

EVALUACIÓN DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS USANDO UN MÉTODO ÓPTICO NO CONVENCIONAL

EVALUATION OF STRUCTURE VIBRATIONS USING AN OPTICAL NON CONVENTIONAL METHOD

Aníbal Valera¹, Arturo Ortiz²

RESUMEN

En este trabajo se presenta el resultado de evaluar las vibraciones de un Techo (CISMID / UNI) en base a un procedimiento no convencional, por el cual la vibración de la estructura es producida por ondas sonoras cuasi monocromáticas y la detección de los movimientos vibratorios es medida ópticamente, por la deflexión de un rayo láser reflejado, experimentalmente se obtienen 2 frecuencias resonantes prominentes: 28.5 Hz y 45Hz, las que se identifican como los modos resonantes (1,1) y (2,1) respectivamente.

Palabras clave.- Vibraciones, Excitación sonora, Detección láser, Foto deflexión.

ABSTRACT

In this work we present the result of evaluating the vibrations of a Roof (CISMID / UNI) on the basis of a not conventional procedure, for which the vibration of the structure is produced by sonorous monochromatic waves and the detection of the vibratory movements is measured optically, by means of the deflection of a reflected laser beam, perimentally we obtained 2 prominent resonant frequencies: 28.5 Hz and 45Hz, which are identify as the resonant vibration Modes: (1,1) and (2,1) respectively.

Key words.- Vibrations, Sonorous excitation, Laser detection, Photo deflection

INTRODUCCIÓN

El proyecto en mención se basa en la alta sensibilidad que se logra con métodos ópticos en la evaluación de parámetros mecánicos, como son el desplazamiento o la vibración de un cuerpo.

El laboratorio de Óptica de la UNI, publicó hace un tiempo [1] algunas técnicas aplicadas a la metrología óptica, en particular describiendo un método original para la detección y transmisión de ondas sonoras inducidas en ventanas (PDS/ Photo Deflection Sensing), habiéndose desarrollado para tal fin diversos tipos de sensores ópticos: lineares, planares, duales, cuadrupolares, etc., que de acuerdo al arreglo a experimentar se encuentran a nuestra disposición. En la literatura especializada se encuentran diversas alternativas tecnológicas

para la evaluación de vibraciones de edificios, tales como sistema acoplado de GPS, laser Doppler velocimeter*, etc. [3 y 4], no obstante el método PDS, aplicado mayormente a espectroscopia, no se utiliza para este tipo de evaluación (Resultado de la evaluación bibliográfica), siendo técnicamente uno de los métodos más directos de poner en práctica. En referencia a los velocímetros *Doppler, existe un trabajo de Laboratorio local, en donde se desarrolla un diseño experimental y se aplica a la evaluación de parlantes [12], no obstante por tratarse de un sistema Interferométrico y de alta sensibilidad (1/2 longitud de onda) su aplicación externa es sumamente crítica, requiriendo de equipos de posicionamiento adicionales que no solo elevan notablemente el costo, sino que son sumamente difíciles de calibrar, como se

¹Dr. Docente investigador de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Alumno de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

demonstró en el Laboratorio de Óptica en una primera aplicación en 1997 [13], por lo que consideramos que el sistema PDS propuesto si tendrá el impacto esperado.

En el caso aquí descrito, queremos aplicar el método de deflexión óptica (PDS) para evaluar explícitamente las modulaciones producidas en un techo.

FUNDAMENTO

Todas las estructuras (edificios), presentan oscilaciones propias, cuyo periodo depende esencialmente de la masa del edificio y su flexibilidad [2]. De hecho, un parámetro que prima en la construcción actual de edificios es la flexibilidad de estos, lo que les permite absorber los impactos sísmicos y disipar la energía recibida [5].

Existen diversas publicaciones referentes, tanto a la detección experimental de las vibraciones de edificios, como también a los modelos teóricos que las describen (por ejemplo referencias [6, 7, 8, 9, 10, 11]). Asimismo en diferentes publicaciones académicas se pueden encontrar referencias simplificadas (http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/physikalischeelektronik/phys_elektr/node388.html), donde se presenta la teoría matemática correspondiente y los parámetros físicos más importantes de que dependen.

