



“ANÁLISIS DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR EL TRÁNSITO PEATONAL: EXCITACIÓN SINCRÓNICA”

Autor: Guillermo Huaco C.

INTRODUCCIÓN

Debido al paso de los peatones por un puente peatonal u otra estructura similar, se producen efectos debido a la vibración lateral, longitudinal, transversal y/o torsional. Los desplazamientos y aceleraciones inducidos por estas vibraciones hay que tenerlos en cuenta para el diseño adecuado de estas estructuras. Se transmiten fuerzas verticales sincronizadas con periodo de su ritmo de paso, fuerzas laterales y longitudinales debido a la fricción existente entre el calzado con la losa del puente, y momentos de torsión debido a una posible excentricidad entre el eje del puente y la línea por donde circula el peatón. En esta investigación se desarrolló el programa de cómputo PUENTE, que permite el cálculo de los efectos de vibración producidos por los peatones. Los resultados obtenidos son analizados en el presente artículo.

ANTECEDENTE: EL PUENTE DEL MILENIO

Se tiene el antecedente del Puente del Milenio (Millennium Bridge), ubicado en Londres-Inglaterra. Dicho puente peatonal al ser inaugurado y al pasar los peatones por su plataforma, un estimado de 80000 a 100000 personas, se observaron aceleraciones laterales no esperadas, muy sensibles para los peatones, teniendo que cerrar el puente para su evaluación y posterior reforzamiento. Como toda estructura, el Puente del Milenio estaba diseñado para un nivel esperado de movimiento. Sin embargo, cuando grupos

numerosos de personas cruzaban dicho puente, ocurrieron movimientos laterales mayores a los previstos. El desplazamiento máximo de la plataforma fue de 70mm.

Este nivel de vibración no estaba previsto en el diseño del puente. Este movimiento excesivo debido a la vibración podría ocurrir en otros puentes, existentes o por construir, para una frecuencia lateral debajo de 1.3 Hz y con un número suficiente de peatones.

ARUP [3] descubrió que otros puentes con estructuras diferentes al puente del Milenio han experimentado vibraciones laterales importantes cuando han estado congestionados. Por ejemplo, el puente del camino del puerto de Auckland durante una demostración en 1975. Estos casos no se han publicado extensa y consecuentemente, por lo cual el fenómeno no es muy conocido.

FENOMENO DE EXCITACIÓN SINCRONICA

Cuando se camina, además del peso del peatón, se genera un patrón de fuerzas repetidas mientras la masa se levanta y cae. Esto crea una fuerza que fluctúa vertical de alrededor 250 N que se repite en cada paso. Hay también una fuerza oblicua pequeña causada por el sacudimiento de nuestra masa pues nuestras piernas están levemente separadas. Esta fuerza, de alrededor 25 N, se dirige a la izquierda cuando se apoya en el pie izquierdo y a la derecha cuando se apoya en el pie derecho y las repeticiones se producen con cada paso sucesivo. El equilibrio no se afecta

significativamente por los movimientos verticales, pero los movimientos oblicuos no se toleran demasiado. Si la superficie donde se camina empieza a oscilar, se pone el pie un poco más separado del otro para buscar la estabilidad y la fuerza (lateral) oblicua aumenta. Esta tendencia hacia la sincronización tiene el efecto que cada paso que comienza a actuar hace que aumente el movimiento de la plataforma. Mientras que el movimiento aumenta, se camina con el mismo período de movimiento de la superficie. También se tiende a ensanchar la postura y así se aumenta la fuerza lateral. Con una cantidad mayor de personas, se multiplica este efecto. Los patrones individuales de la respuesta varían, pero la mayoría de la muchedumbre interactúa con la superficie y desarrolla un movimiento lateral sincronizado. Este fenómeno se refiere como excitación sincrónica, el cual está ilustrado en la Figura 1.

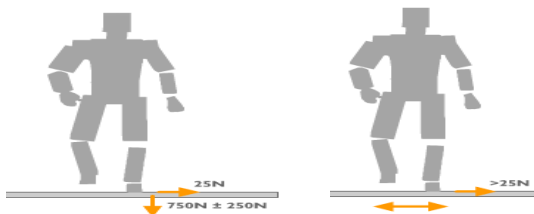


Figura 1. Fuerza vertical y transversal debido a fricción (izquierda), y lateral producida por el peatón (derecha) [3].

