

# INCERTIDUMBRE DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN VIBRACIONAL EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE MEDIDAS DE LA DIFERENCIA DE VELOCIDADES

Del Rey Tormos, Romina<sup>1</sup>; Alba Fernández, Jesús<sup>1</sup>; Estruch, Vicente<sup>1</sup>; Pastor Gimeno, José<sup>1</sup>,  
Escuder Silla, Eva<sup>1</sup>

Instituto para la gestión Integral de las Zonas Costeras.

Escuela Politécnica Superior de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia

Carretera Nazaret-Oliva S/NGrao de Gandia 46730 (Valencia)

Teléfono (96) 284.93.14 - (96) 284.93.00

(roderey@doctor.upv.es, jesalba@fis.upv.es)

## Resumen

Para obtener el valor del índice de reducción vibracional a través de diferentes configuraciones es necesario conocer el valor de la diferencia de velocidades entre los diferentes elementos a estudio cuando éstos son excitados. El procedimiento de esta medida viene descrito en la norma UNE-EN ISO 10848-1, de forma somera, para condiciones de laboratorio. Esta técnica es la que actualmente se está utilizando para evaluar el comportamiento “in situ” de los diferentes flancos, aunque es sabido que tiene ciertas limitaciones. En esta normativa se recomienda que se deban realizar para cada posición de excitación, tres pares diferentes de medidas de diferencias de velocidad, con diferentes posiciones del transductor.

En este trabajo se estudian los resultados obtenidos en la obtención del índice de reducción vibracional, a través de medidas de diferencias de velocidad, en diferentes elementos constructivos, analizando los intervalos de confianza asociados al número de medidas, tanto para valores promedios como en función de la frecuencia.

**Palabras-clave:** transmisiones laterales, aislamiento acústico, índice de reducción vibracional, elementos finitos, incertidumbre.

## Abstract

In order to obtain the vibration reduction index by using different configurations it is necessary to know the value of the velocity difference between the different elements to study when these are stimulated. The procedure of this measure is described in the UNE-EN ISO 10848-1 for laboratory conditions only. This technique is nowadays being used to assess the behaviour “in situ” of the different sides, although its limitations are well known. In this Norm it is recommended to carry out with 3 different pairs of velocity difference measures for each stimulation position, with different positions of the transducer.

In this project the results obtained after the vibration reduction rate are studied by using the speed difference measures, in various constructive elements, by analyzing the trusted intervals associated to the number of measures, for the average values as well as according to the frequency.

**Keywords:** Lateral transmissions, acoustic isolation, vibration reduction index, finite elements, uncertainty.

## 1 Introducción

La normativa referente al aislamiento acústico a ruido aéreo teniendo en cuenta la transmisión por flancos [1-2], y en concreto, la norma española UNE-EN ISO 10848, “Medida en laboratorio de la transmisión por flancos del ruido aéreo y del ruido de impacto entre recintos adyacentes”, en su parte 1, “Documento marco”, detalla un procedimiento para el cálculo del índice de reducción vibracional ( $K_{ij}$ ) de diferentes uniones de elementos constructivos en laboratorio. Este procedimiento, es el que actualmente se está utilizando para evaluar el comportamiento “in situ” de los diferentes flancos, aunque es sabido que tiene ciertas limitaciones [3-4], y estas deberían ser consideradas.

Para obtener el valor del índice de reducción vibracional, y poder así conocer con detalle el comportamiento acústico de todo el conjunto constructivo, es necesario conocer el valor de la diferencia de velocidades de los elementos a estudio cuando éstos son excitados. En concreto, y según la normativa expuesta, es necesario conocer el valor de la diferencia de niveles de velocidades. Según la citada normativa, si se elige un método vibracional, deben excitarse al menos tres puntos y medir en al menos 3 posiciones en función de la velocidad máxima, tanto en la transmisión del flanco  $i$  al flanco  $j$ , como al revés, con la posterior generación de múltiples datos de medida. Además, debe cumplir ciertas condiciones en los datos para darlos por válidos.

