



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**CLASIFICACIÓN DE EDIFICIOS
DAÑADOS POR LICUACIÓN
ACORDE AL TIPO DE
CIMENTACIÓN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
ALEJANDRO MEDEL BARRERA

DIRECTOR DE TESIS:
ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA



FES Aragón

NEZAHUALCÓYOTL, EDO. MEX., NOVIEMBRE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en la cual se han formado hombres y mujeres libres de pensamiento con el objetivo de ayudar al desarrollo de México, en esta Universidad adquirí conocimientos y habilidades que me han hecho crecer como persona. Mi paso por la Facultad de Estudios Superiores Aragón fue solo de algunos años, sin embargo estaré eternamente agradecido y en deuda ya que formar parte de la UNAM sin duda ha marcado mi vida para siempre.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por brindarme la oportunidad de usar sus instalaciones y equipo por más de un año y medio, en donde aprendí que la dedicación y constancia son la clave para no claudicar de nuestros objetivos.

Quiero extender un sincero agradecimiento al Dr. Eduardo Reinoso Angulo, por su valioso apoyo y disponibilidad que hicieron posible el desarrollo de este tema de tesis. Debido a su gran experiencia y calidad de persona es para mí un ejemplo a seguir.

Agradezco de manera especial al Dr. Miguel Angel Jaimes Téllez, por su valiosa colaboración en el desarrollo del presente trabajo, desde la elección del tema de tesis, observaciones y correcciones hasta la culminación de esta tesis.

Al Ing. Gabriel Álvarez Bautista, por sus observaciones en el presenté trabajo e invaluable ayuda para que este tema fuera validado. Además por compartir su gran experiencia y conocimientos en las asignaturas que tuve el honor de cursar con él. Y sobre todo por sus consejos que siempre supe escuchar y sin temor a equivocarme sé que me servirán en la vida.

A mi familia, padres: Aurelio Medel Cruz y Evarista Barrera López, así como a mis hermanos: Héctor y Maricela y por supuesto a mis abuelas: Alfonsa y Felipa. Por su invaluable apoyo en estos arduos años de trabajo, definitivamente sin ayuda no hubiera podido terminar el camino que comencé en agosto de 2007.

Finalmente a mis amigos de la Facultad: Carlos, Daniel, Diego, Faustino, Miguel, Samuel y los que me falten por mencionar, con quienes he pasado momentos muy gratos que siempre atesoraré en mi mente.

*"...No estudio para saber más
sino para ignorar menos..."*

Juana Inés de Asbaje y Ramírez

*"...en tu futuro brillante,
no debes olvidarte de tu pasado..."*

Robert Nesta Marley



Resumen

En los Capítulos 1 y 2 del presente trabajo se exponen casos de edificios y otras estructuras, dañadas por el fenómeno de licuación, durante eventos sísmicos ocurridos en México y otras partes del mundo; esta información fue recopilada en los reportes que diversas organizaciones internacionales publican con fines de investigación. Para propósitos de este trabajo los edificios fueron documentados considerando el tipo de cimentación:

1. Flexible (zapatas aisladas y corridas)
2. Rígida (losa de cimentación), y
3. Pilotes

En el Capítulo 3 se proponen estados límite de daño para estructuras afectadas por licuación, en base a la información expuesta en la Tabla 1.1 y 2.1, así como a los criterios propuestos por Kishida (1966) y Bird *et al.* (2006). Los estados límite de daño propuestos en este capítulo se presentan en la Tabla 3.3.

En el Capítulo 4, se clasifican y analizan los edificios dañados por licuación expuestos en la Tabla 1.1 y 2.1, tomando en cuenta el tipo de cimentación: (1) cimentación flexible, (2) cimentación rígida y (3) cimentación a base de pilotes. Se generan funciones de fragilidad, las cuales representan la probabilidad de que un edificio exceda un determinado estado límite de daño: (1) ninguno, (2) ligero, (3) moderado, (4) severo y (5) completo, en función del desplazamiento vertical (Δ_v).

Índice general

Resumen.....	I
Índice general.....	II
Índice de figuras.....	IV
Índice de tablas.....	IX
Introducción	1
Fenómeno de licuación	1
Cimentaciones rígidas y flexibles	2
Objetivos.....	XII
Capítulo 1 Daños a edificios por licuación en el mundo	1
1.1 Sismo de Niigata en 1964	1
1.2 Sismo de Luzón Filipinas en 1990	3
1.3 Sismo de Costa Rica y Panamá en 1991	6
1.4 Sismo de Kobe Japón en 1995	8
1.5 Sismo de Taiwán Chi-Chi en 1999	10
1.6 Sismo de Turquía Kocaeli en 1999	14
1.7 Sismo de Perú en 2007.....	17
1.8 Sismo de Niigata Chuetsu-Oki, Japón en 2007.....	23
1.9 Sismo de Darfield Nueva Zelanda en 2010.....	24
1.10 Sismo de Chile en 2010	25
1.11 Sismo de Nueva Zelanda, Christchurch en 2011	27
1.12 Sismo de Tohoku Japón en 2011	31
Capítulo 2 Daños a edificios por licuación en México.....	37
2.1 Sismo de Lázaro Cárdenas Michoacán en 1985	37
2.1.1 Planta SICARTSA	37
2.1.2 Planta FERTIMEX	37
2.2 Sismo de Manzanillo Colima en 1995	38
2.2.1 Patio de contenedores del puerto de Manzanillo.....	39
2.2.2 Fenómeno de licuación en zonas de casas habitación.....	40
2.3 Sismo de Manzanillo Colima en 2003	42
2.3.1 Puerto de Manzanillo	42
2.4 Sismo de Baja California en 2010.....	44
2.4.1 Puente San Felipe	44
2.4.2 Edificios de la Universidad Autónoma de Baja California	47
2.4.3 Residencias afectadas en el valle de Mexicali	49
Capítulo 3 Propuesta de estados límite de daño para estructuras afectadas por licuación en base a criterios existentes	54
3.1 Criterios existentes para estimar estados límite de daño en edificios afectados por el fenómeno de licuación	54
3.2 Propuesta de estados límite de daño para edificaciones afectadas por el fenómeno de licuación	56
Capítulo 4 Análisis de edificios dañados por licuación en México y el mundo acorde al tipo de cimentación	58
4.1 Análisis de los edificios con cimentación flexible	58
4.1.1 Edificios clasificados con un estado de daño completo	58
4.1.2 Edificios clasificados con nivel de daño severo.....	59
4.1.3 Edificios clasificados con nivel de moderado	61
4.1.4 Edificios clasificados con nivel de daño ligero	62
4.2 Análisis de los edificios con cimentación rígida.....	63
4.2.1 Edificios clasificados con nivel de daño completo	63
4.2.2 Edificios clasificados con nivel de daño severo.....	64
4.2.3 Edificios clasificados con nivel de daño moderado	65
4.2.4 Edificios clasificados con nivel de daño ligero.....	66

4.3 Análisis de los edificios cimentados con pilotes.....	68
4.3.1 Edificios clasificados con nivel de daño severo.....	68
4.3.2 Edificios clasificados con nivel de daño moderado.....	68
4.4 Análisis de los edificios que presentaron inclinación acorde al tipo de cimentación.....	69
4.4.1 Edificios con cimentación flexible.....	70
4.4.2 Edificios con cimentación rígida.....	71
4.4.2 Edificios cimentados con pilotes.....	73
4.5 Comparación entre las funciones de fragilidad propuestas para edificios con desplazamiento vertical y funciones de fragilidad existentes.....	73
Conclusiones.....	76
Referencias.....	77
Anexo 1. Explicación del método usado para estimar el θ_{aprox}, Δ_V y Daños observados en las estructuras donde no se especificaba este valor en las referencias.....	79
Anexo 2. Edificios afectados por licuación en México y el mundo.....	82
Anexo 3. Edificios afectados por licuación durante el sismo de Turquía en 1999.....	84



