

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DE DOS EDIFICIOS PREFABRICADOS DE CONCRETO REFORZADO CON Y SIN DISIPADORES TIPO CRP

Héctor Guerrero<sup>(1)</sup>, J. Alberto Escobar<sup>(2)</sup>, Roberto Durán<sup>(2)</sup>, Roberto Gómez<sup>(2)</sup> y Tianjian Ji<sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado, Universidad de Mánchester, Reino Unido, [hector.guerrero@manchester.ac.uk](mailto:hector.guerrero@manchester.ac.uk)

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Mexico, D.F., [jess@pumas.iingen.unam.mx](mailto:jess@pumas.iingen.unam.mx), [rgomez@iingen.unam.mx](mailto:rgomez@iingen.unam.mx), [RDuranH@iingen.unam.mx](mailto:RDuranH@iingen.unam.mx)

<sup>3</sup> Académico, Universidad de Mánchester, Reino Unido, [tianjian.ji@manchester.ac.uk](mailto:tianjian.ji@manchester.ac.uk)

### RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos de ensayos en dos modelos prefabricados de concreto reforzado en escala de 1/3 en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para fines de comparación, uno de ellos fue equipado con contraventeos restringidos al pandeo, CRP. Se supuso que ambos modelos estaban ubicados en la zona del lago de la Ciudad de México. Ambos modelos se sometieron a excitaciones de ruido blanco de intensidad baja y al movimiento sísmico SCT-EW 19/09/1985, escalado del 50 al 200%. Debido a los CRP, se observó un aumento importante del nivel de amortiguamiento, y una reducción de la respuesta estructural. Los experimentos se validaron con análisis numéricos.

### ABSTRACT

This paper presents experimental results of two reinforced concrete precast models in the scale of 1/3 tested on a shaking table at the Institute of Engineering, UNAM. For comparison purposes, one model was equipped with buckling-restrained braces, BRBs. It was assumed that the models were located in the lakebed zone of Mexico City. They were subjected to low-intensity white noises and the SCT-EW 19/09/1985 earthquake motion scaled from 50 to 200%. The results show that BRBs (a) increased the damping ratio significantly and (b) reduced the structural response considerably. The experiments were validated with numerical analyses.

### INTRODUCCIÓN

Los contraventeos restringidos al pandeo (CRP) han demostrado ser un sistema muy efectivo para disipar energía inducida en estructuras debida a la ocurrencia de sismos (Uang y Nakashima, 2004; Merrit et al., 2003). Estos sistemas constan de un núcleo metálico y una funda que evita el pandeo y que está hecha de tubo metálico relleno de concreto. Un material elástico es colocado entre el núcleo metálico y el concreto de la funda para evitar interacción directa de ellos. Más información se puede encontrar en Uang y Nakashima (2004) y en las referencias allí indicadas. Vale la pena mencionar que los CRP disipan energía por medio de ciclos de histéresis muy estables; que se generan debido a deformaciones axiales plásticas del núcleo metálico.

La introducción de CRP en estructuras puede ayudar a superar el escepticismo en este tipo de sistemas y a obtener, al mismo tiempo, sistemas más eficientes. En este estudio se presentan los resultados obtenidos de pruebas experimentales en mesa vibradora de dos modelos de edificios prefabricados de concreto reforzado a escala de 1/3. Para fines de comparación, uno de ellos estuvo equipado con CRP. Los resultados muestran que los CRP produjeron un aumento importante del nivel de amortiguamiento, y que redujeron la respuesta estructural de manera importante.

## EXPERIMENTO

Se seleccionó un edificio prototipo de uso habitacional ubicado en la zona IIIb (zona del lago) de la Ciudad de México. Después, se diseñaron dos modelos a partir del mismo prototipo. Debido a la capacidad de la mesa vibradora, los modelos fueron escalados usando factor de 1/3. También se utilizó un factor de masa por unidad de área 1/2 y se desarrollaron las leyes de similitud correspondientes.

### Leyes de similitud

Para escalar los modelos se utilizó la teoría de la modelación. Para ello, se realizaron las siguientes suposiciones:

- Los patrones de daño y mecanismos de falla en los modelos escalados son similares a los del prototipo.
- El factor de escala geométrico ( $f_g$ ) elegido fue igual a 1/3.
- Los materiales presentan las mismas propiedades en el prototipo y en el modelo escalado. Es decir, los esfuerzos y deformaciones unitarias en materiales tenían un factor de escala uno a uno.
- La masa, por unidad de área, se escaló con un factor ( $f_m$ ) igual a 1/2.

A partir de las suposiciones anteriores, se obtuvieron las leyes de similitud mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Leyes de similitud**

Longitud	$L_m = f_g L_p$
Área	$A_m = f_g^2 A_p$
Segundo momento de área	$I_m = f_g^4 I_p$
Masa / área	$\left(\frac{m_m}{A_m}\right) = f_m \left(\frac{m_p}{A_p}\right)$
Masa	$m_m = m_p \frac{A_m}{A_p} f_m = m_p f_m f_g^2$
Módulo de elasticidad	$E_m = E_p$
Esfuerzo	$\sigma_m = \sigma_p$
Periodo de vibración	$T_m = T_p \sqrt{f_g f_m}$
Paso del tiempo	$\Delta t_m = \Delta t_p \sqrt{f_g f_m}$
Desplazamiento	$d_m = f_g d_p$
Velocidad	$v_m = v_p \sqrt{f_g / f_m}$
Aceleración	$a_m = a_p / f_m$

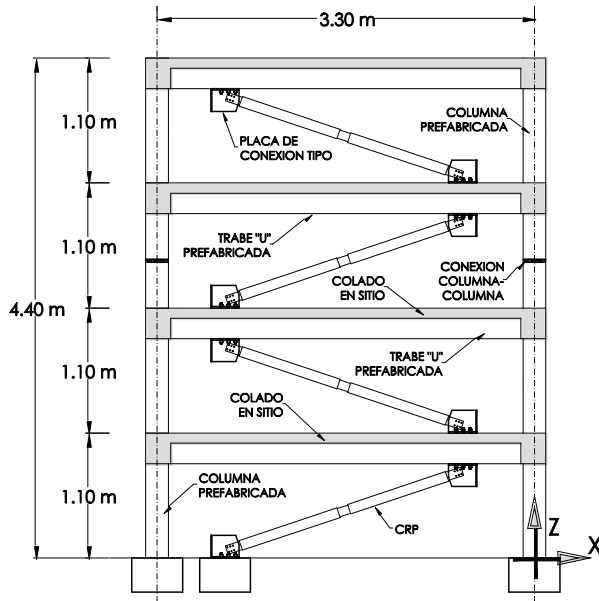
*Nomenclatura:* sufijo  $m$  = modelo escalado; sufijo  $p$  = prototipo en escala completa

### Características de los modelos ensayados

El primer modelo fue diseñado sin CRP y de acuerdo con los requisitos del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004) y sus Normas Técnicas Complementarias. El segundo modelo se equipó con disipadores tipo CRP y se diseñó de acuerdo con el método basado en el control de los desplazamientos laterales propuesto por Guerrero y Ji (2013). Los detalles de diseño se puede encontrar en (Guerrero, 2015).

