

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA**

**“MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN  
ACÚSTICA EN AGUA”**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

*Carlos Ortí Inglés*

Tutor/a:

*D. Rubén Picó Vila*

*D. Víctor José Sánchez Morcillo*

*GANDIA, 2014*

# MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN EL AGUA

*Autor:* Carlos Ortí Inglés

*Director1:* Rubén Picó Villa

*Director2:* Víctor José Sánchez Morcillo

## **Resumen**

Con el presente estudio se pretende caracterizar la absorción acústica de varios materiales absorbentes proporcionados por el Centro Naval de Murcia, empleados habitualmente como recubrimiento en los cerramientos de cámaras de medida, con el fin de absorber las posibles reflexiones generadas sobre éstos. La característica más relevante de estos materiales se encuentran en su geometría, en donde una de sus caras forma una superficie creada a partir de cuñas, tal y como es habitual en cámaras anecoicas pensadas para propagación en aire.

Para caracterizar dichas muestras, varios métodos de medida serán evaluados en el proceso.

En un objetivo secundario, se tratará de adecuar y validar el método comúnmente empleado para la caracterización de materiales absorbentes en aire, descrito en la normativa vigente UNE-EN ISO 354 2004, para condiciones subacuáticas.

## **Palabras clave**

Absorción acústica; Material anecoico; Campo libre; Cámara reverberante.

## **Abstract**

The present study aims to characterize the acoustic absorption of various absorbent materials provided by the Naval Center Murcia, commonly used as a lining in enclosures measuring chambers, in order to absorb any generated reflections on these. The most important feature of these materials are found in geometry, where one side forms a surface created from wedges, as is common in anechoic chambers designed for propagation in air.

To characterize the samples, several measurement methods will be evaluated in the process.

In a secondary objective we try to adapt and validate the method commonly used for the characterization of absorbing materials in air, described in the current regulations UNE-EN ISO 354 2004, in water.

## **Key words**

Acoustic absorption; Anechoic material; Free field; Reverberation chamber.

<b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>Palabras clave</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Key words</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2 MATERIAL ABSORBENTE ANECOICO</b> .....	<b>6</b>
<b>3 BASES TEÓRICAS</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1 Campo libre</b> .....	<b>9</b>
3.1.1 Fundamentos del método.....	9
3.1.2 Principio del método .....	10
3.1.3 Equipo de medida .....	11
<b>3.2 Tiempo de reverberación en cámara reverberante</b> .....	<b>13</b>
3.2.1 Aspectos normativos .....	13
3.2.2 Fundamentos del método.....	13
3.2.3 Principio del método .....	15
3.2.4 Características del recinto y procedimiento del ensayo .....	17
3.2.5 Geometría y propiedades de la cámara reverberante en agua .....	19
3.2.6 Adaptación de la norma ISO-EN UNE 354 2004 en agua.....	21
3.2.7 Equipo de medida .....	23
<b>4 Resultados</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1 Campo libre</b> .....	<b>24</b>
4.1.1 Procedimiento de medida .....	24
4.1.2 Resultados.....	26
4.1.3 Simulación numérica del efecto de dispersión sobre la muestra.....	30
<b>4.2 Cámara reverberante</b> .....	<b>32</b>
4.2.1 Procedimiento de medida .....	32
4.2.2 Resultados. Método de Sabine.....	33
4.2.3 Resultados. Método Eyring.....	34
<b>5 Resumen y conclusiones</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Referencias y bibliografía</b> .....	<b>38</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

Realmente, existen pocos estudios sobre el cálculo del coeficiente de absorción acústica en agua, aunque hayan sido probadas diferentes configuraciones de medida, como la adaptación del método de cámara reverberante [1], [2], o métodos de cálculo directo de energía.

Varias aplicaciones como la calibración de hidrófonos, medición de potencia, la caracterización de transductores, etc. requieren que el experimento se realice bajo condiciones de campo libre en un tanque de agua.

Las ondas ultrasónicas generadas por el transductor inciden sobre las paredes del tanque y se producen efectos de reflexión y dispersión sobre los diversos objetos sumergidos en el agua, incluyendo hidrófono emisor e hidrófono receptor. Lo deseado es que estas ondas no interfieran en la captura de la señal útil.

Esto se puede lograr mediante el uso de tanques hechos de un material totalmente absorbente [3]. Sin embargo, los tanques suelen estar hechos de materiales mecánicamente duros, tal como vidrio, policarbonato, acero, etc. generalmente buenos reflectores de ondas ultrasónicas debido a la alta diferencia de impedancia acústica entre agua y estos, por lo tanto, se vuelve imperativo el uso de otro material que pueda ser adherido en las paredes del tanque, para tratar de eliminar estas reflexiones indeseadas.

Las pérdidas de energía acústica de las ondas ultrasónicas por reflexión en los materiales se caracterizarán mediante el coeficiente de absorción acústica  $\alpha$ , entendiendo por tal a la relación entre la energía acústica absorbida por un material y la energía acústica incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y que puede variar desde un 0 % al 100 %, para diferentes materiales, en el primer caso la reflexión es total y en el segundo lo es la absorción.

El coeficiente de absorción de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda y del ángulo con el que la onda incide sobre la superficie. Además varía considerablemente con el ángulo de incidencia de las ondas.

## 2 MATERIAL ABSORBENTE ANECOICO

Disponemos de dos muestras de material absorbente, suministradas por el Centro Naval de Murcia, de idénticas características geométricas, aunque de diferente composición química.

Estas muestras están diseñadas para realizar la función de recubrimiento en tanques de medida empleados habitualmente en ultrasonidos. Por ello, serán sometidas a los diferentes métodos de medida propuestos en este estudio, para la caracterización de su coeficiente de absorción acústico en el rango frecuencial comprendido entre los 40 y los 160 kHz.

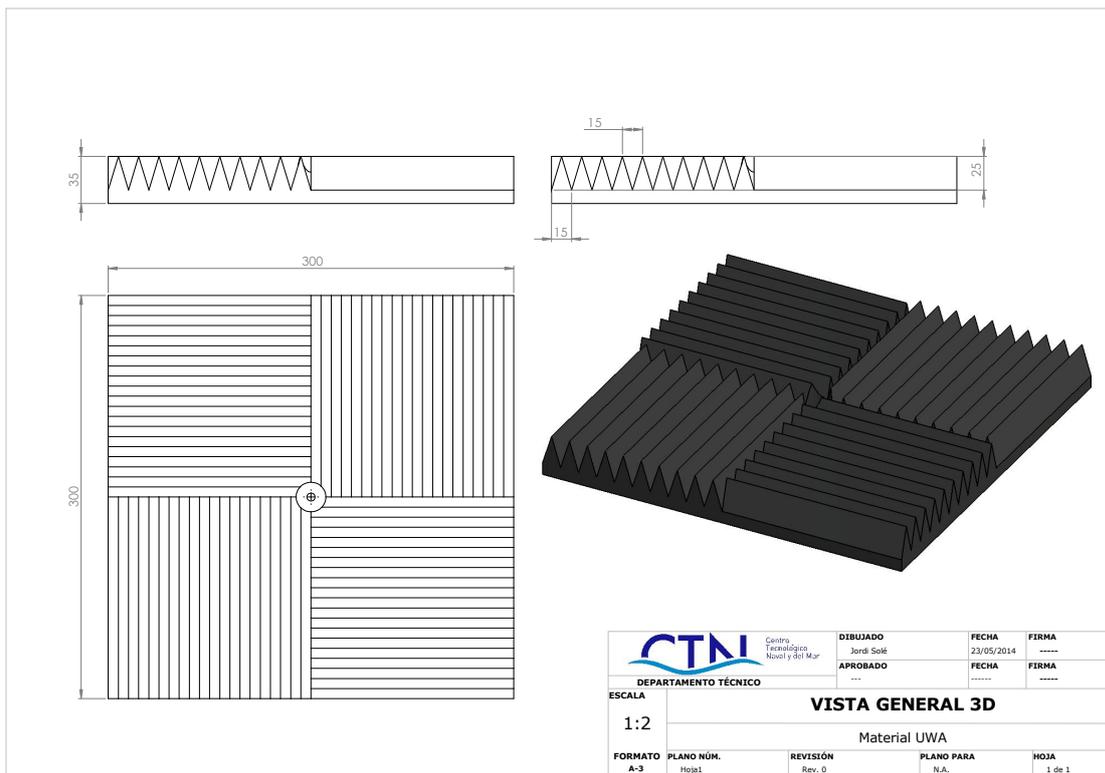


Figura 3.1. Características físicas de las muestras de material absorbente

La característica más relevante perceptible a primera vista, es que la superficie de estas muestras tiene un acabado en forma de cuña. El objetivo de la construcción con esta geometría es la de reducir las superficies planas, de modo que todas las reflexiones son distribuidas nuevamente hacia el absorbente, además de aumentar el coeficiente de absorción en baja frecuencia.

Como se puede observar en la figura anterior, las cuñas crean forman una geometría modular formada por cuatro bloques de simetría impar.

El método de diseño seguido por el fabricante (Centro Naval de Murcia) en cuanto a la composición de los absorbentes, ha sido el del testeo mediante prueba y error, copiando la geometría habitualmente empleada en absorbentes usados en la construcción de cámaras anecoicas en aire.

El hecho de que el proceso seguido no se ha basado en sus condiciones acústicas, justifica el estudio de sus características absorbentes y del futuro desarrollo de estas muestras, más aún cuando por parte del fabricante no se ha evaluado dicha respuesta para las frecuencias de trabajo empleadas en este estudio.

Ambas muestras serán analizadas por sus superficies con forma de cuña y también por su parte posterior, con superficie plana, para obtener una evaluación la contribución del material de construcción. Para el resto del documento nos referiremos a la superficie con geometría en forma de cuña como "cuñas" y a la otra superficie como "superficie plana".

### 3 BASES TEÓRICAS

Los métodos para determinar las propiedades absorbentes del sonido de los materiales pueden clasificarse en tres grupos [8]:

1. Métodos de medida en tubos
2. Métodos de medida en cámara reverberante
3. Métodos de medida en campo libre

Con respecto a los métodos de medida en tubos, el método más clásico para determinar el coeficiente de absorción acústica a partir de la medida de la impedancia superficial de un material bajo incidencia normal, es el basado en el tubo de impedancia acústica. Este método viene descrito en la normativa UNE-EN ISO 10534-2. Este método no es aplicable debido a las frecuencias de trabajo consideradas ya que no se puede asegurar la propagación de ondas planas en las frecuencias más altas. Según normativa para cumplir con esta condición,

$$F_{MAX\ aplicable} = c/2D$$

donde

$c$ , es la velocidad de propagación del medio

$D$ , es el diámetro del tubo

$$D = \frac{c}{2 * F_{MAX\ aplicable}} = \frac{1450}{2 * 160000} = 4.5 * 10^{-3}$$

Por lo tanto el diámetro del tubo tendría que ser del orden de los pocos milímetros.

Por su parte, el método de la cámara reverberante se utiliza para medir la absorción en situaciones de incidencia aleatoria. El método se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material. El hecho de que se trabaje con campo sonoro difuso le proporciona un mayor ajuste a la realidad. Esta metodología viene descrita en la norma UNE-EN ISO 354: 2004

Finalmente están los métodos de medida del coeficiente de absorción acústica que 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 se pueden clasificar de varias formas: por ejemplo, según su aplicación según la clase de señal generada o según el número de transductores necesarios.

