

## ENSAYOS DINÁMICOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

**V. Alegre<sup>1</sup>, J. Terzán<sup>2</sup>, V. Ródenas<sup>3</sup>**

- 1 COTCA. Director Técnico. Miembro de la Red Rehabilitar. Profesor Asociado de la U.P.C
- 2 CONTROL TÉCNICO CATALÁN. Director de Laboratorio. C/. Altimira. Barberá del Vallés.
- 3 COTCA. Director del Departamento de Patologías. C/. Tuset, 8 5ª planta. Barcelona 08006

### RESUMEN:

Los ensayos dinámicos sobre estructuras permiten realizar valoraciones de su rigidez real (merma caso de estar dañada, incremento caso que se refuerce y evolución temporal), y estudiar problemas de vibraciones inducidas por el hombre, maquinaria u otros agentes externos.

Se presenta un caso práctico de aplicación de los ensayos dinámicos en el refuerzo de una estructura lineal (losa de escalera), que manifiesta un comportamiento dinámico deficiente.

Para abordar el problema se realiza un estudio teórico-experimental mediante simulación asistida por ordenador en un modelo de cálculo realizado por el método de elementos finitos, así como una campaña de ensayos dinámicos “in situ”.

El estudio permite obtener valores teóricos y experimentales de rigidez de los tramos ensayados, y una opinión sobre el comportamiento estrictamente dinámico de la estructura frente a acciones inducidas por el paso de personas en referencia a los criterios de aceptación existentes.

### SUMMARY

Dynamic tests on structures allow to make valuations on their real stiffness (a decreased valuation if the structure is damaged, an increased valuation if reinforced and temporary evolution) and to study any trouble with vibrations caused by men, machinery or any other external agent.

This is a case study about the application of dynamic tests in the reinforcement of a lineal structure (a stairs slab) which was found to be very lively (deficient dynamic behaviour).

To solve the problem, it was done a theoretic-experimental study through a computer-assisted simulation together with a dynamic tests campaign “in situ”.

This work allows to obtain theoretical and experimental values of the stiffness of the tested spans, and an explanation on the strictly dynamic behaviour of the structure when there are man-induced vibrations, with reference to the existing overall acceptance criteria.

## **INTRODUCCIÓN**

Los ensayos dinámicos son una herramienta útil tanto para medir la rigidez real de una estructura como para analizar comportamientos dinámicos deficientes, y proponer soluciones de reparación, constatando la bondad de las mismas.

Estimación de rigidez.

Una de las principales aplicaciones de los ensayos dinámicos es la valoración de la rigidez real de un elemento estructural.

A partir de la estimación de rigidez realizada basada en la medida de frecuencias propias de vibración de un elemento estructural se puede ajustar la previsión del comportamiento deformacional de un elemento.

La estimación experimental de rigidez obtenida a partir de los ensayos dinámicos constituye un dato válido por sí mismo, no obstante, de ser posible, habitualmente se compara con la obtenida en ensayos de prueba de carga estática y con la obtenida teóricamente en un modelo de cálculo, permitiendo así el ajuste de este último y la posibilidad de plantear actuaciones de refuerzo o rehabilitación a partir de la respuesta real de la estructura.

Análisis de comportamiento dinámico.

Se engloba en este tipo de ensayos aquellos destinados a valorar los niveles de vibración en estructuras inducidos por personas, maquinaria u otros agentes.

El progreso en este campo está en evolución continua, y se van normalizando con restricciones más estudiadas para cada caso en concreto y la puesta en práctica de sus contenidos. A medio plazo debe aumentar la obligatoriedad de realización de pruebas de carga de tipo dinámico y el estudio de fenómenos de este tipo, ineludible por la normativa básica, pero con observaciones aún a nivel muy recomendativo.

En este apartado es de especial interés la medida de parámetros tales como frecuencias de los distintos modos de vibración, aceleración (desplazamiento en ocasiones) y amortiguamiento. El trabajo experimental se complementa con el contraste a través de un modelo teórico de cálculo, que permite extrapolar otras situaciones posibles.

Para estudiar su campo de aplicación como herramienta de apoyo técnico, se plantea el caso de una losa de escalera con disfunciones dinámicas y de deformabilidad.