Ambos modelos tuvieron las mismas dimensiones. Estas se presentan en la Figura 1a. Las masas fueron 420 kg/m<sup>2</sup> en los niveles uno a tres y 410 kg/m<sup>2</sup> en la azotea. Los modelos tuvieron cuatro pisos y altura total de 4.8 m. La

altura de entrepiso fue uniforme de 1.1 m. Las dimensiones en planta fueron de 3.3x3.3 m. El sistema de piso estaba hecho a base de losas alveolares de 10 cm de espesor y un firme de concreto reforzado de 2 cm de espesor. Las dimensiones de las traves y columnas fueron 15x27 cm y 20x20 cm, respectivamente. Estas se muestran en la Figura 2 junto con su correspondiente acero de refuerzo. Dado que el segundo modelo estaba equipado con CRP, este requiri6 menos acero de refuerzo. El 6rea del n6cleo de los CRP fue de 60 mm<sup>2</sup> en los niveles uno y dos y de 30 mm<sup>2</sup> en los niveles tres y cuatro. Las caracteristicas de los CRP utilizados en el experimento se describen posteriormente.



a) Dimensiones



b) vista general

Figura 1. Modelo ensayado en el laboratorio

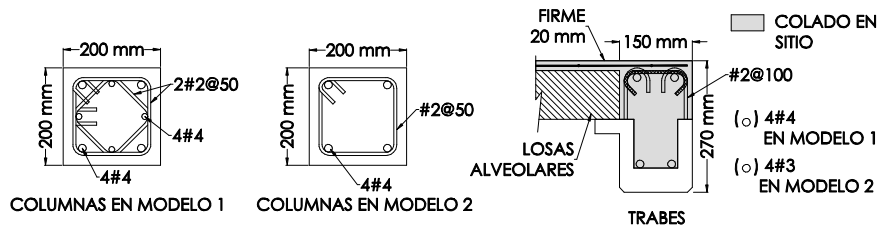


Figura 2. Secciones transversales de columnas y traves

Los elementos prefabricados fueron columnas, traves y losas alveolares. Estas fueron hechas en la planta de la empresa ITISA y ensambladas en el laboratorio de la mesa vibradora de la UNAM. Para el ensamblaje, se utilizaron apoyos met6licos temporales con la finalidad de colocar las piezas en sus posiciones correspondientes. Despu6s se coloc6 acero de refuerzo en los lechos superior e inferior de las traves prefabricadas y se colaron las conexiones con concreto. A este tipo de sistema, mostrado en la Figura 3, se le conoce como sistema prefabricado de conexi6n h6meda (P6rez-Navarrete, 2001).

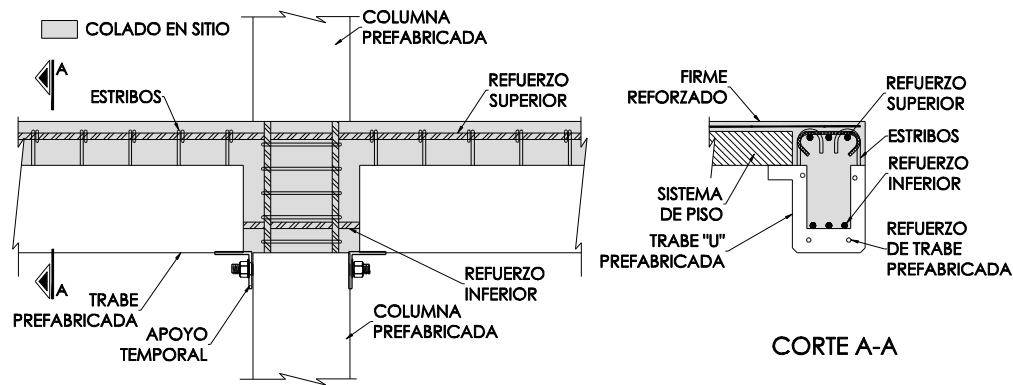


Figura 3. Sistema prefabricado

El concreto utilizado en traveses y columnas prefabricadas y en conexiones húmedas tuvo una resistencia nominal de  $f'_c=500 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que la losa prefabricada y firmes tuvieron resistencia nominal de  $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ . Se tomaron muestras del concreto utilizado durante la fabricación de los modelos. Sus capacidades fueron determinadas y se pueden encontrar en (Guerrero, 2015).

El refuerzo utilizado en traveses y columnas fue acero comercial mexicano con resistencia nominal  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ . Dado que no se tomaron muestras del acero de refuerzo, se consideró que el acero tiene un comportamiento típico de los aceros mexicanos (Rodríguez y Botero, 1996) como se muestra en la Figura 4. El acero de refuerzo en firmes del sistema de piso consistió de malla electrosoldada R-6x6-10/10 con resistencia nominal  $f_y=5000 \text{ kg/cm}^2$ .

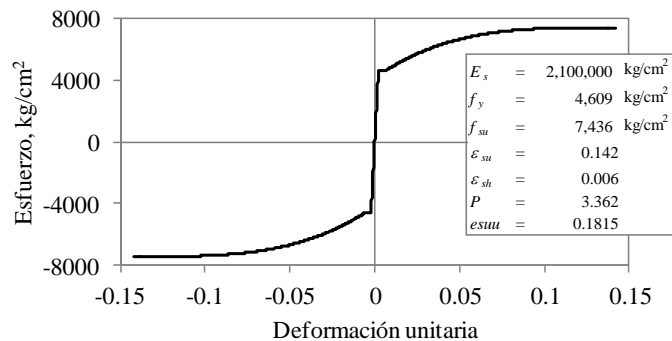


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación, típica de aceros de refuerzo en México

### Contraventeos restringidos al pandeo (CRP)

Durante las pruebas se utilizaron dos tipos de CRP, unos con núcleo rectangular y otros de núcleo circular. Por simplicidad sólo se muestran los resultados de los primeros. Estos se muestran en la Figura 5 y fueron fabricados como se detalla a continuación:

- Primero se prepararon los núcleos metálicos y se envolvieron con cuatro capas de cinta teflón como material elástico desadherente. También se colocó una capa adicional de material elástico en el canto del núcleo para permitir mayor deformación en la dirección mayor de la sección transversal y evitar problemas debido al efecto de *Poisson*.
- Se colocó el núcleo dentro del tubo metálico de la funda interior y se rellenó de mortero.
- Una vez que el mortero se endureció, se colocaron las placas de conexión. Para ello se realizaron cuatro perforaciones de 9 mm de diámetro y se colocaron tornillos de 8 mm de diámetro.

