

Cuantificación de la percepción de la vibración en pasarelas peatonales



Melania Vasilica Istrate*
Antolin Lorenzana Ibán**
Norberto Ibán Lorenzana*
Ali Vasallo Belver*

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Técnico Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

* Centro Tecnológico CARTIF. División de Ingeniería Mecánica. Parque Tecnológico de Boecillo, parcela 205 - 47151 Valladolid. Tfno: +34 983 546504. melist@cartif.es

** UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. ITAP. Paseo del Cauce, 59 - 47011 Valladolid. Tfno: +34 983 423313. ali@eii.uva.es

Recibido: 15/12/2011 • Aceptado: 10/04/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4510>

QUANTIFYING FOOTBRIDGES SERVICEABILITY

ABSTRACT

- Modern pedestrian bridges are very often slender and very flexible structures, where the first natural frequencies of vibration may fall close to dominant frequencies of the dynamic excitation due to walking or running. Aesthetic, technical and technological developments lead to ever more slender, flexible and low damped footbridges and, as a consequence, they can vibrate significantly even under a single person.

Some codes and guidelines establish acceptable values in terms of acceleration functions. In many of these codes, dynamic problems are addressed by defining limits for the natural frequencies of the structures or for the accelerations associated with pedestrian-induced vibrations. Such approaches are usually conservative and fail to deal with all the parameters relevant to human sensitivity to vibrations, which is highly subjective. This, together with the fact that the natural frequencies and accelerations calculated by analytical or numerical methods are subject to uncertainties, may hinder pedestrian bridge design.

In general, the individual judgement whether vibrations are disturbing or not are based on psychological parameters and can lead to different limits, as certain persons can perceive vibrations without being discomforted by them.

Some of these parameters are difficult to quantify or are highly subjective. They include the number of simultaneous users, frequency of use, pedestrians' activity, flexibility of the pavement, time of exposure, if vibration is expected or not, etc. In this work the vibration perception is addressed and certain applied approaches are presented.

- **Key Words:** pedestrian bridges, vibration, perception, discomfort, serviceability.

RESUMEN

Desde el punto de vista del diseño estructural la tendencia actual -en lo que a pasarelas peatonales se refiere- es hacia estructuras ligeras y vistosas que en ocasiones tienen modos propios de vibración dentro del rango susceptible de ser excitado por los viandantes. Aunque las fuerzas inducidas por los peatones en movimiento son de baja intensidad, cuando su frecuencia coincide con alguna de las naturales de la pasarela, pueden provocar movimientos significativos cuando ésta es ligera y poco amortiguada. Este comportamiento dinámico es apreciado por los distintos usuarios y puede provocar cierta incomodidad.

En algunas normativas, recomendaciones y guías de diseño se dan pautas para estimar esta incomodidad mediante distintos indicadores, si bien su utilidad es limitada al depender de distintos factores, algunos difícilmente cuantificables y otros incluso subjetivos. Por tanto, es difícil estimar la adecuación en servicio en las etapas de diseño y cálculo por simulación, y, en ocasiones, tras la construcción de la pasarela, podrían ser necesarias intervenciones para limitar los movimientos que experimenta ante cargas normales de uso. Entre los factores que deben ser tenidos en cuenta se tiene el número de usuarios, su actividad (parados, andar, correr...) y el ritmo de la misma, la flexibilidad del pavimento, el tipo de barandillas y

la visibilidad a través de ellas, la altura sobre el suelo, la previsión del movimiento esperado por el usuario, etc.

En este trabajo se presenta una revisión del estado actual del arte y se lleva a cabo una valoración y comparación crítica de las diversas metodologías y criterios, mostrando los resultados obtenidos para ciertos estudios aplicados a casos concretos.

Palabras Clave: pasarelas peatonales, vibración, percepción, disconfort, aptitud en servicio.

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que las pasarelas peatonales esbeltas son propensas a vibrar de forma apreciable en condiciones de servicio, es decir, cuando son transitadas por los viandantes. En la actualidad este comportamiento se ha acentuado por dos razones principalmente. Por una parte, el desarrollo de los materiales de construcción con mayor resistencia específica, que lleva a que la masa modal de la estructura sea baja, siendo su relación con la masa de los viandantes cada vez menor. Por otra, la tendencia en los países desarrollados hacia ciudades más accesibles, lo que demanda pasos sobre

carreteras y ríos que sean no solo funcionales, sino también atractivos. Esto lleva a concepciones estructurales singulares donde en ocasiones lo que prima es la estética en detrimento de la racionalidad ya que a menudo [1] se pasan por alto ciertos principios clásicos del diseño resistente. En la Tabla 1 se clasifican y enumeran, entre otros, distintos factores que pueden intervenir en la percepción de movimientos y oscilaciones en este tipo de estructuras.

