

## ENSAYE DE UN EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE CINCO NIVELES A ESCALA EN MESA VIBRADORA

*Nina Casas Guzik<sup>(1)</sup>, Sergio M. Alcocer<sup>(2)</sup>*

<sup>1</sup> Estudiante de Maestría, Instituto de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad No. 3000, C.U., CDMX, C.P. 04510, [casas.guzik@gmail.com](mailto:casas.guzik@gmail.com)

<sup>2</sup> Investigador Titular, Instituto de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad No. 3000, C.U., CDMX, C.P. 04510, [salcocerm@ii.unam.mx](mailto:salcocerm@ii.unam.mx)

### RESUMEN

Se presentan los resultados del ensayo en mesa vibradora de un modelo de cinco niveles de mampostería confinada a escala reducida. Este modelo completó el programa experimental planteado previamente, en el cual se ensayaron edificios de uno, dos y tres niveles. Durante la campaña experimental se aplicaron métodos de evaluación no destructiva, pruebas de vibración ambiental y registros de aceleración. De los resultados observados y registrados, se identificaron los mecanismos resistentes; la capacidad estructural fue evaluada en términos de resistencia, rigidez, capacidad de deformación y disipación de energía. Se presentan conclusiones y recomendaciones para las normas de diseño y construcción.

### ABSTRACT

The results of a shaking-table testing of a small-scale five-story confined masonry building are presented. This model completed the experimental program previously carried out, in which one-, two-, and three-story small-scale specimens were tested. During the experimental program, non-destructive methods and a series of seismic motions were applied. From recorded and observed results, resisting mechanisms were identified; the structural capacity was assessed in terms of strength, stiffness, deformation capacity and energy dissipation. Conclusions and design and construction recommendations are presented.

### INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de sismos recientes de gran magnitud en México ha promovido la necesidad de evaluar los objetivos de desempeño aplicables a estructuras de mampostería confinada, específicamente en vivienda de bajo coste, ya que es la tipología edificatoria en la que se utiliza más comúnmente esta modalidad constructiva. Los daños observados invitan a los investigadores a realizar estudios que permitan profundizar en el conocimiento de los principales mecanismos de falla, identificar prácticas inadecuadas de construcción y proponer soluciones que mejoren su desempeño. Adecuados criterios de análisis, diseño y construcción pueden conducir a reglamentos apoyados en evidencia empírica y objetiva que contemplen las características constructivas y el peligro sísmico de cada sitio.

En un programa experimental previo se ensayaron edificios de mampostería confinada de uno (Vázquez 2005), dos (Barragán 2005) y tres niveles (Arias 2005) a escala reducida en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En su diseño y construcción se siguieron los requisitos aplicables de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 2004. Los modelos representaron prototipos comúnmente empleados para viviendas unifamiliares y multifamiliares construidos por el Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT)

en la República Mexicana, los cuales han sido diseñados y construidos conforme a la práctica vigente en la Ciudad de México. La construcción y ensaye de un modelo de cinco niveles completó dicho programa experimental. La propuesta considera que la geometría del modelo de cinco niveles sea similar a la de las estructuras ensayadas anteriormente, salvo un ajuste de escala por restricciones de peso y altura en la mesa vibradora. Durante la campaña experimental se aplicaron métodos de evaluación no destructiva, pruebas de vibración ambiental y registros de aceleración medidos y simulados, de intensidad creciente. Durante el ensaye, se midió la respuesta y se identificaron los distintos niveles de desempeño y los estados de daño que caracterizan a la mampostería confinada, es decir, agrietamiento, resistencia y carga última.

El modelo fue profusamente instrumentado con la finalidad de conocer su comportamiento estructural a nivel local y global. Se utilizaron transductores de aceleración, de desplazamiento y de deformación, integrados por un sistema digital de lectura especialmente diseñado para el ensaye. Los datos obtenidos se analizaron en el dominio del tiempo y de la frecuencia (análisis de Fourier). Mediante el análisis de señales se obtuvieron los modos de vibrar de la estructura, la respuesta histerética, la degradación de rigidez y resistencia, la disipación de energía y los efectos de torsión. La respuesta obtenida experimentalmente se comparó con la respuesta esperada según la norma vigente.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Descripción del modelo

Con el propósito de definir el prototipo de vivienda que sería utilizado para los ensayos, se requirió estudiar dos aspectos fundamentales. El primero consistió en definir las características físicas, geométricas y mecánicas del prototipo, de tal modo que fueran representativas de viviendas unifamiliares o multifamiliares construidas en diferentes estados de la República Mexicana, específicamente en aquellos con mayor amenaza sísmica. El segundo aspecto se centró en la definición de la configuración arquitectónica. Las características de los prototipos estudiados debían apegarse a las características físicas y a la capacidad de la mesa vibradora. La configuración arquitectónica elegida fue la del prototipo llamado “Rancho Victoria”, como la más cercana a las condiciones deseables a ser reproducidas por la mesa vibradora (Arias 2005). Para fines de adecuarse a la superficie de la mesa vibradora, se propuso construir un prototipo simplificado con una configuración arquitectónica similar en planta a la del “Rancho Victoria”. La planta del prototipo tenía una superficie cuadrada de 7.16 x 7.16 m, una altura de entrepiso de 2.40 m y una altura total de 12 m.

Se eligió construir el espécimen de cinco niveles usando la ley de similitud simple como método de modelación, es decir, con los mismos materiales que el prototipo, únicamente modificando las dimensiones. La escala que se utilizó fue de 1:2.4. Como se puede observar en las Figuras 1 y 2, las dimensiones en planta del modelo fueron de 2.98 x 2.98 m, una altura total de 5.20 m y una superficie en planta de 8.88 m<sup>2</sup>. Los muros de carga de tabique rojo recocado fueron confinados por castillos y dalas de concreto reforzado dispuestos en el perímetro de todos los muros y en vanos de puertas y ventanas. En la Tabla 1 se resumen las características físicas y las propiedades mecánicas de diseño para los materiales del prototipo y del modelo.

### Sistema estructural

Los muros en planta baja se desplantaron sobre una cimentación formada por dalas de concreto reforzado de 20 x 10 cm dispuestas sobre una parrilla formada por vigas de acero (IR 305 mm x 59.8 kg/m). Las dalas se diseñaron y construyeron con concreto de resistencia nominal de 300 kg/cm<sup>2</sup> (30 MPa). Como acero de refuerzo, se utilizaron cuatro barras longitudinales de diámetro 5/32” (3.97 mm) y estribos conformados por barras lisas (alambrón) de 5/48” (2.65 mm) a cada 12.5 cm. Los muros se construyeron con piezas de tabique artesanal rojo recocado de 2.5 x 5 x 10 cm (altura, espesor y ancho). En la Figura 3 se muestra la distribución del acero de refuerzo del modelo. El refuerzo longitudinal de los castillos consistió en cuatro barras corrugadas de 5/32” (3.97 mm) y estribos de alambre liso de 5/48” (2.65 mm). Para los primeros dos niveles, la separación de los estribos en la altura del muro fue variable. La separación fue de 2.5 cm en intersecciones de castillos y dalas y en los extremos de los castillos, y se incrementó a 8.3 cm en el resto de los niveles. Las losas de entrepiso se construyeron con dos sistemas distintos: losas prefabricadas macizas de concreto reforzado para los niveles uno al cuarto y losa maciza de concreto reforzado, colada in situ monolíticamente con las dalas de cerramiento para el quinto nivel.

