

Seismic testing of intelligent buildings to measure lateral displacement (Portico Structures)

Marlyn S. Silva O., Francisco Soto*

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

This work provides a description of a system that allows for measuring regular buildings made up of prefabricated concrete porticos designed for measuring lateral displacement under a seismic load with the goal of ensuring that in a given event the limit values of the quotient between the lee and the height of inter-floor space as specified in the Venezuelan norms stipulated in COVENIN 1756-1:2001 *Edificaciones Sismorresistentes* (Earthquake Resistant Buildings); and the automated, intelligent adaptation of the structure to make measuring procedures easier and thus estimate when the normative values have been exceeded, considering certain criteria at the time of taking the measurements. This system allows for generalizing the results in order to develop a methodology for the seismic measurement of buildings as stipulated in the Venezuelan Norm.

Keywords: seismic measurement; measure of displacement; intelligent buildings; methodology for measuring

Instrumentación sísmica de edificios inteligentes para la medición de desplazamientos laterales (Estructuras Aporticadas)

Resumen.-

Este Trabajo proporciona la descripción de un sistema que permite la instrumentación de edificios regulares constituidos por pórticos de concreto armado para la medición de sus desplazamientos laterales bajo efecto de cargas sísmicas, con el fin de verificar que ante la presencia de un evento dado no son superados los valores límites del cociente entre la deriva y la altura de entrepiso especificado en la Norma Venezolana COVENIN 1756-1:2001 *Edificaciones Sismorresistentes*; y la adaptación del mismo de forma automatizada e inteligente a la estructura para hacer más eficientes los procedimientos de medición y así estimar cuándo han sido superados los valores normativos, considerando ciertos criterios al momento de realizar la instrumentación. A partir del sistema descrito se realiza una generalización de los resultados para ofrecer una metodología para la instrumentación sísmica de edificios como aporte a la Norma Venezolana.

Palabras clave: instrumentación sísmica; medición de desplazamientos; edificios inteligentes; metodología de instrumentación

Recibido: noviembre 2015

Aceptado: marzo 2016

1. Introducción

La instrumentación de edificios con el objetivo de cuantificar sus características y verificar criterios de comportamiento estructural ante sismos ha tenido un gran auge en los últimos años [1]. Con la finalidad de establecer una serie de criterios que sean de utilidad para la selección de los instrumentos, su ubicación, disposición y

*Autor para correspondencia

Correo-e: fsoto@postgrado.uc.edu.ve (Francisco Soto)

procedimiento de medición, el presente trabajo pretende describir un sistema que permita la instrumentación sísmica de estructuras aporticadas con el fin de medir sus desplazamientos laterales, y su implementación y adaptación a edificios inteligentes y a la vez presentar una propuesta que sirva de referencia al momento de realizar la instrumentación y posean la flexibilidad de adaptación a un caso particular como aporte a la Norma Sísmica Venezolana.

2. Marco teórico

Las presiones que se generan en la corteza terrestre liberan energía en forma de ondas que inducen vibraciones en las estructuras a través de sus bases originando desplazamientos de cada una de las masas de la edificación con respecto a su posición de equilibrio estático proporcionales al producto de una función de la posición de la masa por una función del tiempo, que constituyen la respuesta de la estructura al movimiento de inducido [2].

Esta respuesta se puede cuantificar mediante el empleo de transductores en los que la corriente aplicada entre los extremos de dos placas móviles de un condensador (denominadas “masa móvil”) generan un desplazamiento con respecto a la placa central del transductor, dando lugar a una señal de corriente alterna de la misma frecuencia que el oscilador que es directamente proporcional a la magnitud medida [3]. Esta corriente puede ser convertida a un valor de voltaje con un ancho de banda de aproximadamente 200 Hz.

El procesamiento de estas señales se hace complejo y debe ser transformado mediante el análisis de Fourier al dominio de frecuencia para obtener el Espectro de Respuesta, el cual es la representación gráfica de algún parámetro básico, como la aceleración para distintos valores de periodo “T” [4].