### 3.1 Campo libre

#### 3.1.1 Fundamentos del método

La energía total que choca contra una superficie, una parte se refleja, otra parte es absorbida en la propia superficie y la otra parte, transmitida al espacio a través de la propia superficie. Dividiendo estos, los fragmentos de energía son:

El coeficiente de reflexión de energía  $|r|^2$

El coeficiente de absorción  $\alpha$

El coeficiente de transmisión de energía  $|t|^2$

y aplicando conservación de energía se obtiene

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1$$

Suponga una onda plana armónica que choca en dirección normal sobre una superficie. La onda plana viajera será reflejada con una disminución de intensidad debido a la absorción del material. Si la presión de la onda de sonido incidente y reflejada son llamadas  $P_i$  y  $P_r$ , respectivamente, y el coeficiente de reflexión  $r$  a un punto, es definido por

$$r = \frac{P_r}{P_i}$$

Las intensidades de las dos ondas son proporcionales a  $|P_i|^2$  y  $|P_r|^2$ , el coeficiente de reflexión de energía es,

$$r^2 = \left| \frac{P_r}{P_i} \right|^2$$

Si el fragmento de energía que traspasa la muestra es muy pequeña (despreciable) comparada con la absorbida, entonces el coeficiente de absorción de energía es obviamente representada por la ecuación

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

Los estudios críticos de numerosos métodos para medir la impedancia acústica en incidencia normal, hace que se confía aquí, en la descripción del principal método que se parece frecuentemente ser usado.

### 3.1.2 Principio del método

La técnica de campo libre - tono burst permite la determinación de las amplitudes de presión del campo libre y reflejado, aún dentro de los confines de un tanque de pruebas de laboratorio.

En un tanque de agua, un pulso sinusoidal viaja desde una fuente de sonido (Emisor) hacia el material de ensayo con un ángulo normal a la superficie. El pulso se refleja parcialmente y se transmite parcialmente en la superficie del material de prueba. Por lo tanto, mediante la medición del nivel de presión delante del material reflectante, se puede obtener el factor de reflexión. El campo frente a la muestra se determina mediante el escaneo con un hidrófono.

Esta metodología está ampliamente estudiada para el cálculo directo de la absorción en muestras de superficie plana, pero debido a la geometría en forma de cuña de las muestras disponibles, será necesario adaptar el método. Por ello en este caso se contempla la medida del campo reflejado para todos los puntos sobre la muestra, procurando un barrido en dos dimensiones (ancho y largo), manteniendo incidencia normal sobre la muestra, que determine posibles focalizaciones producidas por la propia geometría del material.

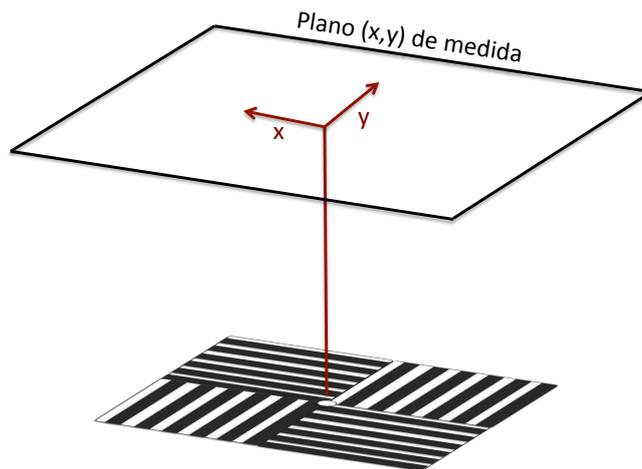


Figura 3.1. Metodología de medida para el barrido de amplitudes en el método de tono burst

El emisor emite pulsos cortos de una señal de frecuencia única. Los sistemas de emisión y recepción se montan de modo que sólo la señal acústica deseada del pulso generado se recibe para su procesamiento.

Las muestras, estarán situadas sobre el fondo del tanque de medida. El emisor se encuentra suspendido de una barra que descansa en la parte superior del tanque, mientras que el receptor está conectado a un mecanismo de desplazamiento de tres ejes.

Con el fin de reducir los efectos de interferencia debido a la reflexión de las paredes del tanque y de superficie libre, se ha tenido en cuenta, para evitar interferencias, las primeras

reflexiones provenientes de los cerramientos y también, las reflexiones múltiples entre transductores.

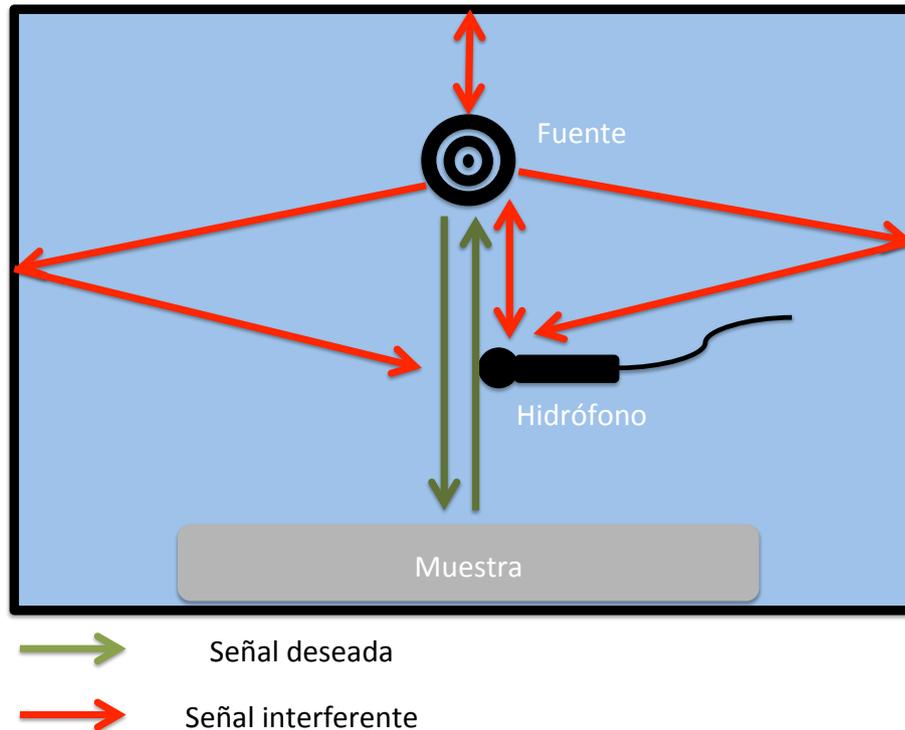


Figura 3.2. Esquema de representación de señales capturadas por el método de campo libre – Tono burst.

Investigadores anteriores, han encontrado que las mediciones fiables de absorción se pueden hacer en un tanque de agua, con la condición de que la longitud de onda acústica no supere la cuarta parte de la dimensión lineal mínima del tanque.

Con este criterio, la frecuencia más baja que se puede considerar para el tanque utilizado en esta investigación es de 10 kHz. Sin embargo, la distancia desde la fuente a la muestra de ensayo es también una longitud crítica. Esta longitud se elige de modo que no haya reflexiones distintas a las que se originan en la muestra de ensayo, de modo que el resto de señales provenientes del resto de cerramientos serán fácilmente detectadas y fuera del rango de enventanado.

### 3.1.3 Equipo de medida

El equipo de medida empleado en el estudio es el siguiente:

Emisor: ITC 1042

Transductor esférico con patrón polar omnidireccional. El rango de frecuencias aplicable se puede ver en la siguiente figura.

## Medida del coeficiente de absorción acústica en agua

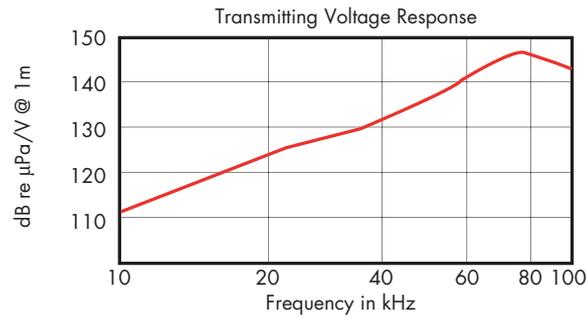


Figura 3.3. Respuesta en frecuencia del transductor ITC 1042 en emisión

### Hidrófono: Reson TC 4034

Hidrófono de banda ancha esférico con patrón polar omnidireccional.

La respuesta en frecuencia se puede ver en la siguiente figura.

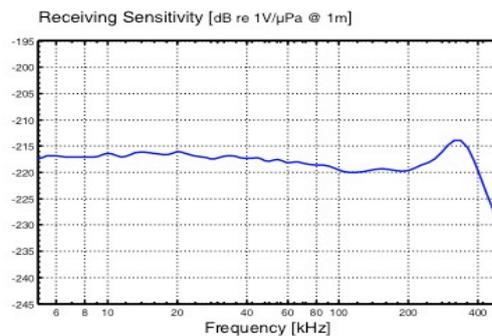


Figura 3.4 Respuesta en frecuencia del transductor Reson 4034 en recepción

Generador de señal: Generador de forma de onda arbitraria de National Instruments PXI/PCI – 5412.

Sistema de amplificación: Amplificador Electronics Innovation 1040

Sistema de adquisición de señales: Tarjeta de National instruments PXI/PCI – Lab203

Las especificaciones de cada uno de los componentes del equipo empleado en el desarrollo del método están adjuntas en el Anexo I.

## 3.2 Tiempo de reverberación en cámara reverberante

Esta metodología supone la adaptación en agua de la normativa vigente UNE-EN ISO 354 2004 para la obtención del coeficiente de absorción en materiales en aire. El método se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material.

Se presentan en primer lugar los conceptos más relevantes para el desarrollo de esta técnica descritos en la normativa.

### 3.2.1 Aspectos normativos

Para la obtención del coeficiente de absorción de materiales en cámara reverberante, se utiliza la norma UNE-EN ISO 354:2004. Ésta, expone dos métodos para calcular el coeficiente de absorción, basados en medir el tiempo de reverberación de la cámara con y sin material, y a partir de estos valores, calcular, mediante la ecuación de Sabine, el área de absorción equivalente y, posteriormente, el coeficiente de absorción sonora del material  $\alpha_m$ .

La norma recoge los siguientes métodos:

Método de la señal de ruido interrumpida: Método de obtención de las curvas de caída de nivel por medio de la adquisición directa de la caída del nivel de presión sonora después de excitar la sala con ruido de banda ancha o con ruido de banda limitada.

Método de la respuesta impulsiva integrada: Emplea una fuente de ruido impulsiva como puede ser un disparo o la explosión de un globo y se mide la respuesta al impulso en los distintos puntos de adquisición. A continuación se integran todos los resultados obtenidos.

En nuestro caso trabajaremos con el método de la señal de ruido interrumpida con las adaptaciones pertinentes para las condiciones subacuáticas.

