

III

COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES DE SISTEMAS DE MUROS DE MAMPOSTERIA CONFINADA CON DIFERENTES GRADOS DE ACOPLAMIENTO A FLEXION

por

Sergio M. Alcocer

Roberto Meli

Tomás A. Sánchez

Leonardo E. Flores

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Como se ha mencionado en los artículos anteriores de este Cuaderno, la experiencia en eventos sísmicos ha mostrado un comportamiento satisfactorio de los edificios a base de muros de carga de mampostería. No obstante ello, a raíz de los sismos de 1985, la normatividad de este tipo de estructuras en el Distrito Federal y en ciudades del interior del país fue revisada. Actualmente, los reglamentos contienen requisitos más severos para el diseño sísmico que los reglamentos anteriores a 1985, lo que ha obligado a que los proyectos tipo de vivienda de interés social deban ser modificados para satisfacer dichos requerimientos. Por el carácter repetitivo de los proyectos de vivienda, sobre todo en zonas de alto y moderado peligro sísmico, es importante contar con una verificación experimental de su seguridad sísmica.

Los estudios sobre el comportamiento de muros mampostería ante cargas laterales realizados hace dos décadas han servido de base para establecer los procedimientos de diseño vigentes. Los especímenes ensayados en esa época fueron muros aislados. Sin embargo, hasta la fecha, no se habían realizado ensayos de sistemas completos y a escala natural que permitieran verificar el comportamiento ante cargas laterales de estas estructuras. Algunos de los aspectos por estudiar son: la influencia del acoplamiento a flexión y el efecto del acero horizontal en el comportamiento sísmico, y la interacción de muros y diafragmas de piso en una estructura tridimensional. El Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED permite la ejecución de estos estudios.

Como se anota en la Introducción de este Cuaderno, el CENAPRED ha venido desarrollando un programa de investigación sobre la seguridad sísmica de la vivienda económica. En este artículo se presentan los resultados más sobresalientes de la primera fase experimental.

1.2 El Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED

El Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del Centro Nacional de Prevención de Desastres ocupa el edificio más grande del Centro. Para aplicar cargas horizontales, el laboratorio cuenta con un muro de reacción de concreto reforzado y postensado de 9 m de altura y 8.4 m de ancho. Para aplicar las reacciones verticales a los modelos, el LEG tiene una losa de reacción de concreto de 8.4 m de ancho y 15 m de longitud. El laboratorio dispone de marcos de carga de acero para complementar el sistema muro-losa de reacción. El LEG cuenta con los equipos más modernos para la realización de ensayos de tipo cuasiestático y pseudodinámico. Entre ellos se encuentran gatos hidráulicos de 50, 100 y 400 t, equipos automáticos de adquisición de datos, un sistema de ensayos controlados por computadora, transductores eléctricos de carga, de desplazamiento y de deformación, y una máquina universal de 100 t.

1.3 Efecto del Acoplamiento a Flexión de Muros en la Respuesta Sísmica de Edificios

En teoría, los muros de mampostería pueden clasificarse, de acuerdo a la manera en que resisten las fuerzas inducidas por los sismos, en (Ref. 1):

- a) Muros en voladizo.
- b) Muros acoplados con plastificación de los tableros o de las mochetas adyacentes a las aberturas.
- c) Muros acoplados con plastificación del sistema de piso.

En el primer caso (Fig. 1a), las cargas laterales son resistidas predominantemente mediante deformaciones por flexión de los muros de modo que la energía se disipa en articulaciones plásticas en la base de cada muro, en donde se concentran las rotaciones plásticas. Para lograr una disipación estable de energía, las articulaciones deben ser adecuadamente detalladas. Para que los muros trabajen en voladizo se necesita que el acoplamiento entre ellos sea débil, lo que implica que el sistema de piso sea flexible.

Comúnmente, las construcciones de mampostería tienen muros de fachada provistos de aberturas en forma de puertas o ventanas (Fig. 1). Ante cargas laterales, la plastificación puede ocurrir en las mochetas adyacentes a las aberturas (elementos verticales) o en el sistema dala-pretil (elementos horizontales). El primer caso es el más común y se caracteriza por una concentración del desplazamiento en las mochetas (y por tanto de daño), ya sea debido a flexión o cortante, en un nivel, generalmente en la planita baja (Fig. 1b). Para este tipo de comportamiento se puede demostrar que la capacidad de deformación requerida es, en la mayoría de los casos, difícil de obtener físicamente aun para ductilidades de desplazamiento moderadas (Ref. 1). Por tanto, en el diseño de este sistema se deben permitir bajos desplazamientos.

En ocasiones, las proporciones de las aberturas en los muros de mampostería son tales que el sistema de piso (o piso más pretil, si éste existe) es más débil que las mochetas (Fig. 1c). Aunque esta configuración estructural ha sido empleada exitosamente en estructuras de concreto reforzado, la fragilidad de la mampostería limita su aplicación, en particular si los elementos de acoplamiento son de mampostería (pretil). El rápido deterioro de la resistencia y rigidez del acoplamiento conduce a un incremento de momentos cuyas magnitudes tienden a las obtenidas en muros en voladizo.

La consideración del grado de acoplamiento en el análisis, y su consecuente impacto en los momentos de diseño son importantes. Como se ilustra en la Fig. 1c, la distribución de momentos flexionantes en la altura del muro depende directamente del grado de acoplamiento supuesto en el análisis. Así, si las capacidades a flexión de los muros se determinaron suponiendo un trabajo de muros acoplados y éste no existe en la realidad, el incremento de momento en las bases de los muros al trabajar en voladizo no podrá ser resistido. Es, por tanto, indispensable evaluar experimentalmente el efecto del grado de acoplamiento en el comportamiento de muros de mampostería.

1.4 Objetivos del Estudio

En este artículo se presentan los resultados que se consideran más relevantes del ensaye de tres sistemas a escala natural compuestos por dos muros de mampostería confinada ligados entre sí con diferentes condiciones de acoplamiento. La descripción detallada de los experimentos se encuentra en la Ref. 2.

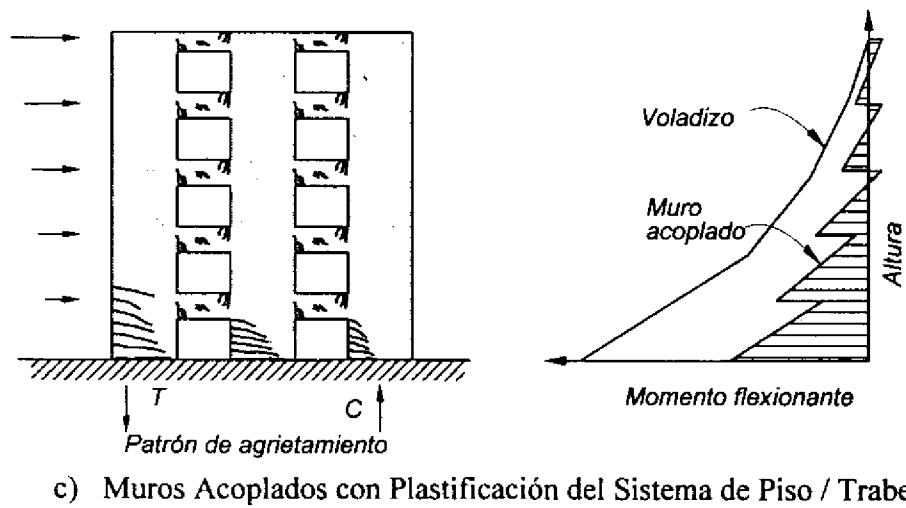
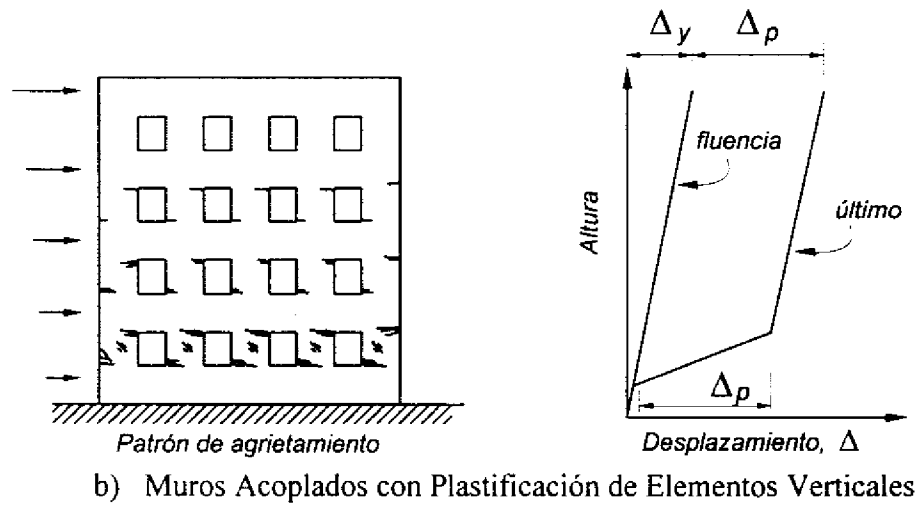
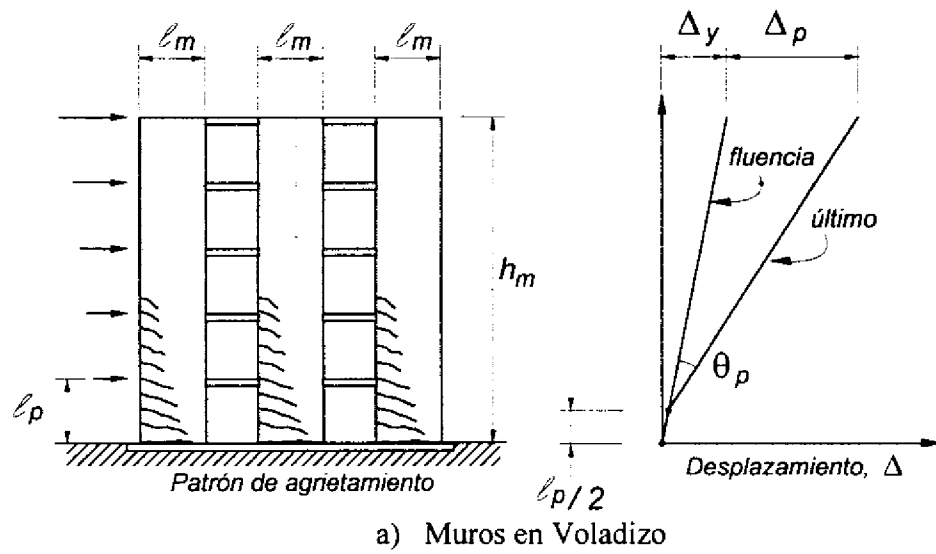


