

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UN PROTOTIPO LOSA-MURO DE TRANSFERENCIA

Alonso Gómez Bernal¹, Daniel Manzanares Ponce², Omar Vargas Arguello²,
Eduardo Arellano Méndez¹, Hugo Juárez García¹ y Oscar González Cuevas¹

RESUMEN

El uso de edificios estructurados con pisos de transferencia se ha incrementado de manera notable y su comportamiento no está bien comprendido ni regulado en los Reglamentos de Construcciones. En la UAM se implementó un programa experimental para estudiar la respuesta de muros de mampostería apoyados sobre losas de concreto, y dar recomendaciones para edificios con losa de transferencia. Se analizan resultados experimentales de un prototipo losa-muro sometido a la acción de cargas verticales y horizontales cíclicas. Además, la parte numérica incluye el análisis con elemento finito de modelos losa-muro en ANSYS. Los resultados más importantes que se presentan, son el cambio de la rigidez lateral y de la capacidad resistente de un muro de carga apoyado en una losa respecto al caso de que éste se encuentre fijo en su base. Durante el proceso de prueba con carga horizontal se detectó que la rigidez del sistema completo losa-muro disminuye a la tercera parte respecto a la del muro aislado, resultado que respalda el estudio numérico.

Palabras clave: losas de transferencia, ensaye muros, ensaye losas de concreto, elemento finito.

ABSTRACT

The construction of structured buildings with transfer floors has significantly increased, but this behaviour is not well understood, nor regulated in the construction codes. A special program was implemented to clarify the response of masonry walls supported on reinforced concrete slabs. This project aims to define recommendations for buildings with transfer slab system. This paper discusses experimental results of a prototype slab-wall subjected to vertical and horizontal cyclic loading. The numerical part consists of several finite element slab-wall models using ANSYS. The most important results are the change on lateral stiffness and resistant capacity of the load-bearing wall supported on a slab, in case is fixed at its base. During the test process of horizontal loading, it was detected that the stiffness of the system slab-wall decreases to the third part, regarding from the fixed wall, this result is supported by the numerical study.

Keywords: transfer slab, masonry wall test, concrete slab test, finite element.

RESUMO

O uso de prédios estruturados com pisos de transferência aumentou significativamente e o seu comportamento não é bem compreendido nem bem regulamentado nos Regulamentos de Construção. Na UAM foi implementado um programa experimental para estudar a resposta de paredes de alvenaria com suporte em lajes de concreto, e dar recomendações para edifícios com laje de transferência. Resultados experimentais de um protótipo de laje-muro submetido à ação do carregamento cíclico vertical e horizontal são analisados. Além disso, a parte numérica inclui análise de elementos finitos de laje-muro com modelos no ANSYS. Os resultados mais importantes que ocorrem são uma alteração de rigidez lateral e da capacidade resistente de uma parede estrutural suportada numa laje para o caso que esteja fixa na sua base. Durante o processo de carregamento horizontal detectou-se que a rigidez do sistema laje-muro completo diminui à terceira parte com respeito ao muro isolado, resultado apoiado pelo estudo numérico.

Palavras chave: pisos de transferência, lajes de concreto, sistema laje-muro, elementos finitos.

⁽¹⁾ Profesor del Departamento de Materiales, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, C.P. 02200 México D.F. E-mail: agb@correo.azc.uam.mx

⁽²⁾ Egresado de la Maestría en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, C.P. 02200 México D.F.

Artículo recibido el 21 de julio del 2014 y aprobado el 12 de noviembre del 2014.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en la Ciudad de México se ha popularizado la construcción de edificios de mediana altura con el sistema estructural llamado "losas de transferencia". En 2009 en un estudio realizado por miembros del Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana, UAM (Gómez, 2009), se evaluaron las características estructurales de ciertos edificios nuevos construidos en la Colonia Roma, para verificar el grado de observancia del Reglamento de Construcciones y sus Normas Técnicas Complementarias. En ese estudio se detectó que un porcentaje alto de edificios se están construyendo con muros discontinuos conocidos como edificios con "piso débil", pero además muchos de ellos se proyectan con los llamados pisos o losas de transferencia. Esta situación causó cierta preocupación, porque es bien sabido que los sistemas discontinuos estructuralmente en elevación son más vulnerables ante cargas sísmicas, pero si además a los muros de carga se les aleja de la zona de flujo natural se incrementará la vulnerabilidad sísmica. Además, no se tiene una información detallada del comportamiento estructural que poseen estos edificios ante cargas verticales y laterales. Por lo que este sistema estructural requiere de una investigación detallada.

Estas estructuras se caracterizan por tener un sistema de piso apoyado sobre uno o dos niveles de estacionamientos, el cual soporta una estructura de muros de cortante, normalmente entre cuatro y seis niveles; un gran porcentaje de estos muros se interrumpen en el nivel del piso de transferencia sin contar con rigidización alguna (Gómez Bernal, *et al.*, 2013b). El problema surge cuando los muros de los pisos superiores, que pueden ser de concreto o mampostería, no se continúan por los sótanos hasta la cimentación, en vista de que se requiere de espacios amplios, prescindiendo de esta manera de varios muros, excepto en algunos casos donde sí se continúan en los linderos de la estructura. Mientras que la estructura inferior del edificio se construye a base de vigas, columnas y muros, generalmente de concreto. Pero la situación es más crítica cuando la mayoría de los muros de los pisos superiores no coinciden con los ejes de los marcos de la planta baja y/o sótanos, provocando que se incrementen de manera importante los esfuerzos cortantes en esos muros, como ha sido observado del análisis estructural de los edificios, esto es principalmente debido a las deflexiones, en algunos casos excesivas, que se inducen a la losa. Las fuerzas cortantes son muy superiores a las que tendrían éstos muros si fueran continuos hasta la cimentación. Además de que la losa de transferencia se somete también a esfuerzos adicionales de gran consideración y a deformaciones muy altas.

Esta investigación tiene como objetivo fundamental analizar de manera numérica y experimental la interacción entre el muro y la losa sobre la cual se apoya, considerando que existen diferencias importantes en el comportamiento entre estos sistemas y los tradicionales que no usan discontinuidades. La parte numérica consiste en estudiar con análisis de elementos finitos con ANSYS varios modelos losa-muro representativos de un sistema de losa de transferencia. Por su parte la fase experimental consiste en el diseño, construcción y ensaye de un espécimen losa-muro a escala natural sujeto a carga cíclica en el Laboratorio de Estructuras de la UAM, para estudiar el comportamiento ante cargas vertical y lateral del prototipo losa-muro.

Se han realizado varias investigaciones experimentales sobre el comportamiento de muros aislados ante fuerzas laterales en su plano, para representar los principales efectos sísmicos en este tipo de miembros. En México y en el resto del mundo se han ensayado un gran número de muros de distintas características, en cuanto a materiales, sistemas de refuerzo, condiciones de carga y otras propiedades (Carrillo *et al.*, 2012; Gouveia *et al.*, 2007; Astroza y Schmidt, 2002). Algunos de los resultados más notables de acuerdo a Meli (1994) indican que la carga que produce el agrietamiento diagonal varía muy poco con el refuerzo del muro. Para muros confinados, la cantidad y detallado del refuerzo en los extremos de los castillos afecta significativamente la ductilidad, aunque no modifica en forma importante la resistencia. La capacidad de los muros aumenta aproximadamente en forma lineal con el nivel de carga axial aplicado, dentro del intervalo de esfuerzos de compresión inducidos por las cargas gravitacionales en edificios de este tipo.

Respecto al comportamiento experimental de losas existe menos información debido al escaso número de pruebas realizadas (Park y Gamble, 2000; Vecchio y Tang, 1990). Dentro de los pocos trabajos a este respecto se han ensayado losas sujetas a cargas distribuidas o concentradas. Sin embargo no existe información específica de cargas lineales debidas a muros apoyados directamente a la losa.

