

COMPORTAMIENTO DE LA VIVIENDA EN MÉXICO DURANTE EL SISMO EL MAYOR-CUCUPAH DEL 4 DE ABRIL DE 2010¹

Arturo Tena Colunga², Joel Martínez Martínez³, Alonso Gómez Bernal⁴

Resumen: Según datos oficiales, durante el sismo del 4 de abril de 2010 se dañaron en México más de 3,000 viviendas, de las cuales el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) de México aportó recursos por 112.1 millones de pesos y el Gobierno del Estado de Baja California 82.3 millones de pesos para atender alrededor de 2,818 viviendas afectadas. En la ciudad y el Valle de Mexicali predominan las casas de uno o dos niveles como vivienda. El daño en conjuntos habitacionales de la ciudad de Mexicali fue extendido. En algunos desarrollos, más del 50% de sus viviendas se dañaron en distintos grados, desde leve hasta severos. En el Valle de Mexicali predominan dos tipos de vivienda de autoconstrucción: (1) casas de un nivel con base en muros de adobe de gran espesor, con techumbres ligeras de dos aguas con base en armaduras de madera simplemente apoyadas sobre los muros de adobe, con o sin losa de cimentación y, (2) casas de un nivel, con base en muros de mampostería de bloque hueco de concreto sin refuerzo ni confinamiento, con sistema de piso de vigueta y bovedilla o losa de concreto reforzado plana o a dos aguas, y que por lo general cuentan con una losa de concreto reforzado como cimentación. Las deficiencias o ausencia de confinamiento en los muros de la vivienda en la ciudad y el valle de Mexicali fueron notables, y en muchos casos fueron responsables de que el daño haya sido tan extendido o severo. En particular, se observó una mala práctica de confinamiento en aberturas para puertas y ventanas, así como una inadecuada preparación de los extremos de los muros (dentarlos), para que al momento del colado con castillos (elementos confinantes verticales de la mampostería fabricados con concreto reforzado) y dadas (elementos confinantes horizontales de la mampostería fabricados con concreto reforzado), trabajen como un conjunto. Por ello, es necesario difundir con mayor vigor, en todos los ámbitos de la ingeniería civil, cuáles son las prácticas correctas de confinamiento en mampostería para vivienda. Otro aspecto no menos relevante es concientizar a arquitectos e ingenieros sobre la importancia de proporcionar una densidad de muros razonable en ambas direcciones ortogonales en los proyectos de vivienda, dado que la práctica observada indica que, por requisitos arquitectónicos (iluminación, ventilación, circulación), normalmente se proporciona una densidad de muros notablemente menor en la dirección de las fachadas que en la dirección ortogonal a éstas, lo cual hace muy vulnerables a las viviendas en la dirección de las fachadas.

Palabras clave: diafragmas flexibles, diafragmas rígidos, estructuras sin diafragma, mampostería confinada, marcos de concreto no dúctiles, muros de ladrillo, muros de bloque de concreto, muros de adobe, techumbres ligeras, vivienda.

SEISMIC BEHAVIOR OF HOUSING IN MEXICO DURING THE APRIL 4, 2010 EL MAYOR-CUCUPAH EARTHQUAKE

Abstract: According to Mexican government official data, more than 3,000 houses were damaged during the April 4, 2010 earthquake. The Mexican National Fund for Disasters (FONDEN) contributed with 112.1 million pesos to assist people directly affected for the disaster, whereas the Government of the State of Baja California contributed with 82.1

¹Artículo recibido el 30 de abril de 2014 y aceptado para publicación el 11 de diciembre de 2014

²Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 México, D.F., e-mail: atc@correo.azc.uam.mx

³Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, Facultad de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria, Mexicali, Baja California, e-mail: joel.martinez@isismicaabc.com

⁴Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 México, D.F., e-mail: agb@correo.azc.uam.mx

million pesos. With these resources 2,818 affected housing were attended. In the city and the Valley of Mexicali housing is dominated by one and two-story houses. The damage observed in housing complexes in the city of Mexicali was extended. More than 50% of existing houses were damaged in some housing complexes. In the valley of Mexicali there are two dominant modalities of self-construction housing: (1) one-story houses made with thick adobe walls with light truss-based gable wood roofs simply supported on the adobe walls, with or without a RC foundation slab and, (2) one-story houses made with unreinforced masonry walls (made with hollow concrete blocks), with precast beam and block floor system (with horizontal or gable roofs) which usually have a RC foundation slab. Absence and/or deficiencies in the confinement of masonry walls were very evident, and such deficiencies were responsible for the widespread damage observed in housing. In particular, bad practices were observed in the confinement of window and door openings. Inadequate preparation for the walls (wall tooting) was observed to cast them adequately with the confining elements (RC tie-columns and bond beams), so they work together to carry lateral loads. For this reason, in order to reduce the vulnerability of such structures in future earthquakes, it is very important to disseminate in all areas of civil engineering, with greater vigor, what the good practices for confining correctly masonry walls are. Another relevant action is to make understanding architects and engineers about the importance of providing, in housing projects, a reasonable and balanced wall density in the two main orthogonal directions. The observed practice is that, for architectural requirements (lighting, ventilation and circulation), it is common that the wall density provided in the direction parallel to the façade is much smaller than at the orthogonal direction. This design practice makes this type of housing very vulnerable in the direction parallel to the façade.

Keywords: adobe walls, brick walls, concrete block walls, confined masonry, flexible diaphragms, housing, light roofs, ordinary RC moment frames, rigid diaphragms, structures without diaphragms.

INTRODUCCIÓN

El domingo 4 de abril del 2010 a las 15:40 horas ocurrió el sismo El Mayor-Cucupah de magnitud $M_w = 7.2$ afectando a la ciudad pero principalmente al Valle de Mexicali. La zona de ruptura fue bilateral abarcando casi la totalidad de la sierra El Mayor-Cucupah. El epicentro, de acuerdo con la Red Sísmica del Noreste de México (RESNOM), se localizó a 26 km al Suroeste del poblado de Ciudad Guadalupe Victoria y a 60 km al Sur-Sureste de la ciudad de Mexicali (115.27° de longitud Oeste y 32.31° de latitud Norte), en la sierra El Mayor-Cucupah, y al Noroeste de la falla denominada Laguna Salada (Figura 1), con una profundidad variable entre 4 y 10 km.



Figura 1: Mapa de las principales fallas de la región Norte de Baja California, localización del epicentro de acuerdo con RESNOM y estaciones acelerométricas, triángulos azules (Grupo RESNOM 2002).

El movimiento fue registrado por muchas estaciones sísmicas, en especial las de la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM) del CICESE, con doce estaciones a una distancia del epicentro variable entre 10 y 140 km, seis de ellas a menos de 35 km. Estas seis estaciones se localizan sobre los sedimentos del Valle de Mexicali, donde se midieron aceleraciones máximas de $a_{N-S} = 527 \text{ cm/s}^2$, $a_{E-O} = 404 \text{ cm/s}^2$ y $a_v = 799 \text{ cm/s}^2$ y desplazamientos de $u_{N-S} = 32.8 \text{ cm}$, $u_{E-O} = 20.1 \text{ cm}$ y $u_v = 14.1 \text{ cm}$ (estación M. de Ocampo, Munguía et al. 2010). Además, una gran cantidad de estaciones acelerométricas también registraron el evento en el territorio estadounidense. El valor de la aceleración horizontal más alta fue de 580 cm/s^2 y se registró en El Centro, California, en la estación 5058 McCabe School; esta estación se localiza a 61.8 km del epicentro y a 22 km de la falla.

El sismo del 4 de abril de 2010 afectó a la vivienda de diversas poblaciones del Valle de Mexicali. Además de la ciudad de Mexicali, se presentaron daños en pueblos y ejidos aledaños de los estados de Baja California y Sonora, así como en los condados vecinos de California, Estados Unidos, principalmente en Calexico, El Centro y el Valle Imperial (EERI, 2010).

En este artículo abordamos con mayor detalle los daños presentados en vivienda en territorio mexicano, dado que es la de mayor interés para México y en la cual los autores de este trabajo tuvimos oportunidad de observar y evaluar personalmente. Sin embargo, también se destacan algunos aspectos relevantes de los daños observados en la vivienda en territorio estadounidense, a partir de lo reportado por su equipo de expertos (EERI, 2010).

