



EFFECTOS DEL PROTOCOLO DE ENSAYE SOBRE LA RESPUESTA DE MUROS DE CONCRETO CON RELACIÓN DE ASPECTO IGUAL A UNO

Julián Carrillo ¹ y Sergio M. Alcocer ²

RESUMEN

En este artículo se compara la respuesta sísmica de ocho muros cuadrados de concreto: cuatro prototipos ensayados bajo carga lateral cíclica reversible y cuatro modelos ensayados bajo excitación de mesa vibradora. El comportamiento de los muros se compara a partir de los modos de falla, curvas de histéresis, propagación del agrietamiento, velocidad de aplicación de carga, número de ciclos, demanda de ductilidad, energía disipada acumulada y los factores de amortiguamiento. Se verificó que los resultados obtenidos a partir de ensayos cuasi-estáticos cíclicos no siempre se pueden suponer de forma confiable como un límite conservador de la capacidad de muros de concreto para vivienda de baja altura sometidos a carga sísmica.

ABSTRACT

This paper compares the seismic response of eight squat concrete walls: four full-scale prototype walls tested under quasi-static cyclic loading and two models tested under shaking table excitation. The behavior of walls is compared using the failure modes, hysteresis curves, crack propagation, loading rate, number of cycles, ductility demand, cumulative energy dissipated and the damping factors. It was verified that data obtained from quasi-static cyclic tests can not always be safely assumed as a conservative bound of the capacity of concrete walls for low-rise housing subjected to earthquake-type loading.

INTRODUCCIÓN

Se reconoce ampliamente que los ensayos en mesa vibradora constituyen el mejor método para reproducir los efectos dinámicos que los sismos imponen a las estructuras o elementos estructurales. No obstante, existen desventajas y limitaciones que aumentan el grado de complejidad de este tipo de ensayos. Dichas desventajas están relacionadas básicamente con el costo del ensaye, las limitaciones de los equipos, el tamaño de los modelos y los efectos de escala asociados y, los problemas de control durante los ensayos. Aunque los ensayos cuasi-estáticos son los más simples de llevar a cabo, también son los más limitados para proporcionar información acerca del comportamiento dinámico de los especímenes de ensaye. En general, en el protocolo de carga simplificado de esta técnica se ignoran los efectos dinámicos que se observan en estructuras sometidas a acciones sísmicas (Bertero *et al.*, 1977); principalmente, los efectos de la tasa de deformación continúan generando algunas dudas sobre la confiabilidad de estos métodos (Paulson y Abrams, 1990; Leon y Deierlein, 1996; Mosalam *et al.*, 2008; entre otros).

Las diferencias entre los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos involucran, en mayor o menor medida: propagación del daño, rigidez, resistencia y disipación de energía (Calvi *et al.*, 1996). No obstante, actualmente no se han identificado plenamente los parámetros principales que generan las diferencias entre los resultados de ensayos dinámicos y cuasi-estáticos de muros de concreto para viviendas de baja altura. Por lo tanto, se llevó a cabo una investigación experimental donde se estudió el comportamiento de ocho muros de concreto con relación de aspecto igual a uno ($H/l_w=1$): cuatro prototipos a escala natural ensayados bajo carga lateral cíclica y cuatro modelos a escala 1:1.25 ensayados bajo excitación dinámica en mesa vibradora.

¹ Candidato a Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, D.F., & Profesor Asistente, Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia; wcarrillo@umng.edu.co

² Profesor Investigador, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, D.F.; alcocerm@ii.unam.mx

En el programa experimental se incluyeron las características particulares utilizadas en muros de concreto de viviendas de baja altura en México. Las variables estudiadas fueron el tipo de concreto (peso normal y celular), la cuantía de refuerzo a cortante en el alma (0.125% y 0.25%) y el tipo de refuerzo (barras corrugadas y malla de alambre soldado). Inicialmente, la respuesta dinámica y cuasi-estática se compara a partir del análisis de los modos de falla y las curvas de histéresis medidas. Luego, se efectúa la comparación del comportamiento detallado en términos de la propagación del agrietamiento, la velocidad de aplicación de carga, el número de ciclos, la demanda de ductilidad, la energía disipada y los factores de amortiguamiento.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS TIPOS DE ENSAYE

Cuando se desea estudiar el desempeño sísmico de una estructura o elemento estructural, existen generalmente tres métodos para obtener información de tipo experimental: ensayos cuasi-estáticos, ensayos dinámicos (en mesa vibradora) y ensayos pseudo-dinámicos. Como su nombre lo indica, los ensayos pseudo-dinámicos son una combinación entre los ensayos cuasi-estáticos y dinámicos. A continuación se discuten las principales ventajas y debilidades de los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos, puesto que fueron éstas las modalidades aplicadas en este estudio.

DINÁMICOS EN MESA VIBRADORA

Los ensayos en mesa vibradora constituyen el mejor método para reproducir, con alto grado de fidelidad, los efectos dinámicos que los sismos imponen a las estructuras o elementos estructurales. En general, este tipo de ensayos tiene ventajas trascendentales respecto a los ensayos cuasi-estáticos; por ejemplo, los especímenes pueden ser sometidos a registros reales de aceleración sísmica para investigar los efectos dinámicos y, al mismo tiempo, las fuerzas y desplazamientos relativos son generados por la respuesta dinámica propia de la estructura. Este problema se evade completamente en los ensayos cuasi-estáticos, pues no se tiene certeza de la historia de desplazamientos o fuerzas que deben aplicarse al espécimen (Calvi *et al.*, 1996).

Sin embargo, existen desventajas y limitaciones que aumentan el grado de complejidad de este tipo de ensayos, por ejemplo (Alcocer *et al.*, 1997; Krawinkler, 2000): a) el costo elevado de instalación y mantenimiento de mesas vibratoras de gran tamaño para el ensayo de estructuras en escala real; es decir, el tamaño del espécimen está limitado por la capacidad de la mesa vibradora, b) para los ensayos en escala reducida, los efectos de escala pueden ser importantes, especialmente en la evaluación de la degradación y los modos de falla locales, c) problemas de control generados por la interacción mesa vibradora – espécimen o por el cabeceo no deseado de la mesa vibradora durante el movimiento, d) en algunos casos no es seguro llevar los especímenes hasta el colapso, especialmente las estructuras en escala real, ya que esto podría resultar en daño de la mesa vibradora y del equipo e instrumentación circundante.

CUASI-ESTÁTICOS

En este tipo de ensayos, la historia de carga o deformación se aplica a una velocidad suficientemente baja, de tal forma que se considera “casi” de forma estática. Los ensayos monótonos y cíclicos se clasifican en esta categoría. La fortaleza principal de los ensayos cuasi-estáticos recae en su relativa economía y practicidad. En comparación con los ensayos dinámicos, se pueden enumerar las siguientes ventajas de los ensayos cuasi-estáticos (Calvi *et al.*, 1996): a) la aplicación de fuerzas de magnitud considerable a los especímenes es relativamente más fácil, b) los ensayos al colapso de especímenes a escala levemente reducida o estructuras en escala natural requieren de equipo menos costoso, c) el fenómeno del agrietamiento y la propagación del daño se puede observar detalladamente y, d) los desplazamientos y, especialmente las fuerzas, pueden medirse de forma más acertada.