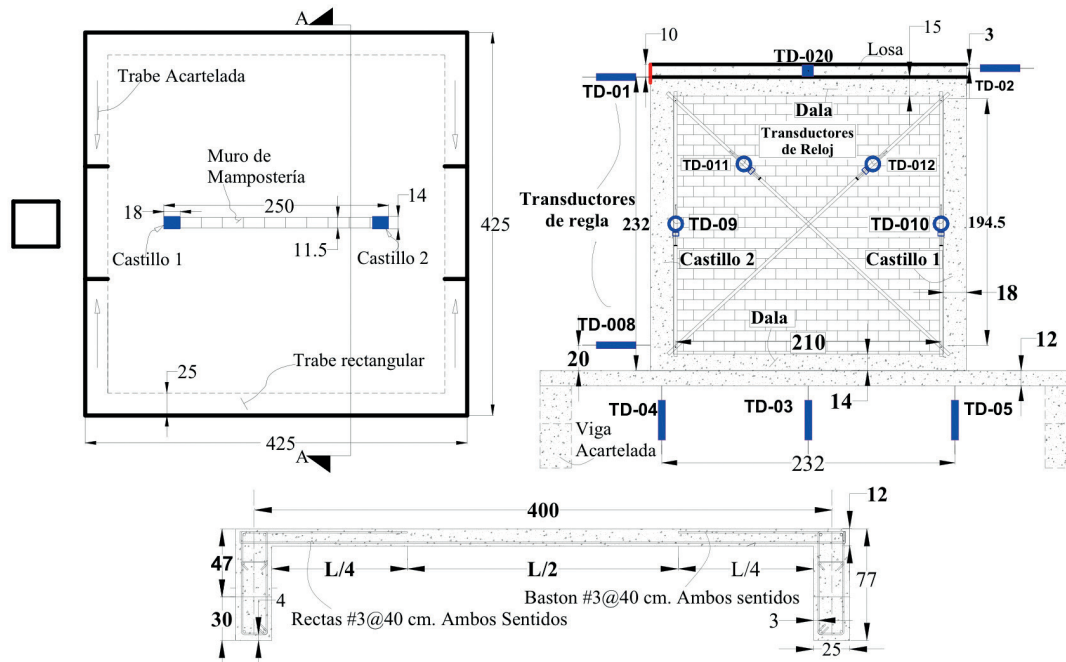


Fig. 1: Detalle del espécimen losa-muro y armado de refuerzo de la losa de prueba.

2. MODELO DE LABORATORIO

El espécimen consta de un muro sobre una losa cuadrada de 4.25 m x 4.25 m y espesor de 12 cm, colada monolíticamente con cuatro traveses de concreto reforzado de dimensiones 25 x 77 cm; las dos traveses transversales al muro son acarteladas y las dos paralelas a él son rectangulares. En el colado de losa y traveses se usó un concreto con resistencia $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$. El acero de refuerzo de la losa corresponde a un armado convencional tratando de representar lo observado en planos estructurales de edificios reales; el acero de refuerzo se distribuyó de forma uniforme, usando el mismo armado de acero en ambas direcciones. Se usaron varillas rectas en el lecho inferior en ambos sentidos de la losa a una separación de 40 cm, combinadas en la franja central con las varillas dobladas (columpios o bayonetas) también a una separación de 40 cm, quedando así una parrilla de 20 cm en ambos sentidos en la franja central. Además se colocan bastones o barras cortas en el lecho superior para resistir momento negativo, por lo que queda también una parrilla de 20 cm en las franjas laterales del tablero. La Figura 1 muestra el detalle del armado de la losa.

Sobre una franja central de la losa se construyó el muro de mampostería de 2.50 m de ancho y 2.41 m de altura, confinado lateralmente por dos castillos de 14 cm x 18 cm, abajo por una dala ahogada en la losa de 14 x 14 cm, y arriba por una losa. Los castillos se colaron con un concreto de $f'_c=150 \text{ kg/cm}^2$, con cuatro barras de acero longitudinal de 3/8" de diámetro colocadas en las esquinas del castillo y anillos de alambre del #2 con 2 cm de recubrimiento por los cuatro lados. El acero de refuerzo cumplió con los requerimientos mínimos de acero de las NTCM-2004.

3. DISPOSITIVOS DE CARGA, DE ANCLAJE, E INSTRUMENTACIÓN

La prueba experimental consiste de tres fases: (a) aplicar una carga vertical o gravitacional no mayor a 8 ton, considerando que es el valor de la carga observada en edificios con este sistema de piso, (b) aplicar solo una carga horizontal de un valor relativo bajo, para estudiar la respuesta lineal a carga lateral, y (c) carga combinada consistente en la carga gravitacional constante no mayor a 8 ton, más ciclos de carga creciente hasta la falla del sistema.

Se diseñaron y construyeron tres sistemas de dispositivos: uno de anclaje, otro de carga vertical y el tercero para la carga horizontal (Fig. 2). Se diseñó el dispositivo especial de anclaje para evitar que el espécimen losa-muro se moviera, ya fuera de forma horizontal o vertical durante la prueba, al aplicar las cargas sobre el muro. Este sistema de anclaje consta de dos partes que se ubican junto a las traveses transversales al muro, las cuales son acarteladas, seleccionadas así para ajustar el espécimen al sistema de reacción del laboratorio. El anclaje en cada extremo está formado básicamente

por dos vigas de acero en cajón ancladas al piso de reacción; en su extremo está recortado para anclar a la viga acartelada con barras de acero de 1" de diámetro, y en el otro extremo del espécimen, el dispositivo se diseñó para impedir cualquier movimiento horizontal durante la aplicación de la carga.

Para la aplicación de la carga gravitacional, se requiere de un segundo dispositivo, el cual consiste de un sistema de vigas de acero, de ocho tensores y de sus anclajes. Las vigas principales son dos vigas de acero en cajón compuestas cada una por dos perfiles I soldados en sus patines y reforzadas con atiesadores. En la cara superior de los extremos de estas vigas se colocan los gatos hidráulicos en una base que sirve para mantenerlos en posición recta y evitar el deslizamiento de los gatos de una capacidad de 25 ton cada uno. En esos mismos extremos una placa sirve como guía para las barras que salen desde las cajas de reacción que se encuentran empotrados en las vigas rectangulares, esta placa tiene dos agujeros que son esenciales porque define el eje vertical de la aplicación de la carga.

El tercer dispositivo, diseñado para la carga horizontal, es un sistema para aplicación de carga cíclica creciente. Puesto que se planea aplicar una carga horizontal aproximada de 12 ton, se seleccionó un gato hidráulico de doble acción con capacidad de empuje de 25 ton, y de retracción o "jale" de 11 ton. El arreglo del actuador y del dispositivo de carga lateral (gato, coples, celda de carga, extensión-perfil cajón y articulación), es de una longitud de 160 cm, desde la columna de reacción hasta el muro de mampostería.

Para la realización de la prueba se instalaron medidores de deformación o *strain gages*, 16 en el acero de refuerzo del lecho inferior de la losa de soporte o transferencia, 16 del lecho superior, 20 en barras de refuerzo de los castillos, y 10 *strain gages* de concreto en losa y castillos (Vargas, 2014). Además para monitorear los desplazamientos y movimientos de la losa y el muro, se instalaron 20 micrómetros en puntos estratégicos, como se observa en la Figura 1.

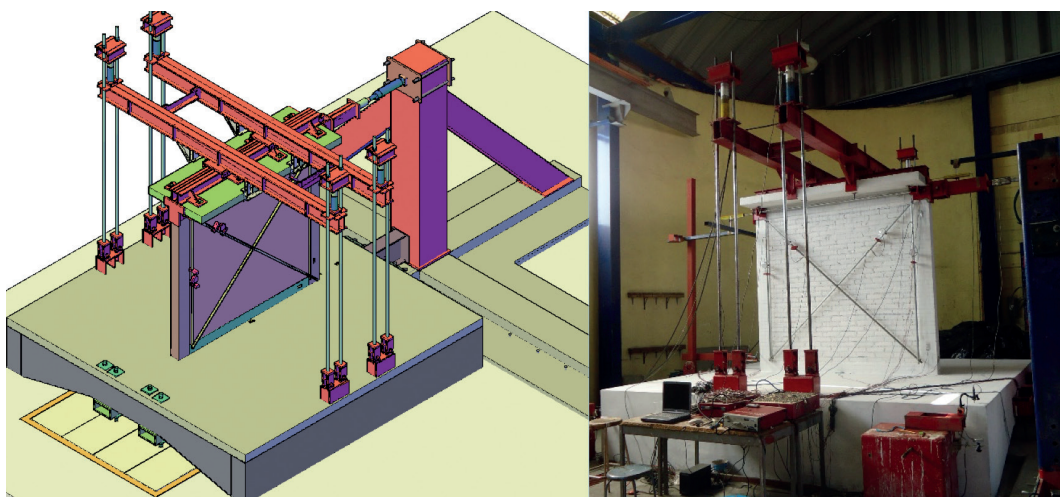


Fig. 2: Ilustración y foto del espécimen losa-muro y de los dispositivos utilizados.