Comúnmente la frecuencia de oscilación para edificios medios se encuentra entre 1 a 20 hz. Usualmente estas oscilaciones pueden ser excitadas tanto por ondas sísmicas, como también por ráfagas de viento o ruidos constructivos, pudiendo producirse eventualmente efectos de resonancia, lo que a su vez constituye un peligro para la edificación pues esto produciría deformaciones peligrosas, que afectan directamente la estructura de los mismos.

El proyecto se basa en el método espectroscópico PDS (Photo Deflection Spectroscopy), desarrollado en el Laboratorio de Óptica para evaluaciones del coeficiente de absorción de muestras semiconductoras. El método PDS se basa en la desviación que sufre un rayo láser dirigido sobre la superficie de la muestra (por ejemplo: un

semiconductor): cuando la muestra es irradiada superficialmente con una luz monocromática modulada; si la radiación es absorbida por el material, este produce en su superficie un micro calentamiento, lo que desvía el rayo por efecto "Mirage", siendo detectada la desviación por un detector óptico sincronizado (Técnica Lock-In), produciéndose una señal proporcional al grado de desviación, o respectivamente cuanto mayor sea el poder de absorción de la muestra.

EXPERIMENTAL

El presente proyecto, constituye así una variante del método PDS convencional, ya que en este caso no se va a producir un calentamiento de la superficie, sino que esta se va a hacer vibrar directamente mediante el sistema de excitación acústico. Por lo cual, basta adosar un espejo sobre la superficie a evaluar (por ejemplo un techo, Fig.1), tal que al incidir sobre ella un rayo Láser, este sea reflejado finalmente a un detector óptico de deflexión (Detector PDS cuádrupolar); con lo cual, cualquier vibración de la estructura alterará el camino del rayo reflejado, induciendo así una señal en el sistema de detección.

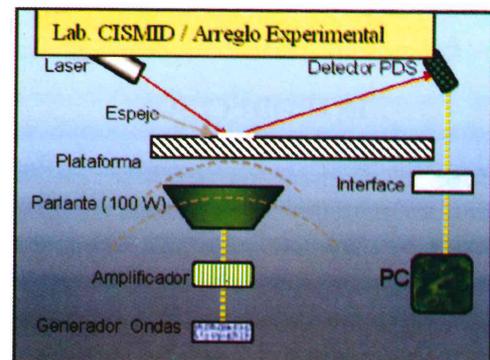


Fig. 1 Diagrama experimental del arreglo experimental propuesto para la generación y análisis óptico de vibraciones.

En nuestro caso las vibraciones del techo (y/o las estructuras a evaluar) se producirán selectivamente (frecuencias definidas) mediante parlantes alimentados por generadores de onda sintonizables (frecuencímetros), lo que permitirá evaluar la respuesta vibracional de la estructura y en particular sus puntos de resonancia.

Experimento 1

En la Fig. 1 y 2 se presentan el esquema experimental empleado:

Un Techo cuadrangular (2.4 m de lado, 13 cm de espesor), construido en base a concreto y cañas descansa sobre dos durmientes laterales y estos a su vez descansan sobre 4 pequeñas columnas (aproximadamente a 1.3 m del piso) formando una especie de mesa elevada.

El espejo de evaluación se sitúa sobre el techo, cerca al centro.

El parlante se localiza por la parte inferior, entre un borde lateral y el centro, tal como resalta la Fig. 2. La fuente Láser se situó aproximadamente a 3m de distancia y el detector a 5 m respectivamente.

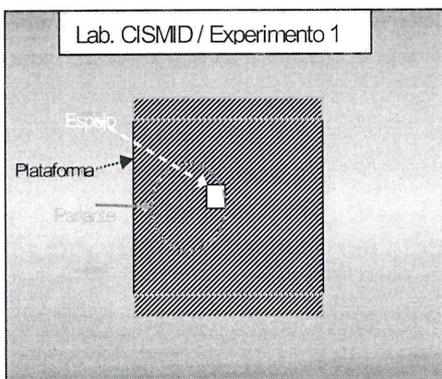


Fig. 2 Esquema experimental correspondiente al experimento 1: excitación de un techo, vista superior.