VIBRACIÓN PRODUCIDA POR LAS PERSONAS

La vibración inducida por las personas, la cual es causada por el caminar de los peatones, se puede representar como una fuerza móvil. Acorde a varios estudios, [1], [4], [5], la frecuencia de esta vibración es de 2 Hz con una desviación estándar de 0.175. En esta investigación la variación de la fuerza vertical considerada se muestra en la Figura 2.

Los efectos longitudinales horizontales son simulados a través de la fuerza de fricción entre la persona y la platea. Esta fuerza horizontal se considera como una función de

fuerza vertical y del coeficiente de fricción entre el calzado y la plataforma (μ). Figura 3.

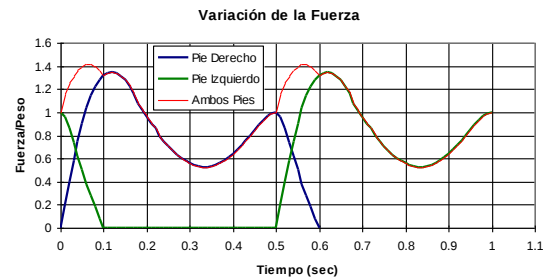


Figura 2. Función de la fuerza producida por el paso de los peatones. (Adaptado de [1])

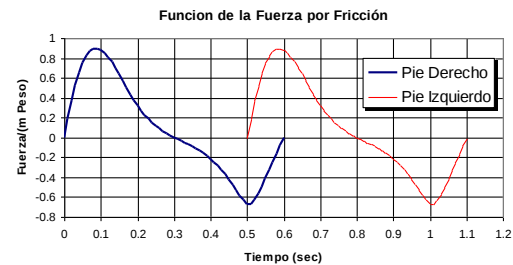


Figura 3. Función de la fuerza de fricción considerada.

SOFTWARE PUENTE

Para obtener los efectos de vibración inducidos por el tránsito de peatones se desarrolló un programa de cómputo de entorno gráfico: PUENTE, que lleva a cabo un análisis modal tiempo historia usando los desplazamientos modales de la estructura obtenidos por otros programas de cómputo como preprocesador. PUENTE permite la obtención de los valores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los 6 grados de libertad de cada nudo de la plataforma del puente, conforme los peatones van caminando a través de este, es decir, con el efecto de la excitación sincrónica. Se puede llevar a cabo la simulación con diferentes números de personas, su ritmo de caminata, así como las distancias entre peatón y peatón. El entorno se muestra en la Figura 4.

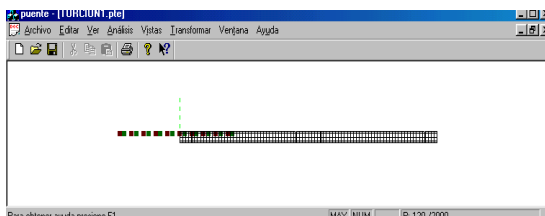


Figura 4. Ventana del programa Puentes, ejecutándose para la excitación del modo torsional (obsérvese la excentricidad de la carga con el eje central de la plataforma).

VALORES DE ACELERACIÓN TOLERABLES

Los niveles de aceptación de la vibración dependen de la susceptibilidad humana. Puede que el efecto producido por las personas al puente no sea de consideración para su estructura, pero si para la susceptibilidad del peatón.

El Código de Diseño Británico [1] permite una aceleración límite a la susceptibilidad humana de

$$A_{\text{limit}} = 0.5 f_1^{0.5} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (1)$$

Para frecuencias f_1 (en Hz) menores que 5 Hz.

Para el Código Canadiense de puentes, el límite de aceleración de servicio es:

$$A_{\text{limit}} = 0.25 f_1^{0.785} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2)$$

CASO DE PUENTE PEATONAL EN LIMA, PERÚ

Para poder estudiar este fenómeno de vibración se analizó un puente peatonal ubicado en la ciudad de Lima. Está conformado por dos tramos con luces de 21 metros cada uno. Cada tramo está articulado en los dos extremos a 2m de cada pilar. Los dos pilares extremos son de forma circular en sección transversal con una altura de 7m, y el pilar central de forma ovalada, Figura 5.

