

**HOCHSCHULE REGENSBURG
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
APLICADAS**

Nuevo modelo uniforme de cargas en puentes inducidas por peatones para diferentes tipos de movimientos – teoría, pruebas experimentales y aplicación práctica

**Christian Seiler, Susanne Hüttner,
Andreas Maurial**

2do. Curso ALEMANIA-MÉXICO-PERÚ
CISMID-FIC-UNI

Contenido

- **Introducción y motivación**
- **Cargas inducidas por peatones – conceptos y modelos**
- **Nuevo modelo consistente de carga peatonal**
- **Aplicación práctica**
- **Conclusiones**

Introducción y motivación

Puentes peatonales:

- Estructuras cada vez más esbeltas con un amortiguamiento bajo (0.2 - 2.0 %)
- Más sensibles a cargas dinámicas inducidas por peatones
- Ejemplos importantes:
 - Millennium Bridge (Londres)
 - Pasarella Solferino (Paris)
 - Puente peatonal en Forchheim (Alemania)



Millennium Bridge en Londres



Passerelle Solférino en Paris



Puente peatonal en Forchheim, Alemania

Introducción y motivación

- Instalación de amortiguadores para reducir las vibraciones intensas
- Problema: el diseño se basa muchas veces solamente en cargas estáticas si se refiere al peatón
- Los reglamentos actualizados recomiendan análisis más refinados y prevén:
 - Cargas dinámicas
 - Rangos de frecuencias críticas
 - Límites admisibles para aceleraciones

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

- Comienzos de descripción de los movimientos de animales por Aristoteles (384 – 322 a.c.)
- Análisis y medición de movimientos humanos en forma más exacta a partir del siglo XIX, p.e. con la ayuda de la cronofotografía.
- Hoy es la denominada Biomecánica que tiene como tema central el análisis de movimientos humanos. Sus principales contribuciones son para la Medicina y el Deporte. Además da la base para la descripción de cargas peatonales.

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

- Existen muy pocos modelos para la descripción de cargas inducidas por peatones.
- Estos modelos se basan en resultados de pruebas experimentales o son empíricos.
- Todos se basan en la aproximación senoidal y parcialmente con diferentes modelos para „caminar“, „correr“ y „saltar“.
- Aunque los modelos no son consistentes permiten análisis dinámicos más exactos

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Descripción matemática:

$$P(t, x) = F(t) \cdot \Phi(x)$$

$F(t)$ = función de la carga que varía en el tiempo

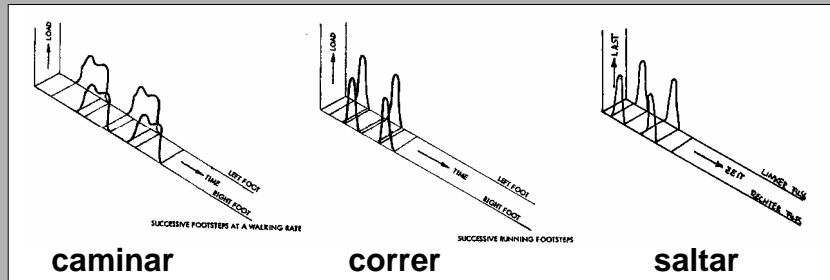
$\Phi(x)$ = función del lugar de aplicación

Ejemplo: velocidad del peatón $v =$ constante \Rightarrow

$$x = v \cdot t \quad \text{y}$$

$$P(t) = F(t) \cdot \Phi(t)$$

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos



Cargas peatonales asociadas al tipo de movimiento

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Caminar

Descripción según Kramer o Matsumoto:

$$F(t) = W + \Delta W \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Kramer:

- Ninguna información sobre la carga dinámica ΔW

Matsumoto:

- Trabaja con una velocidad del peatón $v = \text{const.}$,
- Carga dinámica $\Delta W = 0.342 \cdot W$ (en un ejemplo),
- Frecuencia de pasos $f_s = 2 \text{ Hz}$

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Caminar

Descripción según Petersen:

$$\Delta F(t) = m_s \cdot \hat{y}_s \cdot \omega_s^2 \cdot \text{sen}(2\pi f_s \cdot t)$$

La componente vertical del carga dinámica considera:

\hat{y}_s = la amplitud del punto de gravedad del cuerpo,
 f_s = frecuencia típica de pasos.