Este trabajo se centra en el estudio de varios indicadores propuestos por las distintas guías de diseño para cuantificar la adecuación al servicio de las pasarelas peatonales. En este sentido se realiza - a través de un caso práctico - una valoración crítica y una discusión de potenciales factores que deben ser tenidos en cuenta, evidenciando la necesidad de completar los criterios de las normativas actuales. Una versión extendida de esta introducción, junto con la presentación de los antecedentes y un resumen de las principales normativas aplicables a pasarelas se pueden consultar en este enlace: http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/pdfs/_adic/4510_2.pdf

En la Tabla 2 se resumen las indicaciones más relevantes de algunas de las normas y guías de diseño. Siguiendo el eurocódigo [2], si la pasarela no tiene frecuencias naturales menores de 5Hz en la dirección vertical, se puede considerar que es adecuada al uso y no son necesarias comprobaciones

Factores físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Características estructurales, (estáticas y dinámicas como rigidez, frecuencias propias, modos, amortiguamientos y masas modales) • Número de usuarios y actividad de los mismos (andar, correr, ...) • Tipo de pavimento
Factores fisiológicos del viandante	<ul style="list-style-type: none"> • Biomecánica y Biometría (sexo, constitución, peso, ritmo, características conductuales, sensibilidad sensorial, ...) • Postura, tipo de calzado, si va cargado o no, ... • Tiempo de exposición
Factores psicológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Estado de ánimo • Movimiento esperado o no • Comentarios de otros usuarios • Indicios visuales (transparencia y altura de las barandillas y vallas de protección, altura sobre el suelo, cercanía de otras construcciones, ...) • Preocupación por la integridad estructural

Tabla 1: Factores que pueden afectar a la percepción de la incomodidad

Normativas	Frecuencias críticas (Hz)		Aceleraciones máximas de confort (m/s ²)	
	Vertical	Lateral	Vertical	Lateral
ISO 10137 [4]	1.7÷2.3		60X umbral vertical	30X umbral horizontal
Eurocódigo (ENV1995) [2]	<5	<2.5	0.7	0.2
EAE 2011(España) [5]	1.6÷2.4 3.5÷4.5	0.6÷1.2	min(0.5√f _v , 0.7)	0.2(0.4)
BS 5400 (Reino Unido) [6]	<5		0.5√f _v	
SETRA (Francia) [7]	1.0÷5.0		0.5, 1.0, 2.5	0.15, 0.3, 0.8

Tabla 2: Frecuencias críticas y valores de aceleración máxima de confort

adicionales. En direcciones transversales o torsionales, el rango a evitar está por debajo de 2.5Hz. Es difícil, con diseños resistentes racionales, no tener ninguna frecuencia natural significativa en los rangos indicados [3]. En este caso, hay que garantizar que las aceleraciones máximas en condiciones normales de uso no superan ciertos valores límite. Dicho eurocódigo establece 0.7m/s^2 para vibraciones verticales y 0.2m/s^2 para las laterales. Estos límites, en algunas normativas, se imponen en función de f_v , siendo f_v la frecuencia natural de la estructura en dirección vertical más susceptible de ser excitada por los viandantes (andando o corriendo).

