

DEDUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE UN MODELO CONSISTENTE DE CARGAS INDUCIDAS POR PEATONES Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA

SEILER, Christian¹; HÜTTNER, Susanne²; MAURIAL, Andreas³

RESUMEN - ABSTRACT

Con el aumento de la esbeltez de los puentes peatonales, los efectos dinámicos en estas estructuras se han vuelto más y más importantes, ya que los peatones pueden inducir un fenómeno de resonancia debido a sus cargas casi-armónicas. En particular para el caso de amortiguamiento bajo, las deformaciones y aceleraciones, que pueden ser importantes, pueden afectar a las personas en el puente, de tal manera que este no satisfaga sus condiciones de operación. Para analizar la sensibilidad dinámica de puentes peatonales, se requiere llevar a cabo mediciones in-situ o investigaciones numéricas. En el último caso, se requiere tanto de un modelo que se acerque lo más posible a la estructura real, como una simulación confiable de las cargas producidas por los peatones que circulan por el puente. En este artículo se presenta un nuevo modelo que se basa en un sistema no-lineal simple masa-resorte, que es capaz de simular uniformemente diferentes tipos de cargas inducidas por peatones que caminan, corren y saltan. Las pruebas experimentales llevadas a cabo con personas muestran una buena coincidencia con los resultados arrojados por el modelo y provee información característica que es necesaria para describir de manera definitiva las cargas peatonales. Con base en un análisis de Fourier se deriva finalmente un modelo simple para la estimación práctica de la respuesta dinámica de puentes peatonales bajo cargas inducidas por peatones.

DEDUCTION AND VERIFICATION OF A CONSISTENT MODEL FOR PEDISTARIN INDUCED LOADS AND HIS PRACTICAL APLICATION

With increasing slenderness of footbridges dynamics of these structures become more and more important as pedestrians may cause resonance phenomena due to their quasi-harmonic loads. Especially in case of low damping significant deformations and accelerations occur this might alienate persons on the bridge and hence, might fulfil serviceability requirements. In order to analyze dynamic sensibility of footbridges in-situ measurements or numerical investigations have to be performed. In the latter method both a model approaching the real structure as close as possible and reliable loads simulating crossing pedestrians are required. Therefore, in this paper a new load model is presented which is based on a simple nonlinear mass-spring-system being able to uniformly simulate different types of loads induced by walking, running and jumping pedestrians. Experimental tests with persons show a good agreement of the model with the test results and provide characteristic data which are necessary to definitely describe pedestrians' loads. On the basis of a Fourier analysis a simplified method is finally derived for

¹ Prof. Dr.-Ing. Christian Seiler, Profesor en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Ciencias Aplicadas (FH) de Munich, Alemania

² Dipl.-Ing. (FH) Susanne Hüttner MSc, Ingeniera Civil independiente ,Regensburg, Alemania

³ Prof. Dr.-Ing. Andreas Maurial, Profesor en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Ciencias Aplicadas (FH) de Regensburg, Alemania; eMail: andreas.maurial@bau.fh-regensburg.de

practical application in order to estimate the dynamic response of footbridges under pedestrian loading.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a códigos nacionales e internacionales el diseño de puentes peatonales muchas veces se basa solamente en cargas estáticas. Sin embargo especialmente estructuras esbeltas con un amortiguamiento bajo muestran deformaciones y aceleraciones significantes debido a la excitación casi armónica inducida por peatones que cruzan. Ejemplos impresionantes han sido el Millennium Bridge en Londres (Dallard 2001) o el puente peatonal de Solferino en Paris (Fromonot 2001). En estos casos la instalación de amortiguadores de masas sintonizados era necesaria para reducir las intensas oscilaciones. Por eso unos códigos por ejemplo Eurocode 5 (1999), el British Standard (1987) o el DIN FB 102 (2003), recomiendan un análisis dinámico para puentes peatonales y proveen cargas dinámicas, rangos de frecuencias críticas y de valores límites admisibles para las aceleraciones. Recomendaciones más detalladas se puede encontrar en Bachmann, Amann (1987) y Petersen (1996).

Al realizar un análisis dinámico a base de métodos numéricos primero se debe de evaluar las frecuencias propias. Cuando éstas están dentro del rango crítico de las frecuencias de marcha una investigación más detallada o un análisis simplificado de la respuesta máxima debería realizarse (Kreuzinger 2002). En este contexto las propiedades del material y el amortiguamiento deben ser estimados en forma realista porque un diseño al lado seguro no existe para sistemas dinámicos. Adicionalmente cargas de peatones características deben ser usadas tal cuales son sin embargo de “humanos”: los peatones que pueden sincronizarse con las oscilaciones del puente (efecto “lock-in”), ellos pueden caminar con una velocidad o frecuencia variada, en general ellos no se mueven en sincronización perfecta o inclusive pueden inducir o causar un amortiguamiento si su movimiento es aperiódico.