Ejemplo: $\hat{y}_s = 0.025 \text{ m}$, $f_s = 2.0 \text{ Hz}$

$\Rightarrow \Delta F(t) = \text{aprox. } 40 \% \text{ del peso propio}$

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Caminar

Descripción según Bachmann:

$$F(t) = G + \sum_{(i)} \Delta G_i \cdot \text{sen}(i \cdot 2\pi f_s \cdot t - \varphi_i)$$

Aproximación con 3 armónicas suficientemente exacto

Tipo de movimiento	$\Delta G_1/G$	φ_1 [rad]	$\Delta G_2/G$	φ_2 [rad]	$\Delta G_3/G$	φ_3 [rad]
caminar	0.4	0.00	0.1	1.57	0.1	1.57
correr	1.6	0.00	0.7	0.00	0.2	0.00
saltar	1.7	0.00	1.1	1.73	0.5	1.73

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Correr:

Modelo semisenoidal según Bachmann:

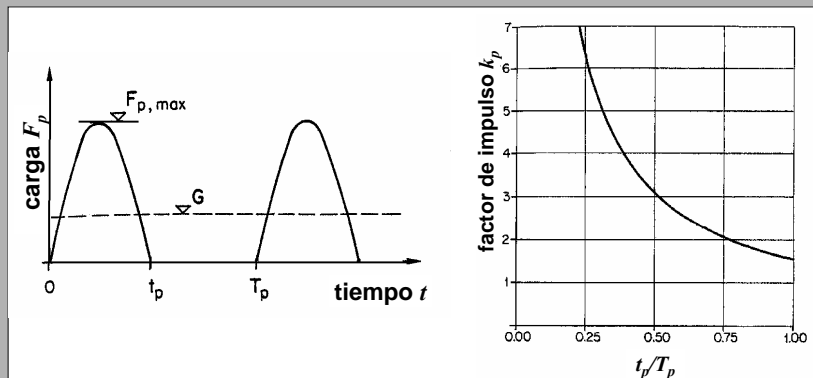
$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{t_p} t\right) & \text{para } t < t_p \\ 0 & t_p < t \leq T_p \end{cases}$$

Factor de impulso: $k_p = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{t_p/T_p}$

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

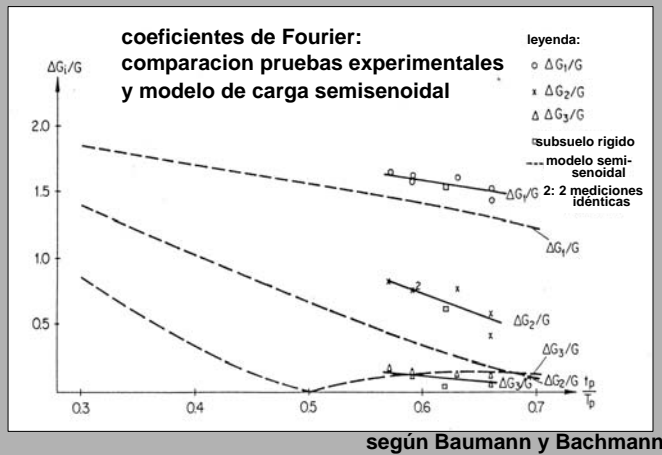
Correr

Modelo semisenoidal según Bachmann:



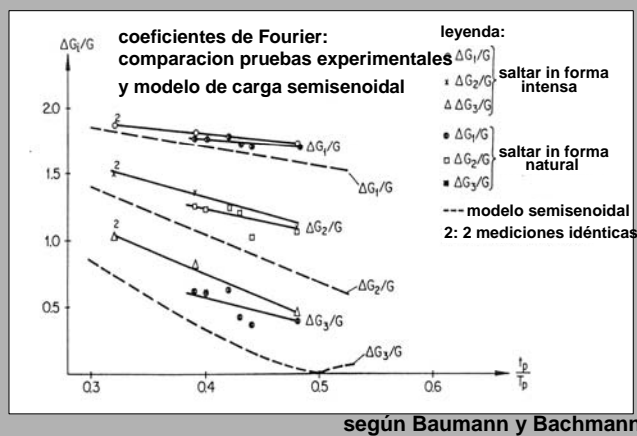
Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Correr



Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Saltar = carga estacionaria



Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Influencia de mayor cantidad de peatones

- Amplificación del peso de peatón (un peatón con aprox. 800 N o 80 kg)

¿Cuántos peatones se deben considerar?

