

## **Case study: aislamiento vibratorio de un edificio en remodelación frente a las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario soterrado**

## **Case study: vibration isolation of a building under renovation against vibrations induced by underground railway traffic**

DOI: 10.46932/sfjdv3n2-049

Received in: February 15<sup>th</sup>, 2022

Accepted in: March 1<sup>st</sup>, 2022

### **Joan Cardona**

Mechanical Engineer

Institución: AV Enginyers

Dirección: Av. Via Augusta 15-25. St Cugat del Valles (Spain)

Correo electrónico: jcg@avenginyers.com

### **Daniel Isern**

Architect with a postgraduate degree in construction

Institución: Isern Associats

Dirección: c/ Zamora 61. Barcelona (Spain)

Correo electrónico: estudi@isern.pro

### **Jordi Lacambra**

Mechanical Engineer postgraduate Edification Structures

Institución: NOLAC Structural Consultants

Dirección: c/ Balmes, 226. Barcelona (Spain)

Correo electrónico: jordi.lacambra@nolac.net

### **Tomás López**

Mechanical Engineer

Institución: GERB

Dirección: c/ Juan Bruil, 2 1a planta. Zaragoza (Spain)

Correo electrónico: tomas.lopez@gerb.com.es

## **RESUMEN**

Un nuevo hotel de 5 estrellas ubicado en el barrio del Eixample de Barcelona se construye en un edificio existente de 7 plantas más 3 sótanos. El edificio original se utilizaba como oficinas y se construyó con una combinación de estructura metálica y de hormigón, teniendo en cuenta de no afectar a un túnel ferroviario existente que afectaba a la parcela. Esta infraestructura ferroviaria se ubica por debajo del primer sótano pero comparte 50/50 los sótanos 2 y 3, por lo que se puede decir que la infraestructura ferroviaria está literalmente insertada en el edificio. Los niveles de vibración que se inducían en el edificio de oficinas existente debido a la explotación comercial de la infraestructura ferroviaria eran demasiado altos para los estándares de confort de un hotel de 5 estrellas, por lo que la propiedad del hotel quiso incluir el aislamiento vibratorio del edificio en el proyecto de remodelación. Se desarrolló una campaña de medidas de vibración en el edificio existente, previo inicio de las obras de remodelación, y se diseñó el sistema de aislamiento para conseguir niveles de vibración confortables en los espacios del futuro hotel. En este artículo se describe la asistencia técnica en el campo de las vibraciones desarrollada previamente al inicio de los trabajos de remodelación del edificio, la solución de aislamiento diseñada, el proceso de

instalación del sistema de aislamiento vibratorio del edificio y los niveles de vibración que se inducen actualmente en el interior del hotel.

**Palabras clave:** vibraciones, ferrocarril, aislamiento.

## **ABSTRACT**

A new 5-star hotel have been built in an existing 7 story building with 3 basements, located in Barcelona's Eixample District. The original building was used as offices and was constructed using a combination of concrete and steel structure, taking into account to avoid any contact with an existing underground railway infrastructure which was affecting the plot. This railway infrastructure lays below the first basement and shares 50/50 the floor of the second and third basements; hence the railway is literally inserted into the building. Vibration levels induced in the existing building due to underground railway infrastructure were too high for a 5-star hotel comfort standards, therefore the hotel property wanted to include vibration isolation into building refurbishment project. Vibration measurements were carried out into existing building previous to the refurbishment works and vibration isolation system were designed to reach comfort vibration levels into future hotel spaces. This paper describes vibration technical assistance developed previously to the refurbishment works, the designed isolation solution, the installation process of the vibration isolation system and the vibration levels finally induced in the hotel.