En la Fig. 3 se presenta el espectro obtenido en esa evaluación: Se manifiesta claramente un Pico resonante alrededor de 28.7 Hz, que se identifica luego como el Modo de oscilación planar (1,1)

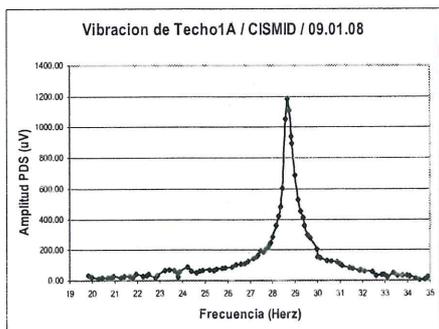


Fig. 3 Espectrograma PDS, resultado del arreglo experimental descrito en la figura 2.

Experimento 2

En la Fig. 4 se muestra de manera esquemática el arreglo empleado para una segunda evaluación, en donde, la única variante es en la posición del parlante, el que es colocado lateralmente.

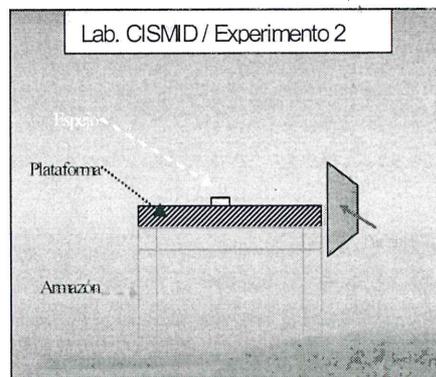


Fig. 4 Esquema experimental correspondiente al experimento 2: excitación de un techo, vista lateral.

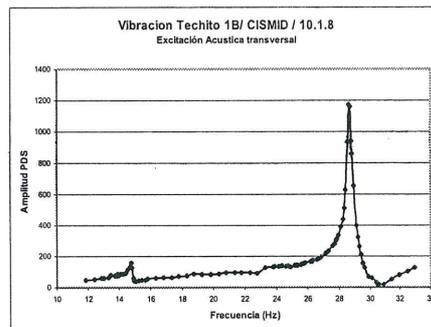


Fig. 5 Espectrograma PDS, resultado del arreglo experimental descrito en la fig. 4.

El resultado de la evaluación, que se muestra en la Fig. 5 indica nuevamente el pico resonante alrededor de 28.7 Hz y un pico adicional pequeño alrededor de 14.8 Hz, que no se manifestó en la primera forma de excitación (Experimento 1).

Más aun, manteniendo el esquema de medición de la Fig. 4 se evalúa la respuesta vibracional del techo a frecuencias mayores, obteniéndose el espectrograma de la Fig. 6.

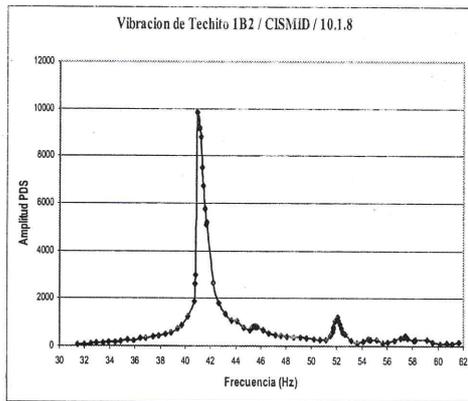


Fig. 6 Espectrograma PDS, resultado del arreglo experimental descrito en la Fig. 4 a altas frecuencias.

A frecuencias mayores se encuentra en esta modalidad de excitación un pico resonante prominente alrededor de 41 Hz y uno menor alrededor de 52 Hz.

Experimento 3

En una tercera experiencia se dispone como objeto de evaluación un muro de ladrillo (2.2m x 2.66 m), el que fue excitado colocando el parlante cerca de la base, como se indica esquemáticamente en la Fig. 7.

La Fig. 8 muestra el resultado de evaluar las vibraciones propias del muro de ladrillo.

El espectro resultante muestra 2 picos prominentes de resonancia en 14.3 Hz y 30.8 Hz respectivamente y una serie de picos menores, los que muy probablemente aparecen por tratarse de un muro "fracturado".