Índice de figuras

Figura 1.1. a) Edificios afectados por licuación (Ohsaki, 1966) ^{36,37} y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	1
Figura 1.2. a) Edificio de cuatro niveles con ~15° de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966) ³⁸ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	2
Figura 1.3. a) Edificio de cuatro niveles con ~8° de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966) ³⁹ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	2
Figura 1.4. a) Edificio de tres niveles con ~5° de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966) ⁴⁰ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	3
Figura 1.5. Desplazamiento vertical e inclinación de un edificio de concreto reforzado (Ishihara, Acacio y Towhata, 1993) ⁴²	4
Figura 1.6. Desplazamiento vertical e inclinación de un edificio adyacente al de la figura 1.7 (Orense, 2011) ⁴³	4
Figura 1.7. a) Edificio de tres niveles afectado por desplazamiento diferencial vertical e inclinación de ~12°, causado por el fenómeno de licuación en la ciudad de Dagupan (EERI, 1990) ⁴⁴ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	4
Figura 1.8. a) Daño a una residencia debido al desplazamiento horizontal y vertical (Orense, 2011) ⁴⁵ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla de una estructura de un solo nivel con cimentación flexible.....	5
Figura 1.9. Puente Magsaysay afectado por el fenómeno de licuación (EERI, 1990) ⁹⁰	5
Figura 1.10. a) Vista longitudinal del puente Magsaysay después del sismo de Luzón y b) Representación esquemática del colapso del puente Magsaysay (Ishihara, Acacio y Towhata, 1993).....	6
Figura 1.11. a) Grietas producto de desplazamiento horizontal en las oficinas de la Chiriquí Land Company en Changuinola, se observa también el desplazamiento diferencial vertical en la parte derecha de la estructura (Camacho y Viquez, 1994) ⁴⁶ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para una estructura de un solo nivel con cimentación flexible.....	7
Figura 1.12. Puente Atalanta, sufrió desplazamiento horizontal de aproximadamente 2 m, el tramo final colapso (Sauter, 1994) ⁹²	8
Figura 1.13. Desplazamiento vertical de aproximadamente 30 cm, del suelo alrededor del edificio de la terminal del tren en Port Island (Akai et al., 1995) ⁴⁷	9
Figura 1.14. a) Pilote agrietado debido a un desplazamiento horizontal de aproximadamente 20 cm, los pilotes no fueron diseñados para resistir desplazamientos laterales (Akai et al., 1995) ⁴⁸ b) El pilote fue cortado y desplazado, había sostenido una construcción que funcionaba como almacén (Akai et al., 1995) ⁴⁸ y c) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación a base de pilotes.....	9
Figura 1.15. Desplazamiento horizontal y vertical de los pilotes de cimentación en la terminal de tren (Akai et al., 1995) ⁴⁹ y b) Representación esquemática para el tipo de modo de falla para un edificio cimentado sobre pilotes dañado por el desplazamiento vertical y horizontal.....	10
Figura 1.16. Presa Shikung después del sismo de Chi Chi (Moh et al., 2001).....	11
Figura 1.17. a) Falla de la cimentación rígida debido al fenómeno de licuación, la superestructura presentó una inclinación de ~12° (Moh et al., 2001) ⁵² y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	11



Figura 1.18. Vivienda de un nivel con techo de tejas y muros de ladrillo sufrió asentamiento (EEFIT, 2007) ⁵³ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible	12
Figura 1.19. Vista interior de la vivienda mostrada en la Fig 1.16, se aprecia el suelo licuado y daño a los muebles. (EEFIT, 2007)	12
Figura 1.20a. Inclinación de un edificio causado por el desplazamiento diferencial vertical en la cimentación de aproximadamente 10 cm. (EEFIT, 2007) ⁵⁴	13
Figura 1.21. a) Daños inducidos por licuación al edificio de una escuela después del sismo de 1999 en Chi-Chi, cortesía: Marshall Lew, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, Bird et al., (2006) ⁵⁵ y b) Representación esquemática para la falla de un edificio con cimentación rígida según Bird et al., (2006).....	14
Figura 1.22. a) Edificio con asentamiento vertical en la Ciudad de Adapazari, fotografía tomada por Thomas L. Holzer (USGS, 2000) ⁵⁶ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	15
Figura 1.23. a) Edificio con inclinación de ~50° debido a que la cimentación falló a causa de la licuación, además sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 50 cm, Fotografía tomada por Richard S. Olsen (USGS, 2000) ⁵⁷ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	15
Figura 1.24. Asentamiento en la entrada al Hotel Sapanca, foto tomada por Thomas L. Holzer, (USGS, 2000) ⁵⁸	16
Figura 1.25. a) Edificio de dos niveles afectado por desplazamiento vertical y desplazamiento horizontal. (Sancio et al., 2004) ⁵⁹ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible afectado por el desplazamiento vertical y horizontal.....	16
Figura 1.26. Edificio de concreto reforzado desplazado 57 cm hacia la calle (Bray et al., 2000) ⁶⁰	17
Figura 1.27. a) Residencia de un nivel sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 1.0 m (Elnashai et al., 2008) ⁶² y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	18
Figura 1.28. a) Residencia de un nivel sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.7 m, y sus muros presentaron severas grietas (Elnashai et al., 2008) ⁶³ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible	19
Figura 1.29. a) Residencia de un nivel sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.5 m, (Elnashai et al., 2008) ⁶⁴ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible.....	19
Figura 1.30. a) Desplazamiento vertical de aproximadamente 0.8 m en un residencia de un nivel localizada en el número 148 de la calle Alfonso Ugarte en el distrito de Tambo de Mora, 08/24/07 9:35AM, S13.45682 W76.18277 (GEER, 2007) ⁶⁵ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible	20
Figura 1.31. a) Residencia de un nivel afectada por un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.7 m, b) Vista del interior de la residencia, se aprecia la gran cantidad de metros cúbicos de arena que ocupan el interior de la estructura (GEER, 2007) ⁶⁶ y c) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible	21
Figura 1.32. Residencia afectada por el desplazamiento lateral de aproximadamente 0.9 m, fotografía tomada el 08/21/07 2:07PM, S12.57739 W76.70338 (GEER, 2007) ⁶⁷ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible	22
Figura 1.33. Residencia afectada por el desplazamiento vertical de aproximadamente 0.2 m, fotografía tomada el 08/21/07 2:18PM, S12.57672	



W76.70358 (GEER, 2007) ⁶⁸ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible.....	22
Figura 1.34. a) Edificio de tres niveles con ~5° de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966) ⁴⁰ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	23
Figura 1.35. a) Asentamiento del terreno adyacente a la cimentación de una torre de transmisión de alto voltaje (EERI, 2007) ⁹³ y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo alrededor de una estructura cimentada sobre pilotes.....	24
Figura 1.36. a) Edificio con desplazamiento vertical de aproximadamente 33 cm (Green y Cubrinovski, 2010) ⁸⁰ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un solo nivel con cimentación flexible.....	25
Figura 1.37. Edificio Riesco sufrió daños inducidos por licuación, la foto de la izquierda muestra la evidencia de sedimentos expulsados en la esquina noreste (S 36.79077°, W 73.08124°; 13:30 hrs 03/17/10). La foto de la derecha muestra daño en el interior del edificio debido al desplazamiento diferencial vertical. (GEER, 2010) ⁶⁹	26
Figura 1.38. Grietas causadas por el fenómeno de licuación en el patio de la escuela en San Pedro de La Paz. (Mendoza et al., 2011) ⁷⁰	26
Figura 1.39. Desplazamiento diferencial vertical de 10 cm en una casa de dos niveles debido al fenómeno de licuación. (Mendoza et al., 2011) ⁷¹	26
Figura 1.40. Restaurante dañado por grietas y un desplazamiento vertical de aproximadamente 40 cm en la orilla del río Bio Bio (Mendoza et al., 2011) ⁷²	27
Figura 1.41. Ejemplo de la severidad del fenómeno de licuación (GEER, 2011).....	28
Figura 1.42. Inundación de calles por efectos del fenómeno de licuación (GEER, 2011).....	28
Figura 1.43. Grieta de 30 m de longitud (GEER, 2011) ⁸⁰	28
Figura 1.44. Desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 10 cm en una casa habitación (GEER, 2011) ⁸¹	28
Figura 1.45. Edificio con desplazamientos diferenciales, a) Vista de ambas caras, b) Vista de la cara norte (GEER, 2011) ⁸² y c) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación a base de pilotes.....	29
Figura 1.46. a) Edificio sometido a desplazamiento diferencial vertical cimentado en una zona propensa a licuación, 24 Mar 2011; -43.52878°, 172.64252° (GEER, 2011) ⁸³ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	30
Figura 1.47. a) Este edificio sufrió desplazamiento diferencial vertical y desplazamiento horizontal, 24 Mar 2011; -43.52878°, 172.64252° (GEER, 2011) ⁸⁴ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida.....	31
Figura 1.48. a) Edificio de tres niveles que presentó un desplazamiento vertical con respecto al nivel de la calle en Urayasu (N35.6485, E139.9178) EERI (2011) ⁸⁵ y b) Representación esquemática de acuerdo a Bird et al., (2006).....	32
Figura 1.49. a) Desplazamiento vertical en relación con el edificio de la izquierda, el cual esta cimentado sobre pilotes, ubicado en Urayasu (N35.6485, E139.9178) EERI (2011) ⁸⁶ y b) Representación esquemática para el tipo de modo de falla de un edificio cimentado sobre pilotes.....	32
Figura 1.50. a) Desplazamiento vertical diferencial e inclinación de edificios residenciales en la ciudad de Kamisu Japón (N35.917, E140.642) Ashford et al., (2011) ⁸⁷ y b) Representación del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	33
Figura 1.51. a) Desplazamiento vertical diferencial e inclinación de un edificio de dos niveles para uso residenciales en la ciudad de Kamisu Japón (N35.917, E140.642) Ashford et al., (2011) ⁸⁸ y b) Representación del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible.....	33