**Keywords:** vibrations, railroad, isolation, isolation.

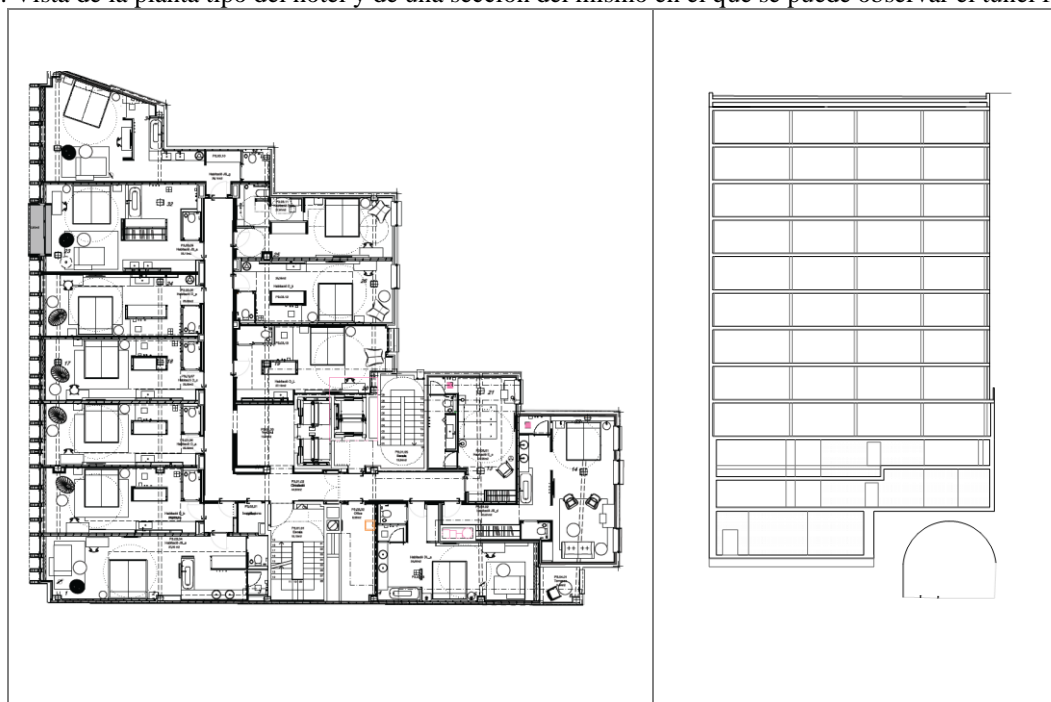
## **1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO**

El edificio objeto de estudio es un edificio de los años 70 ubicado en el barrio del Eixample de Barcelona que hasta el momento de la intervención estaba destinado a oficinas. Está formado por tres plantas de sótanos más ocho plantas sobre rasante con estructura mixta de hormigón y metálica, ya que consta de jácenas metálicas y bovedilla de hormigón.

Las plantas sótano -1 y -2 disponen de toda la planta para servicios comunes del hotel como vestuarios, despachos, mantenimiento o parking, mientras que la planta sótano -3 sólo dispone de la mitad de la superficie puesto que la otra mitad la ocupa el túnel ferroviario. Por tanto, se trata de un edificio que tiene la infraestructura ferroviaria encajada en su propia estructura.

La Figura 1 muestra una planta tipo del hotel y una sección transversal del mismo en la que se puede ver claramente que el túnel ferroviario está encajado en la estructura del edificio.

Figura 1. Vista de la planta tipo del hotel y de una sección del mismo en el que se puede observar el túnel ferroviario.



## 2 EQUIPO DE TRABAJO

Para abordar una obra de esta magnitud y complejidad, se estableció un equipo de trabajo multidisciplinar formado por el arquitecto responsable de la obra, un arquitecto técnico encargado del seguimiento de la obra, una ingeniería de estructuras responsable del estudio de cargas y del dimensionado de la estructura del edificio y una ingeniería vibroacústica responsable del dimensionamiento de los elementos para el aislamiento de las vibraciones y la constructora.

Una vez dimensionados y seleccionados los elementos para el aislamiento del edificio frente a las vibraciones de la infraestructura ferroviaria, la empresa suministradora de dichos elementos se unió al equipo de trabajo, aportando su experiencia en montaje de aisladores.

## 3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Al ser un edificio existente, en primer lugar, se procedió a realizar una campaña de medidas de vibración en diferentes puntos del forjado del primer piso, por ser el habitable más afectado, con el objeto de determinar la magnitud y la forma espectral de la vibración que se inducía en el edificio que debía convertirse en hotel. Para las medidas de vibración se utilizó un equipo multicanal que permite la adquisición de la vibración en los tres ejes ortogonales (x,y,z) de forma simultánea.

Figura 2. Detalle de uno de los puntos de medida de vibración antes de la remodelación del edificio.



Paralelamente a las medidas de vibración en el edificio objeto de estudio, se llevó a cabo otra campaña de medidas en otro hotel próximo a otra infraestructura ferroviaria de la misma propiedad con el objetivo de subjetizar los niveles de vibración para que la propiedad pudiera saber qué sensación tendría en el nuevo hotel.

