Report on geotechnical and structural reconnaissance of the El Mayor Cucupah Earthquake, April 4, 2010, Baja California

J.L. Rangel-Núñez, A. Tena-Colunga & A. Gómez-Bernal Department of Materials, UAM-Azcapotzalco, Mexico

RESUMEN



Se presenta un análisis y síntesis de los daños observados en el terreno y edificaciones ocasionados por el sismo El Mayor-Cucupah ocurrido el 4 de abril del 2010. Destaca la presencia generalizada de la licuación en el Valle de Mexicali principalmente en la cercanía de los cuerpos de agua, y en menor escala en la ciudad de Mexicali, así como la vulnerabilidad alta observada en las construcciones de adobe. Se describen las fallas observadas en construcciones de mampostería y acero estructural, así como el buen comportamiento observado en un puente urbano con aisladores sísmicos.

ABSTRACT

An in-depth analysis of the observed damage in both structures and the subsurface after the April 4, 2010 El Mayor-Cucupah Earthquake is presented, based on a field survey and the critical review of previous studies conducted for both Mexicali city and valley. It can be highlighted the liquefaction phenomena observed in Mexicali valley and in lesser extent, in Mexicali city, as well as the high vulnerability of adobe houses. The observed damage in masonry and steel structures are described, as well as the satisfactory seismic behavior observed in a base-isolated urban bridge.

1 INTRODUCCIÓN

El domingo 4 de abril del 2010 a las 15:40 hrs ocurrió el sismo El Mayor-Cucupah de magnitud M_w=7.2 afectando a la ciudad pero principalmente al Valle de Mexicali. El epicentro, de acuerdo con la Red Sísmica del Noreste de México (RESNOM), se localizó a 26km 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 (Fig 1), con una profundidad variable entre 4 y 10km. 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 140km; seis de ellas a menos de 35km. Estas seis estaciones se localizan sobre los sedimentos del Valle de Mexicali, donde se midieron aceleraciones máximas de $a_{N-S}=527$ cm/s², $a_{E-O}=404$ cm/s² y $a_z=799$ cm/s² y desplazamientos de $u_{N-S}=32.8$ cm, $u_{E-O}=20.1$ cm y $u_z=14.1$ cm (estación M. de Ocampo, Munguía et al., 2010). Además una gran estaciones acelerográficas cantidad de también registraron el evento en el territorio estadounidense; el valor de la aceleración horizontal más alta fue de 580cm/s² y se registró en El Centro, California, en la estación 5058 McCabe School, cuyo espectro de respuesta se muestra en la Fig 2; esta estación se localiza a 61.8km del epicentro y a 22km de la falla. Es importante destacar que algunas estaciones cercanas al epicentro no muestran aceleraciones mayores debido a que se localizaron en terreno afectados por la licuación.

Dada la intensidad del movimiento y los daños ocasionados en los poblados del Valle de Mexicali y en

la ciudad de Mexicali, los autores, por parte de la UAM-Azcapotzalco, realizamos una visita técnica al área de afectación, a fin de observar y evaluar los efectos de dicho terremoto, tanto en el subsuelo como en las edificaciones. En este trabajo se presenta el análisis de la información previa disponible y el reporte de dicha visita.



Figura 1. Mapa de las principales fallas de la región, localización del epicentro y estaciones acelerográficas, triángulos azules (Grupo RESNOM 2002).

2 ANTECEDENTES

El Valle de Mexicali es una de las regiones de México con sismicidad alta, provocada por el movimiento traslacional entre las placas Norteamericana y del Pacífico. Este movimiento entre placas produce una serie de fracturamientos escalonados con dirección preferencial Noroeste-Sureste, teniéndose como principales, por su actividad y energía disipada, las fallas geológicas de Cerro Prieto, la Imperial, la Laguna Salada y la de San Andrés (Fig 1).



Figura 2. Espectros de respuesta de aceleración del 5% de amortiguamiento en la estación EC5058, de El Centro California, donde se registró la aceleración horizontal más alta en el sismo de abril del 2010.

De acuerdo con la historia de sismicidad de la zona, las fallas más activas son la de Cerro Prieto, Imperial y San Andrés, con sismos de magnitud promedio de M_w =4.5 y máxima de M_w =7.1 (Acosta et al., 2007 y Suárez et al., 2001). Por su parte, la falla de Laguna Salada no había tenido actividad desde febrero de 1892, cuando se presentó un sismo de magnitud de 6.7 (Topozada et al., 1981), por lo que el evento del 4 de abril se considera atípico, principalmente por su magnitud y localización.