Figura 1 Clasificación de Muros de Mampostería según su Participación en la Resistencia de Cargas Inducidas por Sismos (de la Ref. 1)

Los objetivos de esta fase eran investigar:

1. El efecto de distintos grados de acoplamiento a flexión en el comportamiento histerético de los sistemas de muros.
2. La influencia del acoplamiento en el modo de falla de los modelos.
3. Las características de degradación de rigidez y disipación de energía según el grado de acoplamiento entre los muros.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En esta primera etapa se ensayaron tres sistemas de dos muros de mampostería confinada ligados entre sí. Los modelos fueron diseñados y construidos de acuerdo a la práctica vigente en el Distrito Federal (Refs. 3 y 4). La variable experimental del estudio fue el grado de acoplamiento entre los muros, es decir la relación entre el momento flexionante M y la fuerza cortante V ; este cociente se expresa como M/VL , donde L es la longitud del muro. En el primer modelo, W-W, los muros estaban únicamente conectados por medio de barras corrugadas de acero de alta resistencia que transmitían la fuerza lateral entre ellos. Las relaciones M/VL de los muros eran iguales a 1.5 y 1.0. Este modelo no intenta reproducir una condición real en estructuras de este tipo, pero su comportamiento sirve de patrón de comparación con las otras estructuras. En el segundo modelo, WBW, los muros estaban ligados por una dala y una losa de concreto colados en sitio, creando una abertura en forma de puerta y, por tanto, con menor M/VL . El tercer espécimen, WWW, tuvo un grado de acoplamiento mayor, ya que contó con pretiles, de manera que la abertura tenía forma de ventana. Las tres estructuras representan los muros de la planta baja de un edificio de interés social de cuatro o cinco niveles.

2.1 Especímenes de Prueba

2.1.1 Descripción

La geometría de los modelos se muestra en la Fig. 2. Los especímenes tenían una longitud de 5 m y estaban formados por dos muros de 1.6 m y 2.4 m de longitud. En WBW y WWW, el sistema dala-losa fue continuo sobre los muros. La altura de los pretiles en WWW era de 1 m. Los muros se construyeron con tabiques de barro de tipo artesanal. Los muros estaban confinados por castillos de sección nominal de 12.5 cm por 15 cm. El espesor de los muros era de 12.5 cm. Las dalas tenían una sección de 12.5 cm por 25 cm. En todos los modelos, el espesor de las losas fue igual a 10 cm y el ancho igual a 120 cm. La altura de las estructuras, desde su desplante, era de 2.5 m, que es un valor cercano al límite superior para las alturas de entrepiso comúnmente empleadas en este tipo de estructuras.

2.1.2 Características de los Materiales y Armado

La resistencia de diseño a la compresión del concreto de castillos, dalas y losa fue de 200 kg/cm² (19,6 MPa). Las resistencias promedio del concreto de castillos medidas a la compresión fueron iguales a 275, 165 y 135 kg/cm² (que corresponden a 27,0; 16,2 y 13,2 MPa) para W-W, WBW, WWW, respectivamente. La resistencia promedio medida del concreto de las losas y dalas fue de 360 kg/cm² (35,3 MPa).

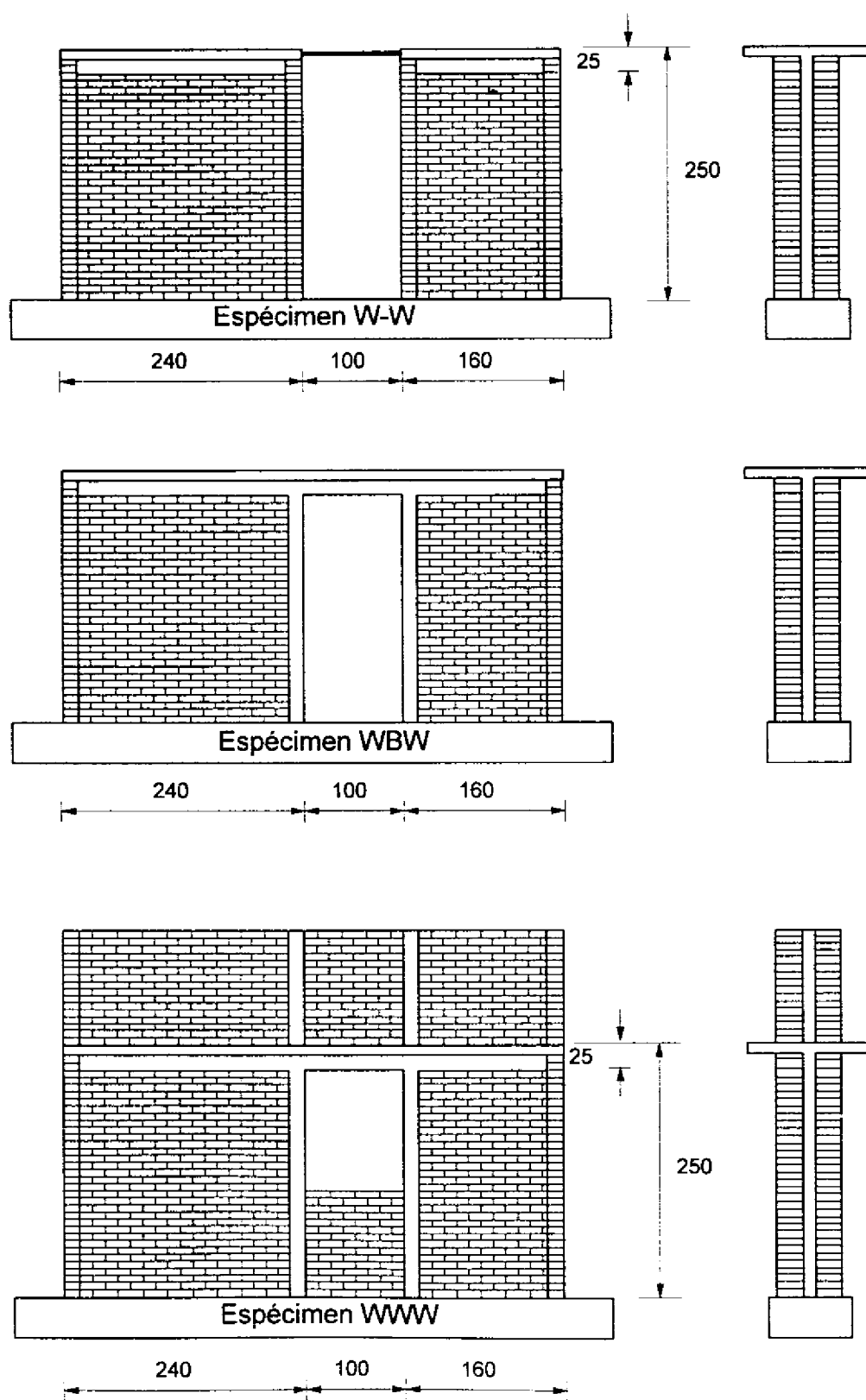


Figura 2 Geometría de los Modelos

El mortero utilizado en la construcción de los modelos fue dosificado por volumen para obtener una resistencia a la compresión de 125 kg/cm^2 (12,3 MPa), la cual, según la Ref. 3, corresponde a un mortero tipo I. El mortero se dosificó con una relación volumétrica cemento:arena igual a 1:3. La resistencia promedio a la compresión del mortero obtenida del ensaye de cubos de 5 cm de arista fue de 160 kg/cm^2 (15,7 MPa).

Para obtener la resistencia a la compresión de la mampostería, simultáneamente a la construcción de los muros, se construyeron pilas con siete tabiques sobrepuestos. El número de tabiques de las pilas se decidió de manera que la relación de esbeltez de ella fuera cercana a cuatro y que, por tanto, el factor correctivo de la resistencia fuera igual a la unidad (Ref. 3). La resistencia promedio a compresión de la mampostería fue de 48 kg/cm^2 (4,7 MPa) para W-W y de 53 kg/cm^2 (5,2 MPa) para WBW y WWW.

