

CATEDRAL DE LEÓN. IMPACTO POR VIBRACIONES DEL NUEVO ÓRGANO SOBRE LAS VIDRIERAS

Búrdalo Salcedo, Gabriel¹, García Ortiz, Eduardo², Cepeda Riaño, Jesús³, de Barrios Carro, Mercedes⁴, de Barrios Carro, Miguel A.⁵

Laboratorio de Acústica Aplicada. Universidad de León. Campus de Vegazana s/n CP 24071, León (España).
Tlno - Fax: +34 987 291 777.

gabriel.burdalo@unileon.es; e.garcia.ortiz@unileon.es; jesus.cepeda@unileon.es; m.debarrios@unileon.es;
mdec@unileon.es; <http://acustica.unileon.es>

Resumen

La conservación de las vidrieras de la catedral de León, ha sido y es uno de los principales objetivos planteados desde hace años, fundamentado en la cantidad y calidad de las mismas, hoy en día considerada como la mayor colección medieval del mundo.

Actualmente las vidrieras están sufriendo un intenso proceso de restauración. La sustitución del actual órgano por otro de mayor potencia acústica, ha suscitado una preocupación por los posibles daños que las vibraciones emitidas pudieran provocar a las vidrieras restauradas más próximas a la emisión.

En la presente comunicación se expone el desarrollo de los objetivos planteados, así como la caracterización de los posibles niveles de vibración recibidos por las vidrieras, análisis de las posibles consecuencias y propuesta, en su caso, de las medidas a adoptar, con la intención de determinar el posible impacto por vibraciones del nuevo órgano, todavía en fase de construcción.

Palabras clave: acústica estructural, vibraciones, órgano, catedral.

PACS: 43.40.Qi

Abstract

The conservation of the windows of the Cathedral of León, has been one of the main objectives for years, based on the quantity and quality of them. These windows are considered nowadays the largest medieval collection of the world.

Currently, the windows are undergoing an intensive restoration process. The replacement of the current pipe organ by another with a more powerful sound has raised concerns about potential damage. This damage could cause vibrations to the closest windows that had been recently restored.

These works present the development of the planned objectives. Included are the characterization of possible vibration levels received by the windows, analysis of possible consequences and the proposal, if any, of the measures to adopt. These actions intend to determine the potential impact of the new pipe organ vibration, still under construction.

Keywords: structural acoustics, vibrations, pipe organ, cathedral.

PACS: 43.40.Qi

1 Antecedentes y Objetivos

1.1 Antecedentes

1.1.1 Las vidrieras

Como es mundialmente reconocido, la calidad y cantidad de las vidrieras de la Catedral de León resultan prácticamente inigualables en el mundo.

Sin pretender ser minuciosos, basten unas cifras al respecto. La superficie total cubierta por las vidrieras se aproxima a los 1.800 m², repartidos por toda la superficie construida. Así, se pueden citar 31 ventanales altos, de cuatro huecos y dos lancetas laterales, con una altura cada uno de ellos de 12 m. En total 112 huecos grandes y 48 lancetas, situándose sobre ellos 83 rosas polilobuladas. Además de los 48 huecos y 12 rosas de las naves laterales y, por supuesto, los tres grandes rosetones de 8 m de diámetro cada uno de ellos. Igualmente podríamos citar los 37 ventanales situados en la franja del triforio, de 3,5 m de alto.

La edad de las vidrieras es muy variable, desde las más antiguas, correspondientes a los siglos XII, XIII y XIV, hasta una importante cantidad de las mismas que fueron recompuestas y restauradas en su totalidad en el XIX.

Ha habido numerosos períodos de restauración, y en los últimos años se está procediendo a una realmente intensa, que incluye tanto la piedra anexa como los propios vitrales, mediante su desmontaje total, restauración propiamente dicha y limpieza; así mismo, se han colocado vidrios de protección exterior y se han mejorado los soportes y elementos de sujeción.