En un estudio reciente de sismicidad de la ciudad de Mexicali, elaborado por el CICESE (Acosta et al., 2007), se presentan mapas de zonificación y amplificación sísmica, así como un pronóstico de las características del evento sísmico con mayor probabilidad y riesgo. Aquí se obtienen valores de los periodos entre 1.1s y 1.5s, siendo del orden de 1.3s y 1.5s en la zona centro.

En la Fig 3 se muestran funciones de amplificación sísmica horizontal de los suelos de la ciudad de Mexicali (Acosta et al., 2007), con valores de amplificación variables entre 5 y 12, y en la Fig 4 se ilustra la amplificación dinámica de los suelos de la ciudad de Mexicali en seis sitios con respecto a roca.

Considerando un evento sísmico originado en la falla Imperial de M_w =6.5, en la Fig 5 se muestran los espectros de respuesta en diferentes estaciones de la ciudad de Mexicali considerando los factores de amplificación sísmica mostrados previamente (Acosta et al., 2007). Se observan aceleraciones absolutas en campo libre de 50gals en roca y variables entre 170 y 350gals en depósitos de suelo, con periodos de vibración de 0.09s a 0.3s.

Con base en los resultados anteriores Acosta et al. (2007), construyen mapas predictivos de aceleración horizontal máxima (Fig 6) y de intensidad de Mercalli modificada, para un evento originado en la porción Norte de la falla Imperial, con o sin efecto de sitio. Sus resultados muestran los valores siguientes:

- Aceleraciones horizontales máximas variables entre 80 a 260gals (sin efecto de sitio) y entre 150 a 450gals (con efecto de sitio).
- Magnitudes de 6 a 9 (sin efecto de sitio) y de 7 a 10 (con efecto de sitio).



Figura 3. Funciones de amplificación relativa en la ciudad de Mexicali. La ubicación de las estaciones se indica en la Fig 10 (Acosta et al. 2007).



Figura 4. Efecto de amplificación relativa a la roca para la ciudad de Mexicali. La estación en roca se muestra en la esquina inferior izquierda, HJA (Acosta et al., 2007).



Figura 5. Espectros de respuesta escalados en amplitud para reproducir el efecto esperado por el terremoto de

Mw=6.5 en la falla imperial. El espectro en roca es la estación HJA (Acosta et al., 2007).

Llama la atención que los valores obtenidos crecen en dirección Suroeste a Noreste, es decir, en la dirección de la fuente sísmica, y que no tienen influencia las condiciones locales del subsuelo.



Figura 6. Mapas predictivos de isoaceleración horizontal máxima esperada para el rompimiento del segmento Norte de la falla imperial, M_w =6.5, con efecto de sitio (Acosta et al., 2007).

3 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA Y ESTRUCTURAL

3.1 Condiciones geotécnicas del subsuelo

El valle de Mexicali se ubica en el delta del río Colorado, donde se distinguen tres unidades fisiográficas: planicie, terraza y la sierra de los Cucupás. Las planicies coinciden con la zona agrícola y tienen una pendiente ligera hacia el Golfo de California, exceptuando la zona donde se localiza la ciudad de Mexicali, que está debajo del nivel del mar. Las terrazas son planas y están escalonadas ubicándose en los extremos Oriente y Poniente del valle, mientras que la sierra se localiza en la parte Poniente del valle y se compone principalmente por granitos, esquistos y calizas, constituyendo un levantamiento tectónico fallado. Es de destacar que dentro de la planicie se ubica el volcán de Cerro Prieto.

Con base en la información geotécnica disponible de la zona (Tabla 1 y Fig 7), tanto del valle como de la ciudad de Mexicali (SMMS, 1974 y Acosta et al., 2007), y campañas de exploración recientemente realizadas en dichas zonas (Franco, 2010), en especial la termoeléctrica de Cerro Prieto (Dumas, 2010), el perfil estratigráfico típico se conforma superficialmente por un estrato arcilloso desecado con espesor máximo de 5m, seguido por intercalaciones de capas de arcilla y arenas finas limosas. El espesor máximo estimado de este estrato es de 2.3km km (Pelayo et al., 2001).