### 3.2.2 Fundamentos del método

Cuando una fuente sonora emite en un recinto cerrado, el nivel que alcanza el sonido reverberante y la caída de nivel que sigue al cese de la emisión de la fuente, están condicionados por las características de absorción sonora de las superficies de los cerramientos, del medio del recinto y de los objetos en su interior. En general, la fracción de potencia sonora incidente absorbida en una superficie depende del ángulo de incidencia. Con objeto de relacionar el tiempo de reverberación con la reducción de ruido debida a un tratamiento absorbente, es preciso conocer las características de absorción sonora de las superficies, normalmente en forma de un adecuado promedio entre todos los ángulos de incidencia. Puesto que la distribución de ondas sonoras en recintos habituales incluye un amplio y altamente impredecible rango de ángulos, es conveniente, con fines de normalización, considerar una distribución uniforme como condición básica. Si, además, la intensidad sonora es independiente

de la posición dentro del recinto, se dice que el campo acústico es difuso y que el sonido incide en las superficies de forma aleatoria.

El campo sonoro dentro de una cámara reverberante diseñada correctamente se aproxima en gran medida a un campo sonoro difuso. Por lo tanto, la absorción sonora medida en una cámara reverberante se aproxima igualmente a la absorción sonora que se mediría bajo las condiciones básicas de normalización.

El propósito de este punto es el de adaptar la normativa internacional existente en condiciones de propagación del sonido en aire, para de este modo promover la uniformidad entre métodos y condiciones de medición de la absorción sonora en cámaras reverberantes subacuáticas.

Es conveniente mostrar una serie de definiciones previas necesarias para entender el desarrollo del método:

Curva de caída de nivel: Representación gráfica de la caída del nivel de presión sonora en un recinto en función del tiempo después de que cese la emisión de la fuente sonora.

Tiempo de reverberación  $RT$ : Tiempo, en segundos, necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB después del cese de la emisión de la fuente sonora.

NOTA: La definición de  $T$  con una caída de 60 dB se obtendrá por extrapolación lineal de rangos de evaluación más cortos, la definición anterior se basa en la suposición de que, en el caso ideal, hay una relación lineal entre el nivel de presión sonora y el tiempo, y que el nivel de ruido de fondo es suficientemente bajo.

Área de absorción sonora equivalente de un recinto  $A_c$ : Área hipotética de una superficie totalmente absorbente sin efectos de difracción que, si fuera el único elemento absorbente en el recinto, tendría el mismo tiempo de reverberación que el recinto considerado.

### 3.2.3 Principio del método

El principio seguido en este método es, tal y como se especifica en la normativa internacional UNE-EN ISO 354:2003 el siguiente:

Una vez dispuesta la cámara reverberante cuyas condiciones no variarán durante la totalidad de las mediciones, se mide el tiempo de reverberación promedio en la cámara con y sin muestra de ensayo  $RT_1$  y  $RT_2$  respectivamente.

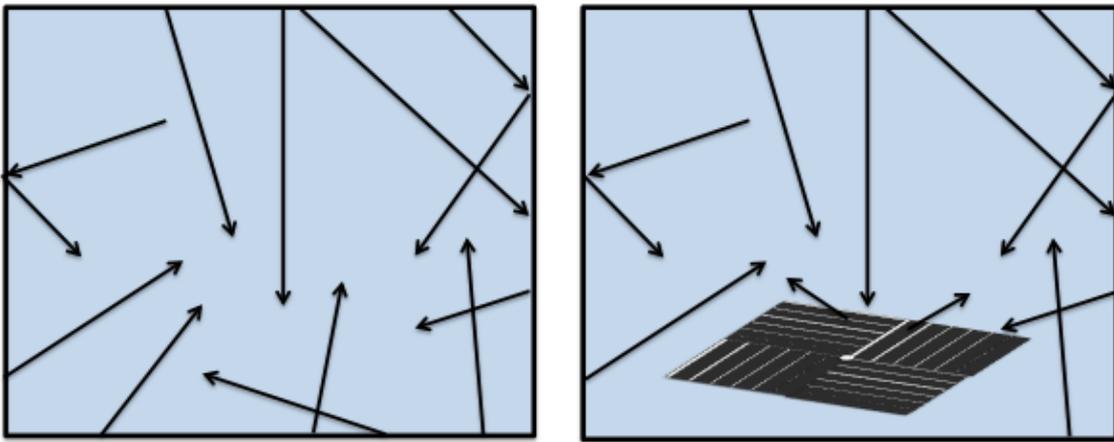


Figura 3.5. Metodología empleada para el cálculo del tiempo de reverberación en cámara reverberante. A) cámara sin muestra; B) Cámara con muestra

A partir de estos tiempos de reverberación, se calcula el área de absorción sonora equivalente  $AT$  por medio de la ecuación de Sabine.

El área de absorción sonora equivalente,  $A_1$ , en metros cuadrados, de la cámara reverberante vacía, se calculará utilizando la fórmula:

$$A_1 = \frac{55.3V}{cT_1}$$

donde

$V$  es el volumen en metros cúbicos de la cámara vacía.

$c$  es la velocidad de propagación del sonido en agua y en metros por segundo.

$T_1$  es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara vacía.

El área de absorción sonora equivalente,  $A_2$  en metros cuadrados, de la cámara reverberante conteniendo la muestra, se calculará utilizando la fórmula:

$$A_2 = \frac{55.3V}{cT_2}$$

donde

$T_2$  es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara con la muestra de ensayo.

$V$ ,  $c$ ,  $S$  tienen el mismo significado que en la expresión anterior.

El área de absorción sonora equivalente  $A_T$ , en metros cuadrados, de la muestra, se calculará utilizando la fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3V \left( \frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1} \right)$$

donde

$c_1$  es la velocidad de propagación del sonido en agua a temperatura  $t_1$ .

$c_2$  es la velocidad de propagación del sonido en agua a temperatura  $t_2$ .

$A_1, V, T_1$  tienen el mismo significado que en las expresiones anteriores.

$A_2, V, T_2$  tienen el mismo significado que en las expresiones anteriores

El coeficiente de absorción sonora  $\alpha_m$  del absorbente se calculará mediante la fórmula:

$$\alpha_m = \frac{A_T}{S}$$

donde

$A_T$  es el área de absorción sonora equivalente, en metros cuadrados.

$S$  es el área en metros cuadrados de la muestra de ensayo.

Además del método de Sabine, utilizada en normativa, existen varias expresiones para calcular el coeficiente de absorción de un material mediante la obtención del tiempo de reverberación de una sala. Una de ellas es la formulada por Eyring, la cual está pensada para su utilización en salas muy pequeñas o con una absorción muy elevada, por lo que parece idónea para nuestro caso.

Su expresión es la que sigue:

$$TR = \frac{\frac{55.3V}{c}}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

para

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \alpha_i}{S}$$

donde

V es el Volumen en metros cúbicos de la cámara vacía.

c es la Velocidad de propagación del sonido en agua en metros por segundo.

S es la Superficie total de los cerramientos en metros cuadrados.

S<sub>i</sub> es la superficie iésima de un cerramiento en metros cuadrados.

α<sub>i</sub> es el coeficiente de absorción iésimo.

### 3.2.4 Características del recinto y procedimiento del ensayo

En la normativa se especifica los siguientes requisitos que debe cumplir el recinto reverberante:

1. El volumen de la cámara debe ser al menos de 200 m<sup>3</sup>, y que debe cumplir con la siguiente relación:

$$I_{MAX} < 1.9 V^{1/3}$$

donde,

*I*<sub>MAX</sub> es la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara.

V es el volumen de la cámara.

2. Ninguna de las superficies de la cámara debe presentar cualquier paralelismo con las demás, para evitar de esta forma la aparición de modos propios de gran intensidad dentro del recinto de ensayo.
3. El rango de frecuencias en el que se trabaja es en bandas de tercios de octava desde los 100 a los 5000 Hz.
4. La superficie de ensayo, de materiales que se consideran absorbentes planos, debe estar comprendida entre los 10 y los 12 m<sup>2</sup> para una cámara de 200 m<sup>3</sup>. En recintos de mayor volumen el límite superior será (V/200 m<sup>3</sup>)<sup>2/3</sup>. Las dimensiones de la

muestra deben cumplir con una relación ancho/largo igual o por encima de 0.7. Los diferentes montajes para muestras de ensayo vienen definidos en el Anexo B de la norma [4], pero siempre debe situarse a no menos de 1 m de cualquier superficie de la cámara.

5. Posiciones de fuente. Las fuentes de emisión usadas deben tener un patrón de radiación omnidireccional. Cada posición debe mantener una distancia mínima de 3 metros respecto a las demás.
6. Posiciones de micrófono. Deben ser omnidireccionales. Entre las diferentes posiciones de los receptores debe haber al menos 1,5 m de separación. En cuanto a las superficies de la cámara y a la muestra, todo micrófono debe estar a más de 1 m de distancia. Respecto a la fuente, se deben mantener siempre a 2 m de la misma.
7. El número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes deben ser al menos 12, combinando un mínimo de 2 posiciones de fuente y 3 de micrófono.
8. Al realizar las mediciones, las condiciones de temperatura y humedad deben ser las mismas durante todo el proceso de ensayo. Los valores de la humedad relativa deben estar comprendidos entre el 30 y 90 %, y la temperatura debe estar por encima de los 15 °C.
9. La norma aconseja el uso de difusores, ya sean fijos o rotatorios, para conseguir un campo sonoro difuso satisfactorio. Estos deben estar contruidos con un material de baja absorción acústica y densidad, deben ser de diferentes tamaños y estar situados de forma aleatoria en el interior del recinto. Se conoce que el área total de los difusores, por ambas caras, debe estar comprendido entre un 15% y un 25% del área total de las superficies de la cámara.

### 3.2.5 Geometría y propiedades de la cámara reverberante en agua

Disponemos de una cámara reverberante de dimensiones reducidas, en condición de máximo llenado de agua estas dimensiones son 0.6 x 0.4 x 0.4 metros.

Cabe señalar que por disponibilidad de material no se ha mantenido la exigencia en normativa para que en el diseño de dicho recinto no exista ningún ángulo recto ni paralelismo entre ninguna superficie.

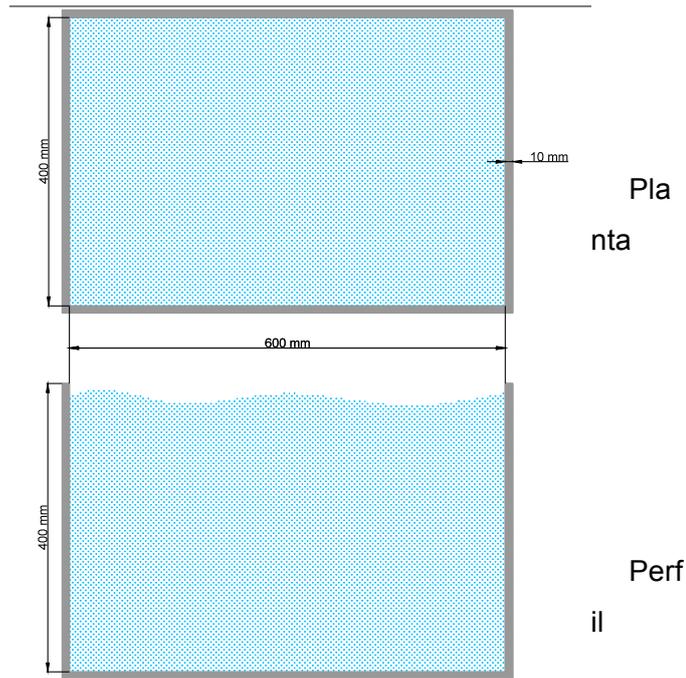


Figura 3.6. planos de la cámara reverberante

Todos los cerramientos de la cámara a excepción de la superficie libre son de polimetilmetacrilato, cuyas propiedades se muestran a continuación.