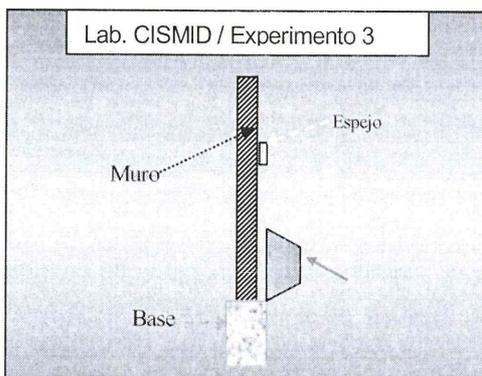


Fig. 7 Esquema experimental correspondiente al experimento 3: excitación de un muro, vista lateral.

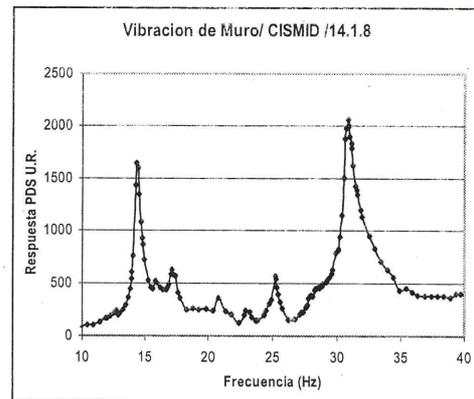


Fig. 8 Espectrograma PDS, resultado del arreglo experimental descrito en la Fig. 4.

Experimento 4

Un complemento experimental importante, relacionado con la determinación de las frecuencias resonantes, es el hecho de poder definir las longitudes de onda (o respectivamente, el patrón de vibración), que corresponden a las vibraciones propias observadas, para lo cual se dispuso de 2 procedimientos:

1. camilla de tecnopor.
2. camilla de agua

Excitación a 41 Hz

En el primero de ellos se dispone sobre toda la superficie del techo una camilla de tecnopor (trociños) y se procede a excitar la estructura por la parte inferior a la frecuencia aproximada de 41 Hz, tal como indica la Fig. 1.



Fig. 9. Patrón cuasi hexagonal que se forma sobre el techo, al ser excitada a la frecuencia de 41 Hz.

Al cabo de cierto tiempo (5 minutos) se establece un patrón cuasi hexagonal (ver fig. 9) sobre el techo, el mismo que es perturbado por las ráfagas de viento producidas durante la experiencia, lo que destruye el patrón establecido, arrojando al tecnopor fuera de la superficie.

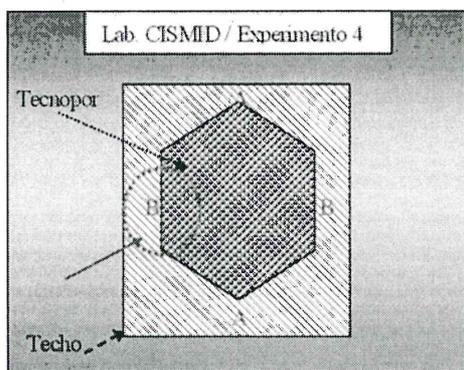


Fig. 10 Patrón cuasi hexagonal que tiende a formarse sobre el techo, al ser excitada a la frecuencia de 41 Hz.

No obstante esa dificultad, se puede concluir que el patrón que se establece, es el que indica la Fig. 10. Lo que va a confirmar las observaciones previas, que bajo esa vibración, al colocar la mano en la posición A sobre la mesa, no se percibe mayor vibración, comparada con la que si se percibe cuando se coloca la mano en la posición B.

Correspondiendo por tanto, la línea común AA, a una línea nodal de vibración cero. En la Fig. 11 se presenta el patrón de vibración más probable para el techo, generado a la frecuencia de 41 Hz y que corresponde al modo de vibración (2,1).

