

# ENSAYOS DINÁMICOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS - SOLUCIONES A PROBLEMAS DINÁMICOS MEDIANTE RIGIDIZACIÓN

*Jaume Terzán Grau*

*Ingeniero Industrial*

## SUMARIO

- Los ensayos dinámicos sobre estructuras permiten por un lado realizar valoraciones de la rigidez real de las mismas (su merma caso de estar dañada, su incremento caso que se refuerce y su evolución en el tiempo), y por otro estudiar problemas de vibraciones inducidas por el hombre, maquinaria u otros agentes externos.
- En este trabajo se presenta un caso práctico de aplicación de los ensayos dinámicos a una estructura lineal (losas de escalera de varios tramos), en la que se manifiesta a priori un comportamiento dinámico deficiente.

# INTRODUCCION

## Estimación de rigidez:

- Valoración de la rigidez real de un elemento estructural.
- Permite el ajuste del comportamiento deformacional.
- Basada en la medida de frecuencias propias de vibración.
- Comparable con la obtenida en ensayos de prueba de carga estáticos y con la teórica del modelo de cálculo.
- Útiles para clasificar tramos de forjado en función de su rigidez antes de la pruebas estáticas o de su estudio teórico.
- Permiten valorar mermas de rigidez en casos de estructuras dañadas y valorar atribuciones de rigidez a la colaboración de diferentes factores posibles (pavimento, empotramientos, aligerantes, ornamentos, etc).

## Análisis de comportamiento dinámico (I):

- Ensayos destinados a valorar los niveles de vibración en estructuras inducidos por personas, maquinaria u otros agentes externos.
- Estudios de tipo estrictamente dinámico
- Campo abierto en constante evolución:
  - progresiva adaptación de los procedimientos de medida a la normativa internacional y nacional que va apareciendo.
  - aumento de la causística de casos estudiadas, tanto a nivel de criterios estructurales de criterios psicológicos.
  - aparición de nueva documentación, con restricciones más estudiadas para cada caso en concreto y con rápida puesta en práctica de sus contenidos.

## Análisis de comportamiento dinámico (II)

-aumento de la obligatoriedad de realización de pruebas de carga de tipo dinámico y del estudio de fenómenos de este tipo, contempladas actualmente por la normativa básica, pero con restricciones aún sólo de de tipo recomendativo.

- Es de especial interés la medida de parámetros tales como frecuencias de los distintos modos de vibración, aceleración (desplazamiento en ocasiones) y el amortiguamiento.
- El trabajo experimental se complementa habitualmente con el contraste a través de un modelo teórico de cálculo.

## Otras aplicaciones.

- Valoración de tensiones en elementos traccionados como cables, platabandas y armaduras de acero (cuerda vibrante).
- Valoración de influencia de condiciones de contorno.
- Valoración de tensiones en elementos comprimidos (paredes, columnas).

