

Capítulo 7. Rehabilitación de edificios dañados en el sismo del 20 de octubre de 1995

Jorge Alfredo Aguilar Carboney
(UNACH)

Mario S. Ramírez Centeno
(UAM)

Robertony Cruz Díaz
(UNACH)

José Alonso Figueroa Gallegos
(UNACH)

Raúl González Herrera
(UNICACH)

Carlos Narcía López
(UNICACH)

Introducción

El sismo del 20 de octubre de 1995 con epicentro en la Depresión Central de Chiapas a 38 km de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, provocó considerables daños estructurales en estructuras de mampostería y concreto reforzado en varias poblaciones cercanas a la zona epicentral. Los daños estructurales severos en diversas edificaciones, principalmente de concreto y mampostería, exigieron proyectos interesantes de reparación y refuerzo estructural, algunos resueltos en áreas rurales de manera empírica, otros propuestos ingenierilmente como es el caso del

edificio de la rectoría de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) de un sólo nivel, estructurado con losa reticular y cimentación de zapatas aisladas, que sufrió daños severos en columnas y muros de mampostería. Se presenta este proyecto como un caso exitoso de intervención estructural después del sismo de Villaflores.

La única estación acelerométrica en una zona urbana de Chiapas que registró el sismo, está ubicada a unos 300 m de este edificio, registró una aceleración a nivel de terreno de 442 cm/seg^2 . El proceso global de reparación y refuerzo de la estructura incluyó inyección de grietas con resina, encamisado de columnas y reestructuración de capiteles. Se realizó también el refuerzo de la cimentación existente mediante el encamisado de contratrabes y el aumento de las dimensiones de las zapatas.

Previamente al desarrollo del proyecto de rehabilitación del edificio dañado se realizaron mediciones experimentales de las propiedades dinámicas de la estructura, mediante el análisis de mediciones de vibración ambiental, estas mediciones se repitieron después de terminado el proyecto de refuerzo. La información obtenida de las propiedades dinámicas del edificio antes y después de su reestructuración muestra importantes cambios en los periodos naturales de vibración y en consecuencia sustanciales incrementos en la rigidez, resistencia y capacidad de deformación de la estructura reparada.

El sismo del 20 de octubre de 1995

El 20 de octubre de 1995 a las 20:39 horas, hora local (21 de octubre a las 2:39 horas GMT) ocurrió un sismo cuyo epicentro se ubicó aproximadamente a 38 km al noreste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Sus coordenadas epicentrales fueron 16.89° de latitud norte y 93.45° de longitud oeste, la profundidad estimada fue de 161 Km (sismo semiprofundo) y la magnitud 6.2 Mb (7.3 Mw) según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S. por las siglas en inglés).

El movimiento fue registrado por la estación acelerométrica XC, perteneciente a la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS). La estación está ubicada en la Facultad de Ingeniería de la

UNACH campus I, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en las coordenadas 16.75° de latitud norte y 93.16° de longitud oeste, a 530 msnm sobre suelo sedimentario.

De acuerdo con el reporte RIIS-05 (Sordo y otros, 1996) la aceleración máxima registrada en la dirección E-O fue de 323 cm/seg², en tanto que en la dirección N-S fue de 442 cm/seg² (véase figura 1). En dirección vertical la aceleración máxima fue de 115 cm/seg². Esta fue la única estación acelerométrica que registró el movimiento en el estado de Chiapas a excepción de los equipos de Rebollar y otros, 1999. Es importante mencionar que es la máxima aceleración instrumentalmente registrada a nivel de terreno, en una zona urbana en México hasta la fecha.

