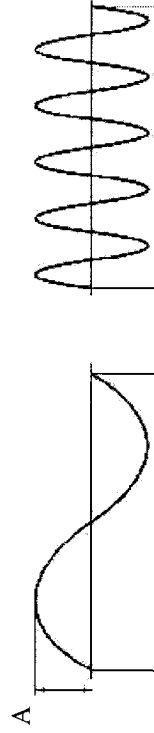


Figura 4.3

Oscilaciones de igual longitud de onda (o frecuencia), pueden tener distinta amplitud, lo que se grafica en la figura 4.4.

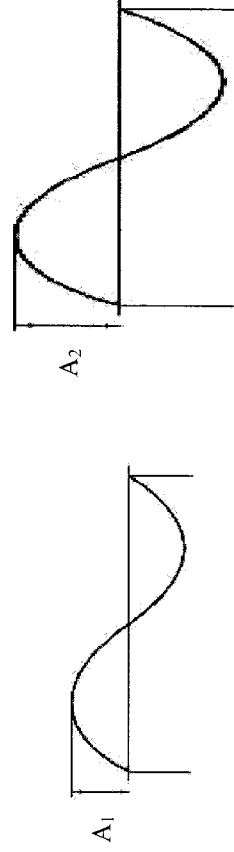


Figura 4.4

Pueden producirse oscilaciones compuestas, como resultado de la adición de varias oscilaciones armónicas simultáneas y la representación ya no es puramente sinusoidal. Se pueden tener entonces oscilaciones de diversa "forma", con una amplitud y longitud de onda determinada.

Este caso se grafica en la figura 4.5.

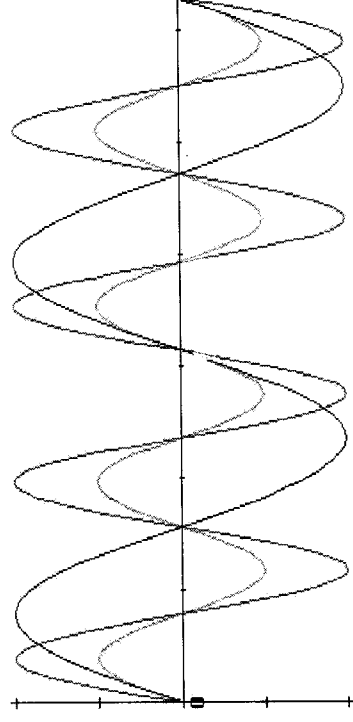


Figura 4.5

En los sonidos comunes, ni siquiera resultan sinusoides perfectas, sino con irregularidades en su onda, aunque sí es verificable que para cada sonido principal existen otros que lo acompañan y se denominan armónicos. Estos últimos cumplen la condición de ser múltiplos o submúltiplos del sonido principal en su frecuencia (ver figura 4.6).

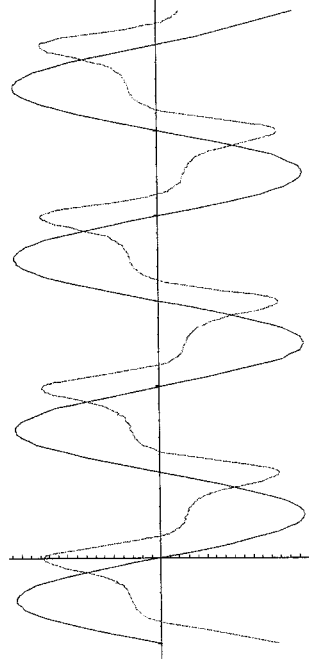


Figura 4.6

### Oscilaciones Acústicas - Caracteres físicos y subjetivos

Las oscilaciones mecánicas de las partículas de un medio elástico, cuando poseen las características y los rangos capaces de excitar el mecanismo auditivo provocando sensaciones sonoras, se llaman sonidos.

Las oscilaciones mecánicas que ordinariamente actúan sobre el tímpano del oído son oscilaciones de presión en el aire que se propagan según las características ya estudiadas.

Veamos aunque sea simplídicamente cómo funciona el oído humano. Este aparato sensitivo del hombre puede ser considerado como obra maestra de ingeniería, pues de todos los órganos del cuerpo, pocos realizan tanto en tan poco espacio (ver figura 4.7).

Desde el punto de vista anatómico, pueden distinguirse tres partes fundamentales, de las cuales las dos primeras son mecánicas y la última nerviosa.

La primera (**oído externo**) va desde el pabellón de la oreja hasta el tímpano al final del conducto auditivo.

Este transmite las vibraciones provenientes del exterior accionando sobre tres huesillos (martillo, yunque y estribo), ubicados en la segunda parte (**oído medio**), actuando como amplificadores del sonido.

Por último el estribo presiona sobre la ventana oval del caracol (**oído interno**), y en esta tercera parte, que está llena de líquido, las vibraciones se transmiten hidráulicamente.

El caracol es menor que un dedo meñique y desenrollado tiene una longitud de aproximadamente 37 mm. Dentro del mismo se halla el órgano de Corti que es el más importante mecanismo auditivo.

El órgano de Corti transforma los impulsos hidráulicos en impulsos electroquímicos que, transmitidos por el nervio auditivo al cerebro son decodificados e interpretados como resultado de miles de filamentos que se flexionan ante las vibraciones sonoras.

Cuando una vibración sonora supera cierta intensidad, estos filamentos pierden elasticidad y se "quiebran", perdiendo su aptitud funcional, lo cual deriva hacia una pérdida de la capacidad auditiva.

### Esquema del aparato auditivo

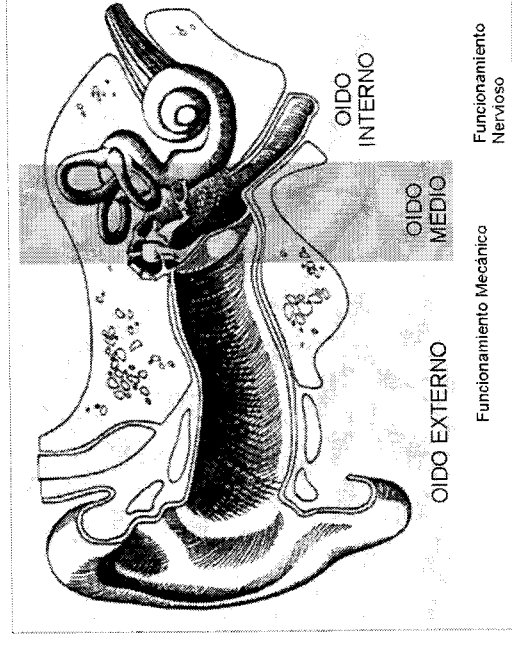


Figura 4.7

Las oscilaciones de presión, para ser capaces de provocar sensaciones sonoras en el ser humano, deben tener frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20.000 Hz (frecuencias límites o extremas de la gama audible).