Tabla 1 Características físicas y mecánicas de diseño del prototipo y modelo

Propiedad	Prototipo	Modelo
Área en planta, m <sup>2</sup>	51.28	8.88
Abertura para puerta, cm	97 x 217	40.4 x 90.4
Abertura para ventana, cm	112 x 100	46.7 x 42
Altura de entrepiso, cm	240	100
Dimensiones tabique, cm	6 x 12 x 24	2.5 x 5 x 10
Junta de mortero, cm	1	0.4
Dimensiones de castillos, cm	12 x 12	5 x 5
Dimensiones de dalas, cm	23 x 12	9.6 x 5
Espesor de losa, cm	12	5
Dala de cimentación, cm	24 x 24	20 x 10
Diámetro acero longitudinal, in (mm)	3/8" (9.5)	5/32" (4)
Diámetro acero transversal, in (mm)	1/4" (6.4)	5/48" (2.6)
Tamaño máximo de grava, in (mm)	3/4" (19)	5/16" (8)
Tamaño máximo de arena, mm	4.76	2
Resistencia nominal concreto, kg/cm <sup>2</sup>	200	200
Resistencia nominal mortero, kg/cm <sup>2</sup>	125	125
Resistencia nominal acero, kg/cm <sup>2</sup>	4,200	4,200
Resistencia nominal estribos, kg/cm <sup>2</sup>	2,500	2,500

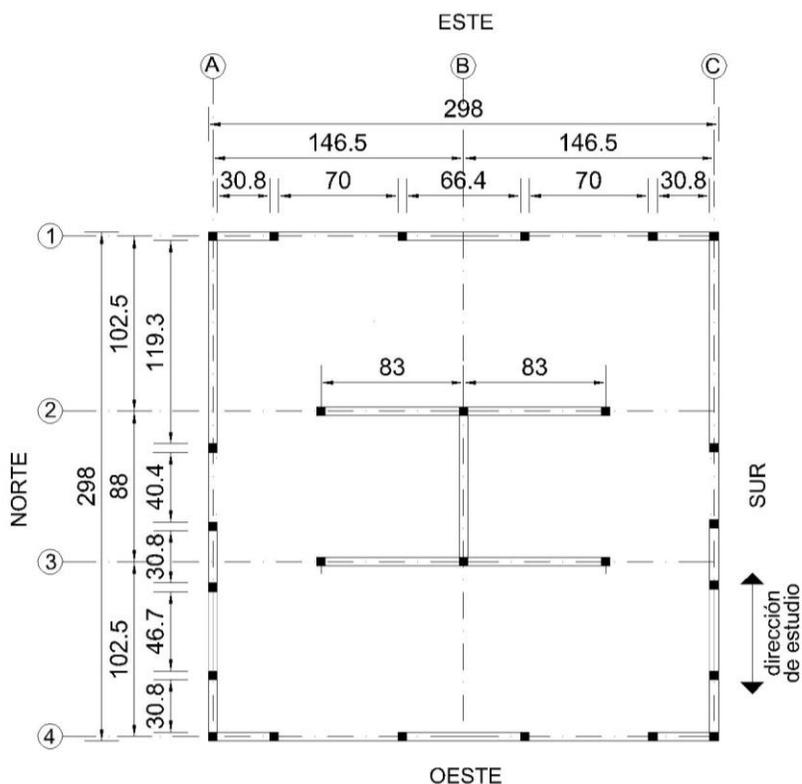
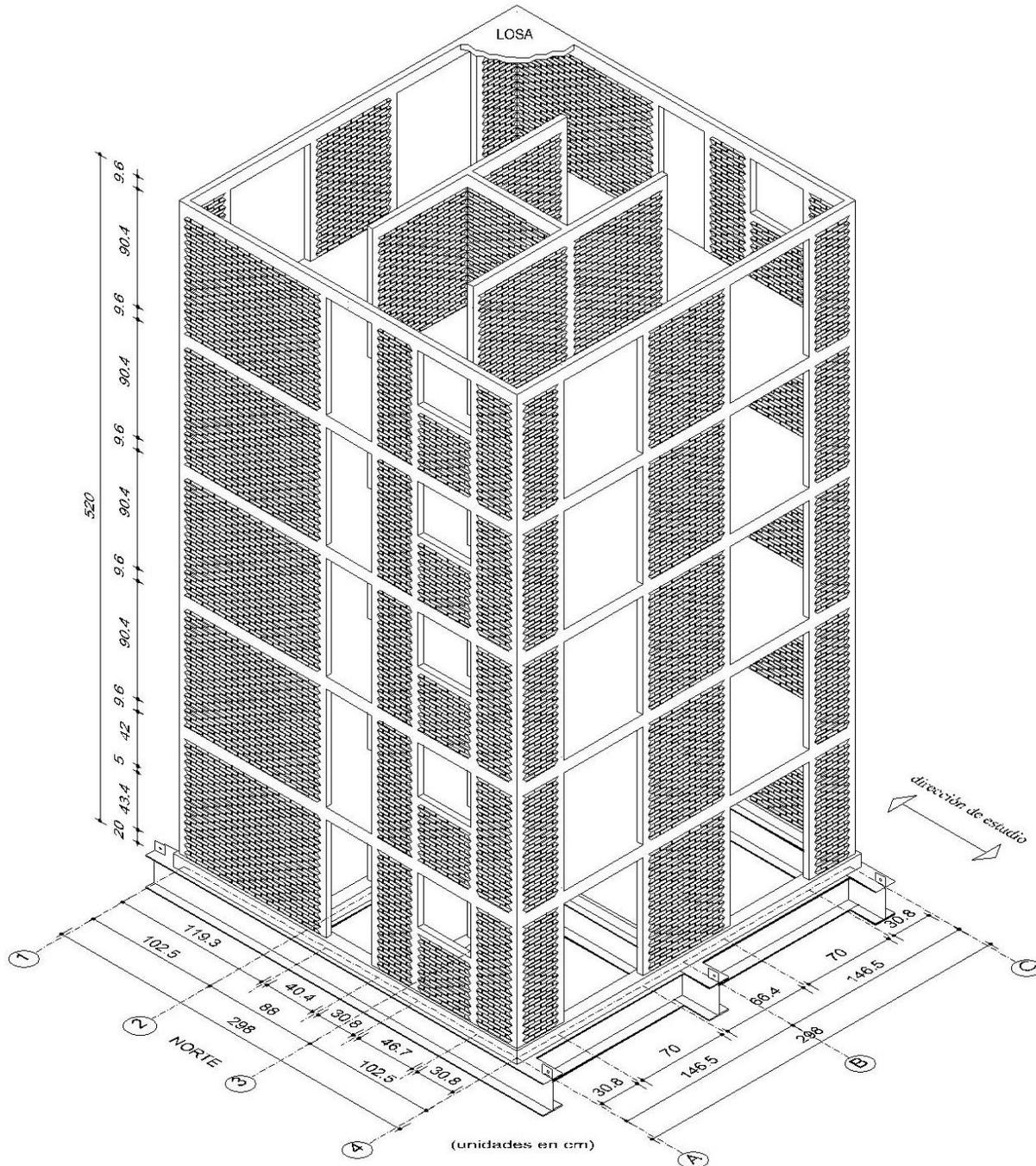