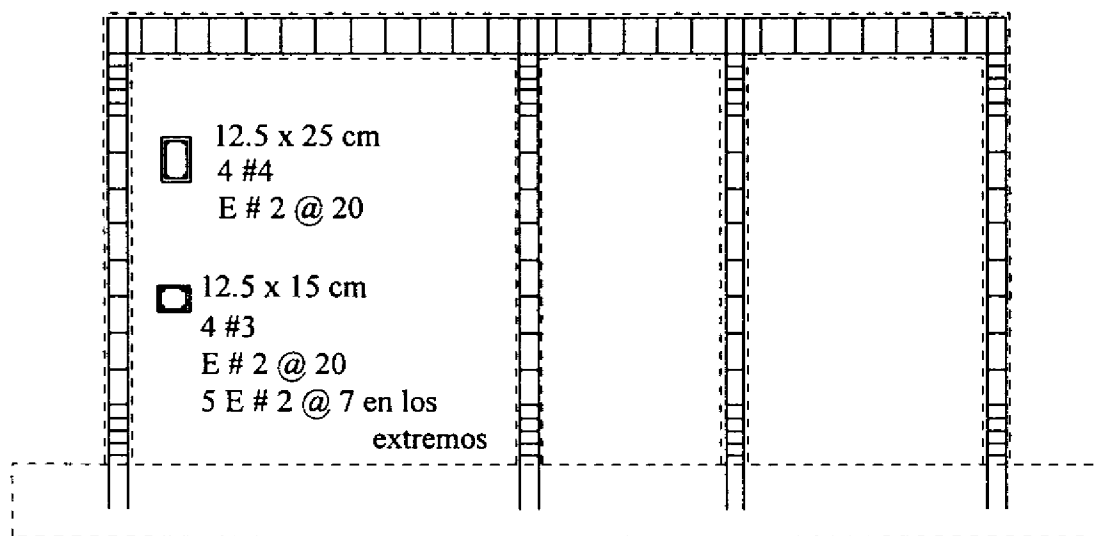
La resistencia a la tensión diagonal de la mampostería se obtuvo del ensaye de muretes. Los muretes, sensiblemente cuadrados, fueron hechos con una pieza y media de base y cinco hiladas y, al igual que las pilas, fueron elaborados durante la construcción de los modelos. La prueba se realizó cargando en compresión a los muretes sobre una de las diagonales. La resistencia promedio a tensión diagonal de la mampostería fue de 10 kg/cm^2 (0,98 MPa) para los tres modelos.

Para el refuerzo longitudinal de castillos, dalas y losa se usaron varillas corrugadas con esfuerzo nominal de fluencia igual a $f_y = 4\,200 \text{ kg/cm}^2$ (412,0 MPa). Para los estribos de castillos y dalas se usó alambra del # 2 con $f_y = 3\,000 \text{ kg/cm}^2$ (294,3 MPa). El esfuerzo de fluencia medido para las barras del # 2, 3 y 4 fue igual a 2 810, 4 610 y 4 320 kg/cm^2 , respectivamente (que corresponden a 275,7; 452,2 y 423,8 MPa).

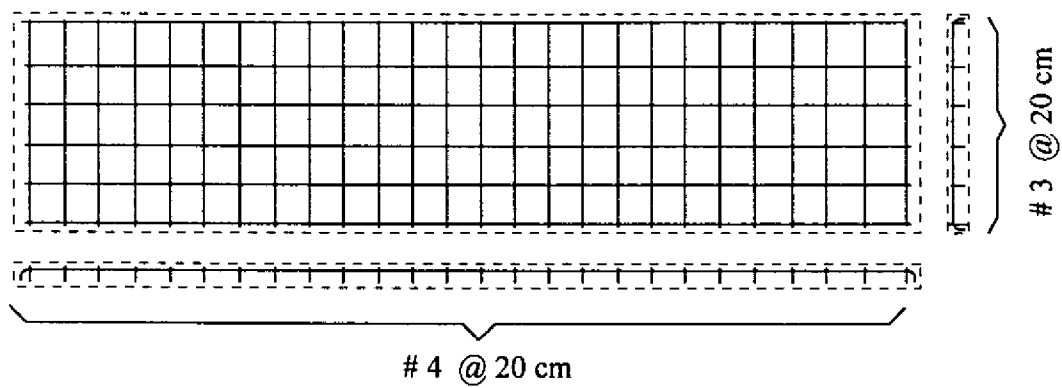
En la Fig. 3 se muestran los detalles del armado de WBW. El refuerzo de W-W y WWW fue similar. El armado longitudinal de los castillos constó de cuatro varillas corrugadas del #3. Transversalmente, los castillos se reforzaron con estribos lisos del #2 separados a cada 20 cm, excepto en los extremos donde se colocaron cinco estribos a cada 7 cm. La menor separación de estribos en los extremos de los castillos obedece a que, ensayos en laboratorio de muros de mampostería confinada con esta modalidad de refuerzo (Ref. 6) han evidenciado un comportamiento más estable y dúctil que cuando la separación en toda la altura del elemento es igual a 20 cm.

Las dalas fueron reforzadas longitudinalmente con cuatro varillas del #4, y transversalmente con estribos lisos del #2 a cada 20 cm. Los estribos de castillos y dalas fueron rematados por ganchos a 135° . Las varillas longitudinales fueron terminadas en el nudo con ganchos a 90° .

El armado de las losas en la dirección longitudinal consistió en una parrilla de seis varillas corrugadas del #3 separadas 20 cm y de varillas corrugadas del #4 a cada 20 cm en la dirección transversal.



Elevación



Losa

Figura 3 Armado del Espécimen WBW

2.1.3 Construcción

Los muros fueron desplantados en vigas de cimentación construidas con concreto reforzado. Los castillos ya armados fueron anclados en las vigas con ganchos de 90°. Los muros fueron contruidos en dos etapas. Primero, se levantaron los muros hasta la mitad de su altura final. Posteriormente se colaron las mitades de los castillos (hasta la misma altura de la mampostería). Después se construyó el resto del muro y se colaron las segundas mitades de los castillos. Finalmente se colaron, simultáneamente, la dala y la losa. Según esta secuencia de construcción se dejaron tres juntas de construcción en cada modelo: en el desplante de los muros, a la mitad de la altura de ellos y en el nudo dala-castillo. Durante los ensayos no se observaron signos de daño en dichas juntas. El concreto empleado en los castillos, dala y losa fue elaborado en el laboratorio y colocado usando botes. El concreto de la dala y losa fue compactado con un vibrador eléctrico portátil. El concreto fue curado a temperatura ambiente sin tomar ninguna medida especial. El agua del mortero se añadió para mantener una trabajabilidad adecuada. Durante la construcción de los muros, se saturó el tabique antes de su pegado como lo indica la Ref. 3. Los tres modelos fueron contruidos por la misma cuadrilla de albañiles.

2.2 Dispositivo de Carga

En la Fig. 4 se muestra el dispositivo de carga empleado en el ensaye de los modelos. La carga lateral fue aplicada mediante un gato hidráulico de doble acción, capaz de resistir fuerzas de compresión y de tensión. El gato hidráulico fue fijado al muro de reacción a través

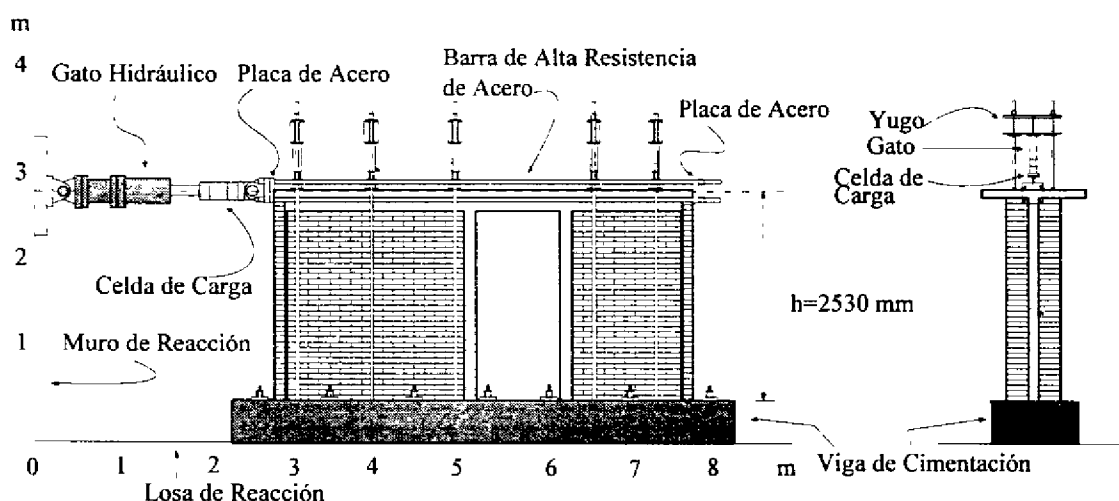


Figura 4 Dispositivo de Carga

de una placa de acero. El gato se conectó al modelo a la altura de la losa en un costado del tablero cuadrado. Durante los semiciclos positivos, el gato hidráulico horizontal estaba a compresión (empujaba al modelo, ver Fig. 4). En los semiciclos negativos, el espécimen se jaló mediante barras de acero de alta resistencia conectadas al gato y ancladas en una placa de acero localizada en el costado exterior del muro rectangular. Para evitar desplazamientos fuera del plano del muro, se construyeron mochetas transversales de mampostería en la altura de los castillos extremos.