1.1.2 El nuevo órgano

Se encuentra en fase de construcción un nuevo órgano para la Catedral de Santa María de León, más potente en su emisión que el actualmente existente, que se espera esté instalado a mediados de 2013. Dicho órgano estará constituido por 4344 tubos, 5 manuales y pedalera y 63 registros y un presupuesto de 1,7 millones de euros; considerado como el mejor órgano instalado en Europa.

La preocupación por parte del Cabildo de León dimana de la posibilidad de que este incremento en la emisión sonora podría originar, como consecuencia de ello, un aumento importante en las vibraciones que soportarán las vidrieras. Resulta evidente que no se puede desdeñar a priori que dicho aumento en las vibraciones pudiera originar daños indeseables en las vidrieras, lo que sería más acusado en los vitrales más próximos a la emisión del nuevo órgano.

1.2 Objetivos del estudio

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, este estudio plantea los siguientes objetivos:

- ✓ Caracterización de los posibles niveles de vibración recibidos por las vidrieras más próximas a la emisión originada por el nuevo órgano.
- ✓ Análisis de las posibles consecuencias que podrían originarse.
- ✓ Propuesta, en su caso, de medidas a adoptar.

2 Metodología

2.1 Datos de partida

Teniendo en cuenta la información suministrada por el organero encargado de la ejecución del nuevo órgano, Phillipp Klais, el incremento de nivel de emisión de ruido se estima en 5 dB, lo que realmente es una diferencia sustancial en el nivel de presión sonora originado por el órgano.

Así pues, se debe considerar este incremento en la emisión sonora a la hora de planificar el presente estudio, lo que se plasma en las fases del trabajo puestas en práctica.

En el momento de dar comienzo el presente estudio, en la Catedral se estaban llevando a cabo diversos e importantes trabajos de restauración en las vidrieras, en concreto en las correspondientes a la 1ª planta y, precisamente próximas a la zona en que se ubica el órgano actual. Dichos trabajos básicamente consistían para cada vidriera en:

- Retirada de las diversas lancetas de cada vidriera.
- Mejora y sustitución en su caso de los elementos de apoyo y sujeción.
- Limpieza y restauración de las diferentes grisallas que componen cada lanceta.
- Colocación de panel de vidrio de protección exterior en cada lanceta.
- Reposición de las lancetas una vez restauradas.

A tal efecto se instaló una importante plataforma de trabajo a nivel de 1ª planta; con una anchura similar a la de la nave principal, la cual permite la colocación de andamios tubulares, mediante los que acceder a las diferentes alturas de las vidrieras.

Teniendo en cuenta la situación de los trabajos de restauración, se orientó nuestro estudio hacia las vidrieras situadas en la 1ª planta en la fachada sur, específicamente hacia la numerada como S-XI.

2.2 Fases del trabajo

A partir de las consideraciones anteriores y siempre bajo la supervisión del Arquitecto conservador de la Catedral, se plantearon las siguientes fases del estudio:

I) Elección de la vidriera a estudiar como elemento representativo de las repercusiones que pudieran existir.

II) Disposición de elemento de estudio sustitutivo de la vidriera en cuestión. Se trataba de bastidores preparados al efecto y colocados en la ubicación de la vidriera real, sirviendo, por tanto, de modelo de trabajo.

III) Prospección y caracterización de la emisión sonora del órgano existente. Análisis de la repercusión que dicha emisión sonora tenía sobre la vidriera en estudio.

IV) Emisión de ruido superior a la caracterizada anteriormente, y superando aquella en aproximadamente 5 dB, con el fin de simular las condiciones futuras.

V) Medición de vibración en la vidriera seleccionada, tanto con la fuente sonora en funcionamiento como en situación de ausencia de emisión, es decir, en condiciones de vibración de fondo.

VI) Análisis de resultados y conclusiones.

2.3 Elección y composición de la vidriera representativa

Como se mencionó en el punto 2.1 la elección recayó en la vidriera denominada como S-XI, situada en la 1ª planta de la fachada sur en la parte delantera del coro y próxima a las salidas de emisión del órgano.

