



VIABILIDAD DE UN TUBO DE IMPEDANCIA EN MEDIO ACUÁTICO

-PROYECTO FINAL DE CARRERA-



ALUMNA: MARTA TORNER RUBIES
TUTOR DEL PROYECTO: LUIS SÁNCHEZ RICART
TITULACIÓN: INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
DEPARTAMENTO: ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

SEPTIEMBRE 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración al Sr. Luis Sánchez Ricart, profesor de la Universidad Politécnica de Cartagena y director de este proyecto, que me ha ayudado en su elaboración.

Igualmente, agradezco también a mis familiares el soporte que me han dado siempre en mi trayectoria como estudiante.

Una vez más, doy las gracias a todos los citados y a todos aquellos que en mayor o menor medida me han ayudado.

Marta Torner Rubies

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1. Descripción y metodología
2. La naturaleza del sonido
3. Caracterización acústica de los materiales y clasificación de los métodos de medida.
4. Conceptos fundamentales
5. La propagación del sonido
6. Energía de propagación y densidad de energía

CAPÍTULO 2: EL TUBO DE IMPEDANCIA. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA Y DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA.

1. El tubo de impedancia
2. Método del tubo de impedancia acústica, tubo de ondas estacionarias o tubo de Kundt.
3. Método del rango de onda estacionaria.
 - 3.1. Fundamentos
 - 3.2. Principios fundamentales
 - 3.3. Análisis
 - 3.3.1. Relaciones
 - 3.4. Métodos para determinar correcciones
 - 3.4.1. Determinación del centro acústico de la sonda microfónica
 - 3.4.2. Determinación de la longitud de onda
 - 3.5 Formas para evitar modos superiores
 - 3.5.1 Control de rango de ondas estacionarias
 - 3.5.2 Dinámica de la sonda microfónica
 - 3.5.3 Control de la excitación del tubo
5. Componentes necesarios para la realización del ensayo del tubo de impedancia.
6. Ensayos y mediciones preliminares
7. Procedimiento de ensayo
 - 7.1. Montaje de la muestra
 - 7.2. Determinación del plano de referencia
 - 7.3. Especificaciones de las frecuencias
 - 7.4. Determinación de la longitud de onda y de la atenuación
 - 7.5 Elección de la amplitud de señal
 - 7.6 Determinación del coeficiente de absorción acústica
 - 7.7. Determinación del coeficiente de reflexión
 - 7.8. Determinación de la impedancia
 - 7.9. Determinación de la admitancia

CAPÍTULO 3: EL TUBO DE IMPEDANCIA. MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

1. Aplicación del método.
2. Fundamentos
3. Componentes necesarios para la realización del ensayo
4. Mediciones preliminares
 - 4.1. Mediciones previas y posteriores a los ensayos
 - 4.2. Calibraciones periódicas
5. Procedimiento de ensayo
 - 5.1 Montaje de la muestra
 - 5.2 Especificación del plano de referencia

- 5.3. Determinación de la velocidad del sonido, longitud de onda y la impedancia característica
- 5.4. Selección de la amplitud de señal
- 5.5 Selección del número de promediados
- 5.6 Corrección por desajuste entre micrófonos
- 5.7. Medición repetida con los micrófonos intercambiados
- 5.8. Factor de calibración predeterminado
- 5.9. Determinación de la función de transferencia entre las dos posiciones
- 5.10 Determinación del coeficiente de reflexión
- 5.11 Determinación del coeficiente de absorción acústica
- 5.12 Determinación de la impedancia acústica específica
- 5.13 Determinación de la admitancia acústica específica.

CAPÍTULO 4: ESTUDIOS REALIZADOS

- 1. Introducción
- 2. Problemas con las técnicas tradicionales del tubo de impedancia
- 3. Estudio “A short water-filled tube for the measurement of acoustic properties of materials at low frequencies”, realizado por Debra M.Kenney.
 - 3.1 Introducción
 - 3.2 Descripción del experimento realizado:
 - 3.3 Resultados del proceso experimental
 - 3.4 Conclusiones de los resultados del proceso experimental
 - 3.5 Conclusiones generales de la tesis
- 4. Estudio “An improved water-filled impedance tube”, realizado por Preston S.Wilson, Ronald A.Roy y William M.Carey.
 - 4.1 Introducción
 - 4.2 Método de medición
 - 4.3 Efectos de guía de ondas elásticas
 - 4.4 Eliminación de perturbaciones causadas por los sensores.
 - 4.5 Instrumentación del tubo de impedancia
 - 4.6 Procedimiento de medición
 - 4.7 Conclusiones

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA UTILIZADA.

El presente proyecto tiene como objetivo el estudio de los ensayos clásicos realizados en tubos de impedancia en aire así como del estudio de la viabilidad y fiabilidad de estos ensayos en medios acuáticos.

En la actualidad, la documentación existente sobre este tipo de ensayos se centra básicamente en su empleo clásico para el estudio de la caracterización acústica o comportamiento acústico de numerosos materiales mediante el análisis de parámetros tales como la impedancia acústica y el coeficiente de absorción acústica, entre otros. Asimismo, también se puede encontrar diversa información sobre estudios de viabilidad de la aplicación de nuevos materiales absorbentes del sonido con el fin de intentar reciclar productos industriales para poder interpretar el comportamiento acústico de estos materiales y mejorar condiciones de aislamiento o acondicionamiento acústico.

No obstante, poca es la información de este tipo de ensayos en cuanto a su uso en un medio del tipo acuoso.

Así pues, este proyecto consta de dos partes bien diferenciadas. En la primera se trata de presentar los distintos métodos de ensayos en tubos de impedancia, explicar sus características y sus componentes. La segunda parte, trata sobre la recopilación, búsqueda de información y estudio de varios trabajos realizados hasta la fecha para establecer la viabilidad de estos métodos aplicados a un medio acuoso.

La metodología utilizada para la realización de este proyecto ha sido, en primer lugar, la búsqueda de información relacionada con los ensayos a tratar y su selección. En segundo lugar, la organización y comprensión de la información adquirida. Estos apartados son de vital importancia puesto que es indispensable seleccionar correctamente la información relacionada sobre el tema a tratar, descartando así otra

información, que aunque aparentemente trate sobre el tema en cuestión, esté relacionada con otros temas vinculantes.

Una vez realizada esta primera etapa, fue posible empezar a redactar el presente trabajo, empezando por la explicación del funcionamiento del tubo de impedancia para lo cual ha sido necesaria la introducción de conceptos fundamentales acerca de la propagación del sonido y extrayendo finalmente las conclusiones que se explican y detallan a lo largo de este proyecto.

2. LA NATURALEZA DEL SONIDO

El fenómeno del sonido consiste en oscilaciones de presión que viajan a través de un medio, ya sea fluido, gaseoso o sólido. Estas oscilaciones se propagan en forma de ondas a la velocidad del sonido, que depende del medio a través del cual se propagan. En los gases, la velocidad del sonido a 20°C es de aproximadamente $343\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que a la misma temperatura y en agua, la velocidad del sonido toma un valor aproximado de $1,482\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. En el caso del acero, alcanza valores de alrededor de $5.960\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LOS MATERIALES Y CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEDIDA.

La acústica se define como la rama de la física que estudia el sonido, que es una onda mecánica que se propaga a través de un medio, ya sea en estado gaseoso, líquido o sólido.

De este modo, la acústica se ocupa del estudio de la generación, propagación, absorción y reflexión de las ondas de presión sonoras en un medio.

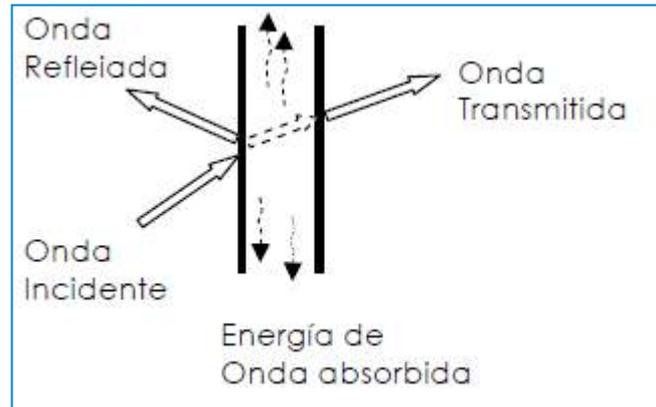


Fig. 1: propagación de ondas.

Para caracterizar acústicamente un material, se pueden utilizar distintos parámetros como son: la impedancia superficial, la porosidad, la tortuosidad, la impedancia característica compleja, la constante de propagación, etc.

No obstante, existen diversos métodos para determinar las propiedades absorbentes del sonido de los materiales que se pueden clasificar en los siguientes tres grupos:

4. Métodos de medida en tubos.
5. Métodos de medida en cámara reverberante.
6. Métodos de medida en campo libre.

Con respecto a los métodos de medida en tubos, el método utilizado para determinar el coeficiente de absorción acústica es el tubo de Kundt o el tubo de impedancia acústica.

La norma que se sigue para estos ensayos es la **UNE-EN-ISO 10534-1** y **UNE-EN-ISO 10534-2**. Estos métodos quedaran ampliamente explicados a lo largo de este proyecto.

Por otro lado, el método de la cámara reverberante se utiliza para medir la absorción en situaciones de incidencia aleatoria. El principio de funcionamiento se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material.

Por último, la mayor parte de los métodos de medida asumen condiciones de campo libre, lo que significa que no se producen reflexiones indeseadas por parte de ningún

elemento que no sea el propio material a estudiar. Estos métodos de campo libre pueden clasificarse de varias formas: según su aplicación *in situ* sea en recinto exterior o interior, según la clase de señal generada, según el número de micrófonos necesarios, etc.

4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Para la comprensión de este proyecto, es imprescindible conocer algunas definiciones tales como el coeficiente de determinación acústica, la impedancia y la admitancia entre otras ya que forman parte del vocabulario utilizado en este campo y es necesario su conocimiento para poder utilizarlo de forma adecuada.

Para dar a conocer estas definiciones, lo que se ha hecho en este punto básicamente es una transcripción del apartado 3 de la norma ISO 10534-1. Asimismo, también se han añadido otras definiciones a partir de la bibliografía utilizada.

A pesar de que estas definiciones pueden ser consultadas en dicha normativa, se ha creído igualmente conveniente incluir este apartado para poder facilitar de esta manera su lectura y comprensión, puesto que son palabras claves y fundamentales dentro de este proyecto.

- **Absorción del sonido:** fenómeno físico por el cual un material absorbe parte de la energía (acústica) que incide sobre el mismo. El parámetro que cuantifica este fenómeno es el coeficiente de absorción acústica.
- **Coefficiente de absorción acústica, α :** cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra del ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente, para una onda plana con incidencia normal.
- **Coefficiente de reflexión de presión acústica para incidencia normal, r :** cociente complejo entre la amplitud de la presión acústica de la onda reflejada

y la de la onda incidente, en el plano de referencia, para una onda plana con incidencia normal.

- **Plano de referencia:** sección recta del tubo de impedancia para la que se determinan el coeficiente de reflexión r , la impedancia Z , o la admitancia G , y que es normalmente la superficie de los objetos planos en ensayo. Se supone situado en $x=0$.
- **Impedancia de campo, $Z(x)$:** cociente entre la presión acústica $p(x)$ y la velocidad de las partículas $v(x)$ (dirigida hacia la muestra de ensayo) en un punto x del campo acústico.
- **Impedancia en el plano de referencia, Z_r :** cociente entre la presión acústica p y la velocidad de las partículas v en el plano de referencia.

$$Z_r = p/v$$

- **Impedancia (normal) de superficie, Z :** cociente complejo entre la presión acústica $p(0)$ y la componente normal a la velocidad $v(0)$ del sonido en el plano de referencia.
- **Admitancia de superficie, G :** Inversa de la impedancia (normal) de superficie, cociente complejo entre la componente normal de la velocidad $v(0)$ del sonido y la presión acústica $p(0)$ en el plano de referencia.
- **Admitancia de superficie, G_s :** componente de la admitancia, normal a la superficie de la muestra de ensayo.
- **Impedancia característica, Z_0 :** impedancia de campo (en el sentido de la propagación) de una onda plana única:

$$Z_0 = \rho_0 c_0$$

Siendo:

- ρ_0 la densidad del medio (aire)
- c_0 la velocidad del sonido en ese medio.

- **Impedancia normalizada, z :** cociente entre la impedancia Z y la impedancia característica Z_0 :

$$z = Z/Z_0$$

- **Admitancia normalizada, g :** producto de la admitancia G y la impedancia característica Z_0 :

$$g = Z_0 G$$

- **Rango de onda estacionaria, s :** cociente entre el nivel de presión acústica de un máximo de presión, $|p_{max}|$ y el del mínimo de presión adyacente, $|p_{min}|$:

$$s = |p_{max}|/|p_{min}|$$

- **Rango de onda estacionaria con atenuación, s_n :** rango de onda estacionaria correspondiente al n -ésimo máximo y al n -ésimo mínimo de presión.

- **Número de onda de campo libre, k_0 :** número definido por:

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}$$

Siendo:

- ω la pulsación;
- f la frecuencia;
- c_0 la velocidad del sonido

En general el número de onda es también complejo

$$k_0 = k'_0 - jk''_0$$

Siendo:

- k'_0 la componente real ($k'_0 = 2\pi/\lambda_0$)
 - k''_0 La componente imaginaria, que es la constante de atenuación lineal en nepers por metro
- **Presión acústica compleja, p :** Transformada de Fourier de la expresión temporal de la presión acústica.

- **Espectro cruzado, S_{12}** : Producto $p_2 \cdot p_1^*$, determinado a partir de las presiones acústicas complejas p_1 y p_2 en dos posiciones de micrófono.
- **Autoespectro, S_{11}** : Producto $p_2 \cdot p_1^*$, determinado a partir de las presiones acústicas complejas p_1 en la posición de micrófono 1.
- **Función de transferencia, H_{12}** : Función de transferencia desde la posición del micrófono uno a la dos, definido por el cociente complejo $p_2/p_1 = S_{12}/S_{11}$ o por S_{22}/S_{21} o por $[(S_{12}/S_{11})(S_{22}/S_{21})]$.
- **Factor de calibración, H_c** : Factor usado para corregir los desajustes de amplitud y fase entre los micrófonos.
- **Fase del factor de reflexión, Φ** : resultado de la representación del coeficiente de reflexión compleja por su módulo y su fase:

$$r = r' + jr'' = |r| \cdot e^{j\phi} = |r|(\cos\Phi + j \sin\Phi)$$

$$|r| = \sqrt{r'^2 + r''^2}$$

$$\Phi = \arctan \frac{r''}{r'}$$

$$r' = |r|\cos\Phi$$

$$r'' = |r|\sin\Phi$$

- **Intervalo de frecuencias de trabajo, f** : intervalo en el que se pueden efectuar las mediciones según el de impedancia dado:

$$f_1 \leq f \leq f_u$$

Donde f_1 y f_u son, respectivamente, las frecuencias límite inferior y superior.

- **Sección de ensayo**: sección del tubo de impedancia que no conlleva modos superiores y en la cual se pueden explorar las ondas estacionarias.

- **Sección de instalación:** sección del tubo de impedancia en donde se ha instalado la muestra de ensayo.
- **Absorbentes acústicos:** materiales con una gran capacidad de absorber la mayor parte de la energía que reciben, con lo que reflejan un porcentaje muy pequeño del sonido incidente. Los materiales absorbentes acústicos pueden clasificarse del siguiente modo:
 - a. Resonantes: presentan la máxima absorción a la frecuencia propia del material.
 - b. Porosos y fibrosos: absorben mejor el sonido a medida que aumenta la frecuencia, siendo más eficaces a altas frecuencias (sonidos agudos).
 - c. Paneles o membranas absorbentes: absorben mejor el sonido en bajas frecuencias (sonidos graves).

5. LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO

La generación del sonido se atribuye normalmente a la vibración de objetos sólidos que inducen vibraciones a las partículas del aire. Particularmente en gases, la propagación del sonido está condicionada por la temperatura, además de tener una atenuación con la distancia. No obstante, para comprender como se propaga, nos centraremos exclusivamente en los principios fundamentales, sin tener en cuenta estos factores.

El sonido necesita un medio para propagarse, que necesita ser además de elástico, másico. Es necesario de esta segunda propiedad debido a que la propagación del sonido consiste en variaciones locales de la densidad del medio. La forma de propagación de las ondas planas a través de un cierto medio u espacio, puede modelarse como un sistema de masa-resorte.

Si por ejemplo, un tubo se llena de aire, todo el volumen del mismo puede dividirse en secciones, y cada sección puede ser modelada como un resorte y un elemento de masa, tal como se muestra en la figura continuación. Cuando se genera un campo en un extremo, hay una única dirección posible de propagación.

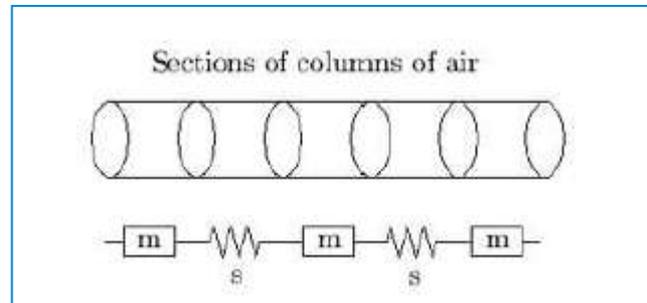


Fig.2: Secciones de aire en una columna de gases.

Siguiendo con las similitudes mecánicas, el campo sonoro sería una fuerza. Una fuerza de impulso inicial aplicada al sistema de izquierda a derecha, comprimiría el primer resorte, empujando la masa siguiente hacia la derecha.

Además, puesto que las masas tienen inercia, la segunda masa no reacciona al mismo tiempo en el que se aplicó la fuerza, sino con un cierto retraso. Por lo tanto y debido a la inercia, la segunda masa comenzaría a moverse gradualmente.

En este punto se pueden hacer las siguientes dos observaciones:

1. El proceso de traslación empujando las masas poco a poco hacia la derecha se repite para las siguientes masas, comprimiendo los resortes uno por uno, y en conjunto, transformando la alteración en una velocidad finita, denominada velocidad del sonido.
2. Un segundo fenómeno se produce cuando se empuja una masa de la cadena hacia la derecha. El resorte anterior está estirado, impidiendo así que la masa se desplace y tirando hacia la dirección opuesta. Entonces, la masa sigue el movimiento de un oscilador armónico en torno a un punto de equilibrio. Este movimiento de oscilación provoca otra velocidad a las masas, llamada

velocidad de partícula y es la velocidad con la que las partículas de gas vibran cuando un campo de sonido los excita.

La figura siguiente muestra un elemento de una columna de gas que está siendo acelerado por fuerzas elásticas. La masa de la misma, es:

$$m = S\rho_0 \Delta x \quad (1)$$

Donde:

- S es la superficie de la sección transversal,
- ρ_0 es la densidad del aire,
- Δx la longitud de la sección longitudinal.

La rigidez del volumen de gas se define como:

$$s = \frac{E_y S}{\Delta x} \quad (2)$$

Donde E_y es el módulo de Young o módulo de elasticidad y es una propiedad interna del material que define su elasticidad.

$$E_y = \rho_0 c^2 \quad (3)$$

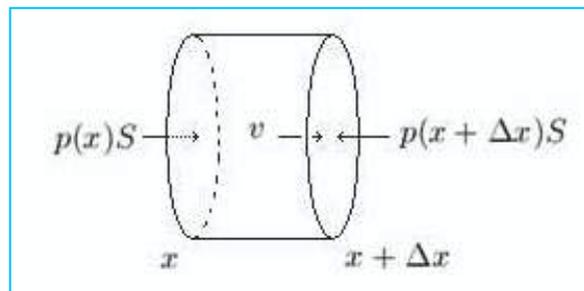


Fig.3: Elemento acelerado de una columna de gas

En resumen, cuando un campo de sonido se aplica a un volumen de gas, se induce el movimiento de los siguientes volúmenes de gas, transformando la alteración a una velocidad constante y finita (c). Sin embargo, las partículas de gas no se mueven hacia

delante, están excitadas y empiezan a oscilar a una frecuencia determinada siguiendo un movimiento de oscilación alrededor del punto de equilibrio, amortiguado por las partículas de alrededor del medio interno.

6. ENERGÍA DE PROPAGACIÓN Y DENSIDAD DE ENERGÍA

Como hemos visto, la propagación del sonido consiste básicamente en ondas de presión que se propagan a lo largo de un medio. Esto implica que las molécula de aire estén sometidas a vibraciones locales alrededor del punto de equilibrio, lo que significa por lo tanto que las partículas de gas momentáneamente almacenan la energía local antes de que la siguiente partícula comience a vibrar debido a la propagación. Se puede modelar el movimiento de vibración por medio de un sistema masa-resorte, cuyos resortes almacenan energía potencial y cuyas masas tienen una energía cinética debido a su movimiento.

La velocidad cinética de una masa m , moviéndose a una velocidad v , se expresa de la siguiente forma:

$$E_{cin} = \frac{1}{2}m|v|^2 \quad (4)$$

Un muelle con una rigidez s comprimida por una fuerza F tiene una energía potencial que se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_{pot} = \frac{1}{2}\frac{|F|^2}{s} \quad (5)$$

Usando la densidad del gas ρ_0 , se puede obtener la energía cinética de un elemento de un volumen de gas:

$$E_{cin} = \frac{1}{2}\rho_0|v|^2\Delta V \quad (6)$$

Aplicando ahora la misma idea a la ecuación de la energía potencial, considerando que $F = Ps$, donde p es la presión y $s = E_y S / \Delta x = \rho_0 c^2 \Delta x$; y teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores 2 y 3

$$E_{pot} = \frac{1}{2} |p|^2 \Delta x / (\rho_0 c^2 s) = \frac{1}{2} \frac{|p|^2 \Delta x}{\rho_0 c^2} \quad (7)$$

Por lo tanto, la cantidad total de energía que tiene un elemento de un volumen de gas excitado por una onda de presión sonora, es:

$$E_{\Delta V} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{|p|^2}{\rho_0 c^2} + \rho_0 |v|^2 \right\} \Delta V \quad (8)$$

Puesto que esta expresión puede variar ampliamente, dependiendo de la cantidad de partículas que se excitan, lo más común es trabajar con la densidad de energía, la cual nos da un valor de energía por unidad de volumen.

$$E = \frac{1}{2} \left\{ \frac{|p|^2}{\rho_0 c^2} + \rho_0 |v|^2 \right\} \quad (9)$$

La cantidad total de energía almacenada en un volumen de gas V , es por lo tanto:

$$E_V = E \cdot V \quad (10)$$

Es importante decir, para una mejor comprensión, que la energía de un gas tiene un comportamiento en forma de ondas, al igual que la presión de velocidad de partícula.

Si hay una onda progresiva propagándose:

$$p = f(t - t/c) \quad \text{y} \quad \frac{p(x,t)}{v(x,t)} = \rho_0 c \quad (11)$$

Luego, la energía resulta entonces:

$$E(x,t) = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} = \frac{1}{\rho_0 c^2} f^2(t - x/c) \quad (12)$$

La energía se propaga con el campo sonoro y, como éste, tiene un comportamiento en forma de ondas.

2. EL TUBO DE IMPEDANCIA: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA Y DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA.

2.1 EL TUBO DE IMPEDANCIA

Para predecir el rendimiento acústico de un diseño de ingeniería, es necesario conocer las propiedades acústicas de los materiales. Por lo tanto, un aspecto importante de la acústica son las mediciones exactas de las propiedades acústicas de los materiales, que pueden variar con la frecuencia, temperatura y presión ambiente.

Anteriormente a la década de 1930, el coeficiente de absorción acústica de un material era la propiedad más comúnmente medida para cuantificar el rendimiento acústico. Sin embargo, el problema con el coeficiente de absorción acústica es que es dependiente no sólo de las propiedades acústicas del material sino también de las propiedades del medio envolvente.

