

Análisis de los datos de precisión del coeficiente de absorción acústica medido en tubo de impedancias

43.58.+z

Sancho Gil Juan; Arnay Sarabia Héctor; Hrelja González Patricia.

E.T.S.I.ST
Ctra. De Valencia, Km 7
28031 Madrid
España
Tel. 913367795
Fax 913367784
jsancho@diac.upm.es

Abstract — This paper presents a study of the accuracy of the results obtained in measuring the sound absorption coefficient in impedance tube, according to the UNE-EN ISO 10534-2 "Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance in impedance tubes. Part 2: Method of transfer function ". It is exposed the state of the art precision of this test method, expressed in terms of repeatability and reproducibility, and are identified the causes which produce the value of the precision obtained.

Resumen — En este trabajo se hace un estudio de la precisión de los resultados obtenidos en la medición del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, según la norma UNE-EN ISO 10534-2 "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia". Se expone el estado del arte de la precisión de este método de ensayo, expresada en términos de repetibilidad y reproducibilidad y se identifican las causas que producen el valor de la precisión obtenida.

I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de acondicionamiento acústico de recintos, uno de los principales problemas con los que se enfrenta el ingeniero es conseguir una absorción adecuada del sonido. Afortunadamente, existen multitud de materiales que tienen la capacidad de absorber energía acústica. Las propiedades absorbentes de sonido de un material se expresan mediante el coeficiente de absorción acústica α en función de la frecuencia. Basándose en este parámetro, se decide qué materiales son más adecuados para revestir las paredes interiores de un recinto. Por tanto, para poder emplear un determinado material en un proyecto de acondicionamiento acústico, es imprescindible conocer previamente su coeficiente de absorción acústica α .

Actualmente, existen varios métodos para medir el coeficiente de absorción acústica de un material. Un método muy empleado consiste en medir las propiedades acústicas de un material utilizando un tubo de impedancia, tal y como se expone en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”*. Se trata de un método muy utilizado en estudios de investigación y desarrollo de nuevos materiales, ya que es un método rápido de ejecutar y solo se necesitan pequeñas muestras del material para llevar a cabo la medida. Este método determina el coeficiente de absorción acústica del material para incidencia normal. Para ello, se coloca la muestra de ensayo en un extremo del tubo y en el otro extremo se sitúa el altavoz. Se generan ondas planas en el interior del tubo empleando una señal aleatoria o pseudo-aleatoria y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones cercanas a la muestra, con esto se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales entre los dos micrófonos, a partir de la cual se determina el coeficiente de absorción acústica del material [6].

En este trabajo se hace especial hincapié en el estudio de la precisión que se puede obtener al aplicar este método de ensayo normalizado. En general, es importante disponer de datos de precisión de los métodos de ensayo, pues sirven de referencia a los laboratorios para evaluar la precisión de los resultados, cada vez que aplican el método de ensayo. Cuando las normas de ensayo no aportan datos concretos de precisión, los mejores datos de precisión disponibles para los laboratorios se obtienen en los ejercicios de intercomparación. Estos ejercicios de intercomparación (pruebas de aptitud, PT) nos aportan datos de precisión, como son: la desviación típica de repetibilidad conjunta S_r y la desviación típica de reproducibilidad S_R . La norma ISO 5725-2:1994 proporciona la metodología para abordar el tratamiento estadístico de los resultados de los participantes con el fin de obtener estos datos de precisión.

En la actualidad, la precisión de los resultados del coeficiente de absorción acústica, obtenidos al aplicar el método de ensayo definido en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002, no está desarrollado a nivel práctico [6]. Por este motivo, este trabajo se centra en ofrecer datos prácticos sobre la precisión que puede alcanzarse al aplicar este método de ensayo.

II. ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO. DATOS DE PRECISIÓN

En Julio de 2002 se publicó la norma española UNE-EN ISO 10534-2 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”*. Esta norma es la versión oficial, en español, de la norma europea EN ISO 10534-2 de Junio de 2001 que a su vez adopta íntegramente la norma internacional ISO 10534-2:1998.