Se trata de una vidriera medieval perteneciente al siglo XV, con una superficie total de 39 m². La vidriera en cuestión se compone en su cuerpo principal de seis elementos verticales o lancetas; de estos seis, las dos laterales son más estrechas o costadillos, mientras que las otras cuatro componen la zona más relevante de la vidriera, con una anchura aproximada de 82 cm cada una de ellas.

Por encima de las lancetas citadas y rematando el conjunto de la vidriera, dándole la forma de óvalo apuntado, existen tres vidrieras en forma de rosa y otros elementos triangulares.

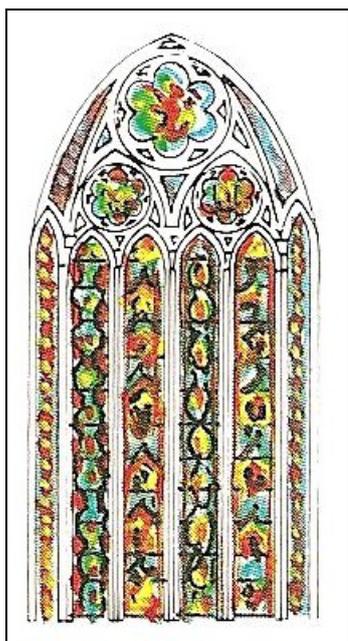


Figura 1 – Representación de la vidriera S-XI



Figura 2 – Vista actual de la vidriera S-XI

Es importante señalar que cada lanceta, a su vez se compone de 12 cuerpos rectangulares, de dimensiones diferentes. Se numeran correlativamente, de abajo hacia arriba, de 1 a 12. La dimensión media de estos cuerpos es aproximadamente de 82,1 cm de anchura y entre 60 y 75 cm de altura.

A su vez cada uno de estos cuerpos de lanceta está distribuido en diversos elementos rectangulares o grisallas, que constituyen la red de composición de la vidriera con las uniones en su día mediante emplomados.

2.4 Elemento de estudio sustitutivo

Para el estudio, y para no dañar en su caso la vidriera mencionada, se procedió por parte del Arquitecto encargado de la restauración a confeccionar elementos sustitutivos, que a todos los efectos pudieran suponer una situación similar a la real.

Se prepararon dos grandes bastidores metálicos, de dimensiones y características en cuanto a distribución similares a las de las dos lancetas centrales de la vidriera, denominadas 'c' y 'd'.