4. MODELOS NUMÉRICOS

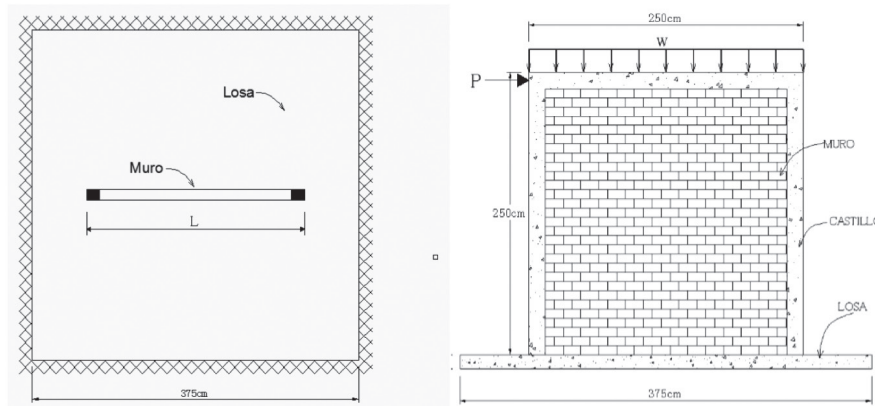
En este artículo se resumen algunos resultados del trabajo de Manzanares (2013), de estudiar modelos numéricos *losa transferencia-muro*, usando análisis de elementos finitos con el programa ANSYS. Se analizaron varias geometrías con características mostrada en la Tabla 1 y Figura 3. Se modelaron muros de concreto y de mampostería confinada, y uno de estos modelos es similar al espécimen ensayado. La nomenclatura de los modelos consta de 3 partes: la primera se refiere al número del modelo, la segunda es C (concreto) o M (mampostería) junto con a la longitud del muro en metros, y la última parte se refiere a la carga aplicada: V (carga vertical) o VL (carga vertical más lateral). Uno de los objetivos principales es determinar las curvas de capacidad de los modelos losa-muro, sometidas primero a cargas verticales cíclicas incrementales, hasta la falla, y también bajo cargas horizontales y verticales combinadas. En la literatura, se han realizado innumerables estudios experimentales y teóricos de muros ante cargas laterales, basados en la suposición de que el muro está apoyado en una base indeformable; ésta es una condición diferente al presente estudio que considera al muro apoyado sobre una base flexible.

Tabla 1: Modelos Numéricos de losa-muro estudiados.

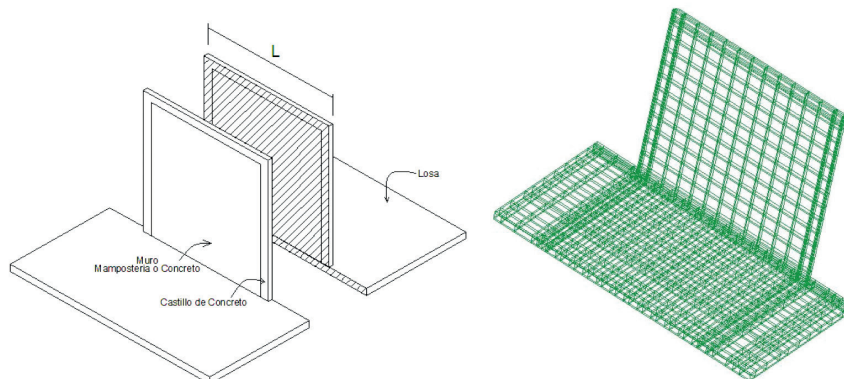
Concreto	Mampostería	Longitud muro (m)	Espesor de losa (cm)
M1_C2.5_12V	M2_M2.5_12V	2.50	12
M3_C3_12V	M4_M3_12V	3.00	12
M7_C3_13V	M7_M3_13V	3.00	13
M9_C2.5_12VL	M10_M2.5_12VL	2.50	12
M11_C3_12VL	M12_M3_12VL	3.00	12
M15_C3_13VL	M16_M3_13VL	3.00	13

Por otra parte, interesa determinar la relación entre la deformación de la losa y el agrietamiento del muro, esto es importante para poder evaluar las condiciones de servicio de este tipo de estructuras. Estos resultados son importantes para aclarar el motivo por el cual se presentan agrietamientos en los muros de los primeros niveles de los edificios estructurados sobre pisos de transferencia.

En la Tabla 1 se puede observar que se ha variado la longitud del muro, y se han utilizado dos espesores diferentes de losa. De acuerdo a la Figura 4, el modelo se dividió a la mitad, con el fin de ahorrar tiempo de cómputo y facilitar el análisis. También se indica la condición de apoyo de la losa, que se supone totalmente restringida en sus bordes.

**Fig. 3: Vista en planta y en elevación de los modelos estudiados en ANSYS. L varía de 2.5 a 3.50 m.**

Para el estudio de los modelos muro-losa bajo carga vertical, se incluye un modelo no lineal de losa sin muro sobre ella, con la misma geometría y refuerzo, pero con carga uniforme, con el propósito de comparar los resultados. En el grupo de los modelos sometidos a cargas laterales, también se incluyen modelos no lineales de muros sobre base rígida. Esos muros tienen las mismas características que los modelos de losa de transferencia (muros sobre base flexible).

**Fig. 4: Esquema de los modelos losa-muro y modelo losa-muro-castillos-dala para ANSYS.**

5. RESPUESTA GLOBAL DEL SISTEMA LOSA-MURO ENSAYADO

Las diferentes configuraciones o modos de deformación del prototipo losa-muro en cada una de las tres fases de carga aplicadas (vertical, horizontal y combinada), definen el comportamiento y la forma de falla del sistema (Fig. 5). Por ejemplo la falla en el muro individual ensayado dependerá de la contribución de las deformaciones por flexión y por cortante ante cargas laterales. Sin embargo en este caso debido a que se encuentra soportado por una losa, se debe considerar además el desplazamiento lateral debido a la rotación del muro por la deformación de la losa. La deformación total en la parte superior del muro está dada por la expresión:

$$\Delta T = \Delta L + \Delta F + \Delta C \quad (1)$$

Donde:

ΔT = desplazamiento lateral total en la parte superior del muro

ΔL = desplazamiento lateral debido a la rotación de la losa

ΔF = desplazamiento lateral debido a la deformación por flexión del muro

ΔC = desplazamiento lateral debido a la deformación por cortante del muro

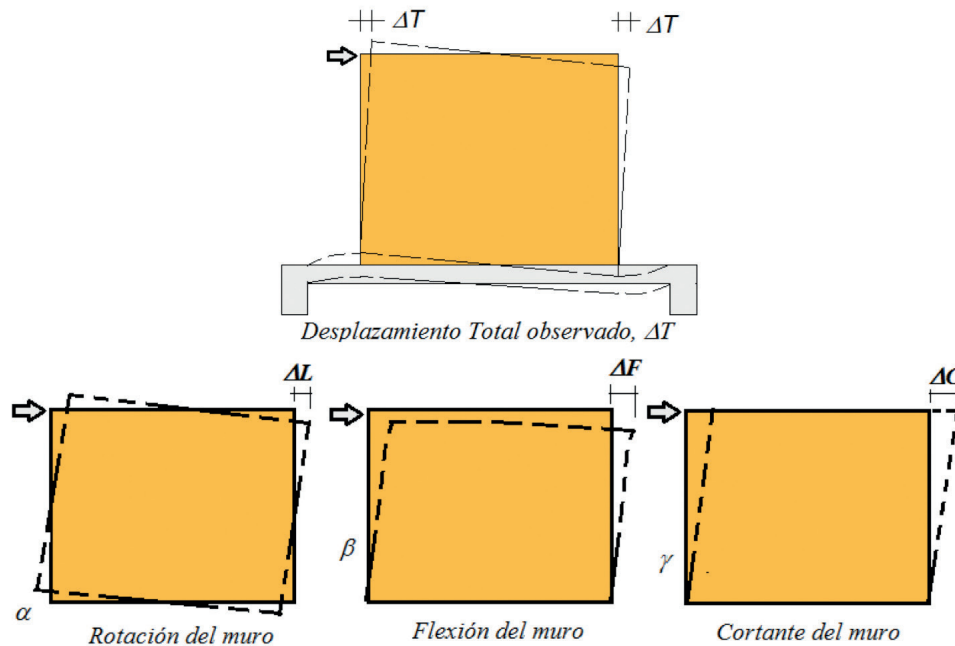


Fig. 5: Deformación total (arriba) y modos importantes de deformación del muro.

5.1 DEFORMACIÓN DEL MURO POR CORTANTE:

Las deformaciones por cortante del muro se pueden obtener a partir de los registros de los transductores de desplazamiento instalados en el sistema de varillas o tubos cilíndricos que considera dos medidores en la dirección de las diagonales y dos en los lados verticales. Con base en la teoría de la resistencia de materiales, la deformación unitaria angular, γ , es debida a los esfuerzos cortantes que actúan sobre un elemento determinado del modelo (Carrillo *et al.*, 2012), y para el caso general de carga cíclica reversible se define mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\delta_2 L_2 - \delta_1 L_1}{2l_m h_m} \quad (2)$$

Para el caso de un muro cuadrado, la fórmula anterior se simplifica como:

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (3)$$

Donde:

$$\varepsilon_1 = \delta_1 / L_1, \text{ y } \varepsilon_2 = \delta_2 / L_2$$

γ = deformación angular del tablero,

ε_1 = deformación unitaria de la diagonal anterior (TD-011 de Fig. 1),

ε_2 = deformación unitaria de la diagonal posterior (TD-012 de Fig. 1),

δ_1 = acortamiento o alargamiento medido en la diagonal anterior,

δ_2 = acortamiento o alargamiento medido en la diagonal posterior,

L_1 = longitud inicial de la diagonal anterior y

L_2 = longitud inicial de la diagonal posterior

l_m, h_m = son el ancho y altura del muro respectivamente

En la expresión anterior se espera que las deformaciones ε_1 y ε_2 tengan signos opuestos. Si se usa esta expresión para el ensaye cíclico, de un muro, se suele tomar la expresión más directa:

$$\gamma = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| \quad (4)$$

en esta ecuación no importa cuál de los valores sea negativo, ya que se suman los valores absolutos. En la deformación angular así calculada se incluyen deformaciones elásticas e inelásticas de la mampostería. Para un valor de la carga lateral aplicada, mientras en una diagonal se registra un alargamiento, en la otra se presenta un acortamiento (Fig. 5).