El estrato de arcilla desecada tiene un espesor máximo de 5m, con una plasticidad media a alta y consistencia dura, potencialmente expansible principalmente la parte superior, con valores del contenido de agua variables entre 10% y 30%, siendo ligeramente menores o iguales al límite plástico (15<*LP*<30). Los valores a la penetración estándar medidos varían entre 6 y 25 golpes, y las velocidades de onda de corte se ubican en el intervalo de 100 y 150 m/s.

La arcilla del estrato formado por alternancias de arcilla y arena se caracterizan por ser limosa o arenosa, de plasticidad media a alta y consistencia blanda a dura (N_{spt}>2golpes), mientras que las arenas son finas y limosas, aunque existen capas de arenas finas limpias, de compacidad baja a media. Esta unidad se detecta hasta el final de la exploración geotécnica disponible, es decir 30m, pero continúa al menos 500m. La velocidad de onda cortante varía entre 200 y 500m/s, con un valor promedio de 300m/s. La profundidad del nivel de aguas freáticas varía entre 1.9 y 7.2m.

Existen dos factores importantes a observar respecto el diseño y el comportamiento de las cimentaciones de acuerdo con la estratigrafía presentada: el potencial de expansión de los estratos arcillosos superficiales y la licuación de arenas finas debajo del nivel freático.

Tabla 1. Información geotécnica disponible (Campos 1974; Acosta et al., 2007; Franco, 2010; y Dumas, 2010). La localización de los sitios se presenta en la Fig 7.

SIGLAS	LUGAR	ESTACIÓN ACELEROMÉTRICA	PERFIL DE ONDA S	MECÁNICA DE SUELOS
PO1	Potabilizadora 1))	Ĕ
DIF	Desarrollo integral de la familia))	Ĕ
PO3	Potabilizadora 3))	Ĕ
PIC	Escuela Calmecac, Pichardo))	ξ
PO2	Potabilizadora 2))	Ĕ
WEL	Secundaria Siqueiros	Ĕ)	Ĕ
BPE	Biblioteca Pública Estatal))	Ĕ
HGM	Hospital General de Mexicali	Ĕ)	Ĕ
RAY	Blvd. La américas, Raymundo))	Ĕ
PCI	Protección Civil	Ĕ)	Ĕ
TER	Anahuác y Terán	Ĕ)	Ĕ
LOZ	Escuela Miguel Alemán	Ĕ)	Ĕ
BOM	Lázaro Cárdenas	Ĕ)	Ĕ
GAS	Gasera Kino	Ĕ)	Ĕ
HJA	Roca firme Ejido Heriberto Jara))	Ĕ
А	Ampliación del Hospital del	ξ	ξ)
	Seguro Social			
В	Hospitales ISSSTE y SSA	Ĕ	Ĕ)
С	Oficinas de la CFE	Ĕ	Ĕ)

3.2 Comportamiento observado

Las construcciones que predominan en la ciudad de Mexicali son viviendas de uno o dos niveles (de madera con techos de dos aguas, o de muros de ladrillo o bloque de concreto, techos de armaduras y cubierta de madera con impermeabilizante o losas de concreto reforzado), así como edificios de oficina y comercios de uno a tres niveles (estructuras de concreto reforzado). Son escasos los edificios altos, resueltos estructuralmente con concreto reforzado, de hasta ocho niveles.

Las cimentaciones de las edificaciones son también variadas, desde los casos más desfavorables donde los muros se desplantan directamente sobre la superficie del terreno, con un despalme de 10 a 20cm, o bien se emplea una losa o firme de concreto en toda el área de la edificación. En el caso de las casas con muros de ladrillo o bloque, 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 es una arcillosa expansiva.

Para las construcciones de uno a tres niveles, la cimentación es mediante zapatas aisladas o corridas de concreto y profundidades de desplante variables entre 0.6 y 2m. La cimentación de los edificios de tres niveles o mayores se ha resuelto mediante losas rigidizadas con contratrabes, con o sin pilas o pilotes.

Considerando la calidad de los materiales de construcción y su estructuración, Rodríguez (2002) ha propuesto una zonificación del daño ante eventos sísmicos e inundaciones, donde destacan la parte Poniente de la ciudad, la zona antigua, la colonia Hidalgo y los condominios Monte Albán, que han sido afectados por sismos previos y que están asentados sobre el borde de la planicie de inundación del río Nuevo.

