

**CEA 2004. CONGRESO DE LA ESTRUCTURA DE ACERO.**

**ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE PASARELAS ANCHAS Y ESBELTAS.**

**Tomás Ripa Alonso**  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
**Javier Pascual Santos**  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
**Francisco Millanes Mato**  
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

**IDEAM S.A.- Madrid**



## **1.- INTRODUCCIÓN.**

## **2.- PROBLEMÁTICA DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE GRANDES PASARELAS.**

## **3.- RESPUESTA DINÁMICA DE LA PASARELA PEATONAL PEDRO ARRUPE.**

## **4.-MEJORA DE LA RESPUESTA DINÁMICA MEDIANTE DISPOSITIVOS AMORTIGUADORES**

### **1. INTRODUCCIÓN**

A lo largo de los últimos años el diseño de las grandes pasarelas peatonales ha experimentado un significativo incremento en la complejidad de las formas estructurales, empleando por lo general el acero como material constitutivo principal. La continua mejora en los métodos de análisis junto con la mejor comprensión de las propiedades mecánicas y leyes constitutivas de los materiales ha contribuido decisivamente a incrementar las luces, flexibilidad y esbeltez de las mismas. Las normativas europeas, por su parte, proporcionan los criterios de diseño apropiados para el análisis estático de las estructuras e incluso criterios detallados para la evaluación de la resistencia a fatiga, pero adolecen de falta de criterios de aceptación de la respuesta dinámicas de pasarelas y, allí donde se proponen, son aplicables únicamente a estructuras sencillas, de escasa utilidad a las grandes pasarelas con formas estructurales complejas.

La respuesta dinámica de grandes pasarelas presenta ciertas particularidades cuyo análisis preciso excede ampliamente los procedimientos simplificados propuestos por las normativas, requiriendo por ello un estudio con modelos numéricos por ordenador. En primer lugar, la singularidad de las formas estructurales conlleva una existencia de numerosos modos de vibración relevantes para la respuesta dinámica, que generalmente difiere de la de una viga isostática simplemente apoyada para la que las normativas proponen los criterios de evaluación dinámica. En segundo lugar, todos estos criterios se formulan en términos de la primera frecuencia de vibración, mientras que en las grandes pasarelas existen frecuencias de vibración superiores, asociadas a modos de vibración antimétricos, torsionales o locales que pueden resultar excitados por los peatones y requieren, por ello, un estudio específico. Finalmente, la sollicitación dinámica a que se pueden ver sometidas estas pasarelas debe ser considerada de forma realista. Teniendo en cuenta las grandes luces e incluso anchuras implicadas, la sollicitación dinámica puede ser muy elevada, ampliamente superior a la acción de un peatón aislado referida en las normativas. Una descripción ajustada de estas sollicitaciones debe tener en cuenta aspectos tales como la simultaneidad, rangos de frecuencias asociados a las diferentes actividades humanas y, en conclusión, debe proponer criterios de aceptación adecuados a la probabilidad de ocurrencia de tales sollicitaciones.

En el siguiente artículo se ilustrarán los análisis y conclusiones con los resultados obtenidos en el proyecto de la Pasarela Peatonal de Abandoibarra, recientemente inaugurada junto al museo Guggenheim de Bilbao, consistente en una estructura en lámina plegada de 142 m. de longitud, 84 de luz principal, con un tronco central de 7,6 m de anchura sustentado en 8 rampas laterales.

## 2.- PROBLEMÁTICA DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE GRANDES PASARELAS.

Como primera aproximación al problema de la respuesta dinámica de grandes pasarelas podemos revisar las frecuencias de vibración medidas en pasarelas construidas que se encuentran en la bibliografía técnica (fig. 1) Puede observarse que no se reportan mediciones en pasarelas de luces superiores a 40 m, dado que las grandes luces en pasarelas son prácticamente exclusivas de las realizaciones más recientes. Sin embargo, haciendo la hipótesis probable de que la relación flecha/luz se mantenga constante, puede fácilmente deducirse que la primera frecuencia natural resulta inversamente proporcional a la luz. Por ello, dado que para luces de 40 m la frecuencia oscila en torno a los 2 Hz, para luces superiores, en el rango de los 80 m. como el caso de la pasarela de Abandoibarra que ilustra esta exposición, resultan esperables frecuencias de vibración situadas por debajo del rango crítico de 1,5 a 2,5 Hz susceptible de entrar en resonancia con la acción de los peatones caminando.

