

## INSTRUMENTACIÓN DINÁMICA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

**V. Alegre<sup>1</sup>, X. Alegret<sup>2</sup>, Jaume Terzán<sup>3</sup>**

- 1 COTCA. Director Técnico. Profesor Asociado de la U.P.C.
- 2 COTCA. Director del Departamento de Estudios
- 3 COTCA. Director del Laboratorio acreditado en hormigón armado

### RESUMEN

La tendencia creciente de los últimos años a la conservación de edificios ha provocado un incremento importante de los proyectos de rehabilitación de construcciones ya existentes.

Sobre un edificio a rehabilitar con estructura metálica y forjados de vigueta metálica y revoltón cerámico, se ha procedido a establecer una metodología y realizar una campaña de ensayos dinámicos con objeto de validar la estructura desde el punto de vista de rigidez y de vibraciones estudiando la influencia o colaboración de los distintos subsistemas estructurales a la rigidez total de la estructura. Se han realizado modelos de comportamiento para avanzar en el conocimiento del grado de empotramiento real de los nudos de los forjados, y se han realizado una campaña de ensayos dinámicos "in situ" para validar la metodología de obtener los grados de empotramiento en cada caso.

### SUMMARY

The increasing tendency of the last years to the conservation of buildings has caused an important increase of the projects of rehabilitation of existing constructions.

On a building to rehabilitate with metallic structure and floors of metallic joist and intermediate curve ceramic element, it has been come to establish a methodology and to make a campaign of dynamic tests with object to validate the structure from the point of view of stiffness and vibrations studying the influence or contribution of the different structural subsystems to the total stiffness of the structure. Behavior models have been made to advance in the knowledge of the real degree of clamping of the floor's joints, and they have been made a campaign of dynamic tests "in situ" to validate the methodology to receive the ranks of clamping for each case.

## INTRODUCCIÓN

La inspección mediante ensayos dinámicos, basada en la lectura de la respuesta que presentan las estructuras al vibrar de manera libre o forzada, ha crecido de manera importante los últimos años gracias a la capacidad de este tipo de ensayos para facilitar información geométrica y mecánica de las estructuras así como detectar en algunos casos sus posibles daños o patologías. En este artículo se describe la aplicación a un caso práctico de una campaña de ensayos dinámicos destinados a obtener información sobre los forjados de un edificio singular. La construcción objeto del estudio es uno de los dos módulos que forman el edificio conocido como “Laboratorios Uriach” de Barcelona. Actualmente el edificio se encuentra en desuso y se pretende rehabilitar para convertirlo en un edificio de oficinas manteniendo la estructura del edificio si es posible. En el pasado, la construcción albergaba unos laboratorios farmacéuticos.

Los objetivos básicos que se persiguen en el estudio son:

-Propuesta de metodología y realización de una campaña de ensayos dinámicos encaminada a la determinación y captura del valor de la frecuencia del segundo modo de vibración de los forjados en obra a partir de diversas situaciones con y sin apuntalamiento.

-Elaboración de distintos modelos de cálculo por ordenador que simulen las situaciones estudiadas en los ensayos dinámicos para validar y comparar las mediciones obtenidas en obra con los resultados de los cálculos teóricos.

-Valoración de la rigidez real del forjado y en especial del grado de empotramiento real de los forjados en sus extremos que posteriormente permita cuantificar el incremento de rigidez de los forjados respecto a la rigidez del perfil metálico debido a la colaboración de elementos secundarios del forjado como el relleno y el revoltón.

-Paralelamente, lo estudiado servirá para ver el comportamiento dinámico propiamente dicho de los forjados del edificio desde el punto de vista psicológico, valorando la incidencia de las vibraciones de los forjados debidas a las acciones habituales en un edificio de oficinas (personas andando), recomendando si es necesario las correspondientes medidas correctoras.

## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS FORJADOS

La estructura del módulo objeto del estudio está formada por siete pórticos transversales de acero laminado de un solo vano de 8.8 m de luz y tres alturas. Estos pórticos principales se distribuyen de manera equidistante a lo largo del edificio separándose entre ellos 6,55 m. Los pilares que forman parte de estos pórticos están compuestos por pares de perfiles de la serie UPN unidos mediante presillas. Los forjados están formados por viguetas de acero laminado del tipo IPN 80 soldados a las jácenas secundarias (IPN 280), perpendiculares y enrasadas por la parte superior de éstas (Figura 1). Las viguetas están separadas 80 cm y el intereje está resuelto con revoltones cerámicos, no existiendo capa de compresión en la parte superior pero si un relleno de material heterogéneo (hormigón pobre o similar) (Figura 2).

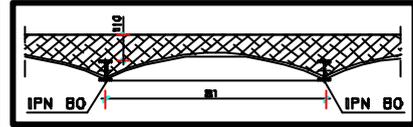
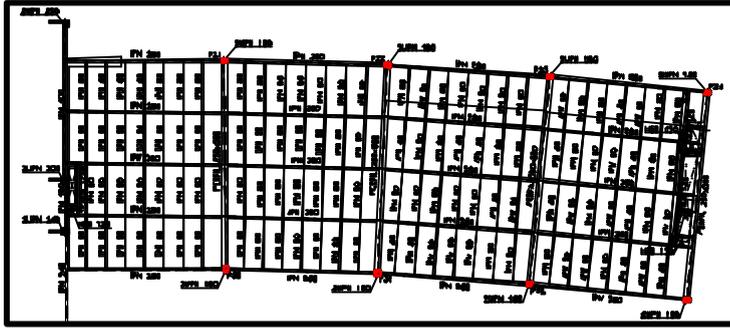


Figura 2: Sección del forjado [elaboración propia].

Figura 1: Esquema estructural de la planta tipo [elaboración propia].

## METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

Los ensayos dinámicos consisten en el registro de curvas aceleración-tiempo obtenidas mediante excitación de una persona (golpe de tacón [1], o persona en tránsito) que permiten estimar frecuencias asociadas a modos de vibración y parámetros tales como aceleración, velocidad o desplazamiento en puntos del forjado. Se han concentrado las mediciones de las frecuencias propias de oscilación en los tramos 2 y 5 del forjado del techo de planta baja del edificio. En el momento de la realización de las mediciones, el edificio se encontraba liberado del pavimento y la tabiquería originarias de la construcción, quedando la estructura metálica principal y los forjados. El elemento fundamentalmente estudiado es la jácena metálica IPN 280 de 6,55 m de luz, con un intereje de 2,2 m y una inercia de  $7590 \text{ cm}^4$ .



Foto 1: Estado del edificio en el momento de la realización de los ensayos [elaboración propia].

Se han planteado dos situaciones de apuntalamiento del forjado con los forjados inferiores y superiores. En una primera fase (F1) se han realizado las mediciones con objeto de determinar las frecuencias propias de vibración en el punto medio de los perfiles IPN 280 del forjado, apuntalando las dos jácenas principales (puntales PJ) que delimitan cada vano de la estructura del forjado de planta primera. El apuntalamiento se ha efectuado mediante tres puntales en cada uno de los puntos de entrega de las IPN 280 del forjado a la jácena principal tal como se muestra en el esquema de la figura 3.

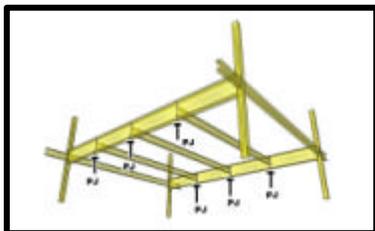


Figura 3: Disposición de puntales en la fase 1 (F1) [elaboración propia].

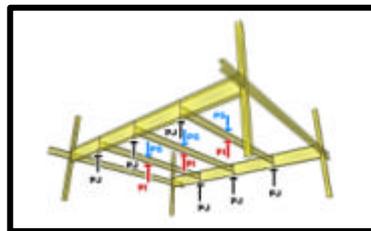


Figura 4: Disposición de puntales en la fase 2 (F2) [elaboración propia].