Las diversas características físicas de la oscilación (amplitud, frecuencia y forma de onda) se corresponden, a diversos tipos de sensaciones acústicas diferentes.

La amplitud de la oscilación, que corresponde a la potencia empleada en la perturbación o a la magnitud de las variaciones de presión, corresponde a la sensación de "intensidad del sonido".

El sonido se percibe como más fuerte o más débil según la amplitud de la oscilación sea mayor o menor.

La frecuencia (o longitud de onda) de la oscilación corresponde a la sensación de "tono" o de "altura" del sonido. Cuanto mayor es la frecuencia, más alto es el tono (tono agudo). Cuanto menor es la frecuencia más bajo es el tono (tono grave)

### Nivel de intensidad del sonido

Si bien hemos descrito al sistema auditivo del ser humano como de gran eficiencia, no podemos dejar de reconocer que hay muchas otras especies vivas que lo superan largamente en cuanto a poseer un oído mucho más sofisticado.

Nuestro más fiel amigo, el perro, es capaz de escuchar sonidos hasta los 40.000 Hz, es decir el doble de los valores superiores que nosotros los humanos percibimos. Ni que hablar de los murciélagos, que registran hasta los 300.000 Hz, usando esa aptitud para desplazarse en vuelo y para obtener su comida (cazando insectos por ejemplo).

En lo que respecta a los niveles de intensidad, también hay especies que registran sonidos que el hombre no logra detectar.

Pero como nuestros estudios y nuestros clientes pertenecen en general al género humano, creemos que resulta útil referirse a la escala de sonidos o ruidos que debemos considerar en nuestros diseños, ya sea para acentuarlos, aislarlos, absorberlos, etc., es decir más genéricamente, para lograr un adecuado tratamiento acústico del hecho constructivo.

Por ello, al referirnos a **nivel de intensidad**, en vez de a *intensidad pura*, lo que hacemos es establecer una escala que es válida solamente para el hombre. Con prescindencia del hecho de que haya sonidos por debajo de los mínimos (infrasonidos como los de los terremotos) y por encima de los altos (ultrasonidos que a veces se usan en mecanismos diversos, como por ejemplo los controles remotos), pero que no son audibles con nuestro sistema auditivo.

La unidad que se establece para esta escala de nivel de intensidad es el decibelio [ dB ], ( 1 Bel = 10 dB ), y se lo puede definir como la diferencia entre dos niveles sonoros, o como la mínima diferencia entre dos presiones sonoras distintas, audibles por un oído humano joven.

La referencia a la juventud es por cuanto sólo un 10 % de la población puede oír un sonido de 0 dB , que es el piso de la escala, cualidad que se pierde por patologías o por el simple paso del tiempo.

El oído humano tiene, como ya hemos dicho, un umbral de audición de

$I_0 = 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$  y el sonido más fuerte es de una intensidad de:

$$I_{MAX} = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$$

La relación entre la escala en decibels y la intensidad del sonido se establece por la fórmula:

$$dB = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (*)$$

Por lo tanto:

$$I_0 = 10^{-16} \frac{W}{cm^2} \quad \text{equivale a } 0 \text{ dB}$$

Y la intensidad máxima, calculada con la fórmula anterior (\*), referida a la intensidad mínima audible, resulta:

$$dB = 10 \cdot \log \frac{10^{-4} \frac{watt}{cm^2}}{10^{-16} \frac{watt}{cm^2}} = 10 \cdot \log 10^{12} \quad \text{lo cual equivale a } 120 \text{ dB}$$

y para despejar las intensidades, en base a la definición de logaritmo, resulta :

$$dB = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad \frac{dB}{10} = \log \frac{I}{I_0} \quad 10^{\frac{dB}{10}} = \frac{I}{I_0}$$

Operando logarítmicamente con valores intermedios de intensidad, se pueden hallar sus equivalentes en dB.

En el rango de la escala de decibels para el oído humano, que como señalamos se extiende de 0 a 120 dB, podemos caracterizar tres valores significativos tales como:

0 dB valor umbral mínimo audible  
80 dB sonido peligroso  
120 dB valor máximo que produce deterioro del oído

Por encima de este último valor la sensación sonora comienza a transformarse en dolor y la destrucción del aparato auditivo se produce en corto tiempo. Pero también sonidos de alto nivel de intensidad, si se reciben durante largos períodos, conducen inevitablemente a la sordera.

En el tema de seguridad en la construcción, uno de los ítems que se vinculan a este tipo de patologías es el uso de los martillos neumáticos, que lamentablemente muchas veces es dable observar que se operan por personas que no poseen protección en los oídos. Veamos algunos valores corrientes de nivel de intensidad del sonido, en las siguientes tablas, donde se indican algunos sonidos comunes con su estimación subjetiva de intensidad, y se establece una relación de comparación con el nivel en dB correspondiente a un tono de 1000 Hz:

| Fuente Sonora                                                              | Estimación Subjetiva | Nivel Comparable (a 1000 Hz) |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Mínimo sonido perceptible                                                  | UMBRAL               | 0 dB                         |
| Murmullo de hojas<br>Tic - tac de un reloj<br>Susurros                     | DEBIL                | 20 dB                        |
| Conversación normal<br>Radio funcionando moderamente                       | NORMAL               | 40 dB                        |
| Conversación en voz alta.<br>Automóvil no ruidoso                          | FUERTE               | 60 dB                        |
| Gritos<br>Trenes<br>Talleres metalúrgicos<br>Automóvil ruidoso             | MUY FUERTE           | 80 dB                        |
| Remachadora<br>Taller de calderería y forja<br>Pleno de orquesta sinfónica | FORTÍSIMO            | 100 dB                       |
| Motor de reacción a 5 m de distancia                                       | INTOLERABLE          | 120 dB                       |

| EFECTOS DEL RUIDO SOBRE EL APARATO CIRCULATORIO |                                    |                          |  |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--|
| Intensidad de Ruido (en dB)                     | Frecuencia cardíaca (pulsac./min.) | Tensión arterial (mm Hg) |  |
| 65                                              | 76                                 | 130/80                   |  |
| 85                                              | 80                                 | 135/85                   |  |
| 95                                              | 85                                 | 145/90                   |  |