Figura 2.1. Desplazamiento vertical del piso en la terminal de usos múltiples de la planta SICARTSA, Lázaro Cárdenas, Michoacán 19 de Septiembre de 1985 (Farreras, Ortiz y Alcalá, 2003)	37
Figura 2.2. Las vías del tren cerca de Paso de Burras en Lázaro Cárdenas, sufrieron deformaciones como resultado del Tsunami del 19 de septiembre de 1985 (Lomnitz y Castaños, 1985).....	38
Figura 2. 3. Las grietas y el asentamiento en el patio de contenedores causo daño ligero en las grúas de carga (Juárez et al., 1997) ⁹¹ y b) Representación esquemática, se observa la distribución de los pilotes que sostienen a la grúa de carga y descarga (Ovando y Romo, 2000).....	40
Figura 2. 4. Evidencia del fenómeno de licuación en la zona de contenedores (Juárez et al., 1997).....	40
Figura 2. 5. a) Edificio de cuatro niveles en la colonia Libertad, sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 10 cm, no presentó daños estructurales (López y Teshigawara, 1997) ⁵⁰ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación flexible	41
Figura 2. 6. a) Casa habitación de un solo nivel, sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 50 cm (López y Teshigawara, 1997) ⁵¹ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla ante el fenómeno de licuación de una estructura de un nivel con cimentación flexible.....	42
Figura 2.7. Desplazamiento vertical y horizontal del suelo debido al fenómeno de licuación de un paseo peatonal, cerca del centro de la ciudad de Manzanillo. La forma cóncava de la acera, a la derecha de la fotografía sugiere un asentamiento de la superficie del del suelo (GEER, 2003).....	43
Figura 2.8. Desplazamiento horizontal en el puerto de Manzanillo, esta parte fue cerrada temporalmente al tráfico (GEER, 2003).....	43
Figura 2. 9. Desplazamiento lateral hacia el mar en el Puerto de Manzanillo (GEER, 2003).....	44
Figura 2. 10. Vista aérea de la terminal de contenedores en el Puerto de Manzanillo, sobre el terreno en la parte frontal de la fotografía se observan las áreas de licuación (GEER, 2003).....	44
Figura 2.11. Desplazamiento lateral del suelo y los efectos sobre los puentes de San Felipito (GEER, 2010).....	45
Figura 2.12. Puente del ferrocarril casi colapsado debido al desplazamiento horizontal. Foto por Scott Brandenburg, 17 de abril de 2010 (GEER, 2010) ⁹⁴	45
Figura 2.13. Colapso de un claro del puente ferroviario cerca de Guadalupe Victoria, debido al desplazamiento horizontal hacia el río Colorado. Foto de Diane Murbach, 10 de abril de 2010 (GEER, 2010) y b) Representación esquemática del desplazamiento lateral que provocó el colapso de un claro del puente ferroviario San Felipito	46
Figura 2.14. Aproximadamente 0.5 m de asentamiento del terreno en el puente de la autopista, también se observa el puente del ferrocarril en el fondo. Foto tomada por Jim Gingery, 10 de abril de 2010 (GEER, 2010) ⁹⁵ y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo y comportamiento eficiente del pilote ante el fenómeno de licuación.....	46
Figura 2.15. Mapa de la ubicación de los edificios de la Universidad Autónoma de Baja California en Mexicali. Google Earth imágenes del 31 de enero de 2008, N32.630260 °, W115.483642° (GEER, 2010).....	48
Figura 2.16. a) Daños parciales al piso debajo del muro en la cara norte del edificio D (GEER, 2010) ⁷³ y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo debido al fenómeno de licuación	48
Figura 2.17. a) Medición del desplazamiento vertical diferencial entre piso de la estructura y el piso del patio. Foto de Scott J. Brandenburg, 17 de abril de 2010 (GEER, 2010) ⁷⁴ y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo debido al fenómeno de licuación	49



Figura 2.18. a) Casa habitación de un nivel dañada por el desplazamiento lateral y por el desplazamiento horizontal, ubicada sobre la margen del río Hardy (GEER, 2010) ⁷⁷ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para una estructura de un nivel por desplazamiento vertical y horizontal con cimentación flexible	50
Figura 2.19. a) Estructura de dos niveles en el poblado de Oaxaca sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 1 m (GEER, 2010) ⁷⁸ y b) Representación esquemática para una estructura de dos niveles dañada por un desplazamiento vertical debido a la pérdida de carga del suelo.....	51
Figura 2.20. a) Esta residencia, situada a unos 60 m del Río Hardy, sufrió severos daños debido al desplazamiento horizontal (N32.2380682° W115.301572°). Foto de Diane Murbach, 10 de abril de 2010, b) Vista interior de la residencia afectada por desplazamiento horizontal, N32.2383828° W115.3014691° GEER (2010) ⁷⁹ y c) Representación esquemática de una estructura de un solo nivel dañada por el desplazamiento horizontal con cimentación flexible	52
Figura 3. 1. Representación esquemática de los estados límite de daños: a) ligero, b) moderado, c) severo y d) completo.....	57
Figura 4. 1. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño severo.....	60
Figura 4. 2. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño	61
Figura 4. 3. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño ligero	62
Figura 4. 4. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible	63
Figura 4. 5. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño severo	65
Figura 4. 6. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño moderado	66
Figura 4. 7. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño ligero	67
Figura 4. 8. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación rígida	67
Figura 4. 9. Funciones de fragilidad para edificios cimentados sobre pilotes	69
Figura 4. 10. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible	71
Figura 4. 11. Edificios con cimentación rígida que presentaron rotación y un estado de daño completo	72
Figura 4. 12. Curvas de fragilidad para edificios con cimentación flexible afectados por desplazamientos verticales (Bird <i>et al.</i> , 2006).....	74
Figura 4. 13. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible	75



Índice de tablas

Tabla 1.1. Edificios dañados por licuación en el mundo.....	35
Tabla 2. 1. Edificios dañados por licuación en México	53
Tabla 3.1. Clasificación de daños a cimentaciones (Kishida, 1966)	54
Tabla 3.2. Límites de estados sugeridos de asentamiento y rotación para cuerpos rígidos debidos a la deformación del suelo, inducido por sismo debajo de edificios con marcos de concreto reforzado (Bird <i>et al.</i> , 2006)	55
Tabla 3.3. Clasificación de daños en edificios con cimentación flexible y rígida por licuación (basado en Kishida, 1966; Bird <i>et al.</i> 2006).....	56
Tabla 4.1. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño V.....	59
Tabla 4.2. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño IV	59
Tabla 4.3. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño III	61
Tabla 4.4. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño II.....	62
Tabla 4.5. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño V	64
Tabla 4.6. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño IV	64
Tabla 4.7. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño III	65
Tabla 4.8. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño II.....	66
Tabla 4.9. Edificios con cimentados con pilotes y nivel de daño IV	68
Tabla 4.10. Edificios con cimentados con pilotes y nivel de daño III.....	68
Tabla A-2.1. Edificios afectados por licuación en México y el mundo.....	82
Tabla A-3.1. Resumen de casos disponibles de edificios después del sismo de Turquía en 1999 (Unutmaz, 2008).....	84

Introducción

México es un país sísmicamente activo, por lo que el estudio del fenómeno telúrico así como sus efectos en seres humanos, suelos y estructuras es de vital importancia. Los eventos sísmicos ocurridos en México y el mundo han provocado cuantiosas pérdidas materiales y desafortunadamente también pérdidas de vidas humanas. Parte de estas víctimas y pérdidas materiales se deben al fenómeno de licuación el cual ha causado daños considerables en vías terrestres, líneas de conducción y captación de agua potable, canales a cielo abierto, puentes así como zonas agrícolas, entre otros.