Para mejorar la difusividad del sonido, se ha completado el diseño de recinto con la incorporación de unos difusores fijos, de modo participen también en la reducción de la intensidad de los modos propios creados en el interior de la sala.

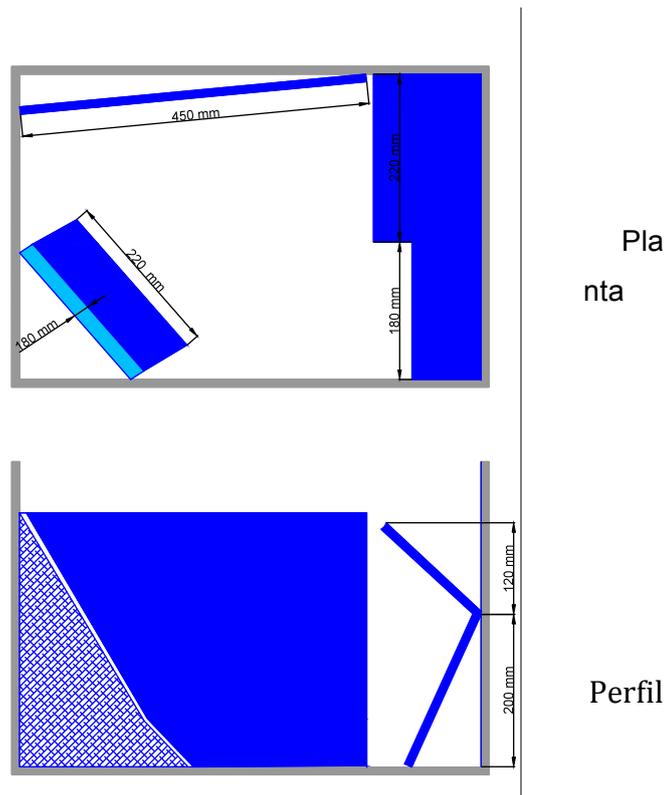


Figura. 3.7. Situación de los difusores

Los difusores están compuestos por el mismo material que los cerramientos de la cámara, siendo cada uno de ellos de diferente espesor.

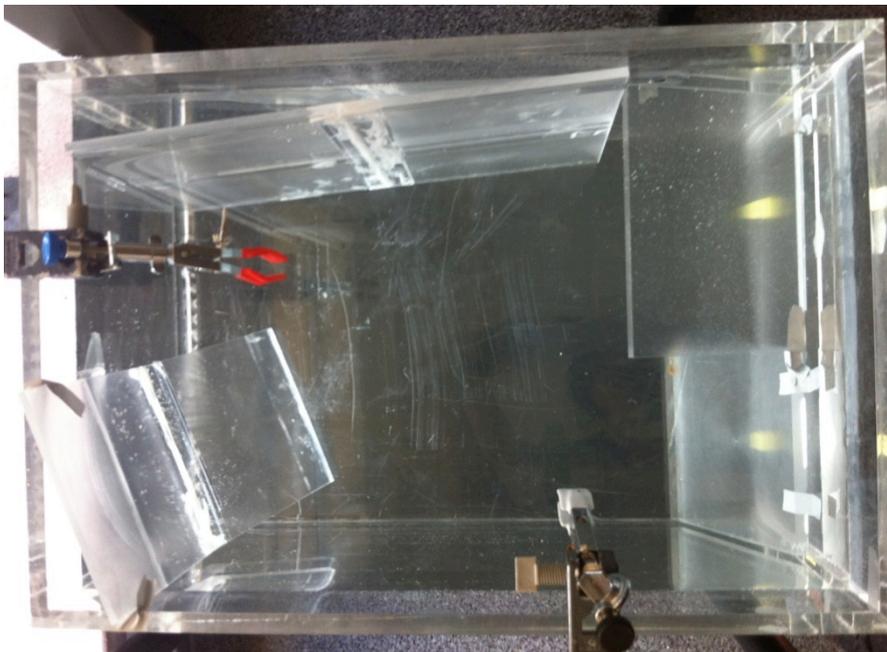


Figura 3.8. Vista de planta de la cámara reverberante en agua.

### 3.2.6 Adaptación de la norma ISO-EN UNE 354 2004 en agua

Una vez marcados los requisitos establecidos por normativa, se comprueba la adaptación de las restricciones especificadas en la normativa para el caso de la cámara reverberante en agua utilizada en el estudio:

Según exige la normativa hay que cumplir con:

$$I_{MAX} < 1.9 V^{1/3}$$

en nuestro caso disponemos de un volumen de recinto de  $0.6 * 0.4 * 0.4 = 0.096 m^3$  y un  $I_{MAX} = 0.72$ .

$$I_{MAX} < 1.9 V^{1/3} \rightarrow 0.72 < 0.87$$

Por lo tanto la cámara cumple este requisito.

Para la validación de las características geométricas de la cámara de reverberación recreada, se trata de comparar la relación existente entre distancia máxima en la sala con las longitudes de onda.

En la norma se especifica que el rango de frecuencias a evaluar va desde 100 Hz hasta 5000 Hz, lo que conlleva una relación  $\frac{L_{MAX}}{\lambda}$  de [ 1.7 – 88 ]. En nuestro caso, las frecuencias tratadas son de 40,000 hasta 160,000 Hz, lo cual equivale a una relación  $\frac{L_{MAX}}{\lambda}$  de [19 - 76]. Este hecho no solo valida el rango frecuencial empleado para el estudio, sino que implica que en la actual cámara se puede trabajar a un rango frecuencial bastante más bajo, el que corresponde a los valores de  $\frac{L_{MAX}}{\lambda}$  de 1.7 hasta 19, por lo tanto y según el criterio anterior la cámara es válida desde 5000 Hz hasta 180 KHz.

El rango de frecuencias que se tratará en método será, tal como se adelantaba, el comprendido entre 40 KHz y 160 KHz. Este rango no abarca ni dos bandas de octava por lo que el incremento entre varios valores de frecuencia se realizara en pasos de 5 KHz y no en tercios de octava como especifica la norma.

El motivo por el cual no se ha abordado un rango frecuencial mayor se debe a la limitación existente en los transductores empleados. Un cambio de transductores para abarcar otros márgenes frecuenciales podría suponer una variación en las condiciones de medida de la cámara.

En cuanto a las muestras de ensayo en normativa se especifica que si el volumen de la cámara difiere de  $200 m^3$  el área de la muestra debe ajustarse por el factor:

$$\text{factor de corrección muestra} = \left( \frac{V}{200m^3} \right)^{2/3}$$

Por lo tanto si la muestra debía tener un área de entre 10 y 12  $m^2$  para un volumen de sala de 200  $m^3$ , para nuestra sala de 0.096  $m^3$  la superficie de la muestra debería estar entre 0.061 y 0.0736  $m^2$ .

Como se puede apreciar en el apartado 2, las muestras disponibles son de una superficie de  $0.09m^2$ , por lo que no cumplimos en este punto con lo especificado en norma. Las muestras analizadas corresponderían con una muestra de superficie  $14m^2$  en una cámara de 200  $m^3$

La norma trata también el posicionamiento de fuente y receptores. En nuestro caso y debido a las limitaciones geométricas, creemos justificada la reducción de puntos de medida, empleando en este caso dos posiciones de fuente y cinco posiciones de hidrófono para completar las medidas en cada una de las muestras.

En la siguiente figura se muestran las posiciones de fuente e hidrófono, donde la ubicación de fuente e hidrófono se muestra en la tabla posterior.

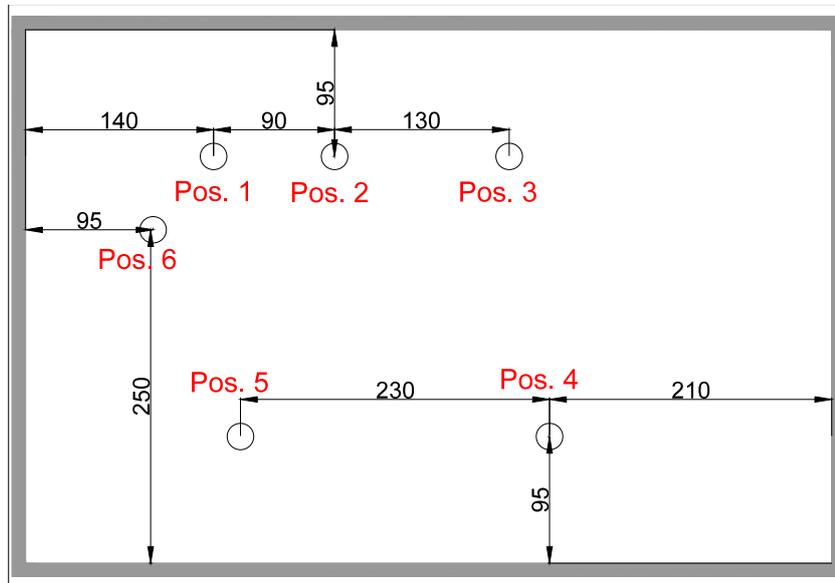


Figura 3.9. Posición de los transductores

Configuración de medida	Posición Fuente	Posición Hidrófono
1	Pos. 1	Pos. 4
2	Pos. 2	Pos. 4
3	Pos. 6	Pos. 4
4	Pos. 6	Pos. 5
5	Pos. 3	Pos. 6

Tabla 3.1. Posiciones de medida de los transductores de emisión y recepción.

La condición de conservación de temperatura se respeta para todo el proceso del ensayo.

### **3.2.7 Equipo de medida**

Los equipos de medida empleados en el desarrollo de las medidas para este método son exactamente los mismos que para el método anterior, descritos en el apartado 4.1.3.

## 4 Resultados

### 4.1 Campo libre

#### 4.1.1 Procedimiento de medida

Como se ha descrito en el punto 3.1.2, en este método se obtiene el coeficiente de absorción acústica, para **incidencia normal**, mediante la relación existente entre energía incidente y reflejada sobre la muestra. Para la obtención de la energía incidente, se procede con la medida inicial en el tanque sin la muestra, en la que la onda viaja por el medio hasta reflejarse en el cerramiento del tanque, para continuar hasta alcanzar el transductor de captura. El eco recibido mediante esta configuración será nombrado a partir de este punto y durante todo el método como “eco directo”.

En una configuración posterior, se realizará la medida del sonido reflejado proveniente de la muestra, con la superficie de cuñas, “eco cuñas”, y otra con la superficie posterior plana, que nombraremos “eco muestra”. La disposición de los elementos será la misma que en el caso anterior, esta vez con la muestra en el fondo del tanque, respetando la distancia recorrida por la onda en todos los casos.

Todas las señales han sido calculadas mediante un promedio de medidas con repetitividad de 50 capturas.