En España, las referencias normativas más relevantes se recogen en las recomendaciones RPX-1995 [8] y en las recientes instrucciones EAE-11 [5] y IAP-11 [9]. En la primera se establece como aceleración vertical máxima el valor de $0.5\sqrt{f_v}\text{m/s}^2$. Para las frecuencias habituales en puentes multiuso se suelen clasificar las vibraciones como ligeramente perceptibles por debajo de 0.034m/s^2 , hasta 0.1m/s^2 como claramente perceptibles, hasta 0.55m/s^2 como molestas y hasta 1.8m/s^2 como intolerables. Valores superiores deberían evitarse. La Instrucción de Acero Estructural EAE-11 se limita a indicar que se deben evitar frecuencias verticales en los rangos (1.6Hz, 2.4Hz) y (3.5Hz, 4.5Hz) y que, en caso de no ser posible, no se superen los $0.5\sqrt{f_v}$ o los 0.7m/s^2 cuando sea transitada por un único peatón andando o corriendo. En la dirección horizontal el rango de frecuencias a evitar es $0.6\text{Hz} \div 1.2\text{Hz}$ y que no se superen los 0.2m/s^2 o, excepcionalmente, los 0.4m/s^2 . La Instrucción IAP-11 sobre acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, en su apartado 7.2.2 relativo a pasarelas peatonales, añade valores de referencia de aceleraciones verticales para el confort de los peatones, siendo el confort máximo por debajo de 0.5m/s^2 , medio hasta 1.0m/s^2 y mínimo hasta 2.5m/s^2 . Por encima lo clasifica como “no aceptable”. En la dirección horizontal los valores indicados son 0.10, 0.30 y 0.80m/s^2 , respectivamente.

En la guía francesa SETRA [7], enfocada específicamente hacia pasarelas ligeras, se definen 4 rangos de frecuencias según el riesgo asumible y se establecen tres niveles de confort en función de las aceleraciones máximas, si bien la adecuación al uso de la pasarela depende del tráfico peatonal esperado. Para movimientos verticales, el confort es máximo por debajo de 0.5m/s^2 , medio entre 0.5 y 1.0m/s^2 y mínimo entre 1.0 y 2.5m/s^2 . Por encima de 2.5 se considera inaceptable. Para movimientos laterales los límites son 0.15, 0.30 y 0.80 respectivamente. Los rangos según las frecuencias en la dirección vertical son: poco riesgo entre 2.6 y 5.0Hz, riesgo medio entre 1.0 y 1.7 y entre 2.1 y 2.6Hz y alto riesgo entre 1.7 y 2.1Hz. En la dirección lateral son: bajo entre 1.3 y 2.5Hz, medio entre 0.3 y 0.5 y entre 1.1 y 1.3 y alto entre 0.5 y 1.1Hz.

Estas aceleraciones son difíciles de estimar en etapas de diseño. A la dificultad de estimar las excitaciones se añade la usual complejidad estructural y la difícil estimación de las propiedades dinámicas de los materiales en servicio,

incluyendo cimentaciones, condiciones de apoyo, efecto de las barandillas, del pavimento, de la existencia de bancos, farolas, etc. Aun así, muchas de estas normativas indican métodos aproximados para estimar estas aceleraciones. Pero tras la aplicación de distintos métodos a una misma pasarela se pueden obtener, según se muestra en el trabajo de Pavic [10], resultados que difieren entre sí en factores mayores de 4, lo que en cierto modo da una idea de su escasa utilidad.

Más allá de estos métodos aproximados podría intentarse una simulación mediante métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos. Aunque la capacidad de cálculo computacional es alta, para la resolución del problema dinámico se necesitan datos que no siempre son fáciles de estimar en la etapa de diseño. Algunos de estos parámetros son críticos, como el amortiguamiento estructural, pudiendo resultar que a pesar de que las simulaciones numéricas hayan sido satisfactorias, tras la construcción, la estructura presente valores ligeramente distintos de esos parámetros y aparezcan problemas funcionales que demanden rediseño o medidas correctoras.

Además, hay que tener en cuenta que puede haber comportamientos de interacción [11] y propiedades locales que no pueden ser incorporadas en el modelo de forma sencilla. Así, pudiera ocurrir que una determinada pasarela tenga carriles con pavimentos distintos, uno rígido y otro flexible. A pesar de que el comportamiento estructural es exactamente el mismo, las sensaciones percibidas por un viandante son distintas dependiendo de si está en la zona de pavimento rígido o en la de flexible.

2. EVALUACIÓN DEL CONFORT EN PASARELAS

Dado su interés social y comercial, son numerosos los trabajos de investigación en los que se proponen, más allá de las normativas, métodos para determinar el confort (o su inversa, la incomodidad) de determinados medios de transporte incluyendo aquellos donde está permitido que los viajeros permanezcan de pie. Tras estos estudios se pueden obtener conclusiones sobre la influencia en el confort de distintos factores como las irregularidades de la carretera o de la vía, el sistema de suspensión del vehículo, el régimen del motor, la postura o puntos de apoyo, etc. Estas conclusiones pueden interesar tanto a los responsables de las vías y carreteras como a los fabricantes de los vehículos, además de a los usuarios finales. Con intenciones similares comienzan a aparecer estudios aplicados a forjados de grandes luces [12-15] y a pasarelas peatonales [16-18], sistemas estructurales ambos propensos a desarrollar vibraciones perceptibles bajo cargas de servicio.