Fuente: CIMARA-ADEMP

| NIVELES DE RUIDO EN LAS CALLES DE BUENOS AIRES |                |                                |                               |  |
|------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| <i>Sitio de la medición</i>                    | <i>Horario</i> | <i>Niveles máximos (en dB)</i> | <i>Nivel promedio (en dB)</i> |  |
| Av. Córdoba y Florida                          | 10 - 10.30     | 106                            | 79                            |  |
| Av. Las Heras y Pueyrredón                     | 11 - 11.30     | 113                            | 87                            |  |
| Sarmiento y Libertad                           | 11 - 11.30     | 108                            | 83                            |  |
| Av. Corrientes y Cerrito                       | 16 - 16.30     | 104                            | 81                            |  |
| Suipacha y Paraguay                            | 17 - 17.30     | 106                            | 81                            |  |
|                                                |                |                                |                               |  |

|                                 |            |     |    |
|---------------------------------|------------|-----|----|
| Av. Callao<br>y<br>Av. Santa Fe | 18 - 18.30 | 108 | 82 |
| Lavalle<br>y<br>Paraná          | 18 - 18.30 | 106 | 80 |

Fuente: ADEMP- CIMARA

| EFECTOS DEL RUIDO SOBRE EL RENDIMIENTO LABORAL |                      |                                 |  |
|------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|
| Intensidad de ruido ( en dB)                   | Duración de la Tarea | Errores cometidos (en los Test) |  |
| 65                                             | 20'                  | 6                               |  |
| 85                                             | 24' (+20%)           | 9 (+50%)                        |  |
| 95                                             | 29' (+45%)           | 13 (+del100%)                   |  |

Fuente: ADEMP- CIMARA

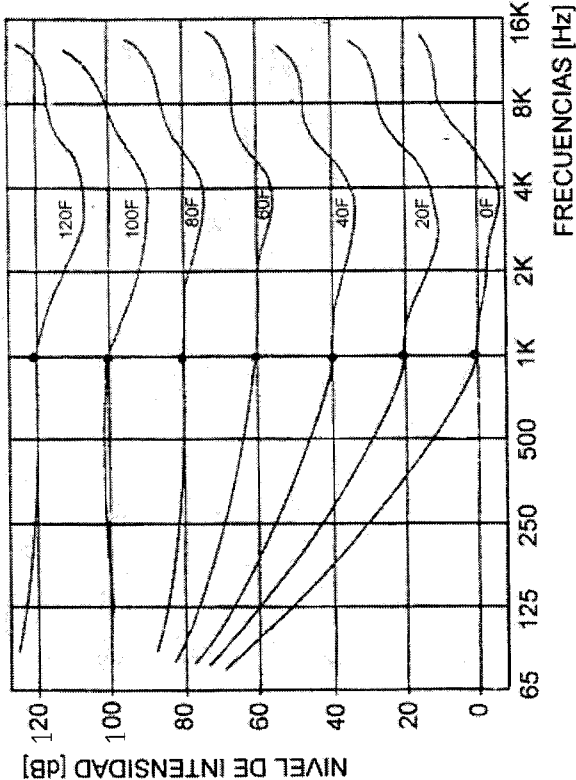
**Fuerza sonora de tonos puros - La unidad Fon**

En el primer cuadro anterior, se hizo la salvedad de que se establecía una comparación entre un sonido determinado y su nivel de intensidad a una frecuencia referencial.  
Y ello es, por cuanto la sensibilidad del oído no es la misma para las diversas frecuencias de la oscilación (tonos graves, medios o agudos).  
En consecuencia el umbral de audibilidad antes considerado (correspondiente a una frecuencia de 1000 Hz) no es el mismo para frecuencias inferiores o superiores.

Esto significa que cuando se quiere considerar la respuesta del oído a tonos puros, con frecuencias discretas definidas, la unidad decibel no es apropiada más que para 1000 Hz.

Para una valoración del nivel de **fuerza sonora** de una sensación de tonos puros, con cualquier frecuencia, se utiliza la unidad **Fon**, estableciéndose experimentalmente curvas de relación con los niveles de intensidad en dB que se correspondan a una frecuencia de 1000 Hz.

Dichas curvas se conocen como "Diagrama de Fletcher y Munson"



En el mismo se indican los niveles de fuerza sonora en Fones.

Ejemplo:

NIVEL DE INTENSIDAD = 60 dB  
frecuencia f = 125 Hz      Nivel de fuerzas : 20 Fones

### Gráfico de nivel de intensidad

En este gráfico, que puede verse a continuación de la enunciación de la Ley de masa, aparecerán los siguientes parámetros:

$R_i$  = Valor de resistencia aérea acústica en db (para sonidos sólo en el aire)

$\sigma$  Densidad superficial

$$\sigma = \text{Peso específico} \times \text{espesor} = \gamma \cdot e \quad \sigma \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m} = \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \right)$$

$f$  = frecuencia del sonido en Hz

### Ley de masa

Esta ley dice que cuanto mayor es la masa de un material por unidad de volumen aparente, mayor es su capacidad de aislación. La idea de que un material posea mayor masa relacionada con su volumen, se correlaciona con poseer mayor densidad y ser poco poroso.

Veamos un ejemplo. ¿Qué capacidad de aislación tiene una pared de ladrillos comunes de 0.30 m de espesor?

Recordemos que un ladrillo pesa  $\approx 1,5$  a 2 Kg. y que el peso específico promedio de la mampostería es:

$$\gamma_{\text{mamp.}} \approx 1600 \text{ Kg/m}^3$$

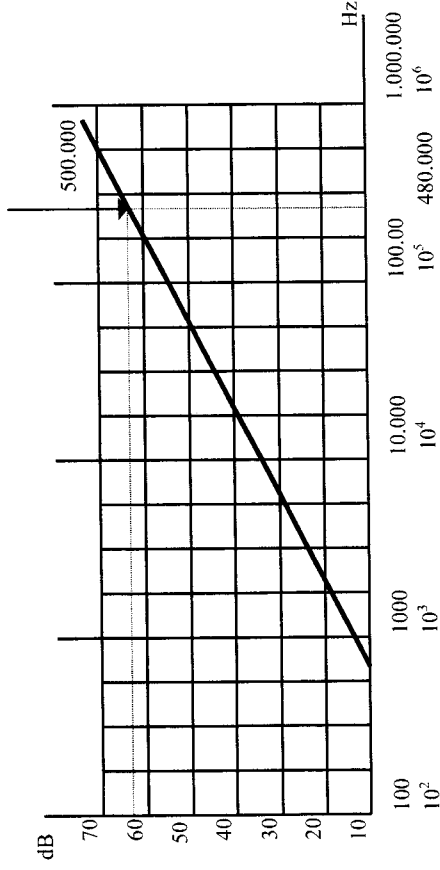
Establezcamos el cálculo para una frecuencia de 1000 Hz, y calculemos la densidad superficial  $\sigma$  en ( $\text{Kg/m}^2$ ), que es el peso por  $\text{m}^2$  de un determinado material.