La colocación de apuntalamientos en las jácenas armadas se realiza para poder valorar las frecuencias propias de vibración de las jácenas IPN 280 que forman el forjado sin recibir interferencias de los modos propios de vibración de las jácenas principales. En una segunda fase (F2) se ha realizado un sistema de apuntalamiento más de la zona. En este caso, para fijar el movimiento del punto medio del forjado, se han colocado un puntal superior (puntales PS) y un puntal inferior (puntales PI) en los puntos medios de las tres IPN 280 tal como se muestra en la figura 4. En este caso, las mediciones se han realizado en los dos cuartos de la luz del vano del forjado. Con el apuntalamiento de los puntos medios de los perfiles IPN 280 o lo que es lo mismo, los puntos medios del forjado se pretende forzar al forjado a vibrar siguiendo la deformada de su segundo modo de vibración que mantiene fijo su punto medio, para poder a partir de la medición del supuesto segundo modo teórico valorar el grado de empotramiento de los perfiles a las jácenas principales.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la primera fase (F1) del estudio. En este caso, los elementos ensayados son forjados ensayados en sus puntos medios (PM).

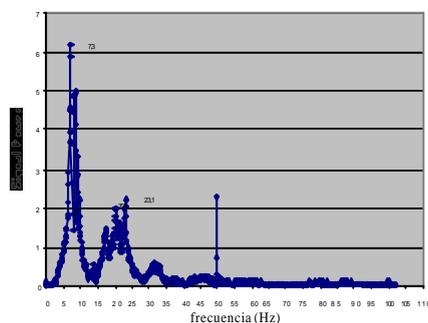
Referencia	Planta	Elemento	Frecuencia (Hz)	Aceleración (g)
F1-02	Planta 1 <sup>a</sup>	Forjado (PM)	7,3	0,100
F1-05	Planta 1 <sup>a</sup>	Forjado (PM)	7,6	0,125

Tabla 1: Resultados de los ensayos en la fase F1 [elaboración propia]

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la segunda fase (F2) del estudio. En este caso, los elementos ensayados son forjados ensayados en los cuartos de su luz (CL).

Referencia	Planta	Elemento	Frecuencia (Hz)	Aceleración (g)
F2-02c	Planta 1 <sup>a</sup>	Forjado (CL)	15,7	0,104
F2-05c	Planta 1 <sup>a</sup>	Forjado (CL)	15,7	0,083

Tabla 2: Resultados de los ensayos en la fase F2 [elaboración propia]



Gráfica 1: Espectrograma obtenido del ensayo [elaboración propia].



Gráfica 2: Gráfica Aceleración-tiempo ( $a(t)$ ) obtenida del ensayo [elaboración propia].

## MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para la modelización del comportamiento de los perfiles IPN 280 de los forjados se ha considerado solamente el perfil IPN280 central del forjado considerando el peso propio de los perfiles metálicos así como el peso del revoltón y el relleno de los senos. Para este estado de carga se han considerado los dos casos extremos de condiciones de contorno: biapoyado y biempotrado. Se han estudiado también los resultados considerando la presencia de un puntal inferior y otro superior en el centro de la luz del perfil IPN280 (figura 4), valorando igualmente el caso biapoyado y el biempotrado. Como se ha indicado anteriormente, la valoración o estimación del grado de empotramiento real de los forjados de la estructura es uno de los objetivos que se persiguen, por lo que a partir de los dos extremos posibles de condiciones de contorno para las vigas IPN 280 del forjado (casos biapoyado y biempotrado), se ha realizado un barrido (obtención de puntos intermedios) entre estos dos extremos para obtener como varían algunas determinadas variables en función del grado de empotramiento. Es decir, se ha realizado un estudio de la sensibilidad de determinados parámetros al grado de empotramiento. La variación de estas variables se refleja en unas gráficas que se muestran en el siguiente apartado “Resultados de la modelización”. Las variables que aparecen en las gráficas del barrido son la primera frecuencia de vibración ( $f_1$ ), la segunda frecuencia de vibración ( $f_2$ ), el cociente entre ambas ( $f_2/f_1$ ), la primera frecuencia de vibración normalizada ( $f_{1n}$ ) y la segunda frecuencia de vibración normalizada ( $f_{2n}$ ), entendiendo como frecuencia normalizada la misma que adopta Araiza [4],