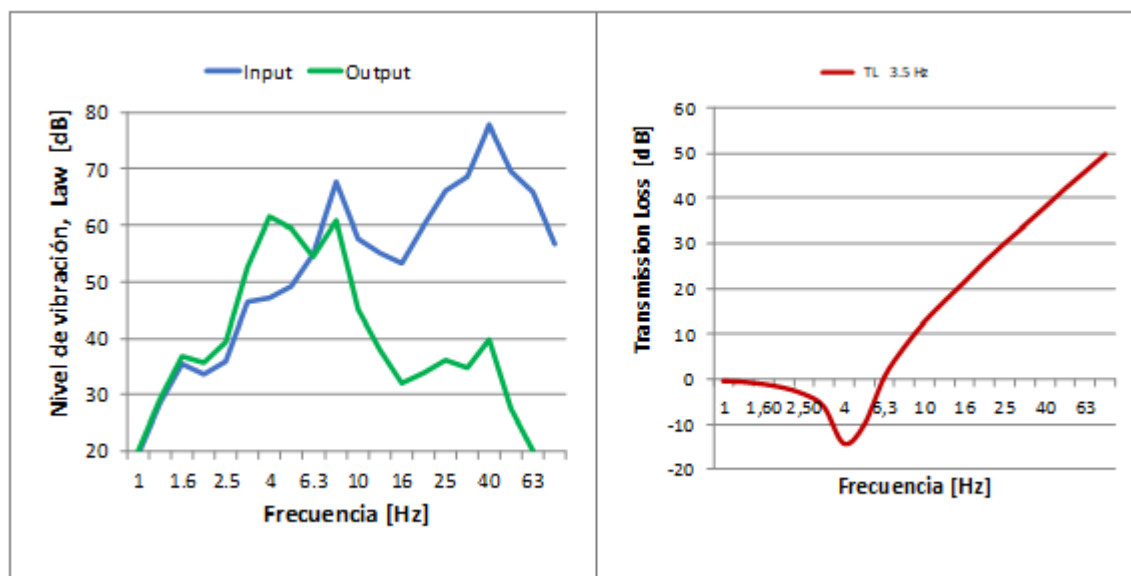
A partir de la señal temporal de aceleración de vibración de cada paso de tren, se calcularon los niveles de vibración globales ponderados en frecuencia, entre las frecuencias de 1 y 80 Hz, según la curva  $w_m$  para obtener los valores  $L_{aw}$  o MTVV. Los resultados de las medidas mostraron que se superaba el valor máximo admisible para edificaciones destinadas a uso residencial.

Estos resultados obligaban a implantar alguna medida correctora en la estructura del edificio que minimizara los niveles de vibración, máxime cuando el edificio debía albergar un hotel de 5 estrellas. En este sentido, el requerimiento de la propiedad no fue solo cumplir con el valor de vibración normativo si no que el objetivo debía ser que el cliente no se diera cuenta que existía una infraestructura ferroviaria encastada en el edificio. Al ser la percepción un aspecto subjetivo, se recurrió a un estudio interno desarrollado por AV Ingenieros en el que se establece una escala de percepción de las vibraciones y el ruido secundario provocado por infraestructuras ferroviarias soterradas, estableciéndose como objetivo no sobrepasar un nivel de vibración  $L_{aw} = 65$  dB, que es el nivel de que da lugar a posibles quejas por ruido secundario, aunque no por vibración, en entornos tranquilos.

El espectro tipo de la vibración inducida por el tráfico ferroviario en el interior del edificio era el que se puede ver en la Figura 3, que se caracteriza por presentar contenido energético importante en dos zonas del espectro muy claras: una a alta frecuencia, alrededor de la banda de 40 Hz, y la otra en la zona de bajas frecuencias, concretamente en la banda de 8 Hz, que es la que limita a la hora de buscar una solución.

Por el contenido energético del espectro, la solución elegida para aislar la estructura del edificio frente a las vibraciones fueron unos paquetes de elementos muelle metálicos de GERB capaces de ofrecer una frecuencia natural del sistema de 3.5 Hz. Con esta frecuencia natural el sistema de aislamiento empieza a ser efectivo a partir de la banda de 6.3 Hz y obtiene una reducción nominal de 7 dB a la frecuencia de 8 Hz que es donde se encuentra buena parte de la energía de vibración.

Figura 3. Espectro de vibración tipo inducido en el interior del edificio y gráfica TL de los muelles metálicos de 3.5 Hz.



Con estos datos, se estimó el espectro y los niveles de vibración que se inducirían en el interior del edificio después de su remodelación y después de la instalación del sistema de aislamiento GERB, obteniendo una reducción de -13 dB y un nivel de vibración global  $L_{aw} = 66$  dB, con lo que se cubrirían los objetivos planteados por la propiedad.