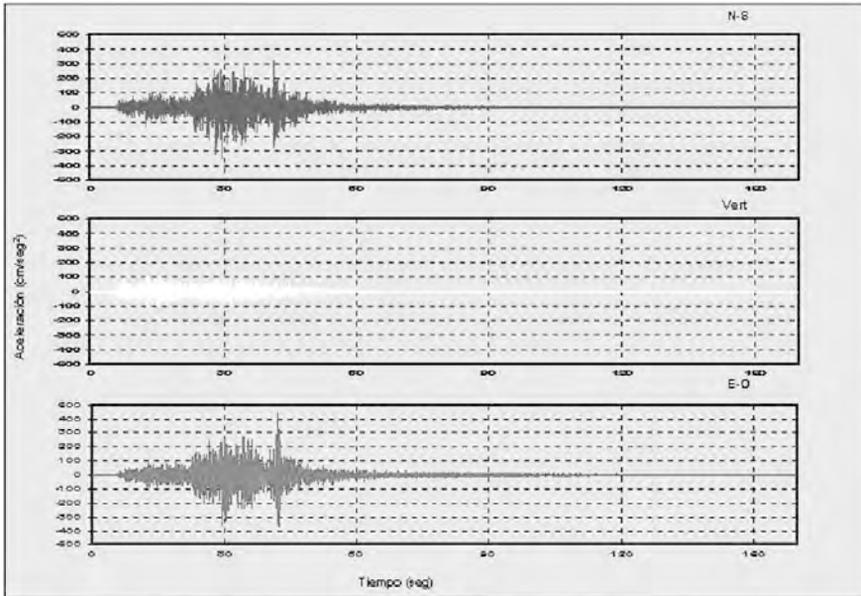


Figura 1. Acelerogramas del sismo del 20 de octubre de 1995 registrados en la Estación Central de la UNACH Campus I (SMIS, 2000).

Descripción de la estructura original

El edificio de Rectoría de la UNACH fue construido a finales de 1978, está ubicado en la zona sur-poniente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; sobre una elevación topográfica de suelo firme, básicamente calizas con una capacidad de carga admisible mayor a los 12 ton/m² (Narcía y Tovilla, 1999).

El edificio consta de un solo nivel y su planta es rectangular con una oquedad en el centro (discontinuidad del diafragma), como se muestra en la figura 2, un elemento clave que generó consecuencias en el sismo, es el que se conectaron muros que no debían trabajar arriostrando las columnas, con lo cual se amplificaban los cortantes por las excentricidades generadas por el acomodo de elementos estructurales de manera asimétrica. Está estructurado con losa reticular con espesor total de 35 cm y columnas de concreto de 50x50 cm, los claros entre columnas son de 800 cm en ambas direcciones. Es importante mencionar que en la azotea se encontró un relleno de 40 cm sobre la losa reticular por cuestiones de drenajes pluviales, lo que representa una sobrecarga considerable.

La cimentación se estructuró a base de zapatas aisladas cuadradas, 140 cm por lado, ligadas por contratrabes. De acuerdo con los planos estructurales originales, se especificó desplantar las zapatas a un mínimo de 85 cm por debajo del terreno natural. Durante el proceso de rehabilitación se detectó que el desplante se realizó entre 100 y 120 cm de profundidad, salvo en un caso en particular que se desplantó a 160 cm, también se observaron discrepancias en las dimensiones en planta de las zapatas. Estas variaciones se presume están asociadas a las dificultades de excavación por la resistencia del terreno y deficiencias en el proceso constructivo (figura 3).

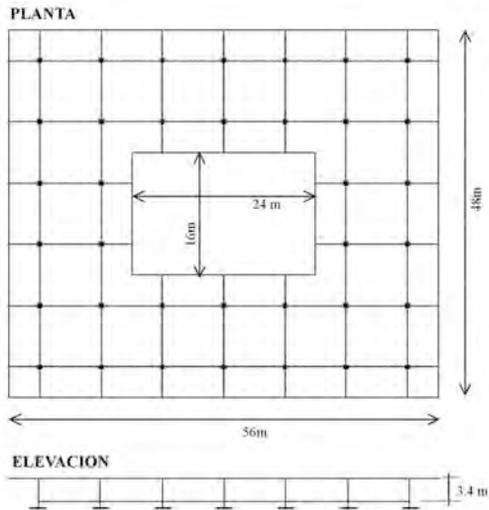


Figura 2. Dimensiones generales del edificio.



