







Monitorización y control de vibraciones en la sustitución de un forjado en nave industrial de producción

Monitoring and vibration control in the project of floor slab replacement in an industrial production building

Alejandro Bernabeu Larena^a, Manuel de la Cal Manteca^b, Javier Gómez Mateo^c y Carlos Manuel Calvo Martínez^d, Francisco Mota Toledo^e, Juan José Quintana Suárez^f

> ^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Bernabeu ingenieros. ^b Arquitecto. Máster en Estructuras. Bernabeu ingenieros. ^c Arquitecto. Ingeniero de edificación. Máster en Estructuras. Bernabeu ingenieros. d Geólogo. Geofísica consultores. e Geólogo. Geofísica consultores. e Técnico geofísico. Geofísica consultores.

RESUMEN

El complejo de la fábrica de Robert Bosch España situado en Madrid alberga una serie de naves de producción de electrónica de automóvil. La evolución de las máquinas de producción, máquinas cada vez más veloces y precisas, hace que los requerimientos para las estructuras que las albergan también aumenten. Se presenta así el diseño de un nuevo forjado en función de los requerimientos de comportamiento dinámico especificados para las estructuras de apoyo de estas máquinas. Por otro lado, se describen también las medias adoptadas para el control y monitorización de las vibraciones producidas durante el proceso de obra con el objetivo de evitar afectar al resto de la edificación.

ABSTRACT

Robert Bosch Spain factory located in Madrid houses a series of industrial production buildings for automotive electronics. The evolution of production machines, faster and more precise, increases the requirements of the structures supporting them. In this context, the design of an existing floor slab replacement is presented, in order to adapt its dynamic behaviour to the requirements of new machinery. Besides, the monitoring and vibration control measures adopted during construction to avoid affecting to the rest of the production building in use.

PALABRAS CLAVE: Dinámica estructural, control vibraciones, monitorización, renovación estructural **KEYWORDS:** Dynamic of structures, vibration control, monitoring, structural intervention.





Condicionantes del proyecto y descripción de la estructura

1.1 Condicionantes del proyecto

El proyecto consiste en la adecuación de una de las naves del complejo de la fábrica de Robert Bosch España, situado en Madrid, a las nuevas y necesidades futuras de comportamiento dinámico de las máquinas de producción de electrónica de automóvil.

La evolución de las máquinas producción industrial trae consigo una mayor demanda de requerimientos para las estructuras que las albergan. En este caso, se requirió llevar a cabo la sustitución de uno de los forjados existentes, a fin de dotarle de mayor capacidad de carga, mayor rigidez y mejores características de comportamiento dinámico.

El proyecto tiene así una serie de condicionantes propios: intervención en edificio existente, requerimientos dinámicos específicos para el nuevo forjado y necesidad de refuerzo de la estructura y cimentación existentes por el aumento de cargas. Por otra parte, el proyecto se ve condicionado por la necesidad de mantener la producción y el normal funcionamiento de la fábrica durante la obra, lo que requiere minimizar y controlar el nivel de vibraciones producidas en las distintas fases. Se define para ello un riguroso protocolo de ejecución, así como un sistema permanente de monitorización de vibraciones durante la todo el proceso.

1.2 Descripción de la estructura existente

El edificio a intervenir (1963-1964), de carácter industrial, tiene un total de tres plantas configuradas de forma escalonada.

La estructura principal consiste en una retícula de pilares metálicos de 6.66x6.66m en las dos primearas plantas, la cual pasa a una retícula de 10x20m en la planta superior. Los pilares están cimentados sobre zapatas aisladas con pozos de cimentación semiprofundos.

Sobre estos pilares se apoya un conjunto de celosías metálicas bidireccionales generando vanos de 6.66x3.33m. Estos vanos se resuelven con un forjado de viguetas metálicas y losa de H.A. no colaborante.

Por su parte, la cubierta consiste en una estructura ligera de cerchas de gran canto.