Para simular los efectos de los esfuerzos verticales producidos por cargas gravitacionales se empleó el dispositivo mostrado en la Fig. 4. El dispositivo constaba de gatos hidráulicos de simple acción (sólo resisten compresión) que reaccionaban contra un yugo de acero anclado a la losa de reacción por medio de barras de acero de alta resistencia. El esfuerzo vertical aplicado fue igual a 5 kg/cm^2 ($0,5 \text{ MPa}$), calculado según las dimensiones reales de los muros. Este valor puede considerarse como típico en edificios de vivienda económica de unos cuatro o cinco niveles de altura (ver el segundo artículo de este Cuaderno). El esfuerzo vertical se mantuvo constante durante el ensaye. Los gatos hidráulicos del dispositivo de carga fueron controlados con bombas hidráulicas eléctricas.

2.3 Historia de Carga

Los especímenes fueron ensayados mediante la aplicación de cargas laterales cíclicas. En cada ciclo se aplicaron varios niveles o incrementos de carga. La historia de carga aplicada fue similar para los tres modelos y constó de dos etapas. En la Fig. 5 se muestra una historia de carga típica. En la primera fase, la prueba fue controlada por carga. La secuencia de cortante (i.e. carga lateral) máxima aplicada fue igual a 5, 10, 18 t (49, 98, 177 kN, respectivamente) y a la que produjera el agrietamiento diagonal. Se definió como agrietamiento

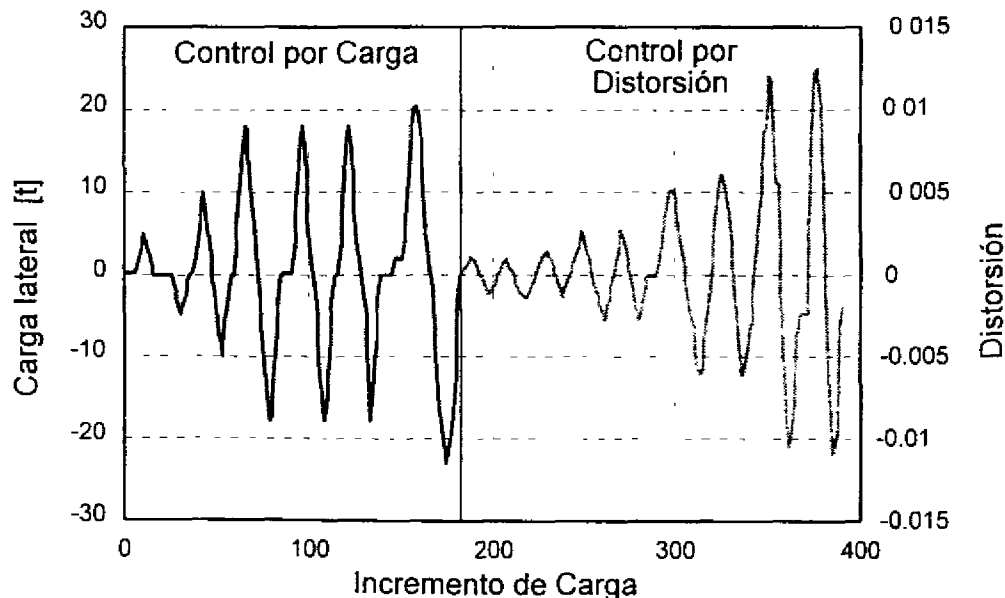


Figura 5 Historia de Carga para el Modelo W-W ($1 \text{ t} = 9,81 \text{ kN}$)

diagonal a la aparición de la primera grieta diagonal en el tablero de mampostería. En la segunda etapa, después del agrietamiento diagonal inicial, la prueba fue controlada por distorsión. Se aplicaron ciclos a niveles de distorsión creciente llegando a distorsiones de hasta 0.012 (excepto en WBW para el cual la distorsión máxima fue de 0.006). Para fines de esta investigación, se definió como distorsión al cociente entre el desplazamiento lateral medido en la losa y la altura de dicho punto a la viga de cimentación. En la Fig. 5, el eje de las ordenadas de la izquierda se refiere a la cortante impuesta en la fase controlada por carga, mientras que las distorsiones máximas aplicadas en el resto del ensaye se pueden leer en el eje de la derecha. Aunque la distorsión máxima alcanzada (1.2%) puede considerarse excesiva para un sistema de muros de mampostería confinada, permite obtener información sobre el comportamiento de ellos a grandes deformaciones. Para cada nivel de carga o de distorsión se aplicaron dos ciclos.

Para facilitar la comparación del desempeño de los modelos y la interpretación de resultados, se trató de aplicar la misma ley de cargas en los tres ensayos. Sin embargo, puesto que el agrietamiento de los muros ocurrió súbitamente, fue difícil controlar el desplazamiento en ese momento; por tanto, en esos ciclos se alcanzaron distorsiones que fueron diferentes en cada uno de los modelos.

2.4 Instrumentación

Los modelos fueron densamente instrumentados para obtener la mayor información posible sobre su comportamiento durante la prueba. Se utilizaron tres tipos de transductores eléctricos: de carga, de desplazamiento y de deformación (deformímetros de tipo adhesivo). La instrumentación fue diseñada para medir, simultáneamente, la respuesta del modelo en diversos puntos. Las cargas aplicadas por los gatos fueron medidas con celdas de carga conectadas en serie (Fig. 4).

La posición de los transductores de desplazamiento para el modelo WBW aparece en la Fig. 6. La instrumentación de W-W y WWW fue similar (Ref. 2). Para estimar las contribuciones de las deformaciones de los muros por flexión (rotación) y por corte (deformación angular) a la total del modelo, se colocaron transductores de desplazamiento a lo largo de los castillos y sobre las diagonales de los tableros.

En la Fig. 7 se muestra la posición de los deformímetros en el refuerzo longitudinal de castillos, trabe y losa, así como en algunos estribos de castillos y dala de WBW. Los deformímetros fueron colocados en secciones críticas. La instrumentación de W-W y WWW fue análoga (Ref. 2).

2.5 Adquisición y Reducción de Datos

Para la adquisición de datos se utilizó un equipo automático y dos cajas de interruptores controlados por una computadora personal. Durante el ensaye de cada modelo se utilizaron alrededor de 100 canales. Los sensores fueron leídos en cada incremento de carga y la información fue almacenada en la memoria de acceso aleatorio de la computadora. Los transductores horizontales de carga y de desplazamiento, para control de la prueba, y de carga vertical, así como algunos deformímetros, fueron monitoreados de manera continua durante la prueba. La respuesta histerética del modelo, carga horizontal-desplazamiento de la losa, fue

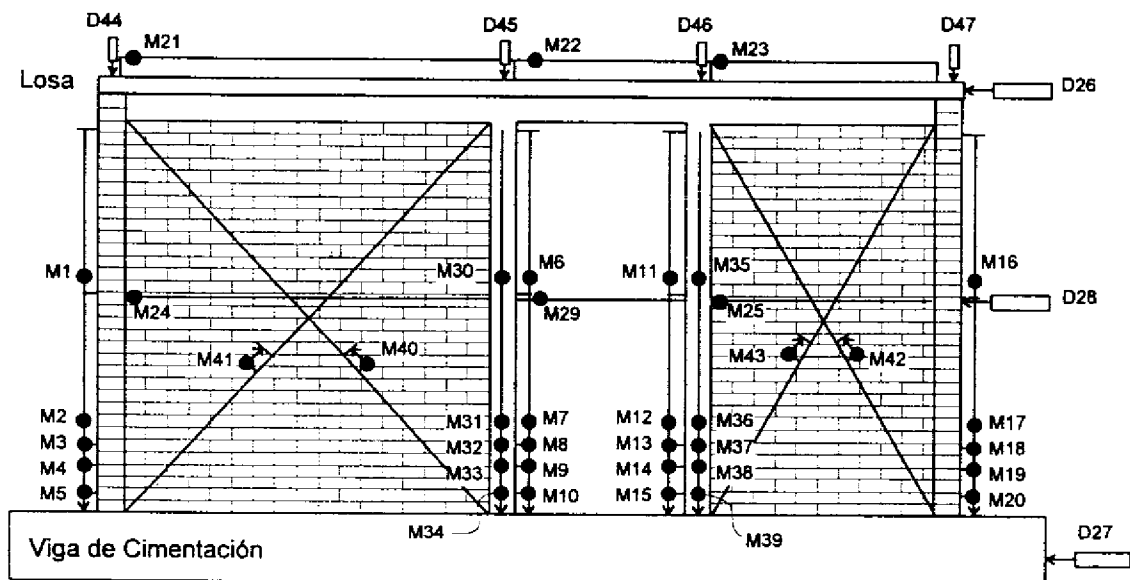


Figura 6 Posición de los Transductores de Desplazamiento (Modelo WBW)

