

Fórmulas analíticas de frecuencias fundamentales para edificios de concreto armado en Perú. Evidencia de impacto del sismo de 1974

B. Guillier^(1,2), H. Tavera⁽²⁾, J.-L. Chatelain⁽¹⁾, C. Michel⁽³⁾, B. Herrera⁽²⁾, H. Perfettini^(1,2)

⁽¹⁾ IRD-ISTerre (formerly LGIT), Université J. Fourier, CNRS, Grenoble, France

⁽²⁾ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Peru

⁽³⁾ ETHZ-Swiss Seismological Service, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, Switzerland

Resumen

Dentro de los parámetros dinámicos usados por los códigos sísmicos o para diseñar los edificios, el más importante es probablemente la frecuencia fundamental elástica. Si para los edificios nuevos, modelizaciones pueden dar una idea de este parámetro, para edificios antiguos es casi imposible modelar ya que no se conoce lo suficiente de los parámetros tal como el coeficiente de Poisson, o el espesor de las barras de hierro ni tampoco el conocimiento íntimo de los materiales que componen el edificio. Una nueva alternativa, bien documentada a nivel internacional, es el uso de microtrepidaciones, aunque los resultados de este método dan frecuencias fundamentales un poco más altas que cuando se estudia un edificio usando registros de sismos. La principal ventaja del método de microtrepidación es la posibilidad de tener numerosos datos, lo que permite un tratamiento estadístico de los mismos. Aquí, presentamos los resultados de un estudio que se llevó a cabo en 23 hospitales de Lima, entregando 396 medidas que se tomaron en 204 edificios construidos en concreto armado con relleno de mampostería. Además, en estos hospitales limeños, se tiene la altura en pisos, los tamaños horizontales tal como la edad de construcción (cuando es posible). El tratamiento estadístico de estos datos permite demostrar que el factor principal que controla la frecuencia elástica es el tamaño vertical cuando las extensiones no entran claramente en cuenta. Finalmente, este estudio subrayó el impacto de la edad de los edificios en sus comportamientos.

Historia

A fin de determinar la geometría que debían tener las estructuras japonesas para resistir mejor a los sismos, Omori [inicio del siglo XX, 1 – 2] usó las microtrepidaciones, como complemento a los registros de sismos. Así, en 1922, Omori tuvo la idea de comparar los registros obtenidos en el “Marunouchi Building” de Tokyo durante su construcción, después del sismo del 26 de abril de 1922 y luego durante la rehabilitación del edificio. A partir de ese momento, numerosas aplicaciones aparecieron, pero el interés y el desinterés alternaron, dependiendo del desarrollo de material más preciso, o con la llegada de medios de cálculo más poderosos. En los años 90 se volvió a trabajar con las microtrepidaciones en los edificios dado a la mejora de los instrumentos de medida que permitían de un lado, hacer medidas en numerosas estructuras, y del otro, hacer medidas permanentes para seguir la evolución de las características dinámicas de las estructuras en el tiempo (Structural Health Monitoring). Eso se justifica también por la complicación de los edificios recientes.

En los años 60, Crawford y Ward [3 – 4] auscultaron varios edificios, demostrando la posibilidad de obtener los modos de vibraciones de las estructuras. En los 80, se realizaron numerosos estudios en edificios [5], en puentes [8] o en estructuras off-shore [9], confirmando el enorme campo de aplicación de esta técnica.

Introducción

Numerosos parámetros controlan en comportamiento físico de un edificio (aceleración, suelo, tipo de materiales de construcción, calidad de construcción, diseño de la estructura...), pero el principal parámetro que controla la respuesta estructural es la frecuencia fundamental elástica [FFE] (usada en sismología) o su inverso, el periodo fundamental elástica [PFE] (usado en ingeniería civil). In situ, esta FFE se puede determinar (i) por métodos dinámicos como excitación armónica o percusión del edificio [10], (ii) por registros de sismos a dentro de la estructura [9] o por método pasivo de microtrepidaciones [8 – 10 – 11 – 12] o por medidas LIDAR. En mayo del 2010, un estudio se llevó a cabo en los hospitales de Lima y Callao (figura 1) dentro del proyecto SIRAD [13] financiado por el PNUD.



Figura 1: Ejemplos de edificios estudiados. Edificios construidos: A- en los años 1930 (Loayza, 1930); B- en los años 1950 (Rebagliati, 1956); C- en los años 90 (Sabogal, 1990) y D: en los años 2000 (Marino Molina, 2009).