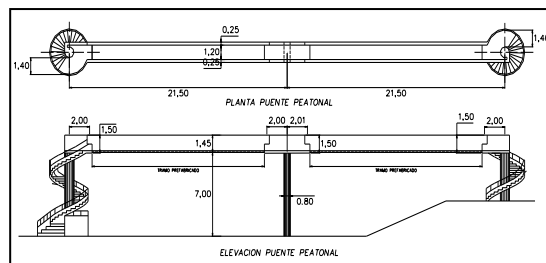
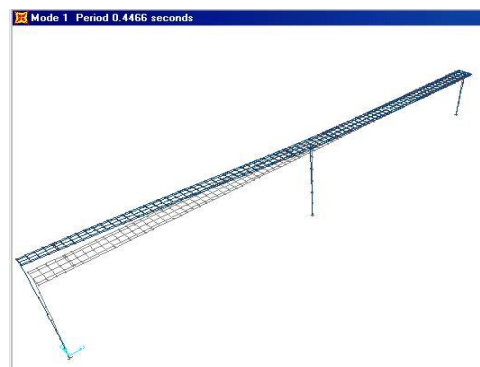


Figura 5. Esquemas del puente peatonal analizado.

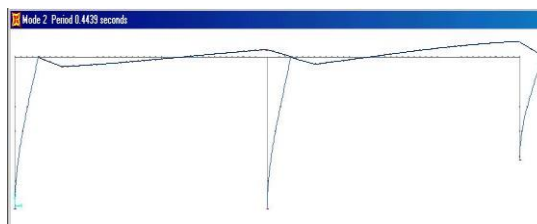
Tabla 1. Periodos y frecuencias del puente analizado.

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (seg)
M1 Transversal	2.239	0.447
M2 Lateral	2.253	0.444
M3	3.293	0.304
M4	3.336	0.300
M5 Vertical	4.012	0.249
M6	5.313	0.188
M7 Torsional	7.473	0.134

a)



b)



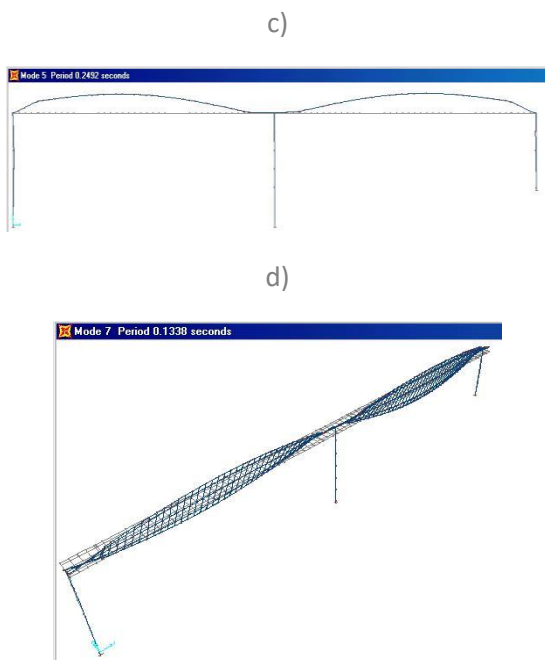


Figura 6. Modos de Vibración: a) primer modo (transversal), b) segundo modo (longitudinal), c) quinto modo (vertical), d) séptimo modo (torsional).

Para las aceleraciones límites asociadas con el Puente analizado se tiene la Tabla 2.

Tabla 2. Aceleraciones Límites.

Frecuencia (Hz)	Aceleración Límite (cm/seg ²)	
	Ecuación 1	Ecuación 2
2.239	74.815	47.067
2.253	75.045	47.295
4.012	100.155	74.407
7.473	136.68	121.23

Buscando encontrar las máximas respuestas de la estructura (resonancia), se sometió el puente analizado a los periodos asociados a los movimientos transversal, lateral, vertical y torsional. Se muestra el efecto de amplificación de respuestas cuando la frecuencia de excitación debido al tránsito peatonal se acerca a la frecuencia de vibración de la estructura. Si se aumenta la masa, o si la configuración estructural del puente es diferente, el periodo de los peatones puede llegar a alcanzar algunos de los periodos de los modos de la estructura, presentándose este fenómeno de resonancia. Se analizó la estructura para el paso de una

persona y para 50 personas simulando el flujo continuo de personas con el mismo ritmo de caminata. Los gráficos presentados corresponden al análisis con carga unitaria (Fuerza/Pesopeatón=1), la respuesta de la estructura será igual al valor mostrado multiplicado por el peso promedio del peatón.