Para la descripción de cargas inducidas por peatones existen solamente pocos modelos, los cuales han sido deducidos en forma empírica o a base de pruebas experimentales (Matsumoto et al. 1987), (Baumann, Bachmann 1988), (Reiner et al. 1988). En general se usa funciones de carga senoidales mientras que se aplican diferentes modelos para peatones que caminan o corren.

Para analizar el caminar se aplica normalmente las series de Fourier (Bachmann et al. 1997) donde se obtiene cada amplitud por un análisis de Fourier de cargas medidas en pruebas experimentales, las cuales se puede encontrar por ejemplo en Galbraith, Barton (1970), McRobie, Morgenthal (2002). Estas cargas normalmente varían y dependen de la persona con que se hace la prueba, del tipo de zapato e inclusive del tipo de piso. Las primeras armónicas resultan normalmente con amplitudes de 0.1 hasta 0.5 del peso propio del peatón y para armónicas más altas entre 0.01 y 0.3. Además el ángulo de fase varía y se determina al rango de entre -0.2π hasta $\pi/2$. Otro modelo de carga presenta Petersen (1996) en relación a la fuerza la cual resulta de la masa acelerada de una persona debido a su movimiento vertical. Para amplitudes observadas típicas las fuerzas máximas se obtienen igual a las que se determinaron por el análisis de Fourier. Adicionalmente se dan componentes horizontales de carga, por ejemplo en el Eurocode 5 (1999), Bachmann (2002) y Harper (1962).

Para la descripción del correr y saltar de un peatón Wheeler (1982) y Bachmann, Amann (1987) proponen un modelo medio senoidal durante el periodo de contacto y cero fuerzas en el intervalo de no tener contacto. La fuerza máxima se define por un factor de impulso. Este se deduce por el teorema de conservación de energía pero se puede evaluar como función de una relación entre tiempo de contacto y el período de los pasos de la marcha. En el caso que el período de contacto se acerca al período de los pasos la función de carga resulta como serie de curvas u ondas medio sinodales las cuales no son realistas. Adicionalmente se presenta un análisis de Fourier a base del modelo medio senoidal donde resultan amplitudes de 1.6 y 1.7 veces la carga y peso propio de la persona que está corriendo y saltando respectivamente.

En general la influencia de más de un peatón se considerará por amplificar la respuesta dinámica causada por una sola persona. Sin embargo una multiplicación con el máximo número de peatones en el puente no sería apropiado porque el peatón no se mueve en sincronización perfecta. Tampoco lo hace completamente conforme con la frecuencia crítica del puente. Por eso Matsumoto et al. (1978) recomienda un factor de amplificación para peatones que caminan, el cual se basa en el teorema de probabilidad de Poisson y en el cual se basa en el número máximo de las personas que pueden moverse en forma fluida en el puente peatonal. Para peatones que corren y saltan se propone un número máximo de tres.

2 UN NUEVO MODELO UNIFORME DE CARGA

Inclusive si en general se pueden aplicar los modelos de carga que existen para un análisis dinámico de puentes peatonales resultan de todos modos inconsistentes y no proveen una transición continua entre las diferentes formas de movimiento. Por eso, se ha deducido un nuevo modelo no lineal de carga a base del análisis físico del proceso de movimiento que realizan los peatones que corren y saltan (Seiler, Hüttner 2004). Adicionalmente se puede aplicarlo para cargas inducidas por personas que caminan. Además pruebas experimentales se realizaron para verificar el modelo y para evaluar los datos característicos que definitivamente describen las cargas inducidas por peatones.

2.1 MODELO MATEMATICO-FÍSICO

Observando el movimiento de personas que corren y saltan durante el período de paso T se pueden identificar dos intervalos característicos (Fig. 1):

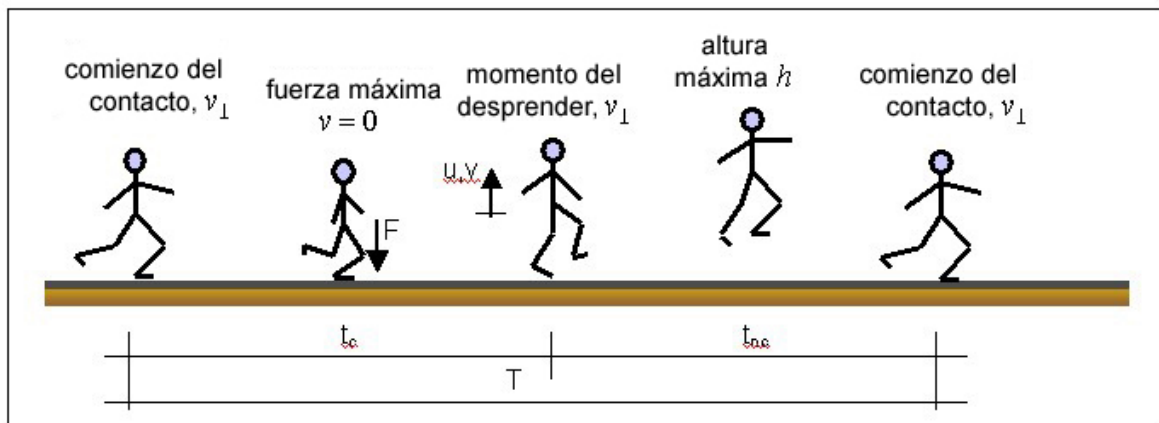


Figura 1: Proceso de movimiento de peatones que corren o saltan

- un intervalo de contacto t_c en el cual se transmiten cargas al piso y
- un intervalo de no contacto t_{nc} en el cual el peatón llega a una altura h se desprendió del piso.