5.2 DISTORSIONES HORIZONTALES NETAS O RELATIVAS DEL MURO

Para definir la distorsión efectiva, R , del muro, se debe restar al desplazamiento registrado en el muro la rotación como cuerpo rígido, es decir, el debido a la flexión de la losa, por tanto la distorsión se puede expresar como:

$$R = \Delta E / H \quad (5)$$

$$\Delta E = \Delta F + \Delta C - \Delta L \quad (6)$$

$$\Delta L = [\Delta I - \Delta D] * H / L \quad (7)$$

Donde:

R = distorsión efectiva del muro

ΔE = desplazamiento lateral efectivo en la parte superior del muro

ΔL = desplazamiento lateral debido a la rotación de la losa

ΔI = desplazamiento vertical del extremo inferior izquierdo en la interfaz losa-muro

ΔD = desplazamiento vertical del extremo inferior derecho en la interfaz losa-muro

H = separación entre medidores TD-01 y TD-08 (Fig. 1)

L = separación entre medidores TD-04 y TD-05 (Fig. 1)

6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR CARGA VERTICAL

El espécimen losa-muro se sometió primero a un proceso de carga vertical monotónica, aplicada por cuatro gatos hidráulicos. La carga consistió de seis semiciclos controlados por el desplazamiento vertical del micrómetro del centro geométrico de la losa. En la Figura 6 se muestran estos tres pares de semiciclos, de 0.5 mm, 1.0 mm y 1.5 mm (con cargas aproximadas de 3.5 ton, 5.8 ton y 7.5 ton respectivamente). No se incluye el peso de los dispositivos sobre el muro.



En la Figura 7 se muestran las gráficas de la evolución de los desplazamientos verticales en los cinco puntos de medición vertical de la losa del prototipo losa-muro durante la prueba con carga vertical. Se observa que los valores mayores se concentran en el centro de la losa (TD-03) siendo de -1.76 mm el máximo valor medido durante todo el proceso de carga. Los desplazamientos a largo de la línea central definida por los medidores TD05-TD03-TD04, que además definen la línea de la parte inferior del muro de mampostería, son notablemente mayores que los desplazamientos de la línea central perpendicular (TD07-TD03-TD06). Pues a lo largo de la línea TD05-TD03-TD04 los máximos desplazamientos observados durante todo el proceso de carga son -1.70, -1.76 y -1.50 mm, mientras que en la línea transversal TD07-TD03-TD06 son -0.90, -1.76 y -0.94 mm.

Al analizar las gráficas de la figura de desplazamientos se observa que existe un comportamiento elástico lineal muy marcado dentro de los dos primeros semiciclos de carga. Durante los dos siguientes semiciclos se mantiene una tendencia lineal que se aprecia clara hasta la carga de 5.22 ton del cuarto semiciclo. Es en el quinto ciclo (de acuerdo a los medidores de desplazamiento vertical) cuando se detecta un deslizamiento en las gráficas, debido a que se llegó a una carga de 7.6 ton. Aunque en el último ciclo se comporta la losa de nuevo de manera lineal, queda una deformación residual o permanente de aproximadamente 0.5 mm en la losa a lo largo de la línea central bajo el muro (Fig. 6), y de aproximadamente 0.25 mm en la línea central transversal al muro.



La carga vertical máxima de 7.6 ton que se aplicó en esta primer etapa corresponde a la carga tributaria que le corresponde a un muro típico del primer entrepiso de un edificio de 4 niveles, y no era el objetivo someterlo a una carga mayor para no dañar a la losa. Cuando se compara la curva obtenida del ensaye experimental con la debida al análisis de elemento finito con ANSYS del modelo M2_M2.5_12V, basado en los datos del espécimen (Fig. 8), se observa una menor rigidez en el espécimen ensayado respecto al modelo numérico, esto se puede explicar debido a que en el modelo numérico se supuso una restricción completa en el perímetro de la losa.

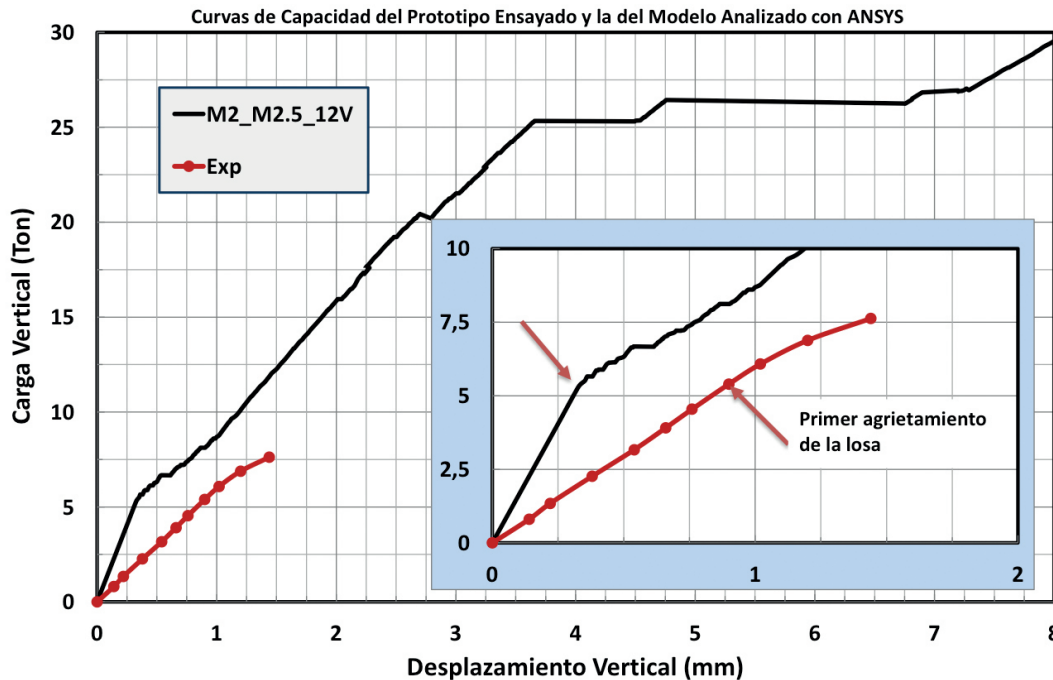


Fig. 8: Curvas carga vertical-desplazamiento vertical en el centro de la losa del espécimen ensayado y de su correspondiente modelo de Elemento Finito de ANSYS.

Sin embargo ambas curvas sí coinciden en señalar el inicio del primer agrietamiento de la losa, que ocurre para un valor aproximado de la carga de 5.5 ton. Como indica la Figura 8, de acuerdo al modelo de elemento finito sometido a carga vertical que se llevó hasta la falla, después del primer agrietamiento detectado en 5.5 ton, la losa tiene una etapa lineal hasta que soporta una carga total de 25 ton, a partir de la cual se tiene una clara etapa “no-lineal”.

En la Figura 9 se muestran de nuevo las curvas de capacidad de la Figura 8 junto con otras curvas de otros modelos numéricos analizados con ANSYS; como la del modelo M1_C2.5_V12, que cuenta con la misma losa y mismas dimensiones del muro, la diferencia es que éste es de concreto reforzado. Puede apreciarse que la curva de este modelo es similar a la del modelo con muro de mampostería (M2_M2.5_V12), lo que indica que ante carga vertical no importa de qué material sea el muro para definir la resistencia de la losa. Esto se confirma con las curvas de capacidad de otros dos pares de modelos mostrados (Fig. 9). Por otra parte se observa también en estas curvas que cuando el muro es más ancho, por ejemplo de 3 m (M3_C3_V12 y M4_M3_V12) aumentan la resistencia y la rigidez del sistema. O cuando aumenta el espesor de la losa a 13 cm (M7_C2.5_V13 y M8_M2.5_V13) también se tiene un incremento importante. Por lo que un resultado a resaltar, derivado del análisis de los modelos con elemento finito, es que para modelos losa-muro en los que solo varíe el espesor de la losa, se tendrá desde luego más capacidad total en el sistema, pero la rigidez en la primera etapa de carga, que corresponde a condiciones de servicio, es la misma, por lo que un mayor espesor no soluciona el problema de dar más rigidez.