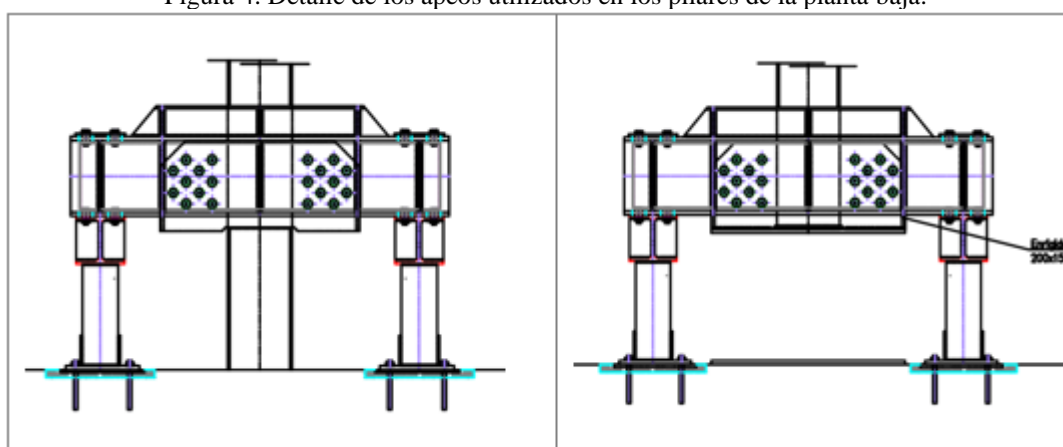
#### 4 IMPLANTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Los paquetes de muelles metálicos se dimensionan individualmente para cada uno de los pilares en función de la carga que debe soportar cada pilar. Para ello, el estructurista realiza una estimación del estado de carga que tendrá cada pilar una vez el edificio esté completamente terminado. Es importante que este cálculo sea lo más ajustado posible ya que una desviación podría provocar que el paquete de muelles perdiera sus propiedades elásticas, ya sea por un exceso de compresión debido a dimensionado para una carga menor a la real (el paquete de muelles quedaría aplastado), o bien por una falta de compresión debido a un dimensionado para una carga mayor a la real, con lo que el paquete de muelles sería demasiado rígido. Se debe tener un cuadro de cargas por pilar que permitirá el dimensionado de cada muelle, que se traducirá en una deflexión prevista.

Al ser un edificio existente, para implantar la solución de aislamiento de las vibraciones y que ésta tenga la eficacia prevista, es necesario realizar las siguientes tareas:

1. Por ser un edificio entre medianeras, en primer lugar, se debe asegurar que el edificio a aislar está completamente desolarizado, independizado, del resto de edificios adyacentes, así como también de la acera.
2. Los elementos antivibratorios metálicos de muelles se colocan mayoritariamente en la planta baja, para garantizar que las plantas superiores que es donde están las habitaciones queden aisladas. Por tanto, se debe asegurar la independencia de los encuentros horizontales entre la planta baja y las plantas superiores.
3. Finalmente, para la instalación de los elementos metálicos de muelle se deben apea los pilares del edificio a nivel de planta baja para cortar dichos pilares y poder insertar así los elementos antivibratorios pre-comprimidos. La Figura 4 muestra un detalle de los apeos utilizados en los pilares de la planta baja.

Figura 4. Detalle de los apeos utilizados en los pilares de la planta baja.



Una vez apeados los pilares de la planta baja, el proceso seguido para el montaje de los aisladores metálicos de muelle fue el siguiente:

1. Corte de los pilares a la altura del apeo. Los pilares metálicos se cortaron con soplete mientras que los pilares de hormigón armado se cortaron con hilo diamantado.
2. Medida de la deflexión del pilar, que en este caso debe ser nula
3. Instalación de los paquetes de muelles metálicos de muelle pre-comprimidos. Dicha pre-compresión se hace a la deflexión nominal para la que están dimensionados.
4. Ajuste de la altura del paquete de muelles mediante galgas.
5. Descompresión de los muelles mediante gatos hidráulicos y entrada en carga de los muelles.