Para determinar esa densidad por unidad de superficie, siguiendo la fórmula antes enunciada, se multiplica el peso específico  $\gamma$  del material, por su espesor  $e$ , resultando la unidad de  $\sigma$ .

$$\begin{aligned} \sigma &: 1600 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0.30 \text{ m} = 480 \text{ Kg/m}^2 \\ f. \sigma &= 1000 \text{ Hz} \cdot 480 \text{ Kg/m}^2 = 480.000 \text{ Kg. Hz/ m}^2 \end{aligned}$$

Con este último valor se entra en el eje horizontal de la gráfica correspondiente a la curva de ley de masas y se obtiene la aislación equivalente en decibels en el eje vertical.

### Curva de la Ley de masa



Resumiendo el uso del gráfico correspondiente a la ley de masas, se calcula el producto **frecuencia por densidad superficial** [ $f \cdot \sigma$  ( $\text{Hz} \cdot \text{Kg/m}^2$ )] y con ese valor ubicado en el eje de las abscisas se levanta la vertical y se obtiene su equivalente de aislación en **decibels** en el eje de las ordenadas.

Como puede observarse en la gráfica, a medida que crece el valor de la frecuencia, nos desplazamos a la derecha de las abscisas y por ser la "curva" creciente, resulta un mayor valor de aislación.

Ello nos dice que a mayor frecuencia, los sonidos son más fáciles de aislar. En otras palabras, son más fáciles de aislar los sonidos agudos (alta frecuencia), que los sonidos graves (baja frecuencia).

Se aclara que aunque la gráfica muestra una recta como función entre los parámetros considerados, nos referimos a ella como una "curva", ya que la escala del eje horizontal es exponencial.

Si se tomaran ambas escalas en forma lineal y con igual unidad, lo que haría el gráfico inadecuado por las proporciones, la función representada sería efectivamente curvilínea.

### Reducción sonora por ley de masa

También es aplicable la fórmula que se enuncia a continuación, y que se relaciona con el mismo concepto de la ley de masa, es decir la propiedad de los materiales de alta densidad, para funcionar como aislantes del

sonido. En este caso, los resultados experimentales con distintos materiales que separan un semiespacio de otro, indican que la reducción sonora que se obtiene en el ámbito contiguo, respecto del sonido original, será (ver figura 4.8):

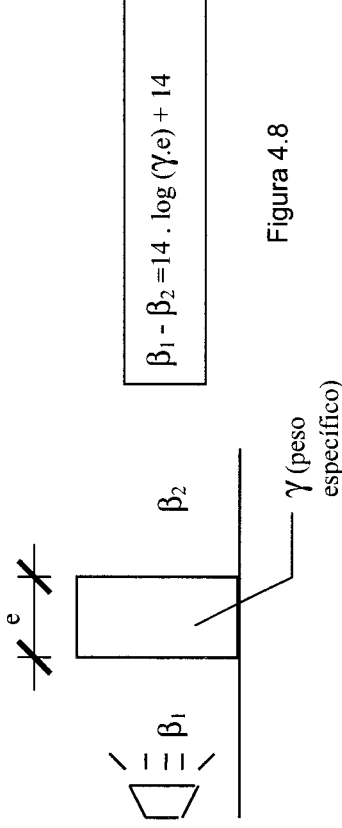


Figura 4.8

Donde aparecen los siguientes parámetros:

$\beta_1$  = sonido emitido en el local que posee la fuente emisora en db

$\beta_2$  = sonido que se percibe en el local contiguo separado por el material intermedio en db

$\gamma$  = peso específico del material del cerramiento intermedio en Kg/m<sup>3</sup>

$e$  = espesor del material del cerramiento intermedio en m

### Ley de distancias

Hemos dicho que todo sonido emitido se propaga en el aire libre como una perturbación que gradualmente se atenúa, o sea la energía de una onda sonora se extingue a medida que su radio crece con respecto a la fuente que lo originó. La presión sonora es pues decreciente a medida que nos alejamos de la fuente.

Esa reducción de nivel sonoro es posible cuantificarla a través de la siguiente fórmula, que expresa la reducción en decibeles, entre dos puntos alejados de la fuente, en relación a las distancias de dichos puntos respecto del origen del sonido.

$$20 \log \frac{D}{D_1} = \text{dB}$$

En la fórmula anterior, son:

$D$  = distancia mayor a la fuente

$D_1$  = distancia menor a la fuente

Ejemplo : distancia doble

$$20 \cdot \log \frac{2 \cdot D_1}{D_1} = 6 \text{ dB}$$

distancia cuádruple

$$20 \cdot \log \frac{4 \cdot D_1}{D_1} = 12 \text{ dB}$$

Cada vez que la distancia a la fuente sonora aumenta al doble, el nivel sonoro disminuye en 6 dB.

### Fenómenos de propagación del sonido

#### Dirección de propagación y frente de onda

Para estudiar gráficamente los diversos aspectos de la propagación del sonido, puede partirse de los dos conceptos siguientes

- a) dirección de propagación
- b) frente de onda

La dirección de propagación es siempre rectilínea en un medio homogéneo isotrópico. El frente de onda, por su parte se extiende en forma radial y tridimensional, a partir de la fuente emisora de sonido.

#### Ley general de reflexión

Cuando el sonido al propagarse encuentra la superficie de algún obstáculo, se refleja cumpliendo la ley, según la cual el ángulo de incidencia  $\alpha_i$ , es igual al de reflexión  $\alpha_r$ .

Dichos ángulos se toman respecto de la normal a la superficie en el punto de incidencia, como se grafica en la figura 4.9.