A finales de la década de los 1930, la impedancia acústica específica normal compleja fue reconocida como la principal propiedad medida para cuantificar el rendimiento acústico. La impedancia acústica específica normal puede ser compleja debido a que la presión acústica no está siempre en fase con la velocidad de la partícula en la superficie de un material sólido. A diferencia del coeficiente de absorción, la medición de la impedancia acústica específica normal compleja es independiente del medio que lo rodea y por lo tanto caracteriza mejor el propio material.

En definitiva, podemos decir que hay dos propiedades de interés: la velocidad de la fase longitudinal y la atenuación en el material.

Las propiedades se pueden derivar de la impedancia acústica específica normal compleja (también conocida como simple "impedancia acústica"). La impedancia acústica se puede derivar de las mediciones del coeficiente de reflexión complejo de una muestra.

Por otro lado, se distinguen también los términos "aire-acústico" y "subacuático-acústico", que hacen referencia a si los ensayos a los que se va a someter la muestra

para la que se desean conocer las propiedades acústicas se realizará en aire o bajo el agua.

Los materiales acústicos utilizados en acústica submarina están expuestos a diferentes temperaturas y presiones hidrostáticas. Por lo tanto, en este trabajo se abordan y recopilan los métodos utilizados para medir el coeficiente de reflexión complejo en las muestras bajo condiciones de laboratorio, es decir, donde la temperatura y presión son factores controlados. El control de la temperatura y la presión requiere que las mediciones sean realizadas en una cámara controlada.

El instrumento más comúnmente utilizado para medir el coeficiente de reflexión complejo de una muestra es un tubo largo de paredes rígidas, generalmente denominado como un tubo de impedancia o tubo de Kundt.

Se han ideado muchos métodos diferentes para medir la impedancia acústica usando un tubo de impedancia. No obstante, todos los métodos tienden a caer dentro de dos categorías generales: una primera categoría que incluye los métodos que emplean una técnica de onda estacionaria, y una segunda categoría que incluye los métodos que utilizan una técnica de pulso.

Aunque la teoría de estas dos técnicas es válida tanto para los medios de aire como bajo el agua, se ha observado que existen deficiencias específicas asociadas a las dos técnicas cuando se trata de medir materiales acústicos submarinos en frecuencias bajas.

Históricamente, los ensayos realizados con un tubo de impedancia para la acústica del aire han utilizado sólo la técnica de ondas estacionarias, a excepción de unos cuantos experimentos más recientes que han aplicado la técnica de pulso. Por el contrario, casi todas las mediciones de impedancia de los tubos de muestras para acústico subacuático han empleado la técnica de pulso.

La teoría fundamental detrás de ambos métodos se aplica cuando se opera en las frecuencias que permiten sólo la propagación de ondas planas en el tubo de impedancia. En la teoría ideal, las paredes del tubo se suponen perfectamente rígidas. Mediante la resolución de la ecuación de onda como un problema de contorno en un tubo con paredes rígidas, se puede encontrar la frecuencia del modo de onda no-plano. Por debajo de este "corte" de frecuencia, el tubo actúa como una guía de ondas acústicas para ondas planas, permitiendo que solamente el cero (u onda plana) se propague por la longitud del tubo. Sin embargo, en realidad las paredes de los tubos no son perfectamente rígidas (especialmente cuando el tubo está lleno de agua). Esto permitirá un modo adicional (un modo "pared") para su propagación en todas las frecuencias. El cumplimiento de la pared afectará también en el valor de la frecuencia de corte y en el resultado en el modo de orden cero siendo sólo una onda plana aproximada. No obstante, al hacer el tubo relativamente rígido y operando en el rango de frecuencia apropiado para la propagación de la onda plana, la aproximación de onda plana se admite como válida.

2. MÉTODO DEL TUBO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA, TUBO DE ONDAS ESTACIONARIAS O TUBO DE KUNDT.

El invento del tubo de impedancia acústica como medida para caracterizar materiales acústicamente se debe al físico alemán August Adolf Eduard Kundt (1839-1894). Fue el sucesor de H. Von Helmholtz y director del Berlin Physical Institute.

Su trabajo se centró principalmente en las áreas de sonido y la luz. Desarrolló un método para la investigación de las ondas dentro de los tubos basados en situar un material en forma de polvo (por ejemplo el lycodium⁹ en el interior de un tubo y

hacerlo vibrar. Con esto, el polvo se iba apilando en determinados nodos. Una variante de este método permite calcular la velocidad del sonido en diferentes gases.

En el año 1945, Scott describió un método para medir directamente la constante de propagación y obtener la impedancia característica de un material poroso para la constante de propagación, Scott dedujo una parte real (factor de propagación, relacionado con el cambio de fase por unidad de longitud) y una parte imaginaria (factor de atenuación, relacionado con la caída exponencial de la presión sonora en el material). El trabajo de Scott consistió en medir la caída de presión sonora en el interior de una muestra pasando un micrófono a través de la misma.

La constante de propagación, describe la variación espacial de la perturbación acústica en el interior del medio poroso.

Determinar la constante de propagación se reduce a determinar la atenuación y la longitud de onda de un onda plana propagándose por la muestra de lana de roca, que el material que Scott utilizó en su trabajo.

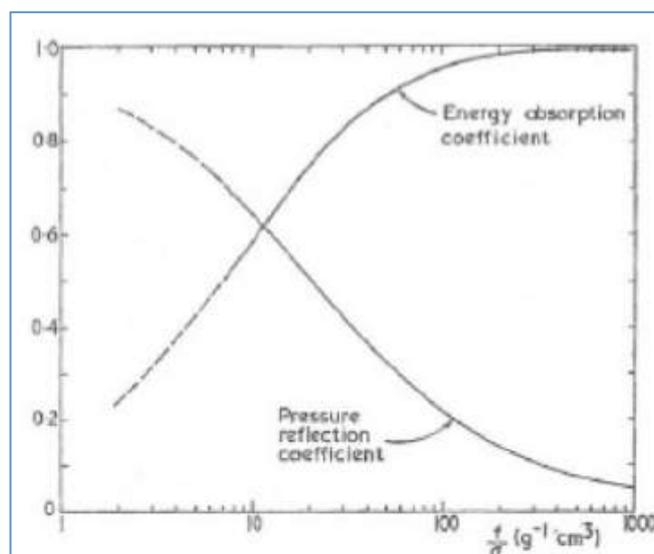
Scott llega a la conclusión de que la medida de la impedancia característica se define como la relación entre la presión sonora y la velocidad de la onda en el medio. También se trata de un parámetro complejo en el que la parte real es la resistencia y la parte imaginaria es la reactancia.

Dos años después, en 1951, los autores Ferrero y Sacerdote proponen una técnica basada en la realización de las medidas de impedancia acústica superficial. Demuestran que es posible el cálculo de la impedancia característica y de la constante de propagación de los materiales porosos midiendo la impedancia característica superficial, a partir de dos muestras del mismo material; siendo una de doble espesor que la primera. Este método ha sido conocido como el "método de los dos espesores". Las medidas se realizan a una única frecuencia.

En el año 1969, los autores Delany y Bazley presentan el trabajo en el que realizan medidas de la impedancia característica y de la constante de propagación de una serie de materiales absorbentes del sonido de tipo fibroso, presentando sus resultados en función de la frecuencia dividida por la resistencia de flujo. Esta fue obtenida directamente de la medida de la presión sonora a través de la muestra para una velocidad volumétrica conocida como flujo de aire pasando a través de la misma.

Estos llegan a una importante conclusión; A pesar de la variación entre el tamaño de la fibra y de su irregular distribución, la mayor parte de los materiales de tipo fibroso pueden considerarse suficientemente homogéneos e isótropos en la dirección de propagación de las ondas planas,

En el gráfico a continuación se muestran los resultados obtenidos del trabajo de Delany y Bazley, en la que se representan las curvas de los coeficientes de reflexión y de absorción acústica.



Gráfica 1. Curvas de los coeficientes de absorción y reflexión.

Este modelo de Delany y Bazley encuentra una de sus mayores aplicaciones en el cálculo del coeficiente de absorción acústica.

Así llegamos al concepto que caracteriza hoy en día a los materiales acústicos. Otros muchos investigadores progresaron en la investigación, pues este tipo de estudio es lo que permite llegar a los nuevos materiales con buen comportamiento acústico. De estos nombraremos dos: Attenborough, que a principios de la década de los 80, presenta un trabajo de gran importancia para la aplicación de los materiales absorbentes del sonido en la acústica arquitectónica.

En su trabajo, este autor revisa la teoría de propagación del sonido en materiales porosos con matriz rígida y poros cilíndricos perpendicularmente situados con respecto a la superficie del material.

Attenborough demuestra que es posible formular una teoría para la propagación del sonido en un material poroso con estructura rígida partiendo del modelo de poros cilíndrico.

Esta formulación se presenta como la alternativa de las teorías clásicas que trabajan con parámetro como el factor de estructura o la densidad efectiva de los materiales.

En el año 2000, el trabajo de Song y Bolton explica un procedimiento para determinar la impedancia acústica y la constante de propagación de los materiales porosos basados en la función de transferencia (la que adoptará la Norma UNE-EN ISO 10534-2).

En este trabajo se realiza una modificación del método convencional basado en el tubo de impedancia acústica. Se miden las presiones acústicas con micrófonos situados antes y después de la muestra para luego determinar la matriz de transferencia. Con este método resulta fácil determinar la impedancia característica y el número de onda de materiales porosos tanto de estructura rígida como flexible. El número de onda es un parámetro que indica el número de veces que se produce una fase concreta a lo largo de un metro de propagación. Se trata de un parámetro complejo

Existen dos métodos estandarizados para la utilización del tubo de impedancia y que se regulan bajo las normas UNE EN ISO10534-1 y UNE EN ISO10534-2.

La UNE-EN ISO 10534-2 se basa en la función de transferencia. Se aplica para el ensayo de la determinación del coeficiente de absorción acústica para la incidencia normal de absorbentes acústicos mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de un micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Puede aplicarse también para la determinación de la impedancia acústica superficial o la admitancia acústica superficial de los materiales. Puesto que los coeficientes de impedancia de un material absorben acústico se relacionan con sus propiedades físicas, tales como resistencia al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad, las mediciones descritas en este método de ensayo son útiles en investigación básica y en el desarrollo de productos.

El método de ensayo es similar al especificado en la Norma UNE-EN ISO 10534-1, en cuanto que ambos usan un tubo de impedancia con una fuente sonora conectada en uno de sus extremos y la muestra en ensayo el otro extremo. No obstante, la técnica de medición es diferente. Esta se basa en las magnitudes medidas de la variación de los niveles de presión acústica después de generar una onda estacionaria en su interior.

Finalmente, es de destacar que las condiciones en las que se realizan estos ensayos son muy concretas y controladas, lo que en ocasiones no representa de forma suficiente las condiciones reales de trabajo en las que estos materiales van a desempeñar su función a lo largo de su vida útil, aunque sirven de referencia para la fase previa de estudio de los mismos.

3. MÉTODO DEL RANGO DE ONDA ESTACIONARIA

3.1 FUNDAMENTOS

Este método se basa en el montaje de una muestra de ensayo en uno de los extremos de un tubo de impedancia rectilíneo, rígido, liso y estanco. Mediante un altavoz situado en el otro extremo del tubo, se produce una acústica senoidal incidente (p_i). La superposición ($p = p_i + p_r$) de la onda incidente (p_i) y de la onda reflejada (p_r) produce un sistema de ondas estacionarias en el tubo.

La figura que se muestra a continuación muestra una geometría típica básica de un tubo de ondas estacionarias.

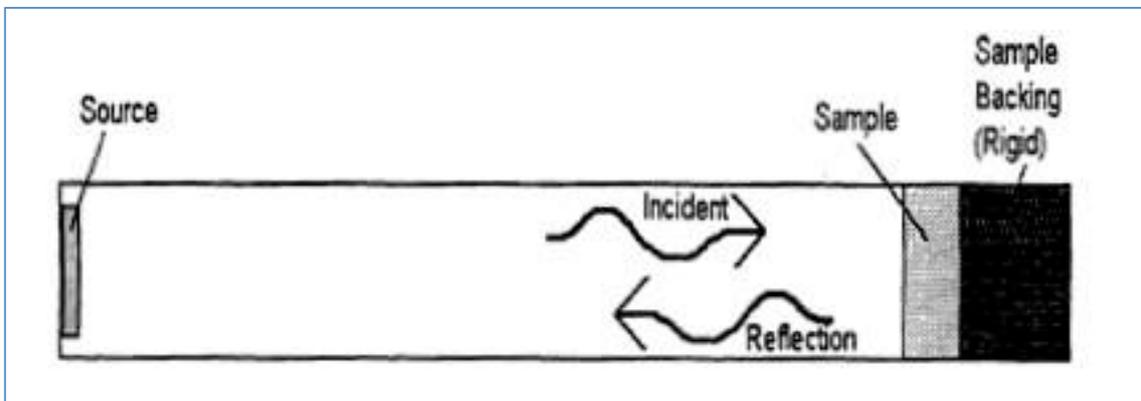


Fig. 4: Esquema de un tubo de impedancia típico.

En el tubo de ondas estacionarias se sitúa una fuente de ondas estacionarias continuas al final del tubo (o cámara larga), en uno de sus extremos. En el otro extremo del tubo se coloca una muestra de la cual se desconoce su impedancia acústica y que está, por lo general, apoyada contra un tapón rígido. En la condición de estado estable, hay ondas planas que viajan hacia y lejos de la muestra, y establecen un patrón de ondas estacionarias. Las propiedades acústicas desconocidas de la terminación (de la muestra más su respaldo rígido) se pueden resolver haciendo mediciones del patrón de onda estacionaria en el tubo. Las mediciones no se toman

directamente en la cara de la muestra, sino que se hacen a lo largo de la longitud del tubo.

La evaluación de este método se basa en las magnitudes medidas (según escala lineal o logarítmica) de los niveles de presión acústica en los mínimos de presión (uno o varios) y en los máximos de presión. Mediante la obtención de estos datos se podrá determinar el coeficiente de absorción acústica.

Indicamos que, normalmente, se debe elegir como primer máximo de presión a medir, el situado en los dos primeros mínimos, tal y como se indica en la figura siguiente.

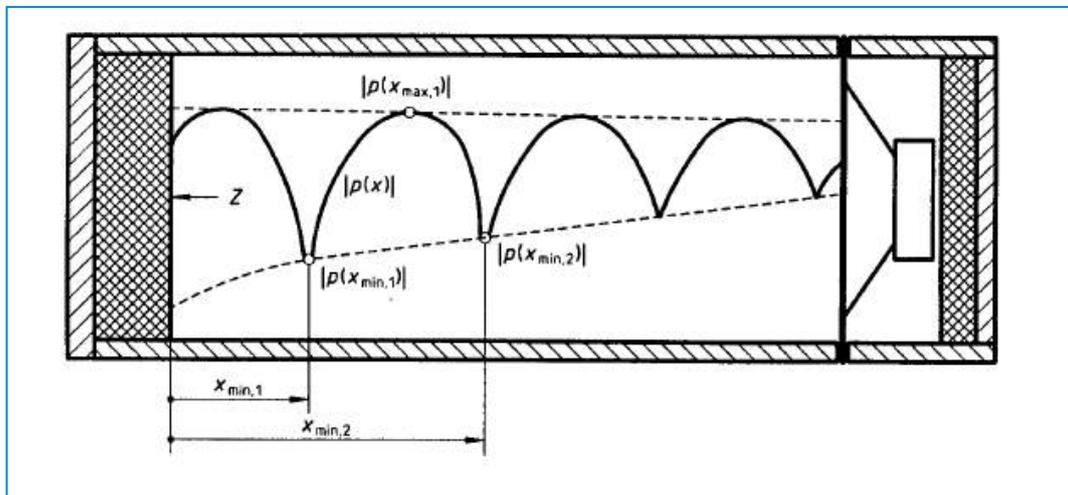


Fig. 5: Sistema de ondas estacionarias, ISO 10534.

Para el coeficiente de reflexión (r) y la impedancia (Z) o la admitancia ($G=1/Z$) deben determinarse además la distancia del primer mínimo de presión acústica al plano de referencia (situado en $x=0$, y que generalmente es el plano que contiene la superficie de la muestra de ensayo) y la longitud de onda.

3.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Este método se basa en el hecho de que solamente existen ondas planas incidentes y reflejadas que se propagan paralelamente al eje del tubo en la sección de ensayo, es decir, la sección en la que se explora el sistema de ondas estacionarias.

Asimismo, se supone además que las ondas acústicas se propagan en el tubo sin atenuación, pudiendo aplicar correcciones para atenuaciones residuales causadas por el rozamiento o por pérdidas térmicas en las paredes del tubo.

Por otro lado, tal y como se ha comentado, este método reside en el hecho de que solamente existen ondas planas incidentes y reflejadas, paralelamente al eje del tubo de la sección de ensayo. Así pues, deberán evitarse la producción de otras formas de ondas o modos superiores.

3.3. ANÁLISIS

La onda acústica incidente p_i se supone plana, armónica de frecuencia f y de pulsación $\omega = 2\pi f$, sin atenuación y propagándose a lo largo del tubo de impedancia (en el sentido de las x negativas):

$$p_i(x) = p_0 e^{jk_0 x}$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} \quad ; p_0 \text{ arbitraria}$$

La **onda reflejada por la muestra de ensayo** que tiene un coeficiente de reflexión r , se define por lo tanto como:

$$p_r(x) = r \cdot p_0 \cdot e^{-jk_0 x}$$

Las **velocidades de partícula de las ondas** (medidas positivamente en el sentido de las x negativas) son, respectivamente:

$$v_i = \frac{1}{Z_0} p_i(x)$$

$$v_r(x) = -\frac{1}{Z_0} p_r(x)$$

La **impedancia del campo** de ondas estacionarias (en el sentido de las x negativas) es:

$$Z(x) = \frac{p_i(x) + p_r(x)}{v_i(x) + v_r(x)} = Z_0 \frac{p_i(x) + p_r(x)}{p_i(x) - p_r(x)}$$

3.3.1 Relaciones

Así pues, en el plano de referencia $x = 0$, se obtienen las siguientes correlaciones:

$$Z = Z(0) = Z_0 \frac{1 + r}{1 - r}$$

De donde:

$$r = \frac{\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - 1}{\left(\frac{Z}{Z_0}\right) + 1}$$

El coeficiente de absorción acústica de ondas planas es:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

Donde $|r|$ se expresa en el módulo de magnitud compleja.

De esta forma, si el plano de referencia coincide con la superficie objeto de ensayo, las magnitudes anteriores son las siguientes:

- Z = impedancia de superficie de la muestra
- r = coeficiente de reflexión de la muestra (para incidencia acústica normal)
- α = coeficiente de absorción de la muestra (para incidencia acústica normal)

Por el contrario, si el plano de referencia está delante de la muestra de ensayo ($x > 0$), la impedancia y el coeficiente de reflexión pasan a ser magnitudes denominadas transformadas para una distancia entre el plano de referencia y la superficie del objeto. No obstante, el coeficiente de absorción no sufre modificación alguna.

a) Onda estacionaria

Se debe distinguir entre un máximo de presión y un mínimo de presión de una onda estacionaria. Para ello tenemos:

- Un máximo de presión se sitúa en un punto donde p_i y p_r están en fase, es decir:

$$|p_{max}| = |p_0| \cdot (1 + |r|)$$

- Un mínimo de presión se sitúa en un punto de oposición de fase, es decir:

$$|p_{min}| = |p_0| \cdot (1 - |r|)$$

Utilizando el rango de onda estacionaria:

$$s = \frac{|p_{max}|}{|p_{min}|}$$

Se obtiene:

$$s = \frac{(1+|r|)}{(1-|r|)}$$

$$|r| = \frac{s - 1}{s + 1}$$

b) Coeficiente de absorción acústica

El coeficiente de absorción acústica se define a partir de las ecuaciones anteriores en las que las amplitudes $|P_{max}|$ y $|P_{min}|$ se miden a una frecuencia dada.

Por otro lado, si la presión acústica en el tubo de impedancia se mide en una escala logarítmica, en decibelios, y ΔL es la diferencia entre los niveles de presión máxima y mínima, se tiene:

$$s = 10^{\Delta L/20}$$

Por lo que el coeficiente de absorción resulta de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2}$$

c) Coeficiente de reflexión

El ángulo de fase (Φ) del coeficiente de reflexión complejo proviene de la condición de fase para un mínimo de presión de la onda estacionaria:

$$r = |r| \cdot e^{j\Phi}$$

$$\Phi + (2n - 1)\pi = 2k_0 x_{min,n}$$

para el n-ésimo mínimo (siendo $n = 1, 2, \dots$) delante del plano de referencia, hacia la fuente acústica.

De donde:

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 2n + 1 \right)$$

Siendo para el primer mínimo ($n=1$):

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

El coeficiente de reflexión compleja se expresa de la siguientes forma:

$$r = r' + jr''$$

$$r' = |r| \cdot \cos \alpha$$

$$r'' = |r| \cdot \sin \alpha$$

d) Impedancia

La impedancia normalizada se define como: $z = Z/Z_0$

$$z = z' + jz''$$

$$z' = \frac{1 - r'^2 - r''^2}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

$$z'' = \frac{2r''}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

e) Longitud de onda:

La longitud de onda λ_0 a la frecuencia f de la señal acústica se determina según la siguiente ecuación:

$$\lambda_0 = c_0/f$$

Donde c_0 es la velocidad del sonido.

Esta longitud de onda se define igualmente por la distancia entre mínimos de presión de la onda estacionaria designados por n y m respectivamente:

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{min,n} - x_{min,m})$$

3.4 MÉTODOS PARA DETERMINAR CORRECCIONES

Tal y como se ha comentado, se pueden aplicar correcciones para atenuaciones residuales causadas por el rozamiento o por pérdidas térmicas en las paredes del tubo ya que el método supone que las ondas acústicas se propagan en el tubo sin atenuación. Para ello, se pueden realizar las mediciones preliminares que se detallan a continuación.

3.4.1 Determinación del centro acústico de la sonda microfónica.

Para resolver las ecuaciones que nos permiten calcular el ángulo de fase para la obtención del coeficiente de reflexión así como para la longitud de onda es necesario determinar la posición de los mínimos de presión acústica.

El centro de presión acústica de la apertura de toma del sonido de la sonda del micrófono y la de sus centros geométricos pueden ser distintos por lo que debe determinarse el centro acústico de la sonda microfónica. Ello se realiza a frecuencias dentro del intervalo de trabajo, para distancias que no excedan un tercio de octava y con el portamuestras vacío.

Los mínimos de presión están a las siguientes distancias respecto a la placa de cierre rígida, situada en $x = 0$:

$$x_{min,n} = (2n - 1)\lambda_0/4 \quad (\text{con } n = 1, 2, \dots)$$

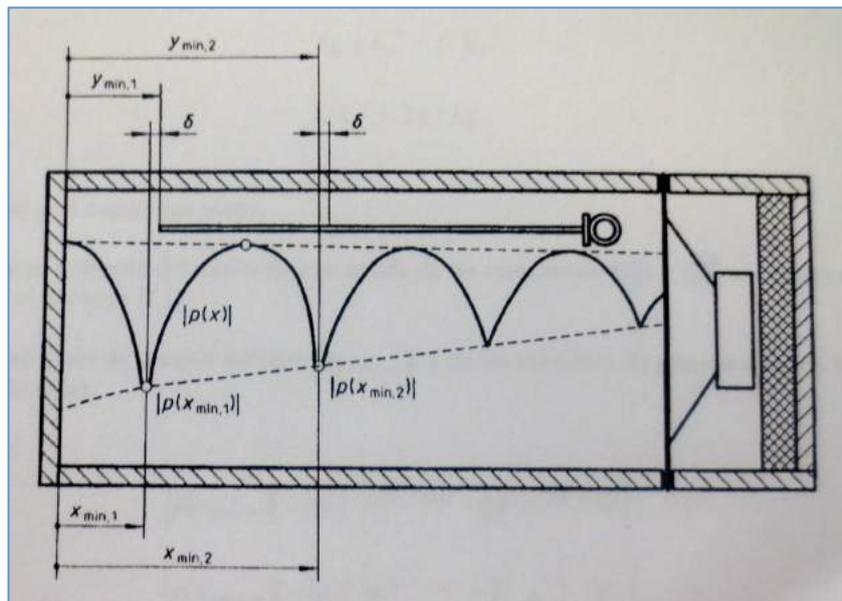


Fig.6. Determinación del centro acústico de la sonda microscópica.