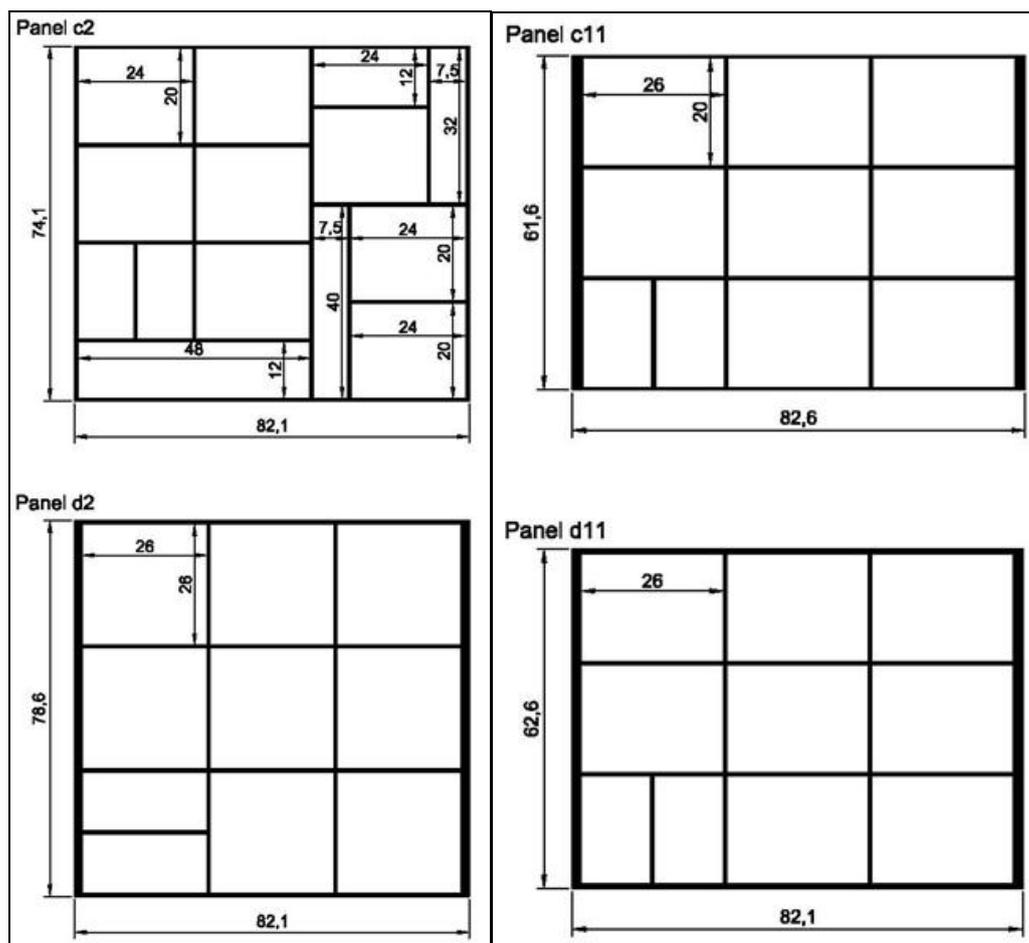


Figura 3 – Bastidores objeto de estudio

Sobre dichos bastidores, se colocaron vidrios de diferente grosor para cada una de ellas, y con elementos de sujeción también análogos a los de aquella vidriera. Para lograr la máxima similitud con la vidriera real, los vidrios de estos bastidores se distribuyeron tanto en dimensión como en número y disposición tal como están en aquella.

Así mismo, con el fin de observar unas posibles respuestas diferentes en los vidrios, las uniones entre las grisallas fueron también diversas.

2.5 Prospección y caracterización de la situación actual

Con el fin de analizar la emisión sonora actual se procedió a hacer una prospección que permitiera definir los niveles de ruido actuales y caracterizar el ruido emitido mediante su análisis espectral. Se procedió de la forma siguiente:

A) Se eligieron cuatro puntos representativos para estudiar la emisión y observar su variación relativa. Estos puntos fueron:

Punto 1: situado sobre el propio órgano, mediante pértiga, a 3,3 m del balcón ubicado sobre aquél.

Punto 2: situado a 3,3 m por debajo de la plataforma y, por tanto, sobre el que incide directamente la emisión sonora, al igual que sobre el anterior.

Punto 3: situado en trípode ubicado sobre la plataforma.

Punto 4: situado sobre trípode colocado directamente sobre el suelo, muy cerca de la puerta de entrada al coro.

B) En cada uno de estos 4 puntos, se hicieron a la vez 4 medidas diferentes con el órgano a máxima potencia.

Medida nº 1 con el órgano emitiendo solamente en agudos.

Medida nº 2 con el órgano emitiendo solamente en frecuencias medias.

Medida nº 3 con el órgano emitiendo solamente en graves.

Medida nº 4 con el órgano emitiendo en todo el rango de frecuencias posible, lo que denominamos 'mix'.

C) En total, de acuerdo con lo anterior, se hicieron 16 medidas, obteniendo para cada punto y tipo de frecuencia un espectro del ruido en tercios de octava. Todas las medidas fueron de una duración de dos minutos.

Se pudo observar, por otra parte, la especial relevancia que presentaban las frecuencias bajas comprendidas entre 63 y 500 Hz, lo que se ha tenido en cuenta a la hora de analizar los resultados.