Fenómeno de licuación

Se define como el proceso en el cual los suelos con contenido limoso-arenoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersécales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a desplazamientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos o en grandes asentamientos (Obando, 2009).

El fenómeno de licuefacción, como también es conocido, provoca la falla en las cimentaciones, ruptura de taludes y deslizamientos, siendo las cimentaciones superficiales las más dañadas ya que generalmente son construidas sin control de calidad de los materiales como se ha visto en casos documentados (GEER, 2010). Por otra parte se ha observado que las cimentaciones profundas tienen un mejor desempeño ante el fenómeno de licuación, por ejemplo el comportamiento de las cimentaciones profundas en el sismo de México en 1985, se observó que los pilotes de punta tuvieron un comportamiento adecuado para edificios, muelles, tanques y otras estructuras pero las cimentaciones superficiales sufrieron desplazamientos verticales importantes (Paniagua *et al.*, 2006). Sin embargo se apreció un adecuado comportamiento en zonas mejoradas previamente con compactación dinámica. El daño por licuación se agrava más en una estructura, cuando esta solo cuenta con una cimentación superficial debido a que resulta incosteable e impráctico que se construyan sobre cimentaciones profundas cuando se trata de construcciones para uso habitacional.

Cimentaciones rígidas y flexibles

La cimentación se define como la parte de las estructuras que tiene por objeto transmitir su peso al terreno natural. Si existe a poca profundidad un estrato de suelo adecuado para soportar la estructura, esta puede establecerse sobre el mismo con una cimentación directa o superficial, simplemente por contacto, pero si los estratos son muy débiles, las cargas se transmiten a un material más adecuado situado a una mayor profundidad, utilizando para ello pilas o pilotes que suelen llamarse cimientos profundos. En un sentido más amplio, una cimentación es la o las partes de una estructura que le proporcionan apoyo a la misma y a sus cargas, incluye al suelo o roca y a las partes de la estructura que sirven para transmitir las cargas (Martínez, 1998).

La clasificación más usual para las cimentaciones es: De acuerdo a García (2008)

Superficiales

- Zapatas corridas
- Zapatas aisladas
- Losas de cimentación

Profundas

- Cajones de cimentación
- Pilotes

Sin embargo, de acuerdo a Muzás (2002), las cimentaciones superficiales se dividen en rígidas y flexibles, las cuales se clasifican en función de la relación entre sus dimensiones, para realizar esta clasificación se toman las siguientes sugerencias, dentro del grupo de las cimentaciones rígidas se consideran:

- Zapatas cuyo vuelo “ v ” en la dirección principal de mayor vuelo es menor que $2h$, siendo h el canto de la zapata junto al paramento del pilar que sustenta
- Pozos de cimentación
- Elementos masivos de cimentación

En las cimentaciones de este tipo la distribución de deformaciones en una sección es no lineal y, por tanto, el método de análisis del elemento estructural es el de las bielas y tirantes.

Dentro del grupo de cimentaciones flexibles se consideran:

- Zapatas cuyo vuelo “ v ” en la dirección principal de mayor vuelo es mayor que $2h$, siendo h el canto de la zapata junto al parámetro del pilar que sustenta
- Losas de cimentación

En este tipo de cimentaciones la distribución de deformaciones en una sección puede considerarse lineal y es de aplicación la teoría general de flexión.

Por otra parte, dentro de los problemas derivados del fenómeno de licuación que afectan a las cimentaciones destacan el desplazamiento horizontal y vertical, lo que provoca el desplome y agrietamiento en las estructuras, esto aunado en ocasiones con la deficiencia que se tiene por parte del proceso constructivo aumenta la severidad de los daños.



Objetivos

Se espera que los edificios apoyados sobre cimentaciones profundas tengan una mejor respuesta, ante el fenómeno de licuación, que los edificios apoyados sobre cimentaciones superficiales, esto se comprobó mediante la recopilación de información de edificios afectados por licuación en México y el mundo, para comparar su modo de respuesta entre sí.

Otro de los objetivos que se busca, es averiguar si el desplazamiento vertical causa más daños que el desplazamiento horizontal, tomando en cuenta los casos expuestos se podrá dar una opinión.

Al no contar con un laboratorio para simular los efectos de licuación sobre modelos de edificios, y tampoco contar con recursos para realizar investigaciones en campo, después de un evento sísmico se pretende conocer que tan confiables es la información recopilada en informes técnicos, para proponer límites de daños a edificios afectados por licuación.

Los límites propuestos de daños para clasificar edificios dañados por licuación, tomando en cuenta el tipo de cimentación, expuestos en el presente trabajo se comparan con las clasificaciones existentes, propuestas por diferentes investigadores en distintos años.

Por último, el presente trabajo tiene como objetivo crear una base de datos de edificios dañados por licuación, acorde al tipo de cimentación, para fines de investigación en futuros trabajos.



Capítulo 1

Daños a edificios por licuación en el mundo

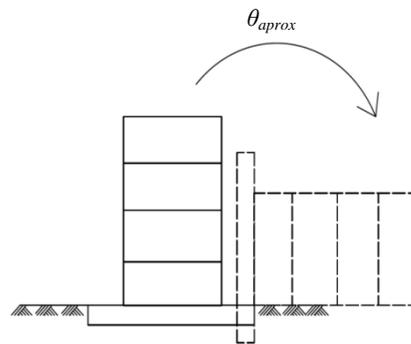
1.1 Sismo de Niigata, Japón en 1964

El 16 de Junio de 1964 un gran sismo ocurrió en la prefectura de Niigata, a las 13:01 hora local con una $M_W=7.6$. La vibración inducida por el sismo ocasiono el fenómeno de licuación en las arenas saturadas causando severos daños a diferentes estructuras, entre los que destacan los provocados a los 2,130 edificios colapsados y 6,240 con daños parciales (Ohsaki, 1966).

En la Figura 1.1 se muestra el caso de un conjunto de edificios departamentales en Kawagishi-Cho en la ciudad de Niigata (tomada desde un avión). En esta se observan daños ocasionados por el fenómeno de licuación. Se puede apreciar que un edificio volcó totalmente mientras que algunos más se inclinaron en diferentes direcciones, además también se observa que otros tres edificios no sufrieron daños graves. Esto indica que las diferentes respuestas de cada grupo de edificios está posiblemente relacionado con el tipo de cimentación: (1) los edificios que sufrieron inclinaciones mayores a 30° tenían una cimentación superficial y (2) los edificios sin daños graves estaban cimentados sobre pilotes de concreto (Mohammed y Maekawa, 2010).



a)



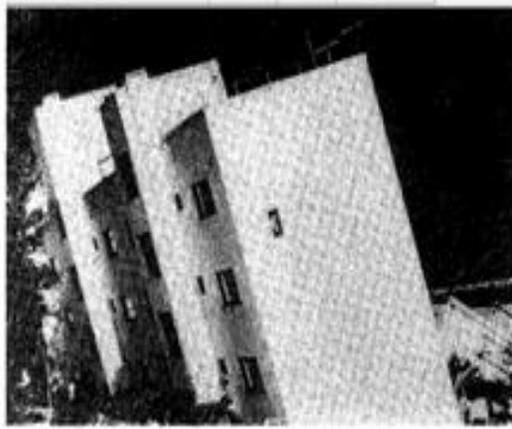
b)

Figura 1.1. a) Edificios afectados por licuación (Mohammed y Maekawa, 2010)^{36,37} y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida

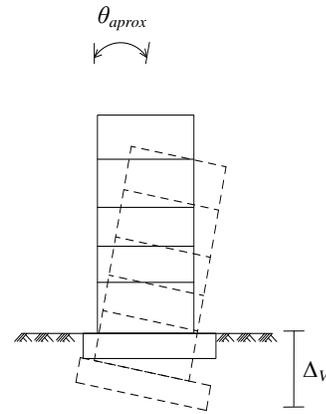
Por otra parte en la Figura 1.2 se aprecia un conjunto de edificios departamentales, de cuatro niveles, ubicados en Kawagishi-Cho, Japón (Ohsaki, 1966). Estos edificios fueron dañados por el fenómeno de licuación debido al sismo de 1994. Se puede observar que los



edificios presentan una inclinación de $\sim 15^\circ$; sin embargo a pesar de la magnitud de su inclinación, no se nota un daño importante en la superestructura de cada edificio.