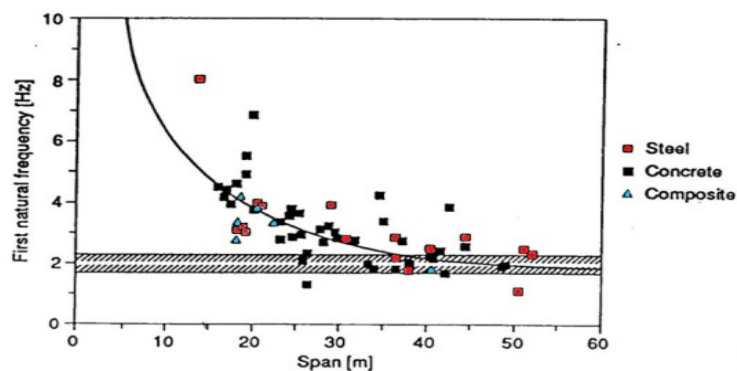


Fig. 1.- Frecuencias medidas en pasarelas ejecutadas

A pesar de que esto no es sino una estimación grosera de la primera frecuencia natural de las grandes pasarelas, que no puede en absoluto tomarse como una conclusión de carácter absolutamente general, sí que resulta relevante para destacar ciertos aspectos de la respuesta dinámica esperable en grandes pasarelas. En primer lugar, dado que la primera frecuencia de vibración va a estar situada casi indefectiblemente por debajo del rango crítico de resonancia, resulta entonces obligado la comprobación de las frecuencias asociadas a los modos de vibración superiores, dado que resulta muy probable que alguna de éstas caiga en dicho rango o en el comprendido entre 2,5 y 3,5 Hz correspondiente a la posible resonancia con peatones corriendo. En segundo lugar, una primera frecuencia de vibración baja puede resultar excitada por peatones caminando despacio, cuya acción dinámica consta no sólo de la carga vertical pulsante sino de notables acciones horizontales asociadas al caminar anormalmente pausado, lo cual, por otra parte, puede resultar obligado en grandes aglomeraciones. Por último, una frecuencia de vibración en el entorno de 1,5 Hz se encuentra en el rango crítico de resonancia para las acciones de personas saltando, debiéndose tener presente por ello una posible resonancia bajo oscilaciones deliberadas o vandálicas.

## 3.- RESPUESTA DINÁMICA DE LA PASARELA PEATONAL PEDRO ARRUPE

La respuesta dinámica de grandes pasarelas se ilustra con los análisis realizados en el proyecto de la pasarela peatonal de Abandoibarra y con las posteriores mediciones "in situ" de la respuesta frente a distintos tipos de solicitaciones actuantes.

La evaluación de la respuesta dinámica de grandes pasarelas requiere, como ya se ha indicado, la realización de modelos dinámicos con ordenador. Debe tenerse en cuenta que, si bien un cálculo estático puede ser en cierta forma conservador, descartando, siempre del lado de la seguridad, ciertas rigideces estructurales, un análisis dinámico debe ser fundamentalmente realista, por lo que, según los casos, pueden requerirse modelos de elementos finitos que reflejen de forma exacta la rigidez estructural, incluyendo todas aquellas rigideces que pudieran resultar despreciables desde un punto de vista estático. En el caso que nos sirve de ejemplo se obtuvieron los modos propios de vibración que se muestran en la fig.2, donde se observa la posible incidencia en la respuesta dinámica de los modos de vibración asimétrico o local del tramo lateral por encontrarse dentro del rango de posible resonancia con los peatones andando o corriendo, respectivamente.