En este trabajo se estudia el valor de la medida de la diferencia de velocidades tomando 3,5 o 7 pares de posiciones del transductor, las incertidumbres asociadas a estas medidas y como afecta a los resultados la elección de los diferentes puntos de medida.

## 2 Mediciones in situ. Obtención de los valores de las diferencias de velocidades.

Se han realizado los ensayos “in situ” en medianeras y forjados de los laboratorios de física y acústica de la EPSG (Escuela Politécnica Superior de Gandía-UPV). Tanto las medianeras como forjados son elementos constructivos simples compuestos por LH7 en el caso de la medianeras y bovedilla de hormigón de 300+50 en el caso del forjado. La excitación para el forjado se ha realizado con una máquina de impactos normalizada y en el caso de medianeras con una caladora, asegurando así una excitación uniforme en ambos casos, siguiendo el documento marco de la UNE-EN ISO 10848-1. La respuesta de los acelerómetros ha sido registrada por un analizador de frecuencias 2144 de Brüel&Kjaer.



Figura 1- Mediciones forjado y medianera de la diferencia de velocidades en el laboratorio de acústica de la EPSG.

La normativa vigente nos da la siguiente expresión para el cálculo de la diferencia de velocidades:

$$D_{v,ij} = \frac{1}{2}(D_{v,ij} + D_{v,ji}) \quad (1)$$

Donde

$D_{v,ij}$  Es la diferencia entre el nivel de velocidad promedio de un elemento i y el de un elemento j, cuando únicamente el elemento i es excitado, se expresa en dB

$D_{v,ji}$  Es la diferencia entre el nivel de velocidad promedio de un elemento j y el de un elemento i, cuando únicamente el elemento j es excitado, se expresa en dB.

La importancia de la determinación del valor de la diferencia de velocidades radica en que su determinación influirá en la determinación del índice de reducción vibracional  $K_{ij}$ . La expresión más simple para la obtención del índice de reducción vibracional en el caso de elementos ligeros bien amortiguados [1-2] es la siguiente:

$$K_{ij} = D_{v,ij}^- + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (2)$$

Donde,  $l_{ij}$  y  $S_i, S_j$  son la longitud de la unión entre los elementos i, j, y las superficies de absorción equivalentes, respectivamente.

En el caso de que exista un fuerte acoplamiento entre los elementos i, j a estudio, puede que el valor medido del índice de reducción vibracional no sea de interés, por no reflejar la realidad de la distribución de energía entre dichos elementos. Para comprobar la validez del método de medida utilizado, se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$D_{v,ij} \geq 3 - \lg \left( \frac{m_i f_{cj}}{m_j f_{ci}} \right) \quad (3)$$

Donde

$m_i, m_j$  son las masas por unidad de área de los elementos, en kilogramos por metro cuadrado, y  $f_{ci}, f_{cj}$  son las frecuencias críticas de los elementos, en hercios.

Desde el punto de vista matemático (estadístico), nuestro objetivo es calcular un valor representativo de la diferencia de velocidades con una valoración de la incertidumbre[5-6]. Para cada valor de la frecuencia tenemos dos muestras, que corresponden a las dos direcciones, (con a y b denotamos las direcciones),  $D_{j,f}^a$  y  $D_{j,f}^b, j=1,2,\dots,n$ . Siendo n el tamaño de la muestra.

Las medias muestrales de estas poblaciones se calculan como:

$$D_f^a = \frac{\sum_{j=1}^n D_{j,f}^a}{n}, D_f^b = \frac{\sum_{j=1}^n D_{j,f}^b}{n} \quad (4)$$

Y las varianzas:

$$\left(S_{n-1,f}^a\right)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n \left(D_{k,f}^a - D_f^a\right)^2}{n-1} \quad \left(S_{n-1,f}^b\right)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n \left(D_{k,f}^b - D_f^b\right)^2}{n-1} \quad (5)$$