Siendo la transformada de Fourier de la función real una función compleja

$$F_{(\omega)} = R_{(\omega)} + I_{(\omega)}i.$$

La curva generada se descompone en una serie de senos y cósenos llamada “Serie de Fourier”,

la cual para una curva Y en función de x tiene la forma

$$Y = \sum_{-\infty}^{\infty} \{a_n \sin(n\omega x) + b_n \cos(n\omega x)\},$$

con

$$\omega = \frac{2\pi}{x_2 - x_1},$$

donde a_n y b_n son los Coeficientes de Fourier, el módulo de esta función es lo que se conoce como el “Espectro de Fourier”

$$\|F_{(\omega)}\| = [R_{(\omega)}^2 + I_{(\omega)}^2]$$

y el ángulo

$$P_{(\omega)} = \arctan\left(\frac{I_{(\omega)}}{R_{(\omega)}}\right)$$

es lo que se conoce como Fase del espectro. La variación de los máximos de la aceleración puede representarse gráficamente en forma de curvas espectrales y obtener a partir de él los espectros de velocidades y desplazamientos a través de un proceso de doble integración [5], reduciendo de este modo errores en el cálculo. Para ello se recurre al uso de sistemas de medición integrados a la estructura.

Existen muchas referencias con los aspectos teóricos de los temas tratados en esta investigación, entre las cuales destacan el trabajo de Lombardi y Bhattacharya [6] y la publicación de Luna y colaboradores [7].

3. Metodología del trabajo

- Se escogió para la investigación una estructura real constituida por pórticos de concreto armado, de altura 27.85 m., diseñada atendiendo a lo requisitos de las Normas COVENIN-MINDUR 2002-88, 1756-98, 1753-87 y situada en una zona sísmica 5
- Se definió como objetivo de la instrumentación verificar que no se superen los valores normativos del cociente de la deriva y la altura de entrepiso bajo acciones sísmicas, y que la edificación responda de forma

inteligente ante la posibilidad de exceder el valor normativo emitiendo una señal de aviso de forma automatizada.

- La magnitud seleccionada a medir es el desplazamiento lateral, por ser la deriva es una medida indirecta que depende de este parámetro y el valor restringido por la Norma [8].

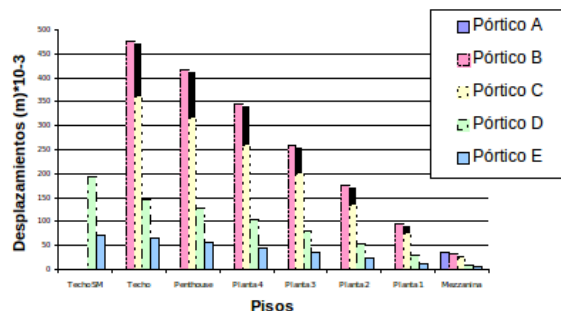


Figura 1: Desplazamientos de los Pórticos A al G en dirección X

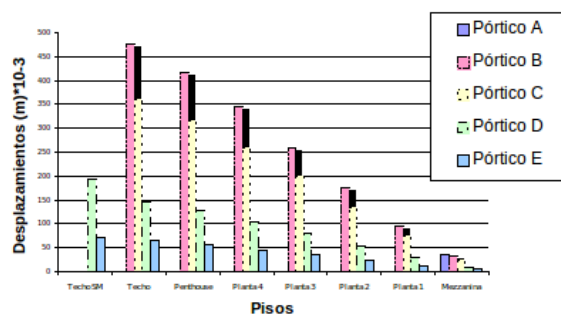


Figura 2: Desplazamientos de los Pórticos A al G en dirección Y

- Se obtienen los desplazamientos y derivas laterales de cada uno de los pisos de la edificación, bajo efecto de un sismo de diseño en base a su zonificación sísmica, las características del suelo de fundación (según estudio de suelos) y las cargas de la misma utilizando el programa de cálculo IP3 versión 7.0. Los desplazamientos teóricos calculados para cada uno de los distintos niveles se

presentan a continuación, la Figura 1 muestra los desplazamientos laterales de los pórticos A al G en dirección X y la Figura 2 en dirección Y.