- Se colocó un material elástico de 15 mm de espesor entre la funda interior y las placas de conexión para permitir la deformación axial libre del núcleo de acero.
- Después, las placas de conexión y cada extremo de la funda interior se introdujeron dentro de su correspondiente funda exterior. Las zonas extremas de los tubos de la funda exterior se rellenaron con mortero.

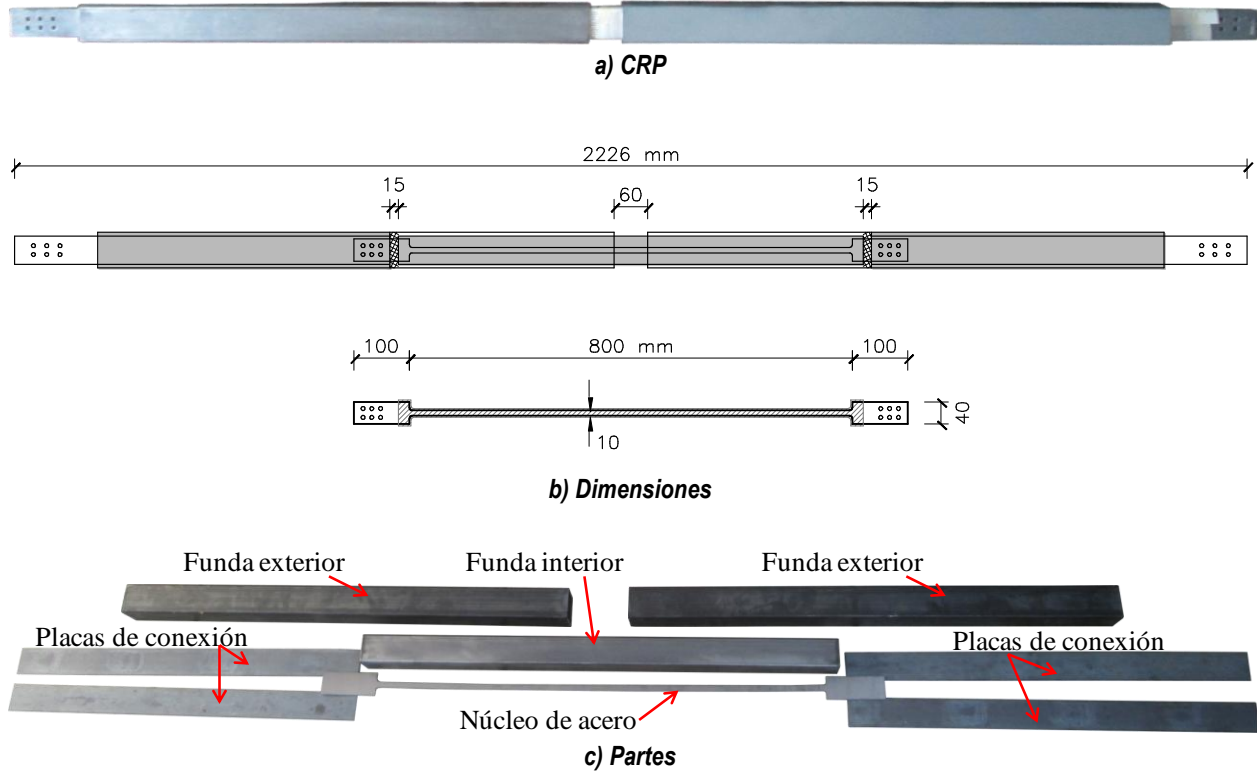


Figura 5. CRP utilizados en las pruebas

### Movimientos en la base

Para las pruebas se simularon dos tipos de movimientos en la base. El primero consistió de ruido blanco tipo RMS de baja intensidad (20 gal) con la finalidad de medir las variaciones de las propiedades dinámicas de los modelos. El segundo tipo consistió del registro de aceleraciones de la estación SCT componente EW, del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México (Figura 6). Este movimiento sísmico se simuló al 50, 100, 150 y 200% con la finalidad de medir la respuesta de los modelos sujetos a distintos niveles de intensidad. Es importante aclarar que antes de aplicar el movimiento sísmico, este fue también escalado en amplitud y tiempo por los factores de 2 y  $1/\sqrt{6}$ , respectivamente, de acuerdo con las leyes de similitud mostradas en la Tabla 1. Todas las pruebas se realizaron en la dirección del eje X; misma que fue la orientación de los CRP en el segundo modelo.