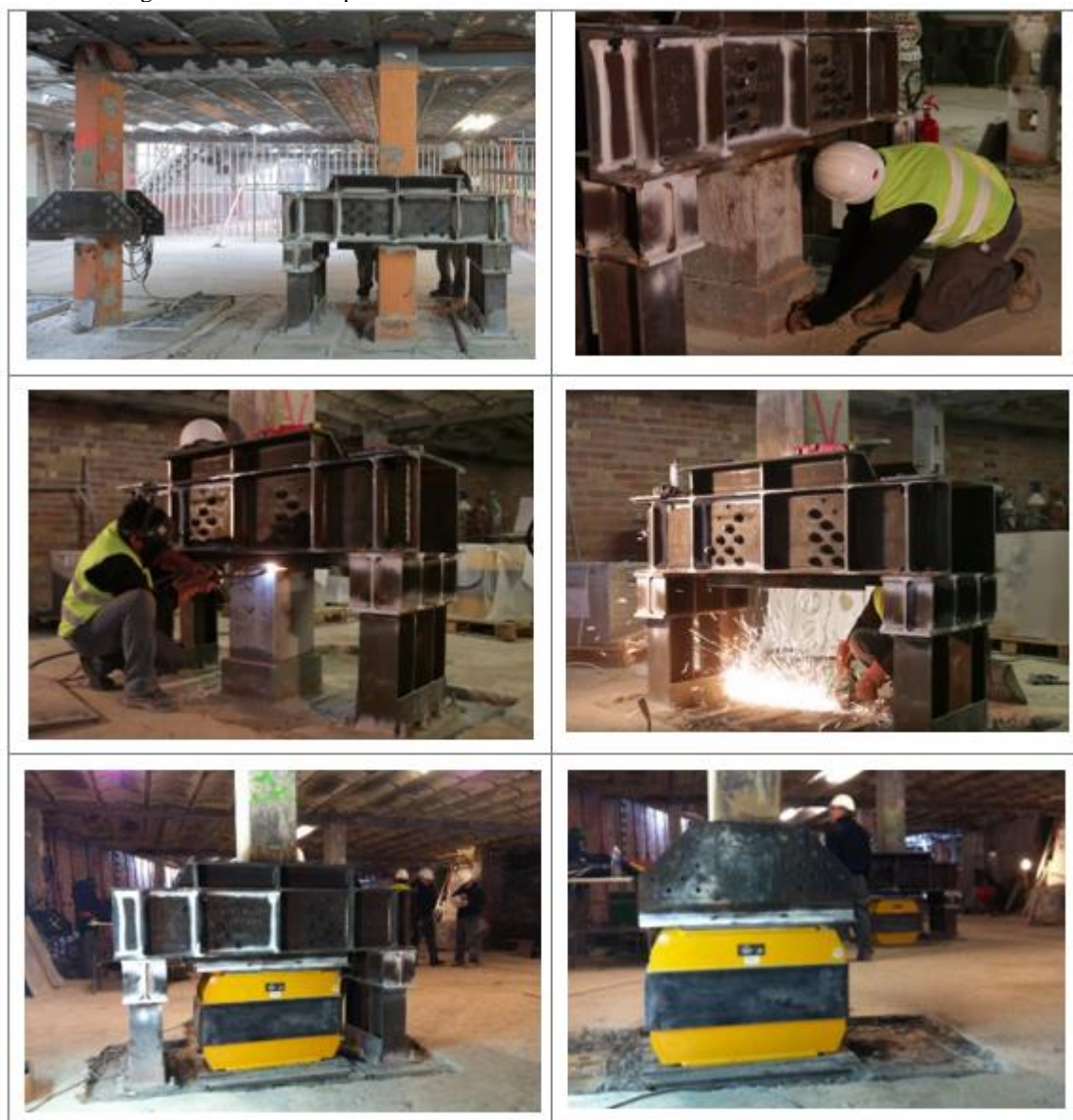


6. Medida de la deflexión del elemento antivibración para comprobar que esté dentro del rango previsto en el dimensionado.

7. En caso de que la deflexión sea diferente a la prevista, ajuste de ésta para que se aproxime lo más posible a la nominal. Se debe tener en cuenta que la deflexión de cada pilar afecta al resto de pilares adyacentes.

La Figura 5 presenta de forma gráfica las diferentes fases del proceso de instalación de los elementos metálicos de muelle en un pilar metálico de la planta baja del edificio.

Figura 5. Detalles del proceso de instalación de los muelles metálicos antivibración.