Respecto a las pasarelas, cabe destacar los trabajos de Hawryszkow [17], quien desarrolla distintos experimentos con 100 usuarios de distinta constitución transitando a distintos ritmos (andar, correr lento y correr rápido a las frecuencias promedio indicadas en la Tabla 3, junto con su desviación estándar) sobre distintas tipologías de pasarelas ligeras, de entre 25 y 90 m de luz, de las normalmente

construidas en entornos urbanos europeos. Las pasarelas se clasificaron en 4 grupos en función de la estimación de la actividad de los usuarios (porcentaje esperado de personas paradas, andando, corriendo lento o corriendo rápido). En el grupo 1, propio de entornos turísticos, se considera que el 30% de los ocupantes están parados y el 70% andando. En el grupo 2, propio de zonas verdes, se toma el 10% parado, el 85% andando y el 5% corriendo lento. En el grupo 3, relativo a lugares de paso sobre carreteras o pequeños ríos en zonas urbanas, todos los usuarios se suponen andando y en el grupo 4, asociado con zonas deportivas, los porcentajes considerados son 30% andando, 60% corriendo lento y 10% corriendo rápido.

En todos estos escenarios y con distintas ocupaciones, se hicieron ensayos para relacionar la percepción de comodidad (mediante encuesta) de dichos usuarios con la aceleración máxima en el centro del vano de cada pasarela (medida mediante el correspondiente acelerómetro). Los resultados se muestran en la Tabla 4, donde se dan tres valores de aceleración (a_{min} , a_{med} , a_{max}) en base a los cuales se obtienen 4 clasificaciones. Por debajo de a_{min} el movimiento no es causa de incomodidad. Entre a_{min} y a_{med} (“normal”) la percepción del movimiento no es causa de inseguridad, pero comienza a llamar la atención, entre a_{med} y a_{max} (“incómoda”) algunos usuarios se preocuparían y serían reticentes a volver a cruzar por la pasarela y por encima de a_{max} la pasarela se podría calificar de no apta para el uso peatonal. Los tres valores indicados se interpretan según la Tabla 5, en función de las reacciones de los usuarios que están andando o parados en el centro del vano.

3. CASO PRÁCTICO

A modo de referencia numérica, se indican seguidamente los valores obtenidos experimentalmente en una pasarela metálica, de 51m de vano y 18Tn de masa modal en el primer modo de flexión, con apreciable comportamiento vibratorio, cuando es transitada por 1, 4 y 15 viandantes, distribuidos aleatoriamente, simulando condiciones normales de uso (casos **a**, **c** y **d**). La pasarela tiene varias frecuencias naturales en rangos susceptibles de ser excitados por los distintos viandantes, destacando la primera de flexión a 3.5Hz, excitable andando a 105 pasos por minuto o corriendo a 210ppm. Por ello se ha considerado representativo mostrar también la respuesta del centro del vano cuando un único viandante camina a 105ppm (caso **b**). En la Fig. (1) se presentan las aceleraciones, para cada caso, durante dos segundos cualesquiera (de los 245s registrados) y en la Fig. (2) se muestran los correspondientes indicadores, junto con los límites establecidos según la norma ISO 2631 [19].

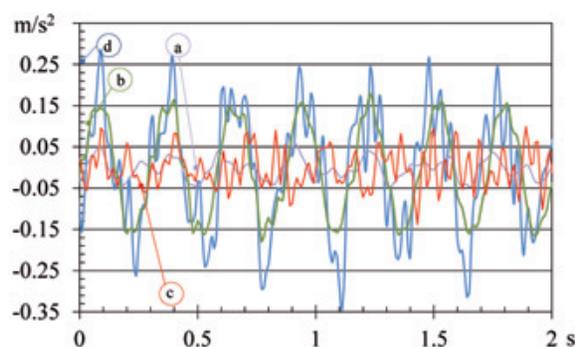


Fig. 1: Registros de aceleración en el centro del vano en los distintos casos de uso

	Frecuencia promedio (Hz)	Desviación estándar (Hz)	Rango usual (90%) (pasos por minuto)
Andar	1.88	0.18	[95, 130]
Correr lento	2.70	0.27	[135, 189]
Correr rápido	3.41	0.52	[153, 256]