# CASO PRACTICO: ESCALERA PEATONAL

## Descripción del problema.

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



amj14



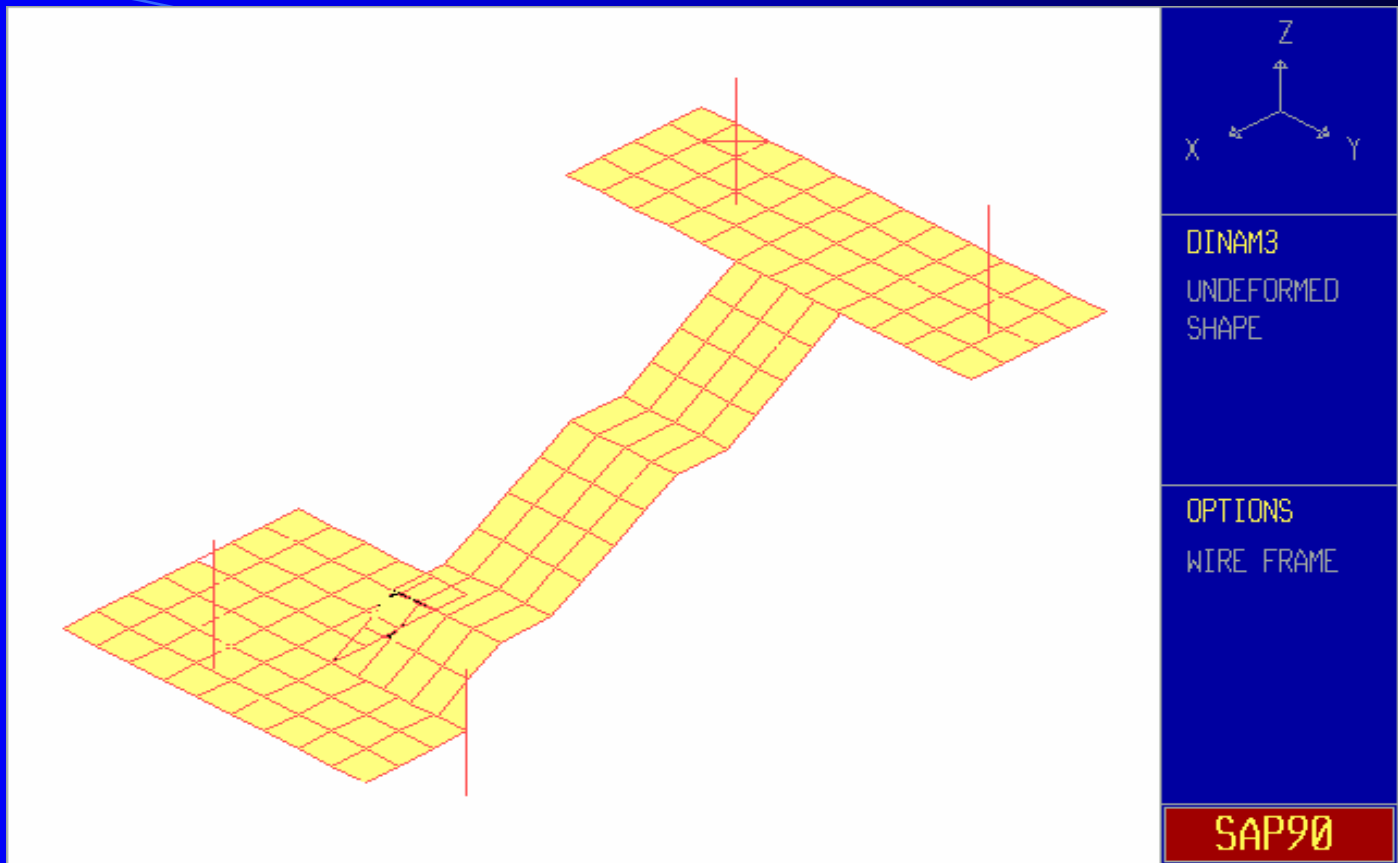
## Estudio y solución del problema.

### Documentación y toma de datos

Fase de recopilación de documentación (planos, memorias, ensayos materiales, etc) y de toma de datos “in situ” (geometría, disposición de armaduras, patología, etc).

## Modelización teórica inicial

- Modelo de cálculo de elementos finitos tridimensional con tratamiento informático que permite una primera evaluación del problema.
- En el tramo largo se aprecia la existencia de un modo de vibración con una frecuencia de 3,7 Hz (flexión vertical), En el resto de tramos estudiados, de menor luz, resultan frecuencias superiores a 6,6 Hz.
- La bibliografía existente en la actualidad recomienda que en las pasarelas peatonales (se toma la escalera como una variante de pasarela peatonal) 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. The British load specifications for Bridges, a modo general recomienda evitar las frecuencias fundamentales inferiores a 5 Hz para la estructura sin cargas vivas.