Se consideran como incertidumbre de las medidas, los valores

$$S_f^a = \frac{S_{n-1,f}^a}{\sqrt{n}} \quad S_f^b = \frac{S_{n-1,f}^b}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Calculamos, para cada frecuencia  $f$ , el valor medio debido a las dos direcciones, tal y como se indica en la normativa anteriormente mencionada

$$D_f = \frac{D_f^a + D_f^b}{2} \quad (7)$$

Este valor es combinación lineal de dos variables, por lo que la varianza correspondiente será

$$\left(S_f\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(S_f^a\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(S_f^b\right)^2 \quad (8)$$

Es decir, una medida de la incertidumbre para cada valor  $D_f$ , vendrá dado por

$$S_f = \frac{\sqrt{\left(S_f^a\right)^2 + \left(S_f^b\right)^2}}{2} \quad (9)$$

## Resultados

El esquema de la configuración estudiada es el de la figura 2.

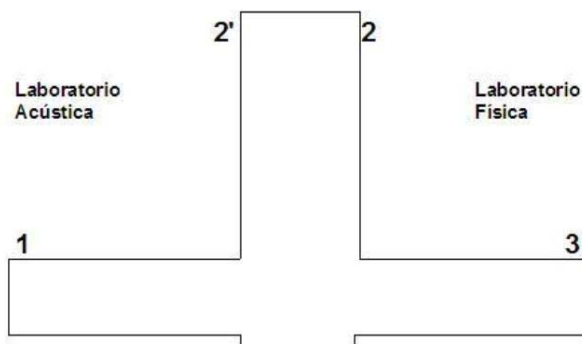


Figura 2-Eschema en T de los elementos constructivos estudiados.

Los índices asociados a las direcciones  $i, j$  de las mediciones se presentan en la tabla 1.

Tabla 1- Código de índices estudiados. Diferentes caminos de vibraciones medidos en los laboratorios de acústica y física de la EPSG-UPV.

<b>13.</b> $i=1, j=3$ .	Excitación Forjado Laboratorio de Acústica. Acelerómetro Forjado Laboratorio de Física
<b>23.</b> $i=2, j=3$ .	Excitación Medianera Laboratorio de Física. Acelerómetro Forjado Laboratorio de Física.
<b>2'1.</b> $i=2', j=1$ .	Excitación Medianera Laboratorio de Acústica. Acelerómetro Forjado Laboratorio de Acústica.

Se presentan valores de las medias de las diferencias de velocidades según normativa y de las incertidumbres asociadas a estas medidas ( $D_v \pm \Delta D_v$ ) o lo que es lo mismo, ( $D_f \pm S_f$ ), si se realizan muestras de 3, 5 y 7 pares de mediciones.

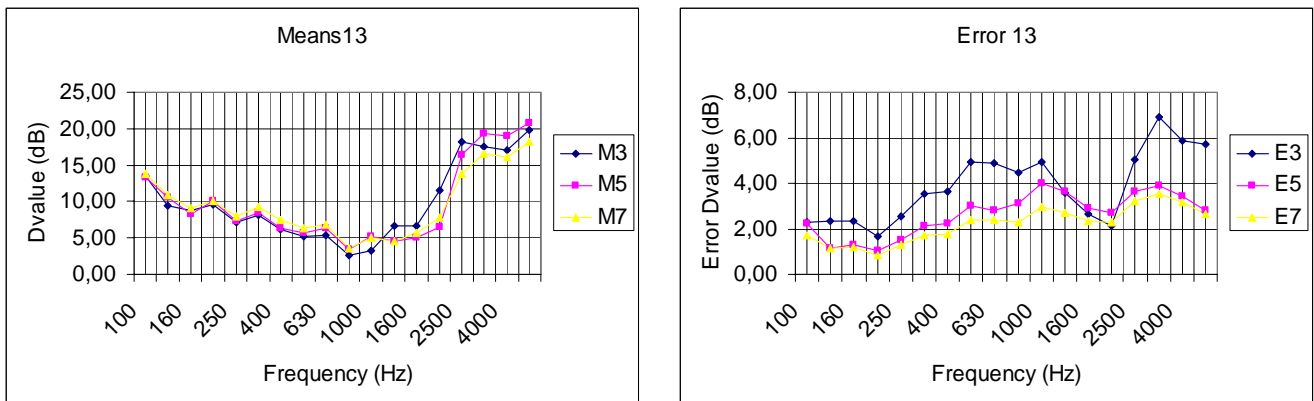


Figura 3-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración forjado-forjado si se realizan, 3, 5 o 7 pares de medidas, con el error asociado a estas medidas.