Tabla 3: Frecuencias y rangos usuales de la locomoción humana

	Uso de la pasarela (%parado, %andando, %corriendo lento, %corriendo rápido)			
	1: Entorno turístico (30/70/0/0)	2: Zonas verdes (10/85/5/0)	3: Pasos urbanos (0/100/0/0)	4: Zonas deportivas (0/30/60/10)
($a_{min}/a_{med}/a_{max}$)	(0.50/1.01/1.78)	(0.67/1.31/2.18)	(0.70/1.40/2.30)	(1.39/2.50/4.75)

Tabla 4: Límites de aceleración (m/s^2) según el uso

	Usuarios andando	Usuarios parados
a_{min}	Perceptible, pero no desvía la atención	
a_{med}	Se entorpece el movimiento. Se dan falsos pasos	La lectura o el uso de móviles se hace difícil. Tendencia a asirse en las barandillas
a_{max}	Sensación de peligro de caerse. Tendencia a pararse y asirse a las barandillas.	Inestabilidad y sensación de inseguridad.

Tabla 5: Efectos del movimiento de la pasarela sobre los usuarios

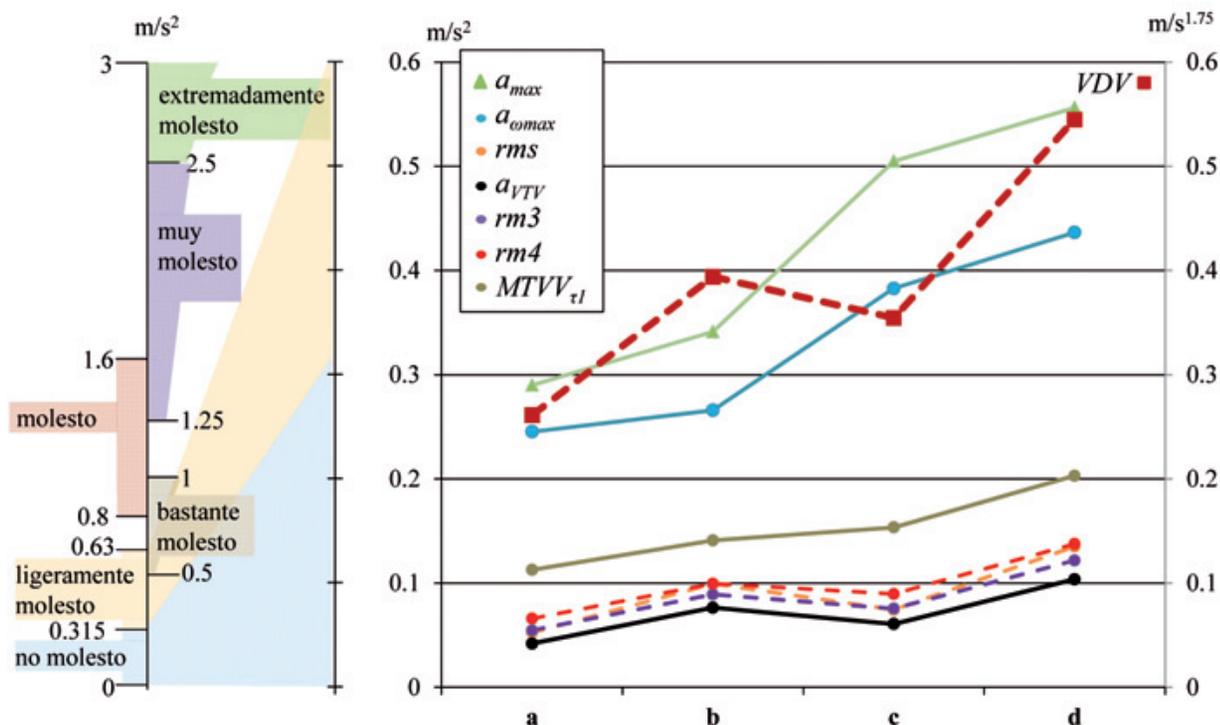


Fig. 2: Límites según ISO 2631 y valor de los indicadores para las distintas condiciones de uso

Además del acelerómetro empleado para el registro en centro del vano, uno de los viandantes (Fig. 3, izda.), de 75kg, iba equipado con otros 3 acelerómetros situados en su puntera (P), talón (T) y cadera (C), como se muestra simbólicamente en la Fig. (3) junto con el sistema de ejes usado.