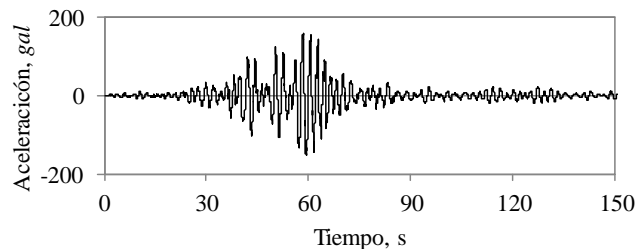


Figura 6. Registro sísmico SCT-EW del 19/09/1985

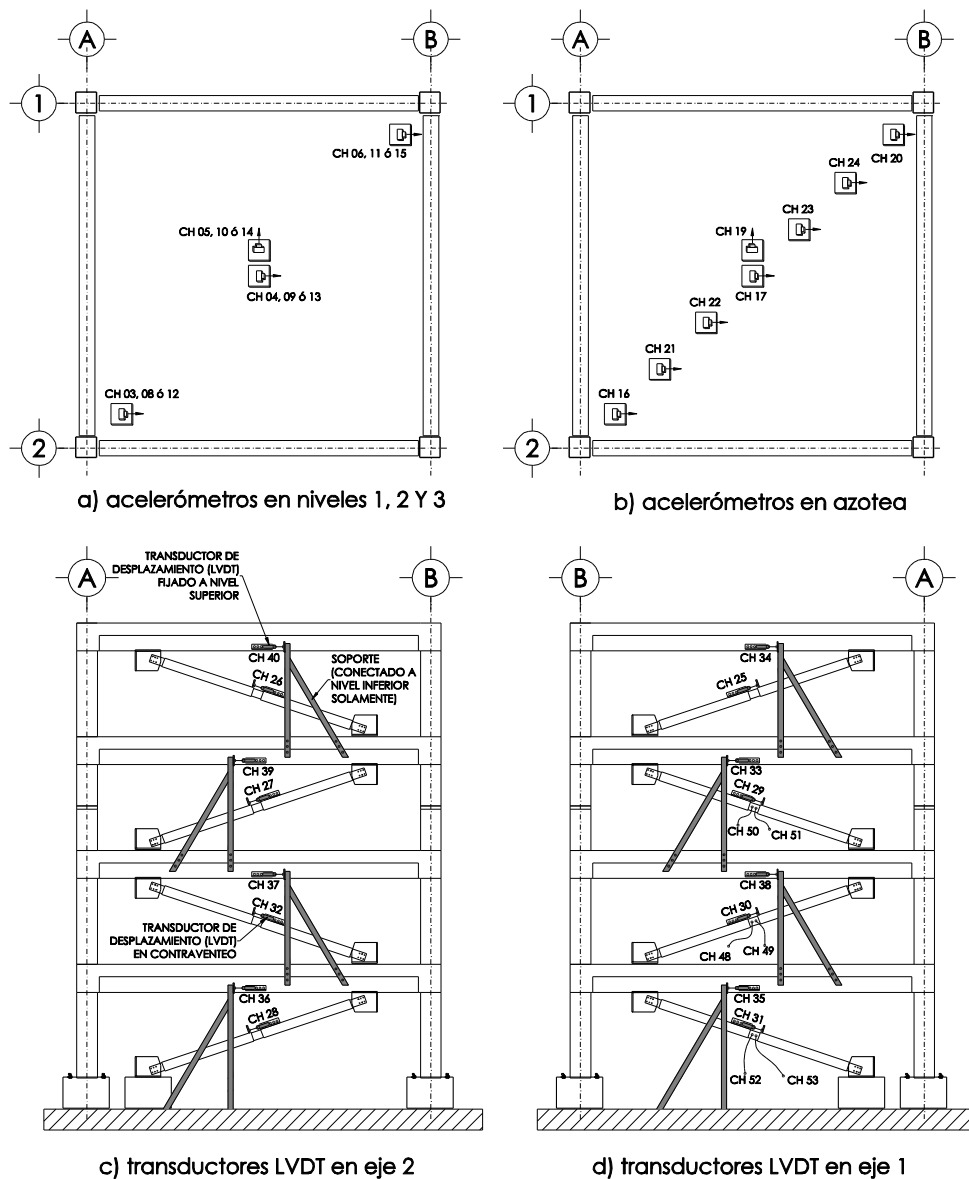


Figura 7. Colocación de instrumentos

### Instrumentación

En la Figura 7 se muestra la ubicación de acelerómetros en la base y en cada planta de los modelos. En todas las plantas se colocó un acelerómetro en la dirección del eje  $Y$ ; mientras que en la dirección de eje  $X$  se colocaron tres acelerómetros en las plantas 1 a 3 y siete en la azotea. Nótese que, para poder medir posibles efectos de torsión, se colocaron acelerómetros tanto en el centro geométrico de las plantas como lejos de éste.

Para medir desplazamientos relativos, se colocaron transductores de desplazamiento tipo LVDT en cada entrepiso. En el modelo con CRP se colocaron LVDTs en los dispositivos para medir las deformaciones axiales.

En los CRP del eje 2 correspondientes a los tres primeros niveles, se colocaron deformímetros (*strain gauges*) en los núcleos. Se colocaron dos deformímetros por núcleo, es decir, un total de seis.

### Programa de pruebas

Se realizaron varias pruebas en los modelos. Sin embargo, en este artículo se presenta sólo un resumen de las pruebas más representativas. En la Tabla 2 se aprecia que se aplicó ruido blanco de 20 gal antes y después de las pruebas con el registro sísmico SCT-EW. Esto para medir las variaciones de las propiedades dinámicas. Nótese que para el modelo 2 se aplicó ruido blanco con y sin CRP al inicio y al final de los ensayos. Esto además permitió obtener resultados para comparar directamente los efectos que causan los CRP en las propiedades dinámicas del modelo. El registro sísmico se modeló al 100, 150 y 200% para el Modelo 1 y al 50, 100, 150 y 200% para el Modelo 2.

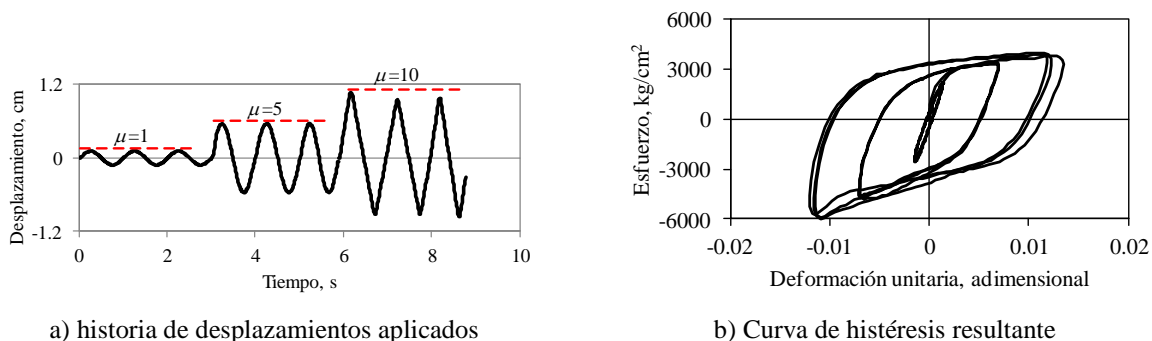
**Tabla 2. Resumen de pruebas realizadas en los modelos**

Modelo	Movimiento	Prueba	Intensidad	con CRP?
Modelo 1 (sin CRP)	Ruido blanco	A-1	20 gal	-
	SCT-EW	A-2	100%	-
	Ruido blanco	A-3	20 gal	-
	SCT-EW	A-4	150%	-
	Ruido blanco	A-5	20 gal	-
	SCT-EW	A-6	200%	-
	Ruido blanco	A-7	20 gal	-
Modelo 2	Ruido blanco	B-1	20 gal	No
		B-2	20 gal	Si
	SCT-EW	B-3	50%	Si
		B-4	100%	Si
		B-5	150%	Si
		B-6	200%	Si
	Ruido blanco	B-7	20 gal	No
		B-8	20 gal	Si

## RESULTADOS

### Comportamiento de CRP como elementos aislados

Antes de realizar las pruebas en mesa vibradora, un CRP como elemento aislado fue sometido a carga cíclica cuasi-estática con la finalidad de evaluar el comportamiento de los CRP antes de utilizarlos en el segundo modelo. La historia de desplazamientos aplicados y la curva de histéresis obtenida se muestran en la Figura 8. Como se puede apreciar, el CRP presentó ciclos histeréticos muy amplios y estables. Esto ya ha sido mostrado también por otros investigadores (Merrit et al., 2003) y significa que los CRP tienen una gran capacidad de disipación de energía.



