4. TEORÍA DEL AISLAMIENTO

El aislamiento o índice de reducción sonora R, se define como "diez veces el logaritmo del cociente entre la potencia sonora que incide sobre el objeto de prueba que se considere, W_1, y la potencia sonora transmitida a través de este, W_2"

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2}$$

(Ecuación 25)

El cálculo de este índice según las normas de intensidad y presión se abordará en los siguientes apartados detalladamente. Es importante señalar sin embargo, que, en la práctica, a la hora de asignar un valor de aislamiento a un determinado material constructivo, se recurre a los valores obtenidos en cámaras de ensayo y no a las expresiones teóricas. [13]

4.1 AISLAMIENTO DE UNA PARED SIMPLE HOMOGÉNEA: LEY DE MASAS

Se explicará a continuación el caso ideal más simple: una partición constituida por un único material. Obviamente, existen numerosos casos de mayor complejidad con paredes dobles, pero al no someterse a ensayo en el presente proyecto, no se han tratado en este apartado.

Dado un cerramiento formado por un único material de unas características de elasticidad y densidad conocidas, la energía "atravesará" el cerramiento tanto a través de los poros como en forma de una nueva onda generada al vibrar la propia partición.
La atenuación de la onda sonora incidente depende de la frecuencia del sonido, de la masa de la pared y de las condiciones de contorno de la partición. En el caso de una pared simple, las propiedades aislantes varían considerablemente con la frecuencia, por lo que se suelen distinguir tres zonas de comportamiento claramente diferenciado:

Zona 1: A bajas frecuencias, la pared se comporta como un muelle o placa vibrante. En esta zona, el aislamiento decae con la frecuencia y se ve afectado así mismo por las frecuencias propias o de resonancia, que están relacionadas con la rigidez y las condiciones de contorno de la pared. La existencia de estas frecuencias de resonancia disminuye drásticamente el aislamiento por debajo de los 100 Hz.
Zona 2: Se corresponde con la mayor parte del espectro de interés para los materiales de uso habitual en las construcciones arquitectónicas. En este rango de frecuencias el comportamiento de la pared simple está gobernado por su masa y se la puede considerar como una gran cantidad de pequeñas masas deslizando unas sobre otras. [13] [15] Para este rango de frecuencias se encuentran expresiones teóricas para el aislamiento en función de la masa y de la frecuencia, de la forma:

$$R = 20 \log(Mf) + C$$

(Ecuación 26)

Donde *M* es la masa por unidad de superficie del material, *f* la frecuencia (Hz) y C una constante que depende de la impedancia del material. El aislamiento R aumenta con una pendiente de 6 dB/octava, tanto si se duplica la masa del cerramiento como si se dobla la frecuencia, aunque esto es así sólo hasta un determinado límite superior de frecuencias. La ecuación (26) constituye la conocida *Ley de Masas* y se representa en la siguiente figura:

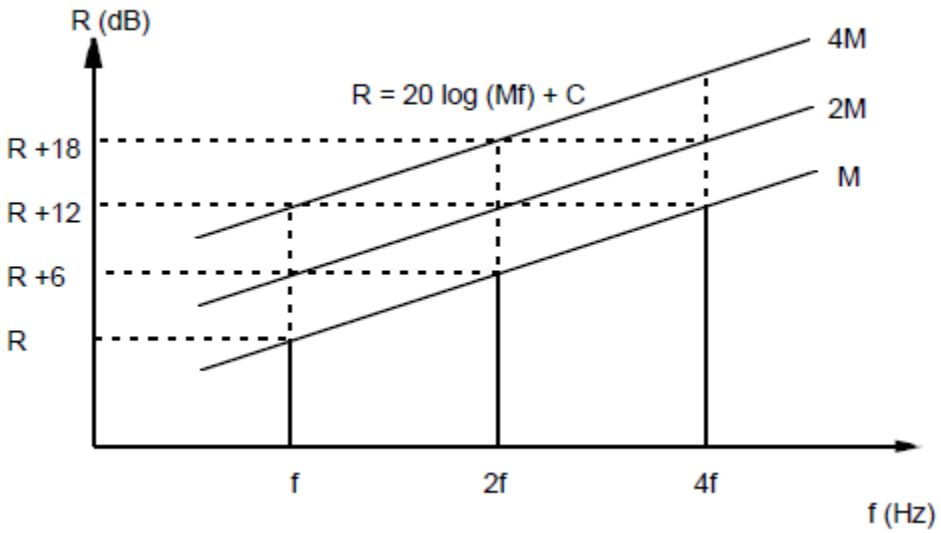

Figura 7. Ley de masas. Partición simple [13]