- Se constata a priori por tanto una situación inicial de posible riesgo de aparición de problemas dinámicos en el tramo central, así como valores de rigidez escasos bajo el punto de vista deformacional.

## Primera campaña de ensayos

Frecuencia propia vibración primer modo	<b>3,77 Hz</b>
Aceleración máxima una persona andando	<b>0,02 g</b>
Aceleración máxima una persona corriendo a 3,7 Hz	<b>0,14 g</b>
Amortiguamiento crítico	<b>0,5%</b>

- Coincidencia de comportamiento entre el modelo teórico y la estructura real (similitud de frecuencias obtenidas)
- Rango de frecuencias de excitación detectado para personas subiendo y bajando escaleras comprendido entre 2,7 y 4,4 Hz,.
- 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

- La coincidencia entre frecuencias teóricas y experimentales permite mantener los parámetros iniciales del modelo de cálculo.
- Comprobación de las variables aceleración, velocidad y desplazamiento de puntos significativos, obtenidos mediante simulación numérica de solicitaciones equiparables a los movimientos de andar y correr. (funciones temporales de contacto continuo con el suelo y contacto discontinuo).
- Como situación más desfavorable se toma la correspondiente a varias personas desplazándose con una frecuencia igual a la de resonancia. (1,5 persona/m<sup>2</sup> de un peso de 80 Kg (120 Kg/m<sup>2</sup>), flujo máximo  $\lambda = 1.5$  personas/s.m. Matsumoto: factor multiplicador  $m = \text{SQRT}(\lambda * T)$ . 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 recomendaciones Prof.Hugo Bachmann).
- Se recomendó por tanto el diseño de una solución que limitara dichos valores por debajo de los valores propuestos.