Figura 3. Detalle de cimentación original.

Daños provocados por el sismo

El sismo del 12 de octubre de 1995 provocó daños en 32 de las 36 columnas existentes. En doce de las columnas dañadas se clasificó el daño como estructural fuerte básicamente por cortante, en las columnas restantes se presentó agrietamiento ligero. Los muros divisorios de

mampostería en la zona de baños presentaron agrietamientos severos y aplastamiento en los castillos (Narcía y Tovilla, 1999), ver figuras 4 y 5. Debe mencionarse que en los planos de construcción originales se indica una separación de 2 cm entre los muros no estructurales y las columnas, esta especificación no se respetó ya que los muros se construyeron sin holgura con las columnas. No se observó daños en la losa reticular.



Figura 4. Daños en columna con pretil superior.



Figura 5. Daños en columnas.

Proyecto de rehabilitación estructural

Después del sismo de 1995 la estructura se apuntaló provisionalmente en la zona de baños, donde se concertaron los daños más graves y el edificio fue desocupado parcialmente, posteriormente el edificio fue desocupado totalmente y se iniciaron las obras de rehabilitación estructural en el año de 1999.

Se estableció un programa de inyección con resina epóxicas en todas las columnas con daños, en general en los agrietamientos visibles. El procedimiento de inyección se realizó con pistola de inyección a través de boquillas colocadas en un sellador superficial. Para verificar la eficiencia de la inyección se realizaron pruebas de ultrasonido, en el reporte del estudio de ultrasonido se infiere que las resistencias del concreto existente son superiores a las especificadas por el proyecto estructural original ($f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$), (ver figura 6).



Figura 6. Inyección de grietas.



Figura 7. Refuerzo en columnas y contratraves mediante encamisado.



Figura 8. Detalle de refuerzo en unión del nudo de columna con contratrabe.

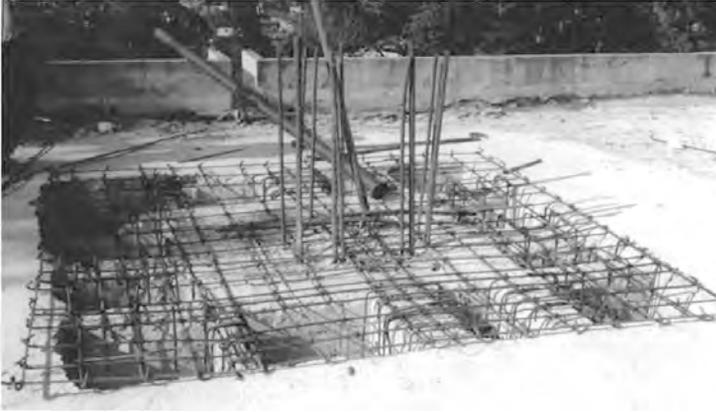


Figura 9. Refuerzo superior en capiteles.

Para definir el proyecto estructural de refuerzo se modeló la estructura con el método del marco equivalente de acuerdo con las NTC (1996). Como espectro de diseño sísmico se utilizó la propuesta de zonificación sísmica para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Alonso y otros, 1995), la cual recomienda un coeficiente sísmico $c = 0.60$. De acuerdo con los resultados de este análisis, se estableció la necesidad de reforzar las columnas, la zona de capiteles y la cimentación.

Se estableció un proyecto para encamisar las columnas, aumentando su sección a 70×70 cm, finalmente por diversos problemas constructivos se ampliaron a 80×80 cm. Los capiteles se ampliaron cubriendo un casetón de la losa reticular, se reforzaron con dos parrillas horizontales, una en la superficie interior de la losa y otra en la azotea, con estribos adicionales en las nervaduras encamisadas. Para la cimentación, se realizó el encamisado integral de las contratrabes y dados, así también se ampliaron las zapatas con armado adicional. En las figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan algunos detalles del proceso de refuerzo del encamisado y refuerzo de los distintos elementos.