2.6 Medición y análisis de ruido en situación futura

Era obligado ya a continuación efectuar mediciones sobre los bastidores de referencia en una situación de emisión sonora que podía suponerse similar a las de las condiciones futuras con el nuevo órgano.

Para ello se procedió según los siguientes puntos:

I) Se eligieron dentro de las lancetas 'c' y 'd' dos cuerpos diferentes en cada una de ellas, a diferente altura, como representativas de los niveles de inmisión que recibirían. Estos cuerpos fueron los numerados como 2 y 11, por lo que, en definitiva, se realizaron las mediciones en los cuerpos o paneles 'c2' – 'c11' – 'd2' y 'd11'.

Dentro de cada cuerpo o panel, se realizaron mediciones en todas las grisallas, con lo que en resumen se hicieron las siguientes:

- Panel 'c2': medidas en sus 14 grisallas.
- Panel 'c11': medidas en sus 10 grisallas.

- Panel 'd2': medidas en sus 10 grisallas.
- Panel 'd11': medidas en sus 10 grisallas.

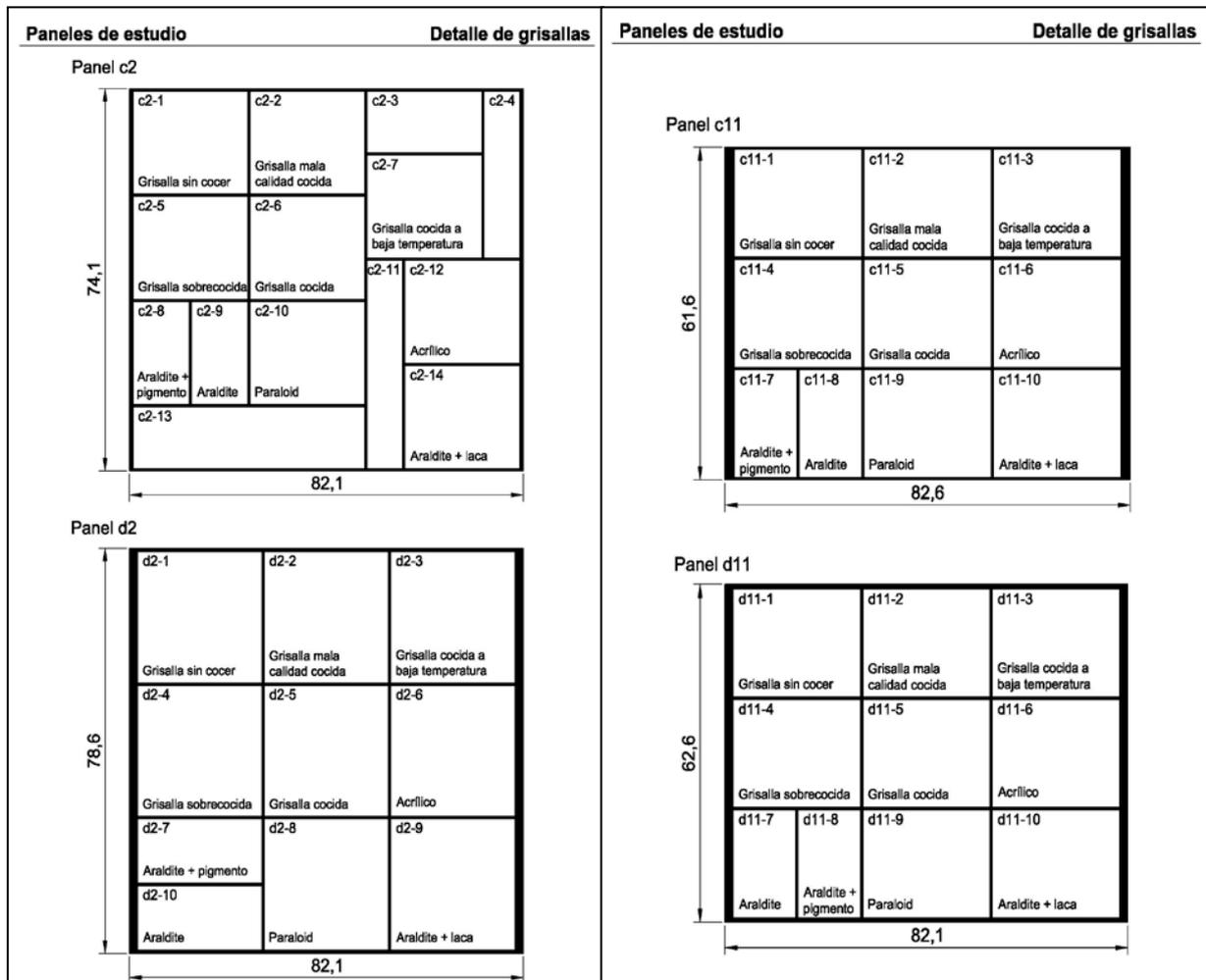


Figura 4 – Detalle de las grisallas

En cada medición se obtuvieron el nivel global de ruido y su espectro en tercios de octava.

II) Para la ejecución de cada medición y al objeto de conseguir las condiciones deseadas y para la situación más desfavorable, se produjeron simultáneamente dos emisiones:

- El órgano tocando a la vez sobre todas las frecuencias, lo que denominamos 'mix'
- Emisión de ruido rosa originado por un Cd al efecto, a través de un equipo de reproducción sonora instalado en la Catedral.

III) Todas las medidas fueron de una duración de dos minutos.

2.7 Medida de vibración

De forma simultánea con las mediciones de ruido descritas en el apartado anterior, se procedió a realizar las mediciones deseadas de vibración. Cabe indicar los siguientes aspectos:

A) Como se ha citado, las mediciones se realizaron de forma simultánea con las de ruido, por consiguiente, con las mismas condiciones de emisión sonora antes mencionadas.

B) Igualmente, los puntos de medidas fueron los correspondientes a las 14 grisallas del panel 'c2' y a las 10 grisallas de los paneles 'c11', 'd2' y 'd11'.

C) En cada medición se obtuvieron los espectros de vibración en tercios de octava para los canales correspondientes a los ejes X, Y y Z.

D) Se llevaron a cabo mediciones de vibración de fondo en cada uno de los puntos citados, al objeto de comprobar la incidencia de nuestro foco de emisión.

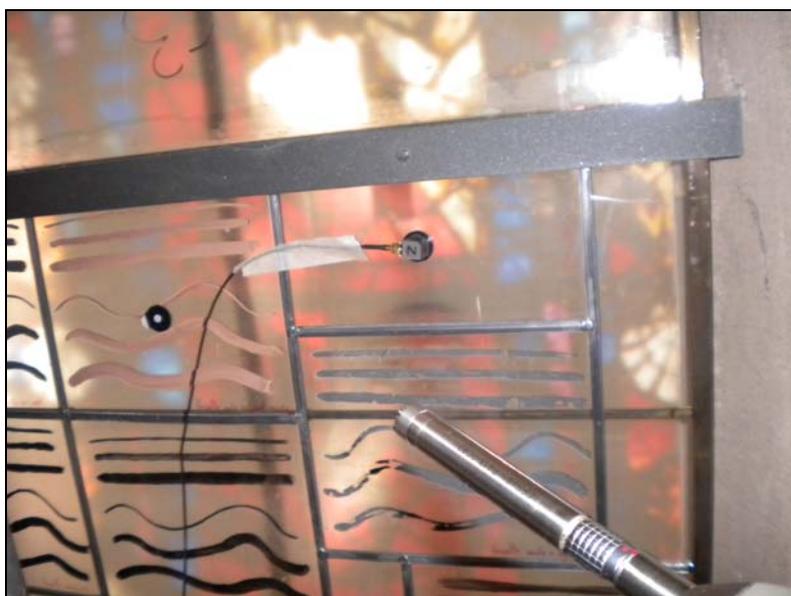


Figura 5 – Medida simultánea de ruido y vibraciones sobre una grisalla del panel 'c2'