En este modelo la masa de persona m se considera concentrada en un solo punto y los músculos están representados por un resorte sin capacidad de tensión. El movimiento durante el período de no contacto se puede describir simplemente por el teorema de conservación de energía con v_{\perp} que representa el componente vertical de la velocidad del peatón en el tiempo de desprendimiento:

$$h = \frac{v_{\perp}^2}{2g}, \quad v_{\perp} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{nc}. \quad (1)$$

Si se supone que no se pierde energía durante el intervalo de desprendimiento el peatón hace nuevamente contacto con el piso con la misma velocidad vertical v_{\perp} . Las fuerzas durante el período de contacto se pueden describir p.e. por el teorema de la conservación de impulso:

$$\int_0^{t_c/2} F(t) \cdot dt = m \cdot v_{\perp} + \int_0^{t_c/2} G \cdot dt . \quad (2)$$

La función de la fuerza $F(t)$ se elige de acuerdo a la solución parametrizada del movimiento libre no amortiguado de un sistema de un grado de libertad. Así la función de carga completa resulta:

$$F(t) = \begin{cases} G \cdot [1 + s \cdot \cos(2\pi f_G \cdot t)] & \text{para } -\frac{t_c}{2} < t \leq \frac{t_c}{2} \\ 0 & \frac{t_c}{2} < t \leq T - \frac{t_c}{2} \end{cases} . \quad (3)$$

La amplitud máxima de la fuerza se define por un factor de impulso s el cual se puede determinar paso a paso por introducir las ecuaciones (1) y (3) a la ecuación (2):

$$\frac{t_c}{T} = \left(1 + \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{\arccos(-1/s)} \right)^{-1} . \quad (4)$$

La solución del factor de impulso s se puede ver ilustrado en la fig. 3 y únicamente resulta como una función de t_c/T . Como este parámetro representa un valor individual que depende de la forma del movimiento de una persona se deben realizar pruebas experimentales para identificar datos típicos.

Como es típico para las formas de movimiento con intervalos sin contacto la solución para los desplazamientos correspondientes se presenta por componentes senoidales y parabólicos. La frecuencia f_G no coincide con la frecuencia de los pasos f_s , pero está relacionado con el factor de impulso s y el período de contacto t_c en la siguiente forma:

$$f_G = \frac{\arccos(-1/s)}{\pi \cdot t_c} \quad (5)$$

Cuando el período de contacto t_c se aproxima al período de los pasos T las frecuencias f_s y f_G coincide que resulta en un movimiento de contacto continuo con el piso, el cual es típico para el caminar e inclusive para el correr. Al mismo tiempo el factor de impulso s resulta igual a 1.0. Así, la oscilación que resulta representa un movimiento no amortiguado con la amplitud igual a la deformación estática debido al peso propio del peatón. El nuevo modelo de carga provee la transición continua entre los dos diferentes formas del movimiento. Sin embargo, también se puede introducir en la ecuación (3), factores de impulso más pequeño que 1.0 y se puede añadir armónicas más altas para simular cargas típicas inducidas por peatones que caminan. Esos factores de impulso ya no se pueden evaluar en base a la ecuación (4) sino deben ser determinados por pruebas experimentales.

2.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para una evaluación explícita de la función de carga que describe peatones que caminan, corren y saltan, se requiere de los coeficientes de Fourier o del factor de impulso respectivamente y la frecuencia de los pasos f_s . Como estos parámetros representan valores individuales que dependen del estilo propio del movimiento de cada peatón se ejecutaron pruebas experimentales para identificar rangos típicos. En este contexto la ecuación (4) solamente representa una

correlación entre el factor de impulso s y la relación t_c/T para deducir y verificar el modelo de carga sobre una base de resultados experimentales.

Las pruebas se realizaron con varias personas que caminaban, corrían y saltaban. Para esto se colocaron plantillas especiales con sensores a presión (frecuencia de exploración de 60 Hz) para asegurar un movimiento no perturbado. Las fuerzas que resultaron se podían determinar por hacer una integración de la presión en cada sensor sobre su área correspondiente.