## **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA LINEAL ESTUDIADA**

Se trata de la escalera central de un edificio universitario en Sabadell (provincia de Barcelona). La escalera consta de varios tramos independientes. La estructura es una losa de hormigón. El tramo central (el mayor) es de 10 m de luz. El ancho de la escalera es de 2,5 m

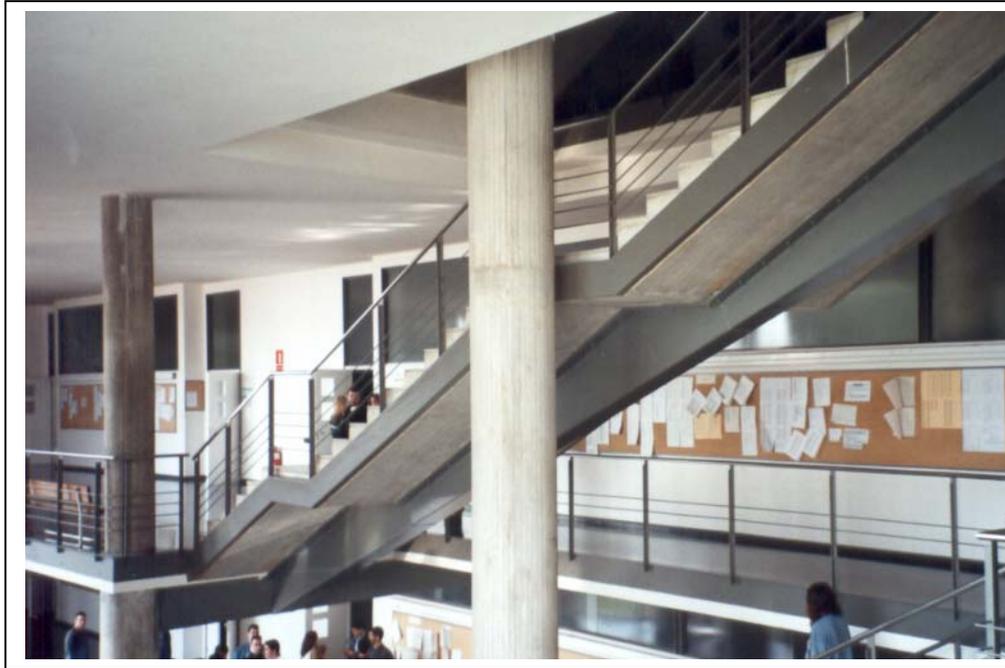


Figura 1. Vista general del tramo central

Después de la inauguración del edificio (figura 1) y del paso de los primeros viandantes, se observa un movimiento vibratorio en el tramo central que preocupa a los entes implicados de la obra.

Un esquema de la misma se adjunta (Figura 2)

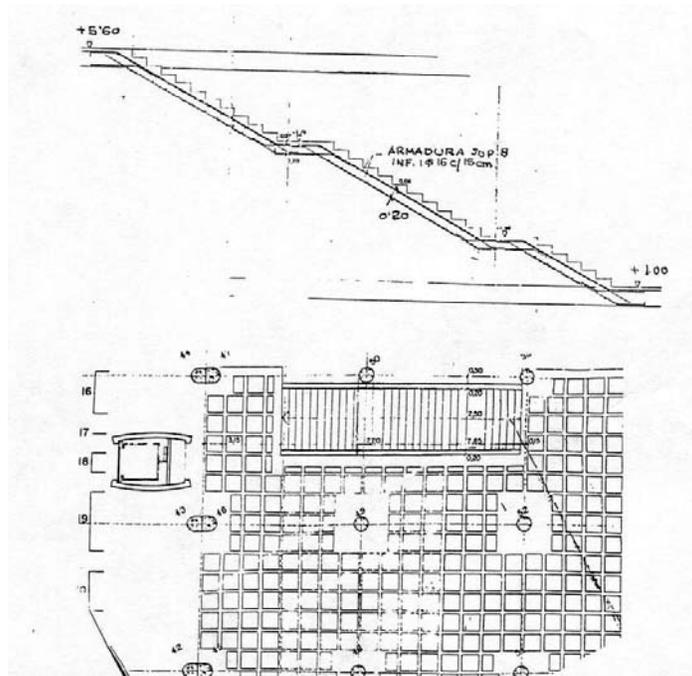


Figura 2. Planta y alzado de la losa de escalera.