Figura 1 Planta arquitectónica del modelo



**Figura 2** Isométrico del modelo

## Materiales

Debido a que se empleó la ley de similitud simple para la construcción del modelo de cinco niveles, se verificó que las propiedades de los materiales empleados fueran iguales a las del prototipo para cumplir con las características físicas de la escala empleada (1:2.4). En la Tabla 2 se muestran los valores de las propiedades mecánicas de los materiales, obtenidos mediante pruebas de laboratorio realizadas a los 28 días y en una fecha cercana a la fecha de ensayo del modelo.

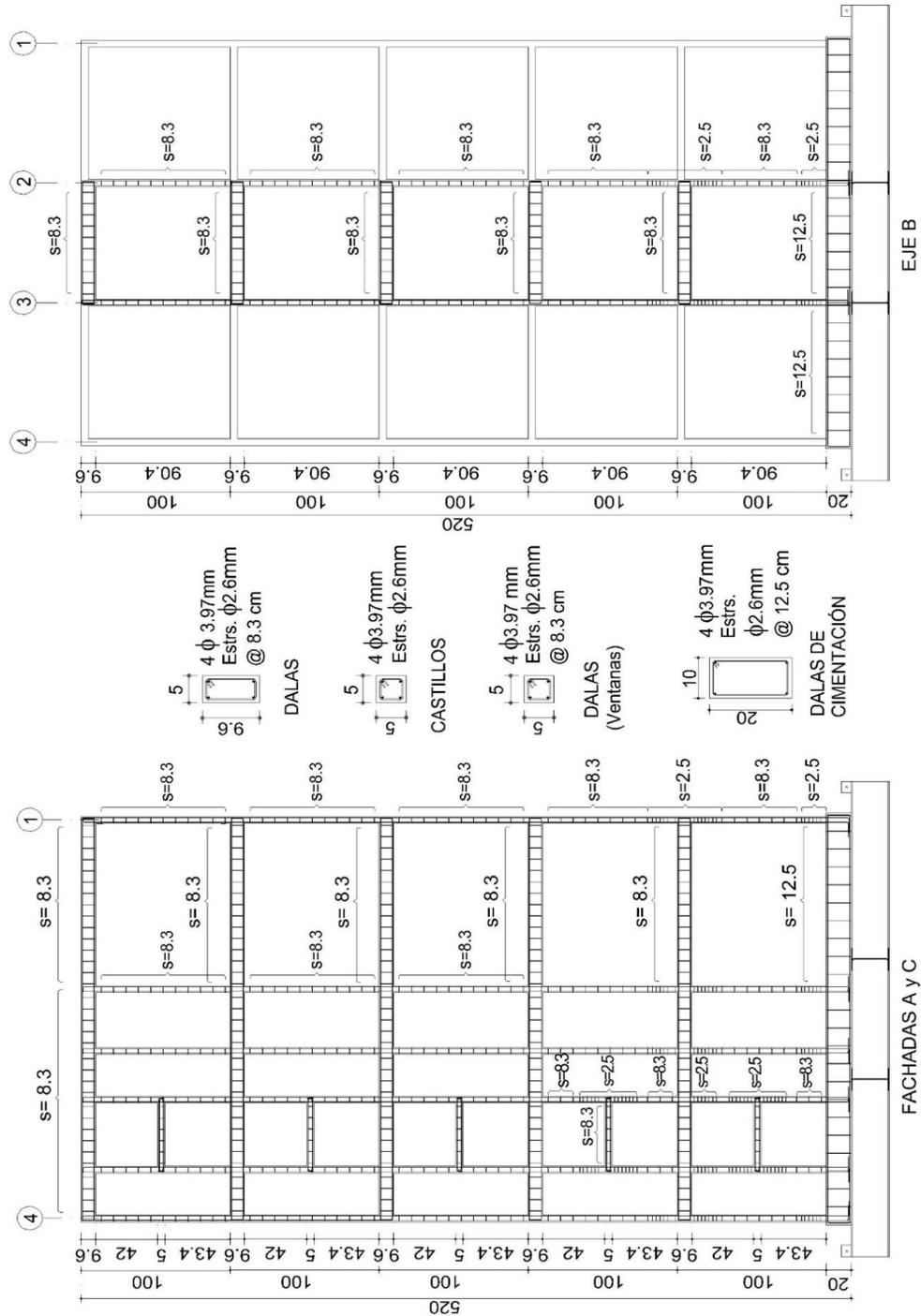


Figura 3 Refuerzo de castillos y dalas (unidades en cm)

Tabla 2 Propiedades mecánicas de los materiales, kg/cm<sup>2</sup>

Propiedad	28 días	Fecha de ensaye
Resistencia a la compresión de tabiques	53	53
Resistencia a la compresión del mortero	117	160
Resistencia a la compresión mampostería (pilas)	38	35
Módulo de elasticidad mampostería	11,629	12,979
Resistencia a compresión diagonal mampostería (muretes)	5	5
Módulo de cortante mampostería	5,036	3,826
Resistencia a compresión de cilindros de concreto	251	288
Módulo de elasticidad del concreto	138,930	199,665
Esfuerzo de fluencia del refuerzo longitudinal	3,622	3,622
Esfuerzo último del refuerzo longitudinal	5,409	5,409
Esfuerzo de fluencia del refuerzo transversal	2,534	2,534
Esfuerzo último del refuerzo transversal	4,021	4,021

### Masa adicional y esfuerzos de trabajo en muros

Para modelar apropiadamente la distribución de masas y cargas vivas del espécimen, se fijaron barras de plomo de 50 kg a las losas de entrepiso. La disposición de las barras de plomo se realizó de tal modo que no se aportara rigidez a la flexión de las losas en la dirección de análisis (dirección de las excitaciones sísmicas) en adición a la propia de la losa. La ubicación de las barras de plomo en la planta tipo de entrepiso y en la azotea se muestra en la Figura 4. La masa adicional suplió casi por completo la masa distribuida que se supone actuaría en una estructura prototipo, con la cual las relaciones de masas (cociente de masa distribuida entre masa concentrada) del prototipo y del modelo fueron prácticamente iguales. Para simular los esfuerzos axiales de los muros del prototipo, se empleó un sistema de postensado en los muros de la dirección de análisis en todos los niveles y se mantuvo constante durante la fase de ensayos. El sistema de postensado estuvo compuesto por cables de acero de 1/8" (3.2 mm) de diámetro, templadores y dinamómetros de 100 kg de capacidad.