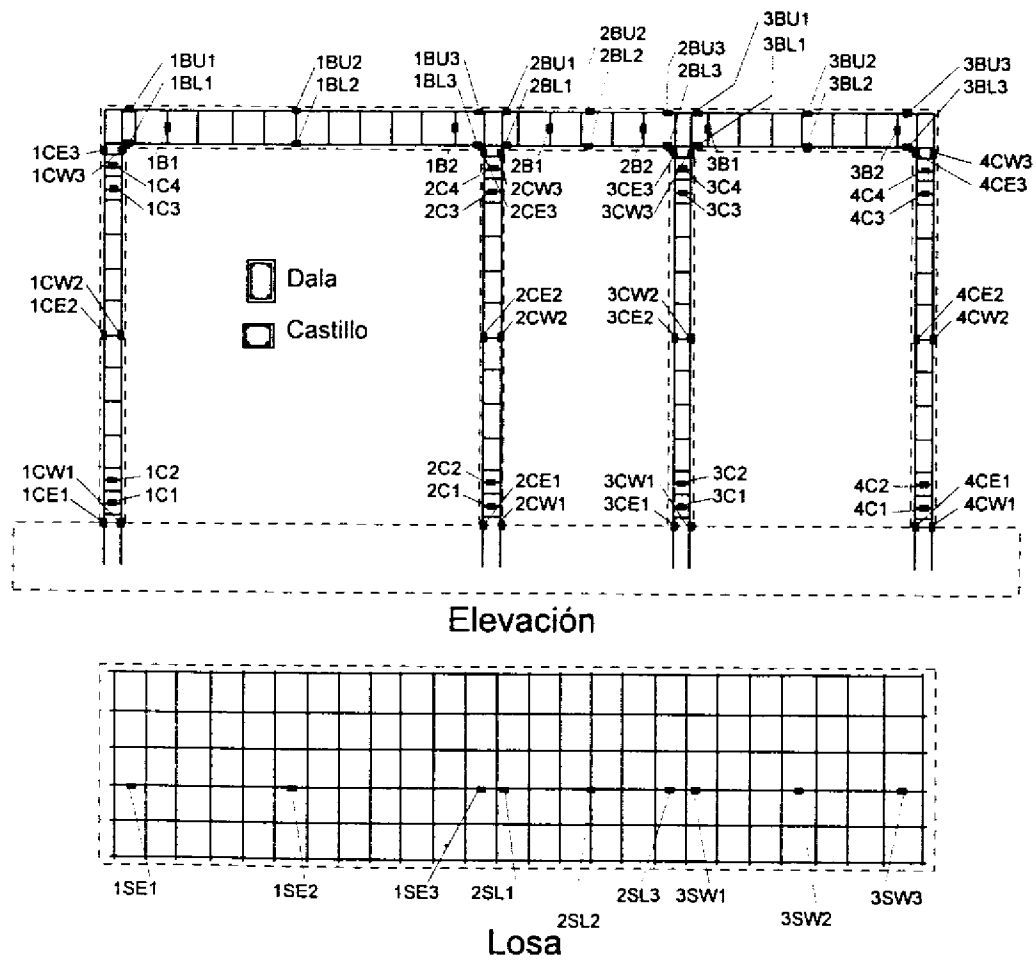


Figura 7 Posición de los Transductores de Deformación (Modelo WBW)

construida en tiempo real en la computadora. La reducción y análisis de la información archivada se hizo empleando un programa preparado para ello (Ref. 5).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

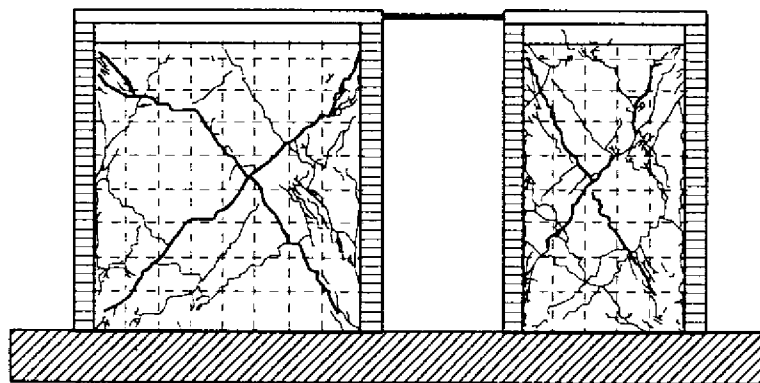
3.1 Patrones de Agrietamiento

En la Fig. 8 se presentan los patrones de agrietamiento final de los modelos. Independientemente del grado de acoplamiento, el daño estuvo dominado por fisuras inclinadas en los muros, lo que es característico de fallas por tensión diagonal. El análisis de las deformaciones angulares de los tableros (sección 3.3) confirmó que las deformaciones por cortante controlaron el comportamiento de los especímenes. Las primeras grietas inclinadas aparecieron cerca de las esquinas de los muros y se extendieron hacia la parte central de los mismos conforme aumentó la distorsión. En general, los muros exhibieron una o dos fisuras diagonales principales en forma de X, el resto de los muros permaneció casi sin daño. Sólo el espécimen W-W, con las relaciones de los muros M/VL más altas, mostró una distribución sensiblemente más uniforme del agrietamiento inclinado debido a mayores deformaciones por flexión de los muros. Lo anterior se explica porque el grado de acoplamiento fue casi nulo, de manera que los muros trabajaron en voladizo.

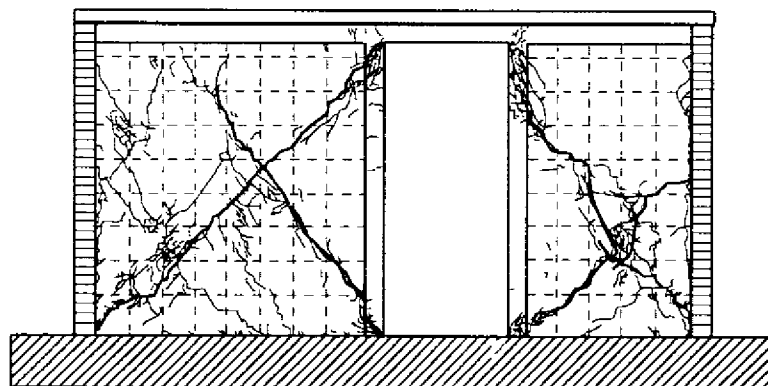
La mayoría de las grietas se propagaron atravesando los tabiques, y en muy pocos casos, siguieron las juntas entre el mortero y el tabique en forma escalonada. Después de que se formó el fisuramiento principal en X (para distorsiones de 0.006), se desarrolló un mecanismo cinemático en que el bloque situado arriba de la grieta principal deslizó con respecto al bloque inferior, causando el aplastamiento de los tabiques en la intersección de las fisuras diagonales (hacia el centro del tablero), y el agrietamiento inclinado y el aplastamiento del castillo. Las grietas inclinadas se extendieron hasta 20 cm afuera de la zona reforzada con estribos colocados con baja separación. Los castillos, tanto interiores como exteriores, exhibieron fisuras horizontales distribuidas uniformemente en la altura. Este se debe a que, una vez agrietados los tableros de mampostería, los muros se expanden en su plano deformando al castillo en curvatura simple. La articulación de los castillos en sus extremos, causada por la penetración de las fisuras diagonales de los muros, impide la recuperación de la vertical de los castillos. Este fenómeno aceleró el deterioro de las estructuras. No se observó aplastamiento del mortero. Al final de los ensayos, se observaron grietas verticales a lo largo de la junta muro-castillo. Este fenómeno refuerza la recomendación, seguida frecuentemente en la práctica, de dentar los muros para lograr una mejor trabazón entre el muro y el castillo y, de este modo, garantizar una adecuada transmisión de fuerzas.

No se registraron grietas en el sistema de piso (dala y losa) de los tres modelos. El efecto del grado de acoplamiento (M/VL) en los patrones de agrietamiento se puede observar al comparar WBW y WWW. En WWW, las mochetas adyacentes a la abertura quedaron flexionadas en doble curvatura debido a la elevada rigidez de los elementos de acoplamiento. Por tanto, el comportamiento dependió de la degradación al corte de las mochetas, en particular de aquélla a compresión. Las grietas inclinadas en la mampostería se extendieron desde las esquinas de la abertura a las esquinas diagonalmente opuestas. Al igual que en los otros modelos, el agrietamiento inclinado penetró en los castillos. En particular, las esquinas inferiores de la abertura fueron muy dañadas ya que la separación de los estribos en esa zona era igual a 20 cm. Por tanto, para disminuir el daño en esta zona es recomendable que se

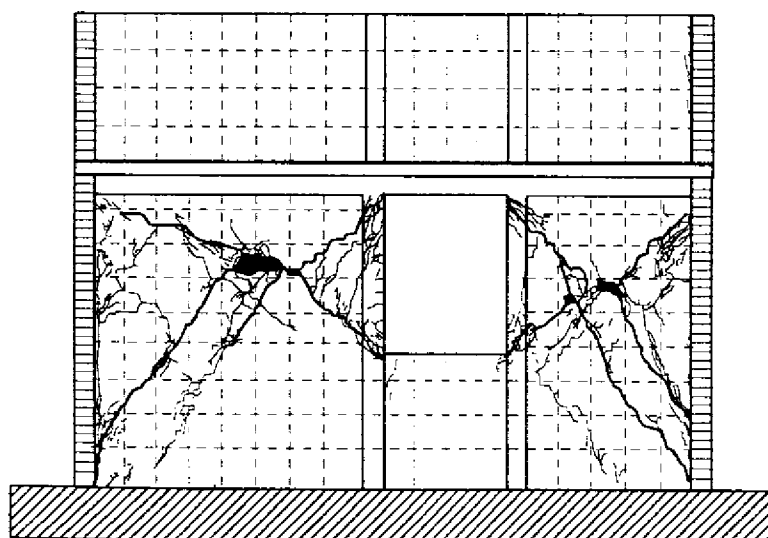
desliguen los pretiles de los muros, para que trabajen con M/VL más alto, o bien que se refuercen los castillos localmente con estribos menos separados para controlar el fisuramiento. No se observó daño en los parapetos inferior y superior.