En el momento de su publicación, no se disponía de información relativa a la repetibilidad y reproducibilidad del método de ensayo que describe dicha norma. Es por esto, que en relación a la precisión de este método de ensayo, la norma comenta que *“se recomienda obtener esta información a partir de ensayos de intercomparación entre laboratorios lo más pronto posible”* [6]. Sin embargo, no consta que durante los años siguientes a la publicación de la norma se haya realizado ningún tipo de ejercicio de intercomparación. Es a finales de 2013, cuando se llevó a cabo una intercomparación de ámbito internacional, en el que se aplica este método de ensayo para la medida del coeficiente de absorción acústica, denominado AQUSTUBO_IMPEDANCIA_1, organizado por la red de laboratorios de acústica, ACUSTILAB en conjunción con RPS-Qualitas. En este ejercicio de intercomparación participaron 9 laboratorios, uno de ellos la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (ETSIST) de la Universidad Politécnica de Madrid. En este ejercicio se ensayaron dos tipos de materiales: lana de roca de 50 mm de espesor (fabricante: ROCKWOOL, modelo: 231.652) y lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor (fabricante: SAINT GOBAIN CRISTALERIA ISOVER ESPAÑA). De acuerdo al programa de intercomparación, cada laboratorio realizó cuatro ensayos completos de cada tipo de material aplicando la metodología dada por la norma UNE-

EN ISO 10534-2:2002. Para ello, el coordinador de la intercomparación suministró a los laboratorios, el material de ensayo del mismo lote de fabricación, y cada participante elaboró cuatro muestras de cada uno de los materiales y determinó el coeficiente de absorción acústica de cada una de las muestras.

Una de las carencias más relevantes de la norma UNE-EN ISO 10534-2 es que no especifica la forma en que se deben entregar los resultados de los ensayos, (frecuencias discretas, tercios de octava u octavas). Esta carencia, dificulta la comparación de los resultados entre los laboratorios, puesto que la resolución en frecuencia de las funciones de transferencia medidas, que sirven para la determinación de los valores del coeficiente de absorción, puede ser diferente en cada laboratorio. Este inconveniente lo resolvió el coordinador de la intercomparación proporcionando a los laboratorios participantes un formato específico para la presentación de los resultados de los ensayos [3]. Concretamente en la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1, cada laboratorio presentó los valores de los coeficientes de absorción de cada muestra de ensayo en bandas de tercio de octava desde 100 hasta 5000 Hz, ambas inclusive. Mediante el tratamiento estadístico de los resultados de los participantes se determinó el valor asignado y la precisión del ejercicio de intercomparación, expresada en términos de desviación típica de repetibilidad, S_r y desviación típica de reproducibilidad, S_R .

En la Figura 1 se muestra la desviación típica de repetibilidad, S_r . Adicionalmente, en la Figura 2 que se muestra a continuación, se ha representado la desviación típica de reproducibilidad, S_R obtenida en el mismo ejercicio de intercomparación.

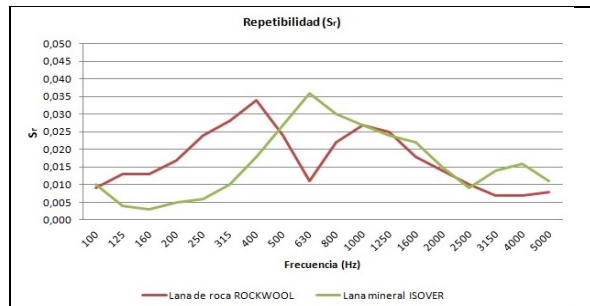


Figura 1. Desviación típica de repetibilidad S_r resultante en la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1 [3].

Por otra parte, la norma americana ASTM E1050 “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”, publicada por ASTM International (American Society for Testing and Materials), en la cual también se describe la medida del coeficiente de absorción acústica por el método de la función de transferencia. En relación a la precisión, esta norma afirma que las medidas del coeficiente de absorción acústica mediante dicho método, se pueden hacer con gran precisión y apunta a que las mayores causas de imprecisión están relacionadas con la preparación y la instalación de la muestra de ensayo en el tubo de impedancia [1]. Además, añade que al no haber un material de referencia disponible del cual se conozcan los valores verdaderos de coeficiente de absorción, no es posible determinar cuantitativamente el sesgo de este método de ensayo [1]. A diferencia de la norma UNE-EN ISO 10534-2, esta norma sí proporciona datos de repetibilidad y reproducibilidad del método, obtenidos a partir de un programa interlaboratorio diseñado al efecto (Round-Robin) en el que participaron 10 laboratorios ensayando un único tipo de material. La precisión que aporta la norma ASTM E1050 determinada en el interlaboratorio (Round-Robin) se expresa en bandas de octava, en términos de límite de repetibilidad I_r y cuyo resultado se muestra en la Figura 3. Además, esta norma también proporciona el límite de reproducibilidad, I_R igualmente en bandas de octava, cuyos valores se muestran en la Figura 4.