CIUDAD DE MEXICALI

Las viviendas que predominan en la ciudad de Mexicali son de uno o dos niveles, con base en muros de bloque de concreto (y en menor cantidad, muros de ladrillo), con sistema de piso con base en vigueta y bovedilla, sobre todo en pisos intermedios. Para los techos o cubiertas, se usan indistintamente techos de vigueta y bovedilla o techos de dos aguas con base en armaduras y cubierta de madera con impermeabilizante o losas de concreto reforzado.

Las cimentaciones en las viviendas de uno y dos niveles son de tipo superficial, pero varían de acuerdo con el nivel socioeconómico de sus moradores. Por ello, existen construcciones que se desplantan directamente sobre la superficie del terreno, previo un despalme de 10 a 20 cm. En otros casos, se emplea una losa o firme de concreto en toda el área de la vivienda y a partir de esta losa o firme, se levantan los muros. En casas con muros de bloque (o ladrillo) suele colocarse una dala para recibir a los muros. Debido a que este tipo de solución de cimentación superficial es muy flexible, se han presentado agrietamientos en muros y pisos, dado que el estrato de apoyo, que es un estrato arcilloso desecado, es expansivo (Rangel et al., 2010).

Existe un menor número de edificios de departamentos o condominios en la ciudad de Mexicali, normalmente estructurados con base en marcos de concreto reforzado y muros divisorios de mampostería de bloque de concreto. La cimentación de los edificios de tres niveles o mayores se ha resuelto mediante losas rigidizadas con contra-trabes, con o sin pilas o pilotes. El comportamiento de este tipo de solución de cimentación ha sido adecuado, al menos en condiciones estáticas, disminuyendo de manera importante el agrietamiento de los muros por el efecto expansivo del suelo (Rangel et al. 2010).

Según datos oficiales, durante el sismo del 4 de abril de 2010 se dañaron más de 3,000 viviendas, de las cuales el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) aportó recursos por 112.1 millones de pesos y el Gobierno del Estado de Baja California 82.3 millones de pesos para atender alrededor de 2,818 viviendas afectadas (FONDEN 2010). En general, hubo vivienda particular de autoconstrucción dañada en zonas de la ciudad, como se ilustra más adelante, pero la mayor cantidad de daño en vivienda se concentró en desarrollos habitacionales. En algunos desarrollos más del 50% de sus viviendas se dañaron. A continuación se destacan y discuten casos típicos y algunos casos puntuales de mal comportamiento estructural de vivienda observados en el valle de Mexicali.

Multifamiliares Monte Albán

Estos multifamiliares, cuyo diseño corresponde a los años sesenta, se encuentran ubicados en Blvd. Río Nuevo, en la planicie de inundación del río Nuevo, y ya habían sufrido daños en sismos pasados (Campos, 1974). Están compuestos por un conjunto de ocho edificios de cuatro niveles y planta alargada con relación de aspecto (lado mayor entre lado menor) mayor de 4 (Figuras 2 y 3a), construidos con base en marcos no dúctiles de concreto reforzado no desligados propiamente de muros de mampostería de bloque, recubiertos en sus fachadas con cintillas

cerámicas y celosías (Figura 3a). En la dirección larga se construyeron muros dentro del marco que se dejaron a media altura, formando columnas cortas (Figura 4a). En la dirección corta se tienen muros de concreto que rigidizan esa dirección (Figura 3b). Cada dos edificios se encuentran comunicados y conectados por un cubo rígido de escaleras de concreto reforzado, las cuales están ligadas estructuralmente a los edificios y, por ello acoplan la respuesta de los mismos (Figuras 2 y 3b).



Figura 2: Vista aérea de los multifamiliares Monte Albán (Google Earth 2010).



a)



b)

Figura 3: Vista general de los multifamiliares Monte Albán.

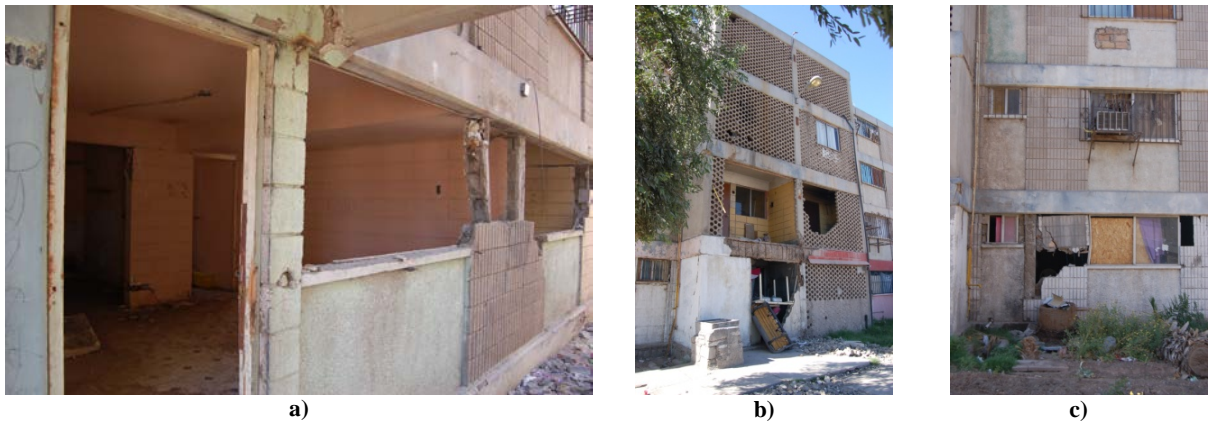


Figura 4: Daño típico observado en los multifamiliares Monte Albán.

Si bien los edificios no colapsaron totalmente, los daños estructurales fueron muy severos, aunque no uniformes, pues hubo pares de edificios considerablemente más dañados que otros, a pesar de estar separados unas cuantas decenas de metros entre sí. Además del desprendimiento de celosías (Figuras 3a y 4b), existieron agrietamientos y fallas por cortante en los muros de bloque que actuaron como diafragmas, sin ser diseñados para ello, principalmente en muros aledaños a aberturas para ventanas (Figura 4c). La falta de desligue de muros divisorios de bloque y la presencia de aberturas para ventanas también propició que se presentara el fenómeno de columna corta (Figuras 4a, 4c y 5), sobre todo dado el pobre refuerzo por cortante con que contaban las columnas, ya que los estribos estaban separados aproximadamente entre 25 y 30 cm (Figuras 5b, 5c y 5d) y los dobleces eran simples (no se remataron a 1350, como exigen los reglamentos en la actualidad), un detallado típico de la época de construcción. Este tipo de falla pone en riesgo la integridad y estabilidad de los edificios, ya que las columnas perdieron su capacidad de carga. Entonces, los edificios fueron soportados principalmente por los muros divisorios de mampostería, los cuales no fueron diseñados para tomar carga. Esto puso en riesgo la seguridad de los usuarios, ya que con algún otro movimiento sísmico podría ocasionarse el colapso.

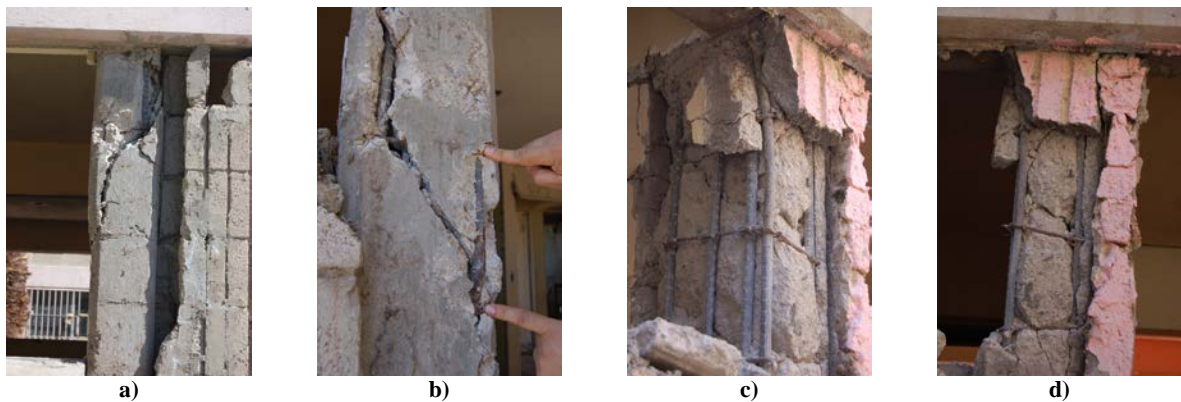


Figura 5: Columnas cortas observadas en la planta baja de los multifamiliares Monte Albán.