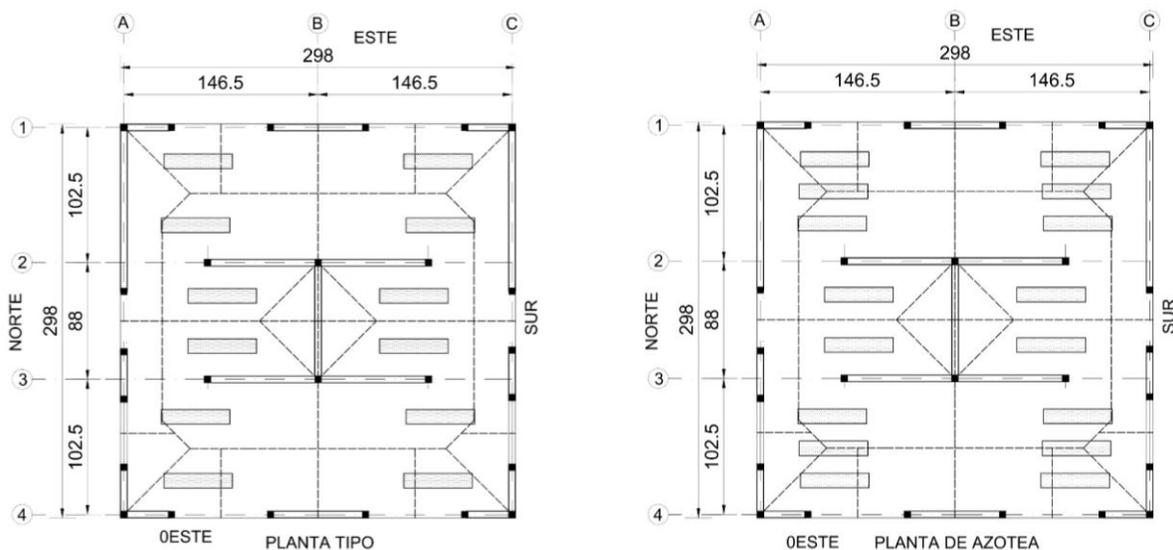


Figura 4 Distribución de barras de plomo en losas

### Instrumentación y señales de aceleración

El modelo fue instrumentado con 131 sensores internos y externos con el fin de obtener datos sobre la respuesta global y local de la estructura durante cada fase de ensayo. La instrumentación consistió en transductores de aceleración, de desplazamiento y de deformación, integrados a un sistema de control y captura digital de datos especialmente diseñado

para pruebas dinámicas. Cuatro eventos sísmicos registrados en la zona epicentral de la República Mexicana se usaron como base para el programa experimental. El primero fue el ocurrido en San Luis de la Loma, Guerrero en 2014 (SLU) con M 7.3. El segundo evento sísmico seleccionado fue el registrado en Fresnillo de Trujano, Oaxaca en 2017 (FTIG) con M 7.2. El tercero fue el registrado en San Juan de los Llanos, en Igualepa, Guerrero en 2012 (SJLL) con M 7.2. Finalmente, el último registro fue el ocurrido en Acapulco, Guerrero en 1989 (DIANA) con 6.9. Para este evento se generó un sismo sintético con M 7.6. Una vez que los eventos fueron elegidos, se aplicaron los requerimientos de similitud para obtener los registros que serían aplicados al modelo a escala reducida. Se aplicaron un total de 15 movimientos incrementando gradualmente la intensidad. Entre cada registro se aplicó una señal de ruido blanco con aceleración RMS de  $50 \text{ cm/s}^2$  ( $0.05 \text{ g}$ ) con objeto de identificar cambios en las propiedades dinámicas del modelo. En la Figura 5 se presentan los acelerogramas y los espectros de desplazamiento del modelo para un amortiguamiento del 5% del crítico. Con línea roja se indica el periodo medido del primer modo de vibrar de la estructura en la dirección de análisis.