2.8 Instrumentación empleada

Para la realización del estudio el Laboratorio de Acústica Aplicada de la Universidad de León utilizó una amplia dotación de instrumentación técnica, que se detalla a continuación:

- Sonómetro integrador CESVA, mod. SC-310, nº de serie T221472.
- Calibrador sonoro BRUEL&KJÆR, mod. 4231, nº de serie 2463850.
- Monitor analizador de vibraciones SVANTEK, mod. SVAN948, con nº de serie 9893.
- Acelerómetro triaxial PCB, mod. 356A02, nº de serie 16248.
- Calibrador de vibraciones RION mod. VE-10, nº de serie 131281.
- Otro material complementario, tal como distanciómetro láser, termohigrómetro y software de desarrollo y aplicación a los procedimientos empleados.

2.9 Parámetros de medición

En la realización del estudio y a efectos del análisis de los resultados, se ha determinado la vibración mediante la medición de la aceleración y el correspondiente nivel de aceleración en dB:

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0} . \quad (1)$$

Donde:

a es el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración en el tiempo a (t), expresado en m/s^2 .

a_0 es la aceleración de referencia (10^{-6} m/s^2).

3 Resultados

3.1 Prospección y caracterización de ruido actual

- Estos resultados permiten determinar que, en cuanto a conformación los espectros no difieren entre sí apreciablemente para los 4 puntos considerados.
- Por otra parte se detecta que para la mayoría de las frecuencias los mayores valores se obtienen en el punto 1, es decir, situado sobre el propio órgano, a 3,3 m, mediante pértiga.
- Igualmente se observa que en general las menores cifras corresponden al punto 3 (trípode sobre la plataforma), lo que es debido al apantallamiento ocasionado por la plataforma.
- En cuanto a los puntos restantes, 2 y 4, son ligeramente superiores para este último (sobre trípode, en el suelo de la nave), lo que nos orienta acerca de la directividad del órgano.
- Finalmente, es importante indicar que para la emisión ‘mix’ (con todo el rango de frecuencias) nos lleva a considerar un mayor relieve para el grupo de frecuencias comprendidas entre 63 y 500 Hz.

3.2 Medida de ruido en situación futura prevista

- Hay una gran semejanza entre los diferentes espectros de ruido obtenidos en las diferentes grisallas de cada uno de los cuatro paneles estudiados.
- Esta similitud en los espectros se reproduce igualmente si se comparan entre sí los cuatro paneles.
- Puede deducirse que las condiciones de presión sonora a que estarán sometidos los diferentes puntos elegidos para el estudio serán prácticamente idénticas, lo que avalará las conclusiones obtenidas.

3.3 Medida de vibración en situación futura prevista

Como cuestión previa, hay que señalar que, por incidencias surgidas durante las mediciones, se han desechado los valores correspondientes al panel 'c2', ya que una vez analizados se comprobó la no validez de los mismos.

Los resultados permiten deducir:

I) De los datos obtenidos puede deducirse con claridad que de los tres ejes considerados, que corresponden a los canales 1, 2 y 3 reseñados, los valores más altos son los del eje Z (canal 3), y en ello en todos los casos. Por ello nos fijaremos en el análisis en las indicadas para este eje y canal.

II) De igual manera tomaremos para su comparación los valores de vibración de fondo que pertenecen al mismo canal 3-eje Z.

III) Con el fin de sintetizar el estudio consideraremos únicamente 3 grisallas para cada uno de los cuatro paneles de referencia, repartidas aleatoriamente en cada panel.

IV) De igual manera, y para una mayor claridad, y sólo referirnos a los valores más importantes, se consideran 3 frecuencias de vibración, situadas en la zona del espectro que de las gráficas puede deducirse que tienen mayor relevancia. Éstas serán las de 80, 250 y 500 Hz.

V) En la tabla adjunta se recogen los valores seleccionados.