	rms (m/s ²)	a _{max} (m/s ²)
Puntera (P)	11.31	82.14
Talón (T)	9.56	68.36
Cadera (C)	3.23	14.33

Tabla 6: Valores promedio y máximo de las aceleraciones durante un paso

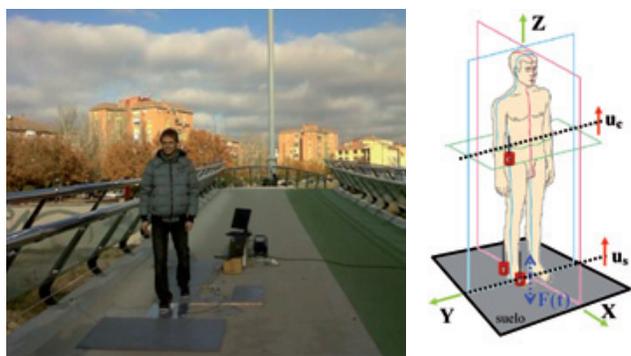


Fig. 3: Instrumentación y ensayo con viandante sensorizado (izda.) y sistema de referencia para los acelerómetros (dcha.)

En la Fig. (4) se muestran los registros en P, T y C correspondientes a un paso representativo. También se incluyen en la misma figura las fuerzas (en relación a su peso) ejercidas por el viandante sobre la pasarela, tanto en la dirección vertical Z como frontal X y lateral Y [18]. En la Tabla 6 se presentan el valor máximo y promedio rms (durante 60s) de las aceleraciones registradas en P, T y C.

Del análisis de los datos de la Fig. (2) y Tabla 6 se puede concluir que incluso siendo las aceleraciones de las distintas partes del cuerpo 1 o 2 órdenes de magnitud superiores a las que experimenta la estructura, los viandantes aprecian el movimiento de ésta incluso bajo condiciones normales de uso. Nótese que con esta diferencia de magnitudes, los valores de los distintos indicadores aplicados a los registros de P, T y C no revelarían diferencias significativas entre los distintos casos de uso (a, b, c y d). Además, la incomodidad apreciada por los autores es proporcional a los indicadores obtenidos de los registros en el centro del vano (y no, en principio, en las distintas partes del cuerpo), lo que en cierto modo valida la metodología promulgada por las normativas y guías de diseño.

Analizando los distintos indicadores mostrados en la Fig. (2) se pueden extraer diversas conclusiones. En primer lugar se tiene que todos los indicadores crecen a medida que aumenta el número de viandantes (casos a, c y d) si bien no en proporción lineal, debido a que no se sincronizan entre ellos ni con el movimiento de la pasarela.