## ANÁLISIS DE LA DISFUNCIÓN

### Modelización teórica

Recopilada la documentación existente (planos, ensayos de materiales, ..) y realizada la toma de datos “in situ”, se define la geometría, se constata que no hay daños y se elabora un modelo de elementos finitos tridimensional (Figura 3) que permite una primera evaluación teórica del problema. Para el cálculo de la estructura en su estado inicial y posteriormente con el refuerzo se ha realizado un análisis espacial. Se ha empleado el programa de análisis de estructuras por elementos finitos “SAP90”, utilizando elementos FRAME 3D, formando las barras los elementos que definen la estructura. La estructura se discretiza en barras y nudos de dimensión finita, de acuerdo con sus características geométricas y mecánicas. En dicho modelo se aprecia la existencia de un modo de vibración con una frecuencia de 3,7 Hz (flexión vertical). Asimismo la previsión de flecha estática para la carga total resulta 5,12 cm (1/195 de la luz)

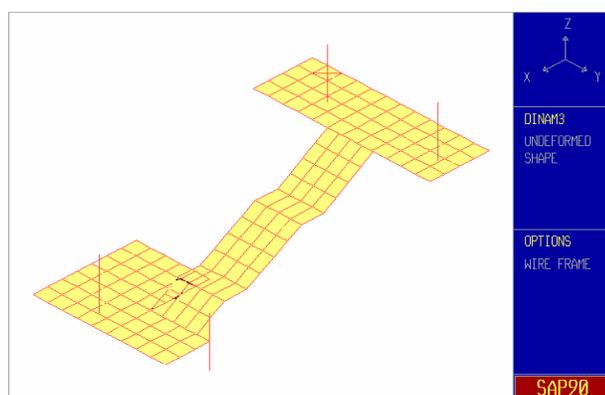


Figura 3. Modelo tridimensional de elementos finitos

En el resto de tramos estudiados, de menor luz resultan frecuencias superiores a 6,6 Hz y flecha superior a 1/500 de la luz.

La bibliografía <sup>(1)</sup> existente en la actualidad recomienda que para la dirección vertical deben evitarse las frecuencias naturales de vibración comprendidas entre 1,6 y 2,4 Hz y comprendidas entre 3,5 y 4,5 Hz.

Se constata a priori por tanto una situación inicial de posible riesgo de aparición de problemas dinámicos en el tramo central, así como de la existencia de problemas deformacionales a nivel teórico.

### Ensayos dinámicos

Se realizó una campaña de ensayos dinámicos, que incluía la excitación de los tramos mediante salto de personas y el registro de señales aceleración/tiempo frente al paso de personas subiendo y bajando las escaleras a diferentes velocidades de paso. En dicha campaña se obtuvieron los siguientes resultados:

	Medido	Recomendación o Normativa	
		< 3,5	> 4,5
Frecuencia propia vibración primer modo	3,77 Hz	< 3,5	> 4,5
Aceleración máxima una persona andando	0,02 g		
Aceleración máxima una persona corriendo a 3,7 HZ	0,14 g	> 0,1 g	
Amortiguamiento crítico	0,5%		

Tabla 1. Ensayos dinámicos sobre la estructura inicial

Como datos más significativos (Tabla 1) destacan:

a) la coincidencia de comportamiento entre el modelo teórico y la estructura real (similitud de frecuencias obtenidas), por lo que se validan las previsiones deformacionales previstas.

b) que el rango de frecuencias de excitación detectado para personas subiendo y bajando escaleras está comprendido entre 2,7 y 4,4 Hz, siendo dicho rango superior al considerado habitualmente para personas andando o corriendo en llano, y que presenta una clara coincidencia con la frecuencia propia de la estructura medida en vacío.

La coincidencia de frecuencia de excitación y frecuencia propias, así como la magnitud de las aceleraciones medidas recomiendan continuar profundizando en el estudio del problema.

### Ajuste del modelo teórico

Dada la coincidencia entre frecuencias teóricas y experimentales no se realiza ninguna modificación que pudiera alterar la rigidez del modelo de cálculo.

El trabajo se limitó a la comprobación de resultados expresados por las variables aceleración, velocidad y desplazamiento de puntos significativos de la estructura, obtenidos mediante simulación numérica al introducir solicitaciones equiparables a los movimientos de andar y correr. Dichas solicitaciones se han modelizado recurriendo a las funciones temporales de contacto continuo con el suelo y contacto discontinuo (half-sine-model con  $f=3,7$  Hz y  $t_p=0,25$ ).