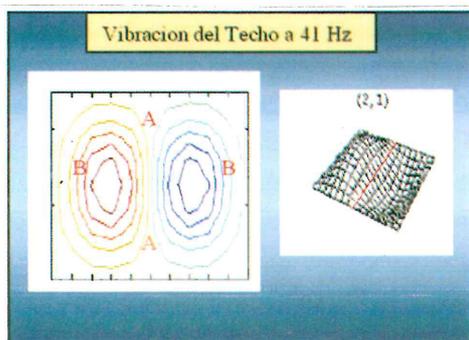


Fig. 11 Patrón de vibración más probable, que se establece en el techo, al ser excitada a la frecuencia de 41 Hz.

En la Fig. 12 se observa finalmente en la camilla de agua un patrón de ondas, generado a la

frecuencia de 41 Hz y que coincide básicamente con el presentado en la Fig. 11.

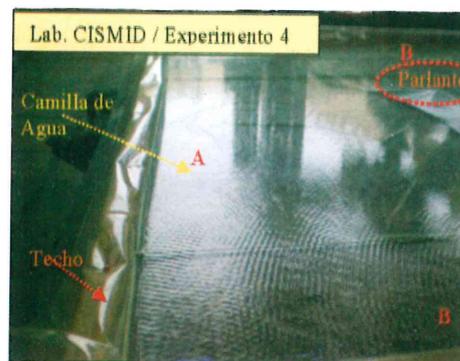


Fig. 12 Vista parcial del patrón de vibración sobre camilla de agua que se establece en el techo, al ser excitada a la frecuencia de 41 Hz.

Cuando la excitación sonora de 41 Hz se efectúa siempre por debajo del techo, pero situando el parlante exactamente en el centro de la estructura cuadrangular, no se observa mayor vibración de la estructura, lo que confirma que el punto central de la vibración obtenida previamente, se encuentra localizado en una línea nodal.

Excitación a 28.7 Hz

Cuando la excitación de la estructura se realiza a la frecuencia de 28.7 Hz, manteniendo el mismo arreglo de excitación de la Fig. 1, se va a confirmar una gran actividad vibracional esencialmente en el centro de ella, tal como muestra la vista de la Fig. 13, obtenida a partir del método de la camilla de agua.

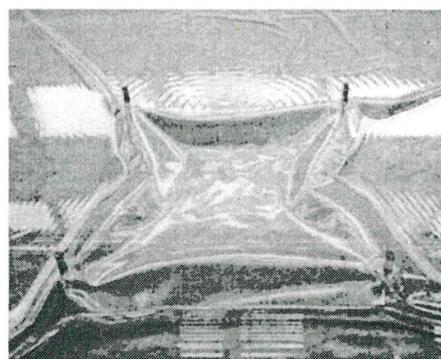


Fig. 13 Vista parcial del patrón de vibración sobre camilla de agua que se establece en el techo, al ser excitada a la frecuencia de 28.7 Hz.

La observación anterior permite establecer que la vibración excitada bajo esta frecuencia en la estructura es la que se bosqueja en la Fig. 14, correspondiendo al modo (1,1)

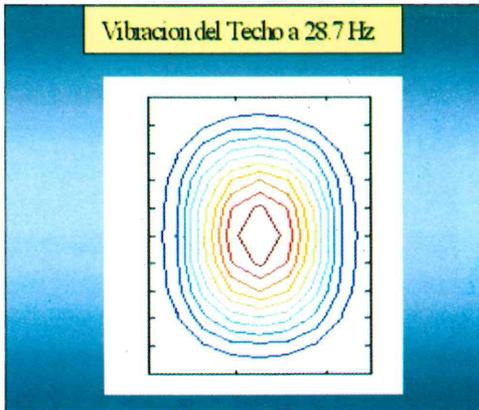


Fig. 14 Patrón de vibración más probable, que se establece en el techo, al ser excitada a la frecuencia de 28.7 Hz.