No obstante, aunque los ensayos cuasi-estáticos son los más simples de llevar a cabo, también son los más limitados para proporcionar información acerca del comportamiento dinámico de los especímenes de ensayo bajo carga sísmica. En general, en el protocolo de carga simplificado de esta técnica se ignoran los efectos dinámicos que se observan en estructuras sometidas a acciones sísmicas (Bertero *et al.*, 1977); principalmente, los efectos de la tasa de deformación continúan generando algunas dudas sobre la confiabilidad de estos métodos (Paulson y Abrams, 1990; Leon y Deierlein, 1996; Mosalam *et al.*, 2008; entre



otros). De acuerdo con Krawinkler (2000), en todos los ensayos que no se llevan a cabo en tiempo real, los efectos de la tasa de deformación pueden originar distorsiones de la realidad. Por lo tanto, cuando se estudia el comportamiento sísmico a partir de este tipo de ensayos, se pueden originar interpretaciones incorrectas de los resultados, principalmente en los siguientes casos (Leon y Deierlein, 1996; Rai, 2001): a) el modo de falla predominante del elemento está notablemente influenciado por las tasas de deformación, b) el material que gobierna el comportamiento es frágil, como en el caso del concreto y la mampostería, c) las características de sobrerresistencia son un parámetro fundamental en la respuesta y, d) la capacidad de ductilidad y disipación de energía son parámetros importantes. En los casos anteriores, no es tan claro si los datos obtenidos de los ensayos cuasi-estáticos se pueden suponer de forma confiable como un límite inferior (conservador) de la capacidad. Por ejemplo, a pesar de que estudios experimentales muestran que sí se puede realizar la suposición señalada, no se ha estudiado adecuadamente qué afecta la subestimación o sobrestimación de estas características, en materiales que exhiben degradación importante de sus propiedades, tales como el concreto y la mampostería (Leon y Deierlein, 1996). De acuerdo con Rai (2001), la ausencia del efecto de la tasa de deformación origina muchas de las resistencias particulares observadas en los ensayos cuasi-estáticos.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

El prototipo tridimensional corresponde a una vivienda de dos niveles con muros de concreto en las dos direcciones principales. Usualmente, el área de piso es igual a 62.5 m² (5.9 x 10.6 m), y el espesor de los muros y la altura libre son iguales a 100 y 2,400 mm, respectivamente (Carrillo y Alcocer, 2008). La resistencia nominal a la compresión del concreto es igual a 14.7 MPa.

GEOMETRÍA Y REFUERZO

Dentro del programa experimental se estudió el comportamiento en el plano de ocho muros aislados de concreto con relación de aspecto (altura-longitud) igual a uno ($H/l_w=1$). Se realizaron ensayos cuasi-estáticos cíclicos reversibles de cuatro muros a escala natural (Flores *et al.*, 2007, Sánchez, 2010) y, ensayos dinámicos en mesa vibradora de cuatro modelos a escala 1:1.25 (Carrillo, 2010) (tabla 1). Tomando en cuenta que la escala de los modelos ensayados en mesa vibradora fue sólo levemente reducida, se seleccionó un modelo de similitud simple (Carrillo y Alcocer, 2008). En este tipo de similitud, los modelos se construyen con los mismos materiales que el prototipo, es decir, no se alteran las propiedades de los materiales, sólo las dimensiones de los modelos.

Tabla 1 Características generales de los especímenes

Muro	Tipo de concreto	Refuerzo a cortante en el alma		Tipo de ensaye
		Tipo de refuerzo	$\rho_v = \rho_h$	
MCN50m	Normal	Malla de alambre soldado	50% ρ_{min}	Cuasi-estático (cíclico reversible) y dinámico (mesa vibradora)
MCC50m	Celular			
MCN100	Normal	Barras corrugadas	100% ρ_{min}	
MCC100	Celular			

Nota: ρ_{min} = cuantía mínima a cortante en el alma establecida en las NTC-C (2004).

En el programa experimental se incluyeron las características particulares utilizadas en muros de concreto de viviendas de baja altura en México. Las variables estudiadas fueron el tipo de concreto (peso normal y celular) y, la cuantía y el tipo de refuerzo a cortante (malla de alambre soldado y barras corrugadas). La cuantía de refuerzo a cortante (ρ_{min}), se estableció en función de la cuantía mínima establecida en las NTC-C (2004). La geometría y la configuración del refuerzo de los modelos ensayados en mesa vibradora se muestran en la figura 1. La altura, longitud y espesor de los muros prototipo fueron 2400 mm, 2400 mm y 100 mm, respectivamente.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de las principales propiedades mecánicas del concreto y del acero de refuerzo en el alma del muro, respectivamente. Para el concreto, estas propiedades fueron obtenidas

en una fecha cercana al ensaye de los modelos. La resistencia nominal a la compresión del concreto fue igual a 14.7 MPa y la resistencia nominal de fluencia de las barras corrugadas y los alambres de malla fueron 412 y 491 MPa, respectivamente. En la tabla 2 se observa que el alargamiento de las mallas utilizadas en la construcción de los especímenes fue menor que el estipulado en la norma NMX-B-253 (2006).