Por este estudio, el NS del sismómetro fue orientado según la dirección, la más grande del edificio (dirección longitudinal) cuando el EW del sensor se ponía paralelamente al ancho del edificio (dirección transversal), la grabación siendo de 15 minutos a una frecuencia de 200 muestras por segundo. La colecta de los datos se hizo por dos estaciones CityShark equipadas de sismómetros Lennartz LE3D-5 sec que se consideran como una buena combinación por este tipo de estudio [14].

Códigos sismorresistentes

En diseños sismorresistentes, el parámetro clave es el periodo elástico (o su inverso, la frecuencia elástica fundamental). Los factores que pueden afectar al periodo elástico son (i) la non-linealidad, supuesta estar en el dominio elástico [12], que puede aumentar el periodo hasta 35% [9] y (ii) el ratio de daños del edificio que produce una aumentación del periodo proporcionalmente al ratio de daños con variaciones desde 30% (medidas in-situ) hasta 50% (medidas en laboratorio). Para ayudar, los arquitectos, los códigos sismorresistentes entregan una estimación del periodo. Este tipo de fórmula se puede también usar en caso de evaluación de vulnerabilidad a gran escala [15]. De la cantidad de fórmulas presentes, se pueden identificar 3 grandes familias:

- las fórmulas (1) que usan al mismo tiempo las dimensiones horizontales y verticales de la estructura [16], pero que están fuertemente criticadas actualmente [12].
- las fórmulas (2) que usan solamente la altura del edificio con fórmula de tipo ley de potencia. Los parámetros cambian de un país a otro, en función de estudios locales [17].
- las fórmulas (3) que usan sólo la altura del edificio con relaciones lineales [12].

$$T = \frac{C_t \times H}{\sqrt{L}} \quad (1) \quad T = C_t H^\beta \quad (2) \quad T = \frac{N}{C_N} \quad (3) \quad \text{con } T: \text{ periodo (sec)} \quad C_t, C_N \text{ y } \beta \text{ constantes}$$

calculadas localmente, H: altura (m); L: tamaño en la dirección considerada (m)

En Perú [18], la fórmula aplicada es la 3, con una constante C_N variable (35 o 45) según la dirección verificada. El primer código peruano fue emitido en 1974 justo después de sismo de Lima ($M_w=8.1$). Por este proceso, se calcularon 792 periodo/frecuencia fundamentales.

Procesamiento de datos

Las frecuencias fundamentales obtenidas provienen de cálculos hechos por el programa “open source” geopsy (www.geopsy.org). Se calcularon espectros en ambas direcciones (longitudinal y transversal) y luego se hizo un “picking” manual de los picos de frecuencia. El espectro de velocidad se obtuvo: (i) selección de ventanas donde la señal sísmica se encuentra estable, usando un “anti-trigger” ($STA=1s$, $LTA=30s$, límites de ratio de 0.3 a 2.5), (ii) aplicación de un filtro “cosine taper” (5%) en cada lado de la señal de cada ventana, (iii) cálculo del espectro en cada ventana, (iv) suavización del espectro de cada ventana y (v) cálculo del espectro promedio y cálculos de errores. Finalmente, por este proceso, se calcularon 792 periodo/frecuencia fundamentales.

Resultados e interpretación

La distribución de las direcciones (longitudinal versus transversal, figura 2A) permite ver que solamente pocos edificios tienen un ratio longitudinal/transversal igual a 1. La gran mayoría de los edificios tienen un ratio del orden de 1 a 4. Por otro lado, las FFEs en ambas direcciones (figura 2B) exponen una pendiente cerca de 1, probando que la extensión horizontal del edificio no es importante.

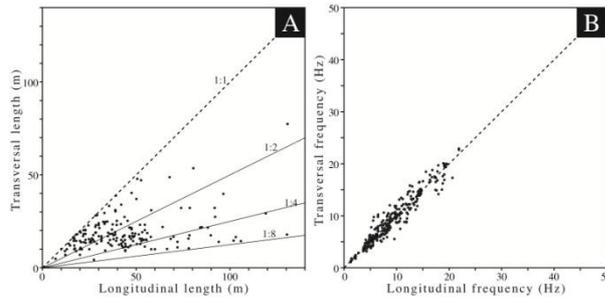


Figura 2: A: tamaño transversal en función del tamaño longitudinal en los hospitales de Lima (las diferentes pendientes muestran los diferentes ratios transversal/longitudinal). B: FFE transversal como función de la FFE longitudinal, la línea discontinua muestra $[FFE_{(transversal)}=FFE_{(longitudinal)}]$.