La confirmación teórica, de las deducciones experimentales realizadas en esta sección se presentará en la sección que sigue a continuación (Análisis de los resultados), no obstante para ver confirmado el planteamiento deben producirse también resonancias en frecuencias mayores, tales como a 78 Hz, motivo por el cual, se realiza medidas complementarias tales como una evaluación alrededor de esta frecuencia, encontrándose en efecto otra resonancia alrededor de 78.7 Hz, como muestra el espectro de la Fig. 15

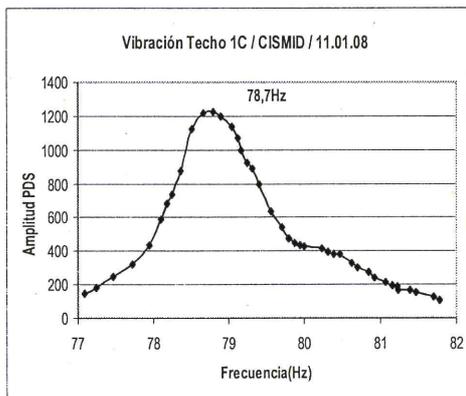


Fig. 15 Espectrograma PDS, alrededor de 78 Hz, obtenido según el arreglo experimental de la fig. 4.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

La teoría básica que explica los resultados obtenidos es la teoría de propagación de ondas en placas bidimensionales [13 y 16], la que para el caso de ondas estacionarias en placas establece una relación simple para las frecuencias (angulares) de resonancia ocurrientes:

$$\omega_{mn} = \omega_0 (m^2 + n^2)^{1/2} \quad (1)$$

o respectivamente

$$f_{mn} = f_0 (m^2 + n^2)^{1/2} \quad (2)$$

Donde : $\omega_0 = \pi (C/L) = 2\pi f_0$

C = velocidad de propagación de la onda en el medio

L = longitud de la placa m, n: factores enteros (Modos).

A continuación aplicamos esta relación (2) a las frecuencias resonantes (f_{mn}) obtenidas y sus probables modos de vibración:

- Frecuencia 28.7 Hz, Modo (1,1)

Considerando $m = 1, n = 1$, resulta: $f_0 = 20.3$ Hz

- Frecuencia 41.1 Hz, Modo (2,1)

Considerando $m = 2, n = 1$, resulta: $f_0 = 18.4$ Hz

- Frecuencia 52 Hz, Modo (2,2)

Considerando $m = 2, n = 2$, resulta: $f_0 = 18.4$ Hz

- Frecuencia 78.7 Hz, Modo (3,3)

Considerando $m = 3, n = 3$, resulta: $f_0 = 18.5$ Hz

Del análisis efectuado se obtiene una buena correlación entre las frecuencias resonantes encontradas y sus probables modos de vibración, lo que significa que la selección modal fue acertada.

Un aspecto adicional de la propagación de ondas en placas es la estrecha conexión entre las frecuencias resonantes (f_{mn}) y los parámetros físicos de la estructura, la que en su expresión más simple se deja expresar por:

$$f_{mn} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{m^2}{A^2} + \frac{n^2}{B}\right) \sqrt{\frac{Ed^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

Donde: A, B: ancho y largo de la placa

E: Modulo de Young

D: espesor de la placa

ρ : densidad de la placa

ν : coeficiente de Poisson

m, n: factores enteros (Modos)

Considerando en una primera aproximación, que el techo evaluado es de hormigón, aplicamos la relación 3 a la frecuencia resonante de 28.7 Hz para encontrar el valor efectivo de E, con los datos conocidos:

- $f_{11} = 28.7$ Hz
- $m = n = 1$
- $A = B = 2.4$ m
- $d = 0.13$ m
- $\rho = 2.4$ g/cm³
- $\nu = 0.2$

resultando $E_{ef} = 4,530$ MPa

De los valores referenciales encontrados para hormigón $E_{ref} = 20,000$ MPa, se observa aun, una cierta discordancia con la teoría, que debe ser próximamente clarificado.

CONCLUSIONES

Se demuestra la efectividad del método óptico en evaluar las frecuencias resonantes de vibración de una estructura, como también la efectividad de poder excitar esas vibraciones con sonido.

Se identifico los modos de vibración resonantes de la estructura, aunque se debe mejorar aun el procedimiento de determinar experimentalmente los modos de vibración, tal que la identificación sea absoluta.

Se debe optimizar aun los procedimientos de medida y en lo posible automatizarlos, para reducir los tiempos de evaluación y aumentar la sensibilidad del equipo.