Durante las pruebas se hicieron registros de movimientos con intervalos sin contacto al piso por ejemplo al saltar y correr como también movimientos con un contacto continuo con el piso, por ejemplo al correr y caminar. Para verificar el modelo de carga para la primera forma del movimiento se determinó al principio la frecuencia de los pasos f_s y t_c/T después se puede determinar el factor de impulso teórico s a base de la ecuación (4) y finalmente la función de carga correspondiente a través de las ecuaciones (3) y (5). Para hacer la comparación del factor de impulso de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales con el factor conforme al modelo de carga, el factor experimental fue definido $s = (F_{max} - G)/G$, que corresponde así a la ecuación (3). Para el movimiento del contacto continuo se determinó directamente la función de carga por un análisis de Fourier de los resultados de las pruebas experimentales. En este caso el factor de impulso se definió como el cociente entre la amplitud de la primera armónica y el peso propio del peatón.

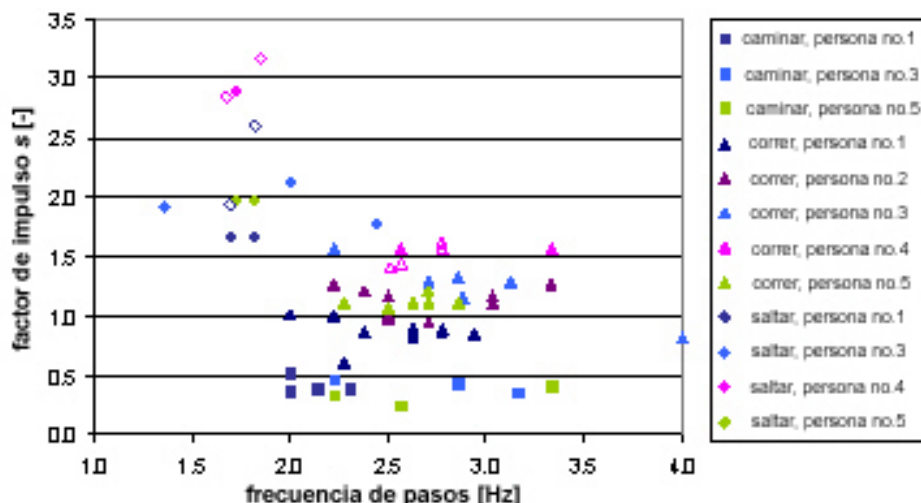


Figura 2: Factores de impulso para personas que caminan, corren o saltan

En la fig. 2 se demuestran los factores de impulso medidos para las diferentes formas del movimiento en función de la frecuencia de pasos. Para el movimiento del tipo saltar se obtuvieron factores de impulso en el rango [1.7; 3.2] el cual corresponde a una fuerza máxima aproximadamente 4 veces el peso propio del peatón. Las fuerzas máximas parecen que son independientes de la frecuencia de pasos.

Para el caminar los coeficientes de Fourier que se midieron eran de 0.25 hasta 0.5, mientras que los ángulos de fase variaban mucho en atención al estilo de movimiento de cada persona. Nuevamente no se ha podido observar ninguna correlación entre las fuerzas máximas y la frecuencia de pasos.

En el caso del correr se registraron formas del movimiento con y sin desprendimiento. Para la primera forma de correr los factores de impulso resultaron entre 1.0 y 1.6 y entre 0.6 hasta 1.0 para la segunda forma. Es sorprendente que las amplitudes de fuerza de cada persona parece que no varían con la frecuencia de los pasos sino se mantienen constantes.

Los factores de impulso determinados y la frecuencia de pasos se resumen en la tabla 1.

forma del movimiento	Frecuencias de pasos f_s [Hz]	Factores de impulso s [-]
caminar	2.0 ÷ 3.4	0.25 ÷ 0.5
correr	2.0 ÷ 3.4 (4.0)	0.6 ÷ 1.6
saltar	1.4 ÷ 2.5	1.7 ÷ 3.2

Tabla 1: Frecuencias de pasos y factores de impulso según las pruebas experimentales

Para la verificación del nuevo modelo de carga se presentan los factores de impulso medidos y los factores de impulso teóricos en fig. 3. Solamente en pocas pruebas se observaron fuerzas máximas más altas que las predichas por la ecuación (4). Sin embargo en la mayoría de los casos existe una muy buena coincidencia entre los resultados en las pruebas experimentales y el modelo de carga que significa la verificación de las suposiciones básicas del nuevo modelo de carga.