Determinación experimental del cambio de rigidez

Con el objetivo de evaluar el cambio de rigidez de la estructura, después del sismo del 20 de octubre se efectuaron registros de vibración

ambiental en el edificio. Básicamente se planteó la hipótesis de que a través de la determinación experimental de los primeros periodos de vibración antes y después del refuerzo se podría valorar el cambio de rigidez en la estructura y con ello determinar la efectividad del mismo. Así, con el fin de determinar los primeros periodos naturales de vibración del edificio, tanto antes como después del refuerzo se registró la vibración ambiental en diversos sitios del mismo.

El equipo utilizado para registrar la vibración consistió en una grabadora digital Kinematics SSR-1, con resolución de 16 bits y seis canales de registro simultaneo. Se utilizaron además seis sensores acelerométricos Kinematics FBA-11, con un g de escala máxima de aceleración (Figuras 10 y 11). El equipo se controló mediante un computador portátil. El programa de comunicaciones utilizado fue el Quick Talk.

Los arreglos de colocación de los sensores, tanto antes como después del refuerzo, fueron iguales. Consistieron en la colocación de los seis sensores en la planta de azotea del edificio, tres en la dirección N-S y tres en la dirección E-O. Se registraron diez eventos de 60 segundos de duración cada uno con este arreglo. Se aplicó un filtro pasa banda tipo Ormsby que elimina las componentes de frecuencia superiores a 15 Hz (Bendat, 1986).



Figura 10. Registro de la vibración ambiental en la azotea del edificio reforzado.

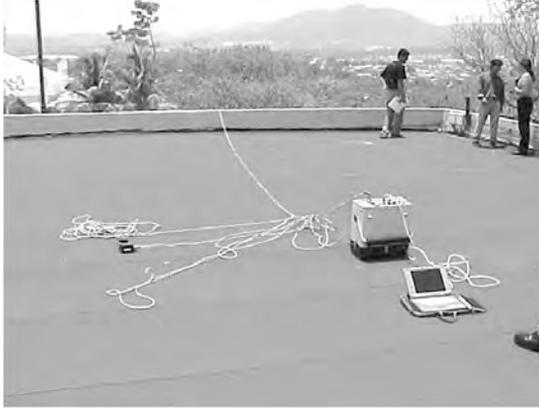


Figura 11. Vista del arreglo del equipo durante el registro de la vibración ambiental.

Una vez registrada la información, ésta se procesó inicialmente con el paquete de cómputo SWS-1 (Kinemetrics, 1989), con el fin de obtener las historias de aceleración corregidas. Posteriormente se obtuvieron los espectros promedio de Fourier mediante el programa MAC/RAN (USS, 1990). Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 12 hasta 15. De la interpretación de los espectros promedio de Fourier obtenidos fue posible determinar los primeros cinco periodos naturales de vibración del edificio, tanto antes del refuerzo como después de éste.

Al observar los resultados, llama la atención la notable reducción en el periodo fundamental de vibración, el cual cambió desde 0.238 s hasta 0.100 s, lo que implica una reducción de 58%. Estos resultados indican un cambio notable en la rigidez. Para valuar el cambio de la rigidez original, considerando que se trata de una estructura de un nivel, es posible estudiarla como un sistema de un grado de libertad en el que se involucra la masa efectiva de las columnas. Debido a que el proyecto de refuerzo básicamente implicó el refuerzo de las columnas mediante el encamisado de las mismas, el cambio de masa se originó sólo en éstas últimas. Como no fue posible despreciar la masa de las columnas, se consideró el efecto de la masa de éstas o masa efectiva en un sistema de un grado de libertad. El cambio en la rigidez estructural es notable, ya que se incrementó en 366%.