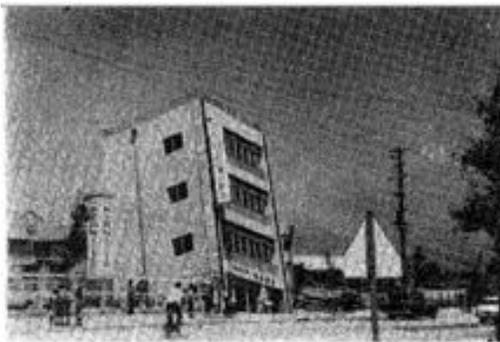
a)



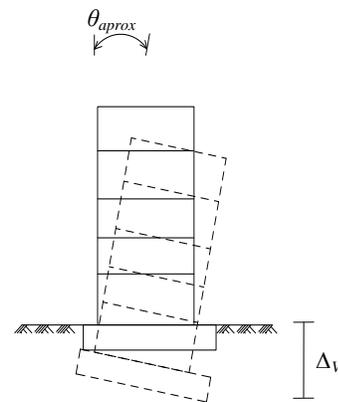
b)

Figura 1.2. a) Edificio de cuatro niveles con $\sim 15^\circ$ de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966)³⁸ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación rígida, que presentó desplazamiento diferencial vertical e inclinación

En la Figura 1.3 se observa un edificio de cuatro niveles con cimentación rígida (Ohsaki, 1966), este edificio presentó una inclinación de $\sim 8^\circ$ por efectos del fenómeno de licuación, al igual que el caso anterior no se nota ningún daño aparente en la superestructura. Sin embargo debido a que después del sismo el edificio es inhabitable y el costo que implica regresarlo a la posición vertical que tenía la estructura antes del sismo, se considera como pérdida completa del edificio.



a)



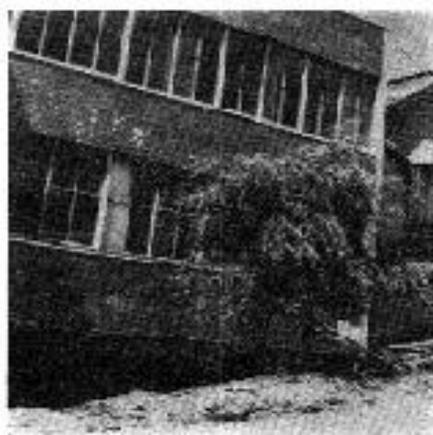
b)

Figura 1.3. a) Edificio de cuatro niveles con $\sim 8^\circ$ de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966)³⁹ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación rígida, que presentó desplazamiento diferencial vertical e inclinación

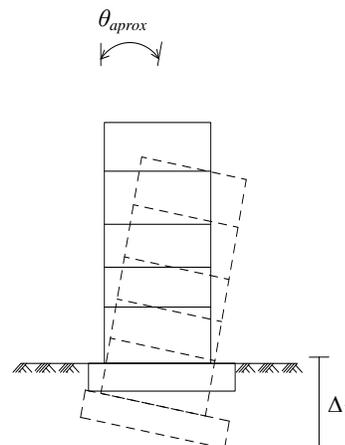
Otro ejemplo parecido a los casos anteriores se muestra en la Figura 1.4 donde se observa un edificio de tres niveles con una inclinación de $\sim 5^\circ$ sin ningún daño severo en la



superestructura, sin embargo el desplazamiento diferencial vertical y en consecuencia su inclinación, provocó la pérdida total del edificio (Ohsaki, 1966).



a)



b)

Figura 1.4. a) Edificio de tres niveles con $\sim 5^\circ$ de inclinación con respecto a la vertical (Ohsaki, 1966)⁴⁰ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación rígida, que presenta desplazamiento diferencial vertical e inclinación

Las estructuras expuestas anteriormente son edificios para uso habitacional de tres o cuatro niveles, los cuales fueron afectados por el fenómeno de licuación provocando modos de fallas similares entre estas estructuras; tomando como referencia la información proporcionada por Ohsaki (1966). Se puede esperar que para edificios de 3 a 4 niveles con una cimentación superficial se inclinen en cualquier dirección aproximadamente de 5° a 15° , por el contrario se espera una mejor respuesta ante el fenómeno de licuación en los edificios cimentados sobre pilotes. Por otra parte, a pesar de que en la superestructura no se observan daños severos, los edificios se consideran como pérdida total debido a que su reparación, en este caso, rehabilitarlos acorde a su estado previo al evento sísmico, sería incoachable.

1.2 Sismo de Luzón, Filipinas en 1990

Este sismo ocurrió en la isla de Filipinas en la ciudad de Luzón a las 4:26 P.M. (hora local) el 16 de Julio de 1990 tuvo una magnitud de 7.7° causando grandes daños a edificios, carreteras y puentes; principalmente en la ciudad de Baguio en donde un gran número de edificios colapsaron (Ishihara, Acacio y Towhata, 1993).



Algunos de estos daños se debieron al fenómeno de licuación, el cual se hizo presente en las comunidades de Tarlac, Pangasinan y poblados cercanos, las ciudades con mayores daños fueron, Dagupan, Agoo y Aringay. En la ciudad de Dagupan algunos edificios sufrieron desplazamientos horizontales de hasta 2 m mientras que otros se inclinaron $\sim 30^\circ$ (Ishihara *et al.*, 1993). El fenómeno de licuación también causo el colapso del puente Carmen, una importante estructura de comunicación de la ciudad de Dagupan, la cual fue una de las más afectadas por el fenómeno de licuación ya que cerca de 500 edificios y casas residenciales sufrieron severos daños a causa de los desplazamientos verticales en las cimentaciones, mientras que otros edificios presentaron inclinación, como resultado de la pérdida de capacidad de carga en el suelo subyacente, tal como se muestra en la Figuras 1.5 y 1.6 en donde se aprecian dos edificios de tres niveles con un asentamiento de aproximadamente 1 m y 5° de inclinación.



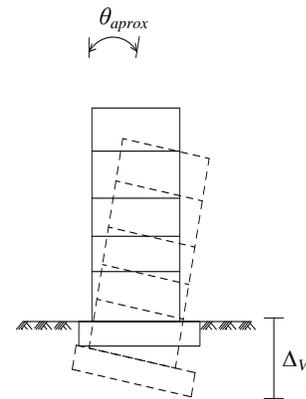
Figura 1.5. Desplazamiento vertical e inclinación de un edificio de concreto reforzado (Ishihara, Acacio y Towhata, 1993)⁴²



Figura 1.6. Desplazamiento vertical e inclinación de un edificio adyacente al de la figura 1.5 (Orense, 2011)⁴³



a)



b)

Figura 1.7. a) Edificio de tres niveles afectado por desplazamiento diferencial vertical e inclinación de $\sim 12^\circ$, causado por el fenómeno de licuación en la ciudad de Dagupan (EERI, 1990)⁴⁴ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación flexible, que presenta desplazamiento diferencial vertical e inclinación



Por otra parte, el desplazamiento horizontal (Δ_H) asociado al fenómeno de licuación también dañó estructuralmente a varias casas de esta ciudad, como se muestra en la Figura 1.8. En esta figura se muestra la severidad del daño en el primer piso de una estructura, la cual presentó 40 cm desplazamiento horizontal y un desplazamiento vertical de aproximadamente 20 cm (Orense, 2011).