Se presentaron numerosos agrietamientos en los muros divisorios interiores, unos por deslizamiento/desligue con las vigas superiores, otros por asentamiento del terreno, otros más por tomar de manera repentina la carga vertical y unos más por cortante (Figura 6a). Incluso, se observaron fallas por cortante y por pérdida de adherencia del refuerzo en algunas vigas en su extremo cercano al nudo viga-columna (Figura 6b). Al parecer, en una rehabilitación previa, en algunos edificios se adicionó un marco interior de acero (Figura 6b), con poca eficiencia para prevenir los daños en la estructura original.

En las traveses también se observaron daños en las conexiones (Figura 7a), y también se observó daño en el acero de refuerzo por pérdida de recubrimiento y oxidación (Figura 7b) lo que debilita gradualmente la resistencia de las vigas hasta que pierden por completo su resistencia.

Otro daño importante que se observó en los edificios se debió al cabeceo que aparentemente experimentaron, ya que fue evidente que en un extremo se elevaron (Figura 8a), y en el otro extremo se hundieron (Figura 8b). Este efecto también aumenta los esfuerzos en los elementos estructurales por el efecto carga axial-deformación ($P-\Delta$).



Figura 6: Daño típico observado en el interior de los departamentos.



Figura 7: Daño típico observado en traveses y conexiones viga-columna.

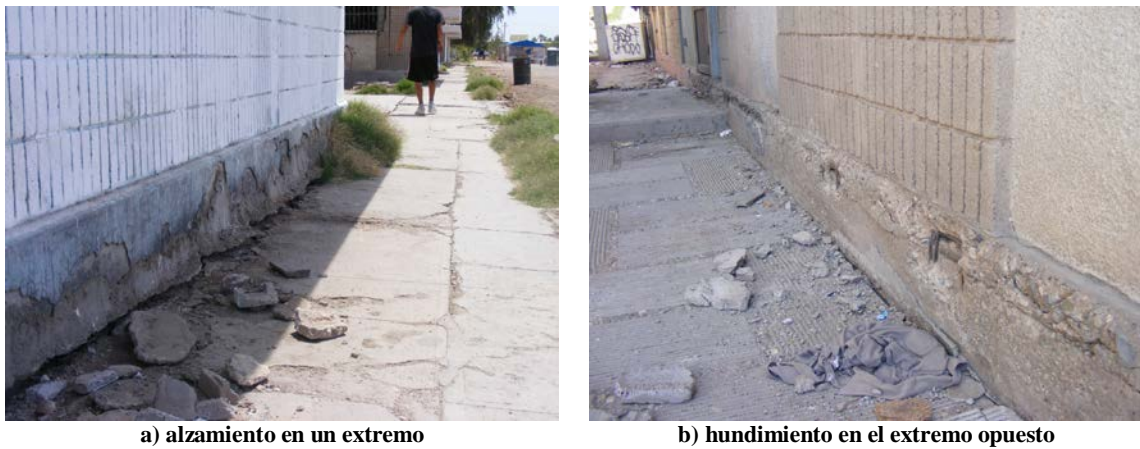


Figura 8: Daño típico observado aparentemente por cabeceo.

En síntesis, el daño presentado en los multifamiliares Monte Albán fue muy severo y extendido, por lo que no estaban en condiciones de ser ocupados, ya que ponían en riesgo la vida de los ocupantes. En este sentido fue el dictamen que se emitió a la autoridad por parte de profesores de la Universidad Autónoma de Baja California, quienes también recomendaron su demolición a la brevedad, aunque también se pudo tomar la decisión de rehabilitarlos estructuralmente toda vez que fueran desalojados, porque el daño, aunque severo, aún era reparable de manera razonablemente económica. Al tiempo de la visita del grupo de profesores de la UAM (Universidad Autónoma Metropolitana), la gran mayoría de los edificios se encontraban parcialmente evacuados, pero aún existía gente que habitaba sus departamentos, principalmente departamentos de los niveles superiores, que presentaron menor daño (Figuras 3a y 4b). Estos edificios fueron desalojados y el ayuntamiento de la ciudad indemnizó a sus habitantes y logró evacuarlos del sitio demoliendo las escaleras y suspendiendo los servicios. Actualmente, ya se demolieron los edificios.

Vivienda de autoconstrucción

En la vivienda de autoconstrucción el sistema estructural común ante cargas gravitacionales y laterales es con base en muros de mampostería confinada. Se presentaron daños en vivienda particular de autoconstrucción en distintas zonas de la ciudad y, como era de esperarse, se presentaron más daños en la vivienda de gente de bajos recursos que en la vivienda de clase media o alta. Sin embargo, sí se presentaron algunos daños en vivienda de clase media, como el caso que se discute a continuación y que ilustra algunas deficiencias constructivas en vivienda con base en mampostería confinada de bloque de concreto hueco que no dispone de acero de refuerzo ni mortero de relleno.

La vivienda en cuestión tiene dos plantas y un mezzanine anexo (Figura 9a). La planta baja está construida con base en muros de mampostería confinada de bloque de concreto hueco de dimensiones 15x20x40 cm (ancho, alto y largo) sin relleno y sin refuerzo, así como de muros confinados de ladrillo recocido de 17x7x20 cm (ancho, alto, largo) ubicados en la dirección perpendicular a los muros de bloque. La planta alta está construida con base en muros de mampostería confinada del mismo bloque de concreto hueco anteriormente descrito. El mezzanine tiene una estructuración mixta y cuenta con cuatro columnas (25x25 cm) y traveses (20x40 cm) de concreto reforzado, con detallado no dúctil, además de muros de bloque de concreto en la parte superior. La losa de entrepiso es plana de concreto reforzado y la cubierta o techo es con base en madera.

En general, la vivienda presentó agrietamientos prácticamente en todos sus muros de planta baja, principalmente en los muros de bloque de concreto hueco sin relleno y sin refuerzo (Figura 9). El daño también se presentó en elementos no estructurales como puertas y ventanas, debido a las distorsiones laterales experimentadas por la vivienda (Figura 9).



Figura 9: Daños observados en vivienda particular de autoconstrucción de interés medio.

El daño observado se debe en parte a que la estructura estuvo sometida a grandes fuerzas laterales que ocasionaron tensiones diagonales más allá de la capacidad de los muros. Sin embargo, existen al menos tres aspectos relevantes que fomentaron su mal desempeño: a) la vivienda tenía una baja densidad de muros en la dirección de la

fachada, en parte por la presencia de aberturas para puertas y ventanas (Figura 9a); b) la mayoría de los muros dañados son de bloque hueco, sin ningún tipo de refuerzo o relleno, por lo que disponen de un área reducida para resistir fuerzas cortantes de importancia y; c) aunque los muros de bloque eran aparentemente “confinados” por castillos y dalas, de los daños se aprecia que en realidad los muros de bloque no se prepararon adecuadamente en sus bordes (escalonarse entre hiladas o cortarse en forma de dientes de sierra) de manera que al colarse los castillos y dalas trabajaran como una sección monolítica, sino que sólo colindan a tope con los castillos, por lo que trabajaron más como muros diafragma y los castillos y dalas entonces forman marcos no dúctiles muy flexibles que interactúan con los muros de una manera muy distinta a como se comporta un muro de mampostería bien confinado. Es por esta última razón por la cual se observaron distorsiones apreciables en los muros que seguramente rebasan la distorsión permisible establecida por el Reglamento de Construcciones de Baja California, que es de 0.004 veces la altura del muro o 1.5 cm.

En la Figura 9b se observa el daño presentado en uno de los muros de fachada, el cual quedó prácticamente destruido y en el que se aprecia claramente que el castillo y el muro eran elementos estructuralmente independientes. En la Figura 9c se muestra la falla de un castillo en su extremo y que tiene el acero de refuerzo expuesto, propiciado en parte por la presencia del hueco de la abertura de la ventana, así como por la distorsión generada en el entrepiso; además, también es evidente la rotación del nudo.

En las Figuras 10a y 10b se muestra la vista interior del muro de fachada, donde se observa claramente que fallaron por tensión diagonal (cortante) y que el muro trabajaba como diafragma y no como muro confinado, ya que se aprecia claramente su desligue con el castillo, que funcionó más bien como la columna de un marco. Además, en la Figura 10b se puede observar el comportamiento del muro lateral ortogonal al de fachada, en el cual se observan claramente las grietas de desligue entre el muro y el castillo y dala, que funcionaron más como un marco.