La intervención que nos ocupa consiste en la sustitución de un área de unos 40x40m del forjado superior, área situada parte sobre una zona de 2 niveles y parte sobre una zona de un único nivel.

1.3 Descripción de la estructura propuesta

De forma general, la intervención estructural consiste en la sustitución prácticamente completa de la estructura del área de forjado descrita, procediendo a la demolición del forjado existente, junto con la práctica totalidad de las cerchas de esta planta y los pilares de la planta inferior que recogen dichas cerchas. Solo se mantendrán los pilares que continúan a cubierta y las cerchas que apean pilares de cubierta.

A continuación se ejecuta un nuevo forjado, formado por nuevos pórticos metálicos de pilares y vigas mixtas tipo HEB, y por un forjado prefabricado de placas alveolares con capa de compresión de H.A. (Figura 1 y 2).

Además, los elementos de la estructura existente que se mantienen, pilares de plantas inferiores, así como la cimentación, requieren ser reforzados.



Figura 1. Nuevo forjado I.

El diseño de la estructura se plantea de tal modo que se eviten, en la medida de lo posible, los trabajos in-situ, además de buscar la mayor rapidez de ejecución. Por ello se plantean estructuras principalmente metálicas o prefabricadas.



2. Diseño dinámico del nuevo forjado

2.1 Requerimientos dinámicos del nuevo forjado

El planteamiento general a la hora de diseñar un forjado para uso industrial es generar un forjado con una frecuencia propia lo suficientemente alejada de las frecuencias de funcionamiento de las máquinas para evitar que los

comportamientos de ambos elementos entren en resonancia [1].

Sin embargo, en nuestro caso particular, el forjado deberá satisfacer nuevo requerimientos especificados para las máquinas Siemens Siplace HS-60 y S-25HM por la empresa fabricante. Estos requerimientos vienen dados a través de un documento prescripciones técnicas, el cual especifica los siguientes requisitos de rigidez V comportamiento dinámico para la estructura de apoyo [2].

2.1.1. Rigidez vertical

El documento establece los siguientes valores de rigidez para la estructura de apoyo.

Tabla 1. Requerimientos de rigidez para el forjado.

Máquina	Rigidez vertical mínima	Rigidez vertical recomendada
HS-60	1.0E8 N/m	≥1.5E8 N/m
S-25HM	$0.7 \mathrm{E8~N/m}$	≥1.5E8 N/m

2.1.2. Comportamiento dinámico

El documento establece que, cumpliendo los requisitos de rigidez, el comportamiento de las máquinas debería ser el adecuado. No obstante, recomienda los siguientes límites de velocidad de onda para una carga dinámica de 2.1kN:

- Vi < 250μm/s en cada punto en el espectro de velocidad de 1/3 de octava para el rango de frecuencias de 5 a 100Hz.
- Vmax < 1.5mm/s para el valor de Vmax en el diagrama de Tiempo-Historia.

2.2 Diseño dinámico del nuevo forjado

2.2.1. Diseño del forjado en base a los límites de rigidez

Para el diseño del nuevo forjado de cara al cumplimento de los requisitos especificados por el fabricante, en primer lugar se diseña una estructura que satisfaga los requerimientos de rigidez vertical definidos para la estructura.

La estructura planteada busca la mayor optimización posible. Así, el forjado de placas alveolares pretensadas nos otorga una estructura que no alcanza momento de fisuración. Por otro lado, las vigas mixtas suponen elementos de gran rigidez. Finalmente, la capa de compresión de 8cm aporta un adecuado comportamiento bidireccional, solidarizando el comportamiento de las placas alveolares.

De esta forma, el forjado diseñado supera en toda su superficie la rigidez mínima recomendada para las máquinas más restrictivas, 1.0E8N/m, cubriendo el valor de rigidez vertical recomendado de 1.5E8N/m en la mayor parte de la superficie del forjado, según se muestra en la Figura 3 a continuación.