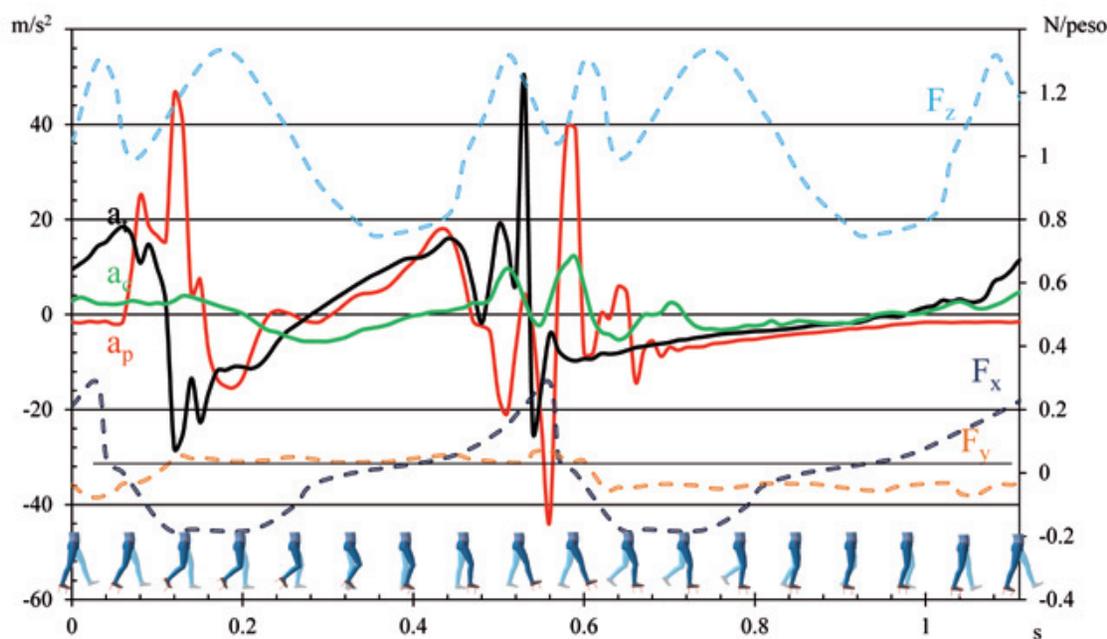


Fig. 4: Aceleraciones y fuerzas durante un paso completo

Por otra parte, cuando la frecuencia de paso coincide con la natural de la estructura, los efectos son significativamente mayores y todos los indicadores en el caso **b** son mayores que en el caso **a**. Aunque las aceleraciones máximas (y el $MTVV_{\tau}$) para el caso **c** son mayores que para el caso **b**, los promedios potenciales ($rm\lambda$, $\lambda=2,3,4$) son menores y el VDV también (ya que $VDV=T^{1/4}\cdot rm4$). En este caso, según qué indicador se use, podría concluirse que el movimiento que se induce en el caso **b** es menos incómodo (o más) que el inducido en **c**. La apreciación subjetiva de los autores es que **c** no es tan incómodo como **b**, dando más importancia a los indicadores promediados (y VDV) que a los valores pico (y $MTVV_{\tau}$). Por último, destacar que para los anchos de ventanas considerados (0.5, 1 y 2s) $MTVV_{\tau}$ no cambia de tendencia y solo para anchos mayores (del orden de 10s) comienza a tomar valores menores de $MTVV_{\tau}$ el caso **c** que el **b**.

Con los valores obtenidos, y haciendo uso de los distintos criterios de confortabilidad comentados en este trabajo, se concluye que según la norma ISO10137 se supera el límite de confort ($a_{\max} > 0.3m/s^2$, considerando la frecuencia predominante de 3.5Hz) en los casos **b**, **c** y **d**. Según la norma ISO2631 ninguno de los casos llega a ser molesto, ya que en todos a_{vTV} es menor de $0.315m/s^2$. Sin embargo, como en todos los casos $MTVV_{\tau}$ es mayor que $1.5a_{vTV}$ sería recomendable no comparar en términos de a_{vTV} sino de $MTVV_{\tau}$. Respecto a VDV , considerando el mismo nivel de vibración durante 8h (en vez de los 245s considerados) se tendrían valores de 0.86, 1.30, 1.17 y 1.79, todos ellos molestos para trabajos sedentarios pero muy por debajo de los $8.5m/s^{1.75}$, considerado el límite a partir del cual debieran tomarse medidas.

Respecto a las indicaciones de las normas y guías enumeradas en el apartado 2 tenemos que en ningún caso se superan los $0.86m/s^2$ recomendados en RPX o BS, ni tampoco los $0.7m/s^2$ indicados en los eurocódigos y en la EAE-11. Según SETRA, la pasarela bajo estudio es de “poco riesgo” al tener la primera frecuencia propia por encima de 2.6Hz y para los casos de uso **a** y **b** su nivel de confort es máximo (por debajo de $0.5m/s^2$) y para los casos **c** y **d** es medio (entre 0.5 y $1m/s^2$). Similares conclusiones se obtendrían de la aplicación de la IAP-11, mientras que según ISO 2631 tendríamos que los casos **a** y **b** son “no molestos” y los **c** y **d** “ligeramente molestos”.

Según la metodología propuesta por Hawryszkow y esbozada en el apartado 4, se tiene que si se clasifica como del tipo 2, en ningún caso su movimiento es causa de incomodidad, aunque si se clasificara como del tipo 1 podría considerarse como incómoda (pero no insegura) en los casos de uso **c** y **d**.

4. CONCLUSIONES

La cuantificación de la incomodidad en pasarelas peatonales es compleja y no hay consenso en la comunidad científica sobre las magnitudes que intervienen, dónde medirlas ni en qué casos de uso (número y actividad de los viandantes). A pesar de ello, los distintos indicadores disponibles, basados en las aceleraciones del centro del vano, permiten comparar entre sí distintos casos de uso y correlacionar los valores obtenidos con los baremos preestablecidos.