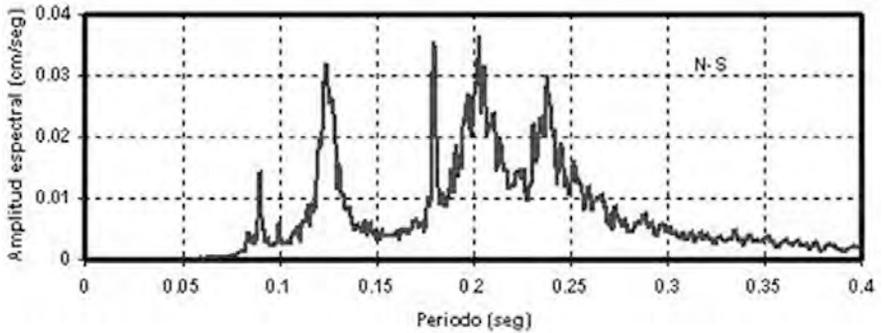


Figura 12. Espectro de Fourier promedio obtenido para la dirección N-S antes del refuerzo.

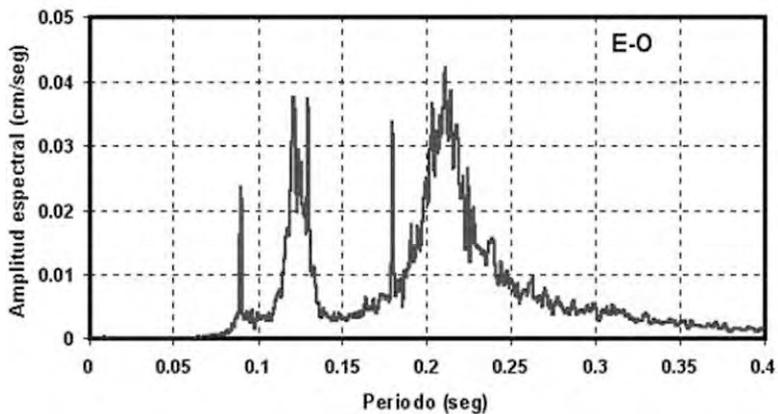


Figura 13. Espectro de Fourier promedio obtenido para la dirección E-O antes del refuerzo.

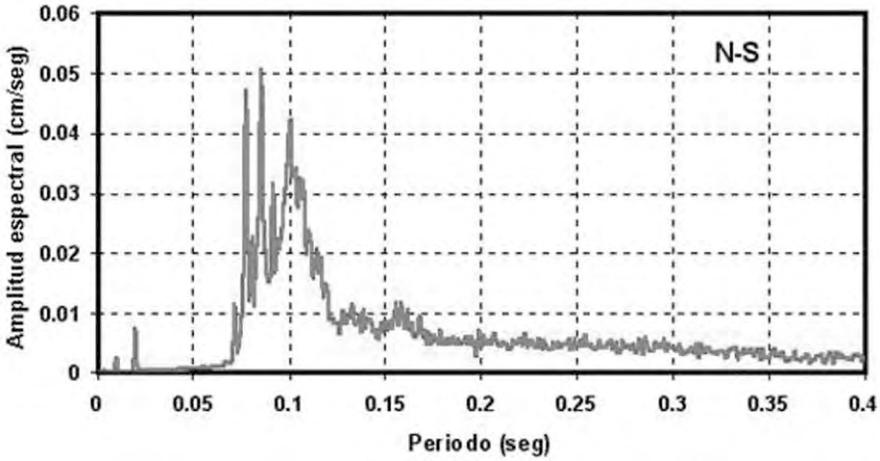


Figura 14. Espectro de Fourier promedio obtenido para la dirección N-S después del refuerzo.