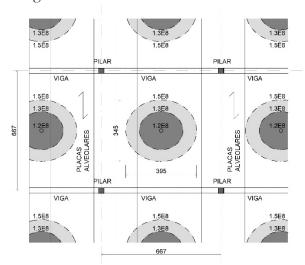


Figura 3. Isolíneas de rigidez del nuevo forjado

El valor mínimo de rigidez obtenido es de 1.2E8N/m, el cual se obtiene en el punto de centro de vano (epicentro) de cada vano de 4 pilares. Sin embargo, teniendo en cuenta las dimensiones reales de las máquinas, este valor mínimo no refleja el comportamiento real del forjado ante el trabajo de las máquinas, siendo un valor de 1.3E8N/m más representativo de la respuesta real del forjado en el área de menor rigidez.

2.2.2. Análisis dinámico del forjado

Una vez dimensionado el nuevo forjado, se realiza un análisis dinámico de la estructura consistente en un análisis estacionario en el rango de la frecuencia o análisis steady-state. De esta manera, se ha analizado el comportamiento del sistema estructural en el rango de la frecuencia indicado por el fabricante, entre 5 y 100Hz, con la carga dinámica prescrita por el mismo, Fdyn = 2.1kN; para la aplicación de esta fuerza se tienen en cuenta la configuración de la maquinaria y su apoyo en cuatro puntos distribuidos en planta, considerando su ubicación en la zona pésima del forjado (centro de vano en la malla de 6.66x6.66m indicada).

Se considera en el análisis un amortiguamiento global del sistema estructural del 2% del crítico adecuado para pequeñas vibraciones. No se considera en este análisis la interacción con los elementos constructivos no estructurales (solados, falsos techos, etc.). Se obtienen de este modo las velocidades en los apoyos en función de la frecuencia de la estructura (Figura 4).

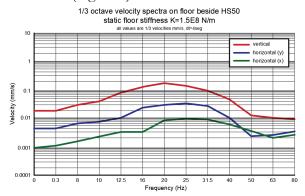


Figura 4. Resultados medidos en el apoyo de una HS-50 en un forjado con rigidez k=1.5E8N/m. Base de calibración aportada por el fabricante de la maquinaria.

Los resultados obtenidos son calibrados conforme a la documentación de prescripciones técnicas que indica el fabricante [2]. El método de calibración del análisis ha consistido en reproducir el mencionado análisis steady-state en un forjado con la rigidez de 1.5E8N/m, tal y como indica el fabricante de la maquinaria en un sistema con dicha rigidez y a una frecuencia de en torno a 20Hz para obtener la velocidad máxima, integrada en bandas de 1/3 de octava, de unos 0.20mm/s. Obtenemos de este modo un parámetro de calibración que se emplea en el análisis realizado conforme al sistema estructural de proyecto.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos aplicando una integración RMS (media cuadrática o raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados) de los valores en bandas de 20Hz (Figura 5).

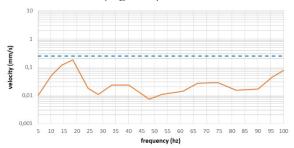


Figura 5. RMS del análisis steady-state

El máximo del espectro se sitúa alrededor de 182µm/s en el entorno de los 18.5Hz; estando el límite indicado por el fabricante en 250µm/s.

A continuación y para poder tener una aproximación al comportamiento del sistema estructural en el dominio del tiempo en vez del dominio de la frecuencia y, para poder obtener un rango aproximado del comportamiento en este dominio del tiempo para de este modo obtener el segundo requisito dinámico indicado por el fabricante, velocidad máxima en el diagrama time-history = 1.5mm/s, se realiza una transformada rápida de Fourier inversa (FFT) que nos permita transformar los datos obtenidos en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

De este modo se obtiene un valor máximo en el diagrama time-history (valor absoluto o módulo del número complejo obtenido mediante la transformada rápida de Fourier) de 1.1025mm/s; estando el límite indicado por el fabricante en 1.5mm/s.