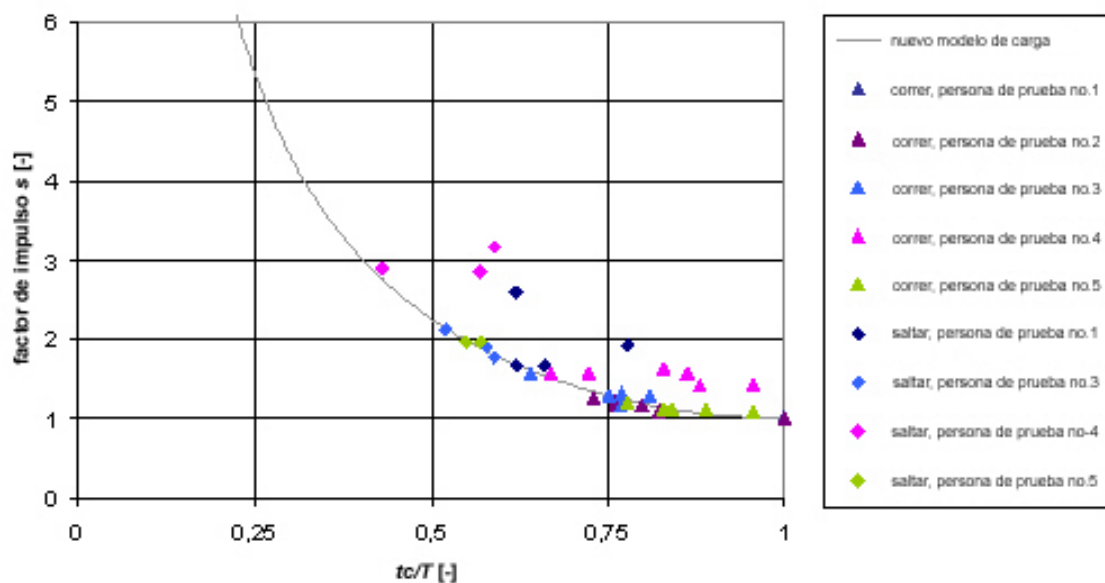


Figura 3: Factores de impulso según las pruebas experimentales y la teoría

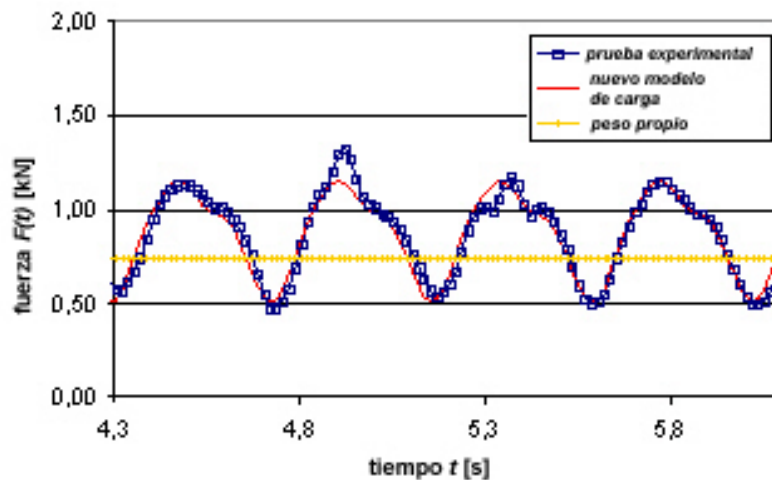


Figura 4: Cargas teóricas y medidas inducidas por una persona que esta caminando

Cuando se hace una aproximación por un análisis de Fourier de los movimientos de la forma de caminar que es caracterizada por un contacto continuo con el piso, en general tres armónicas son suficientes para simular las funciones características de carga. La fig. 4 muestra los resultados típicos en una prueba experimental, con una frecuencia de pasos $f_s = 2.33 \text{ Hz}$. En este caso el movimiento es muy uniforme por eso se muestra también una buena coincidencia en un intervalo más largo, aunque el análisis de Fourier se realizó solamente para el primer período de los pasos. En atención a la manera de caminar en las funciones de carga podrían producirse algunas diferencias. Éstas aparecen debido a la excitación de armónicas más altas, las cuales sin embargo no afectan la respuesta dinámica del puente peatonal.

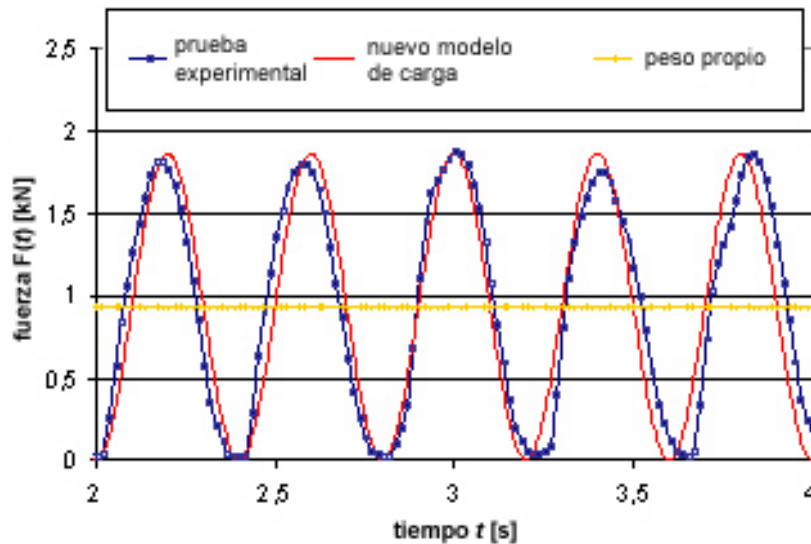


Figura 5: Cargas teóricas y medidas inducidas por una persona que esta corriendo (sin desprendimiento)

Los movimientos en la forma de correr fueron registrados tanto con un contacto continuo en el piso como con un intervalo de desprendimiento. En el primer caso el factor de impulso s es menor que uno, mientras la descripción de las cargas corresponde más o menos a una función de carga perfectamente senoidal como se muestra en la figura fig.5 unas pequeñas diferencias se pueden observar en esta descripción de las cargas, las cuales otra vez están relacionadas con las excitaciones de armónicas más altas.