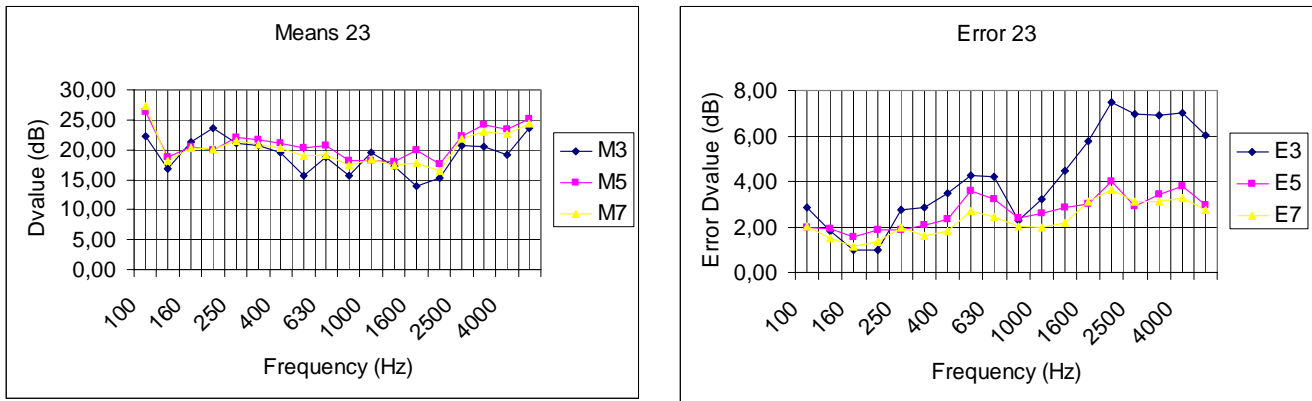


Figura 4-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de física, si se realizan, 3 ,5 o 7 pares de medidas, con el error asociado a estas medidas.

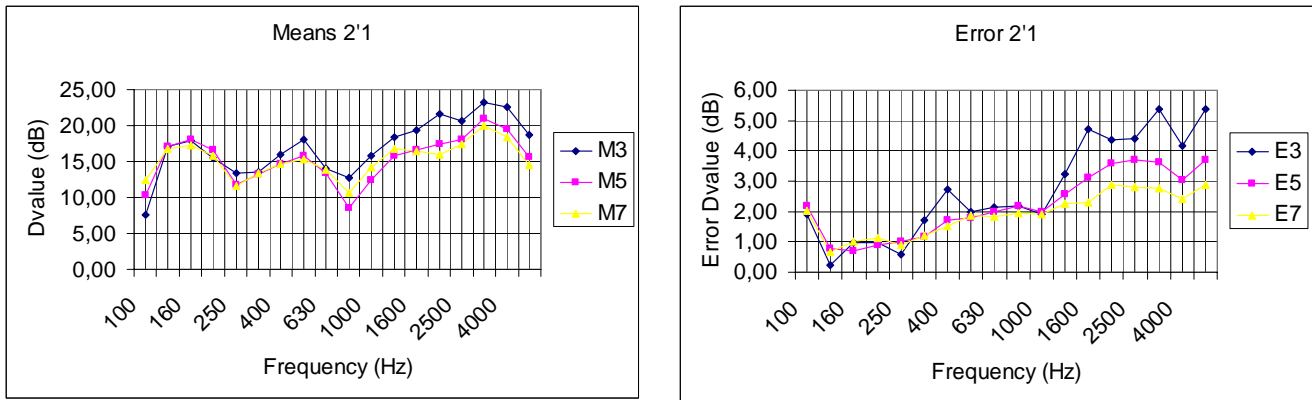


Figura 5-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de acústica, si se realizan, 3 ,5 o 7 pares de medidas, con el error asociado a estas medidas.