2.3 Ensayos dinámicos sobre el forjado ejecutado

Una vez concluida la obra de ejecución del nuevo forjado se procedió a realizar una serie de ensayos encaminados a determinar la frecuencia propia y comportamiento dinámico real del mismo. De tal manera que se pueda conocer así

el comportamiento dinámico final real y, además, validar el diseño realizado.

Se describe a continuación los fundamentos teóricos y los ensayos y resultados obtenidos.

2.3.1. Fundamentos teóricos y procedimientos para el análisis dinámico del forjado

monitorización La análisis de V vibraciones consiste en el registro de los desplazamientos producidos por una excitación mecánica de las partículas que conforman una estructura, con el fin de detectar movimientos causados por fuerzas, que pueden variar de magnitud y dirección. La velocidad de vibración, denominada velocidad de partícula, es la variable más importante en el análisis dinámico de vibraciones, por ello todas las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños generados por vibraciones, utilizan la velocidad de vibración (v) como variable básica. magnitud de las deformaciones que determinado nivel de vibración genera en una también depende estructura, del comportamiento dinámico de esta, y particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en su conjunto y las de los elementos individuales). Por esto, la Frecuencia (f) de la vibración es la segunda variable básica en la evaluación dinámica de una estructura.

Especialmente importante la evaluación de las vibraciones en tres direcciones ortogonales, a fin de observar asimetría de radiación, propiedades de los diferentes tipos de ondas generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas. La obtención de la frecuencia de resonancia o respuesta se obtiene mediante la Transformada de Fourier para cada una de las componentes adquiridas con el fin de determinar en las tres direcciones ortogonales el pico que represente esta frecuencia.

Para este estudio se han empleado seis sensores triaxiales. (3 canales ortogonales de registro por sensor) de alta sensibilidad, capaces de registrar en un rango de frecuencias comprendido entre 0,1Hz y 1.000Hz, posicionados y orientados sobre elementos estructurales previamente seleccionados (Figura 6), según indica las normas de aplicación [3] y [4].

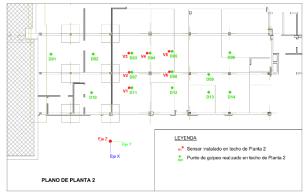


Figura 6. Posición sensores triaxiales y puntos de golpeo para el análisis de respuesta del nuevo forjado.

Una vez instalados los sensores se han llevado a cabo diferentes mediciones sobre la estructura:

- Medición en modo pasivo sobre la estructura, para la obtención de su frecuencia natural o de resonancia.
- Medición en modo activo, efectuando golpeos a diferentes distancias de los sensores, induciendo diferentes frecuencias de respuesta sobre los sensores, con el objetivo de determinar la atenuación energética de la estructura, amortiguación de energía inducida y el coeficiente de amortiguación de la misma.

2.3.2. Resultados del ensayo dinámico sobre el forjado ejecutado.

A partir del registro continuo de señal sobre la estructura en reposo, se han procesado y analizado las señales adquiridas con el objetivo de calcular el espectro de frecuencias representativo de cada uno de los sensores. En los espectros de frecuencia se ha observado la existencia de una serie de picos dominantes de mayor amplitud que se corresponderían con las frecuencias naturales o de resonancia de la estructura (Figura 7).

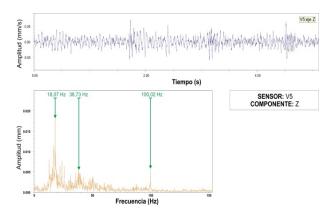


Figura 7. Registro en el eje Z de uno de los sensores y el espectro de frecuencia resultante.