El método aquí descrito permite asimismo discernir respecto de la integridad de una estructura (por ejemplo, si esta se encuentra

facturada) como es el caso del Muro fracturado, cuyo espectro de vibración (Fig. 8) resultó altamente complejo, comparado con el que se obtiene de un muro sano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevo a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la UNI / CISMID, con equipos desarrollados en el Laboratorio de Óptica / UNI, Quedamos muy reconocidos al Dr. Ing. Carlos Zavala y sus colaboradores por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. **Valera, A.**, et al. "Aplicaciones ópticas en la Metrología", TECNIA, Vol. 8 N° 1, pp. 63-67, 1998, Lima, Perú.
2. **Wiegel, R.** "Earthquake Engineering", Prentice Hall 1970, Inc. pp. 518, USA.
3. **Kulyabko, V., Davydov, I.**, "Random oscillations and comfort of structures", 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and structural reliability PCM 2000 pp. 13: 235 – 246 – 314, USA.
4. **Ruscheweyh, H.**, "Full-scale measurements of wind-induced oscillations of chimneys Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", Vol 65, issues 1-3, Dec. 1996, pp. 55 – 62, Holanda.
5. **Douglas Hayes, Ian Sparks, J.**, "Van Cranenbroeck TS 78 - Survey Control and Monitoring of Buildings - Core Wall Survey Control System for High Rise Buildings. October 8-13, 2006, Shaping the Change XXIII FIG Congress Munich, Germany.
6. **Cerovsek, T., Katranuschkov, P.**, "Active Process Model Supported Collaboration", In: proceeding of cib-w78 2005 - 22nd Conference on Information Technology in Construction, Scherer R.J, P. Katranuschkov & S.-E. Schapke (ed.); CIB Publication, ISBN 3-86005-478-3, pp. 97-104, July 2005, Alemania.
7. **Scherer, R. J., Weise M., Katranuschkov, P.**, "A Cooperation Model for the Control of Diverging Design Data", German-Russian Symposium on Construction Informatics in Moscow/St. Peterburg, Sept. 2004, ISBN 5-7264-0341-X (in Russian), Staatliche Bauuniversität Moskau, September 2005, pp. 489-496, Rusia.

8. **Scherer, R. J., Zsohar, M., Faschingbauer, G.,** "Numerical Computation of the Probability Density Function of Resonant Frequencies in Stochastic Layered Soil (in German)", submitted to Journal of Bauingenieur, 2005, por publicar.
9. **Keller, M., Katranuschkov P., Menzel K.,** "Modelling collaborative processes for Virtual Organisations in the building industry", ISBN 04 1535 938 4 "ECPPM 2004 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction", pp. 249-256, by Dikbas A. & Scherer R. J. (eds.), A.A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands, September 2004, Holanda.
10. **Eisfeld, M.,** "Assistance in Conceptual Design of Concrete Structures by a Description Logic Planner", PhD thesis, Dresden University of Technology, Department of Civil Engineering, November 2004 pp. 165, Alemania.
11. **Bretschneider, J., Scherer, R. J.,** "On the quality of time series simulated from multi-wave evolutionary load models". Proceedings of the EURODDYN2002 Conference, Munich, Sept. pp. 2-5, 2002, Alemania.
12. **Powell, A., Mosquera, L.,** "Diseño y construcción de un velocímetro Laser Doppler para la medición de vibraciones mecánicas", TECNIA, Vol. 15 No 2, pp. 77-82, 2005, Lima, Perú.
13. **Valera A., Eyzaguirre C.,** "Optica Física", Ed. Hozlo, 420, 1997 pp.116-117, Lima, Perú.
14. **Cawley, P., Adams, R. D.,** "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies", Journal of Strain Analysis 14(2) 1979, pp. 49-57, Inglaterra.
15. **Farrar, C. R.,** "Debling, S.W. and Vix, D.A.: Vibration based structural damage identification. Philosophical Transactions of the Royal Society of London". Series A-Mathematical Physics on the Engineering Sciences. Vol. 359, pp. 131 - 149, 2003, Inglaterra.
16. **Ortiz, A.,** "Estudio de vibraciones estructurales por métodos ópticos", Tesis de Licenciatura / Fac.de Ciencias /UNI. En edición a presentarse en junio 2008.

Correspondencia: avalera@uni.edu.pe

Recepción de originales: junio 2007

Aceptación de originales: setiembre 2007