En la práctica, los materiales no responden a la ley de masas a todas las frecuencias. Bajo determinadas condiciones, las ondas de flexión (λ*F*) que se generan en la pared al vibrar, pueden entrar en resonancia con la onda sonora incidente (λ). A este fenómeno se le denomina coincidencia. (Figura 8)

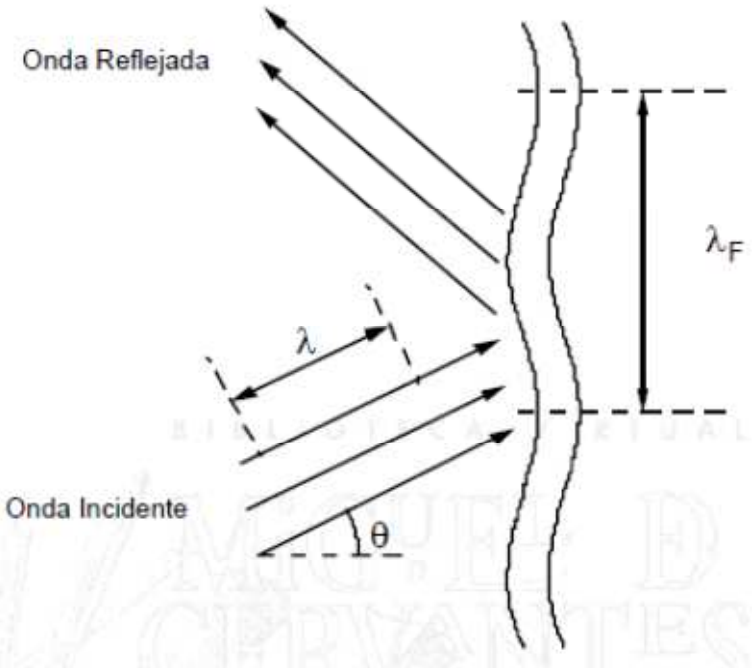

Figura 8. Onda sonora de flexión. Fenómeno de coincidencia [13]

La menor de las frecuencias de coincidencia posibles es la llamada frecuencia crítica y marca el límite superior a la zona 2. Debido al fenómeno de resonancia, el aislamiento se reduce bruscamente a esta frecuencia. Para los sonidos incidentes cuya longitud de onda cumpla la relación:

$$\lambda = \lambda_F \cdot sen\theta$$

(Ecuación 27)

Donde λ*F* es la longitud de la onda a flexión originada en la partición y θ el ángulo de incidencia, se producirá la resonancia. La frecuencia crítica viene dada por:

$$f_c = \frac{6{,}14 \cdot 10^4}{d}\sqrt{\frac{\rho(1-\sigma^2)}{E}}$$

(Ecuación 28)

Siendo *d* es el espesor del cerramiento, ρ es la densidad del material del cerramiento, σ su coeficiente de Poisson, *E* su módulo de Young y λ la longitud de la onda incidente.

Zona 3: Por encima de la frecuencia crítica, la pared simple no obedece a la ley de masas, pasando nuevamente a tener un comportamiento de resorte. En esta zona, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía acústica a las ondas de flexión. Existen sucesivas frecuencias de coincidencia muy distanciadas. Para frecuencias mayores a la frecuencia crítica, a igualdad de masa y frecuencia, el coeficiente de aislamiento aumenta entre 8 y 10 dB cada vez que el amortiguamiento se haga diez veces superior. Cuando se doble la frecuencia, a igualdad de masa y amortiguamiento, para frecuencias superiores a la crítica, R se incrementará entre 9 y 10 dB. [13] [15]
Las tres zonas anteriormente descritas pueden observarse en la figura:

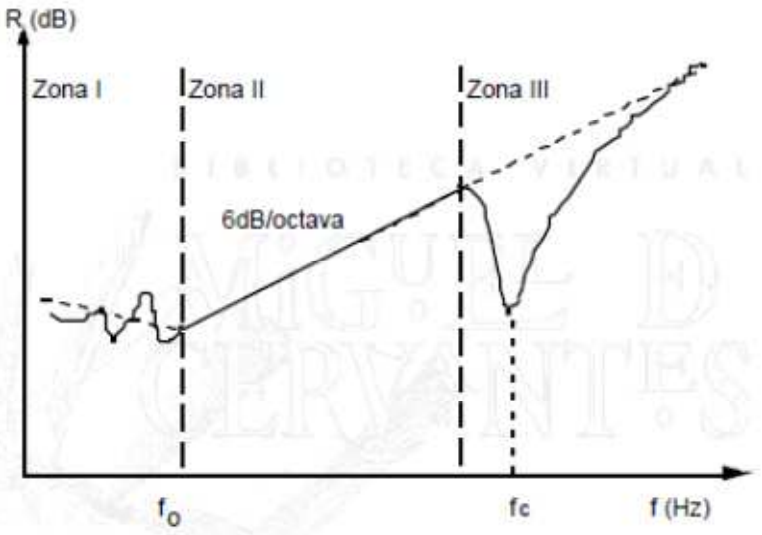

Figura 9. Zonas de aislamiento de una pared simple [13]

4.2 NORMATIVA ISO-140-4. MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. MEDICIONES IN SITU DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES.

En esta norma se especifica un método de laboratorio para la medición del aislamiento acústico de elementos constructivos tales como paredes, suelos, ventanas, puertas, elementos de fachada y fachadas, excepto aquellos clasificados como elementos constructivos pequeños. El laboratorio en el que se realizan los ensayos se debe ajustar a lo especificado en la parte 1 de esta misma serie de normas. Los resultados se expresan en intervalos de frecuencia de tercios de octava.

4.2.1 ECUACIONES Y CONDICIONES DE CAMPO

Para poder determinar el aislamiento de un determinado elemento constructivo en laboratorio, es preciso estimar la potencia sonora que incide sobre él en la sala emisora *W1* y la potencia sonora transmitida a la sala receptora por dicho elemento *W2*. La norma exige que el campo sonoro creado, tanto en la sala emisora como en la receptora, sea difuso y que el sonido radiado en el recinto receptor se transmita sólo a través de la muestra. En estas condiciones de campo difuso se conoce la relación existente entre intensidad y presión sonora promedio en una banda de frecuencia:

$$I_1 = \frac{p_1^{\,2}}{4 \cdot \rho_0 \cdot c}$$

(Ecuación 29)

Donde $\rho_0 c$ es la impedancia del medio, producto de la densidad por la velocidad del sonido, en este caso en aire y p_1 es la presión sonora.

En la sala emisora, por tanto, la potencia sonora que incide sobre la muestra será:

$$W_1 = I_1 \cdot S_p = \frac{p_1^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c} \cdot S_p$$

(Ecuación 30)

Siendo S_p la superficie del elemento de prueba. En la sala receptora, sin embargo, para estimar la potencia sonora recibida sólo a través de la muestra, es preciso tener en cuenta la absorción del resto de la sala, ya que el nivel de intensidad estimado al medir la presión sonora no coincidirá exactamente con el inyectado, al haber sido absorbida por las paredes parte de la energía acústica. En este caso se cumplirá:

$$W_2 = I_2 \cdot A_2 = \frac{p_2^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c} \cdot A_2$$

(Ecuación 31)

Donde *A* es el área de absorción equivalente de la sala receptora en dicha banda de frecuencia.

La energía que es absorbida por las paredes sumada a la que llega a la sala receptora debe ser igual a la transmitida por la fuente sonora en la sala emisora, alcanzándose pues, un equilibrio en la superficie de medición.

El aislamiento, índice de reducción sonora o índice de pérdidas por transmisión sonora, R, según la ecuación 25, en cada banda de frecuencias, será:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = L_{p2} - L_{p1} + 10 \log \frac{S_p}{A_2}$$

(Ecuación 32)

Donde L_{p1} y L_{p2} serían los niveles de presión sonora en las habitaciones 1 y 2 respectivamente.