Espécimen W-W



Espécimen WBW



Espécimen WWW

Figura 8 Agrietamiento Final de los Modelos

3.2 Curvas Carga Lateral - Distorsión

Las curvas carga lateral - distorsión para los modelos se presentan en la Fig. 9. Las gráficas se presentan a la misma escala para facilitar la comparación. Se señalan las resistencias teóricas de cada modelo ($V_{u,RDF}$ y $V_{u,RDF}^*$) obtenidas según la Ref. 3 con la expresión

$$V_u = F_R(0.5v^*A_T + 0.3P) \leq F_R 1.5v^*A_T \quad (1)$$

donde V_u es la resistencia última a cortante, F_R es el factor de reducción de resistencia, v^* es el esfuerzo cortante de diseño, A_T es el área transversal del muro, y P es la carga vertical aplicada.

Esta ecuación fue calibrada para predecir la carga de agrietamiento diagonal del muro; por tanto, las normas de mampostería de México consideran a la carga de fisuramiento diagonal como la resistencia última al corte. Para la obtención de la capacidad teórica se usaron las dimensiones reales del modelo y la carga vertical aplicada durante el ensaye. Para $V_{u,RDF}$ el esfuerzo cortante de diseño fue igual a 3.5 kg/cm^2 (0.34 MPa) y $F_R = 0.7$, los cuales son valores especificados en la Ref. 3. Para $V_{u,RDF}^*$ el esfuerzo v^* fue el máximo esfuerzo cortante aplicado (en ciclos positivos y negativos) y $F_R = 1.0$.

En los lazos se ha marcado el punto de agrietamiento inicial de la mampostería. Los ciclos mostrados son característicos de muros de mampostería confinada. Los especímenes exhibieron una respuesta histerética simétrica en los ciclos elásticos; en la etapa no lineal se observó un mayor deterioro de rigidez y resistencia en los ciclos negativos. Este fenómeno se atribuye al efecto del daño producido en los semiciclos positivos, y al daño en el tablero cuadrado que, para carga lateral negativa, aumentaba su rigidez por una mayor compresión. El comportamiento de este tablero, por su relación de aspecto, tiende a ser dominado por cortante. En ciclos anteriores al agrietamiento diagonal, los modelos mostraron un comportamiento elástico-lineal, no obstante el fisuramiento por flexión de los castillos. La etapa no lineal de comportamiento se inició después del agrietamiento diagonal en los tableros de mampostería. Después del fisuramiento inclinado, las estructuras resistieron cargas mayores hasta la formación de las grietas diagonales en forma de X sobre todo el tablero. En la Tabla 1 se presentan las cargas laterales medidas en diferentes etapas y las resistencias teóricas. El comportamiento a distorsiones de 0.003 fue estable, excepto en WWW (ciclos negativos) para el cual se aceleró el deterioro de la resistencia. Los lazos histeréticos de los modelos muestran poco estrangulamiento cerca del origen. Aunque las deformaciones por corte dominaron la respuesta de las estructuras (ver sección 3.3), el confinamiento proporcionado por los castillos y dadas contribuyó a disminuir el deterioro de la rigidez y la resistencia. Esto condujo a mejorar la capacidad de disipación de energía. En efecto, los especímenes exhibieron una buena disipación de energía para ciclos hasta distorsiones de 0.006. La energía disipada acumulada se discute en la sección 4.3. Aunque los elementos de confinamiento no contribuyen sensiblemente a aumentar la resistencia, participan de manera decisiva para garantizar un comportamiento cíclico estable de las estructuras de mampostería confinada.

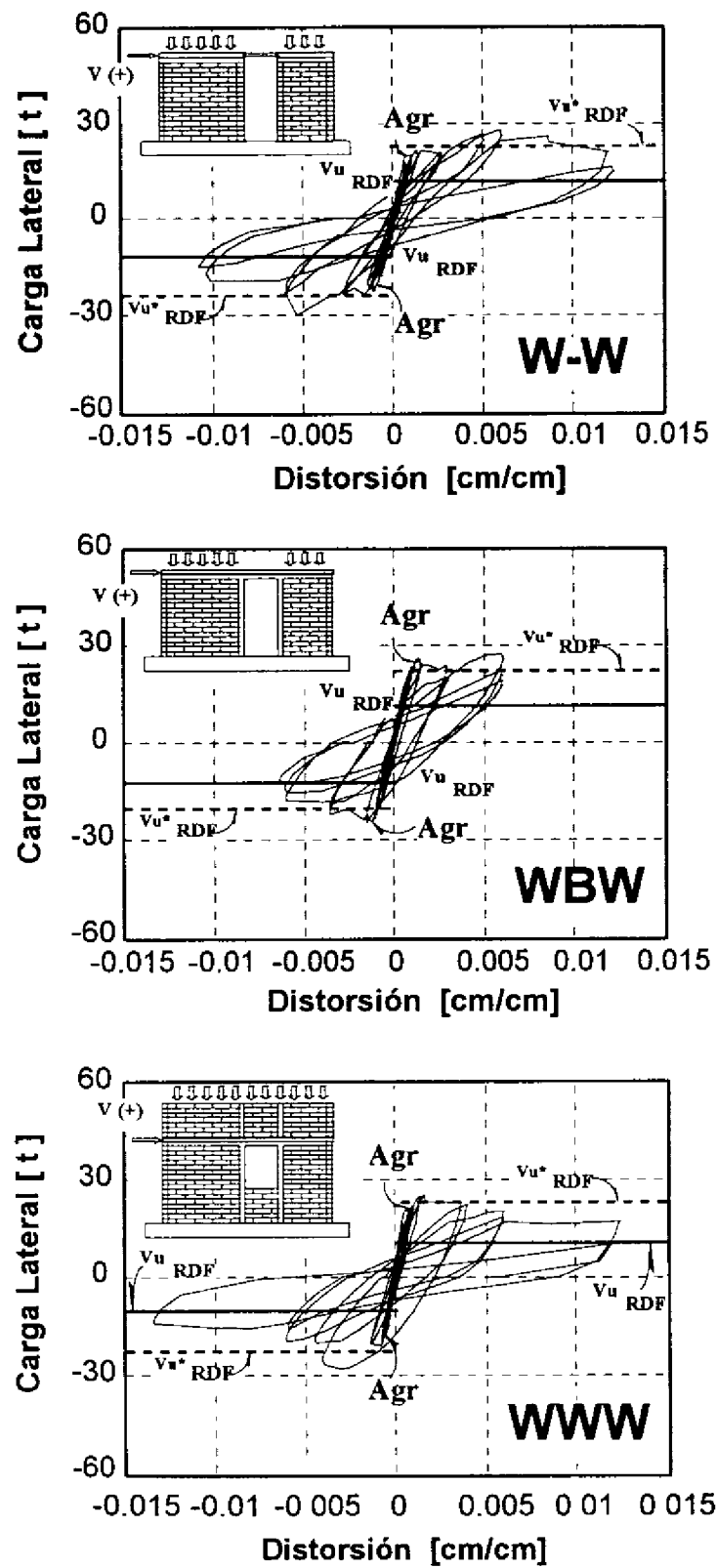


Figura 9 Carga Lateral - Distorsión (1 t = 9,81 kN)

Tabla 1 Cargas Laterales Medidas y Resistencias Teóricas

Modelo	$V_{u, RDF}$ [t]	$V^*_{u, RDF}$ [t]	V_y ¹	Cargas Laterales Medidas [t]			
				Ciclos Positivos		Ciclos Negativos	
				V_{agr} ²	V_{max} ³	V_{agr} ²	V_{max} ³
W-W	10.4	22.8	15.8 (0.08) ⁴	20.5 (0.10)	28.7 (0.60)	22.0 (0.12)	30.6 (0.54)
WBW	10.4	21.3	24.5 (0.20)	25.1 (0.12)	27.7 (0.60)	25.1 (0.12)	25.5 (0.15)
WWW	10.4	21.8	25.6 (0.14)	21.6 (0.07)	25.9 (0.16)	18.2 (0.05)	28.5 (0.31)

Nota: 1 t = 9.81 kN

¹ Carga lateral de fluencia correspondiente a la lectura en los deformímetros eléctricos.

² Cortante medida al inicio del agrietamiento diagonal.

³ Carga lateral máxima.

⁴ En paréntesis se presentan las distorsiones en porcentaje, asociadas a los diferentes fenómenos.