Si $Y_{min,1}$ e $Y_{min,2}$ son los valores medidos de la posición del centro de geométrico de la sonda microfónica, la corrección δ por la cual el centro acústico de la sonda está a la izquierda del centro geométrico, se obtiene de la siguiente relación:

$$\delta = \frac{1}{2} (3y_{min,1} - y_{min,2})$$

Esta corrección debe aplicarse a todos los valores medios medidos de $y_{min,n}$ para resolver las ecuaciones para la obtención del ángulo de fase en la determinación del coeficiente de reflexión, mediante:

$$x_{min,n} = y_{min,n} - \delta$$

3.4.2. Determinación de la longitud de onda.

La determinación de la longitud de onda se re realiza mediante la determinación experimental de la velocidad del sonido c_0 en el tubo de impedancia. La longitud de onda se deduce a partir de:

$$\lambda_0 = c_0/f$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{min,n} - x_{min,m})$$

La determinación de c_0 debe hacerse en un tubo con terminación rígida a frecuencias en intervalos de tercio de octava en todo el intervalo de frecuencias de trabajo.

Para ello, se determinan las longitudes de onda $\lambda_0(f)$ a partir de los mínimos de presión $x_{min,n}$. La velocidad del sonido es entonces:

$$c_0(f) = \lambda_0(f) \cdot f$$

La curva de estos valores, cuando se traza en función de la frecuencia puede ser alisada e interpolada. Las pendientes marcadas o los picos de la curva son indicaciones de error del montaje experimental (perdidas en el tubo de impedancia, modos superiores, frecuencia...etc).

Si se determina c_0 a una temperatura T_0 (medida en grados Kelvin), los valores deben corregirse para la temperatura según las siguientes ecuaciones:

$$c_0(T) = c_0(T_0) \sqrt{T/T_0}$$

$$c_0(T) = 343,30\sqrt{T/293} \ ; \ m/s$$

3.5 FORMAS PARA EVITAR MODOS SUPERIORES

A continuación se explican los métodos utilizados para evitar la producción de otras formas de ondas o modos superiores que se basan en el control de la instrumentación de ensayo a partir de la Norma ISO 10534-1:1996.

3.5.1 Control del rango de onda estacionario

En el tubo de impedancia, las figuras de las ondas estacionarias deben registrarse con un portamuestras sin muestra, preferentemente con un movimiento continuo y lento de la sonda microfónica a través de la sección de ensayo.

Los registros deben repetirse en todo el intervalo de frecuencias, espaciados en saltos que no excedan un tercio de octava, y añadiendo frecuencias intermedias en el caso de que se observen variaciones importantes de las figuras del sistema de ondas estacionarias registrado entre dos frecuencias sucesivas de tercio de octavas vecinas.

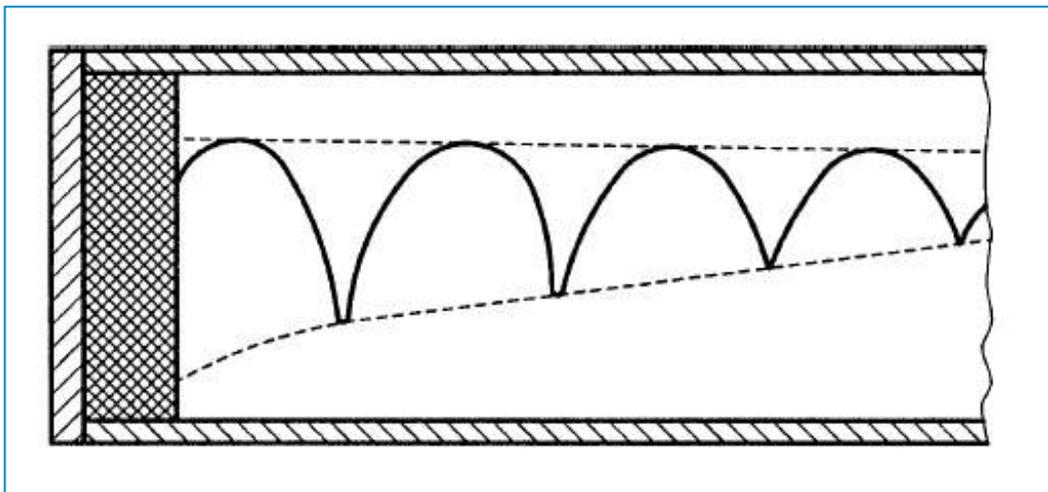


Fig.7: Sistema de ondas estacionarias regular con atenuación en el tubo de medición.

Los rangos de onda estacionaria de los sistemas registrados no deben ser menores de 45dB y la envolvente de los mínimos de presión debe ser de pendiente horizontal o de

pendiente monótonamente ascendente hacia el extremo del lado del altavoz del tubo de impedancia, tal como se muestra en la figura anterior.

Por otro lado, los sistemas de ondas estacionarias no deben incluir ondas residuales.

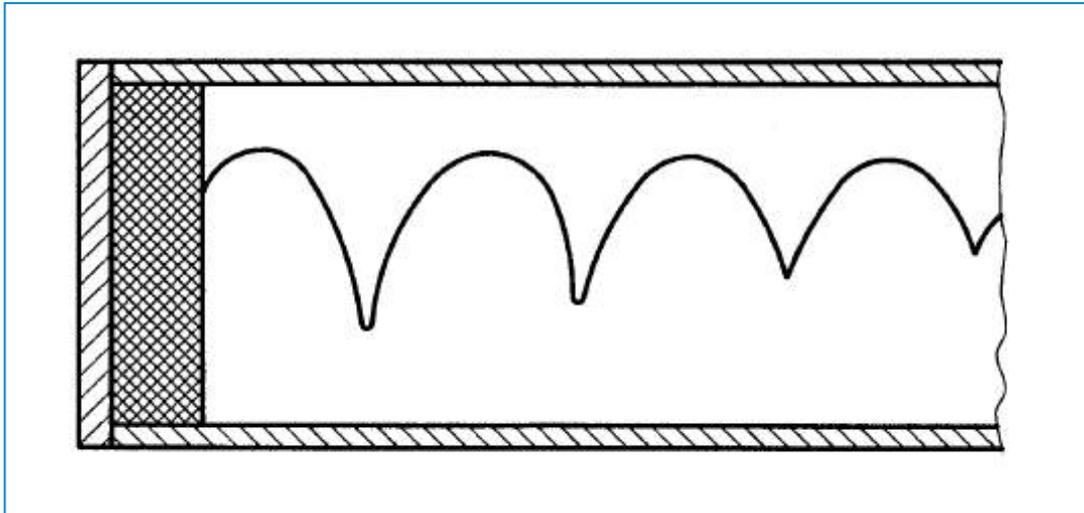


Fig. 8: Ondas residuales de un sistema de ondas estacionarias.

El hecho de que estas condiciones no se cumplan puede ser debido a las siguientes causas, que pueden combinarse:

1. La existencia de una atenuación demasiado elevada en el tubo de impedancia (paredes rugosas, porosas, en vibración, pérdidas en los ángulos, cables y en la sección de ensayo). Ello provoca un aumento muy fuerte en la envolvente inferior con rangos de onda estacionaria demasiado débiles.
2. Los rangos de onda estacionarios son demasiado débiles provocado por una diafonía aérea o por vía sólida (aislamiento insuficiente del altavoz, vibraciones del tubo de sonda) o por una dinámica de la unidad de tratamiento de señales demasiado débil (ruido electrónico/acústico, atenuación demasiado elevada en el tubo sonda).
3. La existencia de un aumento no monótono de la envolvente inferior (ver figura) causado por modos superior en la sección de ensayo (excitación demasiado fuerte de los modos superiores provocada por el altavoz, modos superiores

causados por la sonda, el micrófono, soportes o por otro objeto en la sección de ensayo, paredes del tubo en vibración o pérdidas en los ángulos del tubo). Otra causa podría ser el ruido por vía sólida en el tubo de impedancia y/o en la sonda.

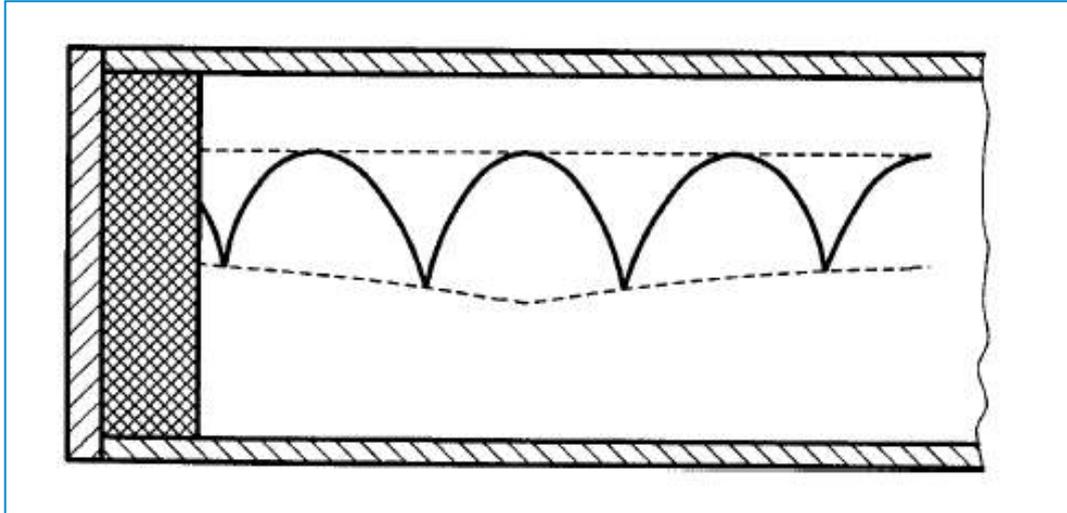


Fig.9: Sistema de ondas estacionarias irregular debido a la superposición de modos superiores.

4. La existencia de rizados en las figuras de las ondas estacionarias provocados por armónicos superiores de la señal (filtrado insuficiente, alinealidad del sistema, trepidaciones de un objeto en la sección recta, tal como la sonda y sus soportes).
5. Aparición de mínimos redondeados debido a la señal en los mínimos por debajo del ruido electrónico o del ruido de fondo (atenuación demasiado fuerte en la sonda, amplitud demasiado débil en la señal, etc.)

En general, la excitación resonante debida a las vibraciones de la sonda no depende únicamente de la frecuencia sino también de la posición de la sonda.

3.5.2. Dinámica de la sonda microfónica

Es recomendable la realización de un primer control para la determinación de los niveles del ruido de fondo (electrónico y acústico, a las mismas frecuencias que el apartado B.1) con la señal desactivada, realizándose estos controles con un micrófono móvil con desplazamiento continuo.

Posteriormente se realiza un segundo control, con la obturación de la apertura de toma de sonido del tubo sonda, a las mismas frecuencias anteriores, pero con la señal activada.

La señal recibida, debe ser como mínimo superior a la señal del segundo control en 5dB para todas las frecuencias y todas las posiciones de la sonda microfónica; esta señal debe ser superior al nivel de ruido de fondo del primer control en 10dB como mínimo.

En el caso de que la segunda exigencia no se satisfaga, hay que utilizar amplitudes de señal más elevadas y/o un filtrado más eficaz. Si la primera exigencia no se cumple, se debe comprobar que la atenuación del tubo sonda no es demasiado elevada (tubo de sonda mayor), mejorar el aislamiento de las vibraciones y el aislamiento del altavoz (diafonía aérea).

3.5.3 Control de la excitación del tubo por vía sólida

Después de haber controlado y eliminado la emisión por vía sólida de la sonda microfónica mediante los casos anteriores y de asegurar que los rangos de ondas estacionarias son inferiores a 45dB, la emisión por vía sólida del tubo de impedancia puede ser la responsable de sus prestaciones insuficientes.

Para controlar este punto, se requiere la instalación de un tapón de un material absorbente, constituido de fibras minerales (cuya densidad esté comprendida entre 20Kg/m³ y 100Kg/m³) y de 0,5m a 1m de longitud, en el tubo de impedancia en el

límite de la sección de ensayo del lado del altavoz. Este tapón se cubre por cada lado por placas de revestimiento cuyo peso por unidad de superficie sea como mínimo igual a 20Kg/m².

Estas placas se montan en el tubo sin contacto directo con las paredes del tubo y se sellan en sus bordes. Se registran los niveles de presión acústica para las frecuencias de ensayo, desplazando el micrófono a lo largo de la sección de ensayo del tubo de impedancia.

Los niveles de presión acústica registrados de esta manera deben ser menores que los niveles mínimos de ensayo de acuerdo con el apartado B.1. Si los niveles mínimos de presión en este control son compatibles con los anteriores, debe mejorarse el aislamiento a las vibraciones entre el altavoz y el tubo de impedancia.

5. COMPONENTES NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DEL TUBO DE IMPEDANCIA

El tubo de impedancia acústica está formado por los siguientes componentes principales:

1. Tubo de impedancia.
2. Porta muestras.
3. Sonda microfónica.
4. Unidad de tratamiento de señales para las señales del micrófono.
5. Instrumentación de análisis de señales.
6. Altavoz.
7. Generador de señales senoidales.
8. Terminación absorbente del tubo de impedancia (opcional/según necesidades de ensayo).

9. Termómetro.

A continuación se describen las principales características y elementos que conforman los principales componentes de un tubo de impedancia.

1. Tubo de Impedancia:

El tubo de impedancia debe ser construido de un material y forma tal que cumpla con los siguientes requisitos:

- El tubo de impedancia debe ser rectilíneo, de sección recta constante. Se recomiendan secciones circulares o rectangulares (en este caso, preferentemente cuadradas)
- Las paredes del tubo deben ser rígidas, no porosas y sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo.
- Asimismo, las paredes deben ser lo suficientemente pesadas y macizas para no vibrar debido a las señales acústicas así como no presentar resonancias en el intervalo de frecuencias de trabajo del tubo.
- Es aconsejable que el tubo de impedancia sea metálico o construido en hormigón estanco y liso para secciones mayores.
- Otra opción es la fabricación del tubo a partir de madera. No obstante, en este caso se recomienda reforzar y amortiguar las paredes con un revestimiento exterior de láminas de acero o plomo.
- Es importante que los ángulos no presenten ningún defecto y estén correctamente sellados.

Otro aspecto a destacar está relacionado con el intervalo de frecuencias de trabajo ($f_1 < f < f_u$) del tubo, ya que está determinado por su longitud y su sección. La longitud de la sección de trabajo debe ser $l \geq 3\lambda_0/4$ a la frecuencia límite inferior f_1 .

La longitud del tubo entre la cara anterior de la muestra de ensayo y el altavoz, está ligada a la frecuencia límite inferior f_1 del intervalo de frecuencias de trabajo por la siguiente relación:

$$l \geq \frac{250}{f} + 3d$$

Donde:

- l es la longitud en metros,
- f es la frecuencia en hercios,
- d es el diámetro interior (o la longitud lateral máxima), en metros,

La frecuencia límite superior de uso del tubo, f_u , está dada por la posible llegada de una propagación de modos superiores. La condición para f_u es:

- Para tubos de sección rectangular:

$$d \leq 0,5\lambda_0$$

$$f_u \cdot d \leq 170$$

Donde:

- d es la longitud lateral máxima, en metros.
 - f_u expresada en hercios
- Para tubos de sección circular:

$$d \leq 0,58\lambda_0$$

$$f_u \cdot d \leq 200$$

Donde:

- d es el diámetro interior, en metros.
- f_u expresada en hercios

2. Porta muestras

Este elemento puede estar integrado en el tubo o simplemente ser un elemento separado, en cuyo caso debe conseguirse un cierre hermético del tubo.

Las características que debe cumplir este elemento son las siguientes:

- La longitud del porta muestras debe ser tal que se pueda instalar las muestras de ensayo, asegurando un volumen de aire adecuado.
- En caso de ser un elemento separado, debe adaptarse al tubo con una precisión del 0,2% en su forma y dimensiones, siendo el montaje del tubo hermético, sin presencia de juntas elásticas.
- La placa posterior del portamuestras debe ser rígida y estar fija herméticamente al tubo. Se recomienda una placa metálica de un espesor mínimo de 2cm.

A modo de ejemplo, a continuación adjuntamos un esquema de los dos tipos de porta muestras posibles, según la norma ISO 10534-1. En el primer esquema se observa un porta muestras con tapa móvil integrado en el tubo y en el segundo un porta muestras separado.

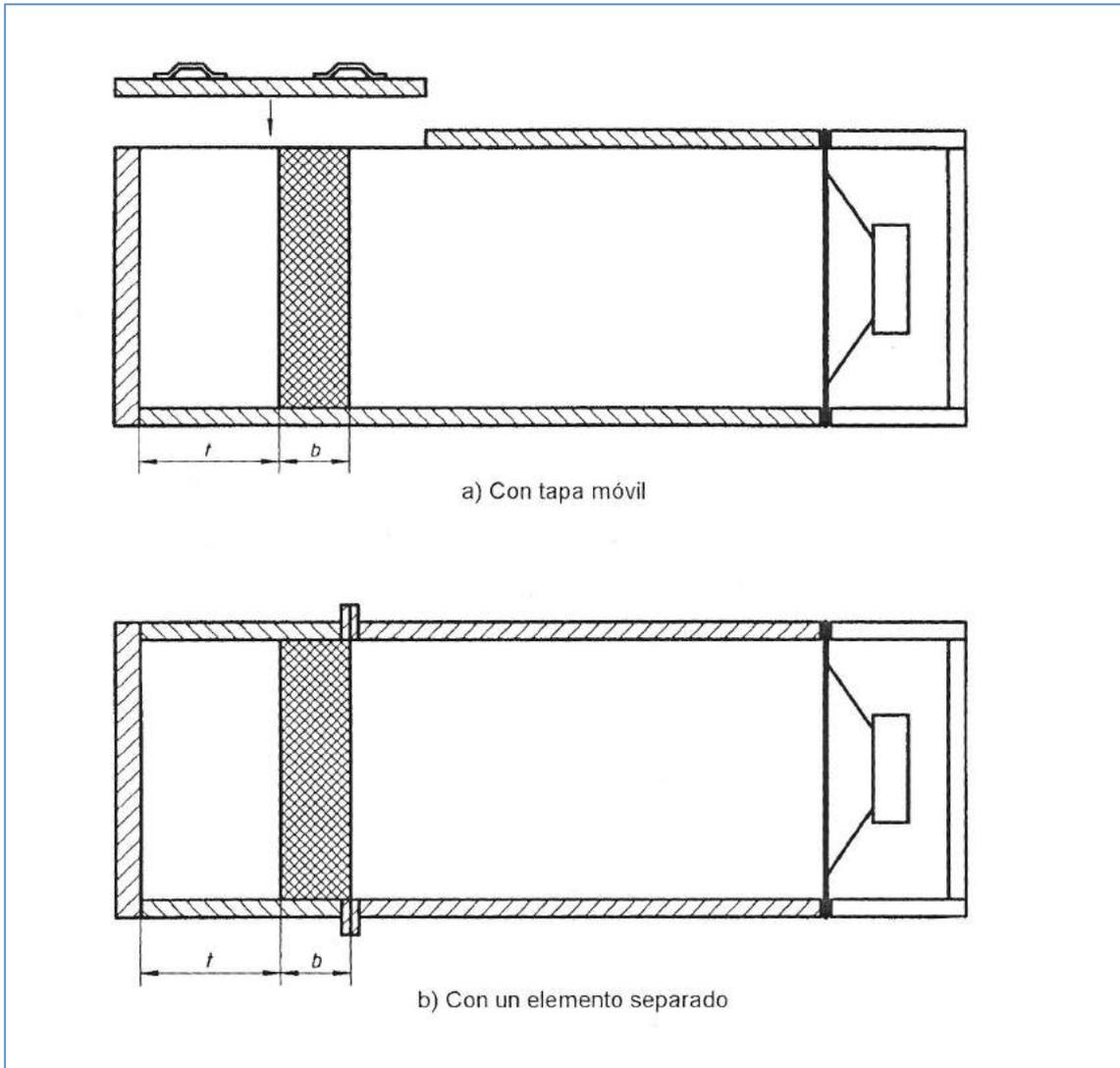


Fig 10: Esquema porta muestras

3. Micrófono

Se utiliza un micrófono móvil para registrar el sistema de ondas estacionarias en el tubo de impedancia. Ello permitirá la localización de máximos y mínimos de presión.

El micrófono puede ser de dos tipos:

- Un micrófono que se desplace por el exterior del tubo de impedancia que esté conectado a una sonda situada en el interior del tubo.
- Un micrófono móvil, colocado en el interior del tubo de impedancia.

No obstante, para cualquiera de los dos tipos de micrófonos que se utilice, es imprescindible su correcta instalación y posición, para poder evitar posibles vibraciones e impedir alteraciones del campo acústico.

4. Unidad de tratamiento de señales para las señales del micrófono.

Con ello nos referimos a la sonda microfónica y a la posición de su centro acústico así como del dispositivo de desplazamiento y de medida de la posición del micrófono.

5. Instrumentación de análisis de señales

La instrumentación de análisis de señales se compone por los siguientes elementos, que permitan realizar mediciones superiores a los 60dB:

- Un amplificador
- Un filtro
- Un aparato de medición de presión o nivel acústico
- Un registrador continuo de ondas estacionarias.

6. Altavoz

En el extremo opuesto al porta muestras en el tubo de impedancia, se coloca un altavoz, que puede colocarse en el eje del tubo, inclinado, o en una posición acodada, que permita el espacio suficiente para la sonda microfónica.

Este altavoz, deberá colocarse en una caja aislada que evite diafonía con el micrófono.

7. Generador de señales

El generador de señales está formado por los siguientes componentes:

- Un generador de señales senoidales
- Un amplificador de potencia
- Un frecuencímetro.

La generación, fluctuación de señal y la lectura de la frecuencia debe tener una precisión menor que 2%.

8. Terminación del altavoz

El nivel de presión acústica en el interior del tubo de impedancia varía en función de la frecuencia por lo que podría causar problemas en el caso de que la columna de aire entrara en resonancia en el tubo. Por ello, hay que aplicar un material acústico absorbente poroso en el interior del tubo y en la zona próxima al altavoz.

A continuación adjuntamos unos esquemas en el que se muestran algunos ejemplos de tipos de terminaciones del altavoz, según la norma ISO 10534-1.