Desde el punto de vista sísmico se destacan tres aspectos para las edificaciones y el subsuelo del valle de Mexicali: comportamiento sísmico de estructuras y cimentaciones, licuación y subsidencia.

3.2.1 Comportamiento sísmico de cimentaciones y estructuras

3.2.1.1 Ciudad de Mexicali

En general, el comportamiento de las cimentaciones en condiciones sísmicas en la ciudad de Mexicali fue adecuado. En efecto, no se apreciaron fallas de la cimentación siguiendo el mecanismo general ni el de punzonamiento. Asimismo, no se observaron asentamientos excesivos después del sismo que pudieran haber afectado a las estructuras, excepto donde se presentó la licuación o cuando el terreno de cimentación se ubicaba en la terrazas del río Nuevo, donde existe material heterogéneo y deficientemente compactado.

En la Fig 7 se localizan con círculos azules los casos que destacan de la visita realizada a la ciudad de Mexicali, donde las edificaciones sufrieron fallas o presentaron problemas de importancia. Figura 7. Localización de los sitios visitados (números 1 al 12) y sitios instrumentados, Tabla 1, (a partir de Google Earth, 2010).

1. Multifamiliares Monte Albán. Estos multifamiliares, cuyo diseño corresponde a los años sesenta, se encuentran ubicados en la planicie de inundación del río Nuevo, y han sufrido daños tanto en sismos pasados (SMMS 1974) como en el recientemente ocurrido. Están compuestos por un conjunto de ocho edificios de cuatro niveles y planta alargada con relación de aspecto mayor de 4, y 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. En la dirección larga se construyeron muros dentro del marco que se dejaron a media altura formando columnas cortas. En la dirección corta se tienen muros de concreto que rigidizan esa dirección. 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 (Fig 8). Si bien los edificios no se colapsaron totalmente, los daños estructurales son severos. Además del desprendimiento de celosías, 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. La falta de desligue de muros divisorios de bloque y la presencia de aberturas para ventanas propició que se presentara el fenómeno de columna corta, con una separación de estribos de 25 a 30cm (Fig 9). Se presentaron numerosos agrietamientos en los muros divisorios interiores, unos por deslizamiento/desligue con las vigas superiores, otros por asentamiento del terreno y unos más por cortante. Incluso, se observaron fallas por cortante y por pérdida de adherencia del refuerzo en algunas vigas en su extremo cercano al nudo vigacolumna (Fig 10). Al parecer, en una rehabilitación previa, en algunos edificios se adicionó un marco interior de acero, con poca eficiencia para prevenir los daños en la estructura original.





2. Edificaciones sobre la Calzada Justo Sierra. Sobre esta calzada, entre las calle de Marmoleros y Plateros, se aprecian diversas edificaciones con diferentes grados de afectación.



El edificio ISSSTECALI, de dos niveles, sufrió daños estructurales severos que consistieron en grietas importantes que atravesaron los castillos de varios muros, y en otros muros incluso se observaron las varillas de los castillos por no contar con estribos (Fig 11). El sistema estructural, con base en muros adosados dobles de aproximadamente 25cm de espesor (doble espesor), están hechos con ladrillo rojo recocido (Fig 12) y confinados aparentemente sólo por castillos de 25cm x 25cm (Fig 18), pues no se apreciaron dalas (Fig 11). Debido a esta anomalía y al gran espesor de los tableros de mampostería, se desarrollaron fuerzas cortantes de importancia que los castillos por sí solos no pudieron frenar y también fueron penetrados (Figs 12 y 13). Aunque el ancho de los castillos es de 25 cm, su refuerzo es muy escaso: únicamente cuatro varillas de 3/8" como refuerzo longitudinal y estribos de alambrón liso de 1/4" cada 20 cm (Fig 13). Por tanto, resulta claro que los castillos se encontraban notablemente subreforzados para el tipo de mampostería que se construyó y la falla de la clínica se debe, en parte, a emplear mampostería deficientemente confinada.

Enfrente a la clínica ISSSTECALI se ubica una escuela privada, que sufrió importantes daños estructurales por el efecto de columna corta en algunos de sus edificios (Fig 14). En la Fig 15 se observan los trabajos de demolición.