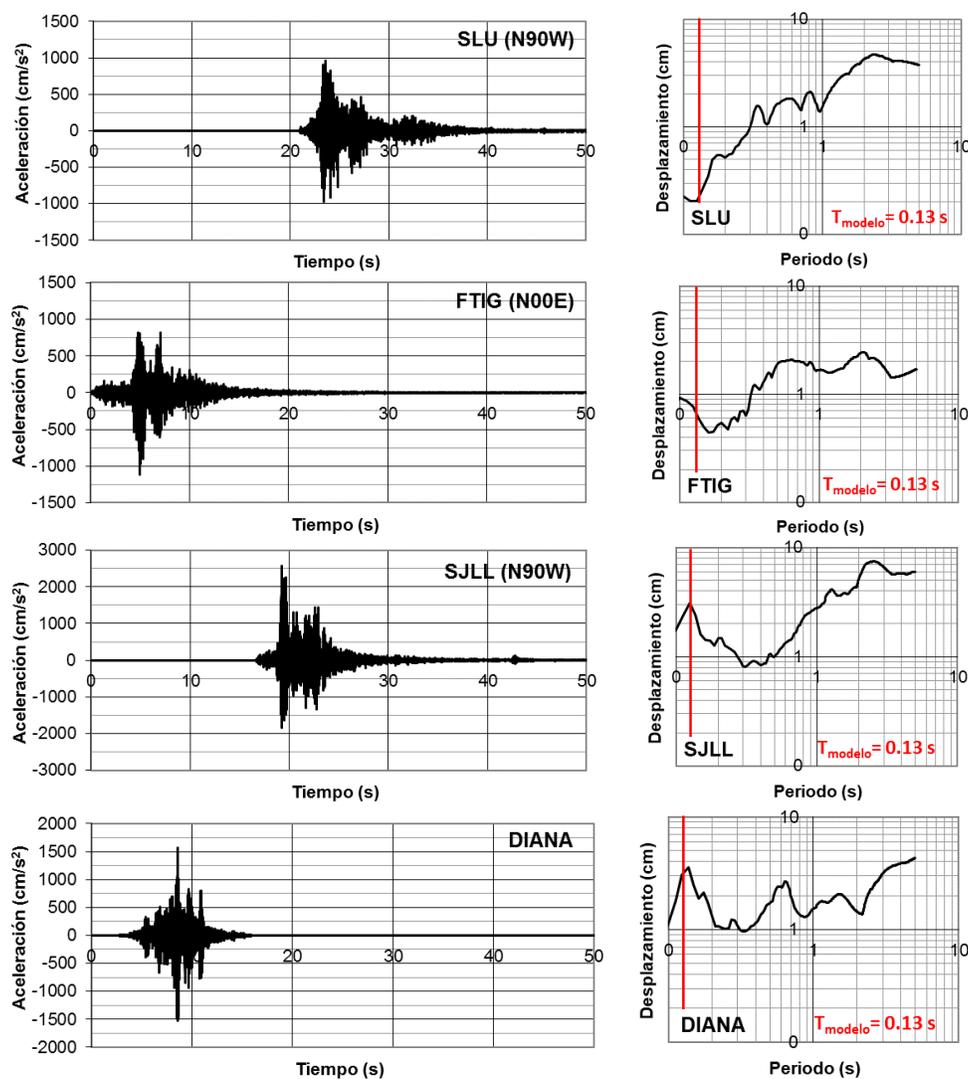
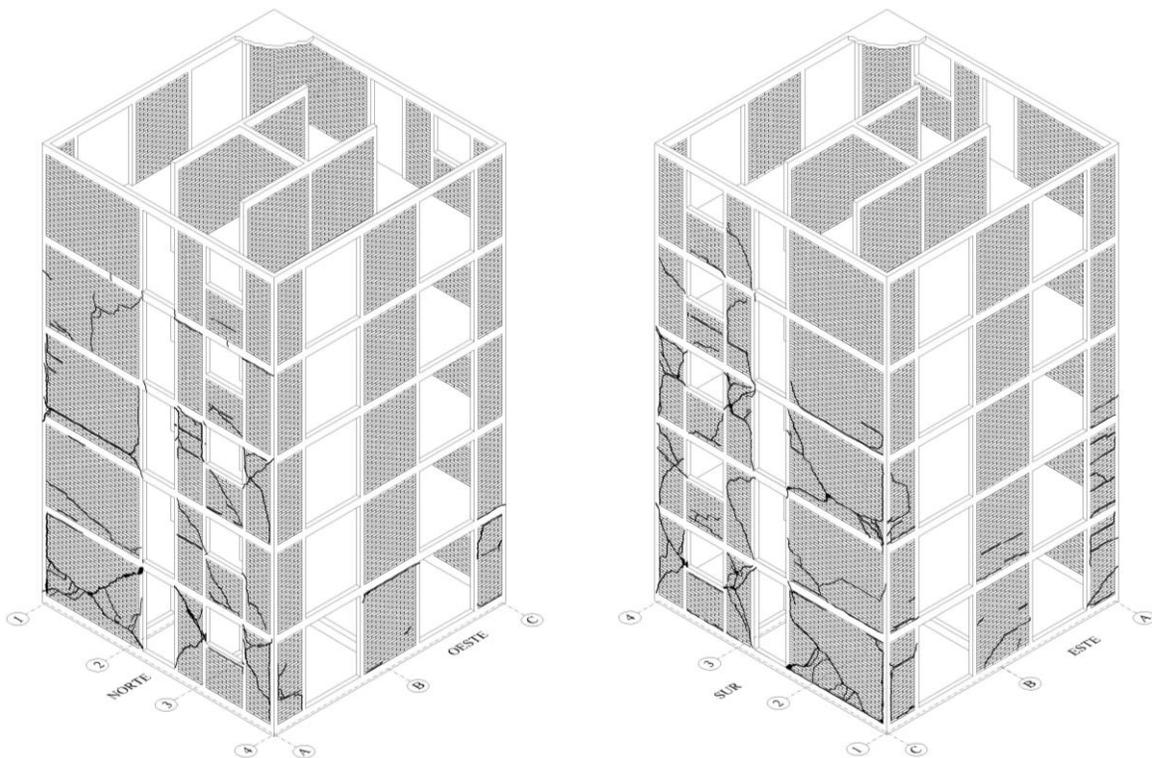


Figura 5 Acelerogramas del modelo y espectros de desplazamiento

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Descripción de daños

Al término de cada prueba, se llevó a cabo una inspección visual de todos los elementos estructurales del modelo y se midió la propagación del agrietamiento y el estado general de daño. Se registró, entre cada movimiento, el tamaño máximo de grieta en muros y castillos con ayuda de grietómetros. En la Figura 6 se muestra el estado final de daño del modelo de cinco niveles. Los primeros agrietamientos registrados fueron horizontales en la base del muro robusto de la fachada sur, siguiendo las juntas de mortero. Las primeras grietas inclinadas aparecieron principalmente en los muros esbeltos y se propagaron a través de los tabiques. Grietas verticales se presentaron en los muros extremos de las fachadas entre el dentado de los muros de tabique y los bordes de los castillos de concreto. El agrietamiento inclinado se extendió ante ensayos sucesivos hasta afectar todos los muros del primer nivel y del tercer nivel en la dirección de aplicación de la carga (E-O). Simultáneamente, los muros perpendiculares (cabeceros y divisorios) sufrieron agrietamientos horizontales como consecuencia de la flexión fuera del plano y por efectos de torsión. La respuesta del modelo estuvo dominada por agrietamiento máximo en el primer y tercer nivel, aunque también ocurrió agrietamiento en los muros de todos los niveles.



*Figura 6 Estado final de daño del modelo*

### Comportamiento histerético

Para estudiar el comportamiento del modelo durante cada uno de los ensayos, se calcularon las curvas histeréticas en términos del cortante basal-distorsión de piso. El cortante basal fue calculado como la sumatoria de fuerzas de inercia actuantes en cada nivel. Éstas se obtuvieron a su vez, como el producto de las aceleraciones medidas en el centro de gravedad de cada losa y de la masa del espécimen incluyendo las barras de plomo. Las distorsiones, por otro lado, fueron calculadas como el cociente entre el desplazamiento relativo de piso y la altura del mismo. Para tal efecto, se calculó la diferencia entre las historias de desplazamiento arriba y debajo de cada piso y de la señal resultante; se tomó el valor máximo como la distorsión de piso. En la Figura 7 se presentan las curvas histeréticas de los tres estados límite (elástico, resistencia y último) en función del cortante basal – distorsión del primer nivel. El límite elástico (E) se



definió por la ocurrencia del primer agrietamiento inclinado en los muros de mampostería; la resistencia se alcanzó cuando se registró el máximo cortante basal; y el estado límite último se consideró para una distorsión del primer nivel correspondiente a una reducción del 20% de la resistencia. Se muestra, además en la Figura 7, la envolvente de respuesta para el primer nivel. Los puntos de la gráfica se obtuvieron con los valores máximos de cortante y distorsión registrados durante cada prueba. Se presenta también la predicción de la resistencia usando las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCM 2017), considerando un factor de resistencia unitario y valores promedio medidos de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Al comparar los resultados obtenidos durante los ensayos con respecto a los del reglamento, es evidente que existe una sobre resistencia del espécimen, cuyo valor fue de 1.3.