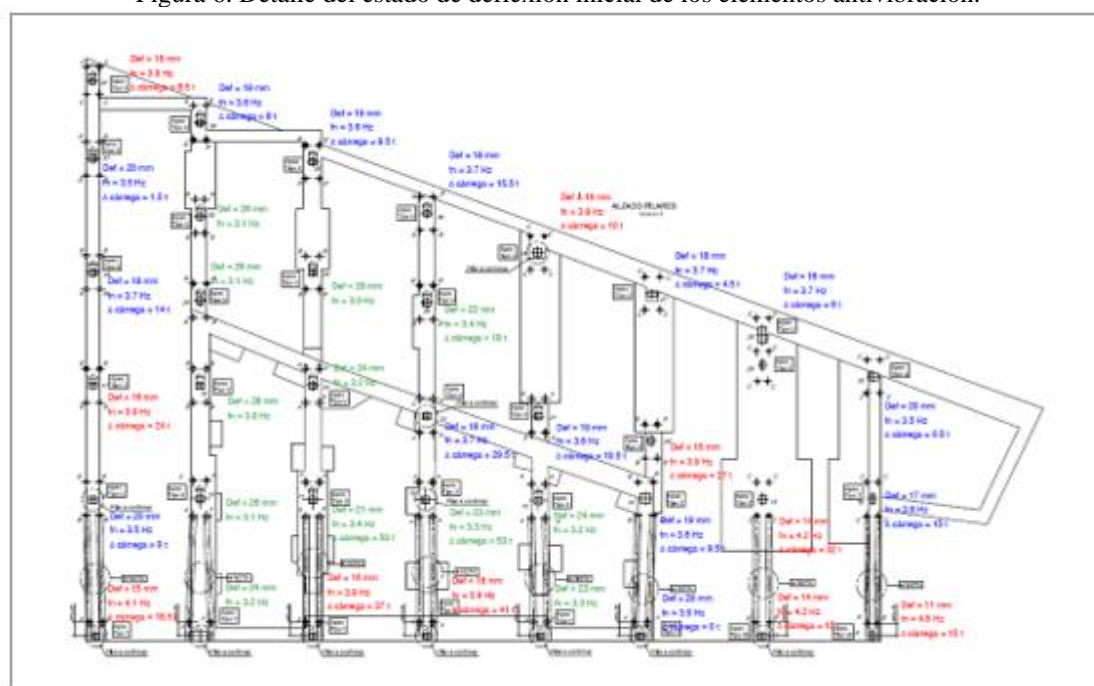
Los elementos antivibratorios no se instalan simultáneamente, por lo que a medida que avanza la obra y la instalación de los elementos antivibración se realizan medidas de seguimiento para ver la

evolución de la eficacia de la solución. Las medidas de vibración se realizan en diferentes puntos y plantas del hotel y se va comprobando la bondad de la solución.

Una vez instalados todos los elementos antivibración, se realiza un estudio de las cargas de cada pilar así como una medida de la deflexión individual de cada aislador, donde se detecta que de un total de 37 aisladores, 7 presentan una compresión inferior a 16 mm y que otros 10 aisladores presentan una deflexión entre 16 y 20 mm. El objetivo de deflexión mínima eran 20 mm, con un grado óptimo de 25 mm El límite superior de deflexión eran 35 mm, deflexión a partir de la cual los aisladores dejan de funcionar como tal, con lo que el coeficiente de seguridad es mínimo.

La Figura 6 presenta el estado de deflexión de cada antivibrador justo después de su instalación. En rojo se muestran los elementos con deflexión menor a 16 mm mientras que en azul se muestran los que presentan una deflexión entre 16 y 20 mm. Los tres aisladores de la fachada presentaban una deflexión menor a 16 mm pero no era preocupante porque aún tenían que recibir la carga de la piscina situada en la azotea.

Figura 6. Detalle del estado de deflexión inicial de los elementos antivibración.