$$f_{in} = \frac{f_i}{f_i(\text{art})} \times 100 \quad (1)$$

donde  $f_{in}$  es la frecuencia normalizada,  $f_i$  es la frecuencia de vibración del modo  $i$  para unas condiciones de contorno cualquiera simétricas (condiciones intermedias entre el caso biapoyado y el biempotrado) y  $f_i(\text{art})$  es la frecuencia de vibración del modo  $i$  para el caso biapoyado. El grado de empotramiento se ha definido como porcentaje (%) del momento de empotramiento de una viga biempotrada ( $p^2/12$ ). La inercia considerada en todos los modelos para este caso es solamente la de la viga IPN 280, puesto que posteriormente si se determina el grado de empotramiento real del forjado, se podrá valorar la contribución del resto del forjado (revoltón y relleno) y del pavimento a la rigidez total de la forjado.

## RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN

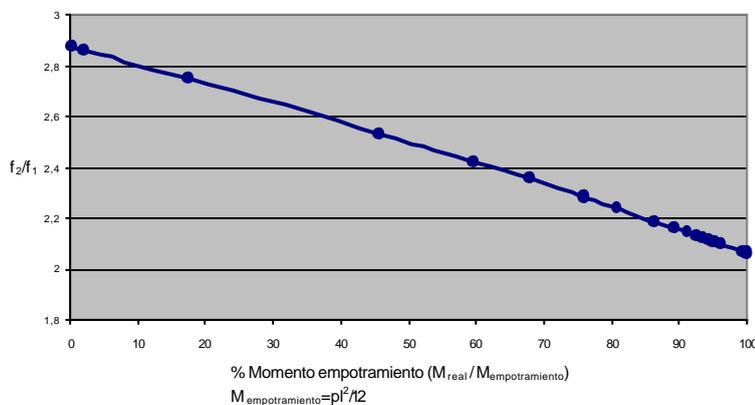


Figura 5: Variación del cociente  $f_2/f_1$  en función del % del Momento de empotramiento teórico para el modelo de viga IPN 280 [elaboración propia].

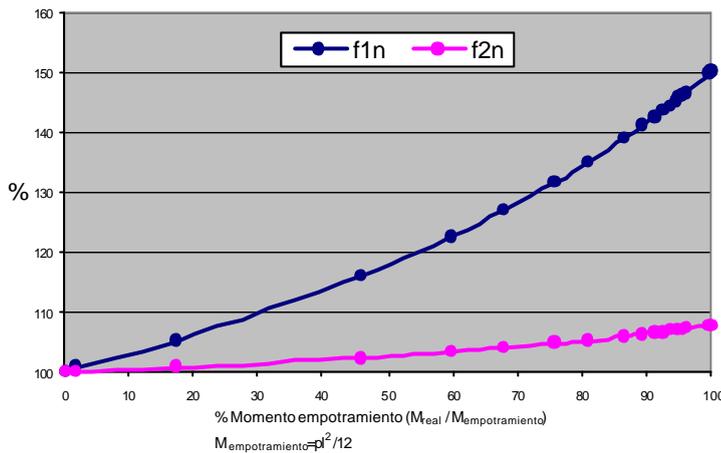


Figura 6: Variación de las frecuencias normalizadas  $f_{2n}$  y  $f_{1n}$  en función del Grado de empotramiento para el modelo de viga IPN 280 [elaboración propia].

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para ambos vanos del forjado de planta primera la relación entre las dos primeras frecuencias obtenidas en los ensayos (la primera frecuencia es la obtenida en la Fase F1 y la segunda frecuencia es la obtenida en la Fase F2) oscilan entre 2.15 y 2.06. A partir de los dos valores obtenidos para el cociente entre frecuencias podemos hallar el grado de empotramiento expresado como el % del momento de empotramiento utilizando la gráfica obtenida en el apartado de modelización para el perfil IPN 280. Para el valor del cociente de las frecuencias 2.15 se obtiene un valor del 91.5% del momento de empotramiento, mientras que para la relación entre frecuencias 2.06 obtenemos un 99.0% del momento de empotramiento (ver figura 7).