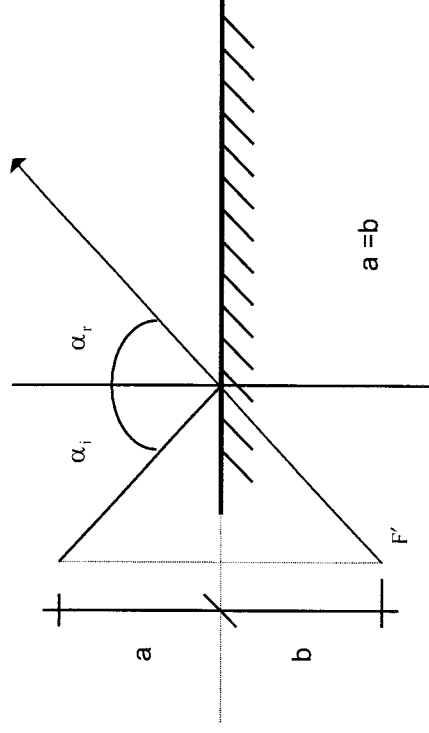


Figura 4.9

Tratándose de una superficie curva, puede resolverse la reflexión, para un punto de incidencia fijado, operando con respecto al plano tangente a la curva en dicho punto, lo cual se grafica en la figura 4.10.

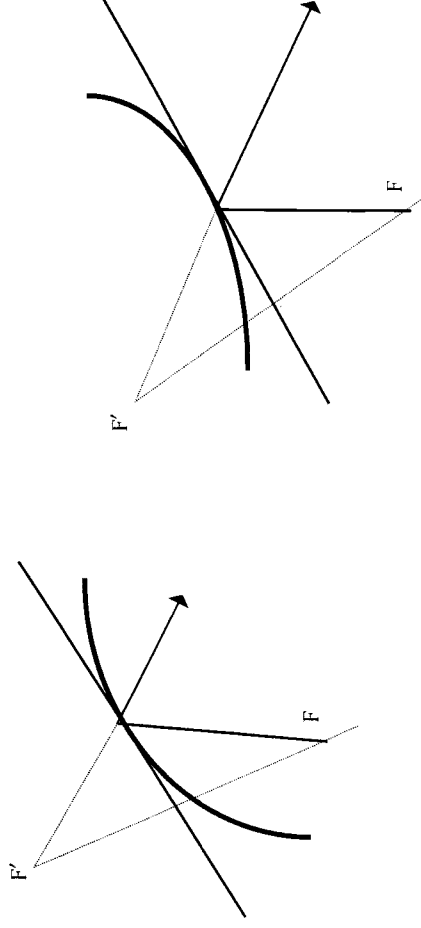


Figura 4.10

Trazando las reflexiones para varios puntos de una superficie curva puede observarse que las superficies cóncavas concentran los rayos reflejados y las superficies convexas los dispersan.

También podemos explicar el fenómeno de reflexión del sonido diciendo: si en un punto  $A$  se produce un sonido, las ondas sonoras formarán superficies esféricas de centro en  $A$ , cuyo radio irá aumentando progresivamente.

Si en el trayecto de las ondas sonoras se encuentra un obstáculo por ejemplo la pared  $PP'$  el sonido se refleja en la pared o sea se superponen las ondas emitidas por el punto  $A$ , a otras ondas cuyo centro virtual está en un punto  $A'$ , simétrico de  $A$  con respecto a la pared.

Se grafica en un croquis en planta, la situación antes descrita, en la figura 4.11.

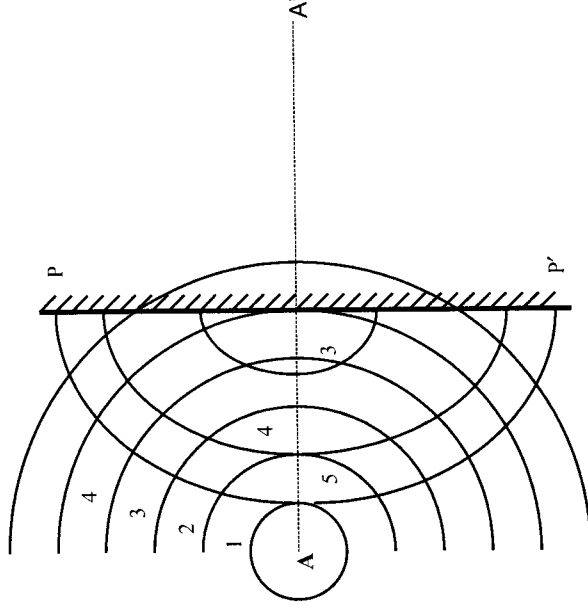


Figura 4.11

### El efecto de eco

La simple reflexión del sonido puede dar lugar al fenómeno de eco. Considerando las posiciones relativas de una fuente sonora y un oyente, respecto de un plano de reflexión, se observa que el sonido puede llegar al oyente en forma directa o por vía reflejada.

Siempre en relación a la figura 4.11, si una persona situada en el punto A emite un sonido, oír a éste dos veces: la primera vez directamente y la segunda después de la reflexión del sonido sobre la pared.

Si el punto A está situado cerca de la pared, a causa de la persistencia de las impresiones sonoras en el oído, el observador percibirá los dos sonidos confundidos en uno, pues cuando llega el sonido reflejado persiste aún en su oído la impresión del sonido original.

Evidentemente las oscilaciones de presión que llegan al oído según el trayecto reflejado lo harán con retraso respecto a las que llegan en forma directa, pues (ver figura 4.12):

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---}$$

$$FA + AO > FO$$

Según esto, para una determinada señal acústica emitida en F, el oyente debiera tener dos sensaciones sucesivas diferenciadas.

Pero una sensación acústica perdura en el oído durante 1/10 de segundo después de pasada la excitación. Por lo tanto la segunda sensación sólo se percibirá como separada y distinguible de la primera, si llega con más de 1/10 de segundo de retraso. En este caso se dice que se ha producido el fenómeno de eco, los dos sonidos se perciben bien distintamente uno del otro.

Como el sonido en el aire se propaga a 340 m/seg., en 1/10 de segundo el recorrido correspondiente es de 34 m.

Por lo tanto para percibir eco, la diferencia de longitud entre el camino de propagación reflejado y el directo debe ser mayor de 34 m.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---}$$

**Condición de eco:**  $(FA + AO) - FO \geq 34 \text{ m}$

Cuando el propio oyente se constituye en fuente sonora, colocado frente a un plano de reflexión, percibirá eco cuando su distancia al plano reflejante sea mayor que 17 m.

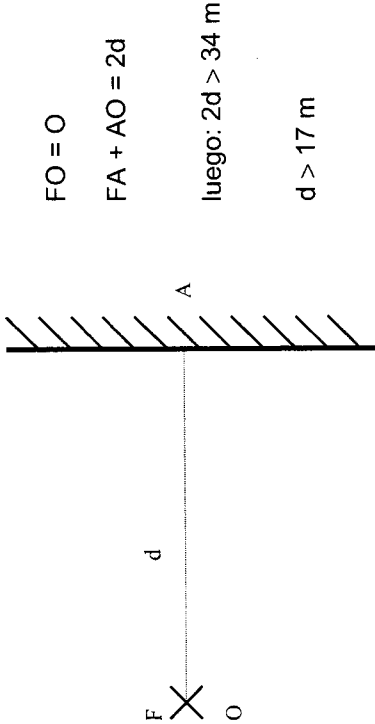


Figura 4.12

### Efecto de reverberación

Este fenómeno consiste en la persistencia del sonido, por efecto de la reflexión en un determinado recinto.