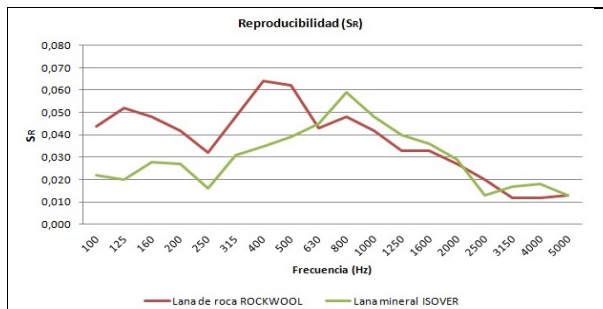


Figura 2. Desviación típica de reproducibilidad S_R resultante en la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1 [3].

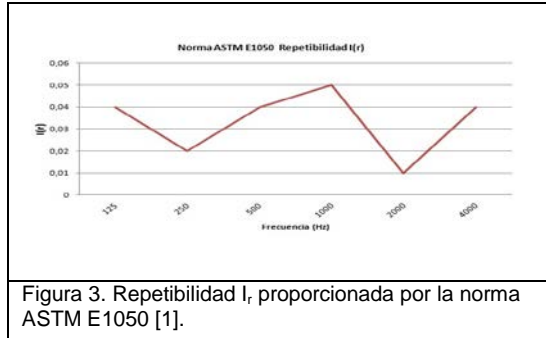


Figura 3. Repetibilidad I_r proporcionada por la norma ASTM E1050 [1].

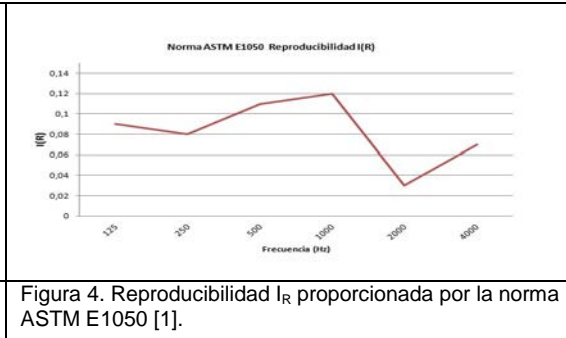


Figura 4. Reproducibilidad I_R proporcionada por la norma ASTM E1050 [1].

III. MARCO TEÓRICO [6]

El método de medición de la función de transferencia descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2 se basa en el hecho de que el coeficiente de absorción acústica para incidencia normal α , puede determinarse a partir de la función de transferencia compleja H_{12} calculada a partir de la presión acústica captada por dos micrófonos colocados en dos posiciones frente al material ensayado, concretamente en las posiciones 1 y 2 como puede verse en la Figura 5.

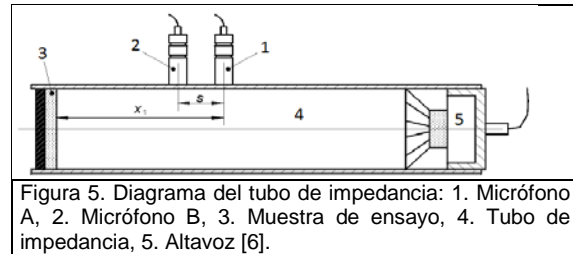


Figura 5. Diagrama del tubo de impedancia: 1. Micrófono A, 2. Micrófono B, 3. Muestra de ensayo, 4. Tubo de impedancia, 5. Altavoz [6].

La función de transferencia H_{12} se obtiene dividiendo la presión acústica compleja en la posición 2 entre la presión acústica compleja en la posición 1.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

La presión acústica de la onda que incide al material p_i y la de la onda que se refleja p_R se definen mediante (2) y (3).

$$p_i = \hat{p}_i e^{jk_0 x} \quad (2)$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x} \quad (3)$$

Donde \hat{p}_i y \hat{p}_R , son los módulos de p_i y p_R en el plano de referencia ($x=0$) y $k_0 = k_0' - jk_0''$ es el número de onda complejo.