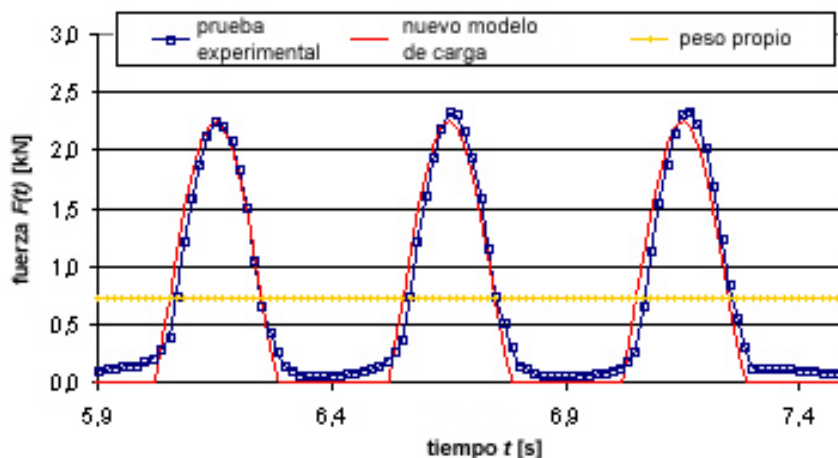


Figura 6: Cargas teóricas y medidas inducidas por una persona que salta

Cuando se analizó el correr con intervalos de desprendimiento, en base de las ecuaciones (3), (4) y (5), la función de carga que resulta tiene una buena coincidencia con los resultados experimentales. En este caso las características de la descripción de la carga son similares a aquellos que se muestran en la fig. 6. Adicionalmente el máximo de las fuerzas medidas corresponden a los factores de impulso teórico.

Los momentos en la forma de saltar se caracterizan por un período más largo sin contacto con el piso, por esta razón las fuerzas máximas resultan más altas que aquellas en el caso de correr. Mientras no haya contacto las fuerzas son igual a cero que se ilustra en una función de carga típica en fig. 6. Inclusive cuando se puede observar algunas variaciones en las fuerzas máximas, las cargas resultantes se pueden simular con una precisión suficiente por el nuevo modelo de carga.

En algunas pruebas también ocurrirían fuerzas más altas, las cuales ya no se pueden predecir con el modelo de carga. Sin embargo la mayoría de las cargas aplicadas por las personas en las pruebas experimentales mostraron una buena coincidencia con el nuevo modelo de carga, por eso se verifican sus suposiciones básicas.

3 APLICACIÓN PRÁCTICA

En el caso que una o varias frecuencias propias de un puente peatonal cae dentro del rango crítico de la frecuencia de pasos, se recomienda un análisis numérico de la respuesta dinámica debido a cargas de peatones para su diseño. Si se asume la frecuencia de pasos f_s igual a la frecuencia crítica del puente f_B las cargas que corresponden a peatones que caminan, corren o saltan, se puede determinar de acuerdo a las ecuaciones (3), (4) y (5) cuando se considera el factor de impulso como valor promedio o máximo (fig. 2).

Sin embargo para la aplicación práctica es más conveniente transformar la ecuación (3) en series de Fourier:

$$F(t) = G \cdot \left\{ 1 + \sum_{(i)} a_i \cdot \cos(i \cdot 2\pi f_s \cdot t - \varphi_i) \right\}, \quad (6)$$

donde el peso propio G del peatón se puede asumir igual a 800 N.

Los coeficientes de Fourier para correr y saltar pueden ser determinados en forma analítica. Como se muestra en la fig. 7 resultan en una función del factor de impulso. En todo esto el desprendimiento se considera dentro del movimiento de correr cuando resultan de esta forma fuerzas más altas. Para determinar los ángulos de fase correspondientes se propone aplicar los valores o la fórmula en la tab. 2.

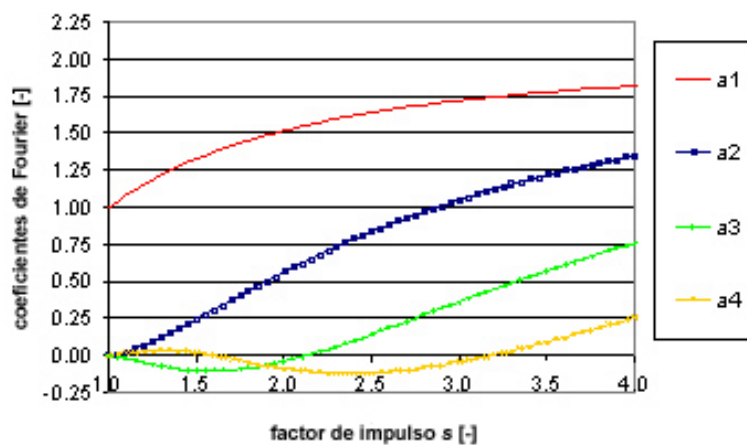


Figura 7: Coeficientes de Fourier en función del factor de impulso para peatones corriendo o saltando