El sonido emitido por una fuente sonora en el interior de un local al propagarse en todas direcciones, sufre múltiples y sucesivas reflexiones en las superficies limitantes, según la ley general de reflexión (ver figura 4.13).

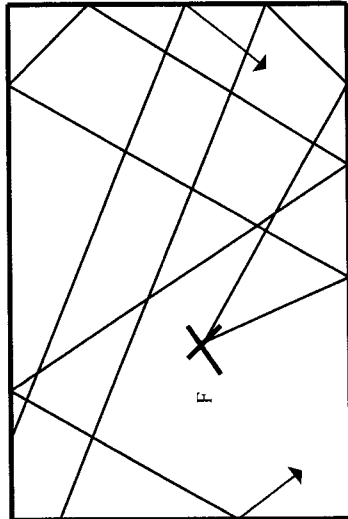


Figura 4.13

Si dichas superficies fueran 100% reflejantes, no se perdería nada de la energía incidente en cada reflexión y al suprimir la producción del sonido en la fuente, la energía ya emitida perduraría en el local indefinidamente a través de infinitas reflexiones, sin decaer el nivel de intensidad .

Como en rigor las superficies límites tienen un cierto coeficiente de absorción  $\alpha$ , en cada incidencia se pierde energía. Consecuentemente, si se ha interrumpido la emisión sonora en la fuente, el nivel de intensidad de sonido en el local irá decreciendo paulatinamente.

El fenómeno de perduración de la energía sonora en el recinto, con posterioridad a la interrupción de su emisión, constituye el efecto llamado de **reverberación**.

### Tiempo de reverberación

Se denomina "tiempo de reverberación" de un recinto, al tiempo que tarde en disminuir 60 db, el nivel de un sonido generado en dicho recinto, a partir del momento en que se interrumpe la emisión de sonido de la fuente sonora.

El tiempo de reverberación  $t_{60}$  depende del volumen del local y de la absorción total  $A_t$  correspondiente al mismo, siendo su expresión matemática:

$$t_{60} = \frac{0.16 V}{A_t}$$

$$A_t \text{ (en m}^2\text{)}$$

$$V \text{ (en m}^3\text{)}$$

$$t_{60} \text{ (en seg.)}$$

### Efecto de difracción

Cuando en el camino de su propagación el sonido encuentra obstáculos aislados los rodea, continuando la propagación detrás del obstáculo por el fenómeno de difracción.

La difracción puede mostrarse claramente observando los sucesivos frentes de onda antes y después de ser alcanzado el obstáculo AB (ver figura 4.14).

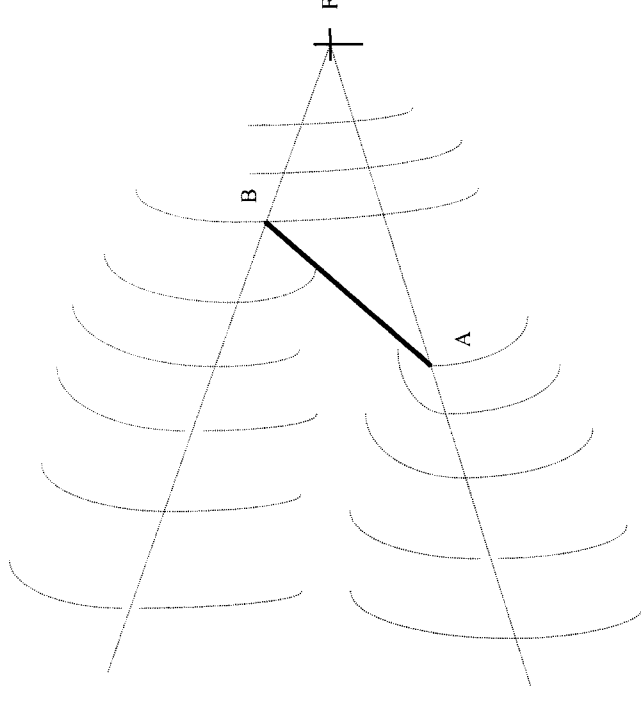


Figura 4.14

Se observa en el gráfico anterior, que detrás del obstáculo los frentes de onda se propagan como emitidos desde centros coincidentes con los extremos de aquél.

Puede verse también que a una cierta distancia detrás del obstáculo los frentes de onda difractados, prácticamente coinciden con los correspondientes a la propagación directa desde la fuente, como si no hubiere existido el obstáculo.

En el caso de una abertura, el paso del sonido a través de ella sigue las mismas leyes generales de la difracción, considerando como obstáculos las superficies que limitan la abertura.

Si se supone la abertura reducida a un orificio muy pequeño, prácticamente coinciden los extremos A y B, propagándose los frentes difractados con centro en el orificio como si allí se encontrara la fuente (F fuente original), figura 4.15.

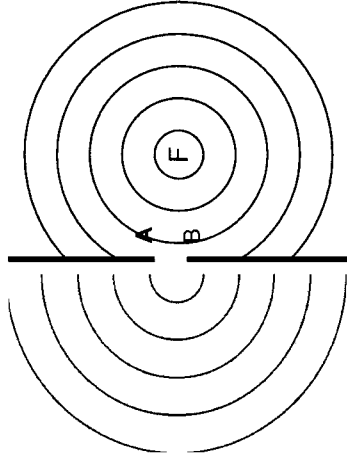


Figura 4.15

### Efecto de resonancia

Se define como fenómeno de resonancia aquél por el cual un cuerpo vibra bajo ciertas condiciones, por efecto de un sonido que recibe. Para ello es necesario que el sonido que el cuerpo reciba sea de igual naturaleza y de igual período, que el sonido que el cuerpo receptor es capaz de emitir.

Un ejemplo simple es el de dos instrumentos de cuerda que se encuentren próximos. Si están igualmente templados, cuando se hace sonar una cuerda en uno de ellos, en el otro comenzará a vibrar esa misma cuerda al recibir el sonido emitido.

En el hecho constructivo este fenómeno se presenta bajo variados casos. Viben las paredes por efecto del sonido producido por ascensores, vibran las cañerías como resultado del ruido (y la vibración propia), de los motores de las bombas elevadoras de agua, vibran los elementos anexos a los equipos acondicionadores de aire cuando éstos se encienden, etc.