Por tanto, las presiones acústicas p_1 y p_2 en las posiciones de micrófono 1 y 2 se determinan mediante (4) y (5), donde x_1 y x_2 son las distancias de la muestra de ensayo a las posiciones de micrófono 1 y 2, respectivamente.

$$p_1 = \hat{p}_i e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (4)$$

$$p_2 = \hat{p}_i e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (5)$$

Además, la función de transferencia para las ondas incidente H_I y reflejada H_R se definen mediante (6) y (7).

$$H_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0s} \quad (6)$$

$$H_R = \frac{P_{2R}}{P_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0s} \quad (7)$$

Donde: $s = x_1 - x_2$, es la distancia de separación entre los dos micrófonos.

La función de transferencia H_{12} para el campo acústico total puede obtenerse ahora sustituyendo (4) y (5) en (1) y, teniendo en cuenta que $\hat{p}_R = r \hat{p}_I$, se puede definir mediante (8).

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0x_2} + r e^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + r e^{-jk_0x_1}} \quad (8)$$

La expresión del coeficiente de reflexión para incidencia normal se obtiene despejando r de (8) y empleando las expresiones (6) y (7), obteniendo:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (9)$$

El coeficiente de absorción acústica α para incidencia normal, se obtiene a partir del coeficiente de reflexión aplicando la ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (10)$$

Donde r_r y r_i son las componentes real e imaginaria, respectivamente, del coeficiente de reflexión para incidencia normal.

IV. ESTUDIOS SOBRE LA PRECISIÓN DEL MÉTODO

Un método de ensayo siempre aporta parámetros indicativos de precisión, siendo los más habituales, la repetibilidad r y reproducibilidad R , que se definen como diferencias críticas con un nivel de probabilidad del 95%. La norma UNE-EN ISO 10534-2 no aporta ninguno de estos datos [6] y, por tanto, para poder disponer de información sobre estos datos de precisión se llevó a cabo la intercomparación AQUIS-TUBO_IMPEDANCIA_1. También se realizaron ensayos para determinar en qué medida influye la colocación y el corte de la muestra de ensayo sobre los resultados de repetibilidad. Además, se estudió la influencia de la temperatura (T) y la distancia entre los dos micrófonos (s) en los resultados del coeficiente de absorción.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de acústica de la (ETSIST) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Para ello, se empleó un tubo de impedancia cuyo intervalo de frecuencia de trabajo cubre las bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz inclusive. Se ensayaron dos tipos de materiales: lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652 (Figura 6.a), y lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER (Figura 6.b). Los coeficientes de absorción acústica obtenidos en los ensayos se presentaron en bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz.

Para estudiar el grado de influencia de la colocación de la muestra de ensayo en el porta-muestras sobre los resultados de repetibilidad se realizaron cuatro ensayos, correspondientes a dos muestras de lana de roca de ROCKWOOL y dos muestras de lana mineral de ISOVER. De cada una de las muestras de ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia, extrayendo la muestra y volviéndola a introducir en el tubo de impedancia en cada medición. En la Figura 7 se muestra la desviación típica de repetibilidad utilizando

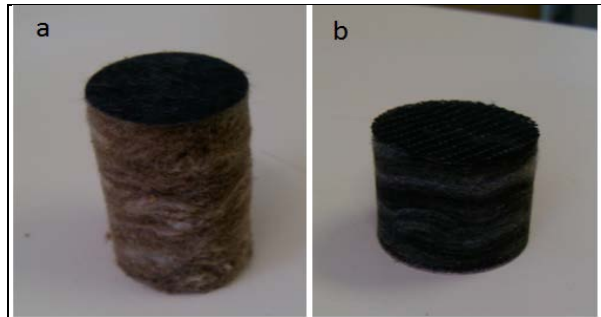


Figura 6. Materiales ensayados: a. lana de roca de ROCKWOOL, b. lana mineral CLIMAVER NETO de ISOVER.

la misma muestra de ensayo, la única variación en el porta-muestras para cada medida. Por consiguiente, la dispersión entre los tres coeficientes de absorción acústica de la misma muestra de ensayo se puede considerar provocada principalmente por la colocación de la muestra [2]

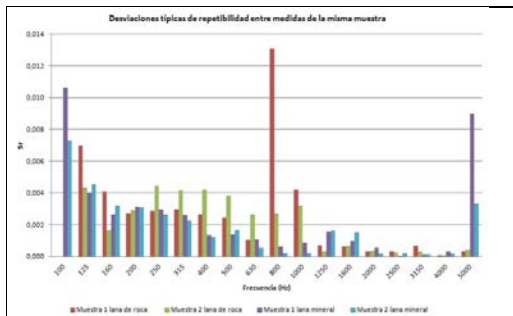


Figura 7. Desviaciones típicas de repetibilidad entre los coeficientes de absorción acústica medidos de la misma muestra [2].

ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia. A partir de las tres funciones de transferencia medidas se determinaron los tres coeficientes de absorción acústica y se promediaron para obtener el coeficiente de absorción acústica de la muestra de ensayo. Por tanto, se dispuso de cuatro coeficientes de absorción por cada material, uno por muestra ensayada, y se calculó la desviación típica de repetibilidad entre ellos. Entre ensayos del mismo material las condiciones de medida no variaron, sin embargo, la muestra bajo estudio era distinta en cada ensayo. Se puede concluir que la variabilidad entre los cuatro coeficientes de absorción acústica del mismo material es provocada principalmente por el proceso de corte de las respectivas muestras [2].

Por otra parte, se analizó la concordancia entre la repetibilidad obtenida en los cuatro ensayos de cada material con los datos de precisión proporcionados por la norma ASTM E1050, en la Figura 9 se comparan, en bandas de octava desde 125 Hz hasta 4000 Hz, los límites de repetibilidad obtenidos en los cuatro ensayos realizados de cada material con los

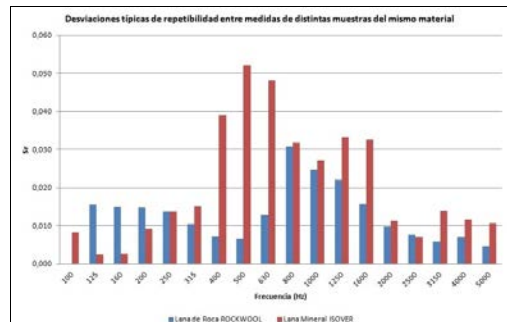


Figura 8. Desviaciones típicas de repetibilidad entre los coeficientes de absorción acústica medidos de distintas muestras del mismo material [2].

límites de repetibilidad proporcionados por la norma ASTM E1050.

Para estudiar el grado de influencia de la temperatura T y la distancia entre los micrófonos s en el resultado del coeficiente de absorción medido, se emplearon los resultados obtenidos en dos ensayos, uno de ellos sobre una muestra de lana de roca de ROCKWOOL y el otro sobre una muestra de lana mineral de ISOVER. El estudio consistió en determinar los coeficientes de absorción acústica de cada material a partir de las funciones de transferencia medidas empleando, por un lado, distintos valores de T y, por otro lado, distintos valores de s , en función de los intervalos de variación supuestos al valor medido.

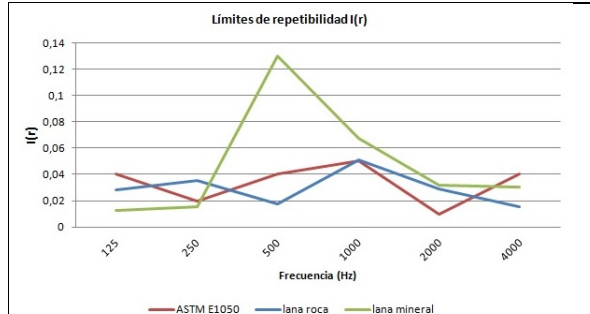


Figura 9. Comparativa entre los límites de repetibilidad obtenidos en los ensayos y los proporcionados por la norma ASTM E1050.

Mediante un procedimiento de cálculo, se pudieron observar las variaciones del coeficiente de absorción en función de los valores de T y s . En la Figura 10 se comparan los coeficientes de absorción acústica determinados con los valores de T medidos y los coeficientes de absorción acústica determinados con los valores de T correspondientes al mayor intervalo de variación aplicado, es decir, ± 4 °C. Por otra parte, en la Figura 11 se comparan los coeficientes de absorción acústica determinados con el valor de s proporcionado por el fabricante y los coeficientes de absorción acústica determinados con el valor de s correspondiente al mayor intervalo de variación aplicado, es decir, $\pm 0,002$ m.