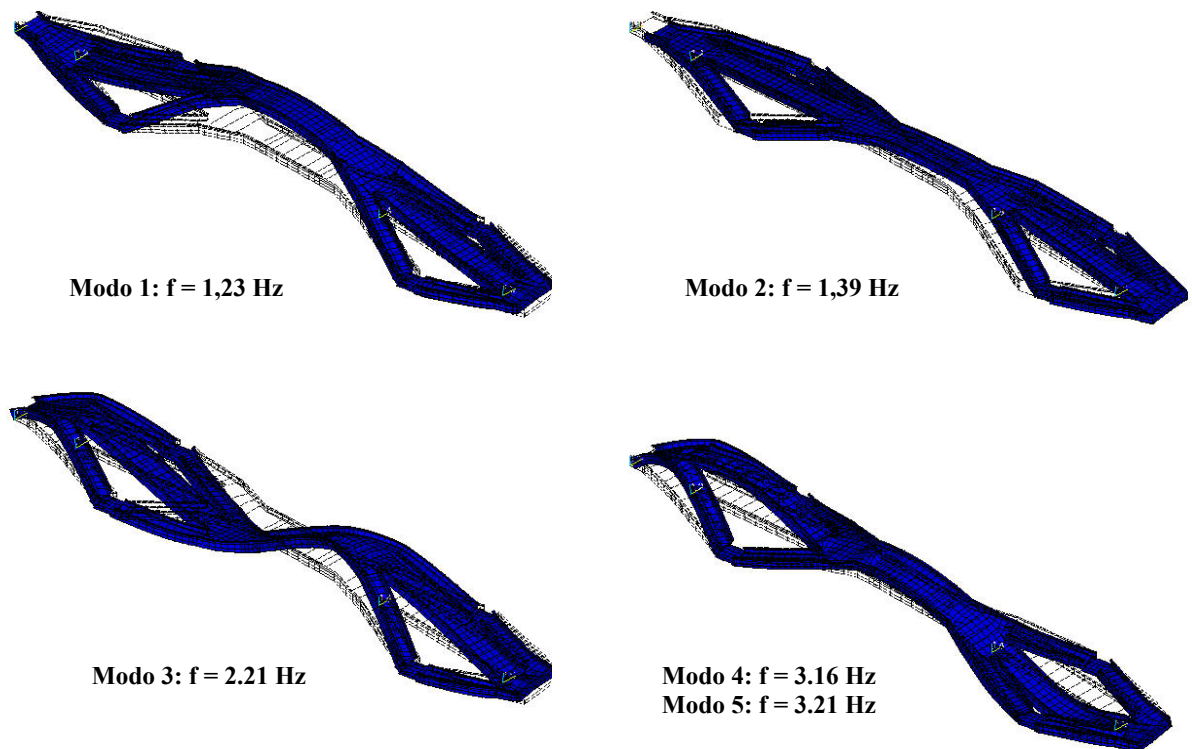


Fig. 2.- Modos propios de vibración

Una vez obtenidos los modos propios se llevaron a cabo una serie de análisis de precisión creciente, obteniéndose en primer lugar los espectros de respuesta en aceleraciones frente a cargas armónicas, puntuales y uniformemente distribuidas por zonas de la pasarela, actuando localizadamente en los puntos más desfavorables de la estructura. Se obtuvieron asimismo los acelerogramas de respuesta frente a cargas móviles transitando a distintas velocidades sobre la pasarela mediante un análisis dinámico directo de integración en el tiempo, más preciso y realista que el armónico. La solicitación simultánea de multitud de peatones se simuló mediante filas de 6 peatones en sentido transversal, separadas 2 m. en sentido longitudinal, todos ellos

avanzando a la misma velocidad. La aceleración de pico para cargas puntuales aisladas obtenidas del análisis armónico es de  $0,86 \text{ m/s}^2$ , ligeramente superior al umbral de confort generalmente propuesto dado por  $0.5 \sqrt{f_0} = 0.57 \text{ m/s}^2$ , si bien se produce para una frecuencia de actuación de  $3,20 \text{ Hz}$ , muy inusual para actividades humanas. En el rango de las actividades humanas más usuales, entre  $1$  y  $3 \text{ Hz}$ , las aceleraciones obtenidas no resultan significativas. Los resultados del análisis por integración en el tiempo se obtienen aceleraciones de pico de  $2 \text{ m/s}^2$ , claramente perceptibles y en el umbral de lo molesto, si bien corresponden a la sollicitación más inusual de la multitud de peatones transitando perfectamente acoplados con el modo antimétrico de vibración.