La representación de las longitudes principales (figura 3) según diferentes fórmulas de tipo 1, tomando en cuenta ambos: altura y dimensiones horizontales o la fórmulas de tipo 2, tomando la altura como una ley de potencia, demuestra claramente que los datos proviniendo de las medidas efectuadas en los hospitales de Lima no coinciden razonablemente con un ratio 1:1.

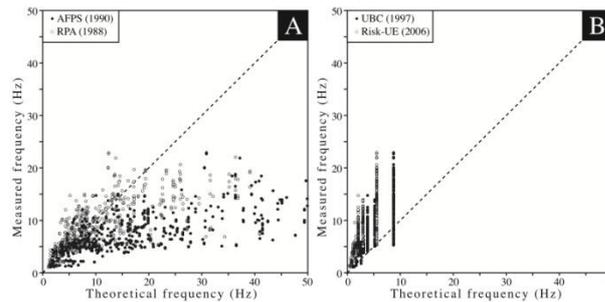


Figura 3: FFEs medidas in-situ como función de A: la frecuencia calculada según formulas tomando en cuenta altura y dimensiones horizontales del edificio. B: la frecuencia calculada según formulas tomando en cuenta únicamente la altura pero como ley de potencia. En ambos gráficos, la línea discontinua muestra $[FFE_{(teorica)}=FFE_{(medida)}]$.

Finalmente, tomando en cuenta todos las PFE se computaron múltiples regresiones del periodo (figura 4A), como función del número de pisos (equivalente a la altura del edificio), obteniendo la relación

$$T_0 = 0.0555N \approx \frac{N}{18} \quad (4) \quad (T_0: \text{periodo fundamental y } N: \text{número de pisos}) \text{ con una desviación estándar de } \sigma=0.079s$$

A partir de este grafico (figura 3A), se puede ver claramente que la población estadística se puede dividir en dos sub-familias: los datos post y pre 1974. Haciendo el cálculo por los datos pre-1974 (figura 3B), se puede construir una relación

$$T_0 = 0.0593N \approx \frac{N}{17} \quad (5) \quad (T_0: \text{periodo fundamental y } N: \text{número de pisos}) \text{ con una desviación estándar de } \sigma=0.081s$$

Finalmente, por los datos post-1974, la relación se vuelve en

$$T_0 = 0.0396N \approx \frac{N}{25} \quad (6) \quad (T_0: \text{periodo fundamental y } N: \text{número de pisos}) \text{ con una desviación estándar de } \sigma=0.047s$$

La fórmula (6) es igual a la fórmula encontrada en el caso de los edificios de mismo tipo, en Grenoble [18] llegando a una constante $C_N=25$. En ambos casos (Grenoble y Lima), los edificios no experimentaron un sismo fuerte (o más bien, un desplazamiento o aceleración fuerte) preservando así la integridad física de estas estructuras.

Por los edificios construidos antes de 1974, la constante C_N cayó hasta un valor de 17, comprobando que los edificios construidos antes de 1974 son mucho más flexibles que los edificios construidos después de 1974. Este factor se podría explicar de dos maneras diferentes:

(hipótesis1): Los edificios construidos antes de 1974 han sido construidos directamente con $C_N=17$, sin tener deformaciones por la edad o la ocurrencia de sismos. En este caso, actualmente, estos edificios podrían aceptar una pérdida de 30-35% de sus frecuencia fundamentales antes de entrar en ventanas de frecuencias peligrosas por sus integridades (y la de las personas a dentro) [9]. Si la integridad física de los edificios es buena, la sobre-flexibilidad de los edificios podría dar repuestas peligrosas en caso de sismo importante.

(hipótesis2): Los edificios construidos antes de 1974 fueron impactados por el fuerte sismo de Lima de 1974, introduciendo daños internos que impusieron una pérdida de la FFE (o un aumento de PFE), llevando a una caída del factor C_N de un nivel inicial desconocido hasta su valor actual de 17. En este caso, si el valor inicial de C_N estaba superior a 23-24, parte de parque inmobiliario de Lima construido ante de 1974 se encuentra actualmente en un rango de frecuencia-periodo letal. Cuando si el valor inicial de C_N estaba entre 20 y 23, parte de los edificios construidos ante de 1974 han sido impactados duramente por el sismo de 1974 y están parcialmente en rango de frecuencia peligro moderado a alto.