Como se puede observar, hay una clara tendencia a la disminución del error en función del número de muestras, aunque esta disminución no es homogénea, siendo más sensible a unas frecuencias que a otras. La medida de diferencia de velocidades también tiende a estabilizarse al aumentar el número de pares de puntos de medida.

La validez de todos estos valores de las diferencias de velocidades medidas según se indica en la normativa, viene dada por la expresión (3). Tan solo se deberá estudiar con detalle en el caso del camino 13, es decir, forjado-forjado. Para las otras dos combinaciones, el valor límite para la diferencia de velocidades que nos da la expresión (3), es de aproximadamente 1.5. Se puede observar en las figuras 4 y 5 que los valores medidos superan en más de 5 dB este valor límite. En el caso de la configuración forjado-forjado, en la cual la relación de masas es la igualdad, el valor límite es de 3dB.

En la figura 6 observamos con mayor detalle los valores del valor de la diferencia de velocidades (con 3, 5 o 7 muestras) comparadas con el valor límite de validez dado por la expresión (3).

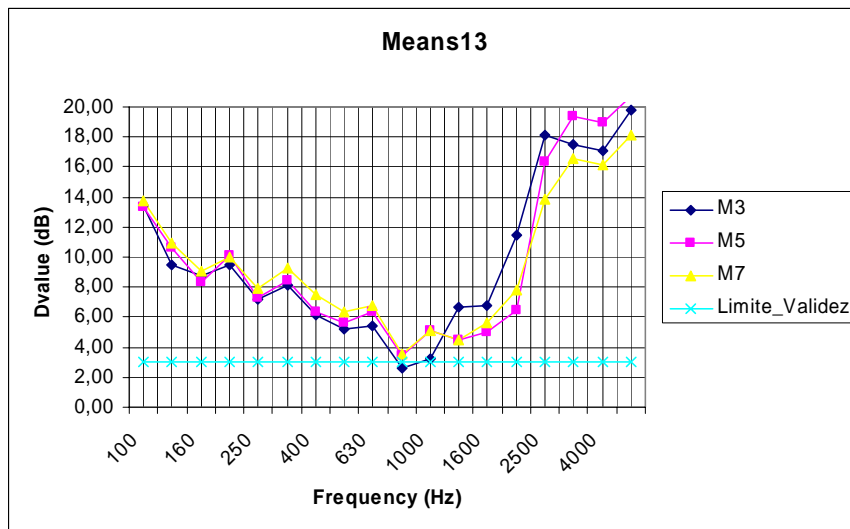


Figura 6-Figura 3 comparada con el valor límite dado por la expresión 3, para el cual, la medición del índice de reducción vibracional ( $k_{ij}$ ), tal como se indica en normativa deja de tener validez.

Se puede observar la disminución que se produce en torno a 1 kHz, de forma que en función del número de medidas, podemos pasar a superar el límite marcado por la norma por el aumento de datos.

En la misma normativa, se nos permite utilizar un valor global del índice de reducción vibracional. Este valor que no depende de la frecuencia se calcula mediante la media aritmética entre 200 y 1250 Hz en nuestro caso, y sirve, además de darnos una visión de valor único absoluto, como valor de entrada para alguno de los modelos utilizados en aislamiento [2]. Hemos estimado este valor global del índice de reducción vibracional. Gracias a la teoría de errores y suponiendo el segundo término de la expresión 2 constante, podemos identificar el error relativo medio del índice de reducción vibracional como el error relativo medio de la diferencia de velocidades:

$$\frac{\Delta K_{ij}}{K_{ij}} = \frac{\Delta D_{v,ij}}{D_{v,ij}} \tag{10}$$

Se presentan los resultados de estas estimaciones para las configuraciones 23 y 2'1, tanto en el caso de 3, 5 y 7 pares de puntos de medida.

Tabla 2- Errores relativos medios de valores globales. Para las configuraciones 23 y 2'1.