- Se investigó sobre la tecnología disponible en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y en la Nave de Ensayos Especiales del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela; para escoger el tipo de instrumento a utilizar, de entre los que se usan ya en nuestro país.



Figura 3: Vista Interna de un Acelerógrafo Etna con EpiSensor Interno

- Debido a la incertidumbre en la ocurrencia de un evento sísmico, se selecciono el acelerógrafo para registros fuertes Etna de Kinematics por su característica de autonomía, ya que realiza el registro del evento de forma automatizada. Este equipo consta en general de un acelerómetro triaxial interno, un amplificador de señal, un software integrado para el tratamiento de la señal, tarjeta madre, microprocesador, sistema GPS para la ubicación del punto de medición, baterías y tarjetas de memoria [9]. En la Figura 3 se observa una vista interna del equipo.

- Se consultó la normativa existente en nuestro país en cuanto a los valores límites de la deriva y lo referente al tipo, número de instrumentos y la ubicación de estos, al igual que las limitaciones de espacio físico de la estructura para la ubicación de los equipos.
- Se consideró la influencia del ambiente (cambios de temperatura, ruido, viento, etc.) en la escogencia del tipo de instrumentos y la experiencia del personal de FUNVISIS como personal calificado para la asesoría técnica.
- Para la instalación, calibración y mantenimiento de los equipos se atendió a las indicaciones del fabricante, los lineamientos normativos existentes y la experiencia del personal de FUNVISIS.
- Se consideró el nivel tanto económico como cultural de los habitantes de la edificación que garantice que los equipos se mantendrán en la edificación y que recibirán su adecuado mantenimiento (factor que en la actualidad será considerado en futuros proyectos debido a las experiencias acumuladas en varios años, aunque no se plantea en la Norma).

4. Propuesta de instrumentación

4.1. Equipos de medición

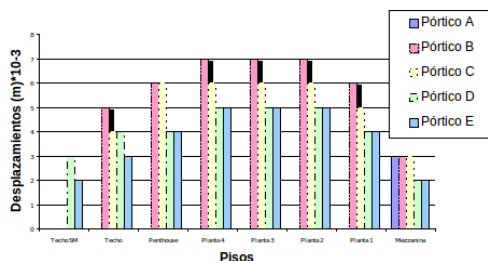


Figura 4: Derivas laterales de los Pórticos A al G en dirección Y

- Se utilizarán dos equipos, uno en la planta tres y otro en la cuatro; ya que el mayor desplazamiento relativo teórico de la estructura

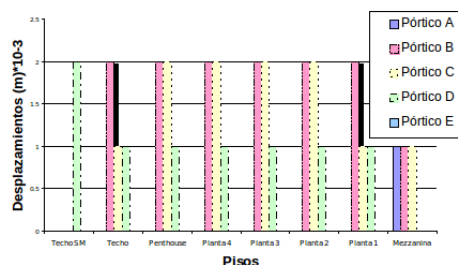


Figura 5: Derivas Laterales de los Pórticos A al G en Dirección X

para el sismo de diseño se registró entre estos entrepisos (obsérvese los valores de deriva en las Figuras 4 y 5 para ambas direcciones principales y para la combinación de efectos.

- Se decide colocar los acelerógrafos en una habitación de dimensiones 2.22 m. por 1.70 m cercana al centro de masa de cada piso, dentro de un closet de 1.05 m. por 0.50 m. para mantenerlo resguardado y lejos de las áreas de circulación. El lugar de colocación de los aparatos se encuentra cercano al centro de masas para evitar los errores en la medición por efectos de torsión [10].
- Ambos acelerógrafos se colocarán alineados verticalmente para asegurar que los desplazamientos absolutos estén referenciados respecto de una misma vertical.
- Los equipos estarán atornillados a la losa de piso para evitar desprendimiento del Epi-Sensor interno [10], la cual será maciza en la zona de colocación del instrumento para proporcionar una zona de anclaje más rígida.
- La orientación de cada EpiSensor coincidirá con los ejes principales de la edificación, con la finalidad de poder comparar los desplazamientos con los obtenidos para el sismo de diseño.
- Se utilizarán solo dos canales de medición que correspondan con la aceleración en las dos direcciones principales de la edificación.