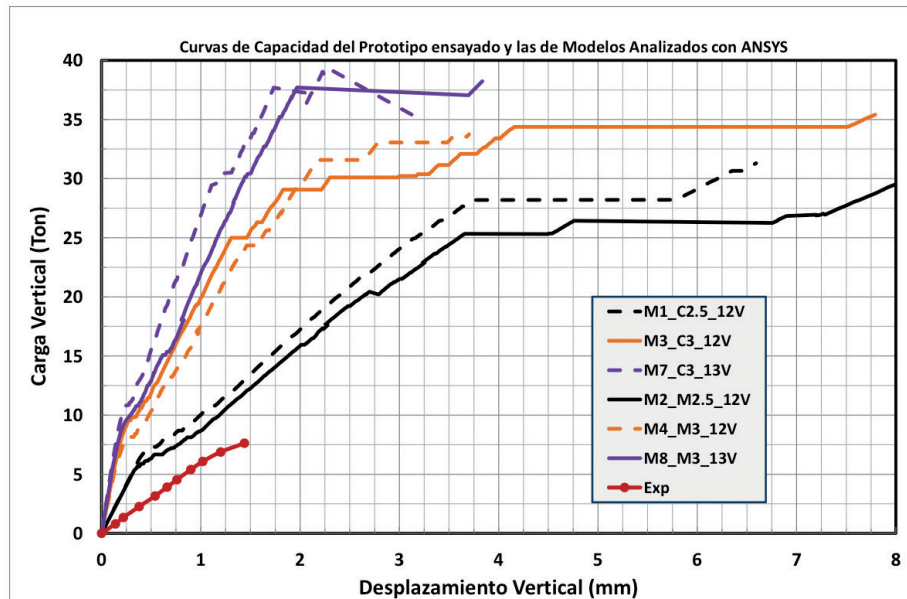


Fig. 9: Curvas carga vertical-desplazamiento vertical en el centro de la losa del espécimen ensayado, de su correspondiente modelo de Elemento Finito de ANSYS, además de otros modelos estudiados.

6.2 AGRIETAMIENTO EN LA ETAPA DE CARGA VERTICAL

En los dos últimos semiciclos de carga, es decir cuando la carga vertical excede las 6 ton, que corresponde a desplazamientos verticales mayores a 1.5 mm, se presentan las primeras grietas en la losa, como lo indica la Figura 10, éstas aparecen en los bordes transversales al eje del muro. No se observaron grietas en el muro de mampostería.

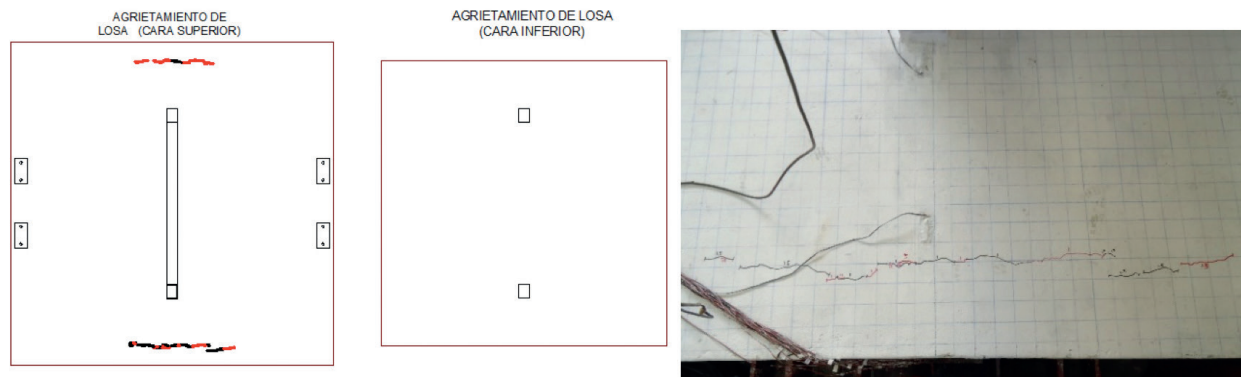


Fig. 10: Agrietamiento de la losa en los dos últimos semiciclos de carga vertical.

7. RESPUESTA ANTE CARGA HORIZONTAL

Como una segunda etapa del proyecto de prueba, el espécimen losa-muro se sometió a un proceso solo de carga horizontal cíclica monotónica. Este proceso consistió de siete ciclos de carga (empuje) y descarga (jale), que se controlaron por el desplazamiento horizontal en el extremo superior del muro, la carga se aplicó por un gato hidráulico de doble acción (que empuja y jala). En la Figura 11 se muestran esos ciclos, en secuencia de 0.5 mm, 1.0 mm y 1.5 mm, para el primer, segundo y tercer par respectivamente, y el último de 2.0 mm (llegando a cargas de 1.0 ton, 1.5 ton, y 2.0 ton, y el último ciclo a 2.5 ton).

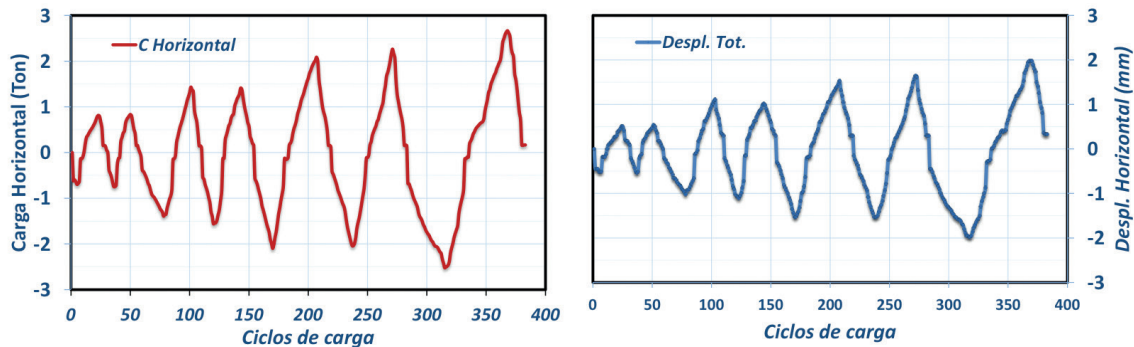


Fig. 11: Carga horizontal aplicada al prototipo losa-muro y desplazamiento de control.

7.1 DESPLAZAMIENTOS POR CORTANTE

Como se estableció antes, la rotación del muro por la deformación en cortante está dada por la Ecuación 3. Debido a que los medidores de desplazamiento de las diagonales no registraron deformaciones, se concluye que el muro no tuvo deformaciones por cortante, y solo se desplazó por flexión y sobre todo por la rotación en la base debido a la rotación de la losa.

7.2 ROTACIÓN Y DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES NETOS DEL MURO

Debido a la aplicación de la carga horizontal, cuando el transductor TD04, baja, el izquierdo, TD05, sube de la línea de referencia, lo que genera que el muro rote como cuerpo rígido, de acuerdo a la Figura 5. Por ejemplo se observa que los valores de desplazamiento para el sexto ciclo son de -0.36 mm en el extremo izquierdo (TD_04), de -0.20 mm en el centro (TD_03), y de 0.64 mm en el extremo derecho (TD_05). Las rotaciones verticales en los extremos inferiores del muro en la interfaz con la losa del espécimen losa-muro muestran una tendencia lineal debido a que la intensidad de la carga fue relativamente baja y no fue inferior a las 3 ton. Así, de acuerdo a la Ecuación 7, el desplazamiento ΔL se muestra en la Figura 12a.

Para definir la distorsión efectiva del muro, R , se aplican las Ecuaciones 5 a 7 definidas antes. Es decir se debe restar al desplazamiento horizontal registrado del muro, la rotación como cuerpo rígido del mismo (ΔL), así se obtiene el valor del desplazamiento efectivo, ΔE , y al dividirlo entre H se obtiene finalmente R , de acuerdo a la Figura 12b. Si se calculan las rigideces a partir de las pendientes de las curvas de la Figura 12b, es decir, la rigidez del sistema losa-muro (azul) y del muro aislado (rojo); las rigideces son en cada caso 13.33 T/cm y 40.0 T/cm, es decir la tercera parte cuando el muro está integrado a la losa. Otra conclusión al analizar la Figura 12 es que el desplazamiento lateral del muro por flexión de la losa es del 67 %, y por deformación (a flexión) del muro es de 33 %, para este nivel de carga aplicado.