Y el aislamiento bruto (D) vendría dado por la ecuación:

$$D = L_{p1} - L_{p2}$$

(Ecuación 33)

Es importante hacer constar en este apartado, que el área de absorción equivalente se calcula a partir de la medida del tiempo de reverberación en la sala receptora que, en condiciones de laboratorio, debe ser una cámara reverberante. [23] [25]

4.3 NORMATIVA ISO 15186-2: MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN UTILIZANDO INTENSIDAD SONORA.

Esta norma establece de forma similar a lo expresado en la norma anterior, pero con medidas de intensidad acústica. Al igual que en la normativa anteriormente expuesta, los resultados se presentan en tercios de octava.

4.3.1 ECUACIONES Y CONDICIONES DE CAMPO

Con carácter general, la diferencia sustancial entre la metodología propuesta por la normativa existente (también llamada "tradicional" o "método por presión") y la que a continuación se presenta o "método de intensidad", radica en que la estimación de la potencia sonora en la sala receptora en este último caso se realiza mediante una medida directa de la intensidad sonora inyectada por el elemento de prueba en la sala receptora.
En el método de presión, la evaluación de la potencia sonora inyectada se realiza a través de la presión, lo cual implica la utilización de una relación aproximada entre presión e intensidad, válida sólo en campo difuso. Sin embargo, en el método de intensidad, la relación entre la potencia sonora inyectada y la intensidad es directa, por lo que en principio es válida en todas circunstancias. En este caso se tiene:

$$W_2 = I_2 \cdot S_m$$

(Ecuación 34)

Donde I_2 es el promedio espacial y temporal de la intensidad sonora medida en la sala receptora en la dirección perpendicular a la superficie de prueba S_p y midiendo sobre una superficie, que la recubra totalmente, Sm, paralela y perpendicular a ella. Se considerará el sentido del vector intensidad sonora positivo cuando el flujo de energía se produzca desde el cerramiento al interior de la sala receptora. Suponiendo el campo difuso en la sala emisora, el aislamiento R, viene dado por:

$$R = 10\log\frac{W_1}{W_2} = L_{p1} - L_{I2} + 10\log\frac{S_p}{S_m} - 6$$

(Ecuación 35)

Donde L_{I2} sería el nivel de intensidad sonora en la habitación 2.

La ecuación 34 no se aplica a la potencia incidente, puesto que al tomar como positivo el sentido de la intensidad desde la sala emisora a la receptora, el término de la potencia resultaría negativo.

La norma propone "corregir" este valor de aislamiento con la corrección de Waterhouse Kc, (cuyo significado se presenta en el apartado siguiente) ya sea mediante unos valores a cada frecuencia predeterminados y dados en un anexo del borrador de norma (calculados para salas de dimensiones 4.5 x 6.0 x 3.0 m3, que pretenden representar unas dimensiones de compromiso para las salas existentes), o bien de acuerdo a la ecuación de Waterhouse que se verá más adelante. Es interesante señalar que estas "correcciones" sólo se proponen cuando el fin de las medidas es el de comparar los resultados obtenidos por intensidad con los de presión, ya que, como se explica posteriormente, no son verdaderas correcciones al método de intensidad. En este caso, la expresión del aislamiento resulta:

$$R = 10\log\frac{W_1}{W_2} = L_{p1} - L_{I2} + 10\log\frac{S_p}{S_m} - 6 + K_c$$

(Ecuación 36)

Asociado a las medidas, se define el índice de presión-intensidad superficial, denotado *F2*, Δ*pI* o *FpI* según la bibliografía consultada, como la diferencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad normal a la superficie, siendo ambos niveles promediados tanto temporal como espacialmente:

$$F_{pI} = L_p - L_{In}$$

(Ecuación 37)

Por analogía con el índice anterior, y en relación con el proceso de calibración, se define el índice de presión-intensidad residual, denotado como δ *pI*0 . En este caso, el indicador se corresponde con la diferencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad medido cuando se sitúa la sonda en un campo tal que la intensidad sonora sea nula (incidencia normal al eje de la sonda):

$$\delta_{pI0} = L_{p0} - L_{I0}$$

(Ecuación 38)

En el siguiente apartado se explicará el uso de este parámetro, ya que en la realidad se toman valores tabulados.