**Figura 8. Pruebas en un CRP como elemento aislado**

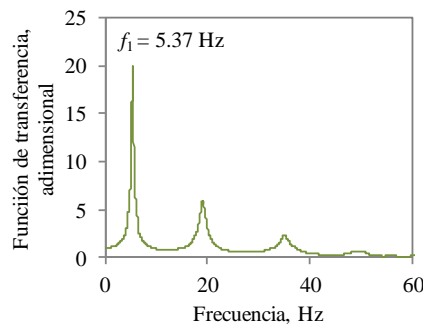
### Efectos de los CRP en la frecuencia de vibrar y amortiguamiento

En esta sección se presentan los efectos que tienen los CRP en las propiedades dinámicas del segundo modelo. Para ello se compararon las propiedades estimadas en las pruebas modelo sin y con CRP, respectivamente. Estas corresponden a las pruebas B-1 y B-2 o a las pruebas B-7 y B-8 de acuerdo con la Tabla 2. En la Figura 9 se presentan las funciones de transferencia de las pruebas B-1 y B-2. Ahí también se indican las frecuencias fundamentales. Como era de esperarse, los CRP incrementaron la frecuencia de vibrar. Es importante destacar que este incremento fue controlado desde la etapa de diseño al aplicar el método propuesto por Guerrero y Ji (2013).

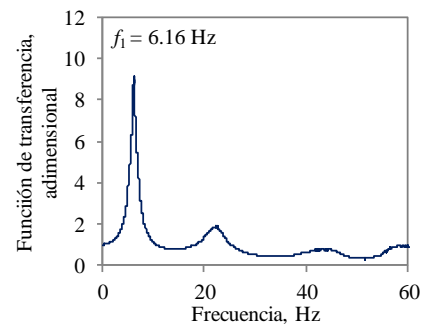
Con respecto al amortiguamiento, se tomó en cuenta que el origen del amortiguamiento en estructuras normalmente no es viscoso (Charney, 2008). Por lo tanto, como se ha hecho de manera clásica, se determina un factor de amortiguamiento equivalente ( $\xi_{eq}$ ) que genere efectos similares. Para su determinación se aplicó un criterio que considera que el factor de amortiguamiento varía en el tiempo durante la aplicación del movimiento sísmico. Este criterio consiste en balancear la ecuación de energía, la cual se muestra a continuación:

$$2\xi_{eq}\omega m \int \dot{x}(t)^2 dt = -\int m\ddot{x}_g(t)\dot{x}(t)dt - \frac{1}{2}m[\dot{x}(t)]^2 - \frac{1}{2}m\omega^2[x(t)]^2 \quad (1)$$

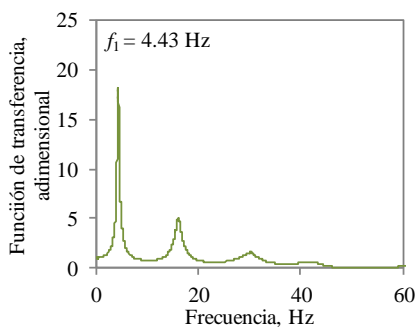
en donde  $m$  es la masa modal,  $\omega$  es la frecuencia circular de vibrar,  $\ddot{x}_g$  es el registro de aceleraciones en la base,  $\dot{x}$  y  $x$  son la velocidad y el desplazamiento en la azotea del edificio divididos entre el factor de participación modal. El factor de amortiguamiento se determina minimizando la diferencia entre el lado derecho e izquierdo de la ecuación anterior, puesto que todos los parámetros, excepto  $\xi_{eq}$ , se pueden obtener de las mediciones experimentales.



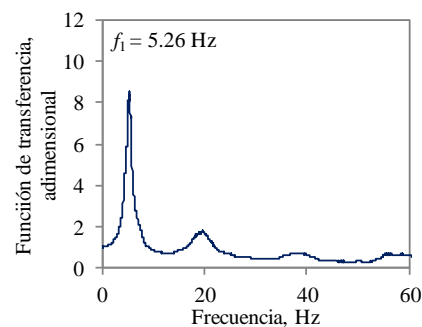
a) Prueba B-1, segundo modelo sin CRP



b) Prueba B-2, segundo modelo con CRP



c) Prueba B-7, segundo modelo sin CRP después de SCT-EW



d) Prueba B-8, segundo modelo con CRP después de SCT-EW

**Figura 9. Funciones de transferencia en segundo modelo sin y con CRP**

La Figura 10 muestra el factor de amortiguamiento estimado para las pruebas B-1, B-2, B-7 y B-8. Las primeras dos pruebas corresponden al modelo antes de aplicar el registro SCT-EW mientras que las últimas fueron ejecutadas después de los movimientos sísmicos. Además, las pruebas B-2 y B-8 corresponden al modelo con CRP. Como se puede observar, se utilizaron distintos factores para balancear la ecuación de la energía en cada caso. Claramente se



aprecia que los valores de 1.2, 5.4, 1.8 y 6.3% generan los mejores balances, respectivamente. En esta figura se puede decir que los CRP incrementaron de manera importante de amortiguamiento del edificio (pruebas B-2 y B-8) comparado con el modelo sin CRP (pruebas B-1 y B7).

Se debe aclarar que el factor de amortiguamiento se estimó con el uso de ruido blanco de baja intensidad que no generó deformaciones inelásticas ni en el modelo ni en los CRP. Por lo tanto, este amortiguamiento se debe interpretar como el amortiguamiento clásico que es dependiente de la velocidad; y no se debe confundir con amortiguamiento histerético producido por deformaciones inelásticas, como lo han abordado otros investigadores (Maley et al., 2010).