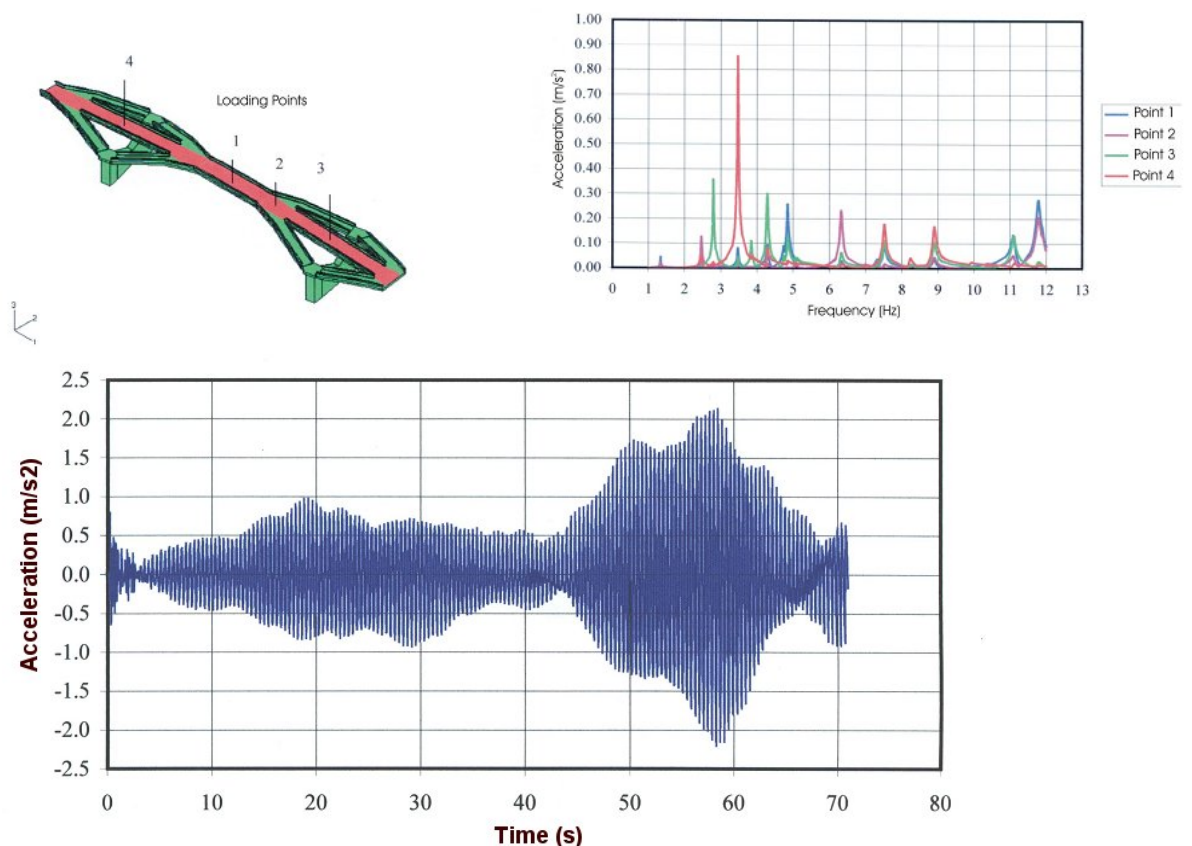


Fig. 3.- Aceleraciones pésimas bajo cargas armónicas y con integración en el tiempo

#### 4.- MEJORA DE LA RESPUESTA DINÁMICA MEDIANTE DISPOSITIVOS AMORTIGUADORES.

La percepción humana de las vibraciones es enormemente subjetiva. Resulta por ello apropiado prever en el proyecto de grandes pasarelas la utilización de dispositivos amortiguadores, absolutamente necesarios en aquellos casos en que la respuesta dinámica sea claramente insatisfactoria y convenientes en todos los demás casos como medio de mejora del confort. Los dispositivos amortiguadores más utilizados son los Amortiguadores de Masas Sintonizadas (Tuned Mass Dampers o TMDs), consistentes en una masa oscilante, conectada a la pasarela mediante un muelle y un amortiguador viscoso, cuyas vibraciones desacompanadas con la estructura permiten amortiguar las vibraciones de ésta.

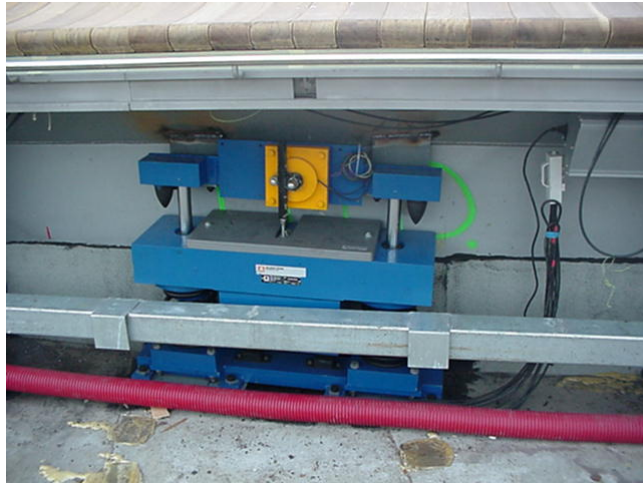


Fig. 4. Dispositivos amortiguadores colocados en la pasarela

Como mejora de los dispositivos TMD, se han desarrollado recientemente los dispositivos amortiguadores de masas sintonizadas semi-activos, que mejoran la capacidad de amortiguamiento frente a ligeras variaciones de la frecuencia de excitación o de la frecuencia propia de la estructura. Estos dispositivos tienen la capacidad de auto-regular su amortiguamiento de forma instantánea en función de la sollicitación actuante, mediante unos sensores electrónicos integrados que determinan la sollicitación instantánea para ser procesada por un algoritmo computerizado que determina la viscosidad óptima del amortiguador. Ésta se modifica en tiempo induciendo una corriente eléctrica a través del fluido amortiguador, cuya viscosidad resulta dependiente de la intensidad de la corriente inducida gracias al carácter magneto-reológico de los fluidos empleados.