En las Figuras 11a y 11b se aprecia claramente también, en los muros interiores que corren en dirección perpendicular al de fachada, las grietas que evidencian el desligue existente entre los muros y los supuestos castillos y dalas. En la Figura 11c se presenta la exposición del acero de refuerzo en uno de los nudos de la unión castillo-dala de la vivienda, el cual falló, aunque de una manera menos espectacular que el mostrado en la Figura 9c.



Figura 10: Daño observado en el muro de fachada visto desde el interior de la vivienda.

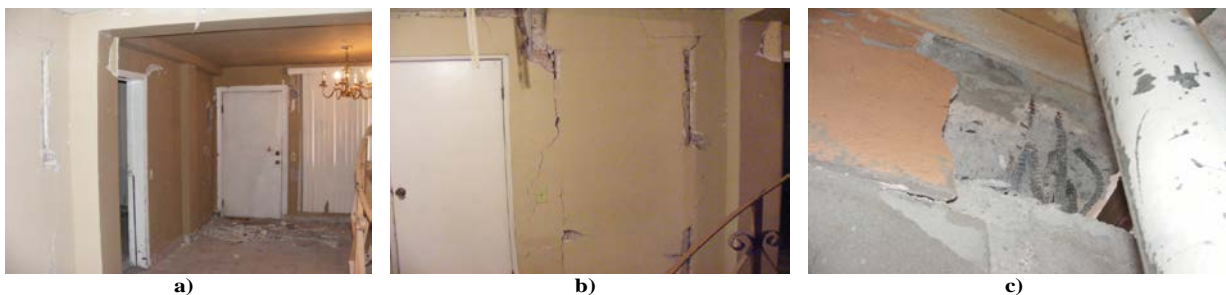


Figura 11: Daños observados en el interior de la vivienda.

Desarrollos habitacionales

La mayor cantidad de daño en vivienda se concentró en desarrollos habitacionales; de hecho, en algunos desarrollos más del 50% de sus viviendas se dañaron. Lamentablemente, muchos de estos desarrollos habitacionales son relativamente recientes.

Aunque existen particularidades, en general muchas de las casas habitación dañadas tienen en común ser de dos niveles, estar estructuradas con base en muros confinados (deficientemente) con base en bloques de concreto de 15x20x40 cm o de 12x20x40 cm que carecen de refuerzo y de mortero de relleno, utilizar vigueta y bovedilla como sistema de piso y emplear una losa de concreto reforzado superficial como cimentación. La densidad de muros en la dirección de la fachada (dirección corta) es menor que en la dirección perpendicular (dirección larga), sobre todo por la presencia de aberturas para puertas y ventanas. Algunos de los muros divisorios de la vivienda son de estructura ligera, con base en poste metálico cubierto con hojas cartón de yeso. Por motivos arquitectónicos, es común que en la fachadas de las casas sobresalga el segundo piso, el cual está soportado por un marco de concreto reforzado en planta baja (Figuras 12a y 14a).

Uno de los casos más dramáticos es el de la vivienda que denominaremos como Vivienda A (Figuras 12 y 13), donde todos sus muros de bloque (15x20x40 cm) del primer nivel en el sentido corto (fachada) fallaron completamente por cortante, en un mecanismo tipo columna corta en los muretes entre aberturas de ventanas, favorecido por la aparentemente baja adherencia desarrollada entre los bloques y las juntas de mortero (Figura 12) y por la falta de un adecuado confinamiento de las aberturas por medio de castillos adicionales, conforme establecen las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004 2004). De hecho, aproximadamente el 75% de los muros en la dirección larga también se dañaron seriamente (Figura 13c), por lo que la vivienda no tenía la resistencia suficiente para soportar cargas laterales ni cargas gravitacionales y se corría el riesgo inminente de que la vivienda colapsara (Figuras 12 y 13). En la Figura 13a se muestra el daño que sufrió la trabe del marco de concreto de fachada, el cual es resultado del exceso de deformación del marco, así como del excesivo esfuerzo cortante. Como es común, la zona de escaleras resultó uno de los sitios donde se concentró más daño (Figura 13b).



Figura 12: Daño severo (colapso incipiente) observado en la Vivienda A.



Figura 13: Detalles del daño (colapso incipiente) observado en la Vivienda A.

Otra casa idéntica a la anterior es a la que denominaremos como Vivienda B (Figuras 14 a 16), que a pesar de estar ubicada en la misma zona residencial, desarrolló un menor nivel de daño, aunque ciertamente muy grave. En este caso se aprecian tanto grietas por deslizamiento en las juntas cercanas a las dalas (Figura 14a), como por tensión diagonal en los muros de la fachada frontal (Figuras 14a y 14b). De hecho, del agrietamiento observado en el muro de la izquierda de la fachada frontal, se aprecian grietas verticales y horizontales que marcan la separación de los castillos y de la dala con el muro (Figura 14a), lo que indica claramente que no trabajaron propiamente en conjunto como mampostería confinada, sino como un muro diafragma dentro de un marco con elementos de concreto de pobres dimensiones, seguramente favorecido por un deficiente proceso constructivo, donde no se dentaron los bloques para que, al colarse castillos y dalas, se formaran llaves de corte que los hicieran trabajar como un conjunto.

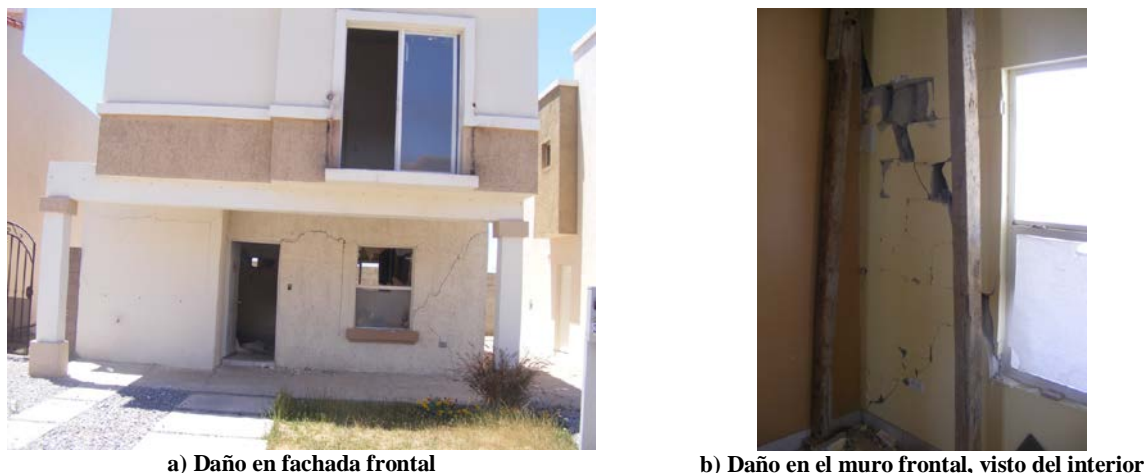


Figura 14: Daño observado en la fachada frontal de la Vivienda B.

Como lamentablemente ya es una mala práctica recurrente en vivienda de mampostería confinada, las aberturas para ventanas carecen de un adecuado confinamiento con castillos adicionales que inhiban o restrinjan la penetración de las grietas por cortante, y por ello estas grietas atraviesan completamente el murete del lado izquierdo de la fachada frontal (Figuras 14a y 14b).

Las deficiencias en el adecuado confinamiento de los muros son también evidentes en los muros de la fachada posterior (Figura 15) y en muros interiores (Figura 16), y esto favoreció que el daño por cortante y explosivo fuera más severo.

Todos los muros de planta baja en el sentido corto (paralelos a las fachadas) de la Vivienda B sufrieron daño muy severo (Figuras 14 a 16), por lo que no disponían de reservas de resistencia suficientes como para seguir soportando cargas laterales de importancia. Los muros en la dirección perpendicular (o larga) sufrieron daños de

menor severidad; sin embargo, ya que las viguetas están soportadas en los del sentido corto, la estabilidad de la vivienda depende de la resistencia de esos muros, por lo que la vivienda estuvo en un estado de equilibrio inestable que no garantizaba su estabilidad ante la acción de una réplica de importancia.



a) Daño en la fachada posterior



b) Daño en el muro posterior, visto del interior

Figura 15: Daño observado en la fachada posterior de la Vivienda B.



a) Daño en el muro de escaleras



b) Daño en muro interior

Figura 16: Daño observado en la fachada posterior de la Vivienda B.