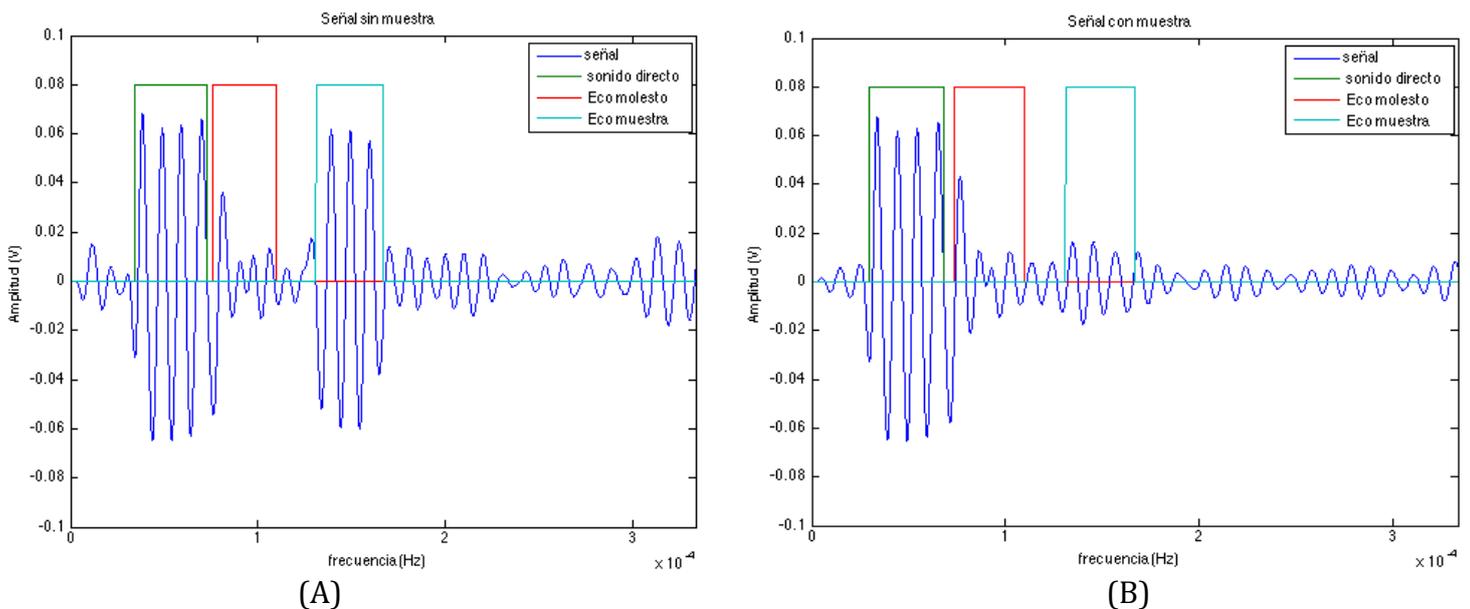


Figura 4.1. Representación de la señal temporal capturada en método de campo libre – tono burst para 100 kHz de frecuencia sin muestra (A) y con muestra (B)

La posición de cada una de las señales presentes en la forma de onda capturada, ha sido determinada, previamente al registro de estas, mediante el cálculo teórico a partir de la distancia entre elementos y la velocidad de propagación del sonido en el agua.

La figura 6.1 representa un ejemplo de las señales que intervienen en el proceso para las dos configuraciones. A la izquierda se muestra la forma de onda para la configuración sin muestra, y a la derecha la misma configuración, esta vez con una de las muestras a analizar.

En ambos casos se pueden distinguir tres señales. La primera de ellas y de más nivel, es el sonido directo que viaja desde el transductor emisor hasta el receptor.

A continuación de esta, aparece en todas las medidas una señal de mayor o menor nivel, que puede llegar a interferir en la medida del nivel del eco de la muestra. Esta interferencia corresponde a la señal que se produce tras múltiples rebotes en entre transductores. Este eco ha sido tenido en cuenta para realizar la configuración de los elementos de medida, tomando distancias entre los elementos que ayuden a evitar esta intrusión.

Por último, aparece la señal proveniente del fondo del tanque de medida, o de la muestra bajo test, en la configuración con muestra. En el caso de la medida sin el material, la amplitud del eco directo, es muy similar a la del sonido directo entre transductores, lo que demuestra que el factor de reflexión del cerramiento del tanque es prácticamente absoluto.

Además, para el caso de frecuencias superiores a los 100 kHz, donde la longitud de onda de la señal es inferior a la separación entre cuñas, ha sido necesario aplicar una corrección en el tiempo de la captura de la señal de eco muestra, que compense el retardo que se produce debido a la intrusión de las señales en el interior de las cuñas.

Este efecto se aprecia claramente en la figura 4.2. donde el eco proveniente de la muestra está ligeramente retrasado, quedando fuera del espacio de procesado.

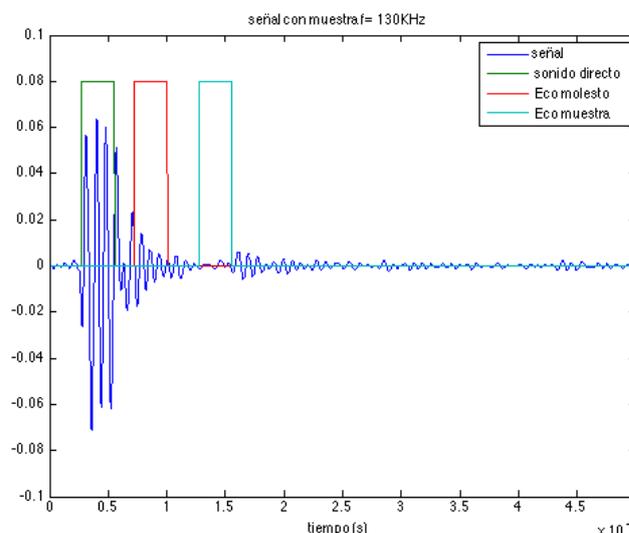


Figura 4.2. Desfase temporal en la recepción del eco de la muestra

#### 4.1.2 Resultados

A continuación se muestran los coeficientes de absorción acústica obtenidos para ambas muestras, medidas con la superficie plana de la muestra y sobre la superficie de cuñas.

##### Muestra 1:

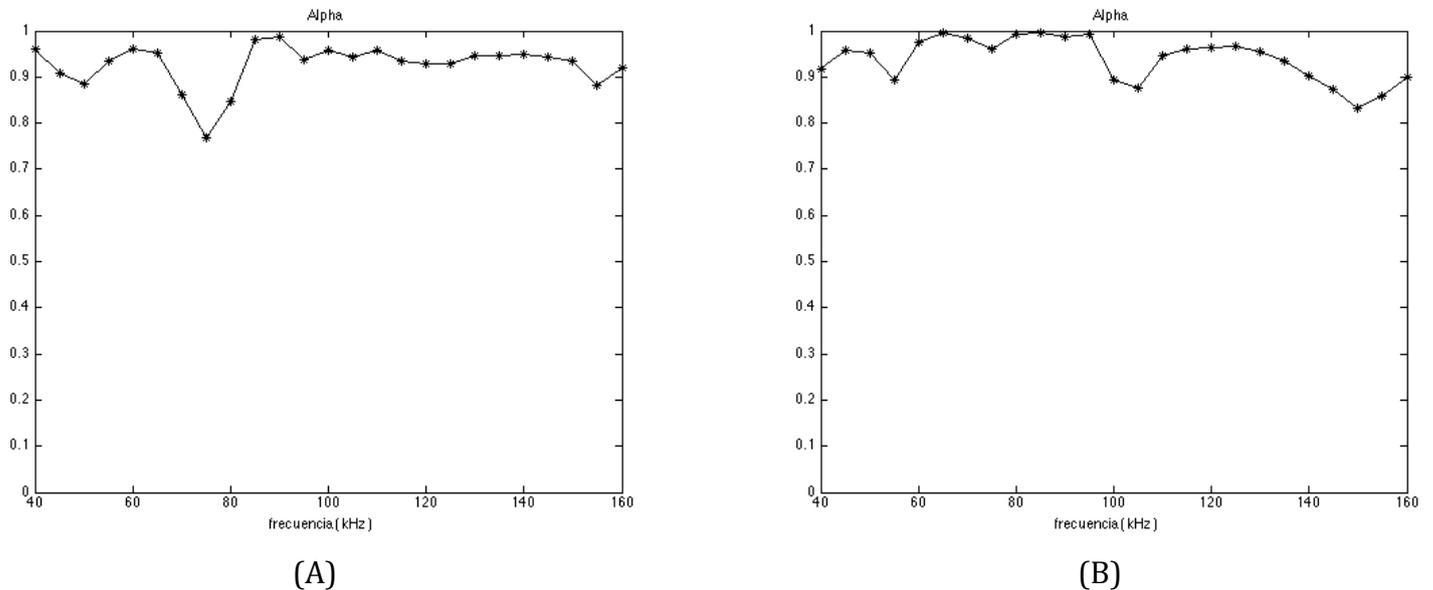


Figura 4.3. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de campo libre – tono burst con muestra 1 plana (A) y muestra 1 con cuñas (B)

La figura 4.3. (A) muestra el coeficiente de absorción acústico en las frecuencias analizadas, para la muestra con la parte plana, por lo que de ella podemos hacer una valoración de la absorción debida únicamente al material.

Se puede observar que el material es realmente absorbente para las frecuencias de trabajo, con un coeficiente de absorción medio de 0.91, a excepción del rango de frecuencias en torno a 75 kHz, para las que presenta un mínimo de absorción de aproximadamente  $\alpha = 0.75$ . Para el resto de frecuencias la curva obtenida presenta un nivel prácticamente plano incluso para las frecuencias más elevadas.

En la parte (B) de la figura, se muestra también, el coeficiente de absorción para la muestra, valorado en este caso sobre la superficie de las cuñas.

Se puede apreciar que en este caso la curva obtenida presenta una forma con mayor variación del coeficiente de absorción, rozando en los máximos, valores cercanos a la absorción absoluta,  $\alpha = 1$ , aunque decrece al aumentar la frecuencia hasta valores de alpha en torno a 0.85.

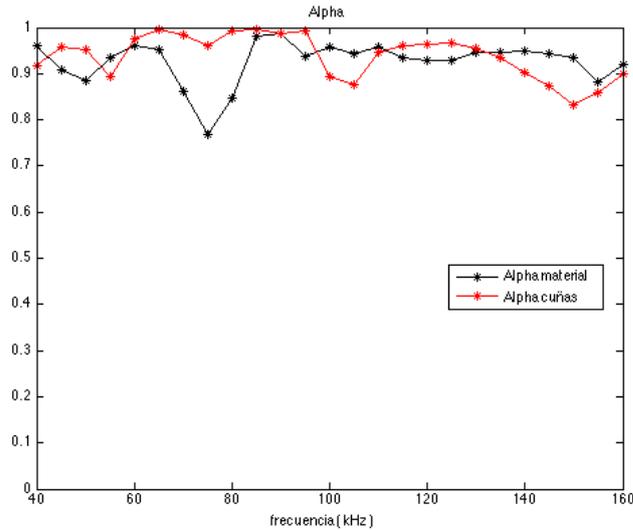


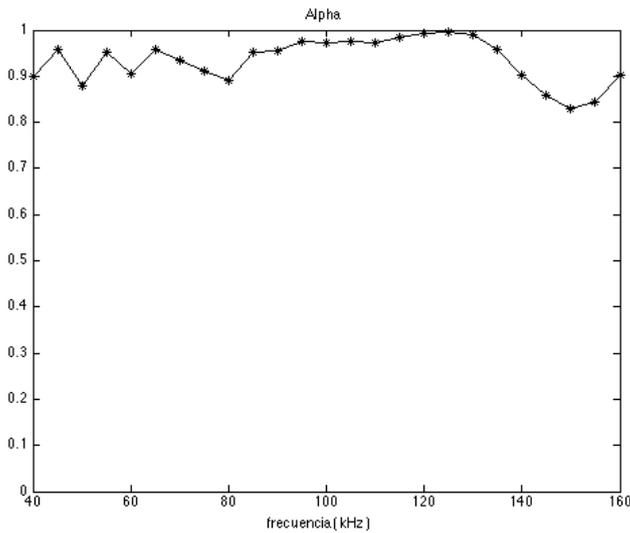
Figura 4.4. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de campo libre para la muestra 1 con la superficie plana y superficie con cuñas

En la figura anterior se muestran conjuntamente las curvas obtenidas en las dos superficies de la muestra 1.