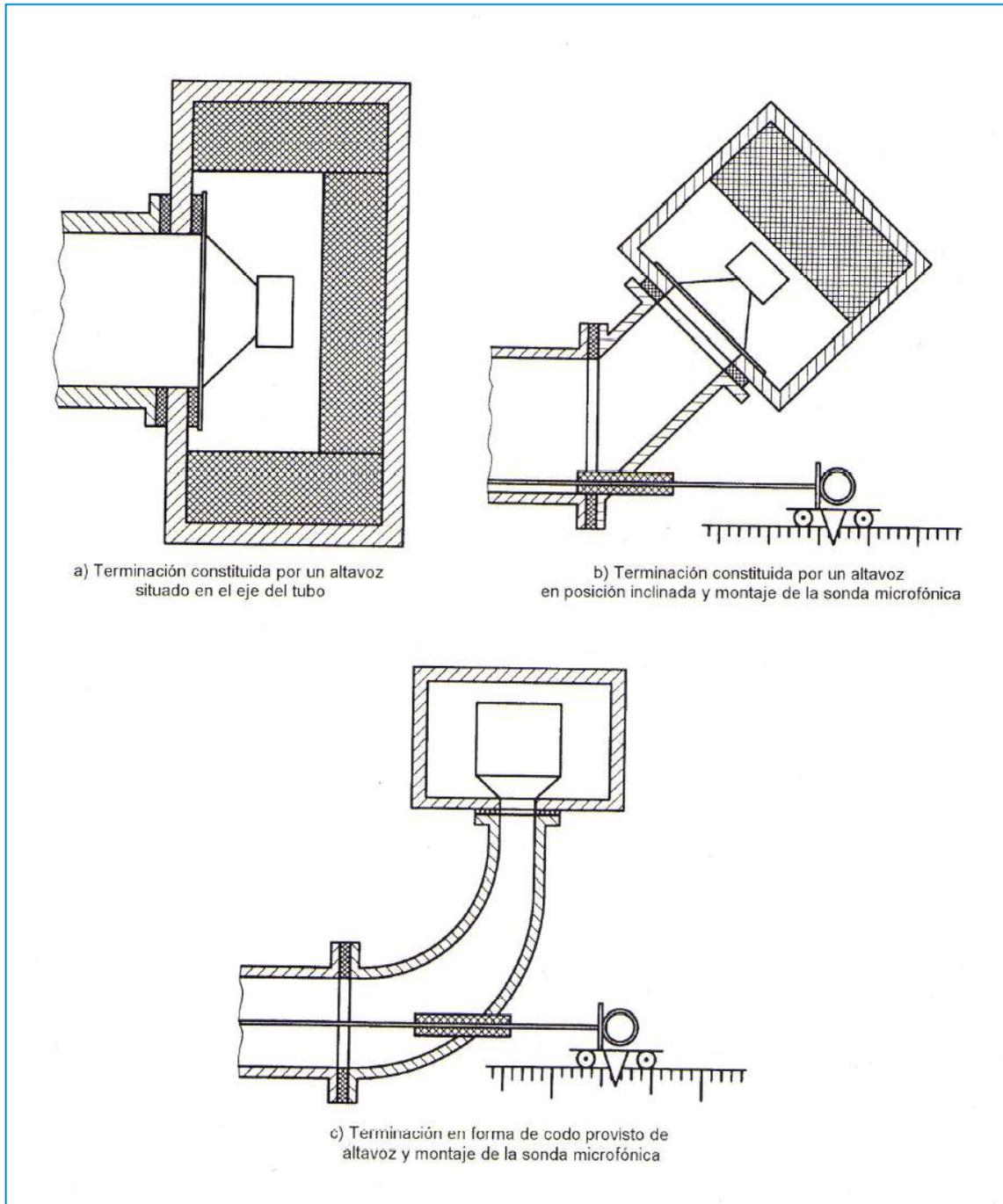


Fig.11: Tipos de terminaciones de altavoz

9. Termómetro

Este componente nos permitirá medir la temperatura en el interior del tubo de impedancia y mantenerla constante durante todo el proceso y permitir así desviaciones menores a 1K.

A su vez, el termómetro nos permitirá controlar la velocidad del sonido c_0 y la longitud de onda λ_0 puesto que son factores que dependen de la temperatura tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$c_0(T) = c_0(T_0)\sqrt{T/T_0}$$

6. ENSAYOS Y MEDICIONES PRELIMINARES

Para evitar cometer errores y satisfacer las exigencias mínimas de la normativa, se deben realizar una serie de mediciones para el control de la instrumentación, que deberán repetirse tras la modificación de cualquier material implicado en el ensayo.

Asimismo, se pueden realizar mediciones preliminares antes de los ensayos y después de los controles de la instrumentación. Dichos ensayos se realizan con una terminación rígida del tubo de impedancia vacía que no permita determinar los siguientes aspectos:

- a) El centro acústico de la sonda microfónica
- b) La longitud de onda o la velocidad del sonido en el tubo de impedancia
- c) Las correcciones por atenuación en el tubo

A continuación se detallan dichas mediciones preliminares:

a) Determinación del centro acústico de la sonda microfónica

Para la realización de este punto, se deben determinar la posición de los mínimos de presión acústica para resolver las siguientes ecuaciones, relacionadas con el ángulo de fase del coeficiente de reflexión y la longitud de onda (expresiones citadas anteriormente):

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 2n + 1 \right)$$

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{min,n} - x_{min,m})$$

Es necesario determinar el centro acústico de la sonda microfónica ya que el centro acústico de la apertura del sonido de la sonda o del micrófono pueden ser diferentes a sus centros geométricos. Ello se realiza a frecuencia dentro del intervalo de frecuencias de trabajo, para distancias que no excedan de un tercio de octava y con el porta muestras vacío y suponiendo que la placa de cierre (rígida) está situada en $x=0$.

Los mínimos de presión están a distancias según:

$$x_{min,n} = (2n - 1)\lambda_0/4 \quad , \quad \text{con } n = 1, 2, \dots$$

Si y es el valor medio de la posición del centro geométrico de la sonda, $y=0$ corresponde a la extremidad rígida. Si $y_{min,1}$ e $y_{min,2}$ son los valores medios de las posiciones de la sonda microfónica (estando respectivamente en el primer y segundo mínimo), la corrección δ viene dada por la relación siguiente:

$$\delta = \frac{1}{2} (3y_{min,1} - y_{min,2})$$

Esta corrección se aplica a todos los valores medidos de $y_{min,n}$ para resolver las ecuaciones anteriormente citadas en este apartado, con la ayuda de :

$$x_{min,n} = y_{min,n} - \delta$$

Siendo δ negativo cuanto el centro acústico esté situado a la derecha.

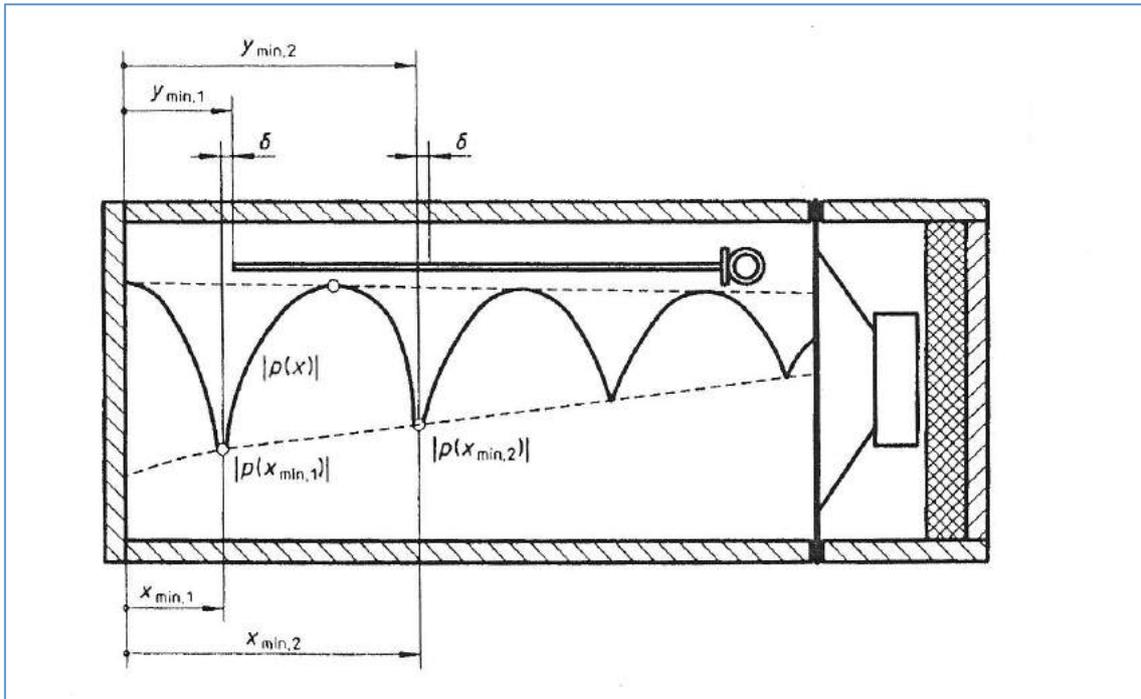


Fig.12: Determinación del centro acústico de la sonda microfónica.

b) Determinación de la longitud de onda

La determinación de la longitud de onda se realiza preferentemente mediante la determinación experimental de la velocidad del sonido c_0 en el tubo de impedancia.

La longitud de onda se deduce a partir de :

$$\lambda_0 = c_0/f$$

La determinación de c_0 se realiza en un tubo de impedancia con terminación rígida a frecuencias en intervalos de tercio de octava en todo el intervalo de frecuencias de trabajo.

Para ello, se determinan las longitudes de onda $\lambda_0(f)$ a partir de las posiciones de los mínimos de presión $x_{min,n}$ con la ayuda de la ecuación siguiente:

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{min,n} - x_{min,m})$$

La velocidad del sonido es entonces:

$$c_0(f) = \lambda_0(f) \cdot f$$

Si la determinación de c_0 se realiza a una temperatura T_0 (en grados kelvin), los valores deben corregirse para la temperatura T según:

$$c_0(T) = c_0(T_0) \sqrt{T/T_0}$$

La velocidad del sonido a la temperatura de ensayo puede determinarse también mediante la relación

$$c_0 = 343,33 \sqrt{T/293} \quad ; \text{ m/s}$$

c) Determinación de las correcciones por atenuación en el tubo

La onda acústica incidente $p_i(x)$ y la onda acústica reflejada $p_r(x)$ generalmente se atenúan durante la propagación a causa de la viscosidad y la pérdidas térmicas. El efecto principal de la atenuación es a elevación monótona de las amplitudes de los mínimos de presión acústica cuando aumenta la distancia a la superficie reflectante.

La atenuación puede describirse como:

$$k_0 = k'_0 - jk''_0$$

$$k'_0 = 2\pi/\lambda_0$$

donde :

- K_0'' es la atenuación, en nepers por metro
- K_0' es el número de onda real
- λ_0 es la longitud de onda

La longitud de onda puede determinarse, como ya se ha visto, a partir de:

$$\lambda_0 = c_0/f$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{min,n} - x_{min,m})$$

Las amplitudes de los mínimos y máximos de presión acústica $|p(x_{min,n})|$ y $|p(x_{max,n})|$ vienen dados por las siguientes relaciones:

$$|p(x_{min,n})| = |p_0| \cdot |e^{k_0'' x_{min,n}} - r| e^{-k_0'' x_{min,n}}$$

$$|p(x_{max,n})| = |p_0| \cdot |e^{k_0'' x_{max,n}} - r| e^{-k_0'' x_{max,n}}$$

siendo $n = 1, 2, \dots$ y empezando con el mínimo más a la izquierda, situado a la derecha del plano de referencia y con el primer máximo situado a la derecha del mínimo nº1.

El valor absoluto del coeficiente de reflexión viene dado por:

$$|r| = \frac{s_n \cdot e^{k_0'' x_{min,n}} - e^{k_0'' x_{max,n}}}{s_n \cdot e^{-k_0'' x_{min,n}} + e^{-k_0'' x_{max,n}}}$$

Dado que :

$$x_{max,n} = x_{min,n} + \lambda_0/4$$

El valor absoluto del coeficiente de reflexión resulta finalmente:

$$|r| = e^{2k_0'' x_{min,n}} \left(\frac{s_n - e^{k_0'' \lambda_0/4}}{s_n + e^{-k_0'' \lambda_0/4}} \right)$$

Poniendo:

$$k_0'' x_{min,n} = 4(k_0'' \lambda_0/4)(x_{min,n}/\lambda_0)$$

Siendo la magnitud $k_0'' \lambda_0/4$ necesaria para la corrección y determinándose con el tubo vacío con terminación rígida, $|r| = 1$.

Se obtiene:

$$|p(x_{min,n})| = 2|p_0| \cdot \sinh(k''_0 x_{min,n})$$

$$|p(x_{max,n})| = 2|p_0| \cdot \cosh(k''_0 x_{max,n})$$

Si la magnitud Δ_n se define por la relación:

$$\Delta_n = \frac{|p(x_{min,n+1})| - |p(x_{min,n})|}{|p(x_{max,n})|}$$

se tiene entonces:

$$\Delta_n = 2 \sinh\left(\frac{k''_0 \lambda_0}{4}\right)$$

y por consiguiente:

$$\frac{k''_0 \lambda_0}{4} = \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta_n}{2} = \ln \left[\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right]$$

$$e^{\pm \frac{k''_0 \lambda_0}{4}} = \left[\frac{\Delta_n}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_n^2}{4} + 1} \right]^{\pm 1}$$

Por otro lado, el ángulo de fase Φ del coeficiente de reflexión viene dado por las dos ecuaciones siguientes:

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

$$r = r' + jr''$$

El valor ficticio del primer mínimo p_0 , cuando está en la superficie del objeto $x=0$, puede obtenerse por aproximación definiendo el rango de onda estacionaria corregido s_0 mediante:

$$s_0 = \frac{|p(x_{max,1})|}{|p_0|}$$

y sustituyendo en esta ecuación el valor de s_0 :

$$\frac{1}{s_0} = \frac{1}{s_1} + \frac{2x_{min,1}}{\lambda_0} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right)$$

donde s_1 y s_2 son los valores de onda estacionaria en el primero y segundo mínimo, que encuadran el máximo de presión $|p(x_{max,1})|$.

Este rango de onda estacionaria corregido (s_0) debe aplicarse a la siguiente ecuación, en lugar de s :

$$s = 10^{\Delta L/20}$$

No obstante, las mediciones en el extremo inferior del intervalo de frecuencias de trabajo, pueden estimarse numéricamente en caso de que no puedan determinarse alguno de los mínimos con suficiente precisión, mediante la siguiente estimación:

$$k_0'' = 1,94 \cdot 10^{-2} (\sqrt{f/c_0 \cdot d})$$

siendo:

- d el diámetro (en metros) de los tubos circulares
- f la frecuencia (en hercios)

De todas formas, esta estimación no tiene en cuenta las fuentes de atenuación tales como las paredes porosas o los objetos dentro del tubo, por lo que debe considerarse como un límite inferior.

En caso de no estar seguros de que las contribuciones especificadas en la normativa existan realmente, se recomienda la determinar atenuación según las ecuaciones para la frecuencia central y superior del intervalo de frecuencias de trabajo y extrapolar para frecuencias superiores:

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{\min,1}}{\lambda_0} - 1 \right)$$

$$r = r' + jr''$$

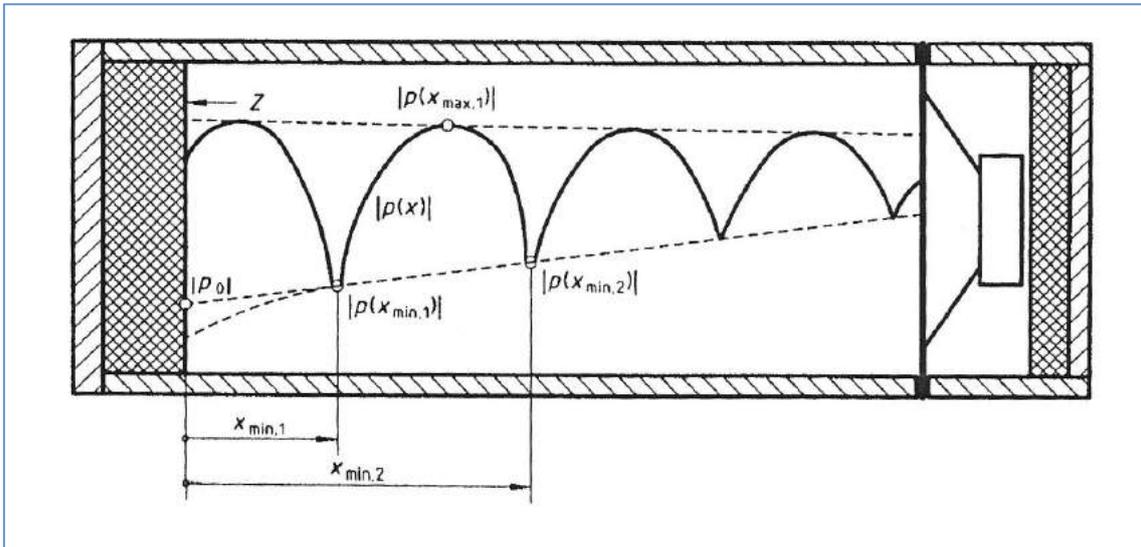


Fig.13: Corrección por la atenuación en el tubo de medición.

7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

A continuación se explica, paso a paso, la secuencia a realizar para la medición del coeficiente de reflexión y la impedancia acústica en tubos de impedancia según el método del rango de onda estacionaria, a partir de la UNE-EN ISO 10534-1 .

Para la correcta obtención de estos parámetros, es necesario la realización por orden, de los siguientes puntos:

1. Montaje de la muestra
2. Determinación del plano de referencia
3. Especificación de las frecuencias
4. Determinación de la longitud de onda y de la atenuación
5. Elección de la amplitud de señal

6. Determinación del coeficiente de absorción acústica
7. Determinación del coeficiente de reflexión
8. Determinación de la impedancia
9. Determinación de la admitancia

A continuación se detallan los pasos anteriormente citados para la obtención del coeficiente de reflexión y de la impedancia.

7.1 MONTAJE DE LA MUESTRA

Es imprescindible un montaje e instalación correctos de la muestra, que debe de realizarse cuidadosamente y especificarse para poder obtener resultados coherentes. La impedancia y el coeficiente de absorción de un material pueden verse fuertemente afectados si las condiciones de montaje no son las adecuadas.

Es necesario la instalación adecuada de la muestra en su soporte para no inducir a errores por su desplazamiento a la recepción de la señal acústica o por absorción o derivación de las impedancias.

Asimismo, la muestra debe posicionarse de forma que no quede comprimida indebidamente cuando se coloque sobre el portamuestras. Se recomienda el sellado de las juntas mediante vaselina o cera.

La cara anterior de las muestras planas, debe montarse en un plano normal al eje del tubo, la posición de los objetos con superficies planas y lisas debe especificarse con tolerancias mínimas de $\pm 0,5\text{mm}$.

Es recomendable y conveniente la utilización de dos muestras, como mínimo, en el curso de mediciones repetidas.

En caso de que la estructura lateral de la muestra de ensayo sea regular, las muestras deben cortarse a lo largo del eje de simetría de esta estructura. Si las dimensiones no

se adaptan a las dimensiones de la sección recta del tubo de impedancia, las mediciones deben hacerse usando varias muestras con posiciones variables del conteo con relación a la estructura. La repetición de mediciones sobre muestras cortadas en diferentes lugares de la muestra de ensayo es igualmente necesaria para materiales lateralmente heterogéneo (p.ej. productos de fibra mineral).

7.2 DETERMINACIÓN DEL PLANO DE REFERENCIA

Una vez montada la muestra, la primera etapa para realizar la medición del coeficiente de reflexión o impedancia consiste en definir el plano de referencia, $x = 0$, que frecuentemente coincidirá con la superficie de la muestra de ensayo. No obstante:

- Si la superficie de la muestra presenta relieves, el plano de referencia deberá situarse a una cierta distancia delante de la muestra de ensayo.
- Para muestras con estructura lateral, se recomienda de igual forma, situar el plano de referencia delante de la muestra de ensayo y a una cierta distancia para evitar modos superiores de la onda reflejada.

En cuanto a la distancia del plano de referencia y del primer mínimo a la superficie de la muestra:

- No debe ser inferior a dos veces el diámetro del tubo
- No debe ser inferior a dos veces la dimensión lateral para tubos de sección rectangular.

7.3 ESPECIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS

El intervalo de frecuencias de trabajo debe cubrir las frecuencias por bandas de tercio de octava como máximo.

Pueden ser necesarias frecuencias intermedias para poner en resonancia las muestras de ensayo y diferenciar las resonancias.

7.4 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA Y DE LA ATENUACIÓN

El siguiente paso es la determinación de la velocidad del sonido, c_0 . Para ello, será necesario la realización de los cálculos explicados en el apartado “Ensayos y mediciones preliminares”.

A partir de la velocidad del sonido se obtendrán las longitudes de onda a las frecuencias de medición así como la atenuación de tubo en las mediciones preliminares.

Una vez obtenidas la longitud de onda y la atenuación, pueden usarse para las siguientes evaluaciones siempre que no se varíen la temperatura ni el tubo.

7.5 ELECCIÓN DE LA AMPLITUD DE SEÑAL

La amplitud de señal debe elegirse de manera que supere preferentemente en 10dB, o 5dB como mínimo, al ruido de fondo y con un mínimo de presión lo más acentuado posible a esa frecuencia.

7.6 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

Llegados a este punto, el procedimiento consiste en medir, a cada frecuencia:

- La amplitud $|p(x_{min,1})|$ del primer mínimo
- La posición $x_{min,1}$ del primer mínimo
- La amplitud $|p(x_{max,1})|$ del primer máximo
- La posición $x_{max,1}$ del primer máximo

A partir de ello, se puede calcular el rango de onda estacionario $|s_1|$ y el valor absoluto del coeficiente de reflexión $|r|$, tomando $n = 1$.

Siendo:

$$s_1 = |p(x_{max,1})|/|p(x_{min,1})|$$

$$|r| = e^{2k_0'' x_{min,n}} \left(\frac{s_n - e^{k_0'' \lambda_0/4}}{s_n + e^{-k_0'' \lambda_0/4}} \right)$$

Finalmente, se obtiene el coeficiente de absorción α , mediante:

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

7.7 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

De forma similar, el procedimiento consiste en medir, a cada frecuencia:

- La amplitud $|p(x_{min,1})|$ del primer mínimo
- La posición $x_{min,1}$ del primer mínimo
- La amplitud $|p(x_{max,1})|$ del primer máximo

A partir de estos datos, de igual forma que en el anterior punto, se calcula el rango de onda estacionario $|s_1|$ y el valor absoluto del coeficiente de reflexión $|r|$.

A continuación se obtiene el ángulo de fase Φ y se determinan las componentes real e imaginaria del coeficiente de reflexión, según:

$$\Phi = \pi \left(\frac{4x_{min,1}}{\lambda_0} - 1 \right) \text{ (rad)}$$

$$r' = |r| \cos \Phi$$

$$r'' = |r| \sin \Phi$$

7.8 DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA

Tras las mediciones y cálculos efectuados en el apartado anterior para la determinación del coeficiente de reflexión, a continuación se evalúa la impedancia normalizada z , según:

$$z = z' + jz''$$

$$z' = \frac{1 - r'^2 - r''^2}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

$$z'' = \frac{2r''}{(1 - r')^2 + r''^2}$$

Para obtener la impedancia dimensional Z :

$$z = Z/Z_0 \rightarrow Z = z \cdot Z_0$$

Siendo la impedancia característica Z_0 :

$$Z_0 = \rho_0 c_0 = 7064/\sqrt{T} \quad ; \text{ (Pa}\cdot\text{s)/m}$$

Donde T es la temperatura durante la medición, en grados Kelvin.

7.9 DETERMINACIÓN DE LA ADMITANCIA

Finalmente, una vez se ha determinado la impedancia Z , se puede deducir la admitancia G :

$$G = 1/Z$$

$$G = G' + jG'' = \frac{Z' - jZ''}{Z'^2 + Z''^2}$$

3. EL TUBO DE IMPEDANCIA: MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

1. APLICACIÓN DEL MÉTODO

El método de la función de transferencia que se describe en este capítulo es similar al método de ensayo explicado en el capítulo anterior (método del rango de onda estacionaria) en cuanto a que ambos utilizan un tubo de impedancia con una fuente sonora conectada en uno de sus extremos y la muestra de ensayo en el otro extremo.

No obstante, la técnica de medición utilizada es diferente. En este método de ensayo (método de la función de transferencia), se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido, y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones fijas usando micrófonos montados en la pared o mediante un micrófono interior móvil, seguido del cálculo de la función de transferencia acústica compleja, la absorción a incidencia normal y los cocientes de la impedancia del material.

Este método de ensayo, se rige mediante la norma UNE-EN ISO 10534-2 y pretende proporcionar una alternativa, generalmente más rápida al método descrito en el capítulo anterior.

2. FUNDAMENTOS

Este método de ensayo se aplica para la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos, mediante un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal..

Asimismo, este método puede aplicarse para la determinación de la impedancia acústica superficial o de la admitancia acústica superficial en materiales.

Este método es similar al explicado en el capítulo 2 “Método del rango de ondas estacionarias” en cuanto a la utilización del tubo de impedancia con una fuente sonora conectada a un extremo y a la muestra de ensayo en el otro extremo, aunque difiere de la técnica de medición empleada respecto al método anterior.

En este método se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente de ruido. Mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones del micrófono se realiza la descomposición del campo interferencial. A continuación procede al cálculo de la función de transferencia acústica compleja, la absorción a incidencia normal y los coeficientes de impedancia del material.