Contacto continuo

$$F_p(t) = G + ?G_1 \cdot \text{sen}(2?f_s t) + ?G_2 \text{sen}(4?f_s t - f_2) + ?G_3 \cdot \text{sen}(6?f_s t - f_3)$$

Contacto discontinuo  $F_p(t) = G_1 + \sum_{n=0}^{\infty} ?G_n \cos[2? \cdot n f_s (t - \frac{t_p}{2n})]$

siendo:      G      ? peso de una persona (generalmente G = 800 N)  
?G<sub>i</sub>      ? amplitud del armónico i  
f<sub>s</sub>      ? velocidad de paso  
f<sub>i</sub>      ? fase angular del armónico i en relación al primer armónico  
t<sub>p</sub>      ? duración del contacto  
n      ? número del armónico enésimo

Una vez comprobada la coincidencia entre los valores experimentales y los del modelo teórico, se realiza una estimación del comportamiento de la escalera para un flujo más elevado de transeúntes y otras situaciones más desfavorables.

Como situación más desfavorable se toma la correspondiente a varias personas desplazándose con una frecuencia igual a la de resonancia. Varias personas significa 1,5 persona/m<sup>2</sup> de un peso de 80 Kg (120 Kg/m<sup>2</sup>), para un flujo máximo de  $\lambda = 1.5$  personas/s.m (utilizando la fórmula de Matsumoto con una distribución de Poisson para la llegada de personas a la pasarela), estimándose el factor multiplicador  $m = \sqrt{\lambda * T}$ . Para  $m_{\min} = 2$ , que equivaldría a dos personas marchando en paso y reproduce el movimiento no sincronizado de grupos de personas resulta una aceleración del orden de 0,28 g.

## Diagnosis

El justificar la posible existencia de aceleraciones del orden de 0,28g, incumple con las prescripciones del compendio de criterios habituales de aceptación estructurales y psicológicos para el uso a que la escalera está destinada (limitación a valores inferiores a 0,1 g según <sup>(1)</sup>).

La validación experimental de las estimaciones deformacionales (valores de flecha con carga total superiores a 1/200 de la luz), a través de las estimaciones de rigidez dinámicas efectuadas inducen a elevar el ratio  $f/l$  por encima de 1/300 a 1/400 de acuerdo a la Normativa vigente.

Se recomendó por tanto el diseño de una solución que limitara dichos valores por debajo de los valores propuestos.

## SOLUCIÓN DE REFUERZO

A la vista de la situación existente se plantean como soluciones posibles la rigidización (aumentar la rigidez desde 5 kN/mm<sup>2</sup> hasta valores por encima de 8 kN/mm<sup>2</sup> o hasta conseguir una frecuencia propia de al menos 5 Hz), incrementar el amortiguamiento mediante dispositivos en apoyos, cambios en el pavimentado, etc o incorporar dispositivos de absorción de vibraciones.(TMD) (suspensión en torno al 1% de la masa en un sistema muelle amortiguador).

La solución adoptada consistió básicamente en la rigidización del sistema hasta lograr una rigidez del orden del doble. Dicha rigidización fue llevada a cabo añadiendo un nervio metálico al eje longitudinal de la escalera, unido a la losa mediante resina y tacos (Figura 4) de modo que su comportamiento se asemejara al de una estructura mixta.

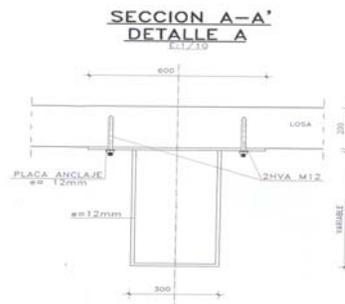


Figura 4. Detalle refuerzo estructura

Dicha solución prevaleció frente a la de crear uniones entre todos los tramos de escalera por las dificultades de previsión de comportamiento teórico del conjunto, y frente a la de adoptar dispositivos de absorción (TMD), por el mayor coste que planteaba la dicha solución (un 60 % más cara en el estudio presupuestario).

El modelo teórico se modificó convenientemente implementando los nuevos elementos, hasta justificar una rigidez del orden del doble que la inicial.

## COMPROBACIÓN DEL REFUERZO

### Ensayos dinámicos

Una vez realizado el refuerzo de la estructura se procedió a realizar una nueva campaña de ensayos dinámicos, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 2, Figura 5 y Figura 6):

	Sin reforzar	Con refuerzo
Frecuencia propia vibración primer modo	3,77	5,33 Hz
Aceleración máxima una persona corriendo a 3,7 HZ	0,14	0,04 g
Amortiguamiento crítico	0,5	0,25%

Tabla 2: Resultados de ensayos antes y después de reforzar.