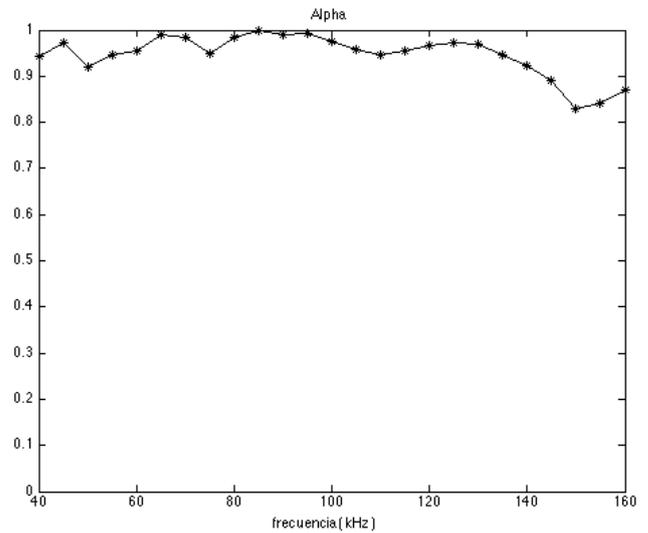
Resulta fácil percibir que la superficie en forma de cuña contribuye favorablemente para el rango inferior a 100 kHz, llegando incluso a compensar el la caída del coeficiente de absorción que presentaba el material para los 75 kHz. Por otro lado, esta geometría no parece ayudar en el rango de frecuencia más elevado, con unas propiedades de absorción inferiores a las pertenecientes a superficie plana de la muestra.

Muestra 2

Al igual que en el punto anterior, las figuras siguientes representan los coeficientes de absorción en este caso para la muestra 2.



(A)



(B)

Figura 4.5. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de campo libre – tono burst con muestra 2 plana (A) y muestra 2 con cuñas (B)

En este caso, los valores obtenidos para la superficie plana están entorno a  $\alpha = 0.93$ , siendo máxima la absorción para el rango entre 90 y 130 kHz, con un coeficiente algo inferior para el rango más bajo, y desfalleciendo en las frecuencias más elevadas, llegando a un mínimo de prácticamente  $\alpha = 0.8$ .

Una vez más la geometría en forma de cuña parece mejorar ligeramente la absorción para las bajas frecuencias, obteniendo valores muy elevados en la zona central y perdiendo eficacia en la banda alta de las frecuencias de medida.

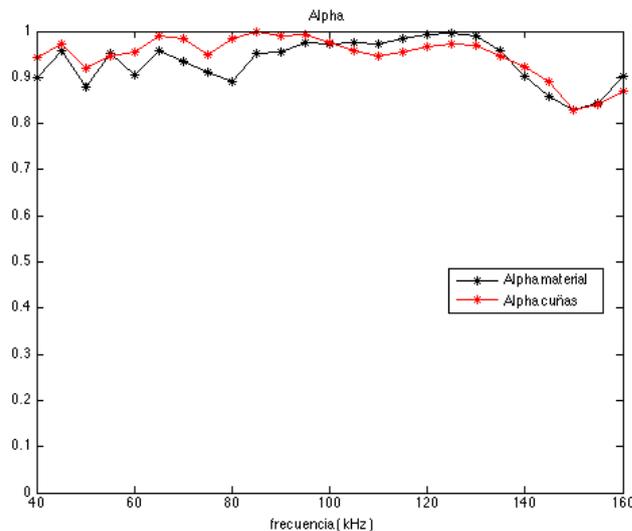


Figura 4.6. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de campo libre para la muestra 2 con la superficie plana y superficie con cuñas

En la comparación entre la absorción propia del material y la absorción de las cuñas, también en esta muestra, la geometría aumenta dicha absorción para bajas frecuencias y va perdiendo valor a modo que aumenta la frecuencia.

Comparación entre muestras:

Por último se realiza la comparación entre las muestras tanto para la superficie plana como para las cuñas.

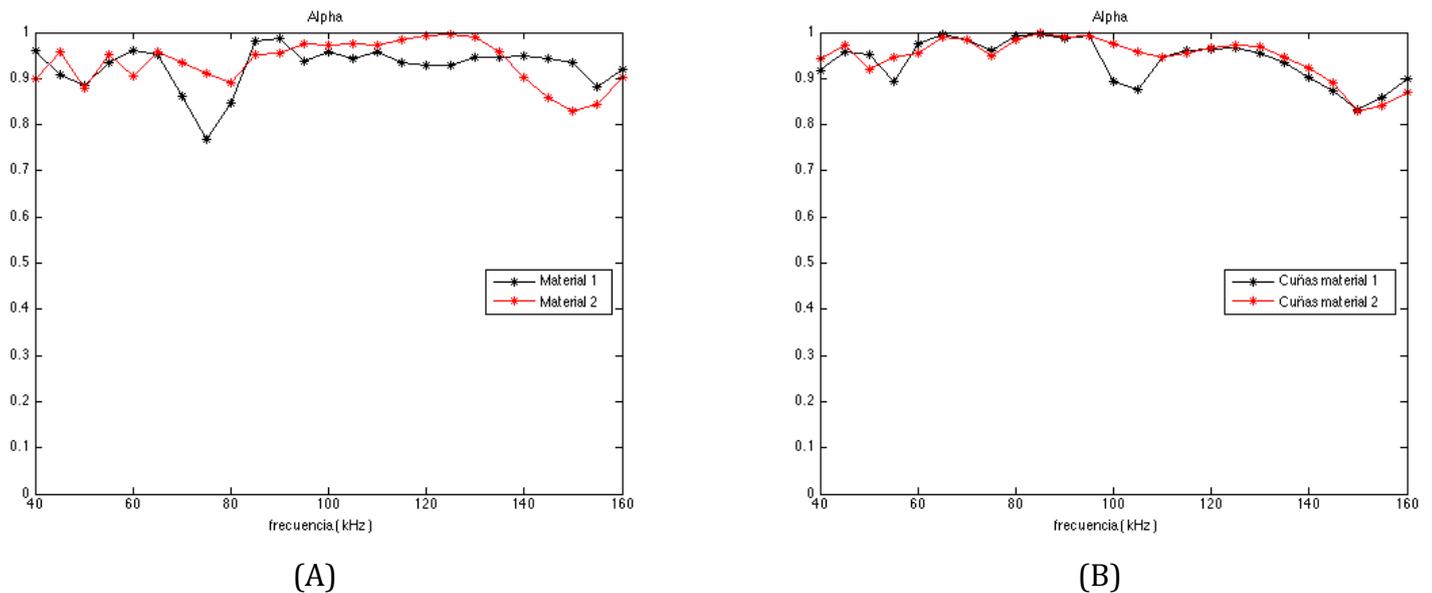


Figura 4.7. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de campo libre con muestra 2 plana (A) y muestra 2 con cuñas (B)

En la figura 4.7.(A) se representa la absorción propia del material para las dos muestras. En ella se puede apreciar que el segundo material presenta un coeficiente de absorción mayor en casi todo el rango evaluado a excepción de las altas frecuencias. Sin embargo, el primer material presenta una curva prácticamente plana para las frecuencias superiores a 100 kHz, por lo que podría ser más adecuado para aplicaciones en la que la frecuencia de trabajo esté por encima de dicho valor.

Se puede afirmar que los materiales de construcción empleados en ambas muestras superan para casi todo el rango de frecuencias el valor de  $\alpha = 0.9$ , por lo que parecen muy aptos para aplicaciones en que se requiera un espacio anecoico en el rango de frecuencias mostradas, teniendo en cuenta que estos resultados son únicamente válidos para incidencia normal.

En cuanto a la geometría de construcción empleada en las muestras, se puede valorar que no aporta grandes resultados, llegando a empeorar la absorción para el rango más elevado de las frecuencias analizadas.

Todos los valores correspondientes a los resultados mostrados se adjuntan en el Anexo II.

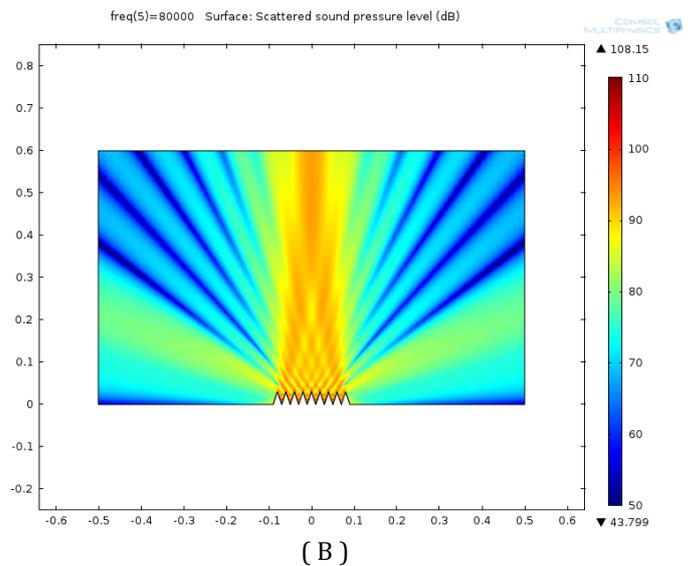
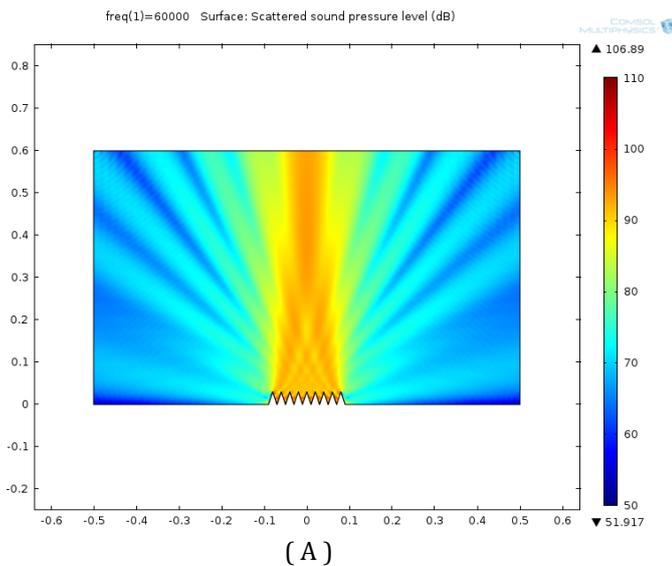
#### 4.1.3 Simulación numérica del efecto de dispersión sobre la muestra

Dado que en el presente estudio no se realizará ningún tipo de medida representativa del coeficiente de difusión del sonido, creemos conveniente realizar una serie de simulaciones para tratar de visualizar el efecto que produce la geometría de la muestra cuando recibe una onda acústica.