Como se verá, todos los ejemplos mencionados son incómodos para los usuarios del hábitat, por consiguiente será tarea del arquitecto evitar que el fenómeno de resonancia se produzca en esas circunstancias.

Aunque el repertorio tecnológico es muy variado y responde a cada problema en particular, se puede decir que en general la interposición de materiales aislantes acústicos cuando el ruido es aéreo y el uso de materiales intermedios elásticos, cuando la vibración se desplaza por medio sólido, resultan los mecanismos más aptos para lograr las soluciones buscadas

## El sonido en el hecho constructivo

### Consideraciones Generales

Para analizar los fenómenos del sonido en los hábitat en general, es fundamental referirnos a su comportamiento respecto a los cerramientos que conforman las "cajas" de los espacios diseñados, en relación con su entorno inmediato.

Sea este entorno perteneciente a otro ámbito del edificio, o el espacio exterior, lo que estudiaremos será un elemento divisorio plano, de cierto espesor, que constituye el plano limitante del espacio considerado, ya sea inferior, superior o lateral.

Dicho elemento divisorio define siempre dos semiespacios, de tal forma que la energía acústica emitida en uno de ellos no puede pasar al otro más que a través de la masa del cerramiento divisorio.

Llamamos semiespacio emisor al que contiene la fuente sonora y semiespacio receptor al otro.

Las condiciones anteriores corresponden a una situación teórica simplificada y corresponderá a un análisis tecnológico detallado del problema, determinar en que medida las condiciones reales de un elemento divisorio entre dos locales se aproxima a las condiciones supuestas.

En base al esquema propuesto (ver figura 4.16), cuando la energía acústica  $W_i$ , proveniente de la fuente ubicada en el semiespacio emisor, incide sobre la superficie del elemento divisorio, pueden reconocerse tres aspectos básicos:

- Parte de la energía ( $W_r$ ) resulta reflejada hacia el semiespacio de origen.
- Parte de la energía ( $W_t$ ) es transmitida hacia el otro semiespacio.
- Un remanente de energía ( $W_c$ ) se pierde convirtiéndose en otra forma de energía (calor), por diversos procesos mecánicos estructurales.

Y se cumple la relación:

$$W_i = W_r + W_c + W_t$$

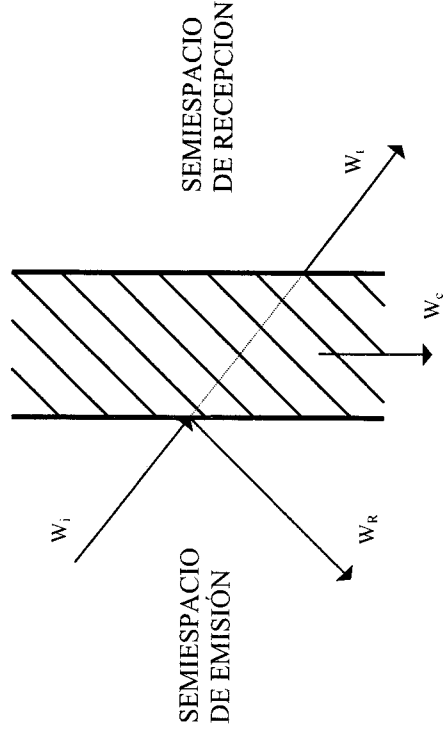


Figura 4.16

#### Absorción del sonido - Coeficiente de absorción y absorción total

¿Cómo funciona en realidad la absorción respecto de ciertos materiales? Al llegar el sonido a un material poroso o a una superficie irregular, es decir ni plana y ni pulida, es absorbido mediante múltiples reflexiones, transformándose en energía térmica. Se llama a este fenómeno **trampa absorbente**.

En las condiciones anteriores, se define como energía acústica absorbida ( $W_a$ ) por el elemento divisorio, respecto del semiespacio de emisión, a toda la energía que no es devuelta hacia dicho semiespacio.

$$W_a = W_c + W_t \quad W_a \leq W_i$$

Se define como coeficiente de absorción  $\alpha$  correspondiente al material del divisorio, a la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad \alpha \leq 1$$

Se considera como absorción A, propia de una determinada extensión S de la superficie de un material, al producto:

$$A = S \cdot \alpha \quad (\text{m}^2)$$

Como  $\alpha$  es un número adimensional, la absorción propia de una superficie viene siempre expresada en  $\text{m}^2$ .

Si se tienen diversos materiales limitantes de un recinto, con extensiones individuales  $S_1, S_2, S_3, \dots$  etc., y con coeficientes de absorción  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  etc., la absorción total propia de todas las superficies limitantes del recinto es:

$$A_t = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + \dots$$

$$A_t = \sum S_n \cdot \alpha_n$$

Son materiales absorbentes del sonido aquellos de bajo peso específico (corcho, poliestireno expandido [telgopor], lana de vidrio, etc.). Por el contrario, para aislar el sonido entre dos ámbitos distintos, se requiere de materiales de alto peso específico (metales, hormigón, mampostería, vidrio, etc.)

También existen otros recursos resultado de emparedados de materiales diversos que usan propiedades combinadas de aislación y absorción. Tal es el caso de los parabrisas para vehículos con lámina plástica (polyvinyl/buthadiene) entre vidrios. Además de lograr un factor de seguridad contra desprendimientos de partículas en un accidente, se obtiene una importante aislación sonora dentro de los vehículos.

En el caso de los cerramientos, se usa el sistema llamado masa-resorte-masa, que consiste en un sandwich, donde las capas exteriores son de un material denso, mientras que poseen una capa interior de otro material de bajo peso específico. Un ejemplo disponible en el mercado actual son los paneles de roca de yeso, conformando las capas exteriores y un relleno de lana de vidrio en su interior.

#### Aislación con distintos materiales

Para obtener una buena aislación acústica, como ya mencionamos y se desprende de lo reseñado en la validez de la ley de masa, es necesario usar materiales de alto peso específico. Dichos materiales deberán, en consecuencia, ser poco porosos y en lo posible poseer una terminación superficial lisa y pulida.