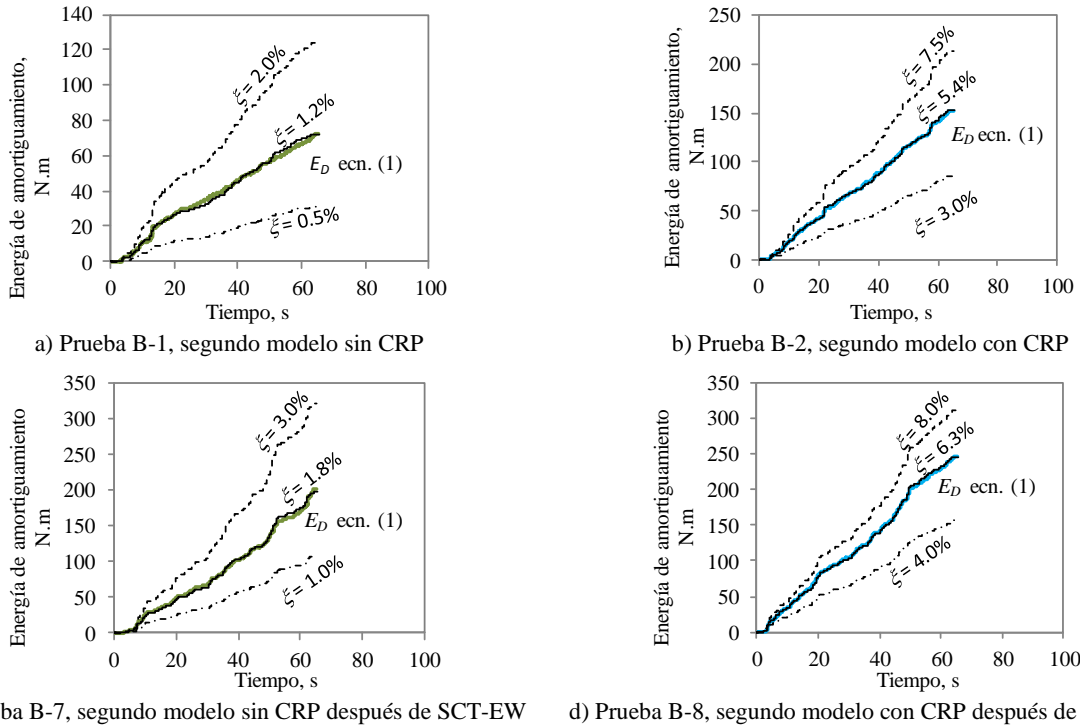


Figura 10. Estimación del factor de amortiguamiento en segundo modelo sin y con CRP

### Efectos del movimiento sísmico en la frecuencia de vibrar y amortiguamiento

En esta sección se muestran los cambios de las propiedades dinámicas de ambos modelos debidos a la aplicación del registro sísmico SCT-EW. De manera similar a la sección anterior, se determinó la frecuencia fundamental de vibrar y el factor de amortiguamiento para las pruebas con el registro SCT-EW. La frecuencia se determinó con la parte inicial y final del registro SCT-EW que correspondieron a los intervalos de tiempo en los que la Intensidad de Arias fue menor al 3% y mayor al 97%, respectivamente. Esto se hizo para evitar oscilaciones que tuvieran efectos no lineales. El factor del amortiguamiento se determinó sólo con la parte final del registro sísmico.

En la Figura 11 se muestran los valores de frecuencia y amortiguamiento estimados en las pruebas con el registro SCT-EW. También se muestran los resultados de pruebas con ruido blanco (RB) antes y después de aplicar el registro sísmico. En la Figura 11a se muestra que el primer modelo (sin CRP) presentó saltos en la frecuencia de vibrar para intensidades de 100, 150 y 200%; mientras que el segundo modelo presentó esos saltos sólo para intensidades de 150y 200%. Estos saltos representan degradación de rigidez en los modelos debido al agrietamiento del concreto. Entonces, se puede decir que los CRP ayudan a retardar la degradación de rigidez ya que esta se presentó para la intensidad de 150% en el segundo modelo contra 100% en el primer modelo.

Para medir la degradación de rigidez total ( $\Delta K$ ), se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$\Delta K = \frac{f_{inicial}^2 - f_{final}^2}{f_{inicial}^2} \quad (2)$$

en donde  $f_{inicial}$  y  $f_{final}$  representan las frecuencias de vibrar estimadas con ruido blanco inicial y final, respectivamente. La degradación de rigidez total resultó 60% para el primer modelo y 28% para el segundo. Esto significa que los CRP también ayudaron a reducir la degradación de rigidez total a prácticamente la mitad en el segundo modelo.

Por otro lado, en la Figura 11b se muestran los valores del factor de amortiguamiento para los dos modelos. En esa figura se puede apreciar que el amortiguamiento es consistentemente mayor en el segundo modelo (con CRP), y que se incrementa con la intensidad del movimiento, o sea, es dependiente de la intensidad sísmica. El primer modelo inició con un amortiguamiento de 1.2% y alcanzó 5.8%, mientras que el segundo modelo inició en 5.4% y alcanzó 10.3%.

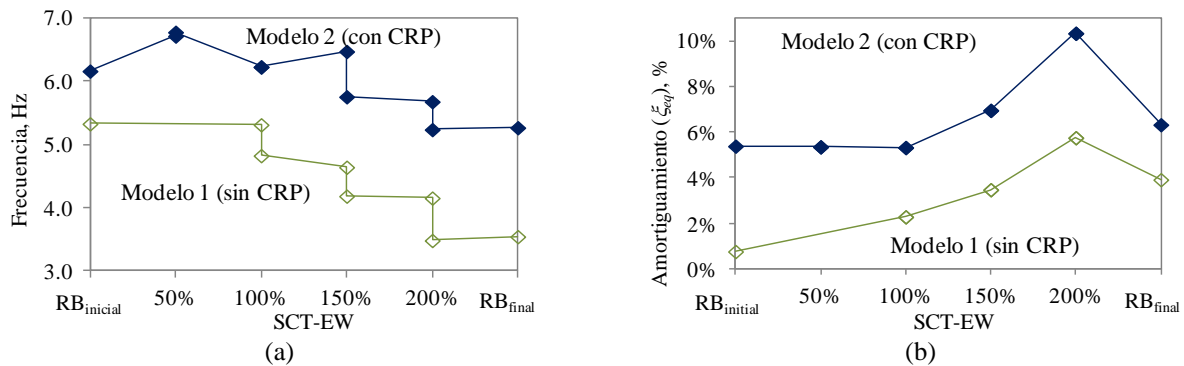


Figura 11. Estimación de propiedades dinámicas para los dos modelos

### Efecto de los CRP en la respuesta sísmica

En esta sección se compara la respuesta sísmica de los dos modelos con la finalidad de evaluar los efectos que producen los CRP. Para esto, primero se compara la respuesta en el tiempo de los dos modelos para el registro SCT-EW al 100% (Figura 12). Las reducciones de la respuesta del segundo modelo con respecto al primero fueron 58% para la distorsión máxima de entrepiso y 53%, 1% y 7% para el desplazamientos máximos, velocidad máxima de piso y aceleración máxima de piso, respectivamente, en la azotea. Es decir, la respuesta se redujo más de la mitad en términos de distorsión de entrepiso y desplazamiento en la azotea; mientras que la velocidad y aceleración de piso en la azotea casi no se modificaron.