La Vivienda C cuenta con idéntica estructuración y se ubica en la misma zona, y por ello presentó daños muy similares a las dos anteriores. Los daños severos se concentraron en los muros que se encuentran en la dirección corta en la planta baja (Figura 17) y se observaron algunos daños moderados en algunos muros de la planta alta. Del daño presentado en los muros de planta baja, además de los agrietamientos por tensión diagonal, son también evidentes los siguientes dos aspectos: a) los muros trabajaron más como muros diafragma que como muros confinados, pues son claras las agrietamientos verticales que deslindan o separan claramente al muro del supuesto castillo (Figuras 17a, 17c y, sobre todo, 17d) y, b) se desarrolló una adherencia insuficiente entre los bloques de concreto y las juntas de mortero horizontales (“bed joints”), lo que fomentó que se presentaran deslizamientos horizontales a lo largo y alto de los muros. Los muros en la dirección larga (perpendicular a la fachada) sufrieron daños de menor intensidad; sin embargo, dado que las viguetas están soportadas en los muros del sentido corto, la estabilidad de esta vivienda ante cargas verticales y laterales estuvo también en serio predicamento.

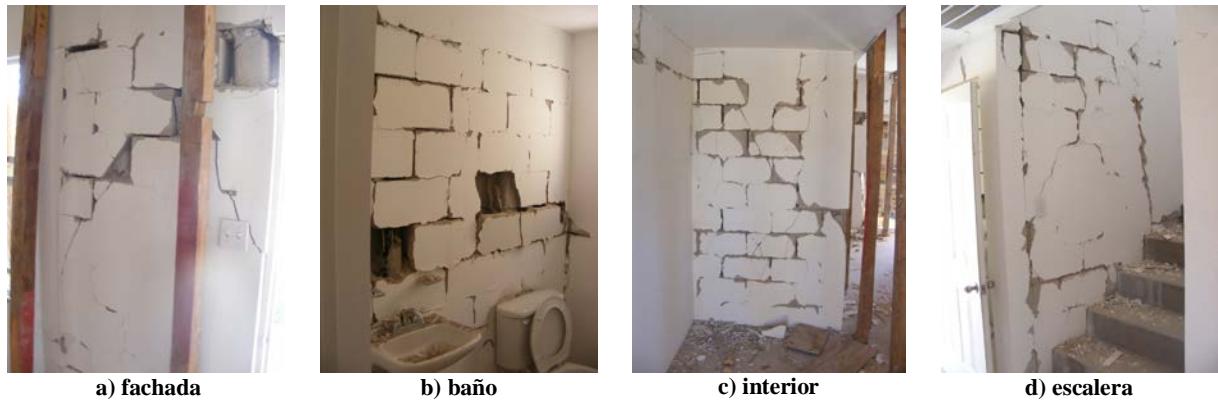


Figura 17: Daño observado en los muros en la dirección corta de la Vivienda C.

Otro modelo de vivienda tipo que sufrió daños importantes, aunque menos severos que los anteriormente descritos, es el representado por las Viviendas D y E (Figuras 18 a 20), construida con base en muros de bloque de concreto de 12x20x40cm que carecen de refuerzo y de mortero de relleno. Como se observa en la vivienda D, el agrietamiento por tensión diagonal en la fachada frontal fue moderado en la zona de las aberturas de ventana y no progresó hacia el hueco o abertura (Figuras 18a y 18b). El daño observado en la fachada posterior (no mostrado) fue similar y en uno de los muros laterales se observó el deslizamiento de una junta horizontal en su tercio inferior (Figura 18c).



Figura 18: Daño observado en la Vivienda D.

En la vivienda E se presentó un daño similar por tensión diagonal en los muros de la fachada frontal (Figura 19) y posterior (Figura 20a). Sin embargo, en la fachada frontal se aprecia que, en este caso, el daño fue más severo en el segmento de muro colindante con la abertura para la puerta (Figura 19b), debido a la ausencia de un castillo que confinara propiamente a este hueco, como lo establecen claramente las NTCM-2004 (2004), lo que desafortunadamente también es un defecto de confinamiento cuya práctica está muy extendida en la vivienda que se construye en el país, tanto en la formal, como en la de autoconstrucción. De hecho, tampoco se puede comentar que el hueco de la ventana esté perfectamente confinado conforme a las NTCM-2004; sin embargo, al parecer, el marco que la adorna está construido con concreto reforzado y funcionó como un elemento confinante que frenó la penetración de las grietas hacia el interior del hueco (Figura 19a). En cambio, en la fachada posterior se aprecia claramente que, tanto la abertura para la ventana como para el cancel que funciona como puerta posterior, carecían de castillos confinantes, lo que seguramente favoreció que el daño por tensión diagonal fuera más severo (Figura 20a). En uno de los muros laterales también se presentaron deslizamientos en una de las juntas horizontales, en esta ocasión en el tercio superior (Figura 20b).



a) Fachada frontal



b) Fachada frontal

Figura 19: Daño observado en la Vivienda E.



a) Fachada posterior



b) Detalle muro lateral

Figura 20: Daño observado en la Vivienda E.

Conclusiones sobre el comportamiento de la vivienda unifamiliar en la ciudad de Mexicali

El daño generalizado experimentado en vivienda unifamiliar, tanto de autoconstrucción como en vivienda desarrollada por empresas constructoras, que como se ilustra en secciones previas de este capítulo fue con distintas intensidades en la ciudad Mexicali, es atribuible a las siguientes causas:

- La reducida resistencia lateral de la vivienda en la dirección de las fachadas principalmente, debida a la baja densidad de muros en esa dirección, primariamente con respecto a la dispuesta en la dirección perpendicular, agravada entre otras razones por la presencia de aberturas para puertas y ventanas. La densidad de muros en la dirección de las fachadas era aproximadamente entre el 33% y el 40% de la dispuesta en la dirección perpendicular.
- El deficiente confinamiento de los muros, sobre todo para confinar aberturas para puertas y ventanas, lo que lamentablemente constituye una mala práctica constructiva generalizada en todo México, tanto en autoconstrucción como en desarrollos de empresas constructoras. Por ello vale la pena resaltar que se debe difundir en todos los ámbitos de la ingeniería civil cuáles son las prácticas correctas de confinamiento en vivienda, y que son las que se encuentran ilustradas en las NTCM-2004 y que se presentan en las Figuras 21 y 22. Con sólo aplicarlas correctamente, se disminuirían notablemente los daños observados crónicamente durante sismos intensos en vivienda en México.
- Problemas de adherencia entre los bloques y el mortero de pega, el cual fue favorecido por el bajo esfuerzo axial de compresión desarrollado en vivienda de dos niveles, lo que provocó que las juntas horizontales deslizaran notablemente en algunos muros. Este problema también puede indicar una deficiencia en la preparación de las piezas antes de construir el muro. Por ejemplo, las piezas empleadas pudieran haberse caracterizado por tener un alto índice de absorción inicial de agua, que es muy común en bloques de concreto producidos en México. En ese caso, el no humedecerlas previamente para evitar que le roben agua al mortero de pega puede debilitar la adherencia química o primaria entre el mortero y las piezas que requiere toda buena mampostería. Cabe señalar que el espesor promedio de mortero que se colocó entre los bloques en juntas horizontales y verticales es aproximadamente de 1.0 cm, que cumple con las NTCM-2004, por lo que la pérdida de adherencia no fue favorecida por el empleo de juntas horizontales de poco espesor o por la ausencia de juntas verticales.

En muchos casos se observó que los muros de bloque no fueron preparados adecuadamente dentándolos de manera que al colarse castillos y dala se formara una llave de cortante que los hagan trabajar como mampostería confinada y, por ello, en muchos casos funcionaron más como un muro diafragma que interactuaba con un marco con elementos de concreto muy flexibles y débiles. Esto explica el daño muy severo, cercano al colapso, que se observó en las casas de algunos desarrollos habitacionales. Por lo tanto, también vale la pena difundir en todos los ámbitos de la ingeniería civil cuáles son las prácticas constructivas adecuadas para el dentado de muros confinados, como se ilustra en la Figura 23.