Figura 14

Figura 15

3. Campus Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Conforme al levantamiento realizado por la misma universidad, varios de sus edificios (siete en total) experimentaron daño estructural moderado. El resto se clasificó como daño con reparaciones menores.

Se identificaron al menos tres diferentes sistemas estructurales. El primero de ellos consiste de edificios tipo de dos niveles con marcos de acero, donde las columnas son tubulares cuadradas (HSS) con vigas W y sistema de piso losacero. Los muros perimetrales de fachada son de mampostería de bloque de concreto o con base recubrimiento de mortero y malla, ubicados fuera del eje de los marcos. Los muros de mampostería con bloques se cubrieron con un material de espesor considerable. Entre estos edificios se destacan el del Instituto de Ingeniería, que sufrió desprendimiento de los recubrimientos, el agrietamiento incipiente de los muros de fachada de bloque de concreto (no estructurales) y rompimiento parcial de algunas conexiones de la estructura de acero, y los edificios de la Facultad de Ingeniería y su biblioteca, donde aparte de los agrietamientos en muros y en pisos, se presentaron movimientos diferenciales entre estructuras vecinas (Fig 16). Debido a la gran diferencia de rigideces entre los dos sistemas utilizados, se puede atribuir el daño en los muros de bloque a la alta flexibilidad de los marcos de acero que utilizan columnas cuadradas.

El Laboratorio de Cómputo y Electrónica, un edificio muy flexible con base en marcos de acero (Fig 17), experimentó cuantiosos daños en elementos no estructurales. Una particularidad que se observó en este edificio fue la práctica absurda de adosar un recubrimiento exterior muy pesado con base en mortero y malla, de unos 4cm de espesor, al recubrimiento original. Con ello se agregó de manera innecesaria masa a la estructura.



Figura 16

Figura 17

Un segundo tipo de estructuras del campus lo constituyen edificios de 2 a 4 niveles de concreto reforzado con base en columnas de concreto reforzado. En los eies de los marcos se construveron muros diafragma de mampostería con bloques de concreto, que se cubrieron con un material de espesor considerable. De acuerdo con lo observado, el daño más común en estos edificios fueron desprendimientos del recubrimiento de los muros y columnas. El daño observado en realidad se debe a que los muros no se diseñaron como muros diafragma, pero se construyeron como tales y por ello interactuaron con los marcos, ya que no existía una separación o desligue adecuado con las columnas.

Un tercer tipo de edificios son estructuras con base en marcos compuestos por columnas y losas planas reticulares o aligeradas de concreto reforzado, como la Facultad de Derecho (Fig 18), donde se apreciaron incipiente penetración o punzonamiento de las columnas en los capiteles de la losa (Fig 19), mismos que ameritaron su apuntalamiento.



Figura 18

Figura 19

4. Oficinas de la CFE. La cimentación consiste de zapatas aisladas con trabes de liga y zapatas corridas. No fue posible visitar este edificio, pero a distancia se observa que su estructura es muy flexible, con base en marcos de acero estructural, y que sus fachadas eran pesadas, con base en recubrimientos de piedra labrada. Además de las notoria irregularidad en elevación por escalonamiento, la estructura presenta una clara irregularidad por relación de aspecto en planta (planta alargada). Al parecer no sufrió daños estructurales, pero sí en las fachadas no estructurales y recubrimientos, seguramente ocasionados por la alta flexibilidad lateral de la estructura.

5. Distribuidor Vial Mexicali. Es una estructura recientemente construida en el Blvd. López Mateos y donde se emplea aislamiento sísmico, estructuras de tierra armada para los accesos, y ataguías de contención para el paso inferior. Este distribuidor tuvo un comportamiento sobresaliente durante el sismo, ya que no presentó daño alguno en ninguno de sus elementos.

El distribuidor cuenta con dos puentes principales, el puente Sur-Norte, con una longitud de 495m, dispone de 11 claros, diez apoyos intermedios y dos estribos, mientras que el puente Norte-Sur y su vuelta a la izquierda a la avenida Lázaro Cárdenas (Fig 20) tiene una longitud total de 537m con 12 claros, 11 apoyos intermedios y tres estribos (Cautín 2010). Los apoyos están formados por cuatro columnas de acero rellenas de concreto reforzado con diametros desde 80cm hasta 120cm. La cimentación es con base en zapatas sobre pilas. Se diseñó conforme a las normas AASHTO y se consideró un factor de reducción R=2 para las columnas y R=1 para la cimentación, para reducir la demanda de ductilidad en la estructura y mantenerla dentro del intervalo de comportamiento elástico para los eventos sísmicos que puedan presentarse (Cautín 2010).