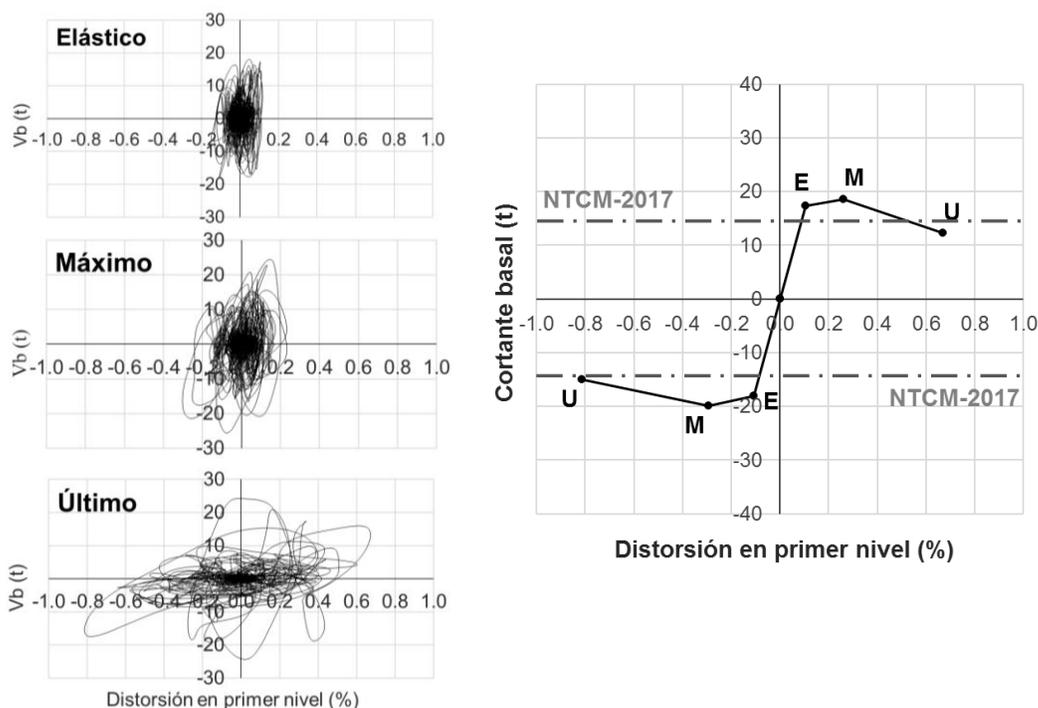


Figura 7 Curvas de histéresis y envolvente de respuesta para el primer nivel

### Degradación de rigidez

Se usó el concepto de rigidez de ciclo en las curvas histeréticas cortante basal – distorsión para estudiar el deterioro de la rigidez equivalente del modelo ensayado. De acuerdo con este concepto, la rigidez se define como la pendiente de la línea secante que une los puntos de cortante y distorsión máximos (positivos y negativos) alcanzados durante la prueba. La rigidez pico ( $K_p$ ) se normalizó con respecto a la rigidez elástica inicial ( $K_0$ ). En la Figura 8 se muestra la variación de la rigidez normalizada ( $K_p/K_0$ ), en función de la distorsión del primer piso. Se puede observar que una vez que ocurrió el primer agrietamiento inclinado en el primer nivel, la rigidez inicial disminuyó en un 40% a una distorsión del primer piso del 0.10%. La degradación de rigidez se presentó desde bajos niveles de distorsión. Con el agrietamiento del tercer nivel, la rigidez del modelo se redujo aproximadamente en un 75%. A partir de que se alcanzaron las distorsiones máximas de +0.26% y -0.29% y a mayores distorsiones, la rigidez permaneció casi constante. Para el estado último, la rigidez fue cercana al 10% del valor inicial. En esta etapa, la degradación estuvo asociada con el agrietamiento y aplastamiento de los muros de mampostería y elementos de concreto reforzado, así como con el agrietamiento en altura entre muros y castillos.

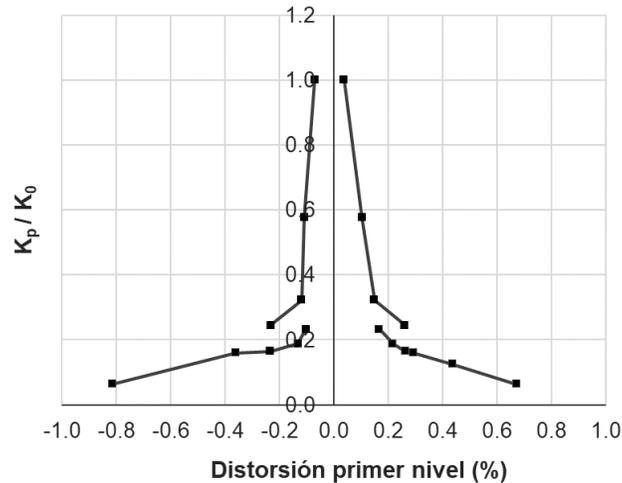


Figura 8 Degradación de la rigidez de ciclo durante los diferentes ensayos

### Frecuencias naturales de vibración

Las frecuencias y periodos naturales de vibración para el modelo de cinco niveles fueron determinadas a partir de las historias de aceleración de los sismos, así como de las pruebas de ruido blanco aplicadas entre cada registro sísmico. Con ayuda del programa DEGTRA 10.3.0 (Ordaz 2015) se obtuvieron las funciones de transferencia entre las señales registradas en el centro de la losa de azotea y de la cimentación. En la Figura 9 se muestran las frecuencias de vibración para los tres estados límite (elástico, máximo y último). Para todos los niveles de daño, la forma de vibrar de la estructura estuvo dominada por una sola frecuencia que correspondió a la frecuencia natural asociada con el primer modo de vibrar en el sentido longitudinal. La segunda frecuencia predominante correspondió al modo de torsión. Para determinar lo anterior, se recurrió a la obtención del ángulo de fase, ya que es una herramienta útil para determinar las formas modales de una estructura.

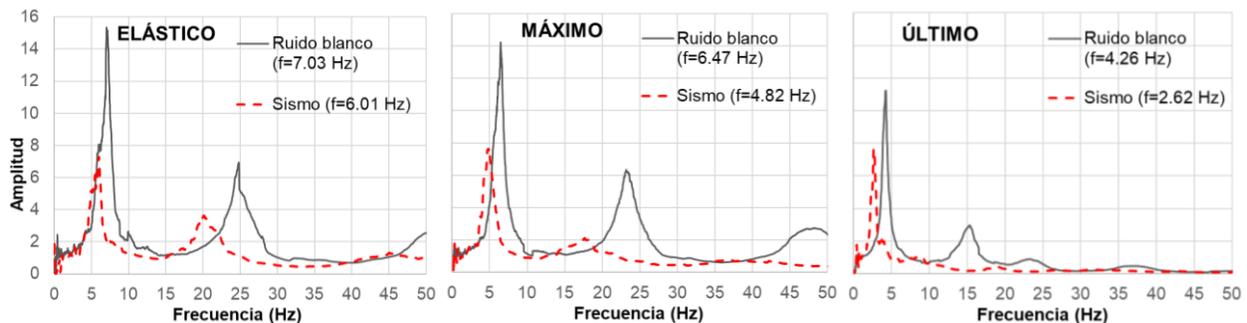


Figura 9 Frecuencias de vibración durante los tres estados límite

### Capacidad de deformación

Se calculó la capacidad de deformación del modelo de cinco niveles como el cociente entre el desplazamiento último y el correspondiente a la fluencia, expresados como distorsiones del primer nivel, según el criterio de ductilidad equivalente de Park (Paulay y Priestley 1992). De acuerdo con este método, la ductilidad equivalente se obtiene a partir de la curva envolvente cortante basal – distorsión. Para la distorsión última se considera el valor correspondiente a una degradación de la resistencia del 20% y como distorsión de fluencia, la correspondiente a una rigidez inicial secante correspondiente al 75% de la carga de falla, como se muestra en la Figura 10. Para el caso de estructuras de mampostería confinada de piezas macizas, el factor de comportamiento sísmico ( $Q$ ) es igual a 2. Una forma aproximada

de obtener este parámetro es a partir de la ductilidad calculada con la ecuación 1, que puede usarse para estructuras de periodo corto (Newmark y Hall 1982).

$$Q = \sqrt{2\mu - 1} \quad (1)$$

En la Tabla 3 se muestran los valores calculados de ductilidad para la envolvente de los ciclos positivos y negativos del primer nivel para el modelo de cinco niveles.