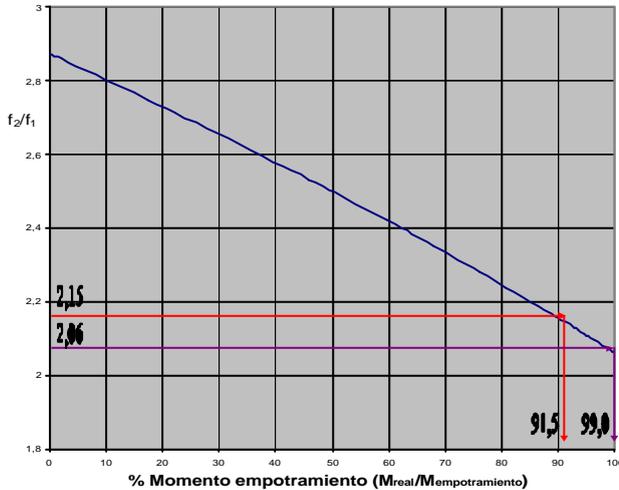


Figura 7: Obtención del % del Momento de empotramiento a partir del cociente  $f_2/f_1$ . [elaboración propia]

Eliminando revoltones, las medidas de las frecuencias 1ª y 2ª fueron 14.7 Hz y 31.9 Hz, resultado la relación  $f_2/f_1 = 2.17$  parecida. Con el valor del momento de empotramiento obtenido de la figura 7, hallamos el valor de la  $f_{1n}$  (frecuencia primera normalizada) utilizando la gráfica obtenida en el apartado de la modelización que relaciona las frecuencias 1ª y 2ª normalizadas en función del grado de empotramiento expresado como el % del momento de empotramiento (ver figura 8). Para el 91.5% del momento de empotramiento obtenemos una frecuencia normalizada  $f_{1n}$  de 142 mientras que para el 99.0% la frecuencia normalizada  $f_{1n}$  vale 149.

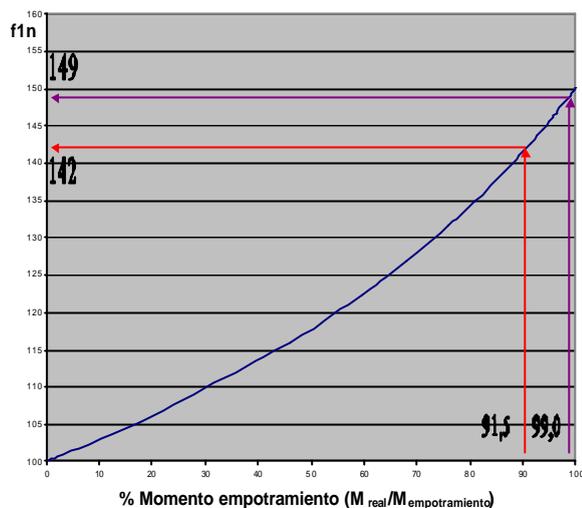


Figura 8: Obtención del valor de la 1ª frecuencia propia normalizadas a partir del % del Momento de empotramiento. [elaboración propia]

A partir de la expresión (1) y conociendo el valor de la frecuencia para el caso biapoyado 5.36 Hz podemos obtener la primera frecuencia teórica para cada caso.