¿Cuántos de ellos se mueven en forma sincronizada y todavía dentro del rango crítico del puente?

- Número total de peatones sobre el puente:

$$n = \lambda \cdot T_0 \quad \circ \quad n = q \cdot A$$

con λ = cantidad de peatones que ingresan por segundo,
 T_0 = tiempo necesario para cruzar el puente,
 q = densidad del tránsito peatonal y
 A = área peatonal del puente.

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Influencia de mayor cantidad de peatones

- según Matsumoto y Bachmann/Ammann:
 $\lambda = 1.0 - 1.5$ pers./s por metro de ancho del puente
- según mediciones de Kreuzinger/Grundmann:
 $\lambda = 1.0 - 2.3$ pers./s en un puente de 5 m de ancho
- el tiempo T_0 se determina a base del largo del puente y una velocidad media del peatón.
- según Wilford: $\max q \approx 1.5$ pers./m²
- Para el peatón que camina con una velocidad media de 1.0 - 1.5 m/s las dos relaciones para la cantidad límite n de peatones sobre el puente son equivalentes.

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Influencia de mayor cantidad de peatones

- factor de amplificación del peso de peatón que camina (según Matsumoto):

$$m = \sqrt{n}$$

(condiciones normales conforme a la probabilidad de Poisson)

- en el caso de una probabilidad alta que los peatones caminen sincronizados, de un efecto “lock in” o de vandalismo:

$$m = \sqrt{n} - n$$

- para peatones que corren o saltan (según Bachmann):

$$m = 3$$

(pero el escenario depende de la ubicación del puente)

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Normatividad alemana

DIN Fachbericht 101: Solicitaciones sobre puentes

- Cargas vivas inducidas por peatones se considera como cargas estáticas de 5 kN/m² (2.5 kN/m²).
- En el caso de puentes peatonales se advierte la posibilidad de vibraciones inducidas por peatones.
- Se investigarán las vibraciones causadas por peatones que caminan, corren o saltan.

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Normatividad alemana y europea

DIN Fachbericht 102: Puentes de concreto (BS 5400)

- Aceleración vertical máxima del puente debida a carga aleatoria que se mueve con una velocidad constante sobre el tramo central del puente:

$$F(t) = 180 \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) \text{ [N]}, \quad v = 0,9 \cdot f_0 \text{ [m/s]}$$

con la frecuencia de pasos f_0 igual a la frecuencia crítica del puente f_B .

- Valor límite para la aceleración vertical: $0,5 \cdot \sqrt{f_B}$
con la frecuencia crítica del puente f_B
(p.e. con $f_0 = 2,0 \text{ Hz} \Rightarrow$ aceleración máxima admisible de 0.70 m/s^2)

Cargas inducidas por peatones - conceptos y modelos

Normatividad internacional

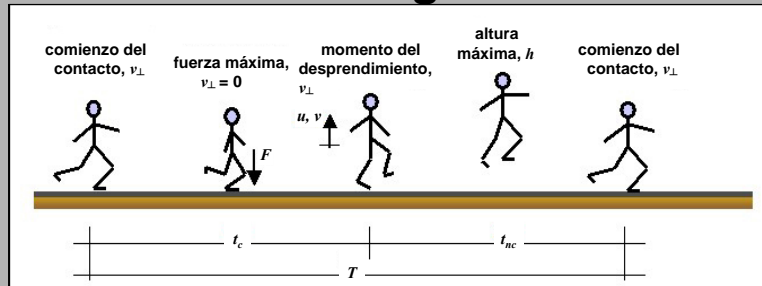
Ontario Highway Design Code (Canadá):

- Valor límite para la aceleración vertical: $0,25 \cdot f_B^{0,78}$
(p.e. con $f_0 = 2,0 \text{ Hz} \Rightarrow$ aceleración máxima admisible de 0.43 m/s^2)

Eurocode 5: Estructuras de madera, Parte 2: Puentes

- Carga aleatoria con la amplitud máxima de 280 N
- Dentro del rango típico para las frecuencias de pasos f_0 se permite aceleraciones verticales de 0.5 hasta 1.0 m/s^2 o como valores límites en dirección vertical de 0.7 m/s^2 y en dirección horizontal de 0.2 m/s^2 .
(también ISO 10137: Basis for design of structures)