El esfuerzo medio de agrietamiento fue igual a 4.4 kg/cm² (0.43 MPa) que es aproximadamente igual a 45% del obtenido en las pruebas de muretes. Este valor coincide con lo considerado en la Ref. 3. Las resistencias de los modelos W-W y WBW se alcanzaron para valores de distorsión muy cercanos a 0.006; para WWW, la resistencia se alcanzó para una distorsión menor de 0.003. La cortante de agrietamiento y la máxima medida fueron superiores a la capacidad teórica $V_{u, RDF}$. Aun más, la resistencia teórica fue excedida prácticamente en todos los ciclos. La carga máxima fue 2.8 veces, en promedio, superior a la resistencia $V_{u, RDF}$. Las cargas de agrietamiento concordaron razonablemente con $V^*_{u, RDF}$. El comportamiento observado sugiere distorsiones entre 0.003 y 0.006 como valores máximos para este tipo de estructuras.

3.3 Deformación Angular de Tableros de Mampostería

Como se señaló en la sección 2.4, los modelos fueron instrumentados con transductores de desplazamiento sobre las diagonales principales de los tableros de mampostería y a lo largo de los cuatro castillos. La instrumentación fue diseñada para aislar la contribución de las deformaciones por cortante y por flexión en la deformación total de los especímenes. La deformación angular (por corte) de cada tablero se obtuvo como la suma del valor absoluto de las deformaciones de las diagonales. En la Fig. 10 se muestra la contribución de las deformaciones por corte y por flexión al desplazamiento total de WWW. De acuerdo al método seguido en el cálculo, en la contribución de la flexión se incluyen posibles rotaciones de cuerpo rígido y deslizamiento del refuerzo longitudinal de los castillos; sin embargo, durante el ensaye de WWW (y de W-W y WBW) no se detectaron signos de este tipo de comportamiento. Del dibujo es claro que a partir del ciclo 8, en el cual se agrietaron diagonalmente los muros de

mampostería, las deformaciones por cortante controlaron la respuesta. Esto es consistente con el daño registrado (sección 3.1). La curva carga lateral - deformación angular se incluye en la gráfica. Destaca la similitud con la curva carga lateral - distorsión de la Fig. 9. Para WBW, con diferente grado de acoplamiento, se obtuvieron los mismos resultados.

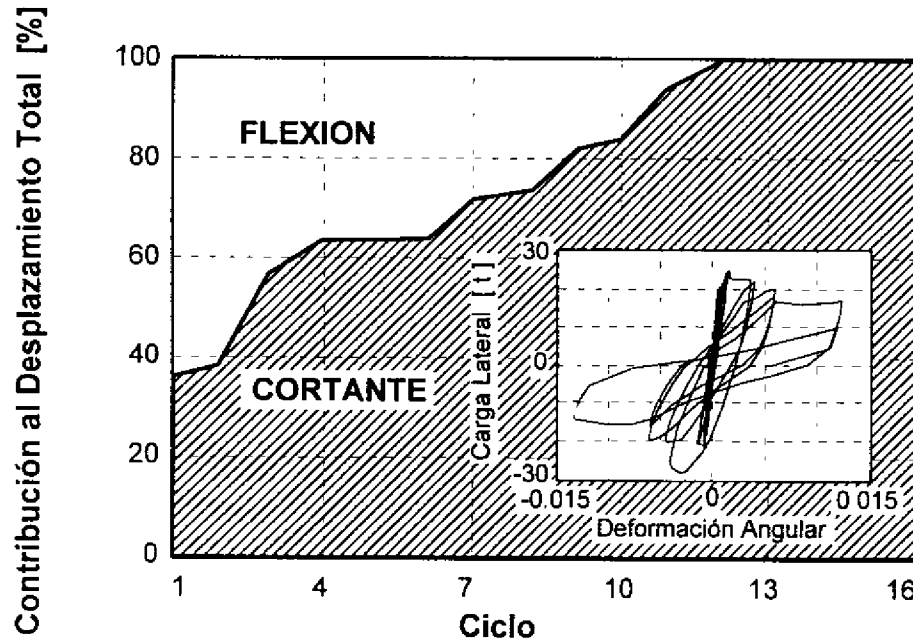


Figura 10 Contribución de las Deformaciones al Corte y Flexión en el Desplazamiento Total y Deformación Angular para el Modelo WWW (1 t = 9,81 kN)

3.4 Deformímetros Eléctricos

Un análisis detallado del comportamiento de las deformaciones registradas por los deformímetros eléctricos adheridos a refuerzo longitudinal y transversal de los especímenes arrojó los siguientes resultados (Ref. 2):

a. El acero longitudinal de castillos fluyó primero en las bases. En el extremo superior de los castillos intermedios (cerca de las dalas), se alcanzaron deformaciones plásticas cuando penetró el agrietamiento inclinado (ciclos a distorsiones de 0.006). En WWW el refuerzo longitudinal fluyó a la mitad de la altura de los castillos intermedios debido a la concentración de rotación en ese elemento arriba del pretil (ver Fig. 8).

b. Algunos estribos localizados en los extremos de los castillos fluyeron después de la formación del mecanismo cinemático y del consecuente agrietamiento inclinado en los castillos. Fuera de esa zona los estribos de los castillos permanecieron elásticos en todos los modelos.

c. El refuerzo longitudinal y transversal de las dalas permaneció elástico. En WBW se alcanzaron deformaciones del 90% de la de fluencia en el lecho inferior del refuerzo

de la dala sobre la abertura en la intersección con el castillo. Las deformaciones del acero de WWW fueron menores que en WBW debido a la mayor rigidez a flexión del sistema dala-losa-pretil.

d. El refuerzo de la losa permaneció en el intervalo elástico de comportamiento para todos los modelos. Este fenómeno es consistente con el nulo daño observado en las losas. El bajo nivel de deformaciones de la losa fue congruente con la magnitud de los desplazamientos medidos con los transductores colocados sobre la losa a lo largo de los modelos.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Envoltentes de Respuesta

Las envoltentes de respuesta máxima de los ciclos positivos se presentan en la Fig. 11. Las curvas correspondientes para los ciclos negativos mostraron un comportamiento similar. En las curvas se identifica el primer agrietamiento diagonal y la primera fluencia durante los ensayos. La primera fluencia se obtuvo de las lecturas de los deformímetros eléctricos instalados en el acero de refuerzo de castillos, dalas y losas. Se observa que el grado de acoplamiento tuvo un efecto significativo en la rigidez inicial. Para el modelo WWW, la rigidez secante, calculada para el primer ciclo con carga máxima a 18 t (177 kN), fue 53% mayor que la correspondiente para WBW y 68% mayor que la de W-W. En la gráfica puede notarse que la primera fluencia ocurrió antes que el agrietamiento diagonal inicial sólo para el modelo W-W. Esto se explica por mayores deformaciones por flexión en comparación con los

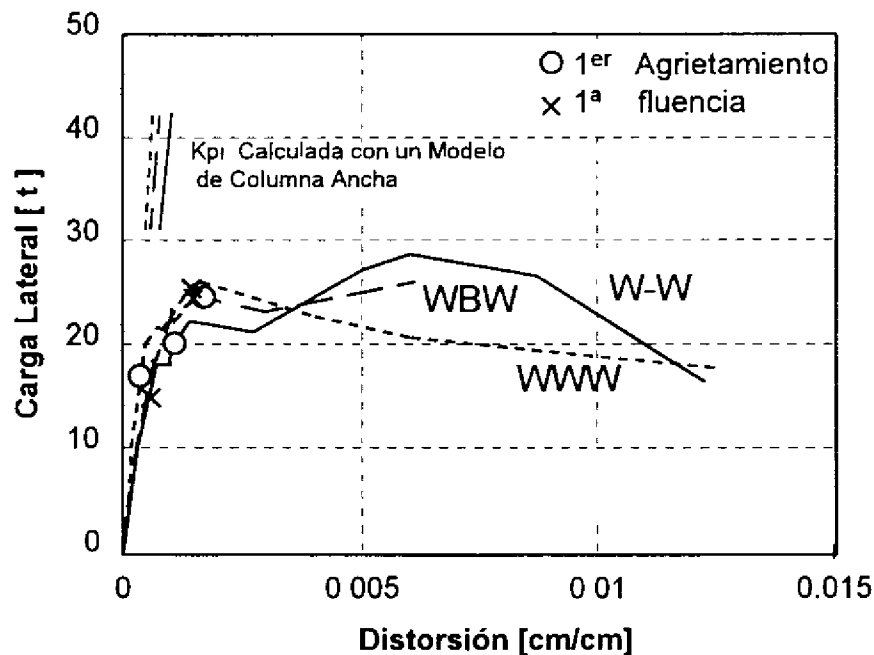


Figura 11 Envoltentes de Respuesta (1 t = 9,81 kN)

otros dos modelos, cuyo desempeño fue controlado por corte. De la gráfica, es clara la degradación de resistencia una vez formadas las fisuras en X (para la máxima carga lateral). En la gráfica se muestra la rigidez calculada para cada espécimen con un modelo de columna ancha en el que se usaron propiedades de la sección completa y las propiedades medidas de los materiales. Los valores calculados concuerdan bien con los medidos.