Para los resultados experimentales resulta:

$$f_1 = \frac{f_{1n} \times f_1(\text{art})}{100} = \frac{142 \times 5.36}{100} = 7.61 \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{f_{1n} \times f_1(\text{art})}{100} = \frac{149 \times 5.36}{100} = 7.98 \quad (3)$$

Los valores obtenidos en las expresiones (2) y (3) son las 1ª frecuencias teóricas que deberían medirse en los ensayos de los forjados puesto que se han obtenido a partir del grado de empotramiento real de éstos, pero recordando que para la obtención de los valores teóricos se ha considerado exclusivamente la rigidez de los perfiles metálicos del forjado (IPN 280) sin contar con colaboración alguna del relleno y el revoltón. De esta manera, la única diferencia que debería existir entre los valores de las expresiones (2) y (3) y los obtenidos en los ensayos F1-02 y F1-05 se debe a la posible variación de la rigidez. A partir de la comparación de los valores de las frecuencias de los ensayos con los obtenidos en este proceso podremos estimar la variación de la rigidez real respecto a la teórica ya que las frecuencias son función de la inversa del cuadrado de la rigidez [1].

frecuencia $f_1$ medida en ensayo (Hz)	frecuencia $f_1$ teórica (Hz)	? rigidez (%)
7.3	7.61	- 8.6%
7.6	7.98	- 10%

Tabla 5: Valores para la estimación de la variación de la rigidez en el forjado del vano-02. [elaboración propia]

El análisis de la tabla 5 y 6 proporciona información acerca de los posibles incrementos de rigidez real de los forjados. En este caso la aportación puede considerarse prácticamente nula.

## CONCLUSIONES

-Se ha reafirmado la validez de los ensayos dinámicos como herramienta importante dentro del marco de ensayos no destructivos (E.N.D.) para la obtención de datos referentes a la estructura de forma rápida, cómoda y repetitiva en la inspección de edificios existentes en los proyectos de rehabilitación.

-Dada la influencia de un gran número de factores en los parámetros que definen el comportamiento dinámico de las estructuras, resulta imprescindible el estudio mediante los modelos de cálculo de la sensibilidad de los parámetros dinámicos (frecuencias, cocientes entre frecuencias, amplitudes...) a ciertas variables (masa, grado de empotramiento, presencia de puntales...) para obtener información que permita una correcta interpretación de las mediciones realizadas en los ensayos.

-Con el objetivo de forzar a los forjados a oscilar siguiendo la configuración de su segundo modo de vibración se ha procedido a apuntalar-los en su punto central. Los resultados obtenidos en los ensayos y en la modelización para las fases con puntales inferiores o con puntales inferiores y superiores son muy similares por lo que se deduce que para capturar el segundo modo de vibración es suficiente con el apuntalamiento exclusivamente inferior.

-A partir de los resultados de las frecuencias medidas en los ensayos conjuntamente con las gráficas obtenidas en la modelización que relacionan el cociente entre las frecuencias de los dos primeros modos de vibración ( $f_2/f_1$ ) y de las dos primeras frecuencias de vibración normalizadas ( $f_{1n}$  y  $f_{2n}$ ) con el grado de empotramiento, se ha valorado el grado de empotramiento real del forjado metálico tipo. Como resultado se obtiene una horquilla de valores para el grado de empotramiento entre el 91 y el 99 %.

-A partir del valor del grado de empotramiento real obtenido para el forjado metálico, considerando su longitud, masa por unidad de longitud y características del perfil metálico IPN 280 se ha estimado un incremento real de rigidez a flexión del forjado prácticamente nula al contrario de lo que ocurre con los forjados del mismo tipo apoyados en fábrica de ladrillo, en los que el revoltón colabora hasta un 30% [3] en aumentar la rigidez a flexión.

## AGRADECIMIENTOS

A Taller d'Arquitectes Col·laboradors y en especial a Eduardo Gascón y Vicente Galiana por las facilidades dadas para la toma de datos y la obtención de información.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bachmann, H. et al. Problemas de vibraciones en estructuras. *Recomendaciones y manuales técnicos E-8*. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. 1991.
- [2] Araiza, J.C. *Dynamic assessment of structural building components*. Tesis doctoral ETSECCPB-UPC, 2003.
- [3] Alegre, V. et al. La instrumentación dinámica en el estudio de daños de forjados unidireccionales de viga metálica y revoltón cerámico "CON-PAT 97". Porto Alegre. Brasil.