Figura 20

Figura 21

Se empleó aislamiento sísmico porque proporciona una significativa reducción en las fuerzas elásticas por sismo. Los aisladores de base empleados son elastómeros laminados con corazón de plomo cilíndricos (Fig 21). El periodo fundamental del puente aislado sísmicamente fue estimado en T_a =1.83s y el periodo fundamental de un puente "gemelo", pero con un diseño convencional, se estimó en T=0.76s (Cautín 2010).

<u>6. Facultad de Ciencias Administrativas de la UABC</u>. Son cinco edificios estructurados con marcos de acero y contravientos, ubicados en la planicie de inundación del río Nuevo. Asimismo, se cuenta con parques, estacionamientos, el puente peatonal y las calles. Todas las estructuras existentes sufrieron daños importantes al descender el nivel de piso por efecto de la licuación del subsuelo, entre 25 y 30cm (Figs 22 y 23).

7. Hospitales Generales del ISSSTE y de la Secretaría de Salud. Ambos hospitales se encuentran ubicados en la misma manzana. De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos, los edificios de los hospitales están apoyados en arcillas preconsolidadas potencialmente expansivas y con el nivel freático a 6.5m de profundidad.

El Hospital General "5 de Diciembre" del ISSSTE está compuesto por una torre de seis niveles y tres cuerpos de tres niveles, y aparentemente data de los años setenta. Al momento de la visita no se pudo entrar a las instalaciones del hospital; sin embargo, desde el exterior eran visibles agrietamientos en el contacto de las escaleras de emergencia (exteriores) con los primeros dos niveles.

Por su parte, el Hospital General de Manzanillo de la Secretaría de Salud consta de un edificio principal de ocho niveles con sótano y varios anexos de un solo nivel. Se trata de un hospital de diseño más reciente que el del ISSSTE, posiblemente de los años noventa, y que no presentó daños estructurales durante el sismo.



Figura 22

Figura 23

8. Edificio de Estacionamiento del Gobierno del Estado. El edificio se ubica prácticamente enfrente del Hospital General del ISSSTE y se encontraba en construcción durante el sismo. Es una estructura prefabricada, con base en columnas y trabes de concreto presforzado y muros de concreto, al parecer postensados. En el proceso constructivo se izan primero las columnas (al parecer pretensadas), que son esbeltas y cuentan con ménsulas de acero y cuya función es recibir a las trabes también pretensadas. Posteriormente, se construían los muros, quienes también cuentan con ménsulas de acero. Finalmente, se montan vigas T prefabricadas para formar el sistema de piso. Los daños que sufrió el edificio al tiempo del sismo fue la caída por deslizamiento de las vigas T que componían al sistema de piso por haber pedido su apoyo, como consecuencia de la inclinación que sufrieron algunas columnas.

<u>9. Central de Autobuses de Mexicali</u>. El edificio sufrió severos agrietamientos por cortante en sus muros de fachada de mampostería, con base en ladrillo rojo recocido, que no disponían de castillos en las zonas aledañas a las aberturas para ventanas, por lo que su falla por cortante era la crónica de una muerte anunciada. A pesar de los daños observados, el inmueble está en operación.

10. Hotel Araiza. Se trata de una construcción de tres cuerpos principales que forman en planta una C, con la alberca en medio. El cuerpo central de seis niveles, que es el acceso al hotel, tiene una planta alargada con relación de aspecto aproximadamente de 4; sin embargo, está conectado a los otros dos cuerpos con pasillos y escaleras, razón por la cual durante el temblor la planta alargada experimentó vibraciones importantes en sus extremos (conexión con los edificios), que originó que algunos muros del extremo sufrieran algunas grietas menores, que no fueron de consideración para la seguridad estructural ni la operación normal del inmueble.