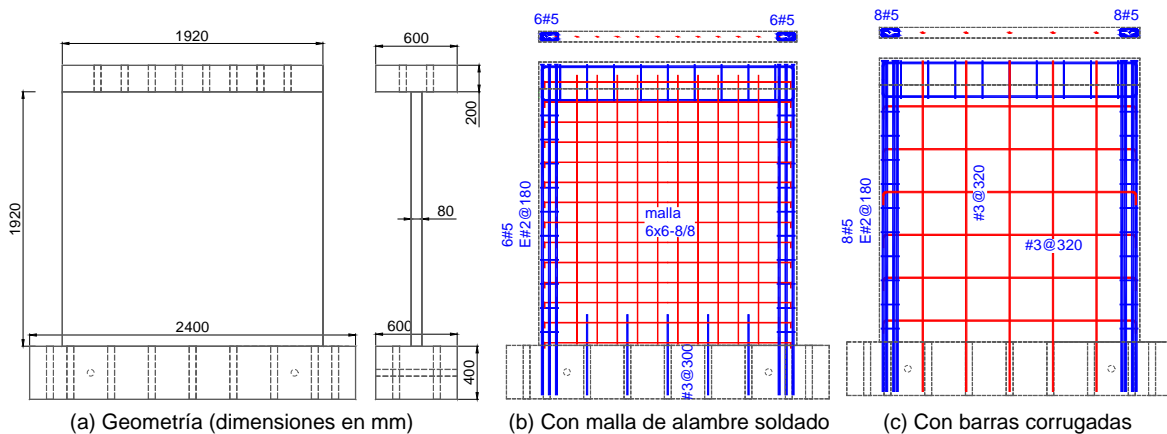


Figura 1 Geometría y refuerzo de los muros

Tabla 2 Propiedades mecánicas de los materiales

Material	Propiedad mecánica	Dinámicos – MV		Cuasi-estáticos			
		MCN50mD MCN100D	MCC50mD MCC100D	MCN50mC	MCN100C	MCC50mC	MCC100C
Concreto	Tipo	Normal	Celular	Normal	Normal	Celular	Celular
	Resistencia a compresión, f_c (MPa)	24.8	21.0	20.0	17.5	26.0	5.2
	Módulo de elasticidad, E_c (MPa)	14,760	9,145	10,290	8,435	10,785	6,725
	Resistencia a tensión, f_t (MPa)	2.09	1.44	2.17	2.00	1.76	0.85
	Peso específico, γ (kN/m ³)	20.3	16.8	19.0	---	18.3	15.2
Acero	Esfuerzo de fluencia, f_y (MPa)	435	630	605	447	605	447
	Esfuerzo máximo, f_u (MPa)	659	687	700	672	700	672
	Alargamiento, (%)	10.1	1.9	1.4	11.0	1.4	11.0

DEMANDA SÍSMICA Y DISPOSITIVOS DE ENSAYE

En los ensayos dinámicos, la sollicitación horizontal estuvo representada por registros sísmicos aplicados a una mesa vibradora sobre la cual se sujetaron los especímenes. Con el fin de estudiar el comportamiento de los muros para diferentes estados límite, desde el inicio del agrietamiento hasta el colapso, los modelos ensayados dinámicamente fueron sometidos a tres niveles de amenaza sísmica utilizando acelerogramas naturales y sintéticos. Los registros fueron representativos de la zona de subducción del pacífico mexicano. En los ensayos cuasi-estáticos, como de forma convencional, la carga horizontal se aplicó a nivel de la losa mediante gatos hidráulicos de doble acción. Carrillo y Alcocer (2008) presentan los detalles del protocolo de los ensayos cuasi-estáticos y de los registros sísmicos utilizados en los ensayos dinámicos.

Los especímenes ensayados en mesa vibradora se diseñaron dinámicamente considerando el periodo fundamental de vibración de la vivienda prototipo. A partir de modelos analíticos calibrados utilizando resultados de pruebas de vibración ambiental, el periodo de vibración fundamental de la vivienda de dos niveles se estimó en 0.12 s. Para el diseño, se supuso que los muros se comportan como un sistema de un grado de libertad y, de esta manera, el peso dinámico nominal fue igual a 188.2 kN (Carrillo y Alcocer, 2008). Con el propósito de disminuir el riesgo de la inestabilidad lateral al ubicar la masa adicional directamente sobre los especímenes, fue necesario diseñar un dispositivo de ensaye para almacenar la masa y transmitir las fuerzas inerciales a los modelos. Para esto, se diseñó un sistema de carga inercial que se desliza horizontalmente sobre una estructura de soporte localizada fuera de la mesa vibradora (Carrillo y Alcocer, 2010).



Para determinar un valor representativo del esfuerzo vertical axial en condiciones de servicio para muros de viviendas de baja altura, se utilizaron modelos de elementos finitos del prototipo de dos niveles (Carrillo y Alcocer, 2008). De esta manera, se estableció un esfuerzo de compresión axial igual a 0.25 MPa. Este valor corresponde aproximadamente al 2% de la resistencia nominal a la compresión del concreto. La carga axial equivalente se aplicó en el extremo superior de los modelos y se mantuvo constante durante los ensayos.

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GLOBAL

MODOS DE FALLA

En los ensayos dinámicos, los muros reforzados con malla de alambre soldado y con el 50% de la cuantía mínima a cortante estipulada en las NTC-C (2004), exhibieron modos de falla por tensión diagonal, “TD”. El modo de falla estuvo gobernado por la plastificación del refuerzo y la posterior fractura de los alambres. La falla fue frágil debido a la capacidad de deformación limitada de los alambres de refuerzo (tabla 2). En cambio, los muros reforzados con barras corrugadas y con la cuantía mínima de refuerzo a cortante, exhibieron un modo de falla combinado de tensión y compresión diagonal, “TD-CD”. El modo de falla estuvo caracterizado por la fluencia de algunas barras de refuerzo en el alma y agrietamiento pronunciado del concreto (Carrillo, 2010). Los muros similares ensayados bajo carga lateral cíclica exhibieron modos de falla y patrones de agrietamiento comparables.

CURVAS DE HISTÉRESIS

Para comparar las curvas de histéresis de los especímenes ensayados dinámicamente y bajo carga lateral cíclica, fue de vital importancia normalizar la capacidad de resistencia utilizando un parámetro conocido. Lo anterior se hizo ya que, aunque se trató de utilizar concretos con propiedades mecánicas semejantes en cada pareja de especímenes, las propiedades medidas fueron diferentes (tabla 2). Cuando el modo de falla observado en los dos especímenes que se comparan es similar, un procedimiento de normalización de resistencia adecuado consiste en utilizar una expresión de predicción de resistencia para dicho modo de falla. En este estudio se utilizó la resistencia calculada con la metodología de Sánchez (2010), V_{normal} , para normalizar la resistencia medida en los ensayos, V .

En el lado izquierdo de las figuras 2 y 3 se muestran las curvas de los especímenes ensayados dinámicamente en mesa vibradora y, en el lado derecho, las curvas de los especímenes similares ensayados bajo carga lateral cíclica reversible. Las curvas de histéresis se presentan en términos de la resistencia al cortante normalizada (o esfuerzo cortante, en el eje derecho de las ordenadas) y distorsión. En las gráficas se indica la línea que representa el 80% de la resistencia, la cual está asociada al estado límite último. Es importante mencionar que al normalizar la resistencia con una metodología de predicción sólo es posible comparar las curvas de histéresis de muros con iguales características geométricas (H/l_w) y de refuerzo (cuantía y tipo de refuerzo). De acuerdo con las tendencias observadas, los resultados se agruparon en dos categorías en función del modo de falla de los muros. El primer grupo corresponde a los especímenes que fallaron por tensión diagonal (“TD”), los cuales comprendieron los muros reforzados con malla de alambre soldado (figura 2). El segundo grupo incluye a los especímenes donde se observó un modo de falla combinado de tensión y compresión diagonal (“TD-CD”); es decir, los muros reforzados con barras corrugadas (figura 3). Al comparar el comportamiento global de cada pareja de gráficas en las figuras 2 y 3, se observan las siguientes tendencias:

- En los muros con falla combinada de “TD-CD”, las diferencias del comportamiento fueron muy evidentes, especialmente en términos de la degradación de resistencia (figura 3). Por ejemplo, en los muros ensayados bajo carga lateral cíclica reversible, la degradación de resistencia inició en distorsiones mayores que las asociadas al esfuerzo cortante máximo. Adicionalmente, la tasa de degradación fue menor en estos especímenes. En cambio, en los muros ensayados de forma dinámica, la degradación de resistencia inició tan pronto se alcanzó el esfuerzo cortante máximo y, adicionalmente, la tasa de degradación fue significativamente pronunciada