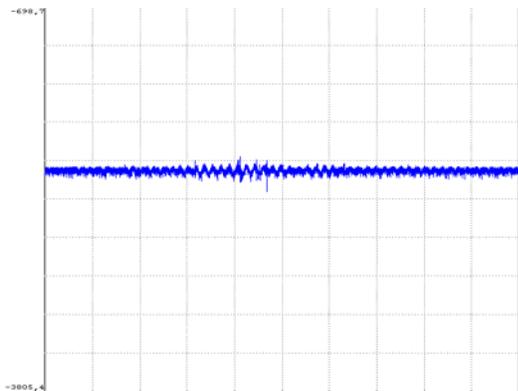


Figura 5. Gráfico aceleración/tiempo una persona corriendo (reforzado)

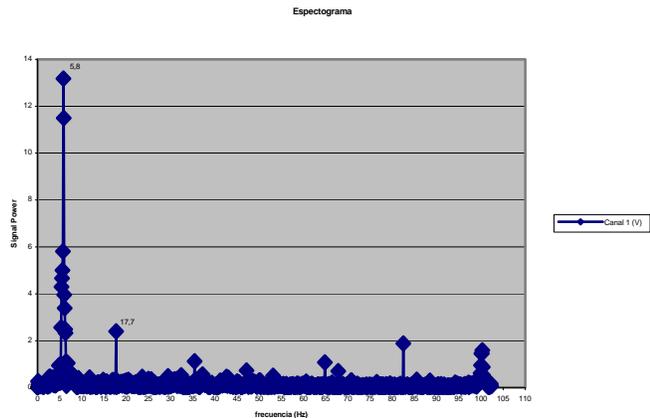


Figura 6. Espectrograma de frecuencias tramo central

A la vista de los mismos destaca el aumento del valor de la frecuencia del primer modo propio de vibración hasta por encima de 5 Hz y la disminución de los valores de aceleración respecto a la primera campaña de ensayos.

También es de notar la disminución del amortiguamiento acorde con el tipo de estructura, que pasa de un valor propio de una estructura de hormigón armado 0,5% <sup>(2)</sup> ( a un valor más propio de una estructura mixta 0,25% <sup>(3)</sup>).

### Análisis teórico

Mediante un proceso análogo al de la primera fase se ajusta la modelización teórica a partir

de los resultados experimentales.

Se realiza una previsión del comportamiento deformacional, estimado una flecha para la carga total de 2,48 cm (1/400 de la luz)) que resulta acorde con la Normativa vigente.

A partir de este estudio teórico y de forma análoga a la fase previa, se estiman los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración máximos debidos a una situación de máxima afluencia de personas corriendo (subiendo o bajando deprisa) la escalera. De dicho estudio se estima un valor del orden de 0,08g como aceleración máxima resultante.

Ahora los valores resultantes son inferiores a los prescritos por los criterios de aceptación habituales <sup>(4)</sup>.

## CONCLUSIONES

- Los ensayos dinámicos permiten valorar por un lado rigideces reales de las estructuras, y por otro efectuar valoraciones de comportamiento estrictamente dinámico frente a excitaciones inducidas por personas, maquinaria u otros agentes.

- Se expone un caso práctico de diagnosis de un problema estructural de tipo dinámico y deformacional con ayuda de ensayos dinámicos, en el que se plantea una solución mediante rigidización (se aumenta la rigidez de una losa al doble), con objeto de respetar por un lado, los límites preconizados por la normativa referentes al estado límite de servicio relativo a deformaciones, y por otro los recomendados por el compendio de criterios de aceptación habituales relativos a efectos de vibraciones en estructuras y sobre los usuarios de la misma.

- Con este documento se pretende remarcar que respetando unos criterios básicos, que por supuesto debería reflejar con más énfasis la normativa de todos los países, muchas veces podrían solucionarse estos problemas, y mejor aún, detectarlos o predecirlos en fases anteriores al proceso constructivo.

## Agradecimientos

Se agradece al Arquitecto autor del proyecto Sr. D. Jordi Fabré y a la Universidad Autónoma de Bellaterra las facilidades dadas para la toma de datos y la obtención de información.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) - Hugo Bachmann, Walter Ammann. Vibrations in Structures Indiced by Man and Machines IABSE. 1.987
- (2) - Norma EHE “Instrucción de Hormigón Estructural”. M.F. 1.998
- (3) - Eurocódigo 4 “Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero”
- (4) - Standard DIN 4150. Standart SN 640312, Directive KDT 046/72, Draft ISO/DIS Directive VDI 205 7. BRE Digest 278, BS 5400, BS6472, NCB Canada Comentary A, Regulations SBA, relativas a vibraciones en estructura.