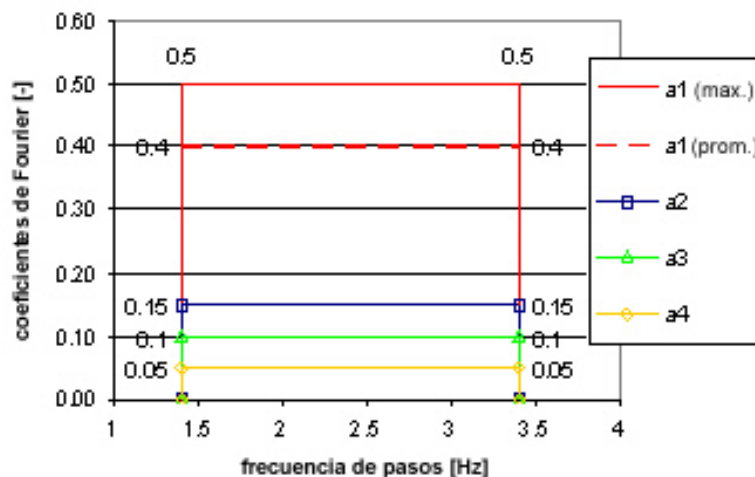


Figura 8: Coeficientes de Fourier máximos y promedios para peatones caminando

Para peatones que caminan ya se evaluaron los coeficientes de Fourier con pruebas experimentales como valores promedios y máximos así como se los muestra en la fig. 8. Los ángulos de fase calculados como valores representativos de los resultados de las pruebas están presentadas en la tab. 2. Desde el punto de vista de la aplicación práctica se proponen los valores promedios de los coeficientes de Fourier para el peatón que camina. También la influencia de varias personas a la vez en el puente debería ser considerada. Para considerar personas que corren o saltan se recomienda aplicar los valores máximos para el análisis. En general alcanza considerar tres componentes de las series de Fourier para simular la carga típica del peatón.

forma del movimiento	frecuencia de pasos [Hz]	a ₁ [-]	a ₂ [-]	a ₃ [-]	a ₄ [-]
caminar (promedios)	1,4 ÷ 3,4	0,4	0,15	0,10	0,05
correr (máximas)	1,9 ÷ 3,4	1,38	0,31	-0,10	0,00
saltar (máximas)	1,3 ÷ 3,4	1,72	1,05	0,36	-0,04

forma del movimiento	ángulo de fase φ_i [rad]			
	i=1	i=2	i=3	i=4
caminar	π	$-\pi/3$	π	$-\pi/3$
correr ($s = 3,0$)	$\varphi_i = i\pi \left(1 + \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{\arccos(-1/s)} \right)^{-1}$			
saltar ($s = 1,6$)				

Tabla 2: Valores propuestos para las frecuencias de pasos, los coeficientes de Fourier y los ángulos de fase para la descripción de las diferentes formas del movimiento

Como en general, solamente una armónica es predominante para la excitación dinámica de los puentes peatonales se puede deducir un método simplificado a través de la solución conocida para un sistema de un grado de libertad. A base de la deformación u_{estat} debido a una carga casi estática $a_i \cdot G$ que corresponde a la frecuencia crítica del puente (a_i conforme a las figs. 7, 8 o la tab. 2) se calcula la respuesta dinámica en términos de la deformación u_{dyn} y la aceleración a_{dyn} para el caso de resonancia:

$$u_{dyn} = m \cdot u_{stat} / (2\zeta_B), \quad a_{dyn} = v_{dyn} \cdot 2\pi f_B. \quad (7)$$

El amortiguamiento estructural ζ_B en general debe ser estimado en el lado seguro, p.e. Tilly et al. (1984), Bachmann (2002), Wheeler (1982). El factor de amplificación m considera la presencia de más de una persona que está transitando por el puente. Ese factor se puede considerar conforme a Masumoto (1987), Bachmann, Ammann (1987) o Wilford (2002), los cuales están compendiados en tab. 3. Si es posible vandalismo o efectos “lock-in” se considerarían valores más altos o en el caso de tránsito menor valores más bajos.

Forma del movimiento del peatón	Factor de amplificación m
caminar	$\sqrt{(\lambda \cdot T_0)^*}$ o $\sqrt{(q \cdot A)^{**}}$
correr / saltar	3

* $\lambda = 0.5 \div 1.5$ por cada metro de ancho, T_0 tiempo promedio para cruzar el puente

** $q = 0.5 \div 1.5$ por m^2 de A , A área peatonal del puente

Tabla 3: Factores de amplificación m para las diferentes formas del movimiento

Cargas horizontales introducidas por peatones se puede considerar p.e. conforme a Eurocode 5 (1999), Bachmann (2002), Harper (1962). Un análisis numérico del puente peatonal puede ser realizado en forma análoga.