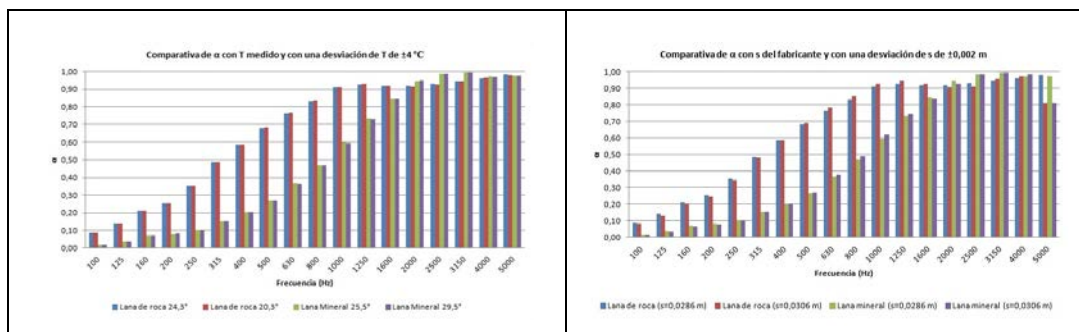


Figura 10. Comparativa de valores del coeficiente de absorción calculados con T medido y con una desviación de T de ± 4 °C [2].

Figura 11. Comparativa de valores del coeficiente de absorción calculados con s del fabricante y con una desviación de s de $\pm 0,002$ m [2].

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Analizando los resultados obtenidos del estudio de la influencia de la colocación de la muestra (Figura 7) se observa que, salvo algún valor puntual, la desviación típica de repetibilidad entre medidas de la misma muestra es pequeña en todo el rango de frecuencia, lo cual revela que la precisión de las medidas es elevada.

En el estudio de la influencia del corte de las muestras (Figura 8) las desviaciones típicas son mayores que en el estudio anterior, lo cual hace indicar que el corte de las muestras provoca que la repetibilidad entre las medidas sea menor y, como consecuencia, la precisión del método también lo sea. Esto revela que el corte de las muestras puede afectar a la precisión de las medidas, en mayor o menor grado, según el tipo de material a ensayar.

Al comparar los límites de repetibilidad obtenidos en los cuatro ensayos realizados de cada material con los límites de repetibilidad proporcionados por la norma ASTM E1050 (Figura 9), se

observa que la repetibilidad correspondiente a los ensayos del material de lana de roca se asemeja a los datos proporcionados por la norma ASTM E1050.

En cuanto a la influencia sobre los valores del coeficiente de absorción como consecuencia de variaciones de la temperatura, los resultados del estudio reflejan que ciertas desviaciones en la medida de la temperatura no afectan al valor del coeficiente de absorción. Puede verse en la Figura 10 ya que, incluso suponiendo desviaciones de hasta 4 °C, apenas se observan variaciones del coeficiente de absorción.

Respecto a la influencia sobre los valores del coeficiente de absorción en función de variaciones en la medida de la distancia entre micrófonos, los resultados obtenidos en el estudio (Figura 11) revelan que hasta la banda de 4000 Hz, variaciones de 1 mm o menos provocan mínimas modificaciones de α (en torno a 0,01), mientras que una variación de 2 mm provoca que los cambios en α aumenten en algunas bandas (entre 0,01 y 0,03).

VI. CONCLUSIONES

Resumen de las conclusiones obtenidas.

Cuando se ensayan muestras uniformes, como las analizadas en este estudio, la dispersión entre medidas de la misma muestra es baja, siempre y cuando la muestra se coloque de forma adecuada para cada medición

La desviación entre los resultados de las medidas de distintas muestras del mismo material aumenta con respecto a la dispersión entre medidas de la misma muestra. Esto revela que la influencia del corte de las muestras en los valores de repetibilidad es mucho mayor que la de su colocación. Por tanto, se puede concluir que el corte de la muestra es un factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la precisión de los resultados de este método de ensayo ya que representa claramente un foco de dispersión. Debido a esto, resulta evidente la necesidad de estudiar en un mismo ensayo varias muestras del mismo material, para así tener en cuenta la variabilidad producida por el corte de las muestras. En el presente estudio se propone realizar el ensayo siempre con, al menos, tres muestras del material bajo estudio. En cuanto al efecto sobre el resultado de un ensayo de posibles desviaciones en la medida de la temperatura se puede decir que, incluso desviaciones de hasta 4 °C con respecto al valor medido, apenas modifican los valores del coeficiente de absorción. Por el contrario, desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos sí condicionan la precisión del método de ensayo en todo el rango de frecuencias, especialmente en la banda de 5000 Hz si la desviación se comete por encima del valor nominal.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E1050-90 — “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”, 1998.
- [2] Héctor Arnay Sarabia. “Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia”. Trabajo Final de Máster (MIAEMA), mayo 2014.
- [3] Informe final intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1.
- [4] UNE 82009-1:1998 — “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 1: Principios generales y definiciones”.
- [5] UNE 82009-2:1999 — “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado”.
- [6] 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”.