La Figura 13 muestra las envolventes de la respuesta para las distintas intensidades ensayadas. Se puede apreciar que las distorsiones máximas de entrepiso y los desplazamientos máximos en la azotea fueron menos de la mitad en el segundo modelo. Estas diferencias se incrementan con la intensidad. Por otra parte, las velocidades y aceleraciones de piso son ligeramente inferiores en el segundo modelo. Sin embargo, para fines prácticos estas diferencias se consideran despreciables.

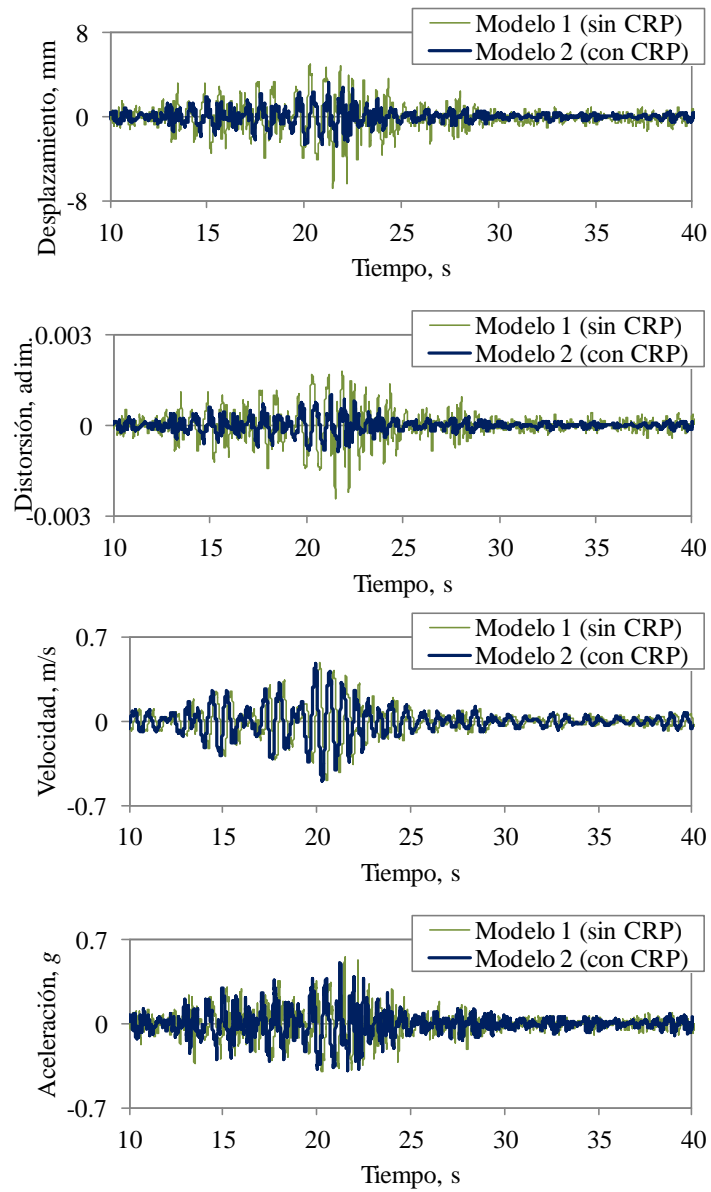
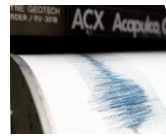
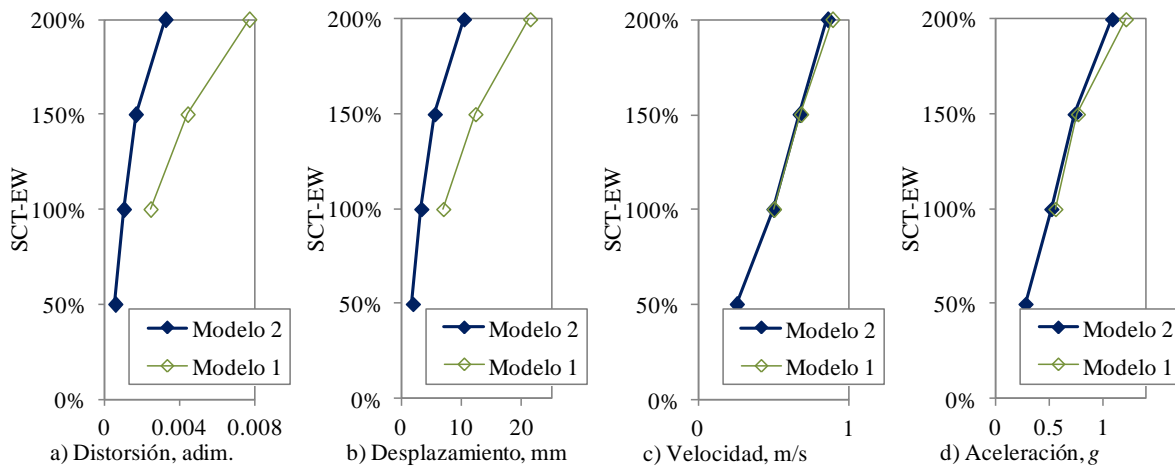


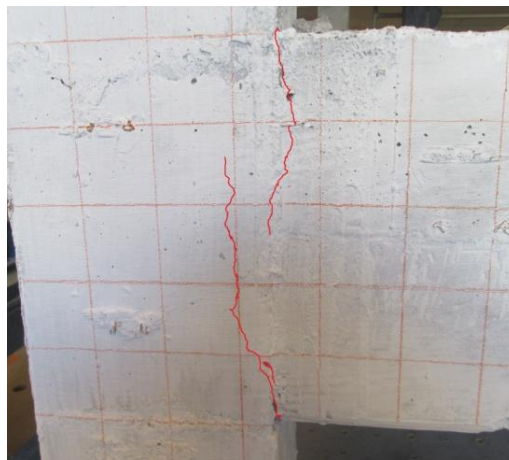
Figura 12. Historias de desplazamientos para el registro SCT-EW al 100%



**Figura 13. Envolventes de la respuesta sísmica para las intensidades ensayadas**

#### Análisis de daño

Al final de todas las pruebas se realizó una inspección visual del daño en los modelos. No se apreció daño significativo que pudiera poner en riesgo la estabilidad de los modelos. El daño típico observado consistió de grietas menores a 2 mm en las uniones de las traveses a las columnas (Figura 14). Para determinar el factor de sobre-resistencia, se realizó un análisis numérico no lineal de los modelos. Este resultó ser cercano a 4 para ambos modelos, que es mayor que el valor de 2.5 comúnmente aceptado para estructuras en la Ciudad de México. Por lo tanto, el nivel reducido de daño observado en las pruebas se atribuye al factor de sobre-resistencia alto. Sin embargo, se considera que las pruebas son válidas, ya que esto no afecta de manera importante el objetivo del estudio que es estudiar los efectos de CRP en edificios prefabricados.