El promedio de frecuencias de naturales (fn) de cada uno de los tres picos observados en los espectros de frecuencia son los siguientes:

Pico observado	Frecuencia (Hz)
fn_1	20,12
fn_2	43,13
fn_3	100,04

Mediante la realización de golpeos en diferentes puntos de la estructura, se han generado frecuencias de entre 500 y 750Hz, con una respuesta de la estructura de velocidad pico de partícula de entre 0,36 y 17,38mm/s, según distancia de golpeo a cada sensor.

Representando los valores de velocidad de partícula y la distancia sensor/golpeo correspondiente se obtiene el gráfico de la Figura 3, en el que se define la curva resultante de la regresión lineal de la nube de puntos obtenida en la representación, cuya ecuación se relaciona con la Ley de atenuación para la estructura (Figura 8).

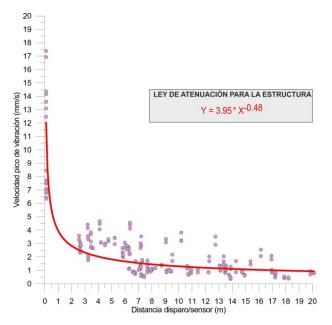


Figura 8. Nube de puntos y curva de ajuste obtenida, cuya ecuación representa la ley de atenuación.

Para definir la ley de amortiguamiento de una estructura, se registra la respuesta de la estructura en el tiempo que genera una vibración de una frecuencia determinada. Por tanto se define la ley de amortiguamiento como la curva de ajuste de la nube de puntos generada al representar el movimiento de partícula obtenido a cada tiempo posterior a la generación de vibración (Figura 9).

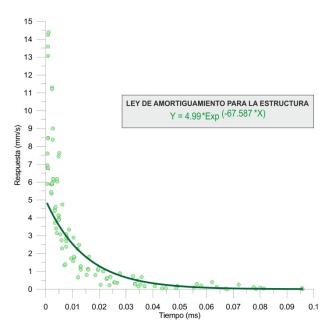


Figura 9. Nube de puntos y curva de ajuste obtenida, cuya ecuación representa la ley de amortiguamiento.

Para la obtención de la ecuación de equilibrio dinámico de la estructura, es necesario calcular el coeficiente de amortiguamiento, el cual se obtiene de forma experimental a partir de la frecuencia de respuesta de las vibraciones inducidas en la estructura mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{fb - fa}{2fn} \tag{1}$$

Donde:

E, es el coeficiente de amortiguación.

fn, es la frecuencia de resonancia calculada sobre la curva experimental.

fayfb, son las frecuencias forzadas a cada lado de fn, donde la amplitud es a razón de $1/\sqrt{2}$ veces la amplitud resonante.

El valor promedio del coeficiente de amortiguación calculado para el sistema es de 3,9%. Este valor correspondería a un coeficiente bajo, recomendado para determinadas estructuras especiales [3].

3. Proceso constructivo y control de vibraciones

En paralelo a los requerimientos dinámicos del forjado, el diseño y proceso constructivo del nuevo forjado viene condicionado por la necesidad de controlar la trasmisión de vibraciones generadas por los trabajos de obra al resto de la fábrica.

Para ello se establece un protocolo de ejecución en el que se adoptan las medidas necesarias para impedir que las vibraciones derivadas de este trabajo puedan afectar al resto de la planta, de manera que esta pueda mantener su normal funcionamiento.

Se han consideran las siguientes medidas específicas para evitar la transmisión de vibraciones:

- Estructura planteada, pilares y vigas metálicas y forjado prefabricado, que permite

reducir las operaciones de ejecución in situ y el tiempo de ejecución.

- Aislamiento de la zona a demoler del resto de la nave mediante la apertura de juntas estructurales, que independizan la zona a intervenir de la estructura de las zonas colindantes.
- Instalación de sistemas de medición de vibraciones, que permitan alertar de un eventual aumento de las vibraciones durante el proceso de obra.

Además, el plan de obra se organiza en función a dos momentos de parada de producción de la factoría, al principio y al final de la obra. En estos momentos se ejecutarán los trabajos más delicados de cara a la transmisión de vibraciones: apertura y cierre de juntas, demolición del forjado y ejecución del recalce de cimentación mediante micropilotes en las zapatas perimetrales.