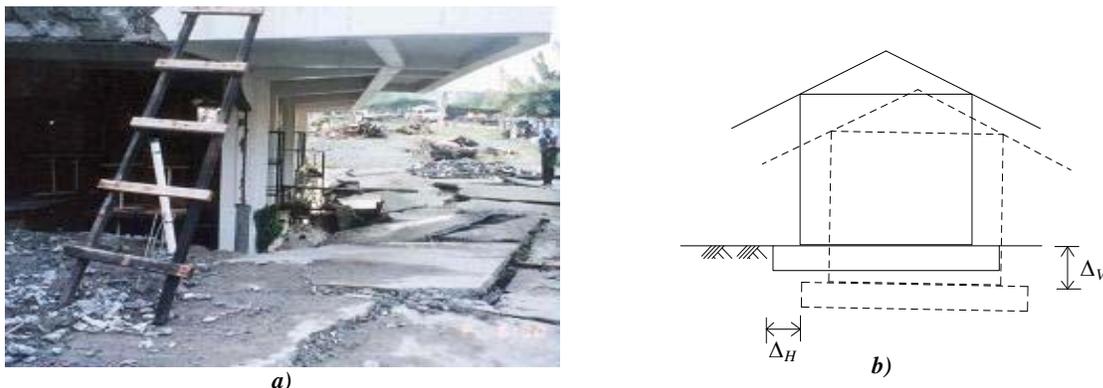


Figura 1.8. a) Daño a una residencia debido al desplazamiento horizontal y vertical (Orense, 2011)⁴⁵ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla de una estructura de un solo nivel con cimentación flexible

En la Figura 1.9 se muestra el puente Magsaysay, este puente se localizaba en el centro de la ciudad de Dagupan. Era uno de los dos principales puentes que cruzan el río Pantal, este colapsó debido a un desplazamiento diferencial vertical, de 15 cm aproximadamente. El puente tenía una longitud de 144 m de longitud y una cimentación a base de pilotes de concreto desplantados a 10 m de profundidad. En este puente fallaron tres de sus cuatro columnas debido a un desplazamiento horizontal de aproximadamente 15 cm, provocando el colapso total de este puente (EERI, 1990).

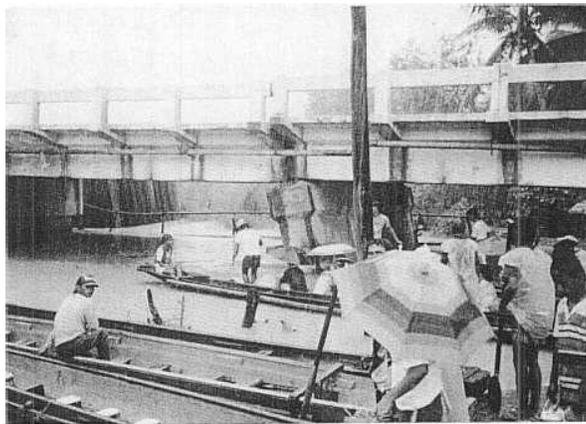


Figura 1.9. Puente Magsaysay afectado por el fenómeno de licuación (EERI, 1990)

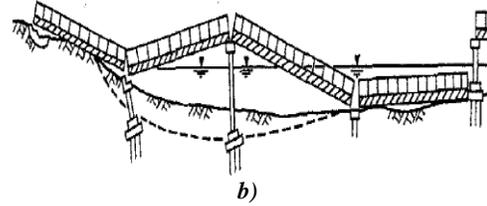
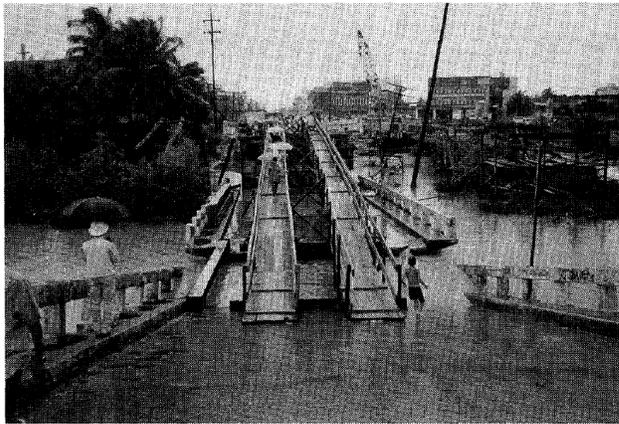


Figura 1.10. a) Vista longitudinal del puente Magsaysay después del sismo de Luzón y b) Representación esquemática del colapso del puente Magsaysay (Ishihara, Acacio y Towhata, 1993)

Ishihara *et al.* (1993), Orense (2011) y EERI (1990) presentan la respuesta de distintas estructuras de diferentes niveles con una cimentación flexible, las cuales presentaron inclinaciones que varían desde los 5° hasta los 12° comparando esta forma de falla con los casos documentados por Ohsaki (1966) se puede observar que los edificios con cimentación flexible son propensos a sufrir un mayor daño debido al desplazamiento vertical y por consiguiente presentar una inclinación. De igual forma estas estructuras fueron afectadas por el desplazamiento horizontal, el cual afectó de manera significativa a estas estructuras provocando su falla.

1.3 Sismo de Costa Rica y Panamá en 1991

El sismo del 22 de abril de 1991 con una $M=7.5$ sacudió la mayor parte de la región Caribe de Costa Rica y noroeste de Panamá. Este evento sísmico ocurrió en una región que se consideraba como de bajo potencial sísmico; sin embargo, causó 79 muertes, 1,061 heridos y 24,341 damnificados. Además de severos daños a viviendas e infraestructuras, lo que ocasiono pérdidas económicas por alrededor de trescientos setenta y cinco millones de dólares (Camacho y Viquez, 1994).

Durante este sismo se presentó el fenómeno de licuación principalmente en la provincia de Bocas del Toro, ocasionando daños a la infraestructura debido a grietas, asentamientos y desplazamientos laterales. En Panamá, el desplazamiento horizontal, de hasta 2 m, se presentó principalmente en sedimentos no consolidados, que por la alta plasticidad no se fracturaron lo que ocasiono una migración lateral de masas. Algunos ejemplos de estos

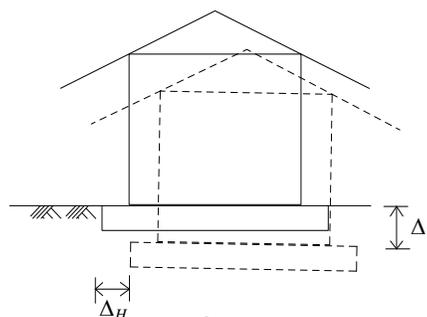


desplazamientos laterales se observaron en algunas avenidas en donde el pavimento estaba levantado en forma de bloques.

En la Figura 1.11 se muestran los daños que se presentaron en un conjunto de oficinas en la ciudad de Changuinola en Panamá. Donde el desplazamiento horizontal (Δ_H) de aproximadamente 2 m y el desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 0.4 m provocaron daños severos de esta estructura, la cual tenía una cimentación flexible (Camacho y Viquez, 1994).



a)



b)

Figura 1.11. a) Grietas producto de desplazamiento horizontal en las oficinas de la Chiriquí Land Company en Changuinola, se observa también el desplazamiento diferencial vertical en la parte derecha de la estructura (Camacho y Viquez, 1994)⁴⁶ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para una estructura de un solo nivel con cimentación flexible

Durante este evento la licuación de suelos aluviales subyacentes causó severos daños en las cimentaciones de varios puentes lo que provocó el colapso en estas estructuras. De igual forma también sobresalen los daños en pavimentos de vías terrestres y vías férreas a causa del desplazamiento horizontal y asentamiento del terreno. Un total de cinco puentes de carretera sufrieron colapso total, varios puentes pequeños fueron severamente dañados y ocho puentes de ferrocarril se desplazaron verticalmente por lo que sufrieron un colapso parcial (Sauter, 1994).

En la Figura 1.12 se presenta un ejemplo de los colapsos de estos puentes en donde la falla se debió principalmente al empuje ejercido por el desplazamiento horizontal del suelo.