Para el programa PUENTE, se usaron cargas unitarias para el análisis estructural, donde el peso de cada peatón es equivalente a una unidad de fuerza, esto para después calcular los valores de las respuestas para diferentes pesos promedios de los peatones para el estado elástico de los materiales.

Se presentan las respuestas del análisis tiempo-historia en Figura 7. Tiempo cuando se encuentra la mayor amplitud de respuesta en cada caso es también presentado.

En la Tabla 3 se resumen las máximas respuestas en desplazamiento y aceleración para el paso de 1 persona y 50 personas, donde el peso de cada peatón es de 60kg, pero para casos de amortiguamiento de 0% y 5%.

Tabla 3. Comparación de desplazamientos y aceleraciones para diferentes valores de amortiguamiento viscoso para un peso de peatón de 60 kg.

Periodo Modal	Amortiguamiento b=0%			
	Transversal	Lateral	Vertical	Torsión
1 persona				
Desplazamiento(cm)	0.254	0.242	0.856	0.00042 rad
Aceleración(gals)	50	48	59	0.944 rad/seg ²
50 personas				
Desplazamiento(cm)	12	12	4.28	0.0152 rad
Aceleración(gals)	2390	2420	2920	33 rad/seg ²

Periodo	Amortiguamiento b=5%			
	Transversal	Lateral	Vertical	Torsión
1 persona				
Desplazamiento(cm)	0.055	0.0146	0.0127	0.0000429 rad
Aceleración(gals)	9.06	2.93	5.39	0.0713 rad/seg ²
50 personas				
Desplazamiento(cm)	0.461	0.317	0.0913	0.0004 rad
Aceleración(gals)	77.6	63.2	75.4	0.703 rad/seg ²