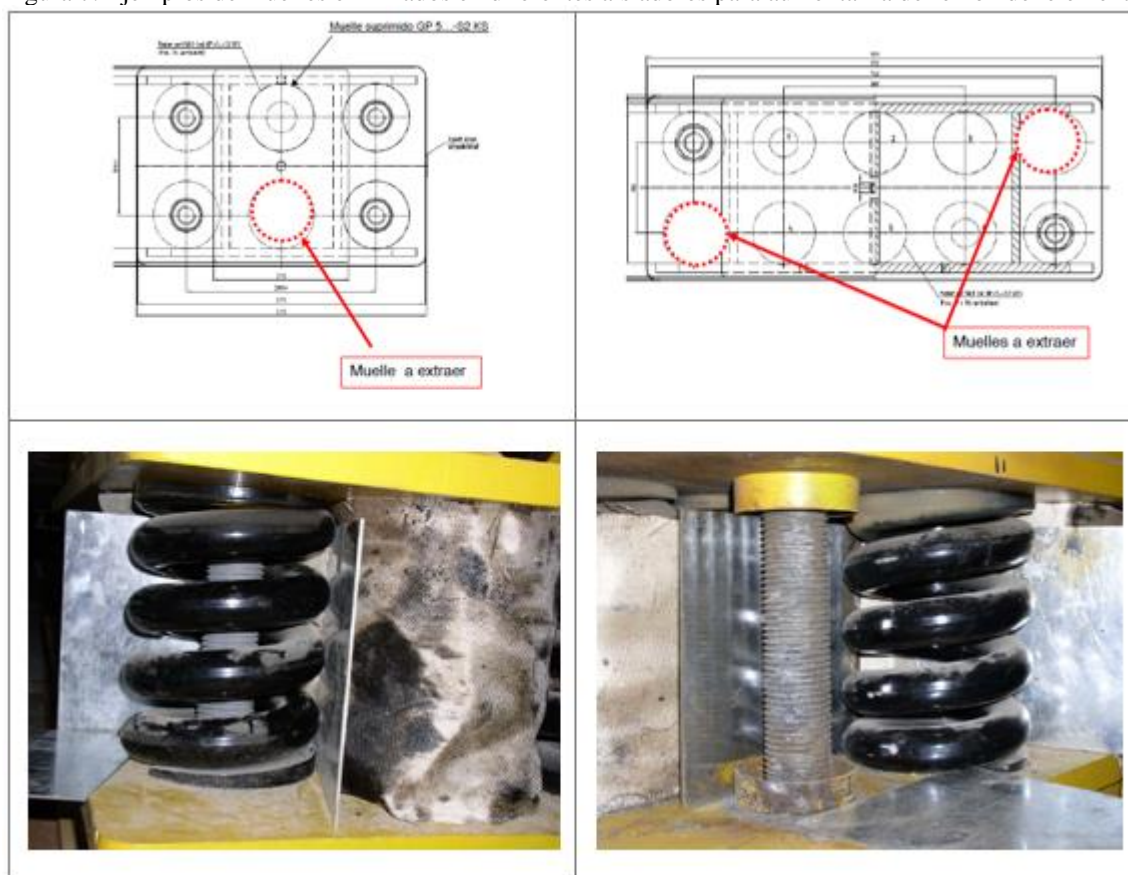
Para conseguir aumentar la deflexión de los aisladores se planteaban dos posibilidades: o bien aumentar la carga en cada aislador o bien reducir su rigidez. El aumento de la carga sobre cada aislador era inviable puesto que el aumento de carga tenía que ser del orden de toneladas, por lo que se optó por la reducción de la rigidez de los aisladores.



Para la reducción de la rigidez de los aisladores se eliminaron uno o dos muelles del paquete aislador en los siete pilares que presentaban una deflexión menor a 16 mm, de forma que para una misma carga existieran menos elementos que la sustentaran y, por tanto, se obtuviera una deflexión mayor del paquete aislador. Para ello, se estudió con GERB cuál era el muelle que se podía eliminar de cada paquete aislador para no comprometer la estabilidad del elemento. La Figura 7 presenta un par de ejemplos de aisladores en los que se eliminó algún muelle, así como imágenes del proceso de eliminación de muelles.

En los aisladores que presentaban una deflexión comprendida entre 16 y 20 mm, se añadieron galgas de forma que estos aisladores y sus adyacentes redistribuyeran sus deflexiones. Con estas dos actuaciones se consiguió llegar a niveles mínimos de deflexión en algunos aisladores y a niveles óptimos de deflexión en la mayoría de ellos, con lo que se aseguraba la eficacia de la solución de aislamiento de las vibraciones en el edificio.

Figura 7. Ejemplos de muelles eliminados en diferentes aisladores para aumentar la deflexión del elemento.



## 5 EFICACIA DE LA SOLUCIÓN

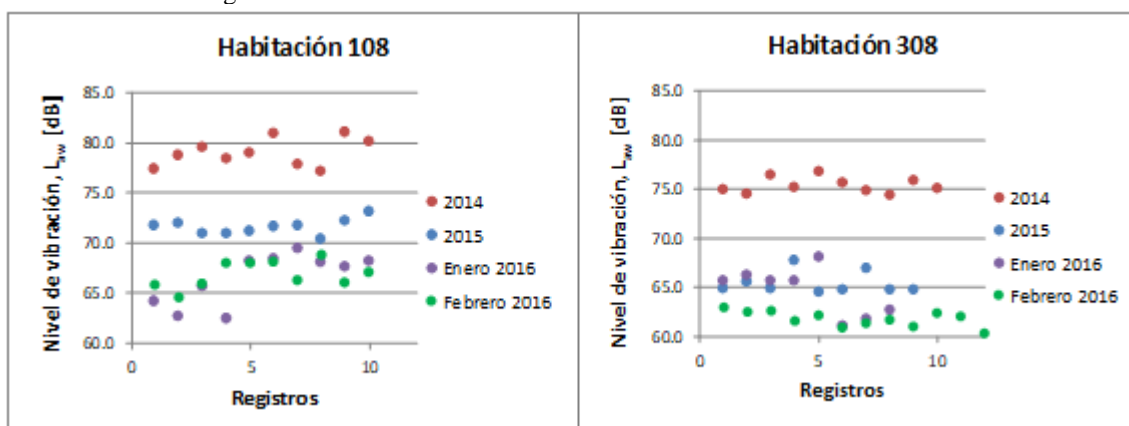
En la Figura 8 se presenta una evolución de los niveles de vibración registrados en dos puntos a lo largo de la evolución de la obra, desde el momento inicial de las obras donde el edificio aún estaba en su estado original hasta el momento en que se entrega el hotel.