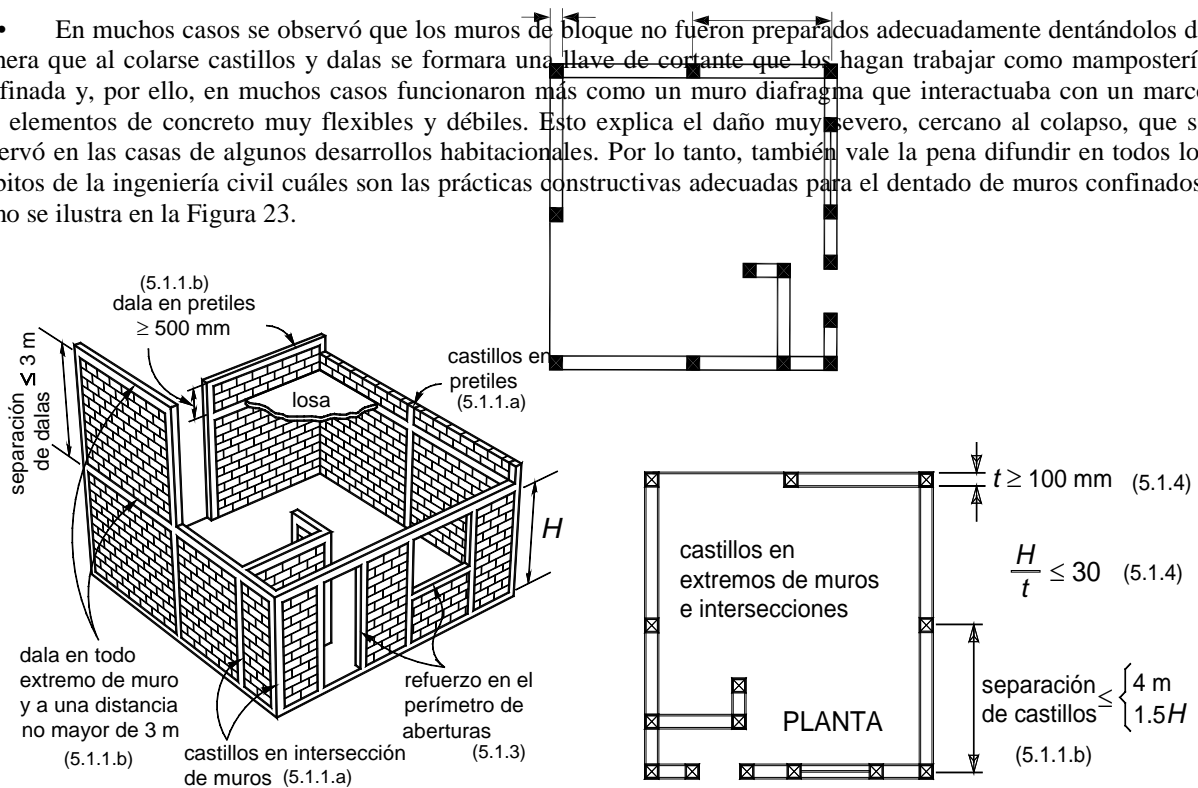


Figura 21: Requisitos mínimos para mampostería confinada (tomado de NTCM-2004 2004).

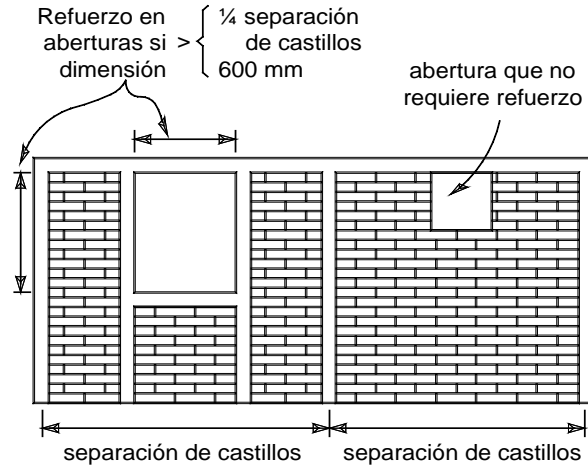


Figura 22: Requisitos para el correcto confinamiento de aberturas para puertas y ventanas (tomado de NTCM-2004, 2004).

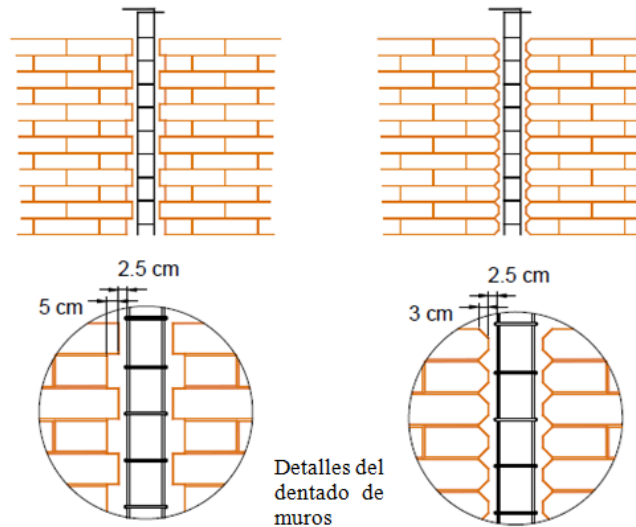


Figura 23: Prácticas constructivas adecuadas de dentado de muros confinados (adaptado de Meli et al., 2011).

Desde el punto de vista estructural pudiera concluirse que, en general, muchas viviendas no se comportaron satisfactoriamente porque sufrieron agrietamiento típico de mampostería no reforzada ni confinada, no de mampostería confinada, como supuestamente fueron concebidas (dada la presencia de castillos y dalas). No obstante lo anterior, muchas viviendas permanecieron de pie y con posibilidades de ser reparadas. Sin embargo, desde el punto de vista social, éste ha sido un problema muy serio en la ciudad de Mexicali, dado que muchos desarrollos se quedaron parcialmente deshabitados, porque la gente tuvo que desalojar sus viviendas y hacer traumáticos procesos de reclamación contra las desarrolladoras inmobiliarias y las aseguradoras.

VALLE DE MEXICALI

Los daños presentados en las viviendas del Valle de Mexicali fueron importantes. Se visitaron los poblados y ejidos La Puerta, Ejido Nayarit, El Faro, Colonia La Mariana, Ejido Durango, Colonia Aguascalientes y Guadalupe Victoria en Baja California y Luis Encinas Johnson en el municipio de San Luis Río Colorado en Sonora.



a)



b)

Figura 24: Daño típico observado en la vivienda de adobe en el Valle de Mexicali.

El tipo de vivienda que predomina en los ejidos son casas de un nivel con base en muros de adobe de gran espesor (40 cm aproximadamente) con techumbres ligeras de dos aguas (Figura 24) con base en armaduras de madera sobre las que descansan hojas de madera contrachapada (triplay). Estos techos ligeros están simplemente apoyados sobre los muros de adobe, por lo cual no existe acción de diafragma, pero su deslizamiento durante un sismo sí genera efectos fuera del plano en los muros de adobe, lo cual los hace muy vulnerables (Figura 24b). Es muy frecuente que la estructura se desplante directamente sobre el terreno sin cimiento alguno (Figura 24), aunque también existen viviendas que cuentan con una losa de concreto como cimentación o al menos una viga de cimentación. Se presentaron extensos colapsos parciales y totales sobre este tipo de vivienda, donde predominaron las fallas fuera del plano de los muros de adobe, debido en parte al movimiento del techo y por supuesto, a su muy reducida resistencia (Figura 24), aunque también cabe señalar que en este ejido en particular también se observó evidencia de licuación del suelo (Rangel et al., 2010).

Un hecho singular que cabe destacar, es que se encontró una vivienda de mampostería confinada con base en muros de adobe (Figura 25), lo cual es atípico. Aunque la estructura sufrió daños por la pérdida de sus techumbres ligeras y el agrietamiento por cortante de uno de sus muros de fachada colindante a una abertura no confinada propiamente, se debe resaltar que el adecuado confinamiento proporcionado a los muros de adobe perpendiculares a la fachada salvaguardó su integridad (Figura 25), sobre todo si se considera que esta vivienda se ubicaba prácticamente enfrente de viviendas de adobe que experimentaron colapsos parciales (Figura 24).



a)



b)

Figura 25: Vivienda de adobe confinado en el Valle de Mexicali.