4.2 Degradación de Rigidez

La degradación de rigidez entre un ciclo y otro para cada uno de los modelos se estudió empleando el concepto de rigidez pico a pico, el cual se define gráficamente en la Fig. 12. En la misma gráfica se presentan las curvas rigidez pico a pico contra distorsión para los tres modelos. Las curvas de los especímenes son muy parecidas. Se observa un mayor deterioro de la rigidez para las primeras etapas de carga que para los últimos ciclos. Aun más, la degradación se acentuó en ciclos anteriores al agrietamiento diagonal; este efecto se atribuye al fisuramiento horizontal de los castillos (flexión) y al acomodo de tabiques. El mayor deterioro ocurrió en los ciclos a distorsiones de hasta 0.006; en ciclos a distorsiones más grandes, la rigidez permaneció casi constante y fue aproximadamente igual a 10% de la rigidez inicial. La rigidez disminuyó al aplicar ciclos a la misma deformación y al aplicar un nuevo nivel de distorsión. La degradación de rigidez es atribuida al agrietamiento y aplastamiento de los tableros y castillos.

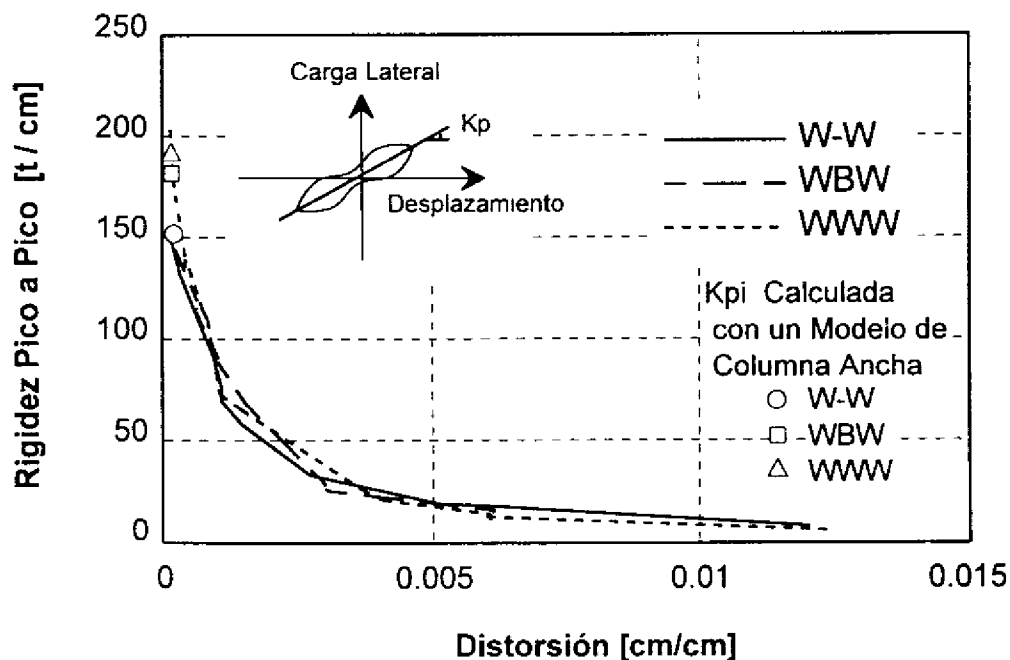


Figura 12 Degradación de Rigidez (1 t = 9,81 kN)

4.3 Energía Disipada

La energía disipada durante los ensayos fue calculada como el área encerrada por los lazos histeréticos de la curva cortante lateral - desplazamiento. La energía disipada total acumulada por los modelos se presenta en la Fig. 13. En general para los ciclos a distorsiones menores que 0.006 (ciclos 10 a 12), la energía disipada fue baja. La disipación de energía aumentó en los ciclos a distorsiones iguales a 0.012. Las características de disipación de energía de los especímenes con diferentes relaciones M/VL (W-W, WBW y WWW) fueron muy similares. La energía disipada por los modelos en cada ciclo se explica por el deslizamiento relativo de los bloques, y el aplastamiento de los tabiques y castillos descritos en la sección 3.1.

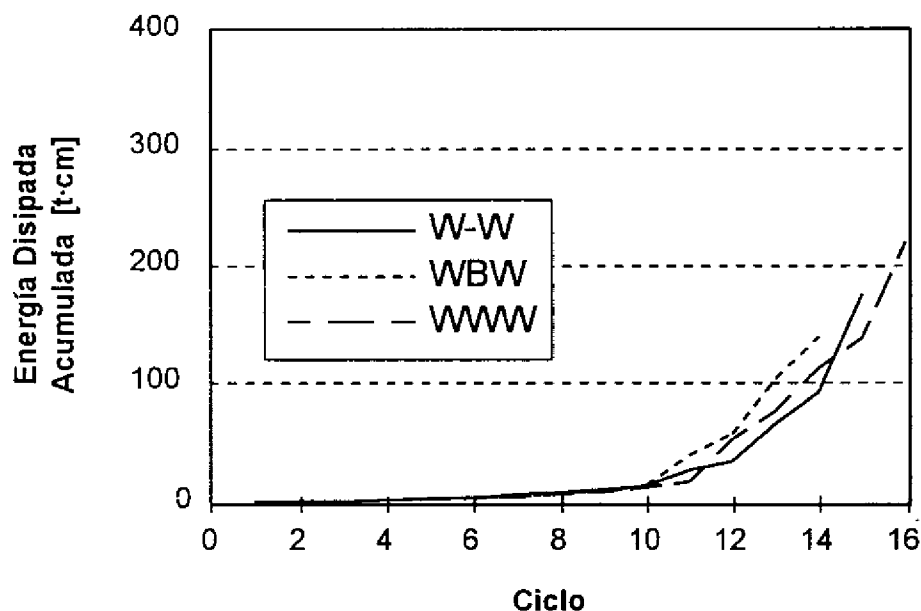


Figura 13 Energía Disipada por los Modelos (1 t = 9.81 kN)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos del ensaye de los tres modelos, se desarrollaron las siguientes conclusiones:

1. La relación M/VL claramente afectó el patrón de agrietamiento. Sin embargo, el modo de falla fue dominado por deformaciones al corte en los muros de mampostería y no fue modificado por el grado de acoplamiento.
2. Independientemente del grado de acoplamiento, las cortantes de entrepiso correspondientes al agrietamiento diagonal fueron similares en los tres modelos. La ecuación

de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería mostró una excelente correlación con las cargas de fisuramiento.

3. Las resistencias medidas fueron 180%, en promedio, más altas que las calculadas con las normas para mampostería con un factor de reducción de resistencia de 0.7. Las tres estructuras alcanzaron cortantes máximas semejantes, independientemente del grado de acoplamiento. Sin embargo, éste influyó en la distorsión para la cual se registró la cortante máxima.

4. Los ciclos de comportamiento histerético fueron estables hasta distorsiones de 0.006, el cual es un valor bajo comparado con el característico de estructuras de concreto reforzado detalladas adecuadamente. Para este nivel de desplazamientos, la zona reforzada con estribos a baja separación tuvo un desempeño aceptable. Estas características de la respuesta observada de estructuras de mampostería confinada, llevan a concluir que no se justifican reducciones importantes en las ordenadas espectrales elásticas.

5. Aunque la relación M/VL tuvo un efecto significativo en la rigidez inicial de los modelos, la tendencia en la degradación de rigidez durante la prueba fue similar para todos los modelos. La rigidez de las estructuras decayó de manera más rápida al inicio del ensaye y disminuyó progresivamente con la aplicación de mayores distorsiones.

6. El grado de acoplamiento no tuvo efecto en las características de disipación de energía.

5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados de esta fase experimental, se presentan las siguientes recomendaciones.

1. Un modelo de columna ancha se puede usar para estimar la rigidez elástica de estructuras de mampostería confinada.

2. En análisis refinados de construcciones de tres o más niveles se debe considerar el acoplamiento proporcionado por el sistema de piso y pretilas.

3. Puesto que las evidencias de daño en construcciones de mampostería de tres pisos o más indican que la planta baja es la más vulnerable y que la falla es por corte, se debe poner especial atención al dimensionamiento, refuerzo y detallado de los elementos confinantes. En particular, los castillos deben construirse con las mayores dimensiones posibles de manera que tengan una mayor resistencia al agrietamiento inclinado y confinen mejor el tablero de mampostería.

4. Para muros de tabique, se recomienda reforzar los extremos de los castillos con estribos colocados a cada hilada o a $d_c/2$ en una longitud de $3d_c$, donde d_c es el peralte del castillo. Con este refuerzo se pretende aumentar el confinamiento del concreto en esta zona del castillo.

5. En muros con ventanas, los castillos deben reforzarse del modo anterior en las esquinas de la abertura.

6. Se recomienda dentar los muros para incrementar la trabazón de los tabiques del tablero con el concreto de los castillos.

7. En un análisis refinado, se deberá revisar que la distorsión no exceda de 0.005 suponiendo una rigidez igual al 10% de la rigidez inicial calculada para la estructura.

6. REFERENCIAS

1. Paulay, T., y M.J.N. Priestley, "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1992, 744 pp.
2. Sánchez, T.A., et al., "Respuesta de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Grados de Acoplamiento a Flexión," CENAPRED, Informe ES-02-91, dic 1991, 106 pp.
3. Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., mar 1989, 19 pp.
4. Departamento del Distrito Federal, "Reglamento de Construcción para el Distrito Federal," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., jul 1987, 100 pp.
5. Flores, L., y S.M. Alcocer, "Manual del Programa AD: Análisis de Datos," CENAPRED, Informe Interno, 1994.
6. Hernández, O., y R. Meli, "Modalidades de Refuerzo para Mejorar el Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería," Serie No. 382, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., dic 1976, 31 pp.