Como puede verse en esta figura, los niveles de vibración iniciales en lo que posteriormente fue la habitación 108 estaban en torno a los 80 dB, mientras que en la tercera planta los niveles de vibración estaban en torno al límite del valor normativo para uso residencial ( $L_{aw} = 75$  dB).

Una vez instalados parte de los aisladores (2015), se observa una reducción importante de los niveles de vibración, del orden de 8 dB en cada una de las dos plantas monitorizadas. En enero de 2016 ya estaban todos los aisladores en carga nominal, aunque no todos presentaban la deflexión óptima, motivo por el cual en la tercera planta casi no se aprecia la mejora, aunque sí en la primera planta, donde se consigue una reducción adicional de 2.5 dB.

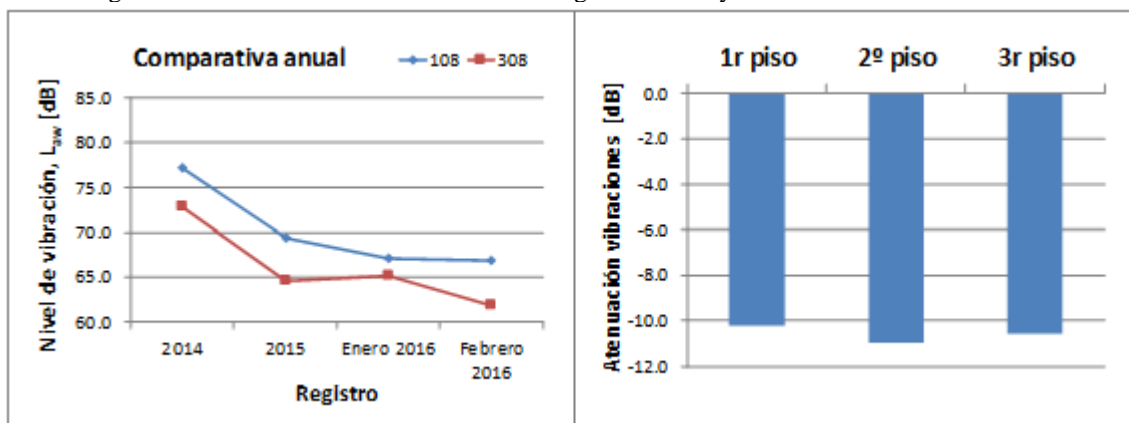
Finalmente, en febrero de 2016 se entrega la obra después de ajustar la deflexión de los aisladores tal como se ha explicado anteriormente (eliminación de muelles a adición de galgas). Con estos ajustes se consigue una reducción adicional de unos 3 dB en la planta tercera respecto a las medidas de enero del mismo año, mientras que en la planta primera la reducción media es insignificante.

Figura 8. Evolución del nivel de vibración con la evolución de la obra.



La Figura 9 presenta la evolución del nivel de vibración medio a lo largo de la evolución de la obra, donde se puede observar que el nivel medio final en el primer piso es  $L_{aw,1r\text{ piso}} = 67$  dB mientras que en el tercer piso es  $L_{aw,3r\text{ piso}} = 62$  dB. Teniendo en cuenta que el nivel de vibración objetivo era  $L_{aw} = 65$  dB y el nivel de vibración estimado en proyecto era  $L_{aw} = 66$  dB, se considera que se lograron los objetivos del proyecto.

Figura 9. Niveles de vibración medios a lo largo de la obra y eficacia final de los aisladores.



## 6 CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un caso práctico de aislamiento de un edificio destinado a hotel contra las vibraciones inducidas por una infraestructura ferroviaria soterrada que está literalmente encastada en la estructura del edificio.

Para ello se insertan unos aisladores metálicos de muelle en los pilares de planta baja mediante apeo y corte de los mismos. Para corregir la deflexión de algunos aisladores sobredimensionados se procede a la eliminación de algunos muelles de los aisladores, obteniendo unas deflexiones finales de entre 22 mm y 26 mm, que conducen a una eficacia del sistema de aislamiento en torno a los 11 dB de reducción respecto a los niveles iniciales, con lo que los niveles de vibración finales están por debajo de  $L_{aw} = 67$  dB, cumpliendo así los objetivos del proyecto.