El otro tipo de vivienda que es común, principalmente en los pueblos, aunque también existe en los ejidos, son casas de un nivel con base en muros de mampostería de bloque hueco de concreto sin refuerzo ni confinamiento, con sistema de piso de vigueta y bovedilla o losa de concreto reforzado planos o a dos aguas (Figuras 26 y 27), y que por lo general cuentan con una losa de concreto con cimentación.

Se presentaron extensos daños en muros, ya sea por tensión diagonal en el plano (Figura 26a) o por la acción fuera del plano en muros, sobre todo aquéllos que disponen de techos inclinados (Figuras 26b y 27), donde se presentaron colapsos parciales y totales.



a) Ejido Nayarit



b) Ejido Durango

Figura 26: Daño típico observado en vivienda de bloque hueco de concreto no confinado ni reforzado en el Valle de Mexicali.

En el Valle de Mexicali se observó que desde el Ejido Nayarit-El Faro hacia el Ejido Durango, el daño mayor fue provocado por el proceso de licuación de una gran intensidad como se describe Rangel et al. (2010). En el Ejido Oaxaca el suelo sufrió un nivel de licuación tal en toda la zona que las autoridades decidieron que ya no es habitable y fue reubicado.



a) Ejido Durango



b) Ejido Durango

Figura 27: Daño típico observado en vivienda de bloque hueco de concreto no confinado ni reforzado en el Valle de Mexicali.

En el poblado Luis Encinas Johnson en Sonora predomina la vivienda construida con base en muros de mampostería de piezas de barro recocido, de bloque de concreto o una combinación de ambas, parcialmente confinada o sin refuerzo alguno (mampostería simple,) y algunas viviendas relativamente antiguas construidas con base en muros de adobe y techumbres ligeras de madera simplemente apoyadas, similares a las utilizadas en Baja California (Domínguez y Pacheco, 2011).

Se presentaron daños en algunas viviendas, los cuales están relacionados con la pérdida de capacidad de carga del suelo, ocasionado por la licuación y agrietamiento del mismo. Los daños observados fueron desde muy ligeros hasta colapsos parciales o totales. El daño estuvo en función de las siguientes características: geometría de la vivienda, densidad de muros, tipo de material en muros (adobe, ladrillo o bloque de concreto), refuerzo de los muros (con o sin castillos y dalas), sistema de techo (losa de concreto que funcionara como diafragma, o techo de dos aguas simplemente apoyado sobre los muros), tipo de cimentación (con o sin cimentación) y cercanía a sitios donde se presentó licuación.



a) Exterior (suelo licuado)



b) muro interior

Figura 28: Daño típico observado en vivienda de bloque hueco de concreto no confinado ni reforzado en el poblado Luis Encinas Johnson en Sonora (Domínguez y Pacheco, 2011).

Aunque la distribución de las viviendas dañadas era dispersa, sí presentó, como era de esperarse, una tendencia a concentrarse en aquellas viviendas ubicadas en la cercanía o bien sobre el trazo de las grietas o volcanes de licuación, a pesar de que su calidad constructiva fuera buena (Figura 28a). Por ejemplo, la vivienda de la Figura 28 contaba con una calidad constructiva razonablemente buena, a pesar de ser de mampostería no reforzada ni confinada. Sin embargo, resulta claro que los agrietamientos en sus muros (Figura 28b) se deben principalmente al asentamiento súbito debido a la licuación del suelo. La evidencia de licuación se aprecia con el pequeño volcán de arena ubicado muy cercano al muro que está entre la ventana y la esquina derecha en la Figura 28a.

CALIFORNIA, ESTADOS UNIDOS

En los Estados Unidos en general, y en California en particular, el sistema estructural dominante en vivienda unifamiliar (casa habitación) o plurifamiliar (edificios de departamentos) es con base en muros de madera contrachapada (“triplay”), con contraventeo lateral (“diagonal sheathing”), también de madera, y sistema de piso de madera, ya sea hojas de triplay montadas sobre vigas de madera (“studs”) o sobre armaduras de madera. La flexibilidad lateral de este tipo de estructuras es alta, pues no sólo los sistemas de piso constituyen diafragmas muy flexibles, sino que los muros de madera también son relativamente flexibles en su plano y con una rigidez muy baja fuera de su plano. La estabilidad de estas estructuras ante sismos depende fuertemente, además de una concepción estructural sólida (por ejemplo, ser regulares y disponer de una densidad de muros adecuada en ambas direcciones ortogonales), de que existan conexiones adecuadas entre los sistemas de piso y los muros, y de un adecuado mantenimiento de la madera, que no deteriore su buena resistencia tanto a tensión como a compresión.

Los daños reportados por los expertos estadounidenses (EERI, 2010) son típicos de los observados en sismos previos que han afectado a las ciudades y pueblos de California. Destacan un par de edificios de departamentos en la ciudad de El Centro, California. El primero de ellos son los departamentos Brighton Manor, que es un edificio de dos niveles con base en muros de madera contrachapada recubiertos con aplanados de yeso, que sufrieron agrietamiento severo en los aplanados de yeso de los muros de planta baja como consecuencia de que el yeso es mucho más rígido que la madera (y además su resistencia a tensión es baja) y, por lo tanto, la flexibilidad lateral del muro llevó a una distorsión tal en la vecindad de las aberturas de las ventanas, que ocasionó que fallara el aplanado (Figura 29a). En otra parte del edificio se presentó la falla o colapso parcial de una celosía con base en elementos de concreto (Figura 29b). El daño reportado en esta estructura es claramente ligero, fácilmente reparable, e incluso, no se requiere desalojar el inmueble para atenderlo.



a) Daño en aplanados de yeso



b) Falla de celosía

Figura 29: Daño típico observado en los departamentos Brighton Manor en El Centro, California. Fotos tomadas de EERI (2010).



a)



b)

Figura 30: Primer piso suave desarrollado en los departamentos Cottonwood Circle en El Centro, California. Fotos tomadas de EERI (2010).

Un caso mucho más grave e interesante desde el punto de vista estructural, es el de los departamentos Cottonwood Circle (Figura 30), los cuales cuentan con una pésima concepción estructural, donde se tiene un claro piso suave en ambas direcciones ortogonales, y la disposición de los muros es tal que favorece la torsión. Como consecuencia de ello, el edificio experimentó un daño severo y estuvo al borde del colapso, pues se desarrolló una deformación permanente en todas las columnas de planta baja en ambas direcciones como consecuencia del piso suave. No se aprecia una evidente torsión (giro) en la planta de la estructura o en las columnas de planta baja, quizá como consecuencia que la flexibilidad del sistema de piso de madera aminoró este efecto, que como lo demuestran otros estudios, es uno de los pocos efectos favorables de los diafragmas flexibles (Tena-Colunga y Abrams, 1996). Además, existe evidencia de la separación entre el ala sur del edificio (izquierda de la Figura 30b) con respecto al ala norte (derecha de la Figura 30b) en el segundo piso de la estructura, que aunado a las grietas de extensión que se observaron en los sistemas de piso, pone en evidencia que estos tuvieron problemas para distribuir y resistir las fuerzas sísmicas. Como puede resultar obvio, el edificio fue evacuado posterior al sismo.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Según datos oficiales, durante el sismo del 4 de abril de 2010 se dañaron en México más de 3,000 viviendas, de las cuales el FONDEN aportó recursos por 112.1 millones de pesos y el Gobierno del Estado de Baja California 82.3 millones de pesos para atender alrededor de 2,818 viviendas afectadas.

En la ciudad y el Valle de Mexicali predominan las casas de uno o dos niveles como vivienda, más que los edificios de departamentos, lo que explica el por qué la mayor cantidad de daño en vivienda se concentró en desarrollos habitacionales más que en edificios de departamentos, como los condominios Monte Albán, que constituyen el único caso reportado de mal comportamiento estructural de edificación para vivienda.

El daño en conjuntos habitacionales de la ciudad de Mexicali fue extendido, y se puede asegurar que no existió un solo desarrollo donde no se reportaran daños en algunas de sus viviendas e incluso, en algunos desarrollos, más del 50% de sus viviendas se dañaron en distintos grados, desde leve hasta severos.