Para la realización de este ensayo, es necesario seguir una serie de pasos que a continuación resumimos y enumeramos:

1. En primer lugar, se monta la muestra objeto de ensayo den uno de los extremos del tubo de impedancia, que deberá ser recto, rígido, liso y estanco.
2. A continuación, mediante una fuente sonora se general ondas planas en el tubo y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra.
3. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos.
4. En base a lo anterior, se procede a calcular el coeficiente de reflexión complejo para incidencia normal, el coeficiente de absorción para incidencia normal y la impedancia normalizada del material de ensayo.

Las mediciones anteriores pueden realizarse mediante el empleo de dos técnicas distintas:

a) Método de los dos micrófonos:

En este método se utilizan dos micrófonos en posiciones fijas. Su utilización implica la realización de un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y fase entre los micrófonos.

Esta técnica es la habitualmente recomendada para fines generales, ya que ofrece gran precisión y es rápida y sencilla de implementar.

b) Método de un micrófono:

Este método se utiliza con un único micrófono, utilizado sucesivamente en dos posiciones. Requiere mayor tiempo así como procesados particulares, aunque permite un posicionado óptimo a cualquier frecuencia.

El uso de esta técnica se recomienda para mediciones de precisión.

3. COMPONENTES NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DEL TUBO DE IMPEDANCIA:

El tubo de impedancia acústica está formado por los siguientes componentes principales:

1. Tubo de impedancia.
2. Porta muestras.
3. Micrófonos
4. Instrumentación de procesado de señales.
5. Altavoz.
6. Generador de señales.
7. Terminación del altavoz.
8. Termómetro.

9. Barómetro

A continuación se describen las principales características y elementos que conforman los principales componentes de un tubo de impedancia.

1. Tubo de impedancia.

El tubo de impedancia debe ser construido de un material y forma tal que cumpla con los siguientes requisitos:

- El tubo de impedancia debe ser rectilíneo, de sección recta constante y con paredes rígidas, lisas y no porosas, sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo.
- Las paredes del tubo deben ser pesadas y macizas para que no entren en vibración y no presenten resonancias de vibración en el intervalo de frecuencia útil del tubo.
- Se recomienda que el tubo sea metálico o de hormigón estanco y liso para tubos de secciones mayores.
- Los espesores de las paredes recomendados son los siguientes:
 - tubos circulares metálicos: espesor aproximado 5% del diámetro
 - tubos rectangulares metálicos: espesor aproximado 10% de la sección transversal. Se debe asegurar que las esquinas sean suficientemente esquinas rígidas.
- Las paredes de los tubos de hormigón deben sellarse mediante un revestimiento adhesivo liso que asegure estanqueidad.
- Las paredes de los tubos de madera deben reforzarse mediante un revestimiento exterior utilizando láminas de acero o plomo.

Por otro lado, debemos hacer hincapié en el intervalo de trabajo utilizado, siendo:

$$f_1 > f > f_u$$

Donde:

- f_1 = frecuencia de trabajo más baja del tubo, limitada por la precisión del equipo de procesamiento de señal.
- f = frecuencia de trabajo.
- f_u = frecuencia de trabajo más alta del tubo, elegida para evitar modos de propagación de ondas no planas.

La condición para f_u , es:

- Para tubos de sección circular:

$$d < 0,58\lambda_u ; f_u \cdot d < 0,58c_o$$

$$c_o = 343,2\sqrt{T/293}$$

Siendo:

- d = diámetro interior, en metros.
- f_u = frecuencia de trabajo más alta del tubo, en hercios
- c_o = velocidad del sonido en m/s
- Para tubos de sección rectangular:

$$d < 0,5\lambda_u ; f_u \cdot d < 0,50c_o$$

$$c_o = 343,2\sqrt{T/293}$$

Siendo:

- d = longitud lateral máxima, en metros.
- f_u = frecuencia de trabajo más alta del tubo, en hercios
- c_o = velocidad del sonido en m/s

En cuanto a la distancia entre los micrófonos, ésta debe elegirse tal que:

$$f_u \cdot s < 0,45c_o$$

Siendo:

- s = distancia entre los micrófonos, en metros.

Como norma general, la distancia entre micrófonos debería exceder en el 5% la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés, siempre que se satisfagan los requisitos de la ecuación anterior. Una mayor distancia entre micrófonos aumenta la precisión de las mediciones.

En cuanto a la longitud del tubo de impedancia, éste debería ser lo suficientemente largo para permitir el desarrollo de ondas planas entre la fuente y la muestra.

Además de ondas planas, el altavoz produce ondas no planas que desaparecen al cabo de una distancia de aproximadamente igual a tres veces el diámetro del tubo (o tres veces la dimensión lateral en tubos rectangulares), para frecuencias por debajo de la frecuencia de corte inferior del primer modo de orden superior. Por ello, se recomienda que el micrófono se sitúe más cerca que un diámetro.

Las muestras de ensayo también causan distorsiones del campo acústico por lo que, en función del tipo de muestra, se recomiendan las siguientes distancias mínimas entre micrófono y muestra:

- Sin elementos de estructura: $\frac{1}{2}$ diámetro o $\frac{1}{2}$ dimensión lateral
- Estructura semilateral: 1 diámetro o 1 dimensión lateral
- Fuertemente asimétrica: 2 diámetros o 2 veces la dimensión lateral.

2. Porta muestras.

El portamuestras puede ser:

- a) Un elemento integrado en el tubo de impedancia:

- b) Un elemento separado del tubo de impedancia: fijado fuertemente a los extremos del tubo durante las mediciones. El montaje debe ser hermético, sin inserción de juntas elásticas.

Para tubos circulares, se recomienda hacer accesible la muestra de ensayo por ambos extremos del portamuestras.

Se aconseja la colocación de una placa posterior al portamuestra, rígida y fuertemente fijada de forma hermética al tubo, generalmente metálica de 2cm de espesor como mínimo.

3. Micrófonos

Se deben usar micrófonos idénticos en cada posición.

Si se usan micrófonos montados en las paredes, el diámetro de estos micrófonos debe ser pequeño, comparado con la relación c_0/f_u . Asimismo, se recomienda en unos de micrófonos de presión para este tipo de montajes.

Por otro lado, se recomienda que los diámetros de los micrófonos sean inferiores al 20% de la distancia entre ellos.

En el caso de montajes interiores, se recomienda el empleo de micrófonos de campo libre.

En cuanto a la posición de los micrófonos, existen varias posibilidades:

- a) Micrófonos montados en la pared: cada micrófono debe montarse con el diafragma coincidiendo con la superficie interior del tubo. La rejilla del micrófono debe sellarse fuertemente a la cápsula del micrófono y debe haber un sellado entre el micrófono y el orificio de montaje. (ver fig.13)

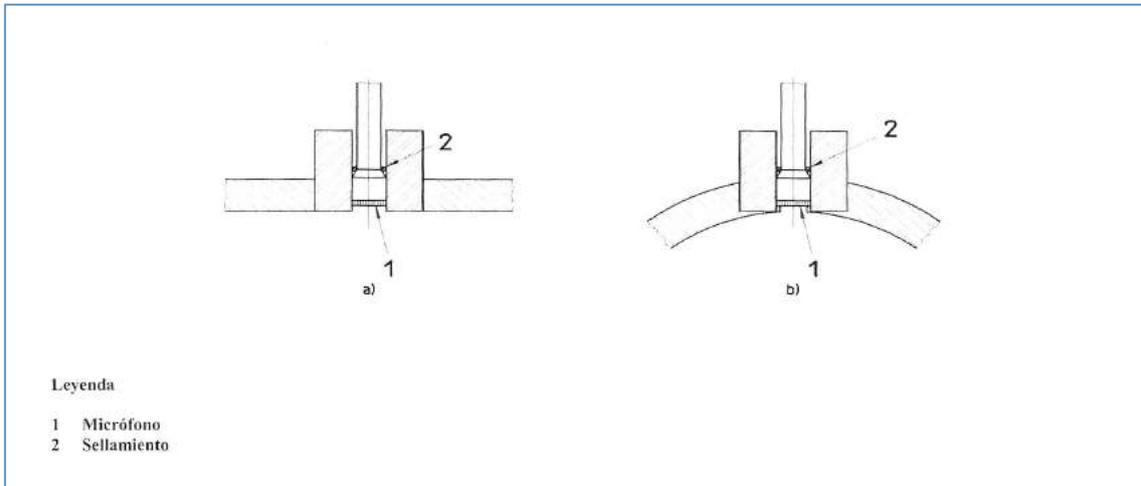


Fig.14: Ejemplos de montajes de micrófonos.

- b) Uso de un solo micrófono en dos posiciones de pared sucesivas: la posición del micrófono sin usar debe sellarse para evitar fugas y mantener una superficie lisa en el interior del tubo.
- c) Micrófonos de ventilación lateral: hay que evitar el bloqueo de los orificios de equalización de la presión por el montaje del micrófono.

Las posiciones fijas de los micrófonos deben conocerse con una precisión de $\pm 0,2\text{mm}$ y debe registrarse su distancia, según se muestra en la figura 15.

Las posiciones de los micrófonos móviles deben conocerse con una precisión de $\pm 0,5\text{mm}$.

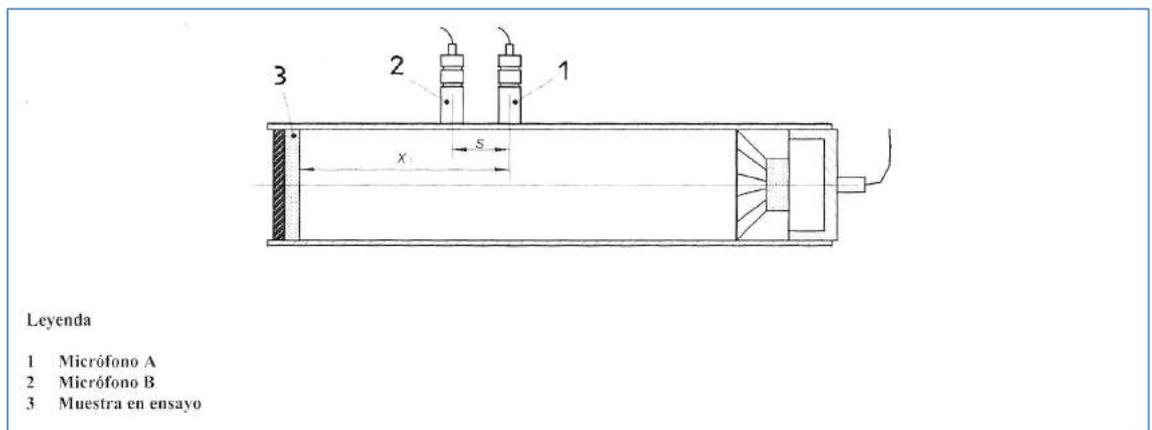


Fig 15.: Posiciones de micrófonos y distancias

4. Instrumentación de procesamiento de señales.

La instrumentación de procesamiento de señales está formada por:

- Un amplificador
- Un procesador de transformada rápida de Fourier (FTT)
- Un generador compatible con el sistema procesador (para producir la señal de fuente)

Es necesario que el sistema que mida la presión acústica en dos posiciones de micrófono y calcule la función de transferencia H_{12} entre ellas.

En el caso de usar la técnica de un solo micrófono, el sistema de análisis debe poder calcular la función de transferencia H_{12} de la señal del generador y las dos señales del micrófono medidas consecutivamente.

5. Altavoz.

Se debe montar un altavoz de membrana (en una caja aislada) en la terminación del tubo de impedancia, del lado opuesto al portamuestras. El altavoz puede situarse de forma coaxial al eje del tubo, inclinado o conectado al tubo por un codo.

La superficie de la membrana del altavoz debe cubrir 2/3 del área de la sección transversal del tubo de impedancia.

6. Generador de señales.

El generador de señales debe poder generar una señal estacionaria en el rango de frecuencias de interés.

Puede generar una o varias de las siguientes señales de excitación: aleatoria, pseudo-aleatorias, pseudo-aleatorias periódicas o trinos.

En el caso de utilizar la técnica de un único micrófono se recomienda una secuencia del tipo pseudo-aleatorias.

7. Terminación del altavoz.

Es aconsejable revestir el interior del tubo de impedancia con un material acústico eficaz, en la zona cercana al altavoz, y en una longitud mínima de 200mm.

Mediante este aislamiento se evitarán resonancias de la columna de aire en el tubo de impedancia indeseadas.

8. Termómetro.

Es importante medir la temperatura en el interior del tubo de impedancia y mantenerla constante (con una tolerancia de ± 1 K). Para ello, debe colocarse un termómetro con una precisión de $\pm 0,5$ K.

9. Barómetro

De igual forma que la temperatura, la presión debe de estar controlada siendo necesaria su medición y permitiendo una tolerancia de $\pm 0,5$ kPa.

4. MEDICIONES PRELIMINARES

Es necesario la comprobación de la utilización de la instrumentación de ensayo, que se dispone según se puede observar en la figura a continuación (fig.16).

Para realizar estas comprobaciones se realizan unos ensayos con el fin de eliminar errores y satisfacer las especificaciones. Se distinguen dos tipos de controles:

1. Mediciones antes y después de cada ensayo
2. Calibraciones periódicas

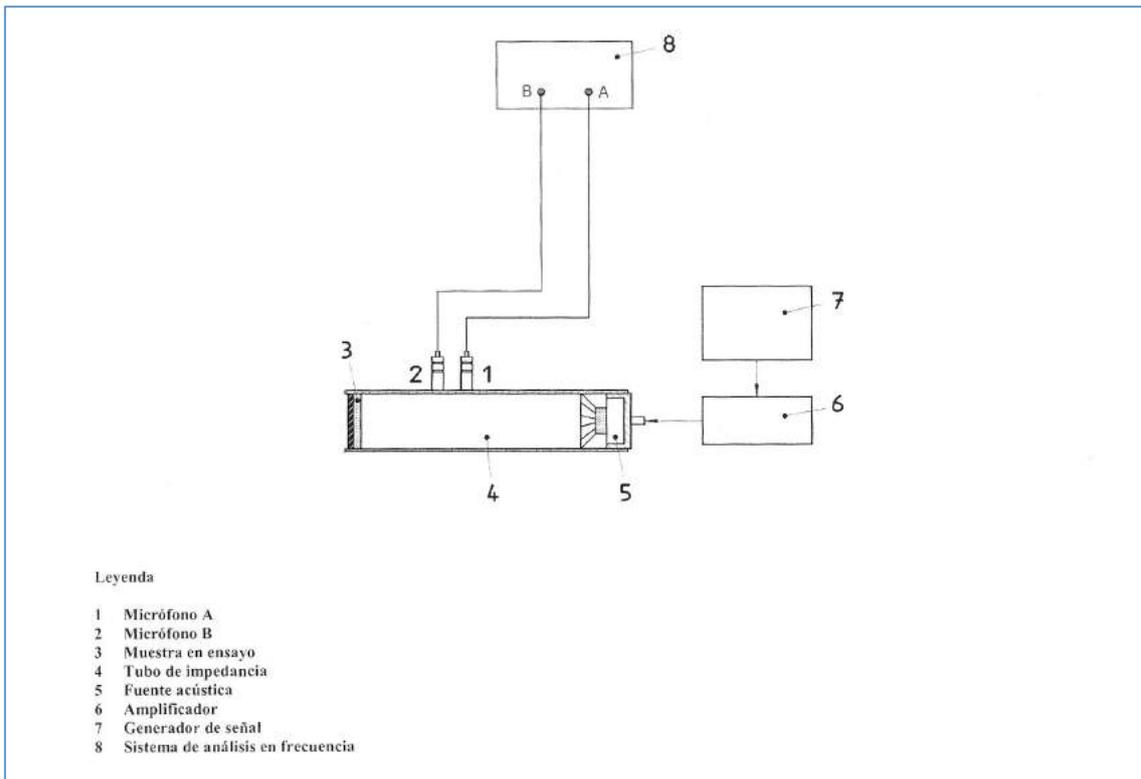


Fig16.: Disposición equipo de ensayo

4.1. Mediciones previas y posteriores a los ensayos

Se deben realizar las siguientes comprobaciones anteriormente a la realización de un ensayo y tras la finalización de éste:

1. Calibración en amplitud del micrófono
2. Medición de la temperatura
3. Medición de la presión del aire
4. Relación señal-ruido

4.2. Calibraciones periódicas

Es necesario la realización de estas calibraciones que nos permitirán determinar los siguientes aspectos y que se realizan con una terminación rígida del tubo de impedancia vacío:

1. Las correcciones de atenuación en el tubo de impedancia

2. La determinación del centro acústico del micrófono

Indicamos que estos aspectos ya fueron ampliamente explicados en el capítulo anterior y no varían para este ensayo, por lo que no creemos necesario la repetición de éstos.

5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

A continuación se explica, paso a paso, la secuencia a realizar para la determinación del coeficiente de absorción y la impedancia acústica en tubos de impedancia según el método de la función de transferencia, a partir de la UNE-EN ISO 10534-2 .

Para la correcta obtención de estos parámetros, es necesario la realización por orden de los siguientes puntos:

1. Montaje de la muestra
2. Determinación del plano de referencia
3. Determinación de la velocidad del sonido, la longitud de onda y la impedancia característica.
4. Selección de la amplitud de señal
5. Selección de número de promediados
6. Corrección por desajuste entre los micrófonos
7. Medición repetida con los micrófonos intercambiados
8. Factor de calibración predeterminado
9. Determinación de la función de transferencia entre las dos posiciones
10. Determinación del coeficiente de reflexión
11. Determinación del coeficiente de absorción acústica
12. Determinación de la impedancia acústica específica
13. Determinación de la admitancia acústica específica.

A continuación se detallan los pasos anteriormente citados para la obtención del coeficiente de reflexión y de la impedancia.

5.1. Montaje de la muestra

Es vital que la muestra quede correctamente ajustada al portamuestras. No obstante, ello debe realizarse de forma que la muestra no quede comprimida, y que no se produzcan abombamientos indeseados. Asimismo, se recomienda el sella de ésta.

En este punto inicial del ensayo, se deben tomar las mismas precauciones y consideraciones que se han indicado para el montaje de la muestra en el capítulo anterior, referente a la determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia mediante la utilización del método del rango de onda estacionaria. Por ello, no se van a repetir dichas indicaciones (véase capítulo 2).

5.2. Especificación del plano de referencia

Una vez montada la muestra de ensayo, hay que especificar el plano de referencia ($x=0$), que frecuentemente coincide con la superficie de la muestra de ensayo.

En caso de que la muestra de ensayo presente superficies de relieve o estructura lateral, el plano de referencia debe situarse a cierta distancia de la muestra de ensayo.

Hay que respetar las indicaciones relacionadas con las distancias entre la muestra y el micrófono según lo indicado en la descripción del tubo de impedancia (véase cap.3.2).

Asimismo y como hemos indicado, la posición del plano de referencia respecto al micrófono debe especificarse con una precisión de $\pm 0,5\text{mm}$.

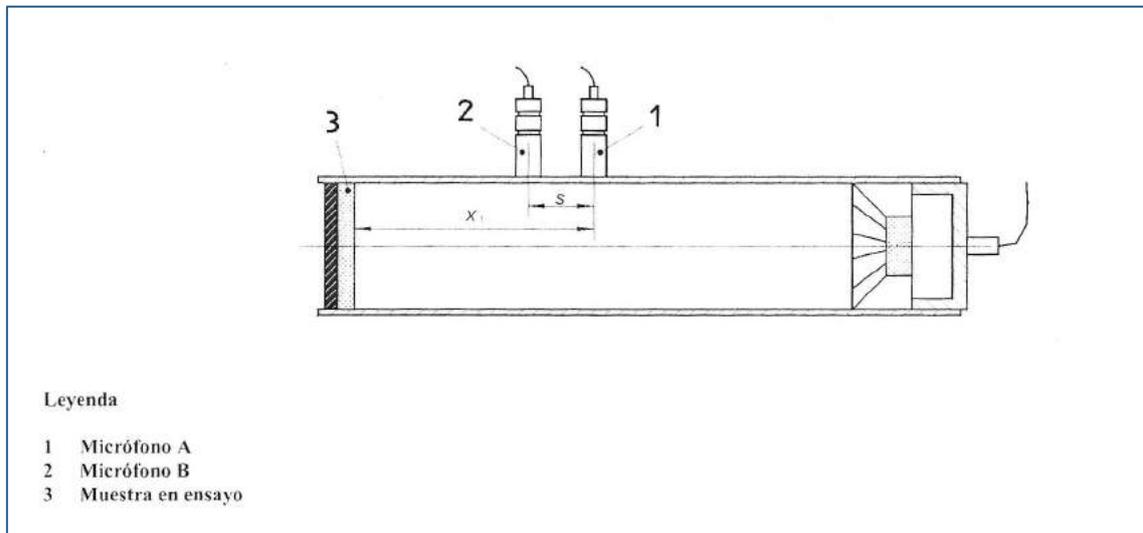


Fig.17: Posiciones de micrófonos y distancias.

5.3 Determinación de la velocidad del sonido, la longitud de onda y la impedancia característica

Llegados a este punto es necesario la realización de:

- a) Determinar la velocidad del sonido c_0 en el tubo.
- b) Calcular las longitudes de onda a las frecuencias de medición.

Para determinar la velocidad del sonido c_0 en el tubo, ésta puede valorarse conociendo la temperatura del aire, a partir de :

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \quad ; \text{ m/s}$$

siendo T la temperatura en °K.

La longitud de onda se deriva de:

$$\lambda_0 = c_0/f$$

La densidad del aire ρ , puede calcularse mediante:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T}$$

Siendo:

- T la temperatura, en °K
- P_a la presión atmosférica, en Kpa.
- $T_0 = 293$ K
- $\rho_0 = 101,325$ kPa
- $\rho_0 = 1,186$ kg/m³

la impedancia característica del aire es producto de ρc_0

5.4 Selección de la amplitud de señal

La amplitud de señal debe ser al menos 10 dB mayor que el ruido de fondo a todas las frecuencias de interés, en las posiciones elegidas de los micrófonos.

5.5 Selección del número de promediados

El número de promediados necesario depende del material ensayado y de la precisión requerida en la determinación de la función de transferencia, según estos dos puntos.

a) Errores aleatorios

Los errores aleatorios aparecen cuando se procesan ruidos aleatorios, ruidos eléctricos de la instrumentación o señales acústicas extrañas.

El número de promediados requerido para conseguir un error estándar viene dado por:

$$n = (1/2 \sigma)^2$$

donde:

- n es el número de espectros independientes promediados
- σ el error estándar.

b) Precisión de la función de transferencia

Una estimación del número de promediados requerido para conseguir un error estándar normalizado del valor determinado para la función de transferencia a una frecuencia particular, viene dado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{1}{2\varepsilon^2} \left[\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right]$$

donde:

- n es el número de promediados
- ε el error estándar normalizado
- γ^2 la función de coherencia

la función de coherencia se determina mediante:

$$\gamma^2 = |s_{12}|^2 / (s_{11} \cdot s_{22})$$

5.6 Corrección por desajuste entre los micrófonos

En el caso de usar la técnica de un único micrófono, no es necesario aplicar esta corrección por desajuste en la determinación de la función de transferencia.

En caso de usar la técnica de dos micrófonos, debe usarse uno de los siguientes procedimientos:

- a) repetición de las mediciones con canales intercambiados
- b) uso de del factor de calibración predeterminado (ver punto 3.4.8)

Indicamos que un canal se compone del micrófono, preamplificador y canal de análisis.

5.7 Medición repetida con los micrófonos intercambiados

Para la realización de este punto, es necesario colocar la muestra en el tubo y medir las funciones de transferencia H'_{12} y H''_{12} , usando las mismas expresiones (ver punto 5.9).

Hay que colocar el micrófono en la configuración estándar 1 (fig. 18) y medir la función de transferencia H'_{12} .