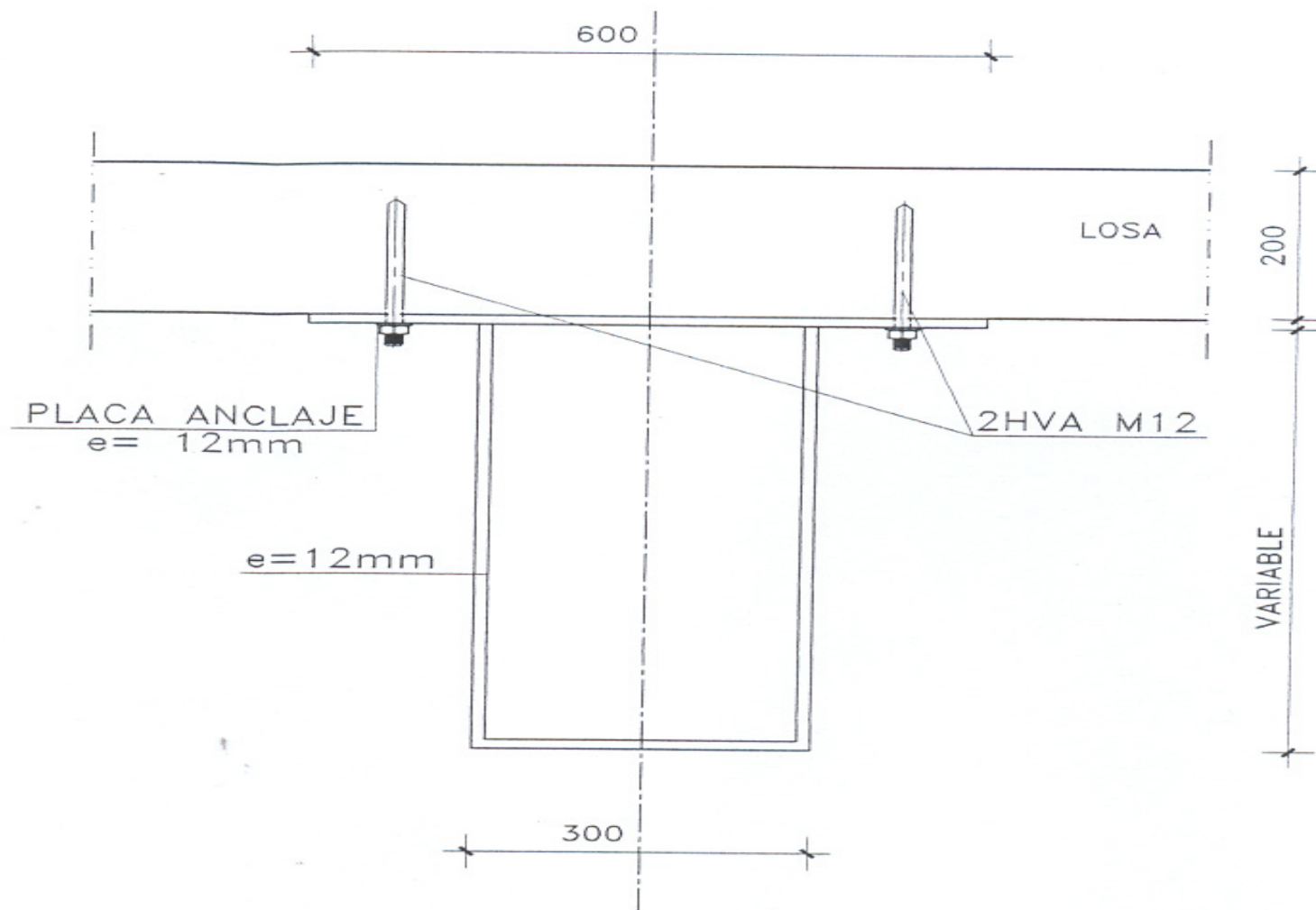
## Diseño de la solución de refuerzo

- Posibles soluciones: la rigidización (aumentar la rigidez desde 5 kN/mm hasta 8 kN/mm o hasta conseguir una frecuencia propia de al menos 5 Hz), incremento del amortiguamiento (cambios en apoyos, en el pavimentado, etc) o incorporación de dispositivos de absorción de vibraciones.(TMD) (suspensión 1% de la masa en un sistema muelle amortiguador).
- Solución adoptada: rigidización mediante adición de un nervio metálico al eje longitudinal de la escalera, unido a la losa mediante resina y tacos (estructura mixta).
- Soluciones desestimadas: creación de uniones entre tramos de escalera por las dificultad de previsión del comportamiento del conjunto, y la adopción de un TMD, por su mayor coste (un 60 % más cara). Solución debía ser del agrado de la D.F.
- El modelo teórico se modificó implementando los nuevos elementos, hasta justificar una rigidez del orden del doble que la inicial.