Nuevo modelo consistente de carga



Modelo de descripción del movimiento peatonal: sistema de masa y resorte que trabaja solo en compresión

intervalo de contacto t_c :

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

(conservación de impulso)

intervalo de no contacto t_{nc} :

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

(conservación de energía)

Nuevo modelo consistente de carga

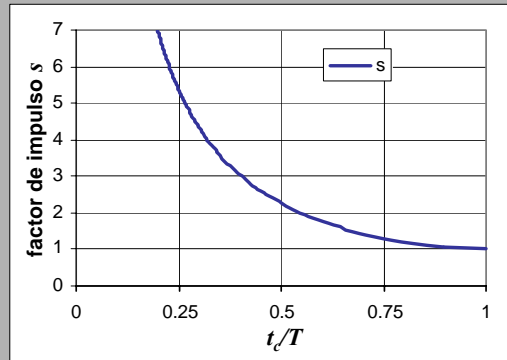
Funciones de carga:

$$s \leq 1: F(t) = G \cdot [1 + s \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)]$$

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

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

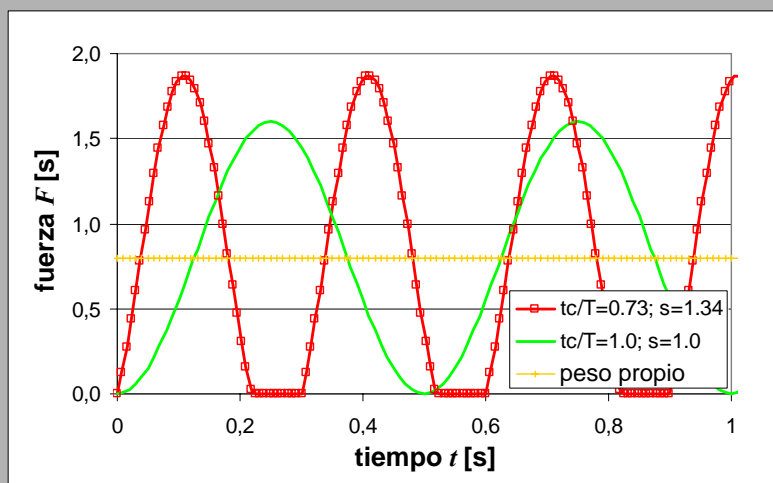
Nuevo modelo consistente de carga



Factor de impulso s :

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

Nuevo modelo consistente de carga



Nuevo modelo consistente de carga

Pruebas experimentales y validación del modelo



Plantillas especiales con 64 sensores de presión en cada una de ellas

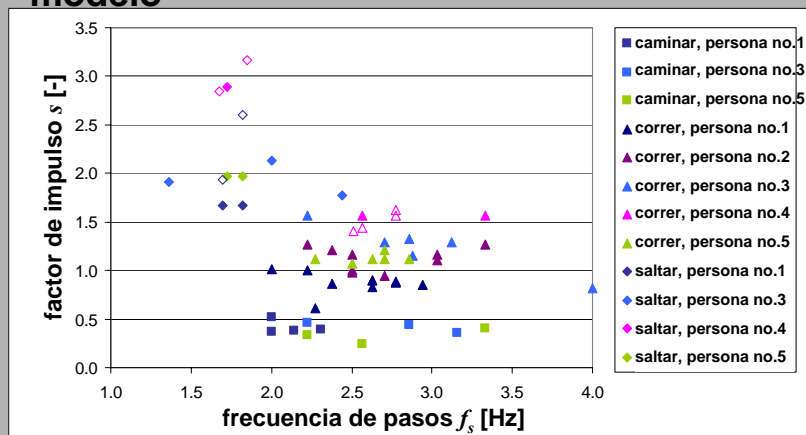
Medición con una frecuencia de exploración de 60 Hz