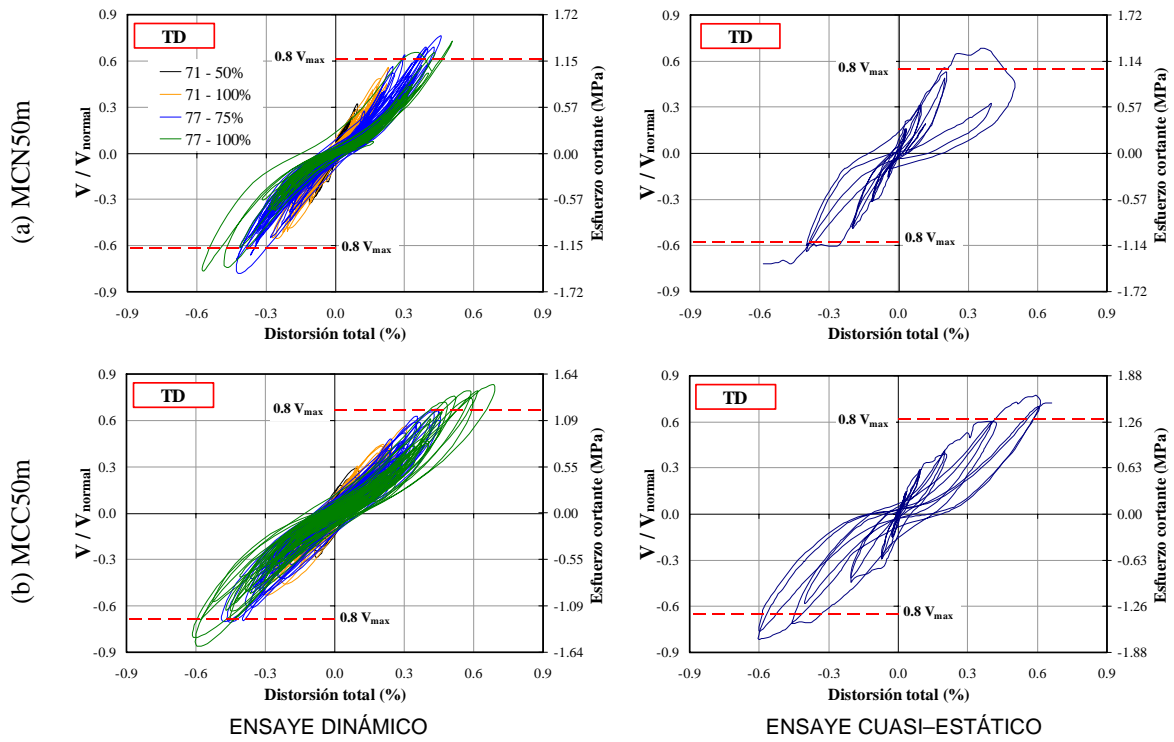


Figura 2 Curvas de histéresis de muros con falla por "TD"

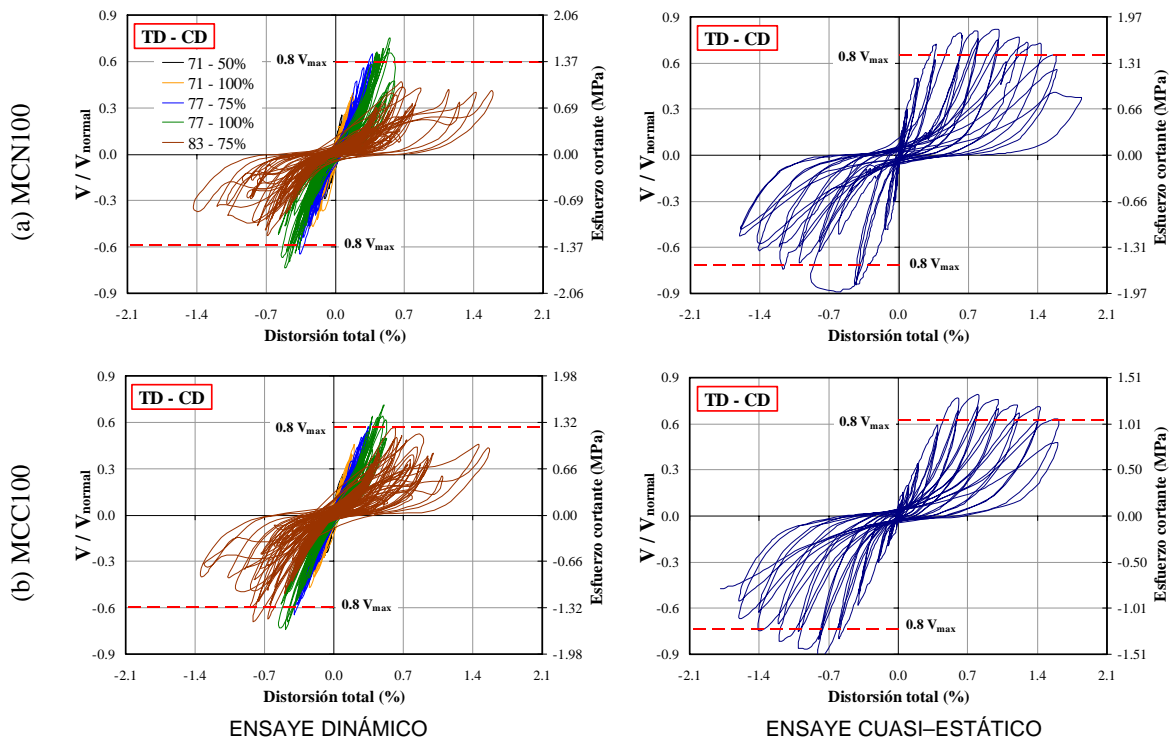


Figura 3 Curvas de histéresis de muros con falla combinada "TD-CD"



- En el comportamiento de los muros con falla por “TD”, no se apreciaron diferencias importantes. En estos muros, en los cuales la porción inelástica fue apreciablemente menor que la observada en los muros con barras corrugadas, no se observó evidentemente el efecto de degradación de resistencia
- En los muros con falla por “TD” y ensayados de forma dinámica, la resistencia (normalizada) fue mayor que en los muros ensayados bajo carga lateral cíclica (pareja de curvas en las figuras 2(a) y (b)). Sin embargo, en los muros con falla combinada de “TD-CD” ocurrió lo contrario; probablemente a causa del número de ciclos que se aplicaron antes de registrarse la resistencia máxima durante los ensayos dinámicos de estos especímenes
- En los muros con falla combinada de “TD-CD” y ensayados de forma dinámica, la capacidad de desplazamiento (máximo y último) fue menor que en los muros ensayados bajo carga lateral cíclica. Para los muros con falla por “TD”, no se observaron diferencias importantes.

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DETALLADO

A partir del estudio de la respuesta global de los especímenes ensayados dinámica y cuasi-estáticamente se observó que las diferencias del comportamiento se originan por la interacción de varios parámetros involucrados en la respuesta. Por lo tanto, se estudió en detalle el comportamiento de los especímenes, utilizando los siguientes parámetros: propagación del agrietamiento, velocidad de aplicación de carga, número de ciclos, energía disipada acumulada y factores de amortiguamiento.