Se detallan a continuación los planteamientos descritos para el control de vibraciones.

3.1 Aislamiento de la zona a intervenir del resto de la nave

La principal intervención para evitar la propagación de vibraciones producidos por los trabajos en obra es la de generar una serie juntas estructurales en todo el perímetro de la zona a intervenir en los dos niveles de forjado.

Estas juntas se realizaron coincidiendo con la primera parada de producción y, dichas juntas, se ejecutaron mediante corte del forjado con disco diamantado a ambos lados de la junta y retirada de tramos de forjado entre cortes para minimizar la generación vibraciones.

Por otro lado, para la ejecución de estas juntas, fue necesario la ejecución de un sistema de arriostramiento y apuntalamiento provisional que asegurase la estabilidad de los elementos estructurales durante las fases de obra. Estos sistemas de arriostramiento y apuntalamiento provisional se mantuvieron hasta la completa ejecución del nuevo forjado, incluyendo el

cerrado de la junta estructural. Finalmente, el cierre de juntas se ejecutó coincidiendo con el segundo paro de producción, aunque en este caso las intervenciones a realizar no suponían una generación de vibraciones elevadas.

3.2 Monitorización y control de vibraciones durante la fase de obra

Paralelamente a todo el proceso de obra de sustitución del forjado, se realizó una monitorización continua de las vibraciones generadas por los trabajos de demolición, a fin de controlar los posibles efectos sobre el resto de las estructuras no retiradas así como la integridad de los trabajos en los espacios aledaños de la propia factoría. La base teorica en la que se fundamente este análisis se describe en el apartado "2.3.1. Fundamentos teóricos y procedimientos para el análisis dinámico del forjado".

Para realizar la monitorización se instalaron sensores triaxiales (Figura 10). específicos en las zonas limitrofes a la estructura a retirar (Figura 11). Las vibraciones producidas por los trabajos de demolición son registrados por sismógrafos característicos, los cuales son conectados de forma remota con el fin de poder evaluar en cualquier momento y sin necesidad de estar presente en la obra, los eventos que pudiesen significar un riesgo tanto para la estructura, como para las labores industriales.



Figura 10. Sensor triaxial colocado en la cara inferior de la zona de forjado a mantener.

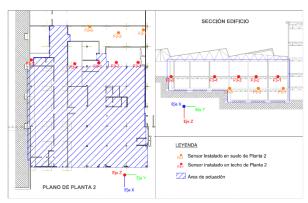


Figura 11. Posición sensores triaxiales Para la monitorización de vibraciones del forjado mantenido.

3.2.1. Estimación de los límites vibratorios aceptables.

El primer paso de la monitorización de vibraciones tiene como fin el determinar los límites máximos de vibraciones a partir de los cuales estos eventos puedan suponer un riesgo tanto para el edificio, como para los trabajos de la fábrica que seguirán en paralelo a las obras de desmantelación.

Para conocer el estado vibratorio de base en las instalaciones, se realiza una medida continua de las vibraciones durante 48 horas en ausencia de cualquier otros trabajos que no sean los propios de las instalaciones. Esto nos permite conocer el estado básico vibratorio de funcionamiento de la fábrica, las velocidades de particula y la frecuencia a la que se producen.

Según los datos obtenidos durante el tiempo de registro, los eventos de velocidad máxima de partícula no superaron los 2mm/s, a diferentes frecuencias. normalmente comprendidas entre los 10 y 100Hz, siendo los eventos de bajas frecuencias (< 10Hz), de bajas velocidades y muy poco frecuentes. Por lo que se definieron dos límites, solo en función de la velocidad de particula, un primer nivel de alarma si los eventos superasen los 2mm/s, que se registrarían y analizarían para la realización de un posterior informe, y otro nivel de alarma a 3mm/s, que se supondría pudiese afectar a la producción de la fábrica, y que debería de ser avisado en tiempo real, mediante un sistema de alarmas automatizado remoto.