Las simulaciones han sido realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics, donde el espacio representado viene a simular la cámara de medida empleada en las medidas, con la muestra en su interior.

Es necesario aclarar que la muestra representada no tiene condiciones de absorción, por lo que únicamente representa el efecto de difusión de las ondas acústicas.

El estudio muestra la evolución de la dispersión del nivel de presión sonora, con la frecuencia, en la cámara cuando la muestra recibe una onda plana, en incidencia normal, que cubre toda la muestra.



## Medida del coeficiente de absorción acústica en agua

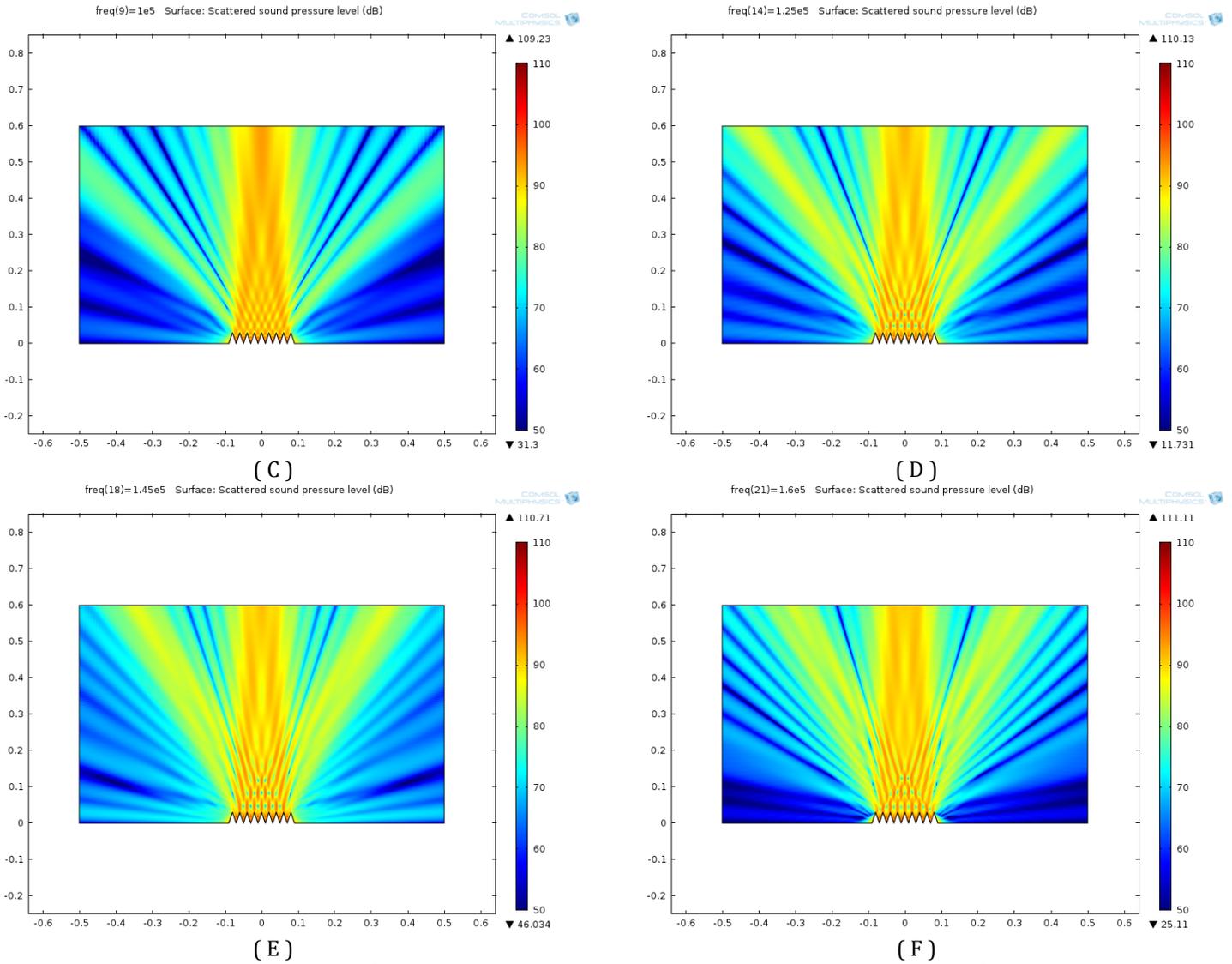


Figura 4.8. simulación del efecto de scattering producido por la geometría de la muestra, sin efectos de absorción, para (A) 60 kHz, (B) 80 kHz, (C) 100 kHz, (D) 125 kHz, (E) 145 kHz y (F) 160 kHz

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, La dispersión de las ondas, crece al aumentar la frecuencia, formando focalizaciones para distintos grados de apertura.

## 4.2 Cámara reverberante

### 4.2.1 Procedimiento de medida

En este segundo método, se obtendrá el coeficiente de absorción acústica de las muestras por el método de señal de ruido interrumpida para **incidencia aleatoria**, lo cual supone un caso más realista al método anterior.

Las señales han sido calculadas a partir de un promedio con una repetitividad de 10 capturas, para 5 posiciones de transductores diferentes y con un ancho de banda de análisis de 10 kHz.

Para las condiciones actuales no es posible reducir el ancho de banda analizable debido a que la densidad de energía para rangos menores es insuficiente para trazar una caída del nivel estable.

El cálculo del coeficiente de absorción acústico se realizará a partir del T20, y será mostrado junto a la desviación media de las 5 posiciones analizadas.

En primer lugar se ha analizado la cámara reverberante construida para obtener el valor del coeficiente de absorción en condiciones de sala vacía, con un resultado entorno a  $\alpha = 0.25$ . como se puede apreciar en la figura 4.9.

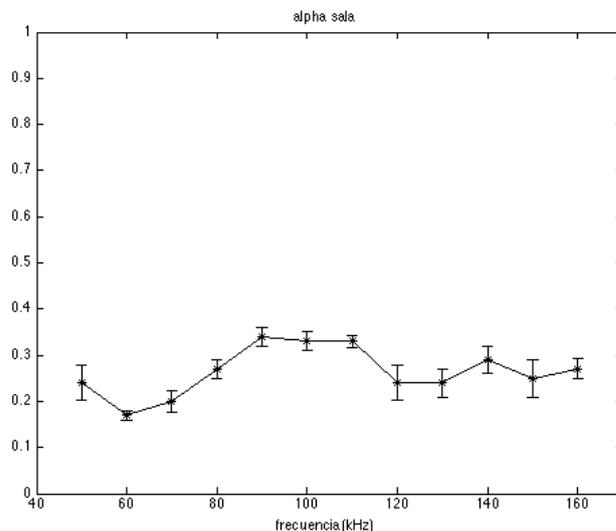


Figura 4.9. Coeficiente de absorción  $\alpha$  de la cámara reverberante

#### 4.2.2 Resultados. Método de Sabine

Siguiendo lo estipulado en la norma UNE-EN ISO 354: 2004, una vez obtenidos los valores del tiempo de reverberación, se procede a realizar el cálculo del coeficiente de absorción mediante la expresión de Sabine expuesta en el marco teórico. Los resultados para la muestra 1 son los mostrados a continuación.

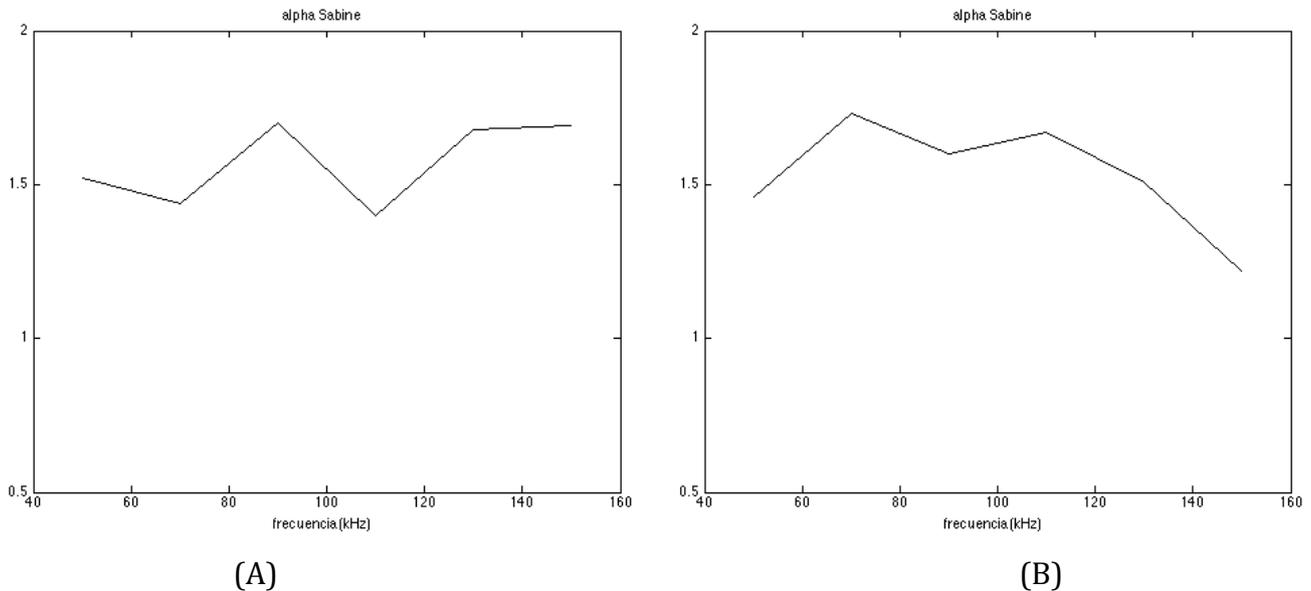


Figura 4.10. Coeficiente de absorción  $\alpha$  para el método de Sabine con muestra 1 plana (A) y muestra 1 con cuñas (B)

Como se puede ver, el resultado obtenido para esta metodología es totalmente descartable debido a que el coeficiente de absorción obtenido para todas las frecuencias es superior a 1, lo que conllevaría a que la muestra absorbe más energía de la que recibe.

Este hecho era previsible, ya que como sabemos la expresión de Sabine solo es válida para coeficientes de absorción promedio inferiores a 0.25, y la cámara de reverberación empleada, ya supera este valor en varias frecuencias.

Por ello se evaluarán nuevamente los resultados para la expresión de Eyring.

Dada la inviabilidad del método no se mostrarán los resultados correspondientes a la segunda muestra.

### 4.2.3 Resultados. Método Eyring

Una vez descartados los resultados obtenidos por la expresión de Sabine, se procede a exponer lo resultados alcanzados mediante la expresión de Eyring.

Las siguientes figuras muestran el coeficiente de absorción para las diferentes frecuencias de análisis, junto a la desviación de los valores de las 5 posiciones tomadas, tanto para las muestras con la superficie plana como para la superficie con cuñas.