Número pares de medida	$\frac{\Delta D_{v,ij}}{D_{v,ij}}$	
	Configuración 23	Configuración 2'1
3	3.2 dB	2.3 dB
5	2.5 dB	2.0 dB
7	2.0 dB	1.6 dB

Se puede observar en la tabla 2 que tan solo en uno de los casos el error medio relativo del valor global apenas supera los 3 dB.

También se ha estudiado la influencia de la elección de la muestra en el valor de la incertidumbre de la diferencia de velocidades. En construcciones reales, existen diversas posibilidades de puntos de medidas, todos ellos válidos según normativa, siempre y cuando se mantengan las distancias y se realice la distribución adecuada.

Se presentan valores de valores medios e incertidumbres de la diferencia de velocidades si se consideran para un mismo caso de estudio (configuración y dirección) diferentes puntos de muestreo, en las figuras 7 a 9, para el caso de poblaciones de 3 y 5 pares de muestras. En cada uno de los casos se estudia la influencia en el valor medio como en el error cometido al escoger diferentes muestras de medidas.

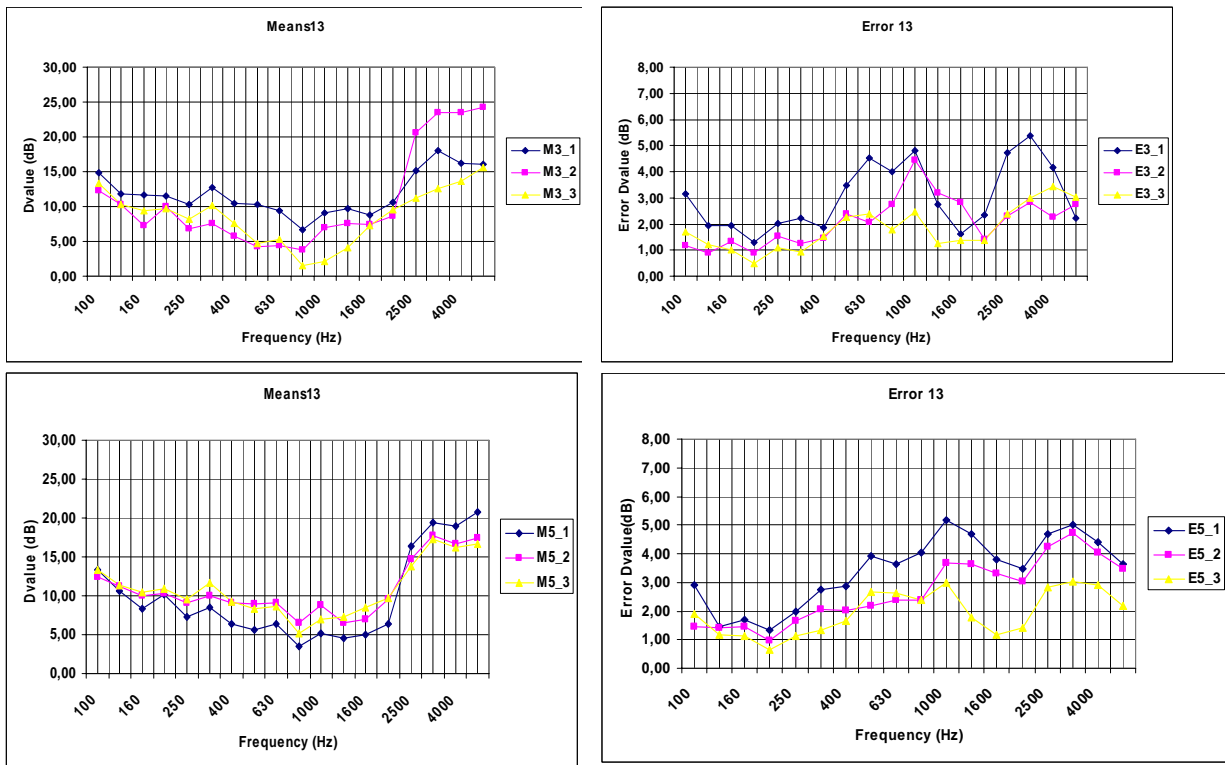
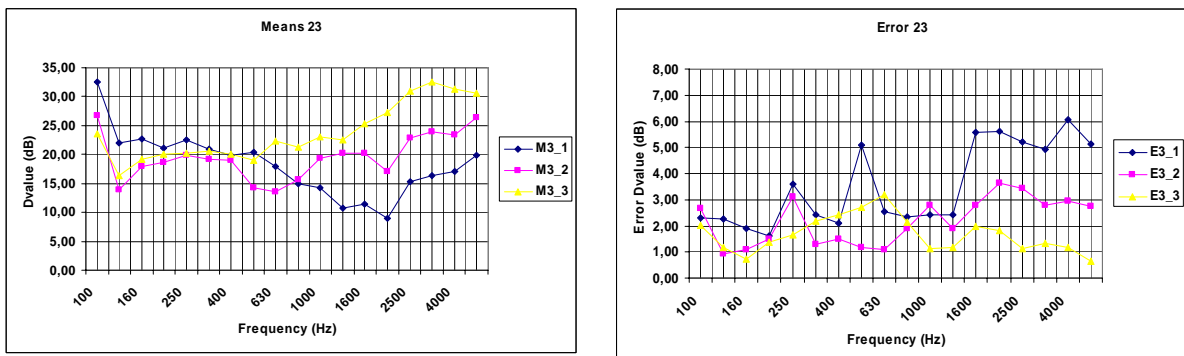