PROPAGACIÓN DEL AGRIETAMIENTO

El agrietamiento en el alma de los muros de los especímenes ensayados bajo carga lateral cíclica fue mayor que el observado en los especímenes ensayados dinámicamente. Las diferencias en la propagación del agrietamiento fueron originadas principalmente por el efecto de la tasa de deformación del ensaye cuasi-estático. En estos ensayos, al finalizar la aplicación de carga en los puntos extremos de la historia de deformación, es decir, en el punto de deformación máxima, comúnmente se hace una pausa entre cinco y diez minutos para obtener documentación apropiada (realizar inspección visual, tomar notas, identificar y medir grietas, tomar fotografías, entre otras). En los ensayos cuasi-estáticos reportados por Leon y Deierlein (1996), durante estas pausas también fue común observar que la propagación del agrietamiento continuaba por varios minutos después de llegar a la carga objetivo. Es obvio que en los intervalos de tiempo cortos del ensaye dinámico, no podría haber ocurrido dicha propagación del agrietamiento. Este efecto ha sido evidenciado de una forma mucho más pronunciada durante ensayos cuasi-estáticos de estructuras de mampostería reforzada ya que, a diferencia de las estructuras de concreto reforzado, en la mampostería existe poca o nula trabazón de agregados dentro del mortero para restringir la propagación del agrietamiento (Paulson y Abrams, 1990).

VELOCIDAD DE APLICACIÓN DE CARGA

A pesar de que actualmente se reconoce que las tasas de deformación afectan el comportamiento de las estructuras, especialmente sobre aquellas construidas con materiales frágiles como el concreto o la mampostería (Leon y Deierlein, 1996; Rai, 2001), aún no se han cuantificado claramente sus efectos. Por ejemplo, de acuerdo con Harris y Sabnis (1999), al aumentar la velocidad de aplicación de carga es probable que la resistencia de los materiales (concreto y acero) se incremente y que su rigidez elástica sea similar a la obtenida a partir de ensayos con velocidades de carga bajas (ensayos cuasi-estáticos monótonos y cíclicos). En la tabla 3 se muestra la velocidad de aplicación máxima de carga en términos de desplazamiento, asociada a cada uno de los registros sísmicos utilizados en los ensayos dinámicos. Las velocidades representan el valor máximo del cociente entre el desplazamiento relativo en el extremo superior de los muros (en un determinado instante de tiempo) y el incremento de tiempo de los registros. En la tabla 3 también se muestra el valor máximo registrado durante los ensayos cuasi-estáticos cíclicos, el cual se calculó utilizando los incrementos de tiempo efectivos registrados durante la aplicación de carga lateral a los especímenes.

Como se observa en la tabla 3, durante los ensayos dinámicos la velocidad de aplicación de carga fue diferente, pues se utilizaron tres registros sísmicos, cada uno con características propias de intensidad y duración. Para propósitos de comparación con los ensayos cuasi-estáticos, se calculó el promedio de los valores observados durante la aplicación de los registros sísmicos. De esta manera, en la tabla 3 se incluye el

cociente entre el promedio de los valores máximos observados en los ensayos dinámicos y el valor máximo registrado durante los ensayos cuasi-estáticos (D/C). En este caso, el valor promedio de los cocientes “D/C” es aproximadamente igual a 650. En la figura 4 se muestran historias características de desplazamiento relativo para los especímenes estudiados. Para observar claramente las diferencias en una sola gráfica, fue necesario mostrar el eje de las abscisas en escala logarítmica. Se observa claramente en la tabla 3 y en la figura 4, que las tasas de deformación utilizadas en los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos son considerablemente diferentes.

Tabla 3 Velocidad de aplicación de carga en los especímenes en términos de desplazamiento (mm/s)

Modo de falla	Muro	Ensayo dinámico (D)					X	Ensayo cuasi-estático (C)	D / C
		Registro							
		71-50	71-100	77-75	77-100	83-75			
“TD”	MCN50m	72	146	255	215	---	172	0.30	570
	MCC50m	72	195	296	338	---	225		747
“TD-CD”	MCN100	68	128	230	286	474	237	0.40	587
	MCC100	72	150	231	314	510	255		632
							X		634
							CV (%)		10.9

Notas: X = media aritmética, CV= coeficiente de variación.

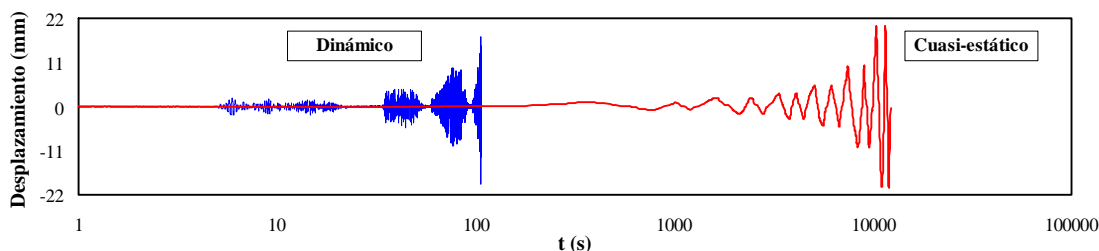


Figura 4 Historias de desplazamiento relativo

De acuerdo con las observaciones anteriores, los incrementos de resistencia observados en algunos ensayos dinámicos, en comparación con los ensayos cuasi-estáticos cíclicos, probablemente están relacionados con el efecto de la velocidad de aplicación de carga. No obstante, en varios estudios donde la velocidad de carga ha incrementado la capacidad de resistencia (Scott *et al.*, 1982; Matsuoka *et al.*, 2006), no se ha tenido en cuenta el efecto cíclico acumulado (parámetros acumulados de ductilidad y disipación de energía), ni el número de ciclos sobre la respuesta dinámica y, por lo tanto, es probable que estos parámetros puedan generar resistencias similares o aún menores en los ensayos dinámicos. La disminución de resistencia entre muros ensayados bajo carga lateral cuasi-estática cíclica y monótona se ha reportado en la literatura. Por ejemplo, a partir de ensayos de muros de concreto, Barda *et al.* (1977) midieron valores 10% menores en los resultados cíclicos, Cárdenas *et al.* (1980) del 7% y, Sánchez (2010) entre 5% y 25% dependiendo del tipo de concreto, de la cuantía y del tipo de refuerzo utilizado en los muros. En estructuras de mampostería también se han reportado valores menores de resistencia lateral y desplazamiento último en ensayos cuasi-estáticos cíclicos, en comparación con en ensayos cuasi-estáticos monótonos (Tomazevic, 2000).