- Los equipos no se conectarán entre sí mediante cables sino que se programarán para que cada canal de un sensor se active al registrarse el evento de interés, de modo que el al activarse cualquier canal todos los restantes comiencen simultáneamente la medición y el acelerógrafo responda al estímulo.

4.2. Descripción del Sistema de Respuesta Automatizado

- Dos acelerógrafos Etna
- Línea telefónica residencial de CANTV y línea neutra para proveer descarga a tierra (esto se refiere a la instalación completa del sistema telefónico, cableado, cajetines, etc.).
- Adaptador para conectar la línea telefónica al equipo (conector macho de 25 pines que provee kinematics junto con los acelerógrafos).
- Una computadora con los programas Quick-Talk y QuickLook (cabe destacar que el usuario puede desarrollar sus propios programas para procesar la información).
- Cable de conexión RS-232 de kinematics para conectar la computadora al puerto de comunicaciones.

5. Metodología para la instrumentación sísmica de edificios

Se propone a continuación una metodología para realizar la instrumentación de edificaciones bajo efecto de cargas sísmicas, como aporte adicional de este trabajo.

1. Definir el o los objetivos de la instrumentación.
2. Escoger la edificación a instrumentar:
 - La selección de la edificación es función de los objetivos propuestos.
 - Las autoridades nacionales, estatales o municipales determinarán la necesidad de instrumentar una edificación para conocer su respuesta a las acciones sísmicas” [10].

- A FUNVISIS le corresponde coordinar la elección y distribución de sitios y registros [10].

3. Seleccionar la magnitud a medir:

- Preferiblemente la aceleración, ya que ofrece la posibilidad de proporcionar la velocidad y el desplazamiento en el punto de medición a través de un proceso de doble integración.

4. Establecer las características de la edificación que definen su respuesta a la acción sísmica:

- Peso de la edificación, forma de la(s) planta(s), uso, período natural de vibración, etc.

5. Preseleccionar los instrumentos más adecuados a las condiciones dadas:

- Estudiar sus características propias, ventajas y desventajas.
- En el caso del registro de movimientos fuertes utilizar acelerógrafos digitales [10].
- Para otro tipo de registros utilizar el instrumento que se considere adecuado siempre y cuando cuente con la aprobación de FUNVISIS [8].

6. Cumplir con las disposiciones normativas existentes aplicándolas al caso en estudio:

- En edificios con más de seis niveles ó área de construcción mayor o igual a 6.000 m², se colocarán tres equipos de medición; estos se ubicarán en la base, en el tope y el último en campo libre en un área representativa del perfil geotécnico [10].
- En edificios con más de diez niveles no importa el área construida, se colocarán cuatro equipos de medición; estos se ubicarán en la base, a media altura, en el tope y el último en campo libre en un área representativa del perfil geotécnico [10].

7. Ubicar los equipos en áreas que permitan la operación óptima de los mismos, su transporte, colocación, mantenimiento, reparación y calibración de forma segura:
 - Deberán estar interconectados entre sí para garantizar registros simultáneos, alineados verticalmente, lejos de las áreas de circulación y de fácil acceso [10].
 - Para registros fuertes, colocarlos sobre la losa de piso si poseen sensor interno, en caso contrario pueden colocarse en paredes y estantes; preferiblemente en los centros de masa de cada planta para evitar que efectos de la torsión introduzcan errores en la medición.
8. Considerar la influencia del ambiente sobre los equipos:
 - Verificar que los cambios de temperatura, variaciones locales de capacidad, variaciones de tensión en la superficie, radiación nuclear y vibraciones producidas en dirección distinta a la de medición no afecten la sensibilidad de los mismos.
 - No colocar cables en las proximidades de máquinas en funcionamiento para evitar el ruido electromagnético.
 - Asegurar las conexiones no estancas con resinas epóxicas y no colocar equipos en contacto directo con sustancias corrosivas.
9. Contratar personal calificado para la instalación, manejo, calibración y mantenimiento de los equipos, así como para la recuperación de la información:
 - Solicitar asesoría técnica del personal de FUNVISIS [10].
10. Cumplir las medidas de seguridad recomendadas por el fabricante del equipo y el personal que labora en FUNVISIS.
11. Realizar el mantenimiento con la frecuencia especificada por el fabricante:
 - Este lapso de tiempo no será mayor que el establecido por la Norma y la calibración de los equipos deberá hacerse cada tres meses [10].
12. Evaluar el nivel económico y cultural de los habitantes de la edificación.
13. Seleccionar los equipos, su interconexión y el procedimiento de medición y recuperación de la información.