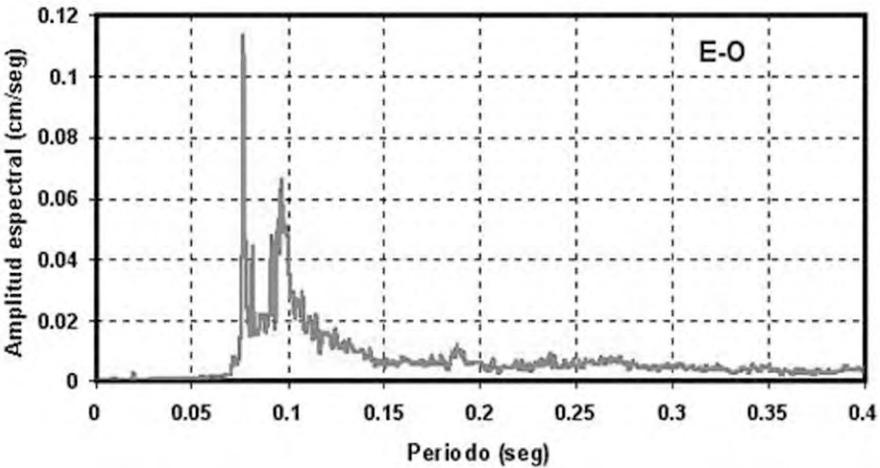


Figura 15. Espectro de Fourier promedio obtenido para la dirección E-O después del refuerzo.

Tabla 1 Periodos naturales de vibración obtenidos antes del refuerzo (seg.)

Dirección	Periodo natural de vibración (seg)		
	1°	2°	3°
E-O	0.215	0.130	0.122
N-S	0.238	0.124	
Torsión	0.180	0.090	

Tabla 2 Periodos naturales de vibración obtenidos después del refuerzo (seg.)

Dirección	Periodo natural de vibración (seg)		
	1°	2°	3°
E-O	0.096	0.087	---
N-S	0.100	---	---
Torsión	0.077	---	---

Evaluación simplificada del cambio de resistencia

Con la finalidad de contar con un parámetro de referencia para evaluar el cambio en la resistencia global del edificio, debido al proceso de rehabilitación, se aplicó la metodología de evaluación simplificada para edificios de concreto propuesta en el *Manual de evaluación de la capacidad sísmica de edificios en la ciudad de México (1987)*, la cual es aplicable para este tipo de edificios y nos aporta una referencia aceptable del nivel de resistencia en términos relativos.

De acuerdo con los resultados de esta evaluación aproximada del edificio, el parámetro de resistencia K para la estructura original es de 0.20, para la estructura reforzada es de 0.73. Esto implica que un incremento en la resistencia de 265%.

Se realizaron varios modelos analíticos más detallados de la estructura, Nava (2003) describe el análisis dinámico de la estructura, lineal y no lineal, reportando resultados que son muy congruentes con lo presentado en este documento.

Conclusiones

En la figura 16 se muestran los principales resultados de la evaluación. Se presenta el espectro de respuesta para el 5% de amortiguamiento del sismo del 20 de octubre de 1995 registrado en la estación acelerométrica ubicada dentro de la UNACH, Campus I, para las direcciones N-S y E-O. Es notable la aceleración espectral máxima que se alcanza para un periodo de 0.20 s, más de 2000 cm/seg². Se muestra además el nivel de resistencia original de acuerdo con el Método de Evaluación Simplificado, asociado al periodo fundamental de vibración para esa condición. También se presenta la condición reforzada del inmueble.