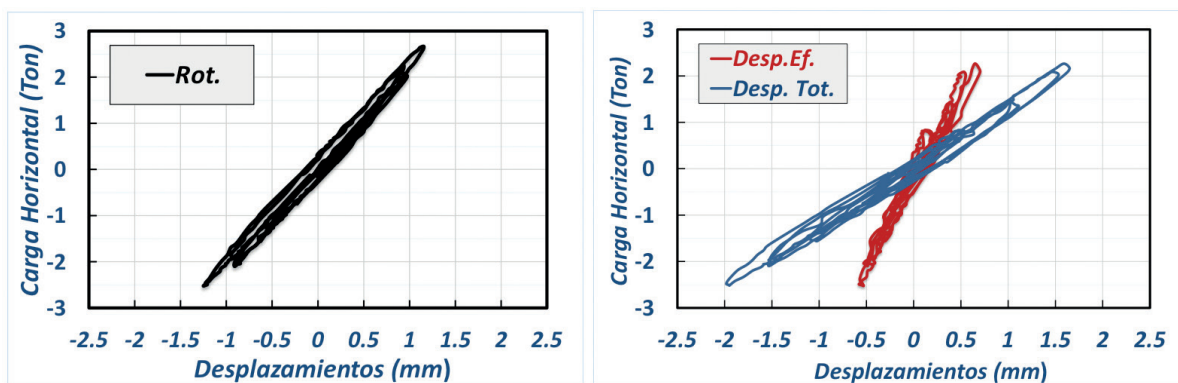


Fig. 12: (a) Desplazamiento ΔL por rotación de la base del muro durante la prueba con carga horizontal. (b) Desplazamientos efectivos, ΔE , del muro y totales del prototipo losa-muro.

8. RESPUESTA ANTE CARGA COMBINADA: HORIZONTAL Y VERTICAL

En la tercera etapa del proyecto de prueba, el espécimen losa-muro se sometió a un proceso simultáneo de carga vertical constante y una carga horizontal cíclica monotónica. Esta carga consistió de aplicar una carga vertical de 8.0 ton y después dieciséis ciclos de carga (empuje) y descarga (jale), que se controlaron por el desplazamiento horizontal en el extremo superior del muro, la carga horizontal se aplicó por un gato hidráulico de doble acción (que empuja y jala). En la Figura 13 se muestran los 16 ciclos, que como en los dos casos anteriores van en pares desde 0.5 mm hasta los penúltimos de 12 mm, y los dos últimos asimétricos de 14 mm y 27 mm, debido a la limitación del gato hidráulico en el caso de *jale*. En cuanto a carga se llegó a aplicar más de 11 ton en el empuje y 8.9 ton en *jale*.

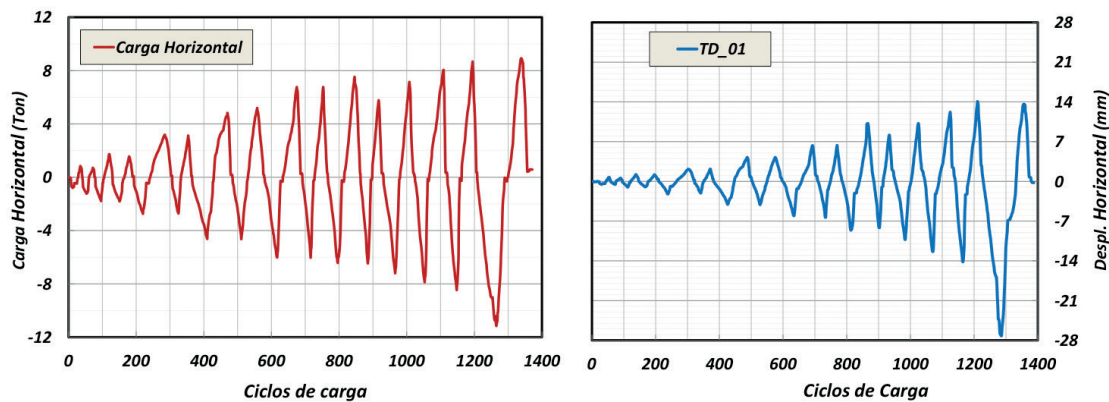


Fig. 13: Carga horizontal aplicada al prototipo losa-muro, y desplazamiento lateral.

8.1 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LA LOSA Y ROTACIÓN DEL MURO

En la Figura 14 se muestra la evolución de los desplazamientos verticales en los tres puntos de medición vertical bajo la losa del prototipo durante la prueba con carga combinada. Estos son los medidores que registran los desplazamientos a largo de la línea central definida por los medidores TD05-TD03-TD04, que además es la línea del muro de mampostería. Debido a la aplicación de la carga horizontal, cuando el transductor derecho baja el izquierdo sube de la línea de referencia, lo que genera que el muro rote como cuerpo rígido, de acuerdo a la Figura 5. Se observa que los valores de desplazamiento se van incrementando desde el inicio de la carga, lo cual supone que debido a la intensidad de la carga vertical sobre la losa se comporta de una manera no-lineal. Para cada ciclo de carga la losa se deforma a una tasa de 0.5 mm sin regresar a su posición inicial, lo que representa un acumulado de aproximadamente 9.5 mm al final de la prueba.

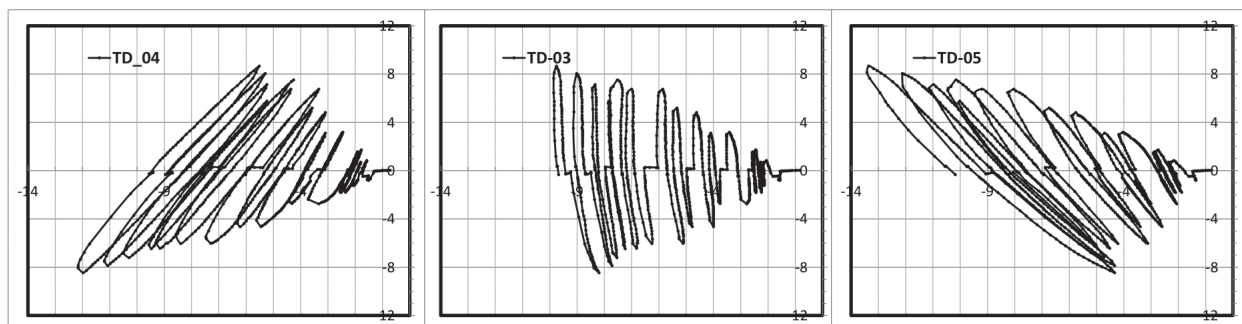


Fig. 14: Evolución de los desplazamientos verticales en los cinco puntos de medición de la losa del prototipo losa-muro durante la prueba con carga horizontal y vertical.

8.2 DESPLAZAMIENTOS POR CORTANTE

La rotación, γ , del muro por la deformación en cortante está dada por la Ecuación 2. Los medidores de desplazamiento de las diagonales no registraron deformaciones en los primeros seis ciclos, por lo que se concluye que el muro no tuvo deformaciones por cortante en la primera parte del proceso de carga, y solo se desplazó por flexión y por la rotación en la base debido a la rotación de la losa. Sin embargo durante el séptimo ciclo comienzan a registrar los medidores diagonales lo que indica que comenzó la deformación por cortante. Se observa que hasta el décimo ciclo se comporta de forma más o menos lineal, y después de este último se comporta de manera no-lineal. En la Figura 15 se muestran los ciclos histeréticos del muro de mampostería de los desplazamientos por cortante.

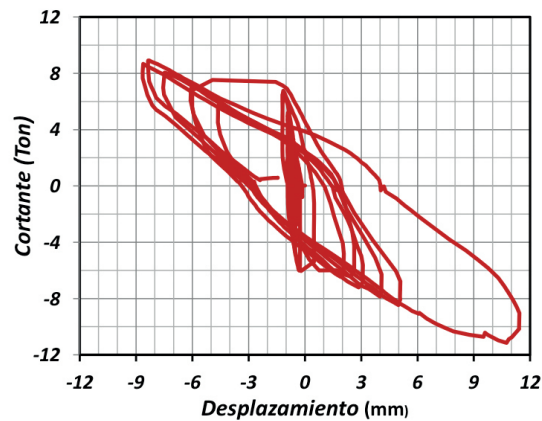


Fig. 15: Desplazamientos por cortante, ΔC , del muro durante la prueba con carga combinada.

8.3 DISTORSIONES HORIZONTALES TOTALES Y NETAS O RELATIVAS DEL MURO

La distorsión efectiva del muro, R_{ef} , se calcula con las Ecuación 5. La Figura 16 muestra las distorsiones totales R_{tot} , del sistema losa-muro y las efectivas durante todo el proceso de carga combinada. En esa misma Figura 16 se muestran las envolventes de esos ciclos de histeresis, se observa una tendencia bilineal en las curvas. Si se calculan las rigideces a partir de las pendientes de las envolventes, es decir, la rigidez del sistema losa-muro (negro) y del muro aislado (rojo); las rigideces son en cada caso 11.25 T/cm y 40.0 T/cm, es decir 3.5 veces menor cuando el muro está integrado a la losa.