El daño generalizado experimentado en vivienda unifamiliar en la ciudad Mexicali, tanto de autoconstrucción como en vivienda desarrollada por empresas constructoras, es atribuible a las siguientes causas:

- La reducida resistencia lateral de la vivienda en la dirección de las fachadas principalmente, debida a la baja densidad de muros en esa dirección, entre otras razones por la presencia de aberturas para puertas y ventanas.
- El deficiente confinamiento de los muros, sobre todo para confinar aberturas para puertas y ventanas, lo que lamentablemente constituye una mala práctica constructiva generalizada en todo el país, tanto en autoconstrucción como en desarrollos de empresas constructoras.
- Problemas de adherencia entre los bloques y el mortero de pega, el cual fue favorecido por el bajo esfuerzo axial de compresión desarrollado en vivienda de dos niveles, lo que provocó que las juntas horizontales deslizaran notablemente en algunos muros. Este problema también puede indicar una deficiencia en la preparación de las piezas antes de construir el muro. Por ejemplo, las piezas empleadas pudieran haberse caracterizado por tener un alto índice de absorción inicial de agua, que es muy común en bloques de concreto producidos en México. En ese caso, el no humedecerlas previamente para evitar que le roben agua al mortero de pega puede debilitar la adherencia química o primaria entre el mortero y las piezas que requiere toda buena mampostería.
- Se observó que los muros de bloque no fueron preparados adecuadamente, dentándolos de manera que, al colarse con castillos y dalas, se formara una llave de cortante que los hagan trabajar como mampostería confinada. Por ello, en muchos casos funcionaron más como un muro diafragma que interactuaba con un marco con elementos de concreto muy flexibles y débiles. Esto explica el daño muy severo, cercano al colapso, que se observó en las casas de algunos desarrollos habitacionales.

Desde el punto de vista estructural pudiera concluirse que, en general, muchas viviendas en la ciudad de Mexicali no se comportaron satisfactoriamente, porque sufrieron agrietamiento típico de mampostería no reforzada ni confinada, no de mampostería confinada, como supuestamente fueron concebidas. No obstante lo anterior, mucha viviendas permanecieron de pie y con posibilidades de ser reparadas. Sin embargo, desde el punto de vista social, éste fue un problema muy serio en la ciudad de Mexicali, dado que muchos desarrollos se quedaron parcialmente deshabitados, porque la gente tuvo que desalojar sus viviendas y entablar las debidas reclamaciones contra las desarrolladoras inmobiliarias y las aseguradoras.

En el Valle de Mexicali predominan dos tipos de vivienda de autoconstrucción: (1) casas de un nivel con base en muros de adobe de gran espesor, con techumbres ligeras de dos aguas con base en armaduras de madera sobre las que descansan hojas de madera contrachapada, simplemente apoyados sobre los muros de adobe, con o sin losa de cimentación y, (2) casas de un nivel con base en muros de mampostería de bloque hueco de concreto sin refuerzo ni confinamiento, con sistema de piso de vigueta y bovedilla o losa de concreto reforzado (planos o a dos aguas), y que por lo general cuentan con una losa de concreto con cimentación.

En general, se presentaron extensos colapsos parciales y totales sobre la vivienda con muros de adobe, donde predominaron las fallas fuera del plano, debidas en parte a la licuación del suelo, así como al movimiento de la techumbre ligera y, por supuesto, a su muy reducida resistencia. En la vivienda de bloque de concreto se presentaron extensos daños en muros en el plano y fuera del plano, provocados en gran parte por la licuación del suelo, pero también favorecidos por la falta de un confinamiento o refuerzo adecuado.

Las deficiencias o ausencia de confinamiento en los muros de la vivienda en la ciudad y el Valle de Mexicali fueron notables, y en muchos casos fueron la causa de que el daño haya sido tan extendido o severo. En particular, se observó una mala práctica de confinamiento en aberturas para puertas y ventanas, así como una inadecuada preparación de los extremos de los muros (dentarlos), para que al momento de colarlos con castillos y dalas, trabajen como un conjunto. Por ello, es necesario difundir con mayor vigor, en todos los ámbitos de la ingeniería civil, cuáles son las prácticas correctas de confinamiento en muros para vivienda, y que son las que se encuentran ilustradas en las NTCM-2004. Lo anterior puede hacerse con base en: (a) cursos de actualización profesional y, (b) la preparación y distribución de cartillas ilustradas simples (panfletos, trípticos, etc.), que sean repartidas gratuitamente entre la comunidad por parte de organismos municipales, de sociedades técnicas y de colegios de ingenieros y arquitectos. Con sólo aplicar correctamente las prácticas adecuadas de confinamiento, se disminuirían notablemente los daños observados crónicamente durante sismos intensos en vivienda en México en lo general, y en el valle de Mexicali en lo particular.

Otro aspecto, no menos relevante, es concientizar a arquitectos e ingenieros sobre la importancia de proporcionar una densidad de muros razonable en ambas direcciones ortogonales en los proyectos de vivienda, dado que la práctica observada indica que, por requisitos arquitectónicos (iluminación, ventilación, circulación), normalmente se proporciona una densidad de muros notablemente menor en la dirección de las fachadas que en la dirección ortogonal a éstas, lo cual hace muy vulnerables a las viviendas en la dirección de las fachadas. Como bien se puede demostrar con los daños presentados en este sismo, así como en otros previos, cuando existen deficiencias tan notables en la estructuración de una vivienda, no se requiere que la estructura sobrepase de uno o dos niveles para tener daños significativos, o incluso experimentar colapsos parciales, sobre todo cuando se desplantan en suelos poco competentes y susceptibles a hundimientos y licuación.

En los poblados de California, Estados Unidos, el sistema estructural dominante en vivienda es con base en muros y sistemas de piso de madera. En este sismo no se reportaron grandes daños en estas estructuras en las poblaciones californianas cercanas al Valle de Mexicali, como son El Centro y Calexico. La única falla grave reportada por el equipo de investigadores estadounidenses fue el condominio Cottonwood Circle, un edificio de departamentos de dos pisos que disponía de una pésima concepción estructural, con un fragante piso suave en ambas direcciones ortogonales, que irremediamente llevó a la estructura a su falla.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las siguientes instituciones que apoyaron económicamente a los autores en sus visitas de campo y/o que permitieron invertir su tiempo en la elaboración del presente trabajo: Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Campus Mexicali, y Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Asimismo, agradecen los comentarios, recomendaciones y sugerencias de los árbitros que permitieron enriquecer la versión final del manuscrito

REFERENCIAS

- Campos, G.J.M. (1974). "Capítulo V: Mexicali, B.C.", *Memorias de la VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS, Tomo I. Guadalajara, México.
- Domínguez, L. y Pacheco, M.A. (2011). "Efectos del Sismo de Mexicali en el Poblado de Luis Encinas Johnson, Municipio de San Luis Río Colorado, Sonora", Sistema Nacional de Protección Civil y Centro Nacional de Prevención de Desastres, Sonora, México.
- EERI (2010). "The El Mayor Cucapah, Baja California Earthquake April 4, 2010", EERI Reconnaissance Report No. 2010-02, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- FONDEN (2010). "Recursos autorizados en 2010", FONDEN.
- Google Earth (2010). <http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

- Grupo RESNOM (2002). “Estado actual de RESNOM y sismicidad de la región noroeste de México en el periodo septiembre-diciembre de 2001”, *Boletín Informativo de la Unión Geofísica Mexicana, GEOS*, pp. 43-48.
- Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., Dai, J., Farsi, M., Hart, T., Mebarki, A., Moghadam, A.S., Quiun, D., Tomazevic, M. y Yamin, L. (2011). “Seismic Design Guide for Low-Rise Confined Masonry Buildings”, Confined Masonry Network, a project of the World Housing Encyclopedia, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association for Earthquake Engineering (IAEE), Oakland, California.
- Munguía, L, Navarro, M., Valdez, T. y Luna, M. (2010). “Sismología de Movimientos Fuertes”, División de Ciencias de la Tierra, CICESE.
- NTCM-2004 (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D.F.
- Rangel, J.L, Tena, A. y Gómez, A. (2010). “Efectos geotécnicos y estructurales observados en el valle y ciudad de Mexicali, provocados por el sismo El mayor-Cucupah del 4 de abril del 2010”, *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Guerrero, México, Vol. II, pp. 765-780.
- Tena-Colunga, A y Abrams, D.P. (1996). “Seismic behavior of structures with flexible diaphragms”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 439-445.