En cuanto al riesgo estructural producido por los trabajos de retirada del forjado, nos basamos en las normativas de aplicación para este tipo de estudios [3] y [4]. Según la normativa los límites admisibles dependen tanto de la velocidad de particula de cada evento y su frecuencia, como al tipo de edificación afectada (Figura 12).

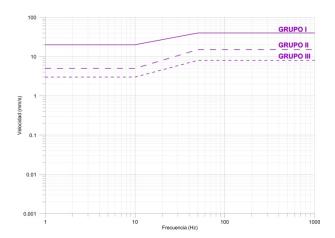


Figura 12. Gráfico de límites en función del tipo de edificación según la norma DIN 4150-3.

Donde:		
Grupo	Tipo de edificación	
I	Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos	
II	Edificaciones residenciales y construcciones similares	
III	Otras edificaciones que por su particular sensibilidad a las vibraciones no son incluidas en los anteriores	

3.2.2. Resultados de la monitorización continua de vibraciones.

Durante los trabajos de derribo y retirada del forjado, se observa un aumento importante de eventos de mayor velocidad de particula y a una frecuencia más baja, aunque solo en ciertos casos excepcionales de manera muy puntual se superaron los límites establecidos. En estos casos se ejecutó el protocolo de alarma para paralizar las obras de demolición, investigar la fuente de vibración y proponer un plan de

mitigación para la ejecución de los trabajos de mayor impacto.

El resto de eventos registrados, se recopilaron y representaron a fin de servir de indicativo de posibles afecciones sobre los elementos en fabricación en el momento de producirse dichos eventos (Figura 13).

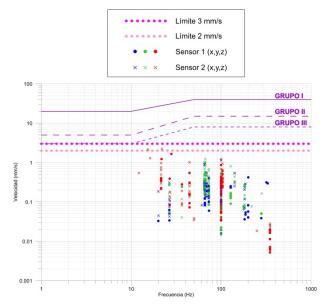


Figura 13. Registro de eventos de dos sensores sobre el gráfico de niveles de vibraciones admitidas.

4. Conclusiones

La evolución de las máquinas de producción, cada vez más veloces y precisas, hace que los requerimientos de las estructuras que los soportan sean mayores, en especial en términos dinámicos y de control de vibraciones. La adaptación a estos nuevos requisitos requiere la intervención en estructuras existentes de edificios de carácter industrial que, además, suelen requerir la realización de la intervención manteniendo la producción en el resto de las áreas del edificio, no directamente afectadas.

La intervencón de sustitución de un forjado existente llevada a cabo en la fábrica de Robert Bosch España supone un ejemplo interesante de esta situación, que ha requerido la consideración y aplicación de planteamientos de diseño y procedimientos de ejecución

específicos, en términos de intervención en estructuras existentes, análisis dinámico, control de vibraciones, y monitorización durante la ejecución de la obra.

Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de Facilities Maintenance FCM de Robert Bosch España su apoyo y colaboración en la preparación del presente artículo, así como su labor de gestión y organización del proyecto y ejecución de la obra.

Nuestro reconocimiento y agradecimiento así mismo a ON, arquitectos responsables del proyecto de sustitución del forjado, y de la coordinación del mismo.

Referencias

- [1] Asociación Científico-técnica del hormigón Estructural, Problemas de vibraciones en estructuras, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- [2] Siemens Dematic AG, Prerequisites for the Set-up Site. Condition on the Floor SIPLACE, Version 1.6.
- [3] ISO 4866 (1990-08-01) de Vibración de edificios (Directrices de medida de vibraciones y evaluación de sus efectos en edificios.
- [4] DIN 4150-3 (1993) de Vibración Estructural (Efectos de vibraciones en estructuras).
- [5] N.M. Newmark and W.J. Hall, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif. 1982.