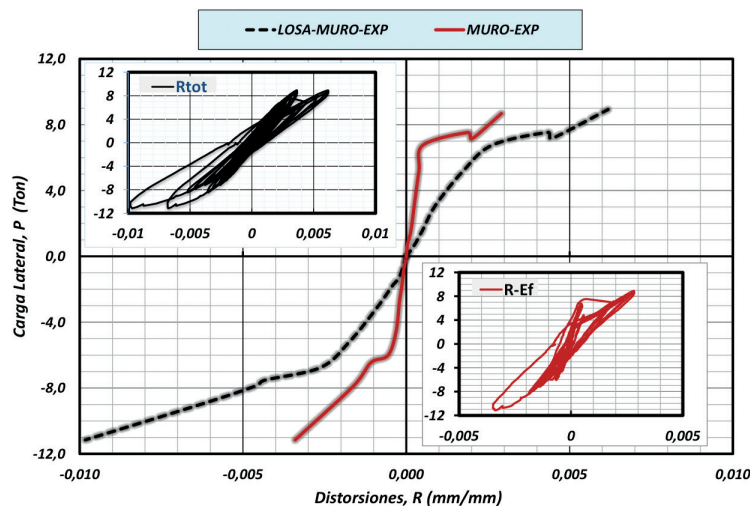


Fig. 16: Distorsiones totales, R_{tot} , del prototipo losa-muro y efectivas, R_{ef} , del muro (fórmula 4), con carga combinada, además de las envolventes respectivas.

En la Figura 17 se comparan las curvas de capacidad obtenidas de los análisis con ANSYS, del modelo losa-muro M10_M2.5_12VL (muro sobre base flexible), con el modelo sobre base rígida o muro empotrado (MBR_M2.5). Se detectaron diferencias significativas en las curvas de capacidad; aunque en ambos casos la carga última tiende al mismo valor de 8 ton, es evidente que las pendientes son diferentes; es decir, en el modelo de muro sobre losa es menor y la rigidez es de 14 ton/cm, mientras que el muro con base fija la rigidez es de 40 ton/cm. Estos valores son muy parecidos a los obtenidos en el ensaye del espécimen losa-muro, como se puede constatar en la Figura 17, donde se comparan estas curvas experimentales con las numéricas.

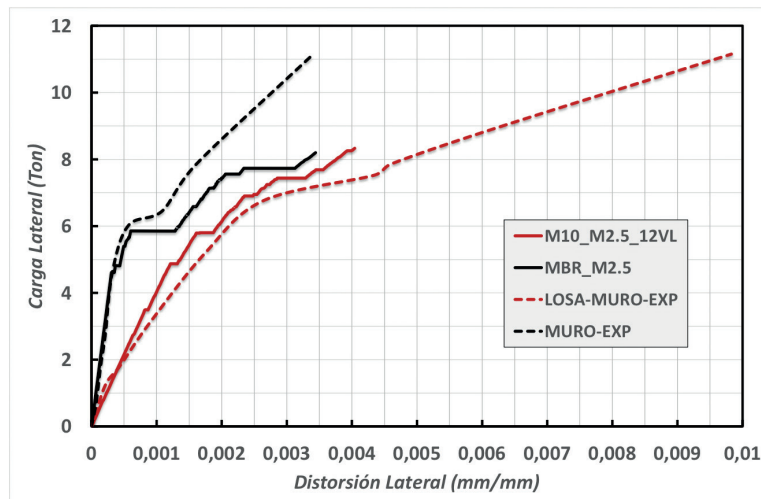


Fig.17: Comparación entre las curvas de capacidad del modelo ANSYS, con las Envolventes Experimentales del prototipo losa-muro con carga combinada.

Los resultados de los modelos ANSYS con muros de concreto (Fig. 18), muestran que el comportamiento es muy diferente al observado en los modelos de mampostería. En este caso, también existen diferencias en las curvas de capacidad de los modelos muro-losa (M9_C2.5_12VL) y los de base rígida (MBR_C2.5), pero ésta diferencia es mucho más grande que la observada en los sistemas con muros de mampostería. Aquí la diferencia en las pendientes lineales es de 15 veces, es decir, 14.06 ton/cm del modelo flexible contra 210 ton/cm. Sin embargo los valores de las rigideces de los modelos flexibles M10_M2.5_12VL y M9_C2.5_12VL son muy similares, (14.06 ton/cm vs 11.25 ton/cm), resultado que resalta la alta disminución de rigidez de los muros de concreto que se desplantan sobre losas.

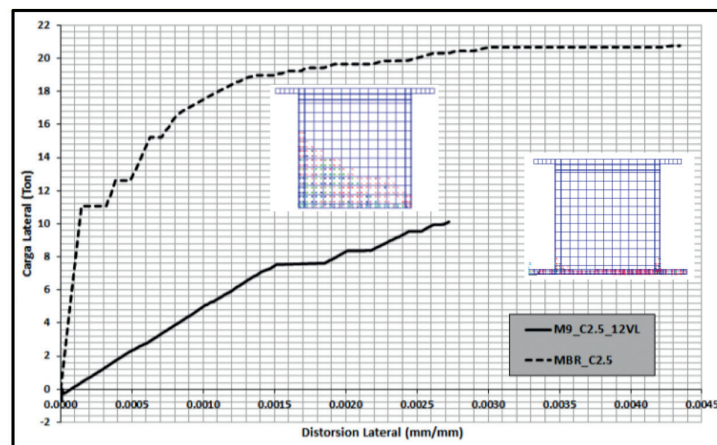


Fig. 18: Comparación entre las curvas carga-distorsión lateral del modelo losa-muro M9_C2.5_12VL con el modelo empotrado MBR_C2.5, se incluyen los patrones de agrietamiento de ambos modelos.

8.4 ANÁLISIS DE AGRIETAMIENTOS

También se estudiaron en los análisis con ANSYS el patrón y la distribución del agrietamiento en los muros. En el caso de los modelos con muros de concreto (Fig. 18), el patrón de agrietamientos de éstos es bastante diferente, porque el muro apoyado sobre la losa muestra poco agrietamiento, caso contrario al daño observado en el muro sobre base rígida, donde el agrietamiento se manifiesta en la zona de tensión (esquina inferior izquierda). Es decir, el muro de concreto sobre base rígida desarrolla la mayor parte de su capacidad a cortante, mientras que en los sistemas de losa de transferencia el muro aporta poca resistencia a cortante, debido en gran medida a que las rotaciones debidas a la carga vertical en la losa, disminuyen un gran porcentaje de la rigidez del sistema, como se puede observar en la Figura 18. Esta condición es muy desfavorable para la losa, sobre todo en las zonas localizadas en los extremos del muro. Debido a que en esta zona la losa experimenta grandes agrietamientos en su cara inferior, además de aplastamiento del concreto en la cara superior, reduciendo en gran medida la capacidad de la losa.

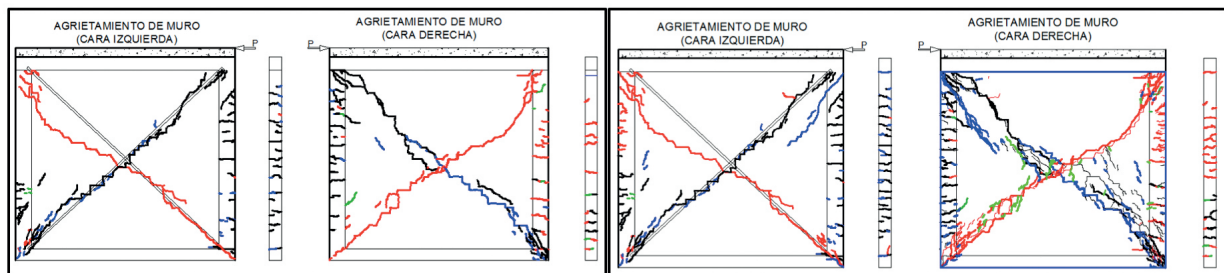


Fig. 19: (a) Condición de agrietamiento en muro después de aplicar los ciclos de carga indicados en la Fig. 13. (b) Condición de agrietamiento Final.

Sin embargo el patrón agrietamiento de los modelos ANSYS con muros de mampostería es muy parecido en ambos elementos, independientemente de cómo se encuentre apoyado el muro. Esta distribución de grietas es el típico de muros confinados, donde se definen las grietas por cortante en las diagonales del muro, el resultado del modelo numérico es tal y como se observó también en el ensaye del prototipo losa-muro y que detalla la Figura 19. Después de los ciclos aplicados al espécimen, días después se aplicaron nuevos ciclos de carga, y como se puede apreciarse en la Figura 19b, la capacidad resistente del muro confinado llegó hasta que uno de los castillos falló por cortante en la base del mismo.