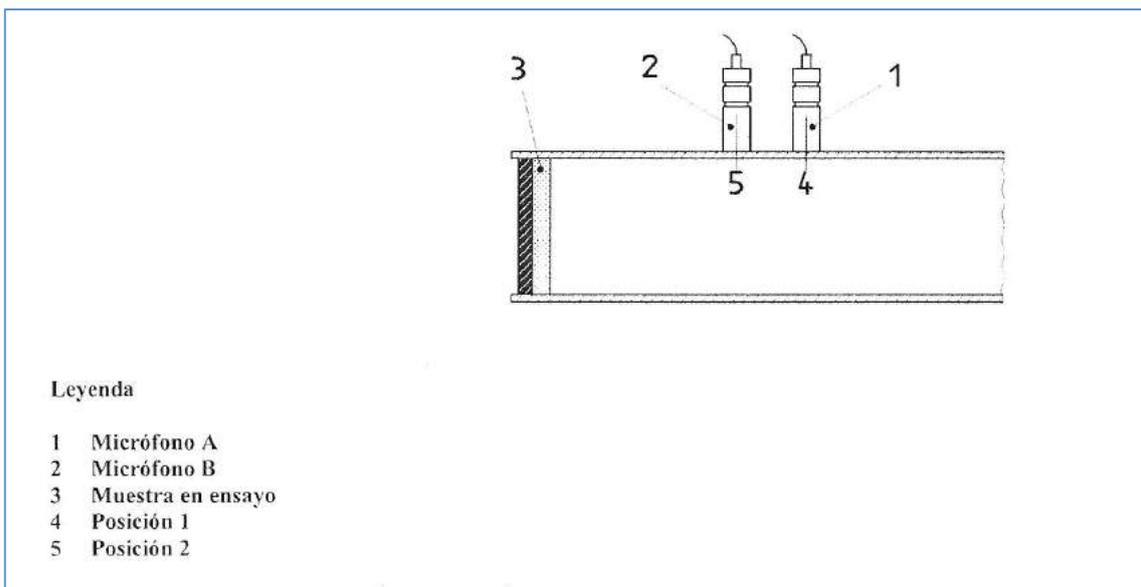


Fig.18: Configuración estándar

Posteriormente, hay que intercambiar los micrófonos A y B, tal y como se muestra en la configuración 2 (fig.19), asegurando que al intercambiar las posiciones, las nuevas posiciones de los micrófonos son exactamente las mismas que las que ocupaba el micrófono anterior, y medir la función de transferencia H''_{12} .

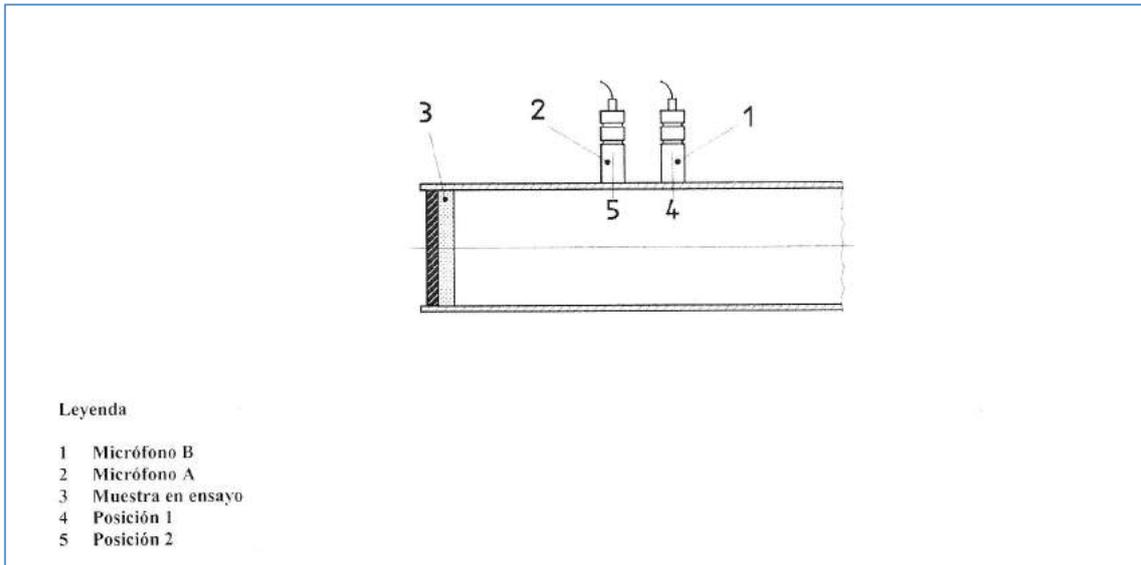


Fig. 19.: Configuración con micrófonos intercambiados.

A continuación, calcular la función de transferencia mediante la siguiente expresión:

$$H_c = (H'_{12} \cdot H''_{12})^{1/2} = |H_{12}|e^{j\phi}$$

5.8 Factor de calibración predeterminado

Se trata de realizar el mismo procedimiento que el explicado en el apartado anterior (punto 3.4.7) y colocar para los siguientes ensayos los micrófonos en la configuración estándar 1 y medir la función de transferencia según:

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}|e^{j\hat{\phi}} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i$$

donde:

- \hat{H}_{12} es la función de transferencia sin corregir
- $\hat{\phi}$ es el ángulo de fase sin corregir
- \hat{H}_r es la parte real de \hat{H}_{12}
- \hat{H}_i es la parte imaginaria de \hat{H}_{12}

Asimismo, corregir el desajuste entre los micrófonos usando la siguiente expresión:

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c}$$

5.9 Determinación de la función de transferencia entre las dos posiciones

Se trata de medir la función de transferencia acústica compleja, que puede definirse mediante una de las tres maneras siguientes:

$$\text{a) } H_{12} = \frac{s_{12}}{s_{11}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i$$

$$\text{b) } H_{12} = \frac{s_{22}}{s_{21}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i$$

$$\text{c) } H_{12} = \left[\frac{s_{12}}{s_{11}} \cdot \frac{s_{22}}{s_{21}} \right]^{1/2} = H_r + jH_i$$

donde:

- H_r es la parte real de H_{12}
- H_i es la parte imaginaria de H_{12}

Indicamos que, por regla general, la ecuación más empleada es la expresada en el punto a), aunque para los casos en los que se detecte ruido en la entrada y salida se recomienda la expresión del punto b).

5.10 Determinación del coeficiente de reflexión

Para calcular el coeficiente de reflexión normal se utiliza la expresión:

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1}$$

Esta expresión deriva de los siguientes fundamentos teóricos, a partir de que este método de medición se basa en el hecho de que el coeficiente de reflexión acústica para incidencia normal (r) puede determinarse a partir de la función de transferencia H_{12} entre dos posiciones de micrófono frente al material ensayado.

Las presiones acústicas de la onda incidente y reflejada, respectivamente p_1 y p_R son:

$$p_1 = \hat{p}_1 e^{jk_0 x}$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x}$$

donde :

- \hat{p}_1 y \hat{p}_R son módulos de p_1 y p_R , en el plano de referencia ($x=0$).
- $k_0 = k'_0 - jk''_0$, número de onda complejo

Las presiones acústicas p_1 y p_2 en las dos posiciones de micrófono son:

$$p_1 = \hat{p}_1 e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1}$$

$$p_2 = \hat{p}_1 e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2}$$

La función de transferencia para la onda incidente, H_1 , es:

$$H_1 = \frac{p_{21}}{P_{11}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s}$$

siendo $s = x_1 - x_2$, la separación entre los dos micrófonos.

De modo similar, la función de transferencia para la onda reflejada H_R , es:

$$H_R = \frac{p_{2R}}{P_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0 s}$$

La función de transferencia H_{12} para el campo acústico total puede obtenerse teniendo

en cuenta que $\hat{p}_R = r\hat{p}_1$:

$$H_{12} = \frac{p_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + e^{-jk_0 x_1}}$$

Despejando la r y usando las dos ecuaciones anteriores para la obtención de H_R y H_1 :

$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}$$

Por lo tanto, el coeficiente de reflexión, puede determinarse a partir de las funciones de transferencia, de la distancia x_1 , número de onda k_0 , incluyendo la constante de atenuación k_0 ”.

5.11 Determinación del coeficiente de absorción acústica

Se trata de calcular el coeficiente de absorción acústica mediante:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2$$

5.12 Determinación de la impedancia acústica específica

Se trata de calcular la impedancia acústica a través de:

$$Z/\rho c_0 = R/\rho c_0 + jX/\rho c_0 = (1 + r)/(1 - r)$$

donde:

- R es la componente real
- X es la componente imaginaria
- ρc_0 es la impedancia característica

5.13 Determinación de la admitancia acústica específica.

Finalmente, se calcula la admitancia acústica específica:

$$G\rho c_0 = g\rho c_0 - jb\rho c_0 = \rho c_0/Z$$

donde:

- g es la componente real
- b es la componente imaginaria.

4. ESTUDIOS REALIZADOS

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se ha tratado de resumir dos de los últimos trabajos realizados por distintos autores sobre el tubo de impedancia en medio acuoso, pasando por describir los principales problemas tradicionales en el tubo de impedancia y obteniendo las conclusiones sobre su viabilidad que se describen posteriormente.

2. PROBLEMAS CON LAS TÉCNICAS TRADICIONALES DEL TUBO DE IMPEDANCIA

Tal y como se ha comentado en puntos anteriores, la mayoría de la información disponible sobre los tubos de impedancia está enfocada para su uso en aire (contrariamente a su uso en otros medios fluidos/acuosos). Asimismo, se han desarrollado satisfactoriamente métodos para el uso del tubo de impedancia y la determinación de propiedades acústicas de materiales en los que el medio utilizado es el aire.

Por ello, si se desean obtener las propiedades acústicas de un material que se utiliza habitualmente en un entorno fluido/acuoso, es necesario que las mediciones se realicen en un tubo lleno de dicho fluido (generalmente agua) ya que ello conllevará a la obtención de mediciones y resultados más precisos y correctos.

Por otro lado, es necesario la utilización de un tubo lleno de líquido ya que una de las dificultades existentes en este tipo de ensayo es la diferencia de los valores obtenidos en la impedancia entre los materiales acústicos utilizados bajo el agua y el aire en el tubo. Esta diferencia de impedancias entre la muestra y el aire en el tubo provocaría que todas las muestras se comporten como reflectores rígidos casi perfectos.

Asimismo, el coeficiente de reflexión sería casi el mismo para todas las muestras y por ello sería muy difícil distinguir con precisión las características de las distintas muestras objeto de ensayos.

En contraposición, podemos decir que un inconveniente del uso del tubo lleno de aire (distintamente a uno lleno de agua) para la realización de la medición de propiedades acústicas bajo el agua mientras los materiales están sometidos a determinadas presiones, es que un tubo lleno de aire podría suponer un peligro para la seguridad del personal que esté trabajando, debido a la compresibilidad del aire bajo presión.

Generalmente y debido al problema de la acumulación de vibraciones en las paredes del tubo lleno de agua, no es habitual el uso de la técnica de ondas estacionarias en tubos llenos de fluido/agua. Algunos autores afirman que la técnica del pulso es la más efectiva para mediciones bajo el agua a pesar de tener desventajas cuando se utiliza a bajas frecuencias.

La relativamente alta velocidad del sonido en el agua teniendo en cuenta el requisito de que exista una separación temporal entre el pulso incidente y el reflejado obliga a la construcción de un tubo de mayor longitud de la deseada.

Para conseguir una separación temporal entre el pulso incidente y el reflejado mediante la técnica del pulso, la longitud del tubo no puede ser menor que la longitud del pulso incidente (duración de velocidad del sonido en el tubo). A continuación adjuntamos una tabla resumen en la que se detallan los resultados obtenidos en un estudio realizado en 1991 en las instalaciones del NSWC en Annapolis (Carderock and White OAK, Maryland, USA):

Tube	Lowest Freq. (Hz)	Length (m)	Length / Longest Wavelength
Annapolis #1	1000	12.8	8.8
Annapolis #2	1000	12.8	8.8
Carderock	3000	1.8	3.8
White Oak #1	500	5.5	1.9
White Oak #2	3000	5.5	11.4
White Oak #3	200	24.4	3.3

Tabla 1: Resultados de NSWC

De estos resultados se observa que el tubo que estaba dotado con un ratio inferior de longitud y longitud de onda fue el indicado como "White Oak" obteniendo una longitud de tubo de 5,5m para mediciones realizadas con una frecuencia inferior a 500 Hz. y obteniendo un ratio de 1,9. Usando la tabla anterior como referencia, se desprende que para realizar mediciones a una frecuencia inferior a 75Hz, la longitud del tubo debería ser de aproximadamente 36m, siendo ésta longitud excesiva y impracticable para su uso en un laboratorio. Por otro lado, estas dimensiones encarecen la construcción del tubo además de que hacen más difícil el control de la temperatura en el agua en el interior del tubo.

3. ESTUDIO "A SHORT WATER-FILLED TUBE FOR THE MESAUREMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES OF MATERIALS AT LOW FREQUENCIES", REALIZADO POR DEBRA M.KENNEY

3.1. Introducción

En líneas generales, el estudio realizado por Debra M.Kenney en la NSWCCD (Naval Surface Warfare Center Carderock Division, Maryland, USA) en 1997, fue realizado

para mediciones del tubo de impedancias en laboratorio a bajas frecuencias (frecuencias inferiores a 75 Hz). Para ello se diseñó y construyó de un tubo de impedancia, utilizando la configuración que mostramos a continuación:

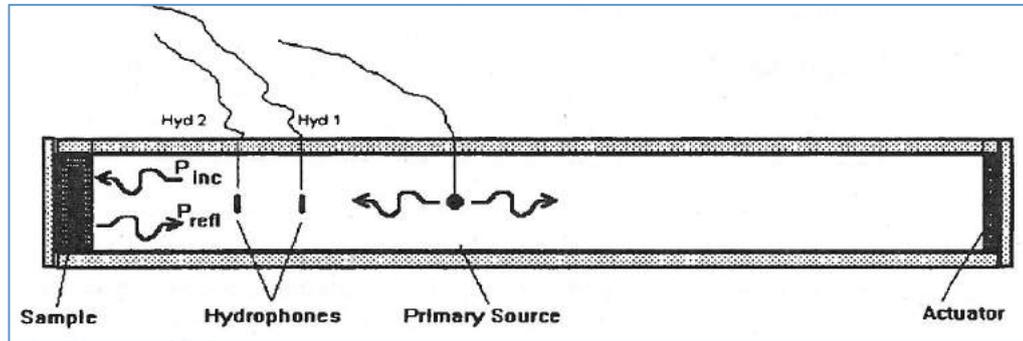


Fig.20 Configuración tubo impedancia

La fuente de sonido primaria fue situada a la mitad de la longitud del tubo, siendo una señal omnidireccional. Entre esta fuente y la muestra de ensayo, se dispusieron dos hidrófonos para medir y separar la superposición entre las señales incidentes y refractadas. Ello se utilizó para calcular el coeficiente de complejo de reflexión.

Debido a que no se requerían separaciones temporales entre el pulso incidente y el reflejado, y debido a que el actuador atenúa la señal al final del tubo, al lado opuesto a la muestra, las mediciones se realizaron en un tubo inferior a una longitud de onda.

Por otro lado, otro objetivo era evaluar los materiales en un rango de frecuencias entre 75Hz y 5kHz. Asimismo, otro objetivo era tener un error inferior al 1% en cuanto a la velocidad de sonido, a partir de mediciones experimentales.

Para diseñar un tubo de impedancia que satisficiera las necesidades de diseño requeridas y que fuera a su vez, realizable y con un coste asequible, se desarrollaron los siguientes dos modelos analíticos :

1. Modelo de propagación: destinado a analizar la propagación en un tubo elástico infinitamente largo.

2. Modelo simulación: realizando una simulación del ensayo para examinar la propagación en un tubo longitudinal finito.

A continuación se resumen con más detalle dichos métodos.

a) Modelo de propagación:

El modelo de propagación está destinado a analizar la propagación en un tubo infinitamente largo, por lo que se asumieron los siguientes extremos:

- Sólo se consideraron movimientos axisimétricos en los análisis (no hay dependencia de θ , todo movimiento es una función de r , z y t).
- Se asume que el material utilizado sea elástico, con propiedades que cumplan la ley de Hooke.
- El medio en el tubo es un fluido, asumiendo despreciables los efectos por viscosidad.
- A pesar de que el tubo estará rodeado por aire o agua, se asume que el medio fuera del tubo será el vacío.

Este modelo consiste en el desarrollo de varios programas (4 programas) mediante la utilización de MATLAB con el objetivo de analizar la propagación en un tubo infinitamente largo. Dichos programas se organizaron de forma que cada programa utilizara los resultados calculados a partir de los programas anteriores.

Los programas que se desarrollaron, a modo de resumen, fueron los siguientes:

- 1.- El primer programa utiliza la teoría de propagación de ondas en un fluido, a través de un cilindro de longitud infinita y envuelto por un tubo elástico infinito en un medio vacío para desarrollar los modos de propagación.
- 2.- El segundo programa calcula las amplitudes relativas de los coeficientes utilizados para definir cada modo.

- 3.- El tercer programa calcula las amplitudes de varios modos utilizando un pistón como fuente en $z=0$.
- 4.- El cuarto programa examina la atenuación de los modos evanescentes.

b) Modelo de simulación:

El modelo de simulación se realizó a través de los tres programas de MATLAB:

- 1.- El primer programa modela las múltiples reflexiones de las ondas de propagación en un tubo de longitud finita. Las ondas de propagación se reflejan en ambos extremos del tubo.

Las ondas de propagación se reflejaron tanto en la terminación sencilla al final del tubo de impedancia, y a la terminación de la cancelación activa del tubo. Se calculó que el tiempo de dominio en cada uno de los dos hidrófonos se calculó representara el resultado simulado de numerosas reflexiones.

- 2.- El segundo programa utiliza la señal del dominio del tiempo en los dos hidrófonos para calcular el coeficiente de reflexión complejo usando algorítmicos separando las ondas incidentes y reflejadas.

- 3.- El tercer programa calcula la velocidad axial compleja del sonido en la muestra simulada, basándose en los coeficientes de reflexión generados por el segundo programa. Dichos coeficientes de reflexión se calculan para dos casos: con un terminación de referencia en el extremo del tubo y con una muestra delante de la terminación. La velocidad del sonido en la muestra puede ser derivada convirtiendo los coeficientes de reflexión de estas dos condiciones en impedancias.

3.2. Descripción del experimento realizado:

En base a los resultados obtenidos en los modelos de propagación y de simulación, se utilizaron las siguientes características geométricas para la construcción de un tubo:

Parámetros mecánicos	Valores utilizados
Diámetro exterior del tubo	10 inches +/- 0,050 inches
Espesor de la pared del tubo	2 inches +/- 10%
Longitud del tubo	7 pies

Para la construcción del tubo se utilizó acero dulce por ser un material disponible de relativo bajo coste.

En la figura a continuación se muestra la configuración del tubo. En ella se observan distintas posiciones, que están indicadas con las letras A, B y C y que corresponden con el tamaño de la norma técnica estadounidense NPT (American National Taper Pipe Thread), según se indica y relaciona en las siguientes tablas:

Puntos	NPT	Utilidad
A	1/4 NPT	Conexión de bomba manual hidrostática para aplicación de presión hidrostática al tubo o cable para hidrófono.
B	1/2 NPT	Cableado de fuente primaria y hidrófonos
C	1/8 NPT	Cercano a la muestra, para sondas de temperaturas o otros cableados.

Pipe size (inch)	Thread density (inch ⁻¹)	Thread pitch		Approx. thread length			Approx. thread length, hand and wrench		Pipe nominal outside diameter, OD		Tap drill	
		(inch)	(mm)	(inch)	(mm)	(turns)	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)
1/16	27	0.03703704	0.9407						0.313	7.950		
1/8	27	0.03703704	0.9407	3/8	9.525	10	1/4	6.350	0.405	10.287	0.339	8.6106
1/4	18	0.05555555	1.4111	5/8	15.875	11	3/8	9.525	0.540	13.716	7/16	11.113
3/8	18	0.05555555	1.4111	5/8	15.875	11	3/8	9.525	0.675	17.145	37/64	14.684
1/2	14	0.07142857	1.8143	3/4	19.0500	10	7/16	11.1125	0.840	21.3360	23/32	18.2563
3/4	14	0.07142857	1.8143	3/4	19.0500	10	1/2	12.7000	1.050	26.6700	59/64	23.4156
1	11 1/2	0.08695652	2.2087	7/8	22.2250	10	9/16	14.2875	1.315	33.4010	15/32	29.3688
1 1/4	11 1/2	0.08695652	2.2087	1	25.4000	11	9/16	14.2875	1.660	42.1640	1 1/2	38.1000
1 1/2	11 1/2	0.08695652	2.2087	1	25.4000	11	9/16	14.2875	1.900	48.2600	1 47/64	44.0531
2	11 1/2	0.08695652	2.2087	1	25.4000	11	5/8	15.8750	2.375	60.3250	2 7/32	56.3563
2 1/2	8	0.125	3.1750	1 1/2	38.1000	12	7/8	22.2250	2.875	73.0250	2 5/8	66.6750
3	8	0.125	3.1750	1 1/2	38.1000	12	1	25.4000	3.500	88.9000	3 1/4	82.5500
3 1/2	8	0.125	3.1750	5/8	15.8750	13	1 1/16	26.9875	4.000	101.6000	3 3/4	95.2500
4	8	0.125	3.1750	1 5/8	41.2750	13	1 1/16	26.9875	4.500	114.3000	4 1/4	107.9500
4 1/2	8	0.125	3.1750						5.000	127.0000	4 3/4	120.6500
5	8	0.125	3.1750	1 3/4	44.4500	14	1 3/16	30.1625	5.563	141.3002	5 9/32	134.1438
6	8	0.125	3.1750	1 3/4	44.4500	14	1 3/16	30.1625	6.625	168.2750	6 11/32	161.1313
8	8	0.125	3.1750	1 7/8	47.6250	15	1 5/16	33.3375	8.625	219.0750		
10	8	0.125	3.1750	2	50.8000	16	1 1/2	38.1000	10.750	273.0500		
12	8	0.125	3.1750	2 1/8	53.9750	17	1 5/8	41.2750	12.750	323.8500		
14	8	0.125	3.1750						14.000	355.6000		
16	8	0.125	3.1750						16.000	406.4000		
18	8	0.125	3.1750						18.000	457.2000		
20	8	0.125	3.1750						20.000	508.0000		
24	8	0.125	3.1750						24.000	609.6000		

Tabla 2: American Society of Mechanical Engineers National Pipe Thread Taper (NPT)

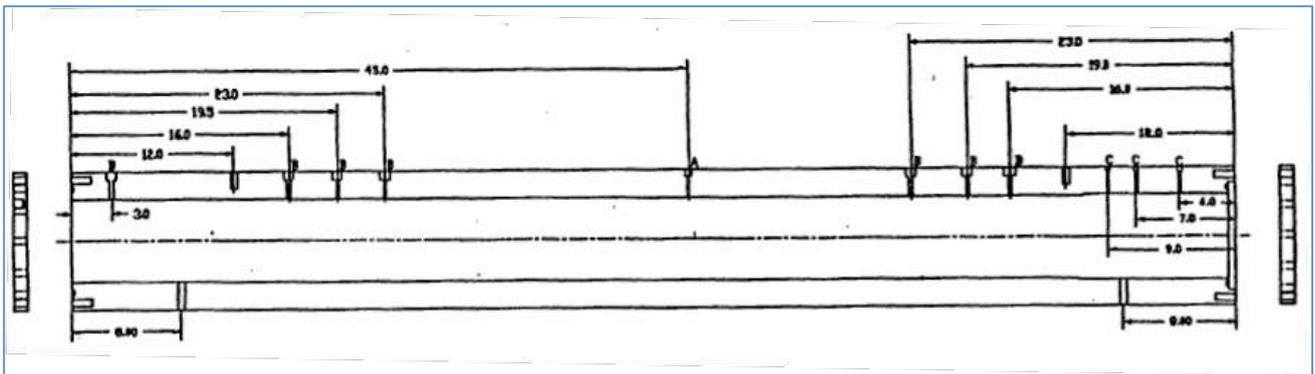


Fig. 21: Configuración experimental del tubo.