6. Conclusiones

De los resultados de este trabajo hay que destacar los aspectos siguientes.

La instrumentación sísmica para medir desplazamientos laterales en edificios de forma inteligente y automatizada es factible. Los criterios a considerar en el proceso de instrumentación son: el objetivo, la magnitud a medir, tipos de instrumentos, características de la estructura, lineamientos normativos, requerimiento de espacio físico, influencia del ambiente, personal calificado, seguridad, mantenimiento y costos. El objetivo de la instrumentación es el criterio más importante a considerar para planear la selección e instalación de los equipos.

Las características propias de la estructura como el peso, forma, uso y sistema estructural influyen en la respuesta de la misma ante cargas sísmicas. El factor que ejerció una influencia significativa en la elección del equipo de medición fue el tipo de carga bajo la cual se realizó el estudio (cargas sísmicas), siendo la magnitud a medir la que definió la elección de acelerógrafos y al Etna por su autonomía.

El máximo desplazamiento lateral relativo teórico bajo el sismo de diseño se presentó entre las plantas tipo tres y cuatro. El cálculo de los desplazamientos laterales bajo el sismo de diseño permitió definir el sitio de colocación de los equipos y el número de ellos, sin embargo los detalles exactos de la instalación dependen de las condiciones locales.

Las disposiciones de la Norma Venezolana COVENIN 1756-1: 2001 fueron el punto decisivo en la elección del número de equipos a colocar, y la ubicación de los mismos en cada planta.

Recomendaciones

Para modificaciones posteriores de la Norma Sísmica Venezolana, se recomienda la incorporación de los criterios de instrumentación propuestos, a manera de establecerlos como pautas y referencia al momento de realizar el proyecto de instrumentación con la finalidad de hacer más eficientes las acciones a seguir y permitir una mejor evaluación de los parámetros estipulados en función de los requerimientos de un proyecto en particular.

Considerar para proyectos futuros el nivel socio-cultural de los habitantes de la edificación en la selección tanto de la estructura a instrumentar como del tipo de instrumentos, basándose en las experiencias acumuladas en los últimos años por el personal de FUNVISIS.

Referencias

- [1] Nathan Mortimore Newmark, Emilio Rosenblueth, and José Luis Lepe. *Fundamentos de ingeniería sísmica*. Diana, 1982.
- [2] Enrique Bazán and Roberto Meli. *Diseño sísmico de edificio*. Limusa, México, 2004.
- [3] Aurel A Beles, Mihail D Ifrim, and A García Yagüe. *Elementos de ingeniería sísmica*. Omega, Barcelona, España, 1975.
- [4] Leopoldo Molina and José Manuel Ruiz. *Instalaciones automatizadas en viviendas y edificios: ciclo formativo, grado medio*. McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, España, 1999.
- [5] G Estrada. *Estructuras antisísmicas*. Editorial CECSA, México, 1975.
- [6] Domenico Lombardi and Subhamoy Bhattacharya. Modal analysis of pile-supported structures during seismic liquefaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(1):119–138, 2014.
- [7] Bismarck N Luna, Jonathan P Rivera, and Andrew S Whittaker. Seismic behavior of low-aspect-ratio reinforced concrete shear walls. *ACI Structural Journal*, 112(5):593, 2015.
- [8] Aharon Kameo-Cohén. Estudio de la deriva sísmica y las variables sistémicas importantes que inciden en ella. Master's thesis, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela, 1988.
- [9] Etna Corporation. *Etna User Guide*.
- [10] Edificaciones sismorresistentes, 1756-1:2001, 2001.