#### Muestra 1

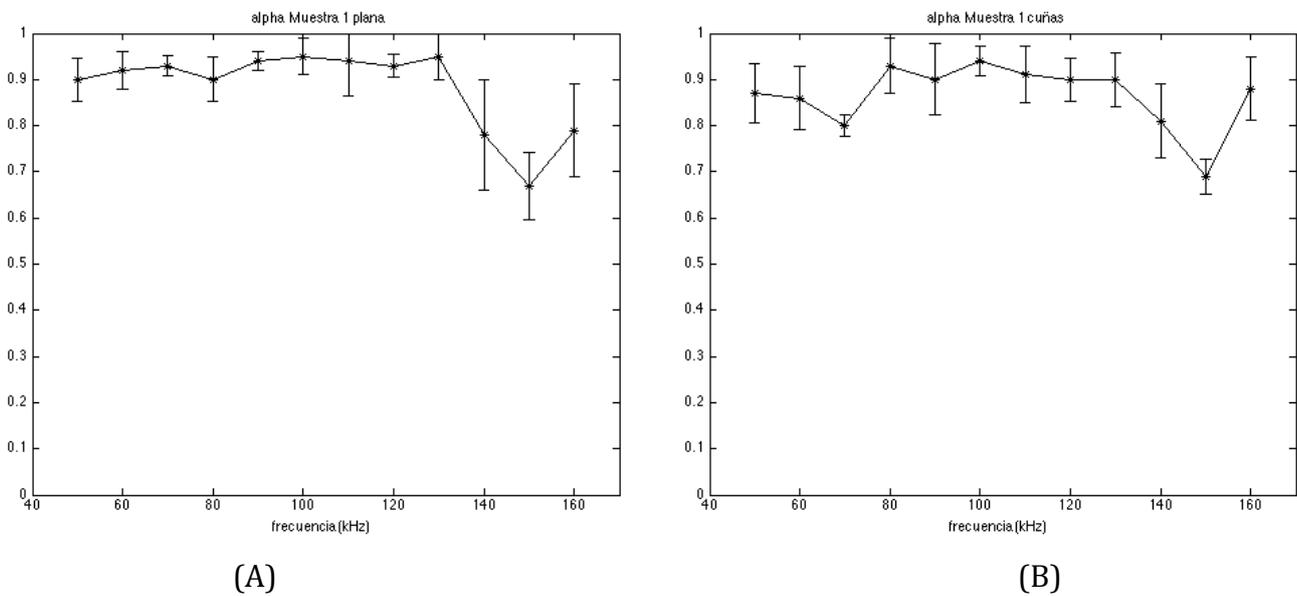


Figura 4.11. Coeficiente de absorción  $\alpha$  con desviación estándar para el método de cámara reverberante con muestra 1 plana (A) y muestra 1 con cuñas (B)

En la gráfica de la muestra en superficie plana se puede observar una respuesta prácticamente plana, a un nivel de  $\alpha = 0.9$ , para todo el rango de frecuencias hasta llegar a los 120 kHz, donde tiene una caída del nivel de absorción.

Este patrón parece repetirse para el caso de las cuñas, donde no solo, no se mejora la respuesta para altas frecuencias si no que a bajas frecuencias presenta un coeficiente de absorción acústica inferior al del propio material.

Se puede apreciar también en ambas gráficas, que la desviación entre los resultados tomados para las 5 posiciones de transductores tiende a crecer a medida que aumenta la frecuencia. Este hecho es más notable en el caso de la superficie plana, quizás debido a que la superficie con cuñas aumenta la dispersión de las ondas que inciden en la muestra.

Muestra 2

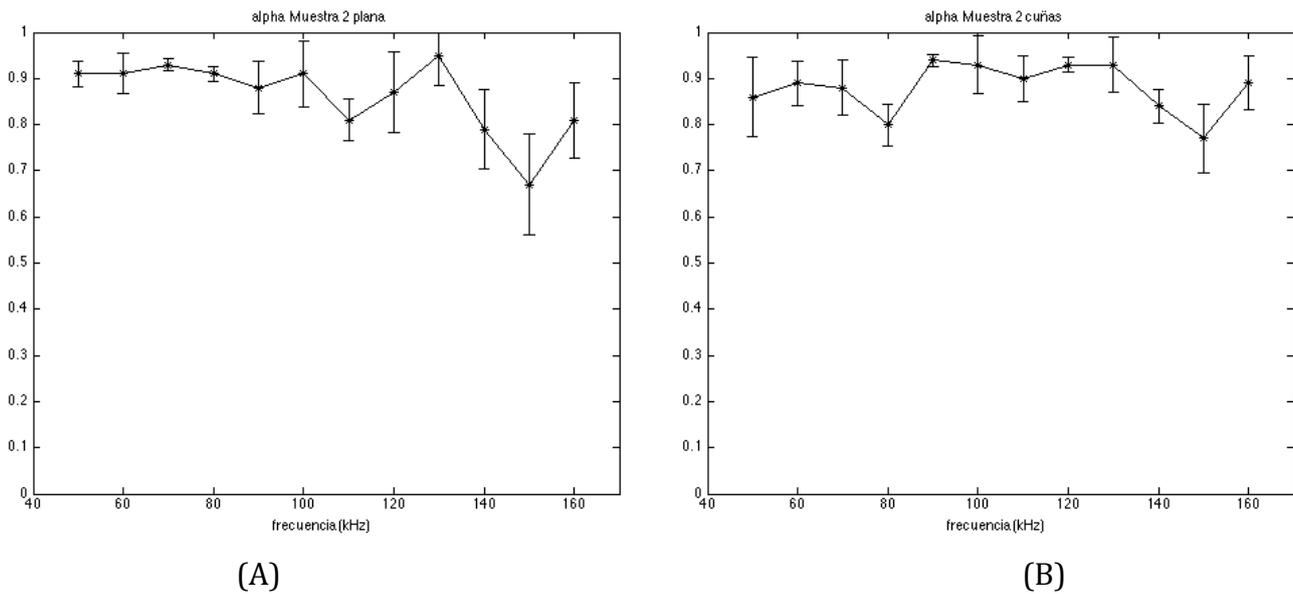


Figura 4.12. Coeficiente de absorción  $\alpha$  con desviación estándar para el método de cámara reverberante con muestra 2 plana (A) y muestra 2 con cuñas (B)

En los resultados para la muestra 2 se observa una tendencia similar a los obtenidos en la muestra 1, obteniendo los peores valores de absorción para las frecuencias superiores a 130 kHz.

En este caso la respuesta propia del material no resulta tan plana como en la muestra anterior aunque también en este material se obtiene un coeficiente de absorción acústica que ronda el  $\alpha = 0.9$ .

En cuanto a la aportación de las cuñas, una vez más, parece que las diferencias respecto a la absorción del material no son muy significativas. Mejora levemente los valores obtenidos para el rango de frecuencias central, pero empeora en bajas frecuencias y no consigue solventar la caída de absorción en las altas frecuencias.

Además se repite la tendencia a aumentar la desviación entre las medidas a frecuencias altas, siendo más notable este hecho para el caso de la superficie plana que con las cuñas.

## 5 Resumen y conclusiones

### Resumen y conclusiones generales:

En el presente estudio se han evaluado las muestras suministradas por el Centro Naval de Murcia en su propiedad como material absorbente en agua, para las frecuencias ultrasónicas comprendidas entre 40 y 160 kHz.

Las muestras han sido analizadas por ambas caras (con cuñas y plana), obteniendo información sobre la absorción propia al material en el caso de la superficie plana, y la contribución de la geometría en el lado de la superficie con cuñas.

### Validación de la metodología

En un objetivo secundario, se ha validado la adaptación, para condiciones de frecuencias ultrasónicas en agua, del método descrito en la norma UNE-EN ISO 354: 2004 para la obtención del coeficiente de absorción, por comparación a los resultados obtenidos en el método de campo libre, ampliamente empleado en bibliografía anterior, así como la cámara reverberante empleada.

Este hecho puede suponer un punto de partida para la elaboración de las directrices a seguir para la obtención de la absorción de materiales en las condiciones mencionadas.

### Resultados de las muestras:

Para la obtención del coeficiente de absorción acústico, han sido considerados dos métodos de medida:

El primero de ellos, tiene en consideración únicamente la absorción del material para una incidencia normal a la superficie de la muestra, obteniendo unos resultados realmente positivos, con un coeficiente de absorción  $\alpha$  que superan en ambas muestras un valor de absorción del 90% para prácticamente todo el rango de frecuencias. Sin embargo, la geometría en forma de cuña de las muestras, no parece aportar mayor absorción a la inherente al material, mejorando, únicamente y de forma muy leve, la absorción en las frecuencias mas bajas analizadas.

El segundo método, ofrece una visión más amplia de  $\alpha$ , ya que en este caso se caracterizan las muestras para una incidencia aleatoria del sonido sobre la muestra, situación más habitual en muchas aplicaciones para la que se requiera un espacio anecoico.

Los resultados obtenidos para este método, resultan de un valor levemente inferior a los alcanzados en la configuración de incidencia normal. Todos ellos muestran una caída del nivel de absorción para las altas frecuencias al igual que pasaba en el método de campo libre.

### **Valoración de las muestras**

Tras analizar los resultados, podemos afirmar que el material empleado para la construcción de las muestras, proporciona por sí mismo un coeficiente de absorción realmente elevado para un rango de frecuencias inferior a 130 kHz, obteniendo unos valores máximos de absorción superiores en el caso de la segunda muestra. Sin embargo el material empleado para la construcción de la primera muestra ofrece una respuesta mas plana.

En cuanto al diseño de la geometría en forma de cuña , se ha demostrado que no aporta grandes variaciones en la respuesta del material, siendo para algunos rangos de frecuencia, inferiores al de la muestra en superficie plana, probablemente debido a la focalización producida por la propia geometría.

## 6 Referencias y bibliografía

[1] **Yang Daheng and Li Qi.** The Variance of Measurement of Sound Absorption of Material in the Underwater Reverberation Chamber. International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2011).

[2] **Yang Song\*, Zhen -qi Zhao, Wei Zhang, Sheng-qi Yu.** Research on the reverberation absorption coefficient of material measured by underwater reverberation field method.

[3] **Biswajit Paik, Ashok Kumar, Reeta Gupta, Yudhisther Kumar.** Selection of a Lining Material for Anechoic Water Tank. Acustica united with acustica Vol. 88 (2002) 195-198.

[4] **KINSLER, Lawrence E.** Fundamentos de acústica - 3ª ed. México: Editorial Limusa, 1988, capítulos 7 y 9.

[5] **WYATT, Mason.** Sound Absorbing Materials, [www.noisecontrol.net/materials.html](http://www.noisecontrol.net/materials.html)

[6] **Norma ASTM C423-09a:** Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.

[7] **Norma UNE-EN ISO 354:2004.** Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

[8] **BERANEK, Leo L.** Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. New York: Acoustical Society of America, 2006. 12 p.

[9] **A. Teira Arnosó.** Trabajo Final de Máster. Adecuación y validación de una cámara reverberante a escala para ensayos de pantallas acústicas. Escuela Politécnica Superior de Gandía, Enero 2013.

[10] **F. Hernández García.** Trabajo Final de Máster. Mejora de la difusión acústica de la cámara reverberante del Campus de Gandía de la UPV. Escuela Politécnica Superior de Gandía, Septiembre 2012.