Una de las grandes aportaciones de la técnica de intensidad incluida en el borrador de norma es la posibilidad de calcular un valor de aislamiento parcial asociado a cada uno de los elementos que constituyen un cerramiento en conjunto, posibilidad que no existía con el método tradicional. Para ello se subdivide el elemento de prueba en *N* superficies de medida menores, tantas como se estime de interés, *Sm,i*. El nivel de intensidad medio inyectado en la sala receptora vendrá dado por:

$$L_{In} = 10\log\left[\frac{1}{S_m}\sum_{i}^{N} S_{m,i}\,10^{0,1Lmi}\right]$$

(Ecuación 39)

Donde el subíndice *i* se refiere a cada una de las superficies menores y la superficie de medida total *Sm* es la suma de todas ellas.

$$S_m = \sum_{i=1}^{N} Sm, i$$

(Ecuación 40)

Sp y Sm podrían llegar a ser iguales en el caso de que se sometiera a ensayo toda la superficie de medición, ya que Sp corresponde a la superficie de la pared al completo y Sm corresponde a la superficie de la pared en la que se mide la intensidad transmitida. Sin embargo, para el caso concreto de nuestros ensayos, sólo se midió la intensidad en una parte de la pared. [21]

4.3.2. AISLAMIENTO A BAJAS FRECUENCIAS. LA CORRECCIÓN DE WATERHOUSE

Uno de los temas que en la actualidad está adquiriendo gran importancia es el aislamiento a bajas frecuencias ya que, en los últimos años, han aumentado vertiginosamente las fuentes de ruido potentes por debajo de los 200 Hz. Tanto el ruido de tráfico, como los diversos equipos utilizados para la comodidad en la vivienda y en las actividades industriales y comerciales son una continua fuente de ruido a bajas frecuencias. Sin embargo, es precisamente en este rango de frecuencias cuando las hipótesis en las que se basa la normativa vigente dejan de cumplirse. Si las dimensiones de las salas son del orden de la longitud de onda de interés, el campo deja de ser difuso y, por tanto, la relación entre potencia y presión sonora anteriormente establecida deja de tener validez. Se ha demostrado, tanto experimentalmente como a través de modelos teóricos, que el aislamiento a bajas frecuencias no es una característica propia de la partición, sino más bien del sistema sala-partición-sala, y una misma partición presentará distintos valores de aislamiento a bajas frecuencias en función de las características de las salas que separa. A modo de regla de oro se ha establecido que debe existir una diferencia en longitud entre ambas salas de, al menos, 1 m para minimizar el efecto negativo debido al acoplamiento entre ambas salas.

La corrección de Waterhouse no es sino una más de las correcciones sugeridas, con la ventaja de que, al tratarse de una modificación en el cálculo y no en la sistemática de medida y al haberse revelado como verdaderamente importante en las medidas de potencia por intensidad, ha sido abiertamente debatida y finalmente aceptada por toda la comunidad científica sin grandes reparos.

En los campos difusos, la densidad de energía es mayor cerca de las fronteras que lejos de ellas, debido a los fenómenos de interferencia que se producen tanto en bordes, como en esquinas y paredes, siendo estos últimos los de mayor importancia puesto que, en salas de tamaño habitual, contienen mucha más energía que los anteriormente citados.
Si se integran los modelos de interferencia en el volumen de la sala, se puede obtener un término corrector (ignorando los fenómenos sobre bordes y esquinas) Wc correspondiente al cociente entre la energía presente y el valor de energía calculado a partir de medidas de presión en el centro de la sala:

$$W_c = 1 + \frac{S_r \cdot \lambda}{8 \cdot V}$$

(Ecuación 41)

Donde *Sr* es la superficie total de la sala, *V* su volumen y λ la longitud de onda. La magnitud logarítmica asociada a dicha energía se denomina corrección de Waterhouse y su expresión viene dada por:

$$K_c = 10 \cdot \log W_c = 10 \log(1 + \frac{S_r \lambda}{8 \cdot V})$$

(Ecuación 42)

Este término corrector, en salas pequeñas, sólo toma valores apreciables a bajas frecuencias, que es cuando la hipótesis inicial de que hay igual flujo de energía en todas las direcciones y en todos los puntos deja de cumplirse, debido a la presencia de modos propios bastante separados entre sí.[13] [21]