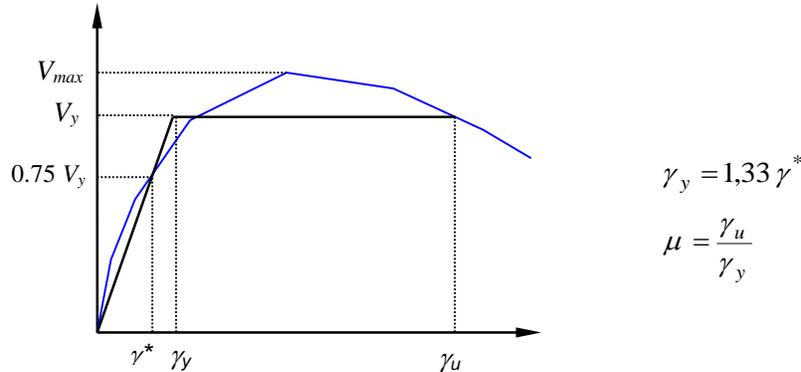


Figura 10 Cálculo de la ductilidad equivalente según el criterio de Park

Tabla 3 Ductilidad equivalente y factor de comportamiento sísmico para el primer nivel

Ciclo	$V_y$ (t)	$\gamma^*$ (%)	$\gamma_y$ (%)	$\gamma_u$ (%)	$\mu$	$Q$
Positivo	14.66	0.067	0.089	0.470	5.28	3.09
Negativo	15.72	0.072	0.096	0.700	7.29	3.69

### Energía disipada

Se determinó la energía acumulada durante los diferentes ensayos a partir de las curvas histeréticas cortante basal – desplazamiento relativo del primer nivel. En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos. Como se puede observar, la relación entre la distorsión y la energía disipada sugiere un modelo trilineal, donde los puntos de quiebre coinciden de manera aproximada con los tres estados límite.

Antes del primer agrietamiento se disipó muy poca energía, ya que la mayor parte fue absorbida por el sistema a través de deformaciones elásticas. Una vez que se presentaron los primeros agrietamientos inclinados en el primer nivel, la energía disipada incrementó hasta alcanzar la resistencia. A partir de ese momento, continuó incrementando la energía disipada, aun cuando los muros del primero, segundo y tercer nivel ya presentaban concentración de daño.

### Torsión

El modelo fue diseñado y construido para minimizar las deformaciones de torsión. No obstante, debido a diferencias en la rigidez y resistencia de los muros y en los movimientos de la mesa a lo largo de los ejes A y C, el modelo experimentó deformaciones de torsión. Para cuantificar la respuesta del modelo en torsión, se obtuvieron los momentos torsionantes por piso y las excentricidades, como el cociente entre el momento torsionante y el cortante de entrepiso. En la Figura 12 se muestran las excentricidades registradas en el primer, tercer y quinto nivel, así como la excentricidad especificada en el RCDF-2017 que corresponde al 10% de la longitud de la planta en dirección perpendicular a la fuerza cortante aplicada. Como se puede observar, las mayores excentricidades se registraron en el tercer nivel, donde

también se concentró la torsión máxima de piso y superaron las especificadas en la norma existente vigente. Esto es consistente con el daño observado en el tercer nivel del modelo.