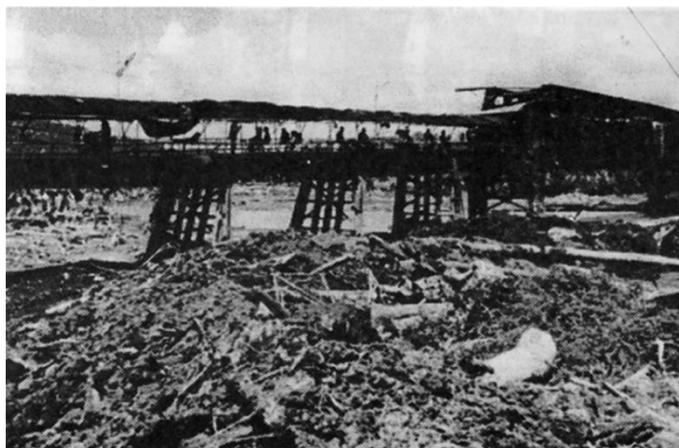


Figura 1.12. Puente Atalanta, sufrió desplazamiento horizontal de aproximadamente 2 m, el tramo final colapso (Sauter, 1994)

En lo que corresponde a edificios para uso habitacional el mayor número de viviendas dañadas o destruidas se encuentran en la zona de la “llanura aluvial”, en Costa Rica, construidas en su mayoría sobre cimentaciones flexibles que soportan un solo nivel. La naturaleza aluvial del suelo, como bien se sabe, posee una respuesta desfavorable ante un evento sísmico, ya que tienden a provocar desplazamientos horizontales y desplazamientos verticales, en las estructuras. Los casos expuestos en esta sección, muestran el mal comportamiento que tienen las estructuras apoyadas sobre cimentaciones flexibles, ante el desplazamiento horizontal inducido por el fenómeno de licuación. Por otra parte las estructuras cimentadas con pilotes también son susceptibles a sufrir daños por el desplazamiento horizontal, como es el caso del puente Atalanta, el cual fallo ante el desplazamiento horizontal, sin embargo las estructuras cimentadas sobre pilotes poseen una óptima respuesta ante desplazamientos verticales, tal como se muestra en los siguientes casos.

1.4 Sismo de Kobe, Japón en 1995

Los edificios expuestos a continuación eran instalaciones de la zona portuaria de la ciudad de Kobe, en donde la mayoría de los edificios construidos en esta zona, contaban con cimentación profunda a base de pilotes. Estos pilotes en general tuvieron un buen desempeño ante el fenómeno de licuación, en casi todos los edificios donde se contaba con cimentación profunda el suelo se fallo alrededor de las construcciones; de tal forma que las estructuras quedaron en su elevación inicial lo cual se tomo como referencia para la estimación del desplazamiento vertical del suelo (Akai *et al.*, 1995).

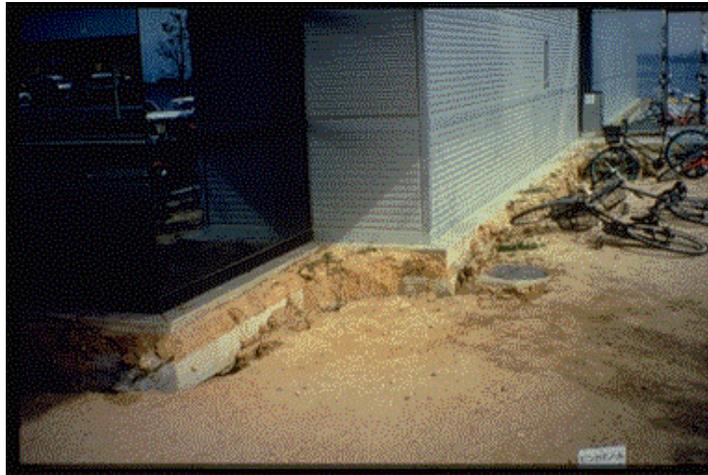


Figura 1.13. Desplazamiento vertical de aproximadamente 30 cm, alrededor del edificio de la estación terminal del tren en Port Island (Akai et al., 1995)⁴⁷

En la Figura 1.14a y 1.14b se muestra un caso de particular interés ya que se observan directamente los efectos ocasionados por el desplazamiento horizontal sobre un pilote, el cual resulto severamente dañado por el efecto de los esfuerzos cortantes. Por otra parte se observa que los pilotes son huecos lo que indica que no fueron diseñados para resistir desplazamientos horizontales lo que aumento los daños por licuación (Akai et al., 1995).



Figura 1.14. a) Pilote agrietado debido al desplazamiento horizontal de aproximadamente 20 cm, los pilotes no fueron diseñados para resistir desplazamientos laterales (Akai et al., 1995)⁴⁸ y b) El pilote fue cortado y desplazado, había sostenido una construcción que funcionaba como almacén (Akai et al., 1995)

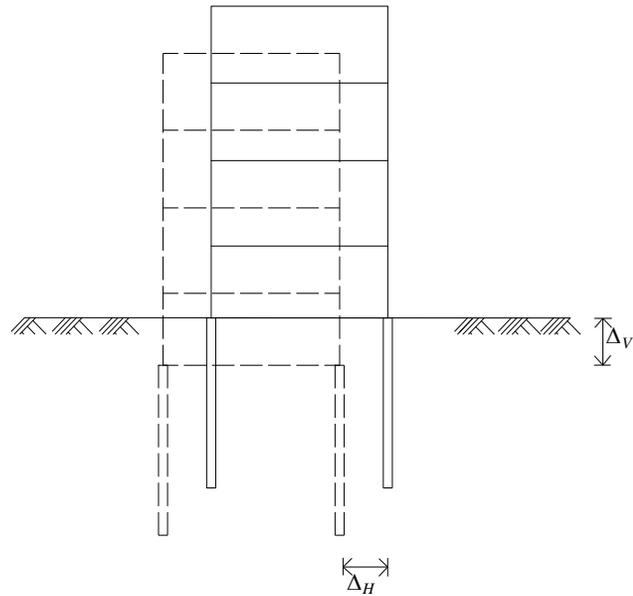
En la Figura 1.15 se muestra otro caso de un edificio cimentado sobre pilotes, los cuales fueron afectados por el fenómeno de licuación, pero a diferencia del caso anterior (Figura 1.14) resistieron el desplazamiento horizontal por lo cual solo sufrieron fisuras moderadas.



El conjunto de pilotes de este caso, mostró un eficiente desempeño ante el evento sísmico, sin embargo la funcionalidad del edificio fue afectada de forma grave.



a)



b)

Figura 1.15. Desplazamiento horizontal y vertical de los pilotes de cimentación en la terminal de tren (Akai et al., 1995) y b) Representación esquemática para el tipo de modo de falla de un edificio cimentado sobre pilotes dañado por el desplazamiento vertical y horizontal

1.5 Sismo de Chi-Chi, Taiwán en 1999

El sismo de Chi-Chi ocurrió el 21 de Septiembre a la 01:47 tuvo una $M= 7.6$ de acuerdo a USGS, con epicentro en la Isla de Taiwán, lamentablemente causó pérdidas de vidas humanas: 2,434 muertos, 54 desaparecidos y 723 heridos de gravedad. Además de severos daños a edificios y redes de abastecimiento de agua potable así como de drenaje. Los puentes también se resultaron afectados por este evento sísmico, aproximadamente 1000 puentes en las áreas con mayor intensidad sísmica presentaron daños moderados, solo 20 puentes requirieron de reparaciones, sin embargo 5 puentes más colapsaron (Moh et al., 2001).

La presa Shikung también se resultó afectada por este sismo ya que colapso parte de la cortina debido a severos asentamientos diferenciales (Moh et al., 2001).



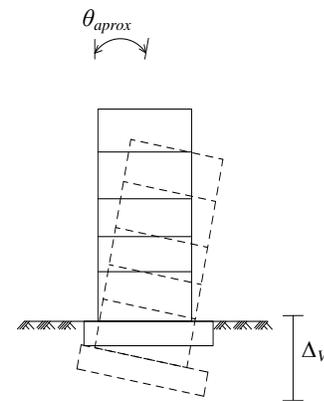
Figura 1.16. Presa Shikung después del sismo de Chi-Chi (Moh et al., 2001)

El sismo de Ji-Ji como también es conocido en la literatura técnica, causó el fenómeno de licuación provocando los mayores daños en las ciudades de Yuan Lin y Changhwa afectando un área de 60 Km² resultando más de doscientas viviendas afectadas con daños irreparables. La mayoría de estas viviendas eran de un solo nivel construidas con adobe y ladrillos con cimentación superficial (Moh et al., 2001).