<u>11. Edificio Comercial del Centro de Mexicali</u>. Durante nuestra visita al centro de Mexicali, no se apreciaron grandes daños. Un ejemplo fue un edificio antiguo de cuatro niveles con base en marcos de concreto reforzado donde se observaron desprendimiento del recubrimiento y el pandeo del refuerzo longitudinal en una columna del último nivel en su extremo superior.

<u>12-Estacionamiento del Bosque y Zoológico de Mexicali.</u> Este sitio no fue visitado por nosotros pero de información recopilada en internet se presenta por su relevancia. Se presentaron agrietamientos en pavimentos con aberturas del orden de los 10cm y profundidades mayores de 1m. Hay que resaltar que esta zona del Bosque y Zoológico se encuentra sobre la margen del río Nuevo, al igual que la Colonia El Vidrio,

zona vecina al Bosque y a la Facultad de Ciencias Administrativas, que también sufrió hundimientos y agrietamientos del terreno.

3.2.1.2 Valle de Mexicali

En contraste con el comportamiento observado en la ciudad de Mexicali, los daños en viviendas, carreteras y canales de irrigación en el Valle de Mexicali fueron importantes.

En vivienda se presentaron extensos daños en muros, pisos y techos, sobre todo en estructuras de mampostería no confinada con base en muros de adobe o de bloque de concreto (Fig 24), donde se presentaron colapsos parciales y totales. Un hecho singular que cabe destacar es que se encontró una estructura de mampostería confinada con base en muros de adobe, lo cual es atípico. Aunque la vivienda 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 24. Daños en viviendas del Valle de Mexicali.

Se visitaron los poblados y ejidos, La Puerta, El Faro, Colonia Mariana, Ejido Durango, La Colonia Aguascalientes, y Guadalupe Victoria. Se pudo observar 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. Se observó que los volcanes de arena y agua que se forman por el proceso de licuación del subsuelo somero de 2 a 8m de profundidad. Además, se observaron fracturas del terreno afectando a construcciones civiles v al sistema de carreteras del Valle de Mexicali.

La zona con más daño se ubica dentro de una franja que está entre las estaciones acelerográficas Michoacán de Ocampo (MDO) y Riito (RII), que pertenecen a la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM), estaciones donde se registraron aceleraciones verticales considerablemente altas, de 799 y 668cm/s².

En caminos, se observaron fracturamientos transversales y longitudinales. Asimismo, se presentaron deslizamiento de terreno en cortes naturales, agrietamientos del terreno (con centímetros de apertura y hasta 3 m de profundidad) y agrietamientos en canales.

Se observaron daños en puentes ferroviarios, como pérdidas de apoyo y torcedura de las vías, así como en apoyos y estribos de puentes carreteros.

Otros daños que se observaron fueron el colapso de algunos pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, y en las líneas de trasmisión, como la de Tijuana-Mexicali (subestación Rosita) y la línea de interconexión con Imperial Valley, Estados Unidos.

Los factores predominantes fueron: la licuación, el agrietamiento provocado por el desplazamiento lateral del suelo, la debilidad estructural de la vivienda y la subsidencia. En general, las viviendas de mampostería no reforzada construidas con adobe o con bloque de concreto colapsaron donde existió la licuación.

3.2.2 Licuación

Es bien conocido el hecho que en lugares donde la sismicidad es alta puede presentarse el fenómeno de licuación en suelos granulares saturados sueltos o compacidad media que se encuentren a profundidades menores de 20 m y debajo del nivel freático.

El fenómeno de licuación se presentó de manera generalizada en el valle de Mexicali (Fig 25), tanto a lo largo de caminos (carreteras Estatal #4, Mexicali-San Felipe, etc.), en zonas de cultivo y en poblados (ejidos Durango, Sonora, Nayarit, Oaxaca, Patzcuaro, etc.).

En la Fig 26 se muestra la variación de la resistencia dinámica de cono mediante un equipo ligero (PANDA) en dos sitios donde se presentó la licuación. Obsérvese que los valores son menores de 80kg/cm² hasta los 3m de profundidad, lo cual indica una arena muy suelta.