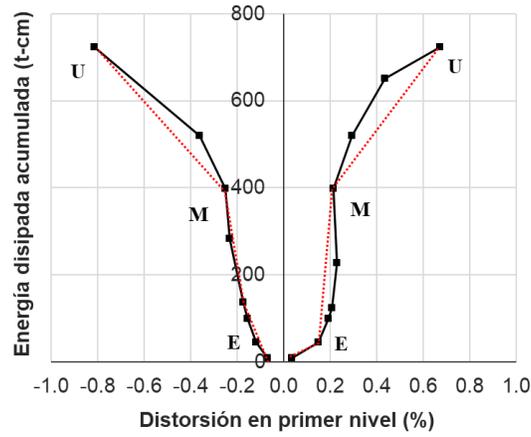


Figura 11 Energía disipada acumulada durante los diferentes ensayos

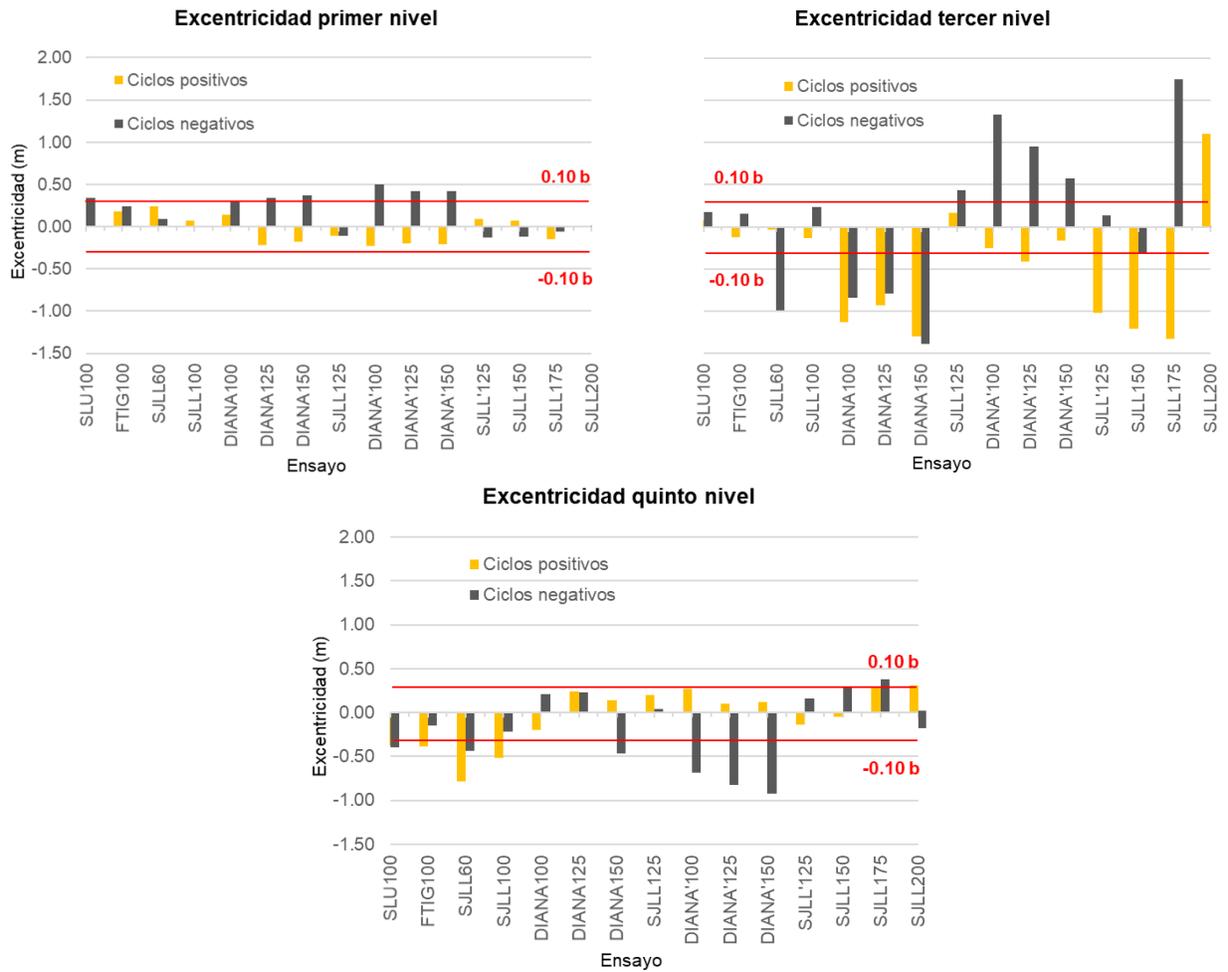


Figura 12 Excentricidad registrada durante los ensayos

## CONCLUSIONES

A partir de las observaciones hechas durante los ensayos, así como del análisis de la información, se proponen las siguientes conclusiones:

- Los agrietamientos inclinados de los muros que penetraron los extremos de los castillos, confirmaron la necesidad de reducir la separación de los estribos en extremos y en intersecciones con dadas en aberturas de puertas y ventanas.
- La respuesta del modelo estuvo dominada por agrietamiento máximo en el primer y tercer nivel, aunque también ocurrió agrietamiento en los muros de todos los niveles. El daño se caracterizó por la presencia de grietas inclinadas en los muros ubicados en la dirección de análisis y grietas horizontales en los muros perpendiculares.
- Las grietas verticales que se presentaron entre los muros y castillos en la altura del primer piso confirmaron la importancia del dentado de los tabiques en los extremos de los muros de mampostería confinada.
- La resistencia medida durante los ensayos fue mayor en un 30% que la resistencia nominal calculada con las NTCM-2017. Lo anterior sugiere que la resistencia de diseño de estructuras de mampostería confinada calculada según el reglamento resulta conservadora, ya que está asociada con el agrietamiento de los muros sin considerar la reserva de resistencia que existe entre la carga de agrietamiento y la máxima.
- Las distorsiones para el primer agrietamiento y para la resistencia, registradas durante los ensayos dinámicos fueron de 0.10% y 0.30%, respectivamente. Los valores obtenidos son inferiores a los indicados en las normas vigentes NTCM (2017), las cuales indican valores permisibles de 0.15% y 0.50%, respectivamente. Se recomienda evaluar la necesidad de ajustar estos valores, los cuales son consistentes con otros ensayos dinámicos en modelos a escala reducida.
- La degradación de rigidez medida siguió una tendencia de tipo exponencial (parabólica), donde se observó un mayor deterioro para bajas intensidades sísmicas (distorsiones menores que 0.20%) y disminuyó progresivamente para mayores intensidades y distorsiones del primer nivel. Lo anterior confirma que las estructuras de mampostería pueden llegar a sufrir pérdidas importantes de rigidez ante sismos moderados si no se cuenta con una densidad adecuada de muros en planta baja. Con el primer agrietamiento inclinado en el primer nivel se registró una pérdida de rigidez del modelo del 40%.
- Los periodos de vibración medidos durante los ensayos fueron ligeramente mayores que los obtenidos con las señales de ruido blanco (20% en promedio).
- La capacidad de deformación (ductilidad) calculada con el criterio de Park, fue de 5; aplicando la regla de Newmark-Hall el factor de comportamiento sísmico ( $Q$ ) fue de 3.10. Estos valores resultan conservadores cuando se comparan con el factor de comportamiento sísmico especificado como 2 en las normas vigentes.
- En la curva energía disipada acumulada – distorsión del primer nivel se distinguió una tendencia aproximadamente trilineal en la que los puntos de quiebre coincidieron con los estados límite. Previo al primer agrietamiento inclinado se disipó poca energía; la energía disipada aumentó en la etapa de comportamiento inelástico hasta la falla definida por la caída de más del 20% de la resistencia medida.
- El incremento de la torsión fue función del registro aplicado, ya que el sismo DIANA fue el que principalmente excitó al segundo modo de vibrar del modelo, que fue un modo de torsión. Si bien la magnitud

máxima de la torsión fue similar o inferior a la calculada según los requerimientos del RCDF (2017), la excentricidad y torsión en el tercer nivel excedieron los límites establecidos por la norma.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto, así como las donaciones realizadas por Grupo CEMEX y Cementos Moctezuma. Los autores agradecen a los maestros albañiles que construyeron el modelo y al personal del Laboratorio de la Mesa Vibradora, quienes activamente participaron en el desarrollo de esta investigación.

### REFERENCIAS

Alcocer, S.M., Arias, J.G. y Vázquez, A. (2004). Response assessment of Mexican confined masonry structures through shaking table tests, *Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering* **2130**.

Arias, J.G., Alcocer, S.M. y Vázquez, A. (2004). Respuesta dinámica de modelos a escala 1:2 de viviendas de mampostería confinada de uno y tres pisos, ensayados en mesa vibradora, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural **II:05**, 1-12.

Arias, J.G. (2005). Ensayos en mesa vibradora de un modelo a escala 1:2 de un edificio de mampostería confinada de tres niveles. Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Barragán, R. (2005). Ensayo de una vivienda a escala de dos niveles de mampostería confinada. Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Barragán, R., Arias, J.G., Vázquez, A. y Alcocer, S.M. (2005). Comparación de la respuesta dinámica del ensayo de viviendas a escala de uno, dos y tres niveles de mampostería confinada, *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica **VII:01**, 1-17.

Gobierno del Distrito Federal (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Gobierno del Distrito Federal (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Gobierno de la Ciudad de México (2017). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Gobierno del Distrito Federal (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, México.

Newmark, N.M. y Hall, W.Y. (1982). *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute.

Paulay, T. y Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley & Sons, New York.

Sánchez, T.A. (1998). Comportamiento de estructuras de mampostería confinada sujetas a cargas laterales. Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vázquez, A. (2005). Ensayo experimental de viviendas de mampostería confinada de un piso mediante el ensayo en mesa vibradora. Tesis de Maestría, Posgrado de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.