Por otra parte los edificios modernos tuvieron un buen desempeño estructural, sin embargo fallaron ante el fenómeno de licuación en el suelo, inclinándose, como se muestra en la Figura 1.17. Se trata de una estructura con cimentación rígida, aparentemente la superestructura no presentó daños severos, sin embargo debido a la inclinación ($\theta_{aprox}=12^\circ$) y el gran desplazamiento vertical ($\Delta_V=1.5$ m) el edificio se considera en un estado de pérdida total.



a)



b)

Figura 1.17. a) Falla de la cimentación rígida debido al fenómeno de licuación, la superestructura presentó un $\theta_{aprox}=12^\circ$ y un $\Delta_V=1.5$ m (Moh et al., 2001)⁴⁹ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación rígida, que presentó desplazamiento diferencial vertical e inclinación

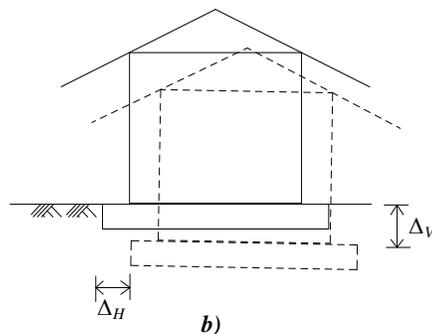
En la ciudad de Taichung el fenómeno de licuación causó severos daños a un gran número de viviendas de un solo nivel con cimentación flexible, principalmente hubo daños por desplazamiento vertical en las cimentaciones. El suelo fluyó por el interior de las



habitaciones levantando los muebles, tal como se aprecia en las Figuras 1.18 y 1.19. Estos casos se suman a los expuestos anteriormente para demostrar que las estructuras con cimentación flexible poseen un comportamiento desfavorable ante el fenómeno de licuación.



a)



b)

Figura 1.18. Vivienda de un nivel con techo de tejas y muros de ladrillo, sufrió un desplazamiento vertical (EEFIT, 2007) y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible, que presenta desplazamiento diferencial vertical y horizontal



Figura 1.19. Vista interior de la vivienda mostrada en la Fig 1.18, se aprecia el suelo licuado y daño a los muebles. (EEFIT, 2007)

Por otra parte en la ciudad de Yuan Lin hubo varios edificios que sufrieron desplazamientos verticales inducidos por el fenómeno de licuación, pero en general los daños estructurales presentados por estos edificios son menores. En el caso expuesto en la Figura 1.20a el edificio afectado presentó una inclinación de 5° hacia el edificio vecino (EEFIT, 2007).



Figura 1.20a. Inclinación de un edificio causado por el desplazamiento diferencial vertical en la cimentación (EEFIT, 2007)⁵⁰



Figura 1.20b Asentamiento con respecto al nivel de calle. (EEFIT, 2007)

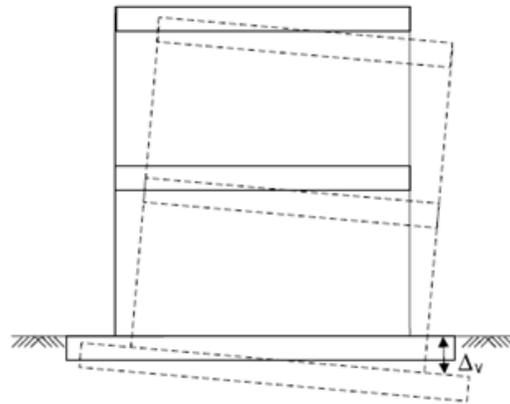


Figura 1.20c Asentamiento de una columna en la cimentación. (EEFIT, 2007)

A continuación se muestran los daños en un edificio con cimentación flexible, en la Figura 1.20 se observa la severidad de los daños inducidos por el fenómeno de licuación a una escuela. Debido a que la cimentación sufrió un desplazamiento diferencial vertical, la pérdida del edificio se considera total. Casos como este se presentaron en Kocaeli, Turquía y Chi-Chi, Taiwán durante el sismo de 1999 (Bird *et al.*, 2006).



a)



b)

Figura 1.21. a) Daños inducidos por licuación al edificio de una escuela después del sismo de 1999 en Chi-Chi, cortesía (Bird et al., 2006) y b) Representación esquemática para la falla de un edificio con cimentación rígida de acuerdo a Bird et al., (2006)

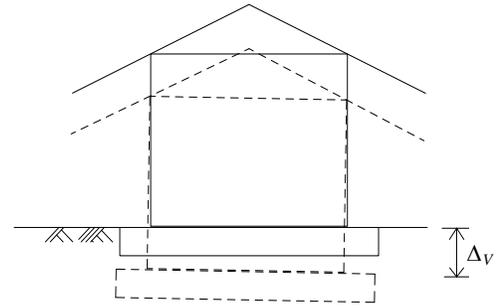
Tomando como referencia los casos documentados por Moh *et al.* (2001), así como los reportados por el grupo de investigadores de EEFIT (2007). Se observa que las superestructuras, apoyadas sobre pilotes, no sufren daños severos, generalmente se inclinan ligeramente hacia cualquiera de sus caras. Por otro lado en la Figura 1.20a se observa una apropiada separación en las colindancias, lo que evito el daño al edificio vecino, a diferencia de los casos documentados por EERI (1990) en Filipinas durante el sismo de 1990, en donde las estructuras inclinadas afectan de manera severa a los edificios vecinos.

1.6 Sismo de Kocaeli, Turquía en 1999

Este sismo ocurrió a las 3:02 a.m. (hora local) el 17 de Agosto de 1999, con una $M=7.4$ causó grandes daños a edificios, puentes y otras estructuras. De acuerdo con cifras oficiales del gobierno de Turquía el sismo causo 17,127 muertes, 43,953 heridos y dejó más de 250,000 personas sin hogar (USGS, 2000). La ciudad de Adapazari lamentablemente también sufrió la pérdida de vidas humanas y grandes daños en sus edificios, el gobierno federal de Turquía reporto 5,078 edificios con daños severos, la cifra oficial de víctimas humanas fue de 2,627 (Bray *et al.*, 2000). Las comunidades de Adapazari, Gölcük y Sapanca, fueron afectadas por el fenómeno de licuación, principalmente se registraron desplazamientos verticales en edificios ubicados en estas ciudades, tal como se muestra en la figura 1.21 en donde se observa un desplazamiento vertical de aproximadamente 1.5 m (USGS, 2000).



a)



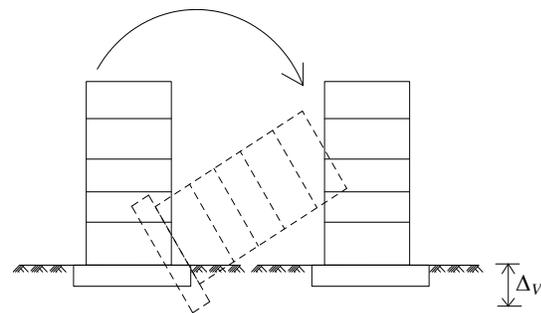
b)

Figura 1.22. a) Edificio con asentamiento vertical en la Ciudad de Adapazari, fotografía tomada por Thomas L. Holzer (USGS, 2000)⁵² y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible

Además de casos como el anterior, en donde el daño principal se debió al desplazamiento vertical de la estructura, se reportaron un gran número de edificios que se inclinaron, debido a la pérdida de capacidad de carga del suelo, lo que provocó la pérdida total del edificio. Tal como se muestra en la Figura 1.23, este edificio tenía una cimentación rígida y estaba cimentado en depósitos de arena del río Sakarya, lo cual aumentó los daños debidos al fenómeno de licuación.



a)



b)

Figura 1.23. a) Edificio con inclinación de ~50° debido a que la cimentación falló a causa de la licuación, además sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 50 cm, Fotografía tomada por Richard S. Olsen (USGS, 2000)⁵³ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida, que presenta desplazamiento diferencial vertical e inclinación

Por otra parte a lo largo de la costa sureste del lago Sapanca, también se presentó el fenómeno de licuación, provocando los mayores daños en el Hotel Sapanca, este edificio sufrió un desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 0.3 m, y desplazamiento horizontal de aproximadamente 0.5 m, además grandes cantidades de arena fueron



expulsadas, por efectos del