NÚMERO DE CICLOS

Varios estudios experimentales han demostrado que las fallas de los elementos y sistemas estructurales son influenciadas por el número de ciclos de respuesta inelástica (Bertero *et al.*, 1977; Krawinkler, 1996; Teramoto *et al.*, 2000, Carrillo *et al.*, 2009). Es decir, los sistemas estructurales son más vulnerables al ser sometidos a ciclos repetidos de movimientos, los cuales originan que la estructura incurra más allá del intervalo elástico. Por ejemplo, aunque en el estudio de Bertero *et al.* (1977) las repeticiones de cargas laterales reversibles no afectaron perceptiblemente la resistencia del muro, sí redujeron la capacidad dúctil aproximadamente 60%. Adicionalmente, el análisis de los ciclos de histéresis de dicho estudio indicó que, cada vez que se incrementó el valor absoluto de la deformación pico, se degradaron la rigidez inicial, la

resistencia y la energía disipada durante el ciclo siguiente. También se ha evidenciado experimentalmente que los especímenes sometidos a movimientos sísmicos de larga duración, sufren daño más severo en el intervalo inelástico que los especímenes sometidos a movimientos de corta duración, aún si los dos movimientos sísmicos generan el mismo espectro de respuesta elástico (Teramoto *et al.*, 2000). De acuerdo con Krawinkler (1996), tanto los parámetros básicos de la capacidad sísmica de un elemento estructural (resistencia, rigidez y desplazamiento inelástico) como los parámetros de la capacidad acumulada (disipación de energía), se deterioran a medida que incrementa el número y la amplitud de los ciclos de daño.

Para analizar el efecto del número de ciclos en los especímenes aquí estudiados, en la figura 5 se muestran gráficas que relacionan la demanda de ductilidad y el número máximo de ciclos equivalentes para un intervalo de ductilidad determinado, N_{max} . N_{max} se relaciona de forma directa con la demanda de ductilidad y, se indica como equivalente, pues representa el valor máximo de los cocientes entre la energía disipada acumulada en un determinado ciclo y la energía acumulada asociada al intervalo de ductilidad. Por ejemplo, $N_{max} = 10$, representa que, para un determinado intervalo de ductilidad, son necesarios hasta 10 ciclos de la misma ductilidad para disipar una energía acumulada determinada. Para los ensayos dinámicos, en la figura 5 también se presentan expresiones obtenidas a partir de análisis de regresión no-lineal, junto con su respectivo coeficiente de correlación (r). Este coeficiente mide la intensidad de la relación entre los valores estimados y los datos reales. Para propósitos de comparación, se utilizaron los valores de ductilidad y fuerza cortante asociados al punto donde se alcanzó la resistencia de los muros (V_{max}).

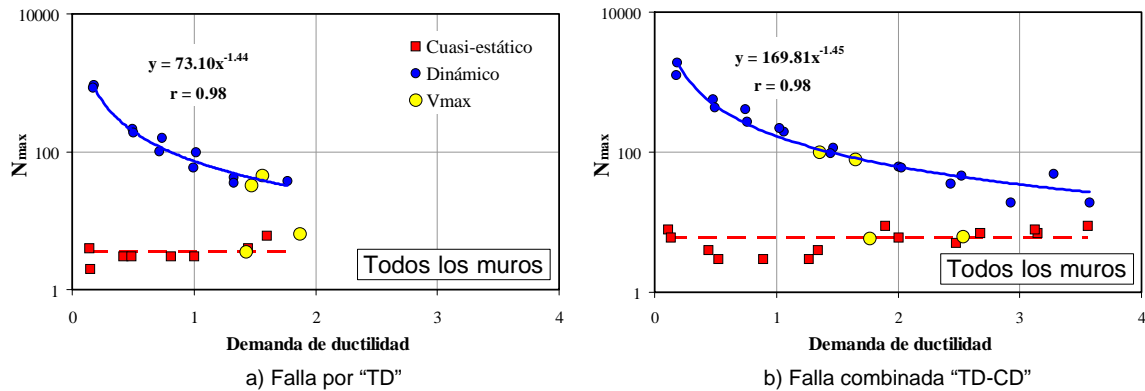


Figura 5 Número de ciclos con ductilidad constante

En la figura 5 se observa que el número máximo de ciclos equivalentes para una demanda de ductilidad determinada, difiere apreciablemente entre los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos. Para observar claramente las diferencias, fue necesario mostrar el eje de las ordenadas en escala logarítmica. Por ejemplo, en la figura 5 se observa que el número de ciclos en los ensayos cuasi-estáticos fue aproximadamente constante para cualquier valor de demanda ductilidad ($N_{max} \approx 5$). Sin embargo, en los ensayos dinámicos el valor de N_{max} , para la ductilidad asociada a la resistencia, varió entre 33 y 45 ciclos para muros con falla por “TD” y, entre 79 y 99 para muros con falla combinada de “TD-CD”. En los ensayos dinámicos existen diferencias entre el valor de N_{max} de los dos grupos de muros, ya que como se esperaba, la resistencia no se alcanzó durante la aplicación de un mismo registro sísmico, ni en el mismo instante de tiempo del registro.

A pesar de que en los muros con falla por “TD”, la resistencia del ensaye dinámico fue mayor que la resistencia del ensaye cuasi-estático (figura 2), en el ensaye dinámico el número de ciclos para un determinado nivel de desplazamiento fue notoriamente mayor; por ejemplo, aproximadamente 9 veces mayor para la ductilidad asociada a la resistencia ($D/C \approx 9$). En los muros con falla combinada de “TD-CD”, las resistencias fueron sólo un poco menores, pero la diferencia del número de ciclos fue más pronunciada; es decir, aproximadamente 15 veces mayor para la ductilidad asociada a la resistencia ($D/C \approx 15$). Por lo tanto, se comprobó que el número de ciclos es una variable fundamental para explicar las diferencias del comportamiento de muros de concreto de baja altura. Sin embargo, actualmente no se tiene en cuenta el número de ciclos para reportar las diferencias de resistencia entre los dos tipos de ensaye (Carrillo *et al.*, 2009).

ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA

En la figura 6 se muestra la variación de la energía disipada acumulada con la demanda de ductilidad acumulada, en los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos. El cálculo de la energía disipada en cada ciclo corresponde al área dentro del ciclo de histéresis. Para realizar la comparación objetiva y no aplicar los factores de escala a los resultados de los ensayos cuasi-estáticos (prototipo de muro aislado), la energía acumulada se normalizó con el producto de la fuerza cortante de fluencia ($V_y = 0.8V_{max}$) y el desplazamiento de fluencia (R_y). Como se muestra en la figura, en el ensayo dinámico los parámetros acumulados de la energía disipada y la demanda de ductilidad son evidentemente mayores que en el ensayo cuasi-estático. Para observar claramente los resultados, también fue necesario mostrar el eje de las abscisas en escala logarítmica. Como se observa en la figura 2, en los especímenes reforzados con malla de alambre soldado, la demanda de ductilidad acumulada máxima fue similar a la demanda de ductilidad acumulada asociada a la resistencia.