* En negro: Vibración de fondo

* En rojo: Vibración previsible futura

Tabla 1 – Niveles de vibración en dB – Panel 'c11' (eje z) .

Frecuencia (Hz)	Grisalla 1	Grisalla 5	Grisalla 9
80	71,8 103,2	63,0 91,9	77,8 101,0
250	85,4 99,4	80,0 99,7	71,0 101,0
500	88,2 101,1	83,6 97,5	76,6 100,4

Tabla 2 – Niveles de vibración en dB – Panel 'd2' (eje z) .

Frecuencia (Hz)	Grisalla 1	Grisalla 5	Grisalla 9
80	60,8 56,4	59,2 63,4	58,4 65,4
250	94,2 105,0	79,7 104,0	84,2 103,4
500	90,1 98,8	85,8 103,9	87,4 101,7

Tabla 3 – Niveles de vibración en dB – Panel ‘d11’ (eje z) .

Frecuencia (Hz)	Grisalla 1	Grisalla 5	Grisalla 9
80	88,2 103,5	86,0 104,8	96,7 107,1
250	85,4 102,2	88,6 108,4	87,4 106,5
500	79,2 94,0	85,7 97,2	82,9 96,9

VI) En la mayoría de los casos, como era de esperar, la diferencia entre la vibración de fondo y la vibración total en situación previsible futura es importante, producto de la elevación producida en las fuentes para conseguir una aproximación a dicha situación futura.

VII) Los datos obtenidos no indican ningún sesgo favorable o en contra hacia un tipo o conformación de grisalla determinada, dentro de los diferentes paneles.

VIII) Los mayores valores se alcanzan en las frecuencias de 250 y 500 Hz, con cifras que se encuentran en el intervalo de 94 a 108 dB. Si las consideramos en términos de aceleración equivalen a un intervalo entre 0,05 y 0,25 m/s².

3.4 Normativa y legislación

Se han tenido en cuenta las citadas a continuación:

- ✓ Norma SN 640312 (1978). Asociación Suiza de Ingenieros de Carreteras.
- ✓ UNE 22-381-93. Control de Vibraciones Producidas por Voladuras.
- ✓ Norma DIN 4150-3:1999, Structural Vibration - Effects of vibration on structures.
- ✓ Norma ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to Whole-Body Vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
- ✓ Código Técnico de la Edificación. R.D. 1371/2007.

4 Conclusiones

- Se han analizado los resultados obtenidos en vidrios colocados sobre bastidores preparados al efecto con situación, disposición y estructura similares a la de la vidriera considerada como modelo de estudio, en concreto la S-XI, situada en la 1ª planta de la fachada sur, próxima a las salidas de emisión del órgano.
- Se han considerado dos lancetas de las cuatro existentes en la vidriera y dentro de ellas cuatro paneles diferentes. Las medidas de vibración se llevaron a cabo en todas las grisallas de dichos paneles.
- Los espectros de vibración obtenidos para los diferentes paneles son muy similares entre sí. Igualmente, no cabe indicar ninguna diferencia apreciable entre las diferentes grisallas de dichos paneles, a pesar de las muy diversas medidas y características de aquellas.
- Para la situación prevista futura los mayores valores de vibración en cuanto a aceleración se sitúan entre los 0,05 y 0,25 m/s², equivalentes a niveles comprendidos entre 94 y 108 dB.

- Si bien en la normativa considerada no se encuentran parámetros o índices que sean de aplicación directa en elementos similares a los estudiados, el análisis de dicha normativa permite concluir que no cabe esperar ninguna repercusión perjudicial para las mencionadas vidrieras en la situación futura prevista, ya que los valores encontrados se encuentran alejados de situaciones de posible riesgo para nuestro caso.

Agradecimientos

Al arquitecto conservador de la catedral de Santa María de León, D. Mariano Díez Sáenz de Miera por facilitarnos el trabajo y poner a nuestra disposición todos los medios necesarios para la ejecución de los ensayos.