Por otro lado, se tomaron las siguientes medidas de control:

- **Control de presión hidrostática:** el tubo fue originalmente diseñado para que la presión hidrostática en el tubo pudiera ser controlada durante los ensayos/mediciones. El sistema se diseñó para realizar mediciones a

presiones superiores a 355psig (para simular profundidades oceánicas de 800pies). En la práctica, el tubo fue diseñado para resistir presiones de 1000psig, por si fuera necesarios su utilización en futuras mediciones con presiones más elevadas.

Se utilizó un diseño simple, en el que las placas terminales son de acero inoxidable y están atornilladas al tubo en sus extremos.

Durante las mediciones experimentales en el tubo se produjo un problema con el modo de onda plana en el tubo, excitando las placas terminales y éstas excitando el modo de onda plana en las paredes e interfiriendo en la velocidad de propagación de las ondas en el tubo. Asimismo, se detectó un problema de reflexión; parte de la reflexión de los extremos se traducía a las paredes y no al agua.

Para minimizar este problema, se procedió a colocar una espuma entre el tubo y las placas de los extremos, tal y como se indica en la figura a continuación.

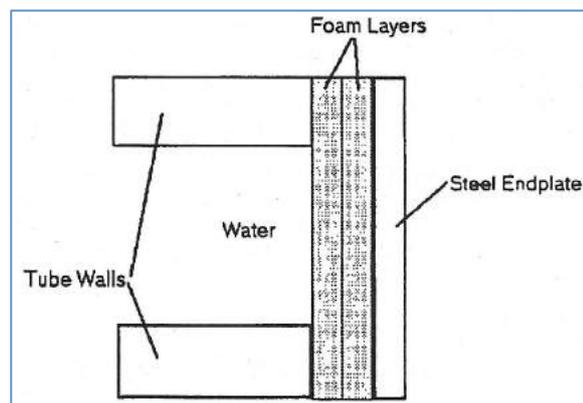


Fig.22: Configuración en extremo de tubo

- **Control de temperatura:** el tubo fue originalmente diseñado para que la temperatura del agua en el tubo pudiera ser controlada durante los ensayos/mediciones. Para simular temperaturas oceánicas, la temperatura del agua debería suponerse entre 4°C y 24°C. Para ello, el tubo se introdujo en una bañera/piscina de agua para poder variar la temperatura. El tubo se

introdujo en la piscina de la cual podía controlarse la temperatura del agua mediante un intercambiador.

- **Control sobre la corrosión:** se colocaron varillas de magnesio en el baño de agua, en el exterior del tubo a modo de ánodos de sacrificio.
- **Inserción de la muestra:** una vez el tubo está relleno de agua, éste se sumerge en el canal/piscina. Mediante una bomba de agua sumergible, el agua se distribuye rápidamente a través del tubo eliminando burbujas de aire que podrían quedar en su interior. Tras varias discusiones, finalmente se optó por dejar un ligero espacio de agua entre la parte posterior de la muestra y el tubo, según se puede observar en la figura a continuación.

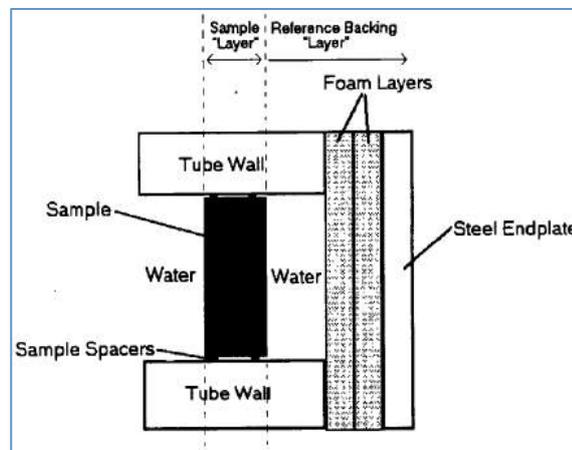


Fig.23 Configuración de la muestra al extremo del tubo.

- **Generación y adquisición de señales:** Un procesador envía una señal cada segundo a un generador de pulso digitales con 4 canales y a un osciloscopio digital para una sincronización de la señal de generación y de adquisición/recepción. Cada uno de los 4 canales del generador de pulso está conectado a un generador de ondas arbitrario. Un Generador de funciones está conectado a las entradas de los anteriores generadores arbitrarios para controlar y sincronizar la frecuencia de salida del generador de ondas arbitrarias.

La salida del primer generador de ondas arbitrarias se conecta a un amplificador y posteriormente se dirige a la fuente primaria. La salidas de los otros cuatro generadores de ondas arbitrarios se suman conjuntamente y se envían a un segundo amplificador de señales y a un actuador.

Las señales del hidrófono son amplificadas mediante amplificadores y pasan a través de unos filtros. Finalmente las señales se dirigen a un osciloscopio digital donde se promedian y se almacenan.

A continuación se adjunta un diagrama en el que se representa la generación y adquisición de señales.

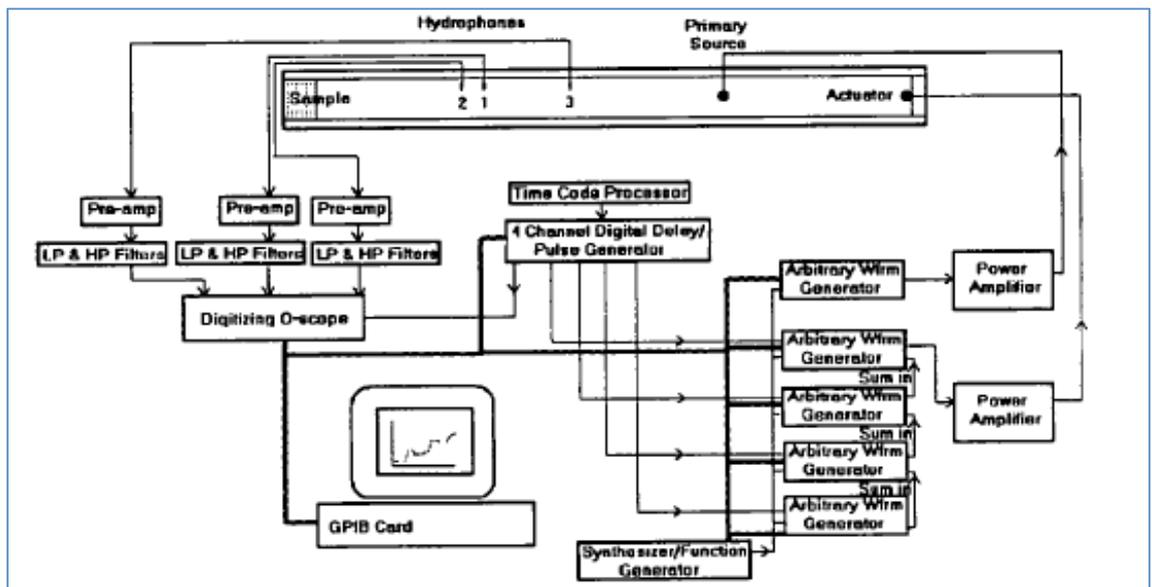


Fig.24: Diagrama de generación y adquisición de señales

- **Hidrófonos:** Se utilizan un total de tres hidrófonos en el tubo, tal y como se indica en el diagrama anterior. Se utilizan tres hidrófonos para que los datos puedan ser procesados con dos hidrófonos diferentes, con distancias de separación diferentes.
- **Fuente primaria:** compuesta por una esfera de PZT resistente al agua, de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, está suspendida aproximadamente en el centro radial del tubo, tal y como se muestra en el diagrama de la figura del diagrama anterior.

- **Actuador de cancelación activa:** compuesto por una esfera de PZT, similar a la fuente primaria.

3.3. Resultados del proceso experimental

a) Proceso de medición experimental

Se realizaron una serie de mediciones en los tres hidrófonos para dos configuraciones experimentales:

- Se realizó una primera configuración sin muestra en el tubo, para calcular el coeficiente de reflexión y impedancia de la terminación (extremo).
- En la segunda configuración, la muestra se insertó en el tubo y se realizaron una serie de mediciones para calcular el coeficiente de reflexión y impedancia de la combinación muestra-terminación.

Se utilizó el mismo software a partir del segundo y tercer programa de simulación, para calcular la velocidad compleja del sonido en la muestra.

Se realizaron mediciones con los hidrófonos a una frecuencia de muestreo de 50kHz y se recogieron 1.500 muestras usando un osciloscopio digital. Las mediciones se realizaron en las siguientes frecuencias: 500 Hz, 1kHz, 1,5kHz, 3kHz y 4 kHz. Para cada una de estas frecuencias, se guardó/computó el promedio de los datos obtenidos para cada uno de los 3 hidrófonos, para ser posteriormente procesados y obtener la velocidad de onda compleja en la muestra. Los datos se procesaron en dos series: una usando los hidrófonos 1 y 2 (aproximadamente 10,6cm de separación) y una usando los hidrófonos 3 y 2 (aproximadamente 49,53cm separación).

b) Muestras

Las mediciones se realizaron en caucho duro natural (3 tipos ligeramente diferentes denominadas: 334-270, AA-165-4 y AA-165-6), que se prepararon en las instalaciones del Naval Surface Warfare Center Carderock Division en Annapolis.

Las muestras consistían en una longitud de 15,31cm de longitud y 15,55cm de diámetro y estaban formadas por los siguientes componentes:

Componente	334-270	AA-165-4	AA-165-6
SMR CV 50/60	100	100	100
Stearic Acid	1	1	1
Protox 166	5	5	5
Carbon Black	20	40	65
Octamine	2	2	2
Circo LP oil	3	3	3
Sulphur	1,5	1,5	1,5
Altax	1	1	1
Unads	0,3	0,3	0,3

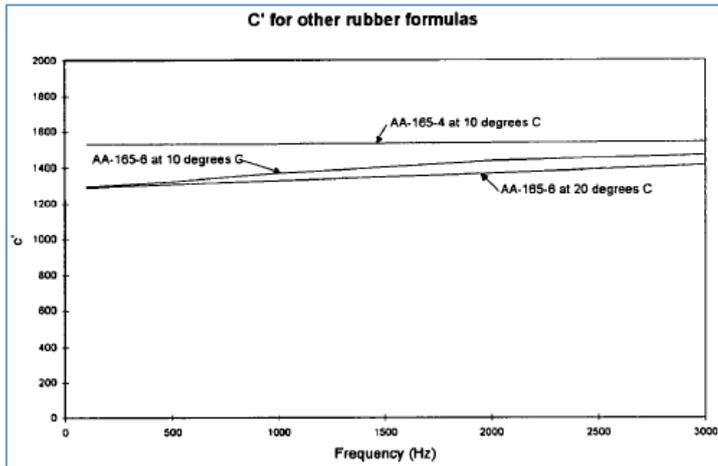
Los distintos componentes son básicamente los mismos, a excepción de su contenido en carbono.

La velocidad del sonido está relacionada mediante:

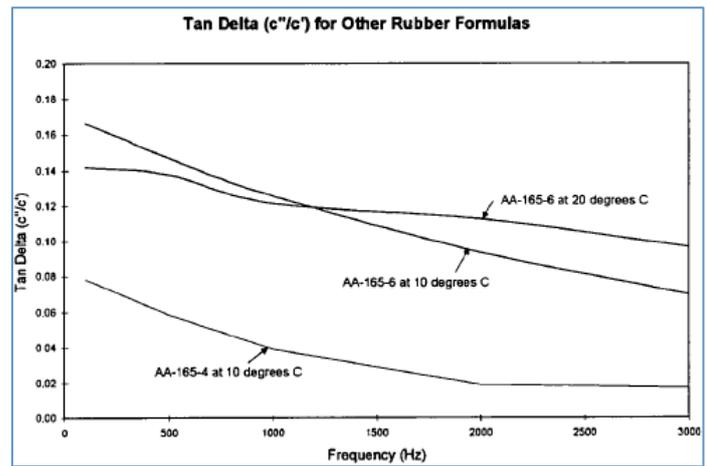
$$c = \sqrt{\frac{M}{\rho}}; \quad \text{donde} \quad M = \frac{3K(3K - E)}{9K - 9}$$

A continuación se adjuntan unos gráficos de estas muestras en las que se observa la evolución de c' y de la $\tan \Delta$ (c''/c'). En ellas se distingue lo siguiente:

- Se representan las muestras AA-165-4 y AA-165-6 a 10°C, mientras que la muestra 334-270 lo hace a 20°C.
- A mayor temperatura, menor c' .
- A menor contenido en carbono negro, mayor aumento de c' .
- A menor contenido en carbono negro, menor pérdida de tangente.



Gráfica 2. Evolución c' para muestras



Gráfica 3. Evolución $\tan \delta$ (c''/c') para muestras

c) Resultados experimentales

En las gráficas a continuación, se muestran los resultados obtenidos de c' para las muestras para unos centros de frecuencia de 500Hz, 1kHz y 3kHz, según lo determinado en el proceso experimental. Cada gráfica muestra el resultado de c' utilizando los hidrófonos 1 y 2 (separación de 10,6 cm) y los hidrófonos 3 y 2 (separación 49,53 cm).

Los resultados experimentales obtenidos no son exactamente los predichos en el proceso de simulación. Se detectan las siguientes observaciones:

- La calidad de los datos es pobre cuando el nivel de señal es bajo.
- Hay un problema generalizado con los datos obtenidos a bajas frecuencias (inferiores a 1kHz), incluso a frecuencias de 1kHz y 500 Hz.
- Los resultados están dentro de un rango esperado para este tipo de caucho utilizado como muestra.
- Aparentemente surgen problemas para el cálculo de c' a frecuencias de 3kHz usando los hidrófonos 2 y 3. Esto en la separación se produce cercano a un cero del factor $\sin\left(\frac{wd}{c}\right)$; para la separación más amplia de los hidrófonos 3 y 2.

Los datos experimentales para la frecuencia de 3kHz se procesaron para lograr una búsqueda iterativa del parámetro complejo c buscado, para soluciones adicionales.

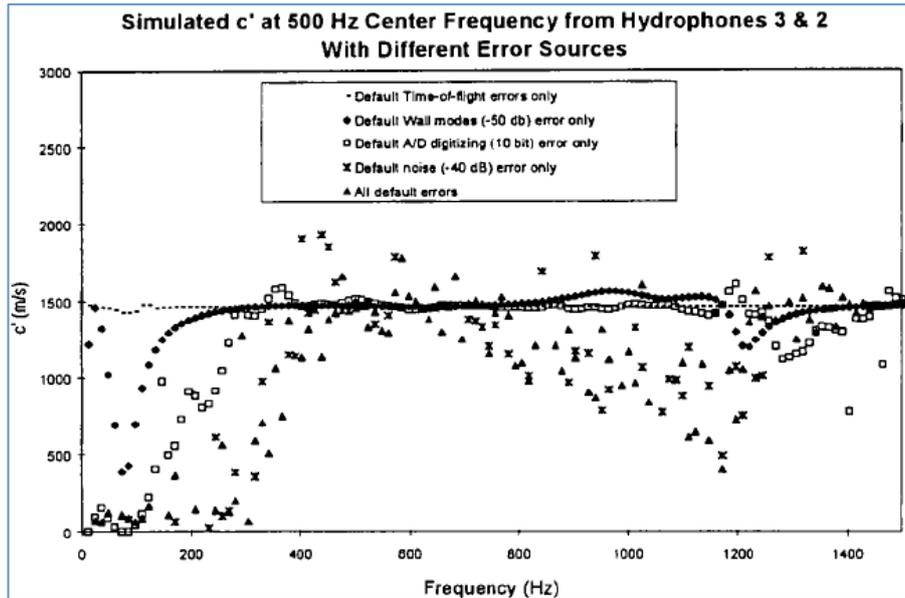
Los modelos de propagación y simulación fueron revisados y mejorados posteriormente para hacerlos simular con más exactitud el ensayo/experimento.

3.4. Conclusiones de los resultados del proceso experimental:

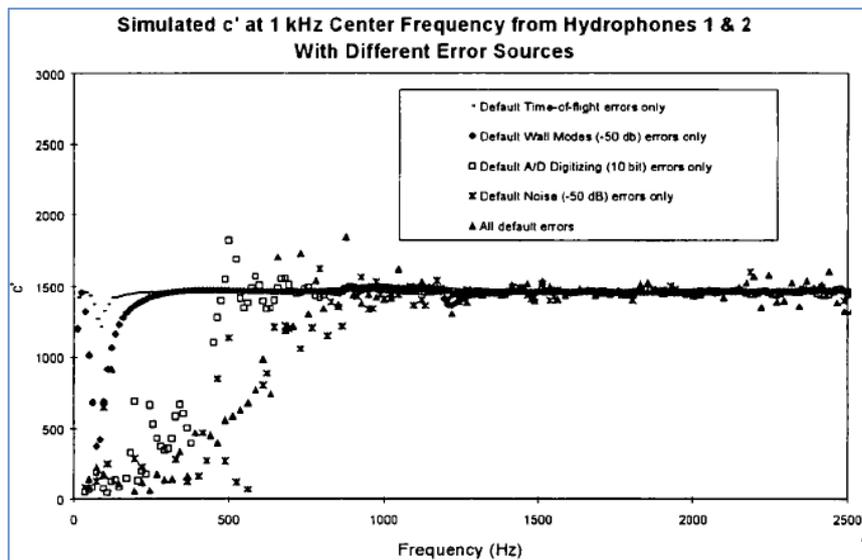
Tras las mediciones y revisiones realizadas, se obtienen las siguientes conclusiones de los resultados obtenidos durante el proceso experimental:

- Se obtienen resultados satisfactorios en cuanto a la determinación de la velocidad compleja de sonido por encima de 1kHz.
- Por debajo de la frecuencia de 1kHz frecuencia, se obtienen errores significantes.
- Asumiendo que los errores en el proceso experimental y en la simulación coinciden, los errores límites para cada frecuencia en cada caso pueden determinarse examinando la contribución de cada error en la expresión general de c' .

En los gráficos a continuación se muestra el resultado de c' con centros de frecuencia a 500 Hz y 1kHz, realizando ensayos con distintas condiciones y representando asimismo todos los errores simultáneamente. De esta gráfica se desprende que cuando todos los errores suceden de forma simultánea en el proceso de simulación, el error límite es el ruido siendo además el error dominante. Por ello, el resultado que se obtiene asumiendo todos los errores es prácticamente el mismo que si éste fuera el único error.



Gráfica 4.: Simulación de c' a 500Hz



Gráfica 5: Simulación de c' a 1 kHz

3.5 Conclusiones generales de la tesis

Como conclusiones de este trabajo se destacan las siguientes:

- Es posible realizar mediciones del coeficiente de reflexión y sobre las propiedades de los materiales acústicos mediante el uso de un tubo que representa una fracción de una longitud de onda.

- Los modelos analíticos y las mediciones experimentales muestran que lo anterior es posible, pero con ciertas limitaciones.
- Las mediciones son más sensibles a los errores cuando se realizan a bajas frecuencias.
- Para materiales con propiedades similares a las del agua, se pueden realizar mediciones satisfactorias con frecuencias inferiores a 300 Hz en un tubo de 2m de longitud.
- Para otros materiales, será necesario un tubo de 10m de longitud mínima para la realización de ensayos por debajo de 300 Hz.

4. ESTUDIO “AN IMPROVED WATER-FILLED IMPEDANCE TUBE”, REALIZADO POR PRESTON S.WILSON, RONALD A.ROY Y WILLIAM M.CAREY.

4.1 Introducción

En el artículo del estudio realizado por Preston S. Wilson, Ronald A. Roy y William M. Carey, de la Universidad de Boston, explican como mejorar la precisión de la medición en un tubo de impedancia lleno de agua, utilizando un método de medición que es una variación de la técnica normalizada del tubo de la función de transferencia de dos sensores.

Según indican en su artículo, en comparación con el estudio en un medio de aire o gas, hay dos barreras adicionales que hay que superar para poder medir las propiedades acústicas de los materiales en un medio acuático:

1. Minimizar los efectos de guía de ondas elásticas, que son el resultado del acoplamiento entre el líquido y las paredes del tubo.

2. La medida de la presión acústica sin perturbación en el ancho del tubo y una ausencia de cualquier señal de movimiento de la pared del tubo. En un tubo de impedancia lleno de agua utilizando dos-tres sensores, en un rango de 5-9kHz; la técnica no está limitada por un rango pequeño de operación.

A continuación se explicará el método de medición de la impedancia, los efectos de ondas elásticas, eliminación de perturbaciones y instrumentación utilizados en este estudio.

4.2. Método de medición

El método utilizado en este caso, al ser un tubo lleno de agua en el que el procedimiento para el método estándar de calibración (técnica de conmutación de sensor, mediante colocación de un amortiguador en la terminación) es difícil de realizar, es el método de los dos-sensores-tres-calibrados que requiere la utilización de sensores no conmutables con terminación absorbente. La calibración en este caso es alcanzada mediante el uso de tres valores conocidos de impedancia como referencia. Así, este método es equivalente al método estándar.

En un tubo de impedancia con un mismo diámetro y espesor de pared como terminación referencial, la altura del agua varía para alcanzar terminaciones de tres longitudes diferentes, las cuales son seleccionadas para evitar la resonancia y la anti-resonancia, lo que en gran medida, reduce la importancia de una detallada descripción teórica de mecanismos de pérdidas. Este requisito limita el rango de frecuencia útil para cualquier conjunto de las tres terminaciones de referencia alrededor de dos octavas. Se utilizan varios puntos de referencia y diferentes distancias de separación entre hidrófonos con el fin de realizar un aumento del rango de frecuencias.

En este método se busca que la frecuencia de corte esté por debajo de un límite, de manera que la onda sea plana dentro del tubo.

En cuanto a la técnica de calibración de los elementos que componen el sistema y que debe realizarse previamente a los análisis, se deberán conocer los puntos de posición de los sensores, terminaciones de referencia.

Con el tubo lleno de agua destilada (con su densidad ρ_1 conocida), y la velocidad del sonido c_1 , se determina la función de transferencia ($y^{(i)}$) para cada una de las tres terminaciones de referencia ($Z^{(i)}$). Seguidamente se mide la función de transferencia para cualquier terminación desconocida de impedancia que estará en función de las tres funciones de transferencia y $\rho_1 c_1$.

$$\frac{z}{\rho_1 c_1} = \frac{A+B+C}{D+E+F} \quad (1)$$

Donde:

$$A = Z^{(1)}Z^{(3)}(y^{(1)} - y^{(3)})(y - y^{(2)})$$

$$B = Z^{(1)}Z^{(2)}(y^{(2)} - y^{(1)})(y - y^{(3)})$$

$$C = Z^{(3)}Z^{(2)}(y^{(3)} - y^{(2)})(y - y^{(1)})$$

$$D = Z^{(1)}(y^{(3)} - y^{(2)})(y^{(1)} - y)$$

$$E = Z^{(2)}(y^{(1)} - y^{(3)})(y^{(2)} - y)$$

$$D = Z^{(3)}(y^{(2)} - y^{(1)})(y^{(3)} - y)$$

Las terminaciones de referencia son aproximadas, con impedancias adimensionadas $Z^{(1)}$, $Z^{(2)}$ y $Z^{(3)}$, que se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$Z^{(i)} = \frac{Z^{(1)}}{\rho_1 c_1} = i \tan(kd_i) \quad (2)$$

Donde:

d_i , es la longitud de la terminación

$k = \omega/c_1$; habiéndose asumido el tiempo $\exp(i\omega t)$

En la calibración, las longitudes de terminación d_i se eligen aquellos valores que eviten la resonancia y anti-resonancia. Las pérdidas en mecanismos pueden ser despreciadas ya que con un número de onda con valor $k = \omega/c_1$ es suficiente.

4.3 Efectos de guía de ondas elásticas

En el caso en el que el tubo está lleno de agua y con paredes de acero, pueden surgir unos efectos de guía de ondas elásticas y una dispersión de la velocidad del sonido, un desplazamiento radial de las partículas, una curvatura en el frente de la onda y la existencia de al menos un modo de orden superior en todas las frecuencias.