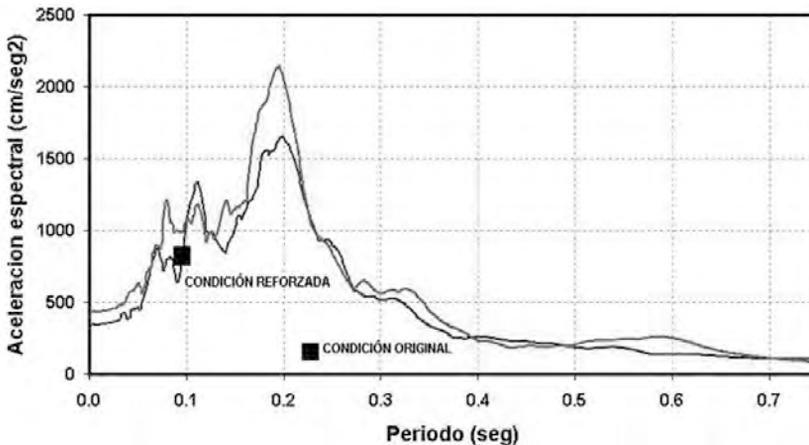


Figura 16. Espectro de respuesta del sismo del 20 de octubre de 1995.

De la gráfica de la figura 16 se puede inferir que:

1. El cortante basal resistente del edificio se incrementó notablemente (265%)
2. El periodo fundamental de vibración se redujo en 58%, lo que implica un incremento en la rigidez estructural del 366%
3. La estructura satisface los requisitos de resistencia solicitados por el RCDF-93.
4. El proceso de refuerzo alejó al periodo natural de vibración final de la estructura (0.10 s) del propio del terreno (0.20 s).

Por tanto, se verificó la eficacia del refuerzo al que se sometió a la estructura. El incremento en la rigidez fue notable, así como el incremento en el coeficiente de cortante basal resistente determinado mediante un método simplificado. Fue también muy benéfica la disminución en el periodo fundamental de vibración, que descarta en el futuro el problema de la resonancia estructural al que probablemente se vio sometida la estructura durante el sismo del 20 de octubre de 1995.

Este es sin duda uno de los casos de rehabilitación estructural más exitosa y documentada después del sismo de 1995 en Chiapas. La estructura ha tenido un comportamiento sísmico adecuado antes los eventos que se ha sometido en los últimos quince años. Desafortunadamente otros proyectos de intervención estructural relevantes en la región afectada por el sismo de Villaflores, no fueron documentados suficientemente para observar su comportamiento posterior y su experiencia sísmica en el tiempo. Asimismo, es preocupante que un gran número de edificaciones menores fueron reparadas y reforzadas por método empíricos sin ningún sustento ingenieril y continúan, hasta la fecha, siendo estructuras muy vulnerables.

Bibliografía

Alonso G., Cruz R., Santos F., Ramírez M., Ruiz Sandoval M. e Iglesias J. 1995, “Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez”, en *Informe de investigación Universidad Autónoma de Chiapas*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, mayo, s.p.

Bendat J., y Piersol A. 1986, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*, 2nd edition, Wiley Interscience. New York, N.Y.

Departamento del Distrito Federal, 1996, “Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto”, en *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México D.F., marzo, 71pp.

Departamento del Distrito Federal. 1987, “Evaluación de la capacidad sísmica de edificios en la ciudad de México”, en *Manual operativo Secretaría General de Obras*, México D.F., enero, s.p.

Kinematics Inc, 1989, “SWS-1: Seismic Workstation Software”, s.p.

Narcía J. y Tovilla L. 1999, *Propuesta de rehabilitación estructural para el edificio de rectoría de la UNACH*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, junio, s.p.

Nava F., J. M. 2003, *Propiedades dinámicas del edificio de la rectoría de la Universidad Autónoma de Chiapas*, tesis para obtener el grado de maestro en

Ingeniería Estructural. Universidad Autónoma Metropolitana–Azcapotzalco, México, D.F.

Rebollar, C., L., Quintanar, J. Yamamoto y A. Uribe, 1999, “Source Process of the Chiapas, Mexico, Intermediate–Depth Earthquake of 21 October 1995”, en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 2, pp. 348–358, abril 1999.

Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), 2001, *Reportes técnicos RIIS–01 a RIIS–09*, disco compacto.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2000, *Base mexicana de datos de sismos fuertes*. disco compacto, vol. 2

University Software Systems (USS), 1990, *Micro MAC/RAN Software. Time Series & Spectral Analysis System*, Los Angeles, California.