Considerando una aceleración del terreno de a_h =530gales para el valle de Mexicali y un sismo de magnitud M_w=7.2, la relación de esfuerzo cíclico (CSR) generado por el sismo es de 0.35<CSR<0.56 (Seed e ldriss, 1971). Dado este esfuerzo cíclico, la licuación del terreno se presenta cuando el número de golpes a la penetración estándar es menor de N_{SPT}<30. De la información geotécnica obtenida para el valle de Mexicali se observa que el potencial de licuación es muy alto entre las profundidades de 1.5 a 2.5m y 4 a 8m. Este resultado sugiere que la licuación se presentó en los primeros 10m de profundidad. Es necesario llevar a cabo un estudio de licuación más amplio a fin de corroborrar la conclusión anterior.



Figura 25. Conos de arena originados por el fenómeno de licuación en el Valle de Mexicali.



Figura 26. Sondeo de cono dinámico en zona licuada.

En ocasiones la licuación fue acompaña por el agrietamiento del terreno provocado por su desplazamiento lateral en exceso. Este fenómeno se observó en los caminos y canales, aunque también en terrenos de cultivos. La falla de los taludes tanto en terraplenes de carreteras como en canales fue una de las principales causas del agrietamiento longitudinal. También se observó un agrietamiento transversal a los canales y carreteras, el cual probablemente tiene su origen en el fallamiento de bloques en el subsuelo.

Estudios de paleosismicidad indican que muchos de los agrietamientos observados en la zona de Cerro Prieto son generados principalmente después de un sismo por el descenso de grandes bloques en el subsuelo.

En conclusión, tanto los agrietamientos como los descensos observados en el terreno en la zona de la planta geotérmica de Cerro Prieto y alrededores han sido originados primordialmente por el movimiento de grandes bloques sometidos a las fuerzas sísmicas y la licuación.

4 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos sobremanera las atenciones del Dr. Joel Martínez de la Facultad de Ingeniería de la UABC por guiarnos en la visita a la Facultad de Ciencias Administrativas de la UABC y al Edificio de Estacionamiento del Gobierno del Estado. Asimismo, agradecemos al Ing. Alfonso Rodríguez Pérez de la Constructora Cautín, por facilitarnos información valiosa sobre el diseño del Distribuidor Vial Mexicali y a los M.I. Cesar Dumas González y Francisco Javier Franco Casas por la información geotécnica proporcionada tanto del valle como de la ciudad de Mexicali.

5 REFERENCIAS

Campos, G.J.M. 1974. Capitulo V: Mexicali, B. C., *VII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Tomo I. Guadalajara, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS, México.

- Cautín 2010. Construcciones con aislamiento sísmico en México, Informe Interno, *Constructora Cautín*, Guadalajara, México.
- Dumas, G.G.C. 2010, personal comunication.
- Franco, C.F.J. 2010, personal comunication.
- Google Earth, 2010.
- Grupo RESNOM 2002. Estado actual de RESNOM y sismicidad de la región noroeste de México en el periodo septiembre-diciembre de 2001, *GEOS*, Unión Geofísica Mexicana, Abril.
- Munguía, L., Navarro, M., Valdez, T. and Luna, M. 2010. *Sismología de Movimientos Fuertes*, División de Ciencias de la Tierra, CICESE.
- Pelayo, A., Razo, M., Gutiérrez, L.C.A., Arellano, G.F., Espinoza, J.M. and Quijano L. 1991. Main geothermal fields of Mexico; Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, The Geology of North America, *Geological Society of America*, Vol. P-3, Economic Geology, México, pp:23-58.
- Rodríguez-Esteves J.M. 2002. Los desastres naturales en Mexicali BC, diagnóstico sobre el riesgo y la vulnerabilidad urbana, *Frontera norte* enero-junio, año/vol 14, num 027, colegio de la frontera norte, Tijuana México.
- Seed, B.H. and Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soils Mechanics and Foundation Division*, Vol. 97, No. 9, Sept, pp 1249-1273.
- Suárez-Vidal F., González, M., Munguía-Orozco, L., Wong-Ortega, V., Vidal A. and González-García, J. 2001. Distribución de daños materiales en el valle de Mexicali, B.C., ocasionados por los sismos de 1 de junio y 10 de septiembre de 1999, Mw=4.8, *GEOS*, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Abril.
- Topozada, R., Tusson, C.H., Real R. and Park D.L. 1981. Preparation of isoseismal maps summaries of reported effects for pre-1900 California earthquakes. Open File Report 81-11 SAC, Annual technical report to U. S. Geological Survey, California Division of Mines and Geology.