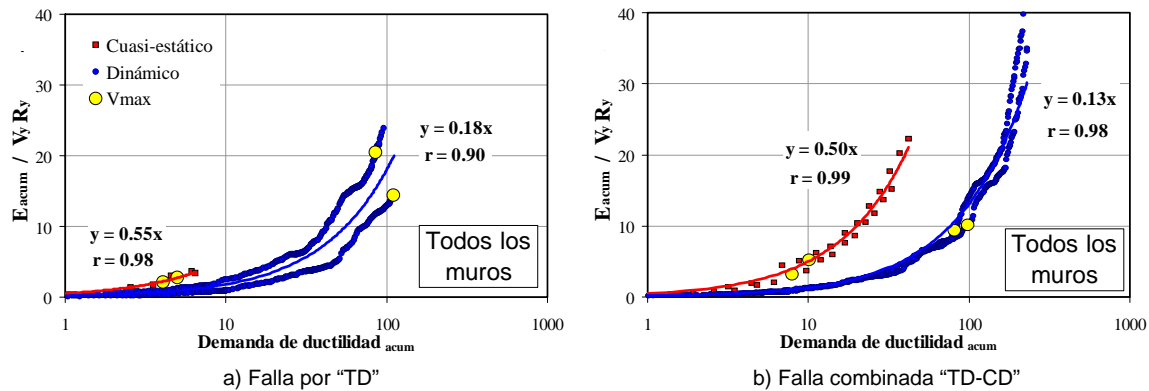


Figura 6 Energía disipada acumulada

En los ensayos dinámicos, la energía disipada acumulada (normalizada) asociada a la resistencia, varió entre 14.4 y 20.5 para muros con falla por "TD" y, entre 9.3 y 10.1 para muros con falla combinada de "TD-CD". Las diferencias observadas en la energía disipada acumulada están relacionadas principalmente con el efecto del número de ciclos en los mecanismos de resistencia involucrados en el modo de falla de los muros. Por ejemplo, cuando el mecanismo de falla está relacionado con el agrietamiento y/o el aplastamiento del concreto, como en el caso de fallas combinadas de "TD-CD", a medida que aumenta el número de ciclos se incrementa perceptiblemente la tasa de degradación (de resistencia y rigidez) y se hace más evidente el estrangulamiento de los ciclos de histéresis; es decir, los ciclos de histéresis se tornan más delgados e irregulares y, por lo tanto, disminuye la capacidad de disipación de energía de los especímenes. En cambio, cuando el mecanismo de falla por "TD" está controlado por la plastificación del refuerzo y posterior fractura de los alambres, el número de ciclos no afecta de forma importante la degradación de las propiedades de resistencia y rigidez (Carrillo *et al.*, 2009).

En la figura 6 se observa que en los ensayos cuasi-estáticos, la energía disipada acumulada fue un poco mayor en los especímenes con falla combinada de "TD-CD" que en aquellos con falla de "TD"; es decir, a diferencia de los ensayos dinámicos, no se evidenció el efecto del número de ciclos en el agrietamiento y/o el aplastamiento del concreto. Por lo tanto, cuando se desprecia el efecto del número de ciclos en los mecanismos de resistencia, como en el caso de ensayos cuasi-estáticos, se pueden obtener tendencias diferentes a las observadas en los ensayos dinámicos. En la figura 6 también se observan diferencias importantes entre la energía disipada acumulada en los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos (D/C). Por ejemplo, para los muros donde se observó falla por "TD", la energía disipada acumulada para la ductilidad asociada a la resistencia fue aproximadamente siete veces mayor en el ensayo dinámico ($D/C \approx 7$). Para los muros con falla combinada de "TD-CD", la energía acumulada fue aproximadamente dos veces mayor ($D/C \approx 2$). Las diferencias significativas están directamente relacionadas con valores de energía acumulada mayores en el ensayo dinámico, en comparación con el cuasi-estático para un determinado número de ciclos.

FACTORES DE AMORTIGUAMIENTO

En la figura 7 se muestra la variación del factor de amortiguamiento viscoso equivalente con la demanda de ductilidad, en los ensayos dinámicos y cuasi-estáticos. En los ensayos dinámicos primero se calculó el factor de amortiguamiento durante cada registro sísmico utilizando el método de ajuste de amplitud de la función de transferencia y , luego se extrajo el factor de amortiguamiento inducido por el sistema de deslizamiento (Carrillo y Alcocer, 2010). Para los muros ensayados bajo carga lateral cíclica, los factores de amortiguamiento se derivaron utilizando el método de la energía disipada y la energía de deformación dentro de los ciclos de histéresis.

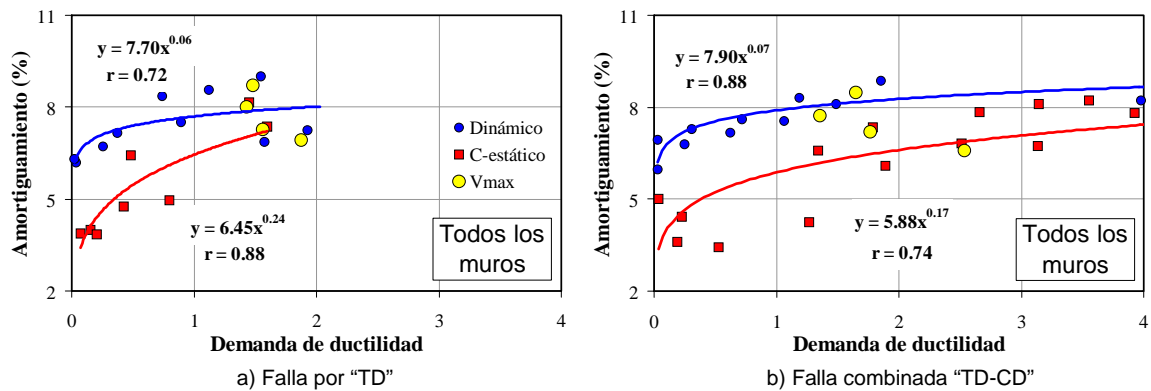


Figura 7 Factores de amortiguamiento

Es importante mencionar que los valores que se muestran en la figura 7, no representan el amortiguamiento total de viviendas de baja altura con muros de concreto reforzado. El amortiguamiento total depende tanto de la contribución del amortiguamiento del sistema estructural, así como de la contribución de los elementos no estructurales (si existen) y de la fricción entre los diferentes elementos (Aristizabal-Ochoa, 1983). Sin embargo, un buen punto de partida es estimar el amortiguamiento de los elementos estructurales, ya que el valor total del amortiguamiento de la vivienda puede ser similar o un poco mayor que el de los elementos estructurales. Como se muestra en la figura 7, los valores iniciales del factor de amortiguamiento de los muros de concreto durante los ensayos dinámicos fueron cercanos al 6%; es decir, el amortiguamiento total de la vivienda será similar o un poco mayor que el 6%. Por lo tanto, el factor de amortiguamiento del 5% que se supone en el análisis dinámico de viviendas de concreto en el intervalo de comportamiento elástico lineal, es consistente con los valores medidos.