Transmisión de datos via radio directamente a la computadora

Fa. T & T medilogic Medizintechnik GmbH

Nuevo modelo consistente de carga

Pruebas experimentales y validación del modelo



Nuevo modelo consistente de carga

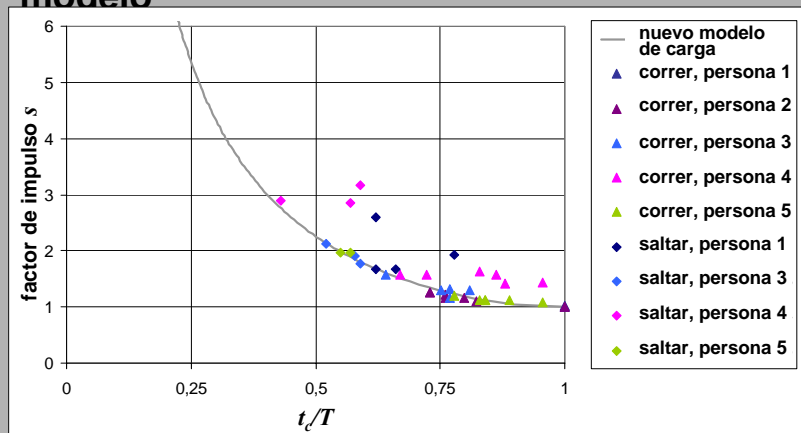
Pruebas experimentales y validación del modelo

Factor de impulso: $s = (F_{max} - G)/G$ (Definición para las pruebas experimentales)

forma de movimiento	frecuencia de pasos f_s [Hz]	factor 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

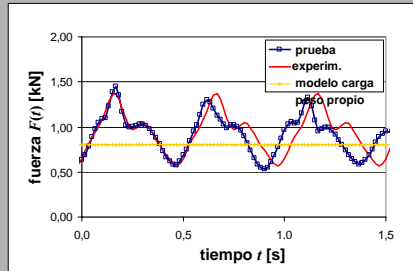
Nuevo modelo consistente de carga

Pruebas experimentales y validación del modelo

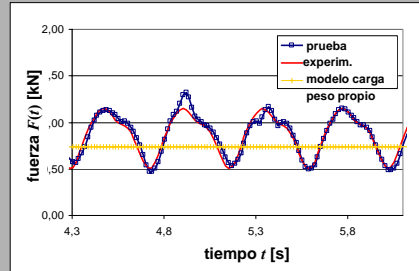


Nuevo modelo consistente de carga

Pruebas experimentales y validación del modelo
 caminar: descripción de las fuerzas



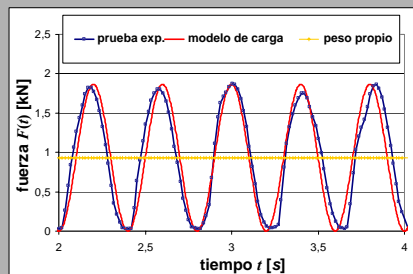
$f_s = 2.0 \text{ Hz}$



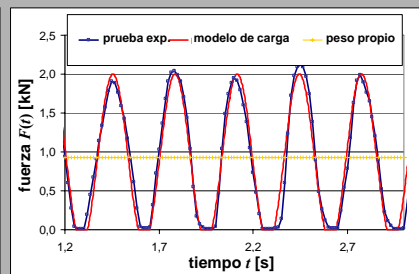
$f_s = 2.33 \text{ Hz}$

Nuevo modelo consistente de carga

Pruebas experimentales y validación del modelo
 correr: descripción de las fuerzas



factor de impulso $s = 1.0$
 $(f_s = 2.5 \text{ Hz})$

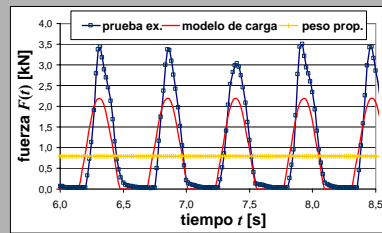
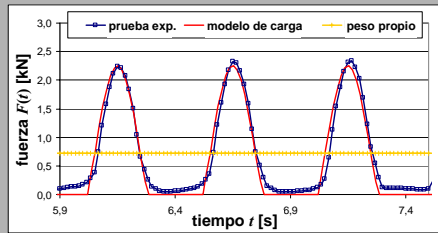


factor de impulso $s = 1.15$
 $(f_s = 3.0 \text{ Hz})$

Nuevo modelo consistente de carga

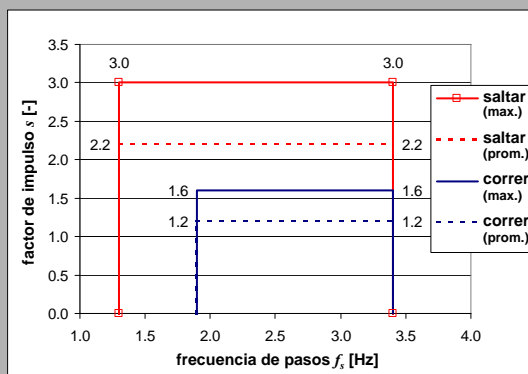
Pruebas experimentales y validación del modelo