Figura 7-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración medianera-medianera, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior e inferior respectivamente).





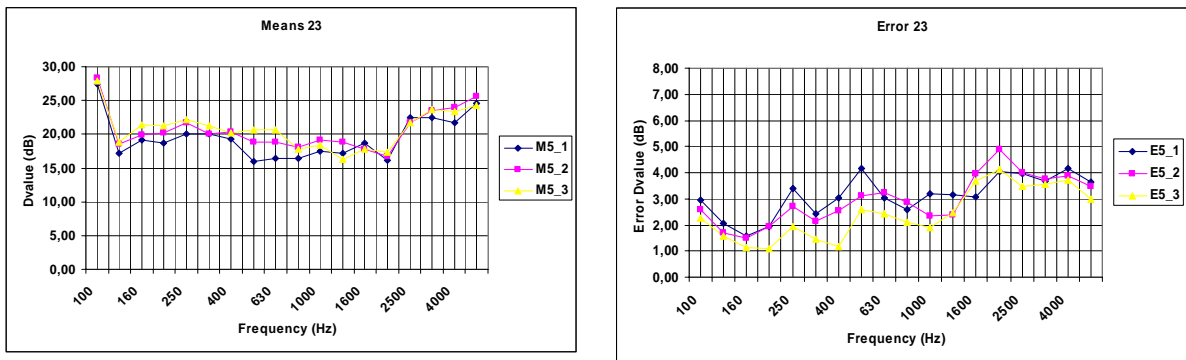


Figura 8-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de física, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior y inferior respectivamente).