# SECCION A-A'

## DETALLE A

E:1/10

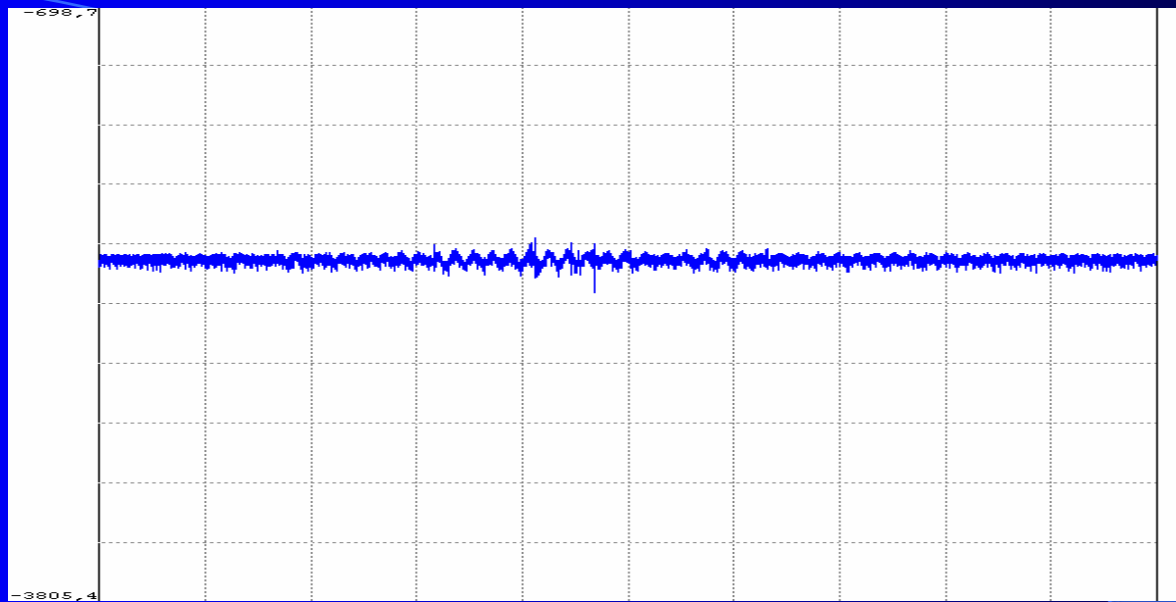




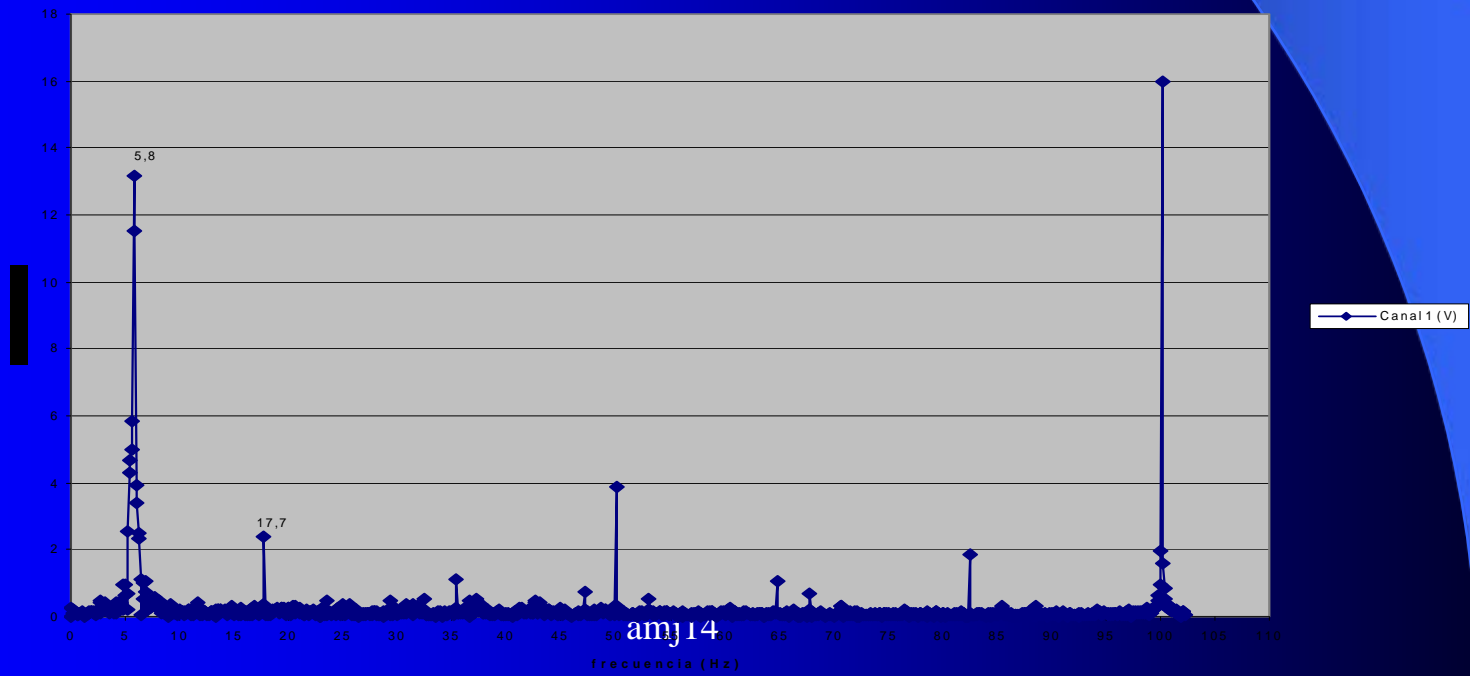
## Nueva campaña de ensayos

Frecuencia propia vibración primer modo	<b>5,33 Hz</b>
Aceleración máxima una persona corriendo a 3,7 Hz	<b>0,04 g</b>
Amortiguamiento crítico	<b>0,25%</b>

- Aumento del valor de la frecuencia del primer modo propio de vibración hasta por encima de 5Hz
- Disminución de los valores de aceleración y amortiguamiento respecto a la primera campaña de ensayos.



Espectrogram a



## 2 Validación teórica

- Proceso análogo al de la primera fase previa al refuerzo.

Ajuste del modelo teórico a partir de los resultados experimentales.

- Estimación de los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración máximos debidos a una situación de máxima afluencia de personas corriendo (subiendo o bajando deprisa) en la escalera.
- 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 ( $0,08g < 0,1 g$ )

## Casos similares: pasarela de fibroplástico

- Otro ejemplo de soluciones a problemas dinámicos mediante rigidización.
- Se trata de una pasarela construida en fibroplástico sobre la línea de tren de alta velocidad (AVE), de 38 m. de largo y 3 m. de ancho.
- En los tests iniciales previos a la colocación definitiva de la pasarela se midieron una frecuencia correspondiente al primer modo de flexión de 2,7 Hz y una aceleración frente al paso de 2 personas corriendo al paso de 0,34 g.
- El atirantado con cables diagonales entre nudos consiguió rigidizar la estructura y disminuir los valores de aceleración medidos. Después del refuerzo se midieron una frecuencia propia de 5 Hz y una aceleración de 0,14 g.