Dada la diversidad de indicadores y baremos, ocurre que una misma pasarela puede ser clasificada como “cómoda”

o “incómoda” según cuales se usen. Con los estudios realizados se pone de manifiesto que los indicadores sugeridos en las actuales normativas y guías de diseño deben ser completados, no solo para tener en cuenta factores cuantificables como la fase o la flexibilidad del pavimento, sino también para incluir, en la medida de las posibilidades, alguno de los aspectos subjetivos de los comentados en este trabajo.

El desarrollo de nuevas metodologías de caracterización dinámica de pasarelas, que incorporen aspectos de percepción como los tratados en este trabajo, será de gran utilidad no sólo en las etapas finales de evaluación (para cada procedimiento de ensayo que se pueda definir) sino también en las etapas de concepción estructural y dimensionamiento resistente, con potenciales consecuencias durante la vida útil de la pasarela.

5. AGRADECIMENTOS

Los contenidos de esta comunicación han sido parcialmente obtenidos en el marco del proyecto de investigación BIA2011-28493-C02-02 titulado “Técnicas experimentales y numéricas para la valoración del comportamiento vibratorio de pasarelas peatonales”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Flaga A, Pantak M. "Vibration comfort criteria for pedestrians on footbridges". En: 3th International Conference Footbridge (Porto 16-19 July 2008), 2008.
- [2] European Standard Norme Basis of structural design. Annex A2. Application for bridges. EN 1990-A2. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [3] Ruiwamba J; Tanner P; Bellod JL; et al. "Towards a consistent design method: A proposal for a new steel and composite bridge design code for Spain". Nordic Steel Construction Conference '95. 1995. Vol. 1-2 p.337-344
- [4] International Standards Organization. Bases for design of structure, serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration. ISO 10137:2004. Geneva, 2005.
- [5] Ministerio de Fomento. Instrucción de acero estructural (EAE). Real Decreto 751/2011. Madrid: BOE (Boletín Oficial del Estado) Reino de España, 2011.
- [6] BS5400. Steel, concrete and composite bridges. Part-3. Code of practice for design of steel bridges. BS5400. BS5400. 1982.
- [7] SETRA. Technical guide Footbridge: Assesment of vibration behavior of footbridges under pedestrian loading, Bagneux: Setra, 2006.
- [8] Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras. RPX. España: Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, Octubre 1995.
- [9] Ministerio de Fomento. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Orden FOM/2842/2011. Madrid, 2011.
- [10] Pavic A et al. "Vertical crowd dynamic action on footbridges: review of design guidelines and their application". En: 4th International Conference Footbridge, (Wroclow 6-8 July 2011), 2011.
- [11] Zivanovic S, Pavic A, Reynolds P. "Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review". Journal of sound and vibration. 2005. Vol.279-1-2 p.1-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2004.01.019>
- [12] Smith AL, Hicks S, Devine P. Design of floors for vibration: a new approach. SCI Publication ISBN 10:1-85942-176-8, 2007. 354p. ISBN 13:978-1-85942-176-5
- [13] Feldmann M, Heinemeyer Ch. "A new approach for the assessment of human induced vibration of slabs". Bauingenieur. 2010. Vol.85 p.36-44
- [14] Maier C., "A probabilistic approach to prognosticate pedestrian induced vibrations of long-span floor systems" Bauingenieur, 2010. Vol.85 p.241-248
- [15] Jun C, Xiongxiang S, 2010, "Investigation of as-built vibration serviceability of long-span floor by field measurement under human-induced excitation". En: 2nd Asia-Pacific young researchers and graduates symposium. Advance in Structural Engineering (Hangzhou - China, 2010), 2010. P.19
- [16] Casado C, Sebastián J, Muñoz I, et al. "Control de vibraciones en pasarelas peatonales". DYNA Ingeniería e Industria. Julio 2011. Vol.86-3 p.318-327
- [17] Hawryszkow P. "Analysis of dynamical sensitivity and comfort of footbridges". En: 4th International Conference Footbridge, (Wroclow 6-8 July 2011), 2011.
- [18] Racic V, Pavic A, Brownjohn JMW. "Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review". Journal of Sound And Vibration. 2009. Vol.326-1-2 p.1-49 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.020>
- [19] Evaluation of human exposure to whole-body vibration. International Standards Organisation, ISO 2631-1. Geneva 1997.