En este ensayo, los autores aplicaron la teoría obtenida por Del Grosso en la cual obtiene las ecuaciones del campo de desplazamiento de partículas y una relación de la dispersión en los modos de simetría axial en un tubo cilíndrico lleno de un fluido viscoso con unas paredes elásticas y un espesor cualquiera, el contorno radial exterior se aproxima como la liberación de la presión. Del grosso aplicó las ecuaciones que obtuvo a una variedad de ondas guía, utilizando como material en la pared acero inoxidable, obteniendo un resultado de la dispersión en relación al espesor de la pared con el ratio interno inferior al 1% en un orden bajo (denominado ET0), este porcentaje sigue en este orden hasta que la guía de ondas alcanza una frecuencia de corte. ET0 tiene tres frentes de ondas planas y un escaso movimiento radial de la curvatura del frente de onda alrededor de 14 veces y un movimiento de partículas radiales 20 veces superior a ET0. Asimismo, aparentemente la fuente propagadora de ondas ue es un pistón situado en la pared se acopla bien a ET0 y ml a ET1, dejando sólo planas las ondas que se propagan por la guía de ondas.

Aunque los resultados de Del Grosso fueron experimentalmente verificados en numerosos casos, todos los experimentos confirman su teoría para los parámetros de interés.

Se empleó un tubo cilíndrico de acero inoxidable de pared gruesa, de dimensiones y propiedades que se detallan en la tabla a continuación:

Sound speeds			
Water	304L s.s.	Densities	Dimensions
$c_1 = 1491 \text{ m/s}$	$c_l = 5640 \text{ m/s}$	$\rho_1 = 998 \text{ kg/m}^3$	$a = 2.54 \text{ cm}$
	$c_t = 3070 \text{ m/s}$	$\rho_s = 7970 \text{ kg/m}^3$	$b = 5.08 \text{ cm}$
			$L = 150.2 \text{ cm}$

Tabla.3: dimensiones y propiedades en el estudio de Del Grosso.

El pistón utilizado es de aluminio y está accionado por un elemento piezoeléctrico, montado en la parte inferior del tubo que se coloca verticalmente y se llena de agua destilada sin gas, tal y como se muestra en a figura a continuación.

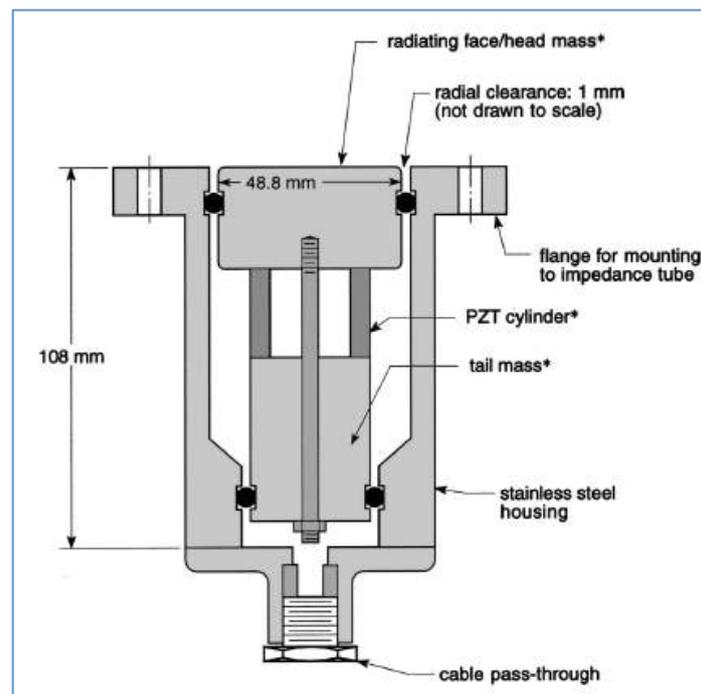
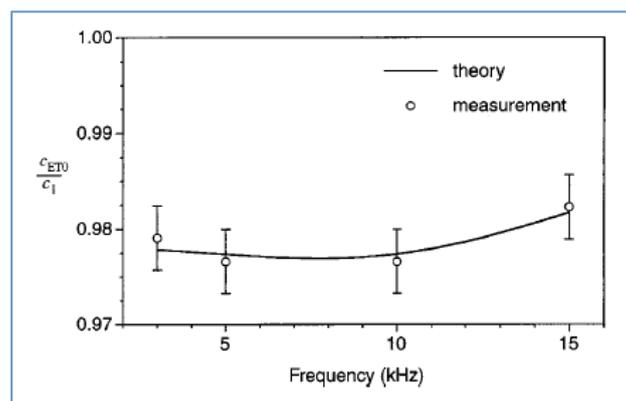


Fig.25: Sección transversal de la fuente de sonido

Se realizaron una serie de mediciones con la ayuda de un hidrófono, por debajo de la superficie del agua en un extremo abierto del tubo, el hidrófono genera una serie de

pulsos que se propagan entre la fuente y el extremo abierto, la señal de los hidrófonos fue grabada por un osciloscopio digital. Los pulsos estaban suficientemente separados en el tiempo y el tiempo entre pulsos se obtuvo a partir de una correlación del análisis.

Los resultados obtenidos para varias frecuencia fueron comparados satisfactoriamente con la ecuación el Del Grosso, la dispersión medida a partir de un rango de 3kHz a 15 kHz es inferior al 0,5% y las velocidades están sólo a un leve porcentaje por debajo de la velocidad media intrínseca del sonido.



Gráfica 5.: Comparación de resultados teóricos y analíticos.

La desviación entre la presión acústica del centro del tubo y de la pared es del orden del 1% para la frecuencia de 5kHz, 2% para 10kHz y 5% para 15kHz, conforme con las predicciones realizadas utilizando las ecuaciones de Del Grosso.

Estas mediciones confirman que el campo del interior de la guía de ondas no es realmente plana, sino que hay una pequeña dispersión y la curvatura del frente de onda está presente, a pesar de esta desviación en el comportamiento plano de onda, éste es suficiente para describir la propagación dentro la guía de ondas.

4.4. Eliminación de perturbaciones causadas por los sensores.

Corbett, informó en una de sus investigaciones que los hidrófonos dentro de un tubo de impedancia lleno de agua, podrían perturbar el campo acústico y junto con la ubicación del sensor podría contribuir significativamente a un error de medición de la

impedancia.

Los sensores de pared podrían ser menos invasivos y ubicarlos con mejor exactitud, pero el movimiento de la pared del tubo impide su uso.

Se realizan cálculos utilizando las ecuaciones de Del Grosso, indicando que para los parámetros de guías de ondas dados en la tabla anterior (apartado 4.3.2), el movimiento radial y longitudinal de las partículas están presentes en la pared del tubo.

El hidrófono se monta en la pared de tal forma que se produzca una reducción del acoplamiento en ambas direcciones de la pared. Sin embargo, se debe mantener un valor alto de la impedancia en la dirección radial ya que no debe aparecer como una zona acústicamente blanda en la pared.

Esto se consiguió mediante un disco transductor de material Lead-Zirconate-Titanate (PZT: Plomo- Zirconato-Titanato) montado en una carcasa cilíndrica de acero (ver figura). Las dos partes de la carcasa se enroscan juntas y comprimen entre ellas unas capas apiladas de mica / PZT / mica, las capas de mica aíslan eléctricamente el PZT y también ayudan a evitar el cizallamiento entre la carcasa del sensor y el elemento PZT, sin embargo la rigidez en la dirección radial se mantiene. El aislamiento del movimiento con la pared es a partir de dos juntas tóricas de goma, a pesar de estar libre para el movimiento en dirección radial como respuesta a una fuerza radial constante, la densidad y rigidez del hidrófono dan un resultado de alta impedancia acústica de entrada, debe de haber una holgura entre el sensor y el orificio de manera que las juntas tóricas proporcionan el aislamiento. Sin embargo, en esa holgura se produce pérdidas de energía acústica. Se encontró un orificio con dimensiones está comprendidas entre un 0.4%-0.8% más grande que el hidrófono.

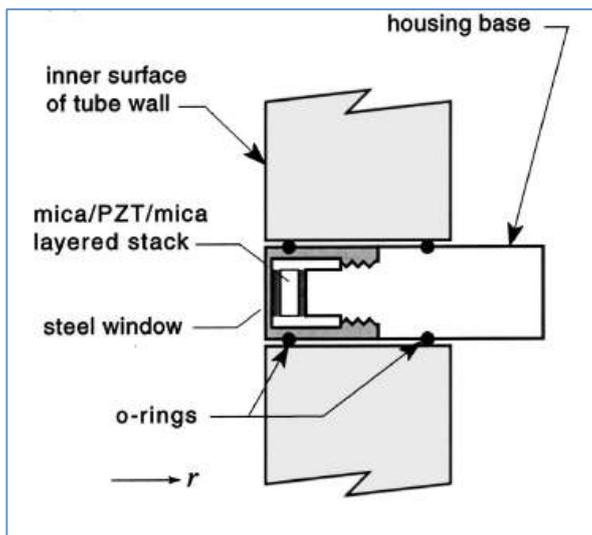


Fig. 26: Montaje del hidrófono en la pared del tubo

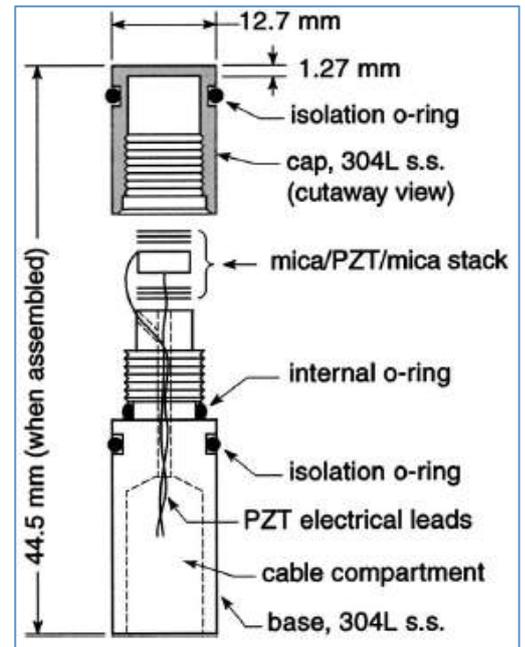


Fig. 27: Detalles del hidrófono utilizado.

Se realizó un experimento para verificar que el uso de estos hidrófonos no perturban significativamente el campo acústico en el interior del tubo de impedancia. La fuente emite una señal de banda ancha; se utilizó un analizador de espectro para medir la presión acústica como función de la frecuencia. Se midió el espectro en el tubo antes de que fueran perforados para el montaje de los componentes, y una vez instalados los hidrófonos se volvieron a medir. La desviación media de los espectros antes y después de colocar los hidrófonos fue aproximadamente de 0.5 dB para un rango de la impedancia de 5 a 9 KHz.

El aire atrapado en el hueco entre la junta tórica y la ranura puede presentar pérdidas de energía acústica y alterar las condiciones de contorno en la pared del tubo. Es difícil evitarlo, a menos que la colocación de los hidrófonos se realice bajo agua, si esto no fuera posible, es útil humedecerlos en agua sin gas antes de su colocación. La medición de la función de transferencia entre los hidrófonos y el aire libre en el sistema mostrará picos agudos y nulos en un correcto funcionamiento. Estas variaciones bruscas se deben a valores nulos en el campo de presión que se producen en múltiplos enteros de media longitud de onda en la parte superior del tubo, la presencia

de burbujas de aire, incluso en un instante corto de tiempo variará la velocidad del sonido eficaz que induce a la pérdida de energía y por tanto la frecuencia se desplaza reduciendo la nitidez entre los extremos.

4.5. Instrumentación del tubo de impedancia

Como se comentó en apartados anteriores la longitud del tubo era apropiada para la propagación, pero los efectos de atenuación que ya eran pequeños se reducen aún más minimizando la longitud del tubo. Se utilizó la siguiente longitud del tubo y distancia de separación entre sensores, basándose en la ASTM, según se muestra en la figura a continuación:

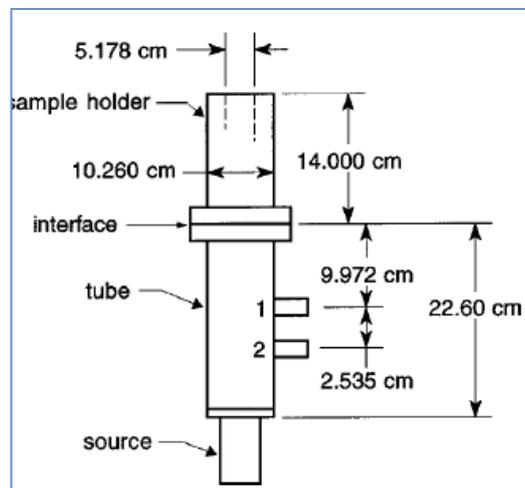


Fig.28: Dimensiones de un tubo de impedancia ASTM

En el siguiente apartado se adjunta un esquema de la instrumentación y elementos de apoyo. La fuente que es un pistón piezoeléctrico, la excitación de la onda plana es dada con un ruido mayor a 10 dB, el aumento de la distancia de separación entre sensores (s) disminuye la frecuencia mínima utilizable del instrumento y por tanto se produce una disminución del radio interior del tubo.

4.6. Procedimiento de medición

El primer paso en el procedimiento consiste en la medición de la velocidad de propagación efectiva en el tubo; la calibración del sistema es sensible a pequeñas variaciones de la velocidad del sonido en el tubo y a la temperatura, se controla

usando un multímetro digital y un termopar unido al exterior del tubo. La calibración y medición de la velocidad del sonido se debe repetir si la temperatura en el tubo varía alrededor de 0.5°C , pero la capacidad calorífica del agua hace que el tubo de impedancia lleno de agua sea menos sensible a los cambios de temperatura en el ambiente comparado con un tubo lleno de aire

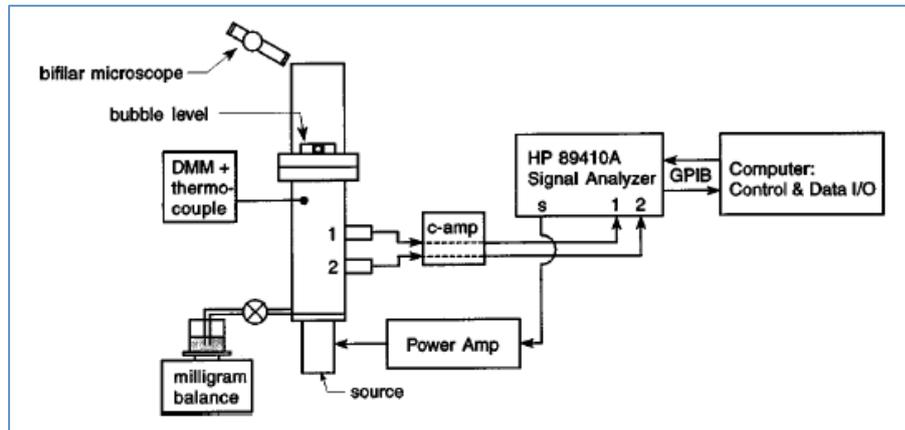


Fig.29: Esquema del tubo de impedancia e instrumento de apoyo.

El tubo se llena con agua destilada y sin gas, preferiblemente varias horas antes de la operación. Esto asegura una temperatura sea constante así como la disolución de cualquier burbuja de aire que puede estar en el soporte de la muestra, en el tubo, en la fuente-pistón o alrededor de los hidrófonos. Se obtiene un nivel del agua para aproximar 0.05 mm de precisión por medio de un microscópico bifilar para medir la distancia desde la superficie del agua a la parte superior del tubo. La generación y transferencia de la medición de la señal se lleva a cabo por un equipo analizador de señales, en este caso tipo Hewlett-Packard 89410A.

La fuente de sonido es conducido por medio de chirridos periódicos de $5\text{ a }9\text{ KHZ}$ o banda limitada de ruidos pseudo-aleatorios, los chirridos son útiles para mediciones individuales de corta duración y el ruido es útil para valores medios. La función de transferencia y_0 entre los hidrófonos montados en la pared se mide al igual que la posición de los ceros y picos, la conservación in situ de la velocidad del sonido c_{eff} se

puede calcular sobre la base del nivel de agua.

El sistema está listo para realizar tres mediciones de calibración, las longitudes de 1.5, 2.5 y 3.5 cm se seleccionan para evitar cualquier extremo, como se ha mencionado anteriormente.

El volumen de agua adecuada es controlada y la función de transferencia $y(1)$, $y(2)$, $y(3)$ se mide para cada longitud d_1 , d_2 y d_3 ; de esta forma se completa el procedimiento de calibración. El material desconocido es instalado y se mide la función de transferencia. La impedancia que se desconoce se calcula a partir de las tres mediciones de calibración $y(1)$, $y(2)$, $y(3)$ y la ecuación (1). Para minimizar el error en las mediciones de la función de transferencia, el ancho de banda de resolución se reduce al mínimo y se obtienen un número suficiente de promedios. Si se utiliza una membrana para separar la muestra del agua por debajo de la interfaz, las longitudes de las terminaciones de calibración deben de ser establecidos por la eliminación de agua desde la parte superior del tubo con una pipeta volumétrica.

La calibración puede ser verificada de manera eficiente mediante el uso de la medición de la primera función de transferencia $y(0)$, corresponde a un cuarto de la longitud del fluido d_0 , que puede ser considerada una transmisión de la liberación de la presión final, cuya longitud es conocida a partir de la medición con microscópico.

4.7 Conclusiones del estudio

Las conclusiones de este trabajo realizado por Preston S. Wilson, Ronald A. Roy y William M Carey, obtenidas tras la medición de la impedancia mediante la técnica de dos-sensores-tres-calibrados en un tubo lleno de agua, son las siguientes:

- Para que la técnica tenga éxito, la propagación dentro del tubo debe limitarse a las ondas planas y la medición de la presión acústica debe lograrse sin la perturbación del campo acústico. El primer criterio se encontró con la reducción al mínimo de la guía de ondas elásticas, efectos que son inherentes en un tubo lleno de líquido. El uso de una modelo de guía de onda elástica de un tubo

cilíndrico, interior y radios de pared exterior facilitó la reducción al mínimo estos efectos en el rango de frecuencias de interés, 5-9 kHz. El segundo criterio se cumple utilizando una vibración aislada, montado en la pared un sensor de presión acústica, con una alta impedancia de entrada acústica que mantuvo la condición de contorno-sonido duro a lo largo de la pared del tubo.

- Se ha comparado el rendimiento del presente tubo de impedancia lleno de agua con el rendimiento de sistemas anteriores obteniendo una mayor precisión de medición.
- Aunque el presente instrumento fue diseñado para una particular gama de frecuencias, los radios de tubo y posiciones de los sensores podrían ser modificados para el uso en otras frecuencias.

5. CONCLUSIONES

A continuación se detallan las conclusiones extraídas tras el estudio de la historia del tubo de impedancia , de sus características y métodos de medición, así como de varios trabajos detallados sobre su uso en un medio acuoso.

Algunos problemas con las técnicas tradicionales del tubo de impedancia al realizar dicho ensayo en medio acuoso son los siguientes:

- Generalmente y debido al problema de la acumulación de vibraciones en las paredes del tubo lleno de agua, no es habitual el uso de la técnica de ondas estacionarias en tubos llenos de fluido/agua. Algunos autores afirman que la técnica del pulso es la más efectiva para mediciones bajo el agua a pesar de tener desventajas cuando se utiliza a bajas frecuencias.
- La relativamente alta velocidad del sonido en el agua teniendo en cuenta el requisito de que exista una separación temporal entre el pulso incidente y el reflejado obliga a la construcción de un tubo de mayor longitud de la deseada.
- Para conseguir una separación temporal entre el pulso incidente y el reflejado mediante la técnica del pulso, la longitud del tubo no puede ser menor que la longitud del pulso incidente (duración de velocidad del sonido en el tubo).
- En para realizar mediciones a determinadas frecuencias, es necesario una gran longitud del tubo, siendo ésta longitud habitualmente excesiva y impracticable para su uso en un laboratorio además de que estas dimensiones encarecen la construcción del tubo y dificultan el control de la temperatura en el agua en el interior del tubo.

Del trabajo realizado por DEBRA M.KENNEY, se desprenden las siguientes conclusiones

- Es posible realizar mediciones del coeficiente de reflexión y sobre las propiedades de los materiales acústicos mediante el uso de un tubo que representa una fracción de una longitud de onda.

- Los modelos analíticos y las mediciones experimentales muestran que lo anterior es posible, pero con ciertas limitaciones.
- Las mediciones son más sensibles a los errores cuando se realizan a bajas frecuencias.
- Para materiales con propiedades similares a las del agua, se pueden realizar mediciones satisfactorias con frecuencias inferiores a 300 Hz en un tubo de 2m de longitud.
- Para otros materiales, será necesario un tubo de 10m de longitud mínima para la realización de ensayos por debajo de 300 Hz.

Las conclusiones del trabajo realizado por Preston S. Wilson, Ronald A. Roy y William M Carey, obtenidas tras la medición de la impedancia mediante la técnica de dos-sensores-tres-calibrados en un tubo lleno de agua, son las siguientes:

- Para que la técnica tenga éxito, la propagación dentro del tubo debe limitarse a las ondas planas y la medición de la presión acústica debe lograrse sin la perturbación del campo acústico. El primer criterio se encontró con la reducción al mínimo de la guía de ondas elásticas, efectos que son inherentes en un tubo lleno de líquido. El uso de un modelo de guía de onda elástica de un tubo cilíndrico, interior y radios de pared exterior facilitó la reducción al mínimo estos efectos en el rango de frecuencias de interés, 5-9 kHz. El segundo criterio se cumple utilizando una vibración aislada, montado en la pared un sensor de presión acústica, con una alta impedancia de entrada acústica que mantuvo la condición de contorno-sonido duro a lo largo de la pared del tubo.
- Se ha comparado el rendimiento del tubo de impedancia lleno de agua con el rendimiento de sistemas anteriores obteniendo una mayor precisión de medición.
- Aunque el instrumento objeto de estudio fue diseñado para una particular gama de frecuencias, los radios de tubo y posiciones de los sensores podrían ser

modificados para el uso en otras frecuencias.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. *Composites con reciclado para la mejora del aislamiento acústico*. Ortiz-Quintana, M. Iglesias. 2010.
- [2]. *Diseño y construcción de un dispositivo para medir coeficientes de absorción de materiales*. Sánchez, J. Abey Álvarez y González, G. Lozano. 2007.
- [3]. *Glosario de términos acústicos*. Sociedad española de acústica. 2012.
- [4]. UNE-EN ISO 10534-1:2002. *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria* (ISO 10534-1:1996)
- [5]. UNE-EN-ISO 10534-2:2002. *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia* (ISO 10534-2:1998)
- [6]. *Acondicionamiento acústico*. Rodríguez, S. Rial. 2013.
- [7]. *Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para uso en acústica arquitectónica*. Sanchis, E. Juliá. 2008.
- [8]. *Minimization of enclosed acoustic energy density by means of active noise control method*. Gil, J. Sobrino. 2009.
- [9]. *A short water-filled pulse tube for the measurement of the acoustic properties of materials at low frequencies*. Debra M. Kenney 1997.
- [10]. *Underwater acoustic absorption characteristics of composites of wood, rubber and steel*. F.A. Barge, 1978.
- [11]. *An impedance tube for the insitu classification of bubbly liquids*. J. Chester Wilbur. 2004.
- [12]. *An improved water-filled impedance tube*. Preston J. Wilson, Ronald A. Roy and William M. Carey.
- [13]. *Diseño de un tubo de impedancia para la caracterización de materiales en acústica submarina*. Stabilito, D. Díaz. 2013.
- [14]. *Tubo de impedancia en medio acuático: análisis del error sistemático y aleatorio*. Lison C. Campillo. 2013.
- [15]. *Standard Method of test for impedance and absorption of acoustical materials by the tube method*. ASTM. 1972.
- [16]. *Accurate method for the experimental evaluation of the acoustical impedance of a black box*. Munjal, I.L. Kathuriya and M.L. 1975
- [17]. *Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random excitation technique*. Ross, A.F. Seyber and D.F. 1977.
- [18]. *Analysis and improvement of the experimental techniques*. Geetere, 2004.

[19]. *Diffusivity characteristics of the acoustic field in the reverberant room at the CIF.* Pérez-López, L. Torres Quevedo. A. 1965.

[20]. *Sound propagation in bubbly liquids.* Wilson, 2002.