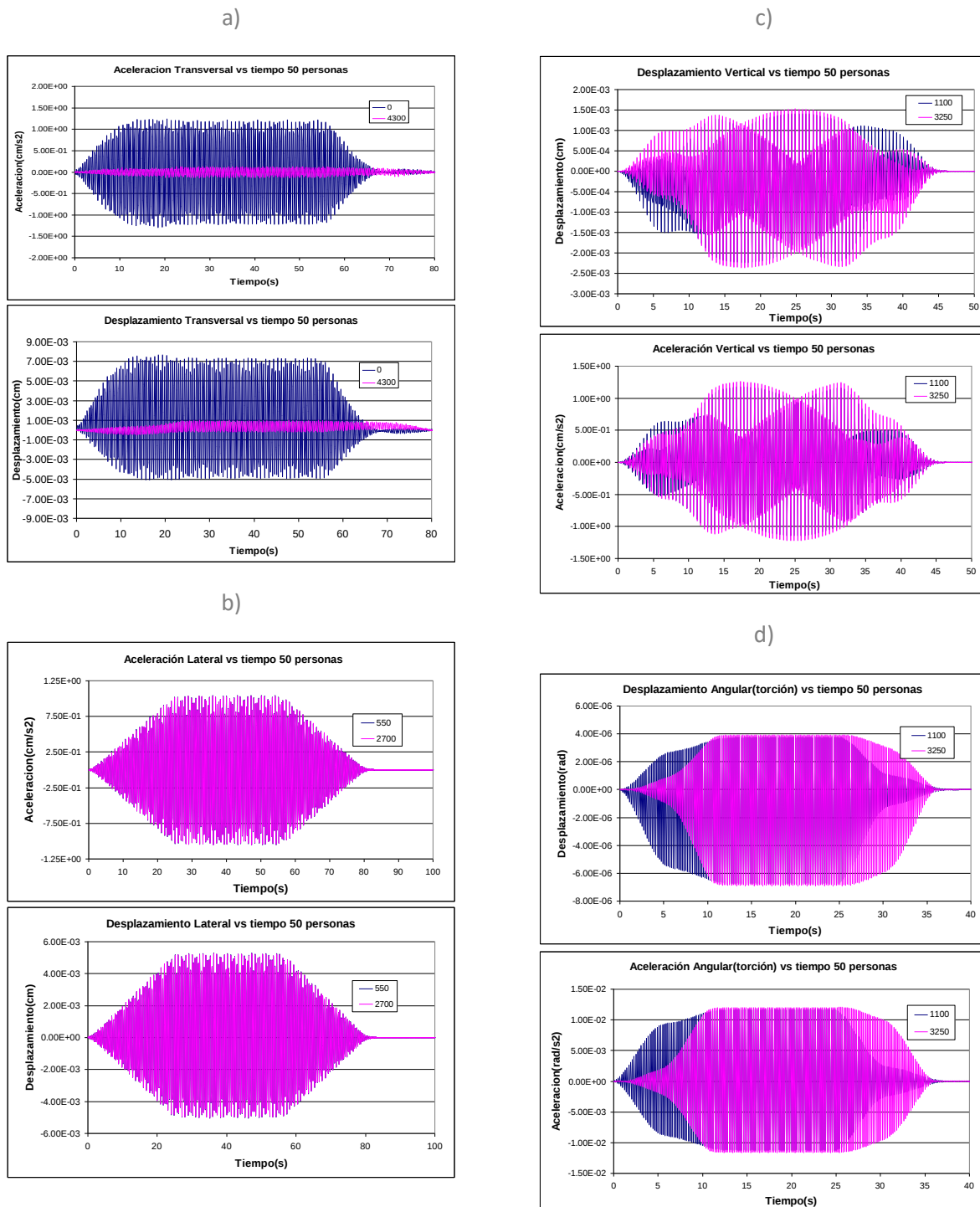


Figura 7. Desplazamientos y aceleraciones 50 personas, $\beta=5\%$.: a) primer modo (transversal), b) segundo modo (longitudinal), c) quinto modo (vertical), d) séptimo modo (torsional).

Se puede notar que la aceleración transversal, lateral y vertical para el paso de 50 personas y amortiguamiento elástico de 5%, sobrepasan los límites establecidos en los códigos de diseño canadienses, pero para los códigos británicos están cerca de no cumplir sus requerimientos. Para el caso de aceleración torsional, los valores están por debajo de los límites.

CONCLUSIONES

Los efectos producidos por los peatones en un puente se deben de tomar en cuenta, puesto que, si el periodo del paso de las personas es similar al del puente, se puede llegar a la resonancia. El puente no necesariamente puede ser peatonal, sino cualquier otro que tenga algún periodo modal que sea similar al paso de las personas. Casos como poca rigidez, mayor masa, características de puentes peatonales, o plataformas de paso de peatones en las alas laterales de puente vehiculares se presentan.

La vibración es causada por el paso de los peatones es mínima para el caso de un solo peatón sin embargo para el caso de un flujo de personas caminando al mismo ritmo las vibraciones inducidas van creciendo, llegando a niveles que pueden sugerir inseguridad en las personas que van cruzando el puente. Para niveles de amortiguamiento pequeño los desplazamientos y aceleraciones inducidas son bastante elevadas. En algunos casos será necesario incluir en el puente algunos elementos mecánicos que disipen la energía de tal manera de controlar los efectos producidos por el tránsito de las personas.

Los diseñadores de puentes deben de tomar en cuenta este fenómeno, cuyo cuidado es mayormente de percepción de los peatones. Existen antecedentes que muestran estos efectos de las vibraciones como el caso del Puente del Milenio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bachmann, Hugo, et al, (1995) Vibration Problems in Structures, Birkhauser, Berlin.
2. Biggs, John (1964) Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York.
3. Fitzpatrick, Tony et al (2001) "Linking London, The Millennium Bridge", The Royal Academy of Engineering, London.
4. Tilly, G, Cullington, D., Eyre, R. (1984) Dynamic Behavior of Footbridges, IABSE Surveys S-26/84, pp 13-24.
5. Wheeler, John (1982) "Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges", Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No ST9, pp.2045-2065.

EL AUTOR

GUILLERMO HUACO CÁRDENAS, Ingeniero Civil egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería. Profesor del pregrado en la Universidad Peruana de Ciencias (UPC) y del Post grado en la Universidad Nacional de Ingeniería y Universidad Peruana de Ciencias (UPC). Asesor Externo de ConsultCreto S.A.C, Consultor en Ingeniería Estructural. Miembro del comité 369 del ACI - USA y del Earthquake Engineering Research Institute EERI. Ha recibido su maestría en Ingeniería Civil en la Universidad de Texas en Austin, EE. UU. PhD en la Universidad de Texas en Austin, EE. UU., Ingeniería Civil / Ingeniería Estructural.