En la figura 7 se observa un incremento de los valores medidos en los ensayos dinámicos en comparación con los ensayos cuasi-estáticos. Por ejemplo, para la demanda de ductilidad asociada a la resistencia, los valores son aproximadamente 10% mayores en los muros con falla por "TD" y 20% mayores para los muros con falla combinada de "TD-CD". El incremento de los factores de amortiguamiento probablemente está relacionado con valores mayores del número de ciclos (figura 5) y de la energía disipada acumulada (figura 6) en los ensayos dinámicos. Sin embargo, los incrementos leves de los factores de amortiguamiento no generaron diferencias visibles en la forma de las curvas de histéresis medidas en los dos tipos de ensaye (figuras 2 y 3).

CONCLUSIONES

A partir de las diferencias observadas en el comportamiento dinámico y cuasi-estático, se comprobó que no es necesariamente correcto suponer los datos obtenidos de los ensayos cuasi-estáticos como un límite conservador de la capacidad de muros de concreto para vivienda con las características aquí estudiadas y con los modos de falla observados. Por ejemplo, al comparar la respuesta dinámica y cuasi-estática de muros de concreto con relación de aspecto igual a uno, se observó que los parámetros de la respuesta dependen principalmente de la velocidad de aplicación de carga (tasa de deformación), el mecanismo de resistencia involucrado en el modo de falla (aplastamiento del concreto y/o fluencia del acero), el número de ciclos, la

disipación de energía acumulada y, por supuesto, de la interacción entre ellos. Por lo tanto, los resultados de ensayos cuasi-estáticos monótonos y cíclicos son sólo una primera aproximación del comportamiento dinámico de muros de concreto de las características estudiadas sometidos a acciones sísmicas reales.

Actualmente, no se han establecido correlaciones cuantitativas entre los resultados de ensayos dinámicos y cuasi-estáticos, asociadas al comportamiento a cortante de muros de concreto de las características aquí estudiadas. Los resultados presentados en el artículo podrían ser utilizados para el desarrollo de modelos de degradación que permitan estimar la rigidez en función de los parámetros identificados, así como ajustar los modelos de predicción de resistencia que usualmente se calibran utilizando exclusivamente resultados de ensayos cuasi-estáticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo CEMEX, por el apoyo económico de la investigación, en especial, a los Ingenieros Roberto Uribe y Ángel Ponce, Director General y Gerente de la División de Estructuras, respectivamente, del Centro de Tecnología del Cemento y del Concreto, CEMEX, así como al personal de los laboratorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por su valiosa colaboración durante la realización de los ensayos. El contenido de este artículo representa exclusivamente la opinión de los autores y no refleja la opinión de los patrocinadores y/o colaboradores.

REFERENCIAS

Alcocer S., Flores L., López-Bátiz O., Aguilar G. y Elías J. (1997), **“Taller sobre investigación experimental en estructuras”**, Informe Técnico IEG/02/97, Coordinación de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, México.

Aristizabal-Ochoa J. (1983), **“Cracking and shear effects on structural walls”**, Journal of Structural Engineering – ASCE, Vol. 109, No. 5, pp. 1267–1277.

Barda F., Hanson J. y Corley W. (1977), **“Shear strength of low-rise walls with boundary elements”**, Reinforced concrete structures in seismic zones, Publicación SP 53–8, American Concrete Institute. Detroit, pp. 149–202.

Bertero V., Popov E., Wang T. y Vallenas J. (1977), **“Seismic design implications of hysteretic behavior of reinforced concrete structural walls”**, 6th World Conference on Earthquake Engineering, India, pp. 1898–1904.

Calvi G., Kingsley G. y Magenes G. (1996), **“Testing of masonry structures for seismic assessment”**, Journal of Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 1, pp. 145–163.

Cardenas A., Russell H. y Corley W. (1980), **“Strength of low-rise structural walls”**, Reinforced concrete structures subjected to wind and earthquake forces, Publicación SP 63–10, American Concrete Institute. Detroit, pp. 221–241.

Carrillo J. (2010), **“Evaluación del comportamiento al cortante de muros de concreto para vivienda por medio de ensayos dinámicos”**, Tesis de Doctorado (en proceso), Universidad Nacional Autónoma de México.

Carrillo J. y Alcocer S. (2010), **“Improved external device for a mass-carrying sliding system for shaking table testing”**, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Aceptado para publicación.

Carrillo J. y Alcocer S. (2008), **“Ensayos dinámicos de muros de concreto con relación de aspecto igual a uno”**, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, México, Tema VI, Artículo 9.



Carrillo J., Alcocer S. y Uribe R. (2009), **“Comportamiento dinámico y cuasi-estático de sistemas estructurales de muros de concreto con aberturas”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, México, Tema VIII, Artículo 1.

Flores L., Alcocer S., Carrillo J., Sánchez A., Uribe R. y Ponce A. (2007), **“Ensayo de muros de concreto con diferente relación de aspecto y bajas cuantías de refuerzo, para uso en vivienda”**, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México, Tema XI, Artículo 2.

Harris H. y Sabnis G. (1999), **“Structural modeling and experimental techniques”**, Segunda Edición. CRC, Press, Florida, 789 pp.

Krawinkler H. (2000), **“A perspective on experimental research in earthquake engineering”**, Journal of Earthquake Technology, Vol. 37, Nota del Editor, pp. iii-iv.

Krawinkler H. (1996), **“Cyclic loading histories for seismic experimentation on structural components”**, Journal of Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 1, pp. 1-12.

Leon R. y Deierlein G. (1996), **“Considerations for the use of quasi-static testing”**, Journal of Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 1, pp. 87-109.

Matsuoka Y., Esaki F. y Masayuki O. (2006), **“Lateral load carrying capacity of framed shear wall subjected to monotonic increased load at high rate”**, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ginebra, Suiza. Paper 358.

Mosalam K., Hagerman J. y Kelly H. (2008), **“Seismic evaluation of structural insulated panels”**, 5th International Engineering and Construction Conference, ASCE (IECC'5), Los Angeles, California.

NMX-B-253 (2006), **“Norma Mexicana: Alambre de acero liso o corrugado para refuerzo de concreto”**, ONNCCE-CANACERO, México, 8 pp.

NTC-C (2004), **“Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto”**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

Paulson T. y Abrams D. (1990), **“Correlation between static and dynamic of model masonry structures”**, Journal of Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 3, pp. 573-591.

Rai D. (2001), **“Slow cyclic testing for evaluation of seismic performance of structural components”**, Journal of Earthquake Technology, Vol. 38, No. 1, pp. 31-55.

Sánchez A. (2008), **“Comportamiento sísmico de viviendas construidas con muros de concreto”**, Tesis de Doctorado (en proceso), Universidad Nacional Autónoma de México.

Scott B., Park R. y Priestley J. (1982), **“Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates”**, ACI Structural Journal, Enero-Febrero, pp. 13-27.

Teramoto N., Cuadra C., Ogawa J. y Inoue N. (2000), **“Pseudo-dynamic test and FEM analysis of RC shear walls”**, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, Paper 1226.

Tomazevic M. (2000), **“Some aspects of experimental testing of seismic behavior of masonry walls and models of masonry buildings”**, Journal of Earthquake Technology, Vol. 37, No. 4, pp. 101-117.