# CONCLUSIONES ENSAYOS DINÁMICOS

- Permiten valorar rigideces reales de las estructuras, y efectuar valoraciones de comportamiento estrictamente dinámico.
- Normativa en evolución, pero los documentos existentes son muy generalistas y muy a nivel recomendativo.
- Respetando unos criterios básicos, que debería reflejar con más énfasis la normativa podrían solucionarse y evitarse muchos de los problemas dinámicos en estructuras.
- Los técnicos proyectistas deberían ser capaces de realizar evaluaciones elementales del comportamiento dinámico de las estructuras. Realizando una adecuada estimación de concargas y de rigideces, es posible diseñar con unos niveles de rigidez adecuados para la prevención de problemas de este tipo (comprobable posteriormente mediante ensayos dinámicos).
- Los especialistas siempre tendrán su papel, como simple control o como patólogos. La tendencia a construir estructuras ligeras, facilita la existencia de estructuras con “vida” y con movimientos no siempre fáciles de prever en determinadas circunstancias.

## NORMATIVA ACTUAL

- EHE
- CTE
- EUROCODIGOS
- Recomendaciones E-8. Problemas de vibraciones en estructuras
- Decreto 176/2009 de niveles de vibración
- UNE 22 381:1993 Control de vibraciones producidas por voladuras
- UNE 5349 Vibraciones mano-brazo , cuerpo humano, etc
- Otra normativa internacional

# Contacto

- Jaume Terzán
- [jterzan@amj14.com](mailto:jterzan@amj14.com)
- Tel. 686443013
- [www.amj14.com](http://www.amj14.com)