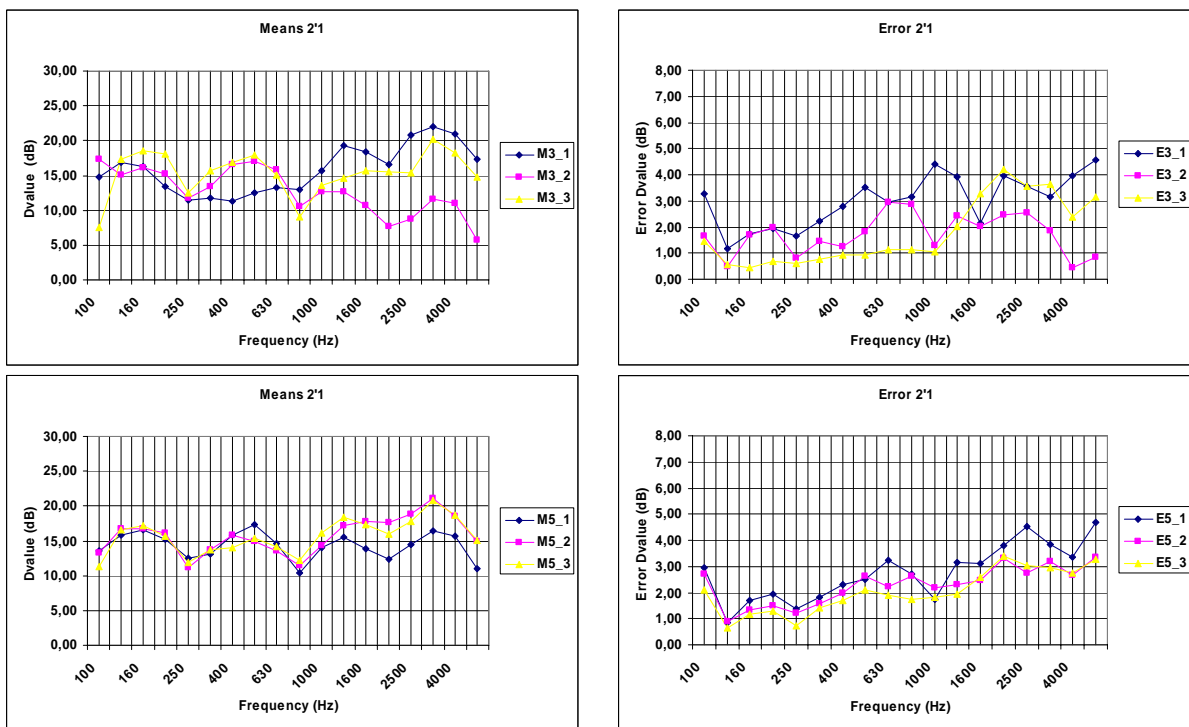


Figura 9-Valores de las diferencias de velocidades obtenidas para la configuración medianera-forjado en laboratorio de acústica, si se realizan 3 o 5 pares de mediciones (gráficas superior y inferior respectivamente).

Como se puede observar, la agrupación por pares de 3 y 5 puntos no asegura la reducción del error por completo. Las diferentes agrupaciones de puntos de medida, han dado errores diferentes, si bien parece que en el caso de los pares de 5 mediciones el error presenta menos altibajos en su distribución.

### 3 Conclusiones

Se han realizado diferentes campañas de medida con el fin de obtener datos sobre la incertidumbre cometida en el proceso de medición de la diferencia de velocidades para la obtención del índice de reducción vibracional según el procedimiento descrito en la UNE-EN ISO 10848-1. En principio, como parecía lógico, el aumento del número de muestras reduce de manera global la incertidumbre de medida. Sin embargo, esta reducción no se realiza de forma gradual, reduciéndose bastante en los valores extremos del espectro en frecuencias, y menos en las bandas centrales.

Esto también se puede observar en el error cometido al evaluar el valor global medio del índice de reducción vibracional, suponiendo que el término asociado a las absorciones es constante, donde este valor parece variar relativamente poco.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el ministerio de educación y Ciencia. DG RESEARCH (BIA2007-68098-CO2-01 y BIA2007-68098-CO2-02).

### Referencias

- [1] ISO 10848-parts 1, 2 and 3. Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms.
- [2] UNE-EN 12354-1 Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements.
- [3] Alba, J., Venero, J., del Rey, R., Ramis, J., Escuder, E. Vibration Reduction Index of different junctions measured in situ. ICA 2007.2-7 September 2007.
- [4] Alba, J., Ramis, J., Escuder, E., del Rey, R. Effect of the estimation of the wall/floor junction type on the acoustic isolation. Acoustics'08. Paris. 29 Junio-4 Julio 2008.
- [5] P. Bevington and D. K. Robinson; Data reduction and error analysis for the physical sciences, 2nd ed., McGraw Hill, New York (1993).
- [6] Richard A. Johnson; Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund, 5th ed., Prentice-Hall, (1997).