Los requerimientos para garantizar las condiciones de operación según los reglamentos nacionales e internacionales, p.e. DIN FB 102 (2003), British Standard 5400 (1987), ISO 10137 (1992), normalmente se refieren a valores límites de aceleraciones que las personas sienten con cierta sensación de incomodidad. Se recomienda rangos permisibles entre 0.5 y 1.0 m/s^2 para oscilaciones verticales y 0.2 m/s^2 para oscilaciones horizontales (tab. 4). Adicionalmente se puede encontrar en la literatura especializada, p.e. Bachmann (2002), valores límites para deformaciones aceptables para evitar los efectos de sincronización “lock-in”.

forma de oscilación	aceleraciones [m/s^2]	deformaciones [mm]
oscilación vertical	$0.5 \div 1.0$	10
oscilación horizontal	0.2	2

Tabla 4: Valores límites recomendados para aceleraciones y deformaciones en función de la forma de oscilación

En el caso que estos requerimientos no se hayan cumplido se recomienda medidas adicionales, p.e. la instalación de amortiguadores de masas sincronizadas.

4 CONCLUSIONES

Sobre la base de un simple sistema no lineal de masa – resorte se presenta un nuevo modelo, el cual, hace posible simular en forma realista cargas dinámicas introducidas por peatones que corren, caminan o saltan. En pruebas experimentales este modelo de carga se podría verificar y los datos característicos y necesarios han sido identificados para describir finalmente las cargas peatonales. Por eso se provee un modelo de carga reliable para ejecutar un análisis dinámico de puentes peatonales debido a cargas inducidas por peatones, ya en la fase de diseño. Al aplicar un análisis de Fourier al nuevo modelo, adicionalmente se provee un método simplificado para estimar la respuesta máxima del puente en caso de resonancia. Entonces aceleraciones y deformaciones máximas pueden ser comparadas con valores límites recomendados por la literatura especializada y estándares para juzgar la sensibilidad dinámica de los puentes peatonales y para decidir si son necesarias las medidas suplementarias.

REFERENCIAS

- Bachmann, H.; Ammann, W.: Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Structural Engineering Documents 3d. Zürich: Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH) 1987
- Bachman, H. et al.: Vibration problems in structures – Practical guidelines. 2nd ed. Basel, Berlin, Boston: Birkhäuser 1997.
- Bachman, H.: “Lively” footbridges – a real challenge. Proc. Footbridge 2002. Paris, France, November 20 – 22, 2002. 18 – 30
- Baumann, K.; Bachmann, H.: Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule. Zürich 1988.
- British Standard 5400: Steel, concrete and composite bridges. Part 2: Specifications for loads. Appendix C: Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges. 1987
- Dallard, P.A. Et al.: The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer Vol.79, No. 22 (2001) 17 – 35
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN-Fachbericht 102 – Betonbrücken. 2. Aufl. Berlin, Zürich, Wien: Beuth 2003
- Eurocode 5: Design of timber structures. Part 2: Bridges. 1999
- Fromonot, F.: Marc Mimram. Passerelle Solferino Paris. Birkenhäuser 2001
- Galbraith, F.W.; Barton, M.W.: Ground Loading from Footsteps. The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 48, No. 5, Part 2 (1970)
- Harper, F.C.: The Mechanics of Walking. Research Applied in Industry Vol. XV, No. 1 (1962)
- ISO 10137: Basis for design of structures. Serviceability of buildings against vibrations. 1992
- Kreuzinger, H.: Dynamic design strategies for pedestrian and wind actions. Proc. Footbridge 2002. Paris, France, November 20 – 22, 2002. 129 – 141
- Matsumoto, Y.; Nishioka, T., Shiojiri, H. & Matsuzaki, K.: Dynamic Design of Footbridges. Proc. IABSE August 1987
- McRobie, A.; Morgenthal, G.: Full-scale Section Model Tests on Human-Structure Lock-in. Proc. Footbridge 2002. Paris, France, November 20 – 22, 2002. 77 – 80
- Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn 1996
- Rainer, J.H.; Pernica, G.; Allen, D.E.: Dynamic Loading and Response of Footbridges. Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 15, No. 66 (1988)
- Seiler, C.; Hüttner, S.: Ein einheitliches Modell zur Beschreibung von Fußgängerlasten für verschiedene Bewegungsarten – Theorie, experimentelle Messungen und praktische Anwendung. Bauingenieur Vol.79 (2004) 483 – 496
- Tilly, G.P.; Cullington, D.W.; Eyre, R.: Dynamic Behaviour of Footbridges. IABSE-Surveys S-26/84. 1984. 13 – 24
- Wheeler, J.E.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges. Journal of the Structural Division ASCE Vol. 108, No. ST9 (1982) 1045 - 1065
- Wilford, M.: Dynamic Actions and Reactions of Pedestrians. Proc. Footbridge 2002. Paris, France, November 20 – 22, 2002. 66 – 73