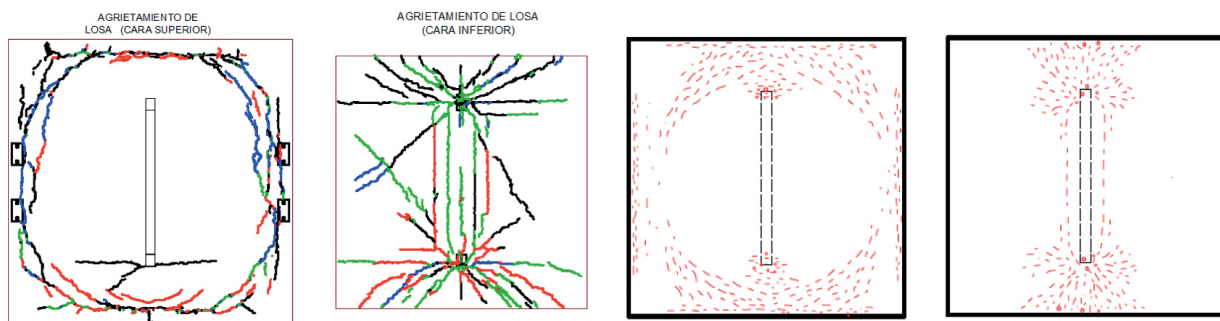


Fig. 20: (a) Condición de agrietamiento de la losa después de aplicar los ciclos de carga indicados en la Figura 10. (b) Condición de agrietamiento del modelo ANSYS con carga vertical.

En cuanto al agrietamiento de la losa, ya se comentó antes que debido a la aplicación de la carga vertical solamente, se presentaron las primeras grietas en los bordes de la losa adyacentes a las vigas y paralelos al muro, según la Figura 10. Pero al final de la prueba se llegó al patrón de agrietamiento de las dos caras de la losa que muestra la Figura 20a; las grietas en la cara superior se concentraron en los bordes perimetrales, y algunas grietas en los bordes con el muro, sin embargo en la cara inferior las grietas se concentran en grupos de líneas paralelas al muro y en grietas radiales que salen de los bordes en la unión con los castillos. Como referencia se muestra en la Figura 20b, el resultado del modelo en ANSYS con carga vertical.



Fig. 21. Agrietamiento final del espécimen ensayado.

9. CONCLUSIONES

Para la condición de carga vertical, se sometió al prototipo a una carga vertical con semi-ciclos de carga creciente. A una carga de 5.8 ton, valor por debajo de la carga de servicio, se observó un deslizamiento de la losa hacia abajo debido a un primer agrietamiento del concreto. Después se comportó ésta de nuevo de manera elástica. La curva del modelo ANSYS fue congruente con la experimental y coincidió en que el agrietamiento se presenta para el mismo valor de carga.

Un resultado a resaltar para el caso de carga vertical, derivado del análisis con ANSYS, es que para modelos losa-muro con el mismo ancho, la rigidez en la etapa de carga de servicio es la misma, independientemente de que se varíe el espesor de la losa, o si son muros de concreto o de mampostería. Aunque se tendrá desde luego más capacidad última del sistema, pero la que interesa es la carga en condiciones de servicio, por lo que un mayor espesor de losa no soluciona el problema de obtener una mayor rigidez.

En el proceso de carga horizontal (sin carga vertical) se detectó que la rigidez del sistema completo losa-muro es de la tercera parte respecto a la del muro aislado. Debido al valor de carga horizontal aplicado relativamente bajo, el muro tuvo desplazamientos horizontales principalmente por la flexión de la losa (66 %) y por flexión del muro (33 %), no se midieron deformaciones por cortante, por lo que se concluye que el muro no se deformó por cortante. No se realizaron análisis en ANSYS con esta condición.

Durante los ciclos de cargas combinadas (vertical y horizontal) se observó que la losa se deforma de tal manera que después de cada ciclo se incrementa la deformación residual a una tasa de 0.5 mm sin regresar a su posición inicial, debido a la intensidad de la carga vertical constante y la horizontal cíclica.

En el proceso de carga combinada, el muro no tuvo deformaciones por cortante en la primera parte del proceso de carga (primeros seis ciclos), y solo se desplazó por flexión y por la rotación en la base debido a la flexión de la losa. Pero a partir del séptimo ciclo comenzó la deformación por cortante (hasta el décimo ciclo se comporta de forma elástica, y después de este último se comporta de manera no-lineal).

Cuando se comparan las curvas de capacidad del modelo experimental contra las del modelo numérico de ANSYS se observa una excelente correlación entre las dos condiciones revisadas. Y la rigidez inicial del muro aislado entre la del conjunto losa-muro es del orden de 3.5 veces, las rigideces son en cada caso 11.25 T/cm y 40.0 T/cm. Sin embargo en los análisis de elemento finito con muros de concreto este cociente es más crítico pues se encontró de 15, es decir, la rigidez del muro de concreto sobre losa disminuye 15 veces respecto a estar fijo en su base.

Como una consecuencia de los resultados de este trabajo se proponen dos aportaciones en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. La primera en la sección de “análisis por cargas laterales”, se debe solicitar al diseñador calcular de forma adecuada la rigidez lateral relativa cuando se tengan muros apoyados sobre losas, para lograr una respuesta global del sistema que sea adecuada. Y la segunda, de acuerdo a los resultados de cargas verticales, se debe limitar la carga vertical en cada muro para evitar el agrietamiento de la losa.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto estuvo parcialmente financiado por la Secretaría de Obras del Gobierno del Distrito Federal a través de los convenios 212015 y 22611040.

Se agradece a todos los alumnos de la Licenciatura de Ingeniería Civil que participaron en este proyecto a través de los Talleres de Ingeniería Civil I y II, de Proyecto Terminal I y II y de Servicio Social, en particular se agradece a Ausencio López y Pedro Pérez.

También se agradece el apoyo de los técnicos del Laboratorio de Estructuras Juan, José Luis y Rubén.

REFERENCIAS

Astroza, M., Schmidt, M. (2002), “Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, 70, pp. 59-75.

Carrillo, J., Alcocer, S., González, G. (2012), “Deformation analysis of concrete walls under shaking table excitations. *Revista DYNA*, año 79, No. 174, ISSN 0012-7353, Medellín, Agosto, pp. 145-155.

Gobierno del D.F. Gaceta Oficial (2004), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.

Gómez Bernal, A., González Cuevas, O., Manzanares Ponce, D., Vargas Arguello, O., Arellano Méndez, E. (2012), “Comportamiento de edificios estructurados con losa de transferencia”, *Reporte UAM-A/ DMAE-02*, patrocinado por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del D F, conv. 212015.

Gomez-Bernal, A., Manzanares, D. A., Juárez-García, H. (2013), “Interaction between shear walls and transfer-slabs, subjected to lateral and vertical loading”, *Proc. Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Paper 447, Viena Austria, Agosto, pp. 28-30.

Gómez Bernal, A., Manzanares Ponce, D., Juárez García, H. (2013), “Comportamiento de edificios discontinuos en altura y con pisos de transferencia”, *Memorias XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, SMIS, Veracruz, Ver. Noviembre.

Gómez Soberón, C., Gómez Bernal, A., González Cuevas, O., Terán, A., Ruiz Sandoval, M. (2009), “Evaluación del diseño sísmico de estructuras nuevas ubicadas en la Colonia Roma del Distrito Federal”, *Proc. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, SMIS, Puebla, México, Noviembre.

Gouveia, J.P., Lourenço, P.B. (2007), “Masonry shear walls subjected to cyclic loading: influence of confinement and horizontal reinforcement”, *Proc. Tenth North American Masonry Conference*, St. Louis M. USA. Junio.

Hopkins, D.C., Park, R. (1971), “Test on a reinforced concrete slab and beam floor designed with allowance for membrane action, cracking, deflection and ultimate load of concrete slab system”, *ACI pub 30*.

Manzanares Ponce, D. A. (2013), “Comportamiento de edificios estructurados con losa de transferencia”, *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ing. Estructural, CBI-UAM, Mayo.

Meli, R. (1994), “Mampostería estructural, la práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México”, *Cuaderno de investigación CENAPRED sobre Seguridad sísmica de la vivienda económica*, No. 17 julio, México.

Park, R., Gamble, W.L. (2000), “*Reinforced Concrete Slabs*”, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc.

Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004), Gaceta Oficial del Gobierno del D. F. México.

Tickoo, S., Singh, V. (2009), ANSYS 11.0 for Designers, CADCIM Technologies.

Vargas Arguello, O.S. (2014), “Diseño, construcción y ensaye ante carga cíclica de un prototipo losa-muro a escala natural”, *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ing. Estructural, CBI-UAM, Julio.

Vecchio, F., Tang, K. (1990), “*Membrane action in reinforced concrete slab*”, Can. J. Civ. Eng. 17, pp. 686-697.