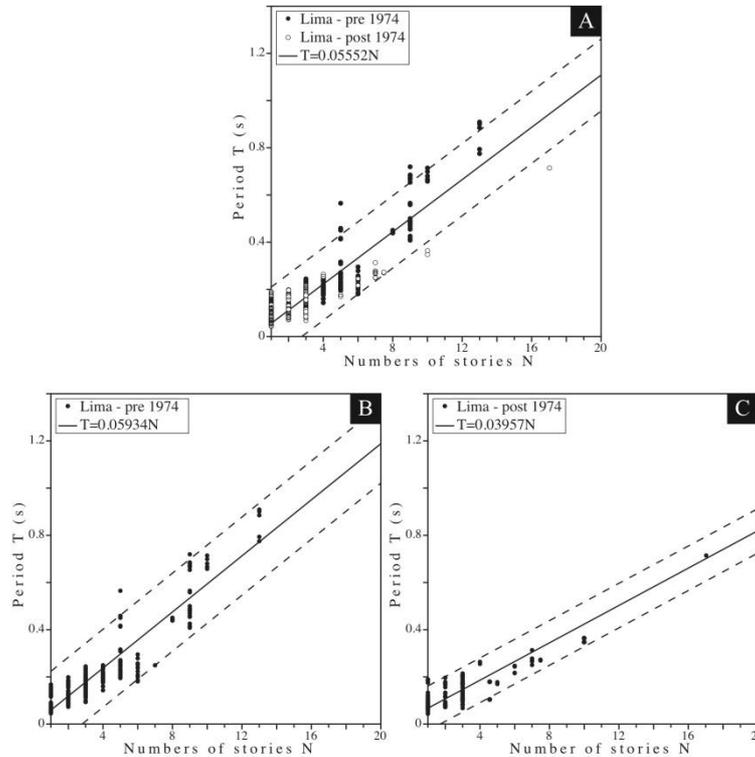


Figura 4: PFEs de edificios de concreto armado con rellenos de mampostería como función del número de pisos (N) . A: correlación incluyendo todos los datos (círculos negros: edificios construidos antes de 1974, círculos blancos: edificios construidos después 1974). B: correlación tomando únicamente los datos pre-1974. C: correlación tomando únicamente los datos post-1974. Línea continua: la regresión lineal; línea discontinua intervalo de confianza de 95%.

Para ver cuál de las dos hipótesis es la más probable, se debería hacer este mismo tipo de estudio en lugares que no han sido impactados por el sismo de 1974, para evaluar el valor de C_N antes de 1974. Esto se podría hacer en el Norte del Perú que no fue impactado por sismos desde hace mucho tiempo, al centro-Sur del Perú, ya que estas zonas fueron impactados por sismos posteriores (Nazca [19] y Pisco [20]) o al Sur del Perú que ha sido impactado en 2001 por el sismo de Arequipa.

Conclusiones

El estudio realizado sobre 204 edificios en Lima construidos en concreto armado con rellenos de mampostería permitió precisar que la Frecuencia Fundamental Elástica, un parámetro clave en ingeniería sísmica, es principalmente dependiente de la altura del edificio, cuando las dimensiones horizontales del edificio no se deben tomar en cuenta. De los datos colectados, se pudo definir tres leyes de comportamiento para este tipo de edificios:

$$T_0 = 0.0555N \approx \frac{N}{18} \quad \text{Cuando no se tiene la edad del edificio, o es desconocido}$$

$$T_0 = 0.0593N \approx \frac{N}{17} \quad \text{Por los edificios construidos antes de 1974}$$

$$T_0 = 0.0396N \approx \frac{N}{25} \quad \text{Por los edificios construidos después de 1974}$$

Si este tipo de relación da una buena estimación de la Frecuencia Fundamental Elástica o del Periodo Fundamental Elástico con un error estándar amplio, es actualmente la única estimación por la mitigación de vulnerabilidad, especialmente en una zona urbana amplia como Lima.