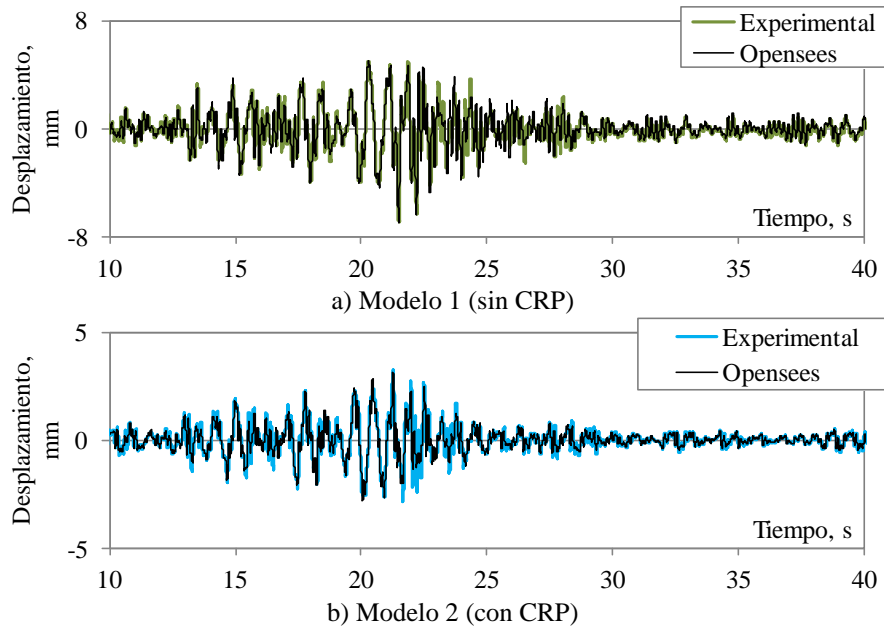


**Figura 14. Daño típico observado al final de las pruebas en mesa vibradora**

#### Comparación de resultados experimentales con numéricos

Con la finalidad de validar los resultados experimentales, se realizaron análisis dinámicos no lineales de los edificios en el programa de elemento finito Opensees (2014). Los detalles de los modelos numéricos se pueden encontrar en Guerrero (2015). La simulación del registro sísmico SCT-EW se realizó para todas las intensidades mostradas en la

Tabla 2. Sin embargo, por simplicidad, en la Figura 15 sólo se muestran los desplazamientos en la azotea correspondientes a la intensidad del 100% para el Modelo 1 (sin CRP) y para el Modelo 2 (con CRP). Como se puede observar, los resultados experimentales y numéricos son muy similares entre sí.



**Figura 15. Historias de desplazamientos en la azotea de los modelos para el registro SCT-EW al 100%**

### CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados de pruebas experimentales en mesa vibradora de dos modelos de edificio prefabricados de concreto reforzado en escala de 1/3. Para fines de comparación, uno de los modelos se equipó con contraventeos restringidos al pandeo, CRP. Se estudiaron los efectos de los CRP y se formularon las siguientes conclusiones:

- Los CRP incrementaron el factor de amortiguamiento de manera muy importante. El amortiguamiento inicial en el segundo modelo fue de 1.2% sin CRP y 5.4% con CRP. Estos valores cambiaron a 1.8 y 6.3% después de la aplicación del movimiento sísmico.
- De la Figura 11b se apreció que el amortiguamiento también es dependiente de la intensidad sísmica y se alcanzaron valores de 5.8% sin CRP y 10.3% con CRP.
- En la Figura 11a se observó que los CRP dan el beneficio adicional de retardar y reducir la degradación de rigidez. Por ejemplo, para el primer modelo (sin CRP) la degradación de rigidez inició a la intensidad de 100% mientras que para el segundo modelo (con CRP) inició a la intensidad del 150%. Además, la degradación de rigidez total en el primer modelo fue de 60% contra 28% en el segundo modelo.
- Las distorsiones de entrepiso y los desplazamientos laterales en el modelo con CRP fueron más de 50% menores que los del modelo sin CRP. Las velocidades y aceleraciones de piso fueron ligeramente menores en el modelo con CRP; sin embargo, estas diferencias fueron muy pequeñas y se pueden considerar despreciables.

### AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONACyT y a la SEP por la beca otorgada para sus estudios de doctorado. Se agradece a la empresa ITISA y COREBRACE por el patrocinio proporcionado. También se agradece a Felipe Bennetts, Manuel

Calzeta y a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que contribuyeron con su apoyo durante la realización de las pruebas.

### REFERENCIAS

Charney, F. A. (2008). Unintended Consequences of Modeling Damping in Structures. *Journal of Structural Engineering-Asce*, **134:4**, 581-590.

Guerrero, H. (2015). Development of an efficient approach based on Performance-Based Seismic Design of Healthcare Infrastructure in Mexico. Tesis Doctoral, Universidad de Mánchester, Reino Unido.

Guerrero, H. y Ji, T. (2013). A displacement-based seismic design procedure for dual systems equipped with hysteretic fuses. *Young Engineers Conference*, Newcastle, Reino Unido.

Maley, T. J., Sullivan, T. J. y Corte, G. D. (2010). Development of a Displacement-Based Design Method for Steel Dual Systems with Buckling-Restrained Braces and Moment-Resisting Frames. *Journal of Earthquake Engineering*, **14:1**, 106-140.

Merrit, S., Uang, C.M. y Benzoni, G. (2003). Subassemblage testing of Corebrace Buckling-Restrained Braces. Reporte No. TR-2003/01. Universidad de California, San Diego.

Opensees (2014). Open Source finite element platform for earthquake engineering simulations. Pacific Earthquake Engineering Center. Universidad de California, Berkeley.

Pérez-Navarrete, D. 2001. Comportamiento Sísmico de Tres Tipos de Conexión Viga–Columna de Elementos Prefabricados. Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, UNAM.

RCDF (2004). Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus normas técnicas complementarias. Ciudad de México.

Rodríguez, M. y Botero, C. (1996). Aspectos del Comportamiento Sísmico de Estructuras de Concreto Considerando las Propiedades Mecánicas de Aceros de Refuerzo Producidos en México. Reporte No 575. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Uang, C.M. y Nakashima, M. (2004). Steel Buckling-Restrained Braced Frames. En: Bozorgnia, Y. & Bertero, V. V. (editores). *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press.