Saltar: descripción de las fuerzas



Aplicación práctica

Factores de impulso (promedios y máximos)

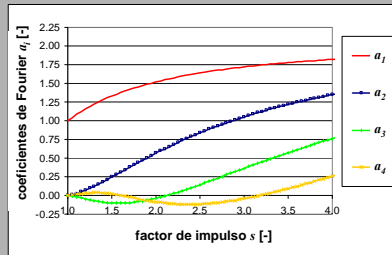


correr y saltar

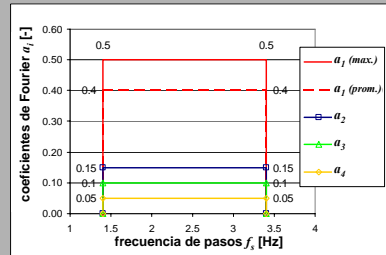
Aplicación práctica

Descripción de las cargas peatonales por series de Fourier:

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



correr y saltar



caminar

Aplicación práctica

Propuesta para las frecuencias de pasos, los coeficientes de Fourier y los ángulos de fase conforme a las diferentes tipos de movimiento:

Tipo de movimiento	frecuencia de pasos f_s [Hz]	a_1 [-]	a_2 [-]	a_3 [-]	a_4 [-]
caminar (promedios)	1,4 + 3,4	0,4	0,15	0,10	0,05
correr (máximos)	1,9 + 3,4	1,38	0,31	-0,10	0,00
saltar (máximos)	1,3 + 3,4	1,72	1,05	0,36	-0,04

Tipo de movimiento	ángulo de fase φ_i [rad]			
	i=1	i=2	i=3	i=4
caminar	π	$-\pi/3$	π	$-\pi/3$
correr (s = 1.6)	$\varphi_i = i\pi \left(1 + \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{\arccos(-1/s)} \right)^{-1}$			
saltar (s = 3.0)				

Aplicación práctica

Método simplificado para la evaluación dinámica

- Obtener las frecuencias propias del puente.
- Calcular el desplazamiento estático u_{stat} debido a una carga de amplitud $a_i \cdot G$ que *corresponde a la frecuencia crítica* f_B .
- Calcular la respuesta máxima en el caso de resonancia suponiendo una carga de peatón dinámica estacionaria en el lugar más desfavorable del puente:

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

- El amortiguamiento ζ_B debe estimarse de manera conservadora. Con el factor de amplificación m se considera la presencia de más de una persona en el puente conforme al escenario esperado.
- Analizar la dirección horizontal en forma análoga.
- Comparar con los requerimientos para el estado de operación.

Aplicación práctica

Tipo de movimiento	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 metro de ancho del puente, T_0 = tiempo promedio para cruzar el puente
 ** $q = 0.5 \div 1.5$ por m² de área peatonal del puente, A = área peatonal del puente

dirección de vibración	aceleraciones [m/s ²]	deformaciones [mm]
vertical	0,5 - 1,0	0,2
horizontal	10	2

Conclusiones

- Se desarrolló un modelo consistente que simula en forma realista las cargas dinámicas inducidas por peatones que corren, caminan o saltan.
- Este modelo se verificó con pruebas experimentales y de esta manera, el modelo propuesto puede ser utilizado para estimar la respuesta dinámica en puentes peatonales ante estas solicitaciones.
- A partir de análisis de Fourier, se propone un método simplificado que estima la respuesta máxima del puente en caso de resonancia.
- Las aceleraciones y deformaciones máximas pueden ser comparadas con los valores límite en los reglamentos y la literatura especializada.

**¡Muchas gracias
por la atención prestada!**



*Illuminierte Steinerne Brücke
Bild: M. Reichl, OSRAM Opto Semiconductors*