La presencia de dos fórmulas diferentes para simbolizar dos tipos de comportamientos dinámicos diferentes, permitió fijar una fecha por este cambio de comportamiento estructural: 1974. Durante el año 1974, dos cosas importantes por los edificios de este tipo ocurrieron: el sismo de Lima y la implementación del primer código sismorresistente en el Perú. Como no se puede saber actualmente cual es el factor que influyó, estudios complementarios se deben llevar a cabo fuera de la zona de impacto del sismo de 1974. Explicar la razón de este cambio de comportamiento dinámico de las estructuras en Lima es sumamente importante para saber si los edificios construidos antes de 1974 están en zona de comportamiento letal-altamente peligrosa o normal (aunque demasiado flexible en este caso).

Bibliografía

- 1 - Omori F (1922) The semi-destructive earthquake of April 26, 1922. *Seismological Notes* (Imperial Earthquake Investigation Committee, 3, 1-30).
- 2 - Davison C (1924) Fusakichi Omori and his work on earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 14(4), 240-255.
- 3 - Crawford R. And H.S. Ward (1964) Determination of the natural period of buildings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54(6), 1743-1756.
- 4 - Ward H.S. and R. Crawford (1966) Wind-induced vibrations and building modes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 56(4), 793-813.
- 5 - Trifunac M.D (1970) Ambient vibration test of a thirty-nine story steel frame building. Technical report EERL-70-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena (California).
- 6 - MacLarmore V., G.C. Hart and J.E. Luco (1971) A new method for the measurement of the natural period of building, *Journal of Structural Division ASCE*, 97, 2567-2582.
- 7 - Kuliyeu I. (1973) Investigation of dynamic characteristics of the off-shore oilfield structure. In *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Roma, Italy.
- 8 - Trifunac MD (1972) Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Earthq Eng Struct Dyn*. 1: 133-150
- 9 - Dunand F, Guéguen P, Bard P-Y, Rodgers J, Celebi M (2006) Comparison of the dynamic parameters extracted from weak, moderate and strong building motion. *Proceeding 1st European Conference of Earthquake Engineering and Seismology*, Genova, Switzerland paper 1021
- 10 - Carder DS (1936) Observed vibrations of buildings. *Bull Seismol Soc Am* 26: 245-277
- 11 - Trifunac MD, Ivanović SS, Todorovska MI (2001a) Apparent periods of building. I: Fourier analysis. *J Struct Eng* 127:517-526. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:5(517)
- 12 - Michel C, Guéguen P, Lestuzzi P, Bard PY (2010) Comparison between seismic vulnerability models and experimental dynamic properties of existing buildings in France. *Bull Earthquake Eng* 8: 1295-1307. doi: 10.1007/s10518-010-9185-7
- 13 - D'Ercole R, Metzger P, Robert J, Hardy S, Gluski-Chraibi P, Vernier P, Sierra A, Perfettini H, Guillier B (2011) Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao – Estudio SIRAD IRD / COOPI, Proyecto Preparación ante desastre sísmico y/o tsunami y recuperación temprana en Lima y Callao, INDECI, PNUD, ECHO, Lima, Perú, 178 p.
- 14 - Guillier B, Atakan K, Chatelain J-L, Havskov J, Ohrnberger M, Cara F, Duval AM, Zacharopoulos S, Teves-Costa P, and the SESAME Team (2008) Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations. *Bull Earthquake Eng* 6 (1): 3-31. doi: 10.1007/s10518-007-9039-0
- 15 - Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthq Eng* 4:415-443
- 16 - Lee L-H, Chang K-K, Chun Y-S (2000) Experimental formula for the fundamental period of RC buildings with shear-wall dominant systems. *Struct Des Tall Build* 9: 295-307
- 17 - UBC (1997) Uniform Building Code. International conference of building officials, U.S.A.
- 18 - E.030 (2007) Norma técnica E.030, diseño sismo resistente en el Perú. Instituto Geofísico del Perú, 32 p
- 19 - Chatelain J-L, Guillier B, Guéguen P, Bondoux (1997) The Mw 7.7 Nasca (Peru) Earthquake, November 12, 1996: A Repetition of the 1942 Event ? *Seismol Res Lett* 68 (6): 917-922
- 30 - Perfettini H, Avouac J-P, Tavera H, Kositsky A, Nocquet J-M, Bondoux F, Chlieh M, Sladen A, Audin L, Farber DL, Soler P (2010), Seismic and aseismic slip on the Central Peru megathrust. *Nature* 465:78-81