Considerando un elemento divisorio infinito que define un semiespacio de emisión y otro de recepción, si es  $N_1$  el nivel sonoro emitido y  $N_2$  el nivel sonoro recibido, será en general:

$$N_2 < N_1$$

A partir de ello, podemos definir como "valor de aislación" del divisorio, a la diferencia neta:

$$N_a = N_1 - N_2 \quad [dB]$$

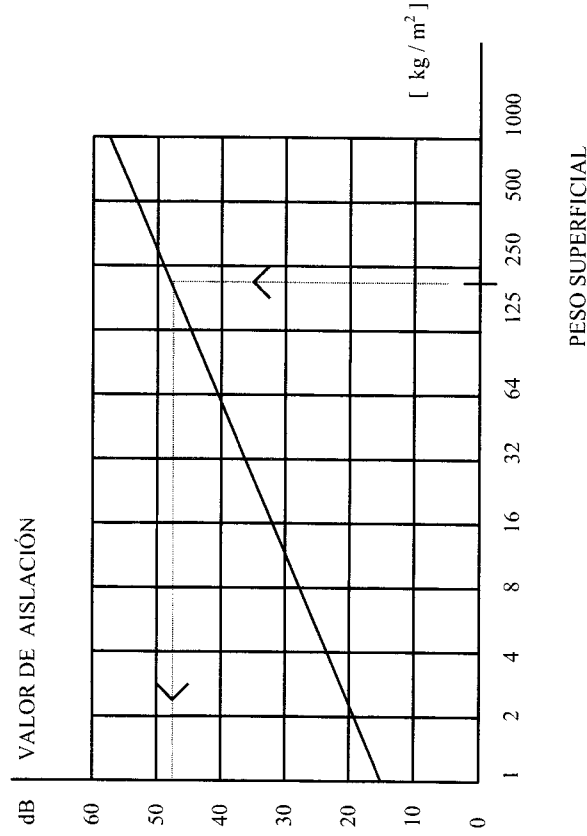
Cuanto mayor sea  $N_a$  más eficaz se considera el elemento divisorio como aislante acústico.

Dicha eficacia aislante depende básicamente del peso del sistema divisorio por unidad de superficie, según la llamada **Ley de los pesos superficiales**, que es una versión simplificada de la *Ley de masa*, y dice que un elemento divisorio es tanto más aislante cuanto más pesado es por unidad de superficie.

El peso  $\sigma$  por unidad de superficie, es el mismo que se usa en el gráfico de la Ley de masa, y como se dijo, depende del peso específico del material y del espesor del elemento divisorio que constituye, siendo su unidad,

entonces: 
$$\frac{Kg}{m^2}$$

Para  $\sigma = 1 \frac{Kg}{m^2}$  se tiene  $N_a = 15 dB$ . A partir de este valor, se ganan 4 dB de aislación por cada duplicación del peso. Gráficamente la regla anterior se indica en la siguiente tabla:



Ejemplo de utilización del diagrama:

Material: mampostería de ladrillo común  
 Peso específico:  $\gamma = 1600 \text{ Kg/m}^3$   
 Espesor considerado  $e = 0.15 \text{ m}$   
 Peso superficial  $\sigma = \gamma \cdot e = 240 \text{ Kg/m}^2$   
 Valor de aislación  $N_a = 47 \text{ dB}$

La ley del peso superficial considerada se refiere exclusivamente a casos en que el sonido se origina en el espacio del sector de emisión. Se dice en este caso, que se trata de "aislación por vía aérea".

Pero el sonido puede originarse directamente sobre la superficie del elemento divisorio, del lado de emisión. En este caso se dice que se trata de un proceso de aislación por "vía sólida" o "aislación de impacto".

No debe aplicarse el criterio de la ley de los pesos superficiales a los casos de aislación por impactos.

### Aislamiento simple

Consideremos ahora el caso de un aislamiento simple, de espesor único y su capacidad aislante. Cada vez que se duplique la densidad superficial ( $\sigma$ ) de un cerramiento, se incrementará en un orden de 4 dB a 6 dB la aislación acústica que dicho cerramiento brinda. Al duplicar la frecuencia del sonido, también aumenta en 4 dB la aislación o insonoridad del muro.

### Aislamiento múltiple

Cuando se trate de un aislamiento conformado por un cerramiento donde por sectores nos encontramos con distintos materiales (ver figura 4.17), habrá que considerar todos y cada uno de los materiales intervinientes, su superficie de transmisión de sonido, y su capacidad aislante acústica.

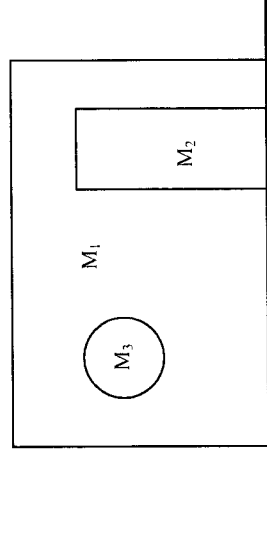


Figura 4.17

En el ejemplo genérico que planteamos, nos encontramos con tres materiales que componen sectores del cerramiento. Estos materiales,  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ , poseen cada uno de ellos un coeficiente de transmisión aérea del sonido, denominado  $t_i$  ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ), que se obtiene a partir de conocer la resistencia acústica aérea respectiva  $R_i$  ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), que es el valor obtenido del diagrama de *Ley de masa* o *Ley de los pesos superficiales*, o de una tabla al respecto.

A partir de allí se aplica la relación:

$$R_i = 10 \cdot \log \frac{1}{t_i}$$

Y con los valores del coeficiente  $t_i$ , y las superficies parciales de cada material  $S_i$  ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ), y la superficie total del cerramiento  $S_T$ , se aplica la fórmula siguiente:

$$t_e = \frac{S_1 \cdot t_1 + S_2 \cdot t_2 + \dots + S_n \cdot t_n}{S_T}$$

$$\text{siendo } R_e = 10 \cdot \log \frac{1}{t_e}$$

que da como resultado la aislación total del cerramiento en cuestión,  $R_e$ . Resumiendo, los términos intervinientes en este proceso de cálculo, son:

$t_e$ : coeficiente de transmisión efectiva en cerramientos de múltiples materiales

$t_i$ : coeficiente de transmisión acústica de cada material

$R_e$ : resistencia acústica aérea total

$S_i$ : superficies parciales de cada material

$S_T$ : superficie total del cerramiento

Veamos un ejemplo de cálculo sencillo de coeficiente de transmisión acústica de un determinado material, cuya capacidad aislante es de 60 dB.

$$R_i = 10 \cdot \log \frac{1}{t_i} \quad \text{siendo } R_i: \text{resistencia al paso del sonido (aéreo)}$$

$$\text{Ejemplo } 60 \text{ dB} = 10 \log \frac{1}{t_i} \quad \frac{1}{10} = \log_{10} \frac{1}{t_i}$$

$$\text{De lo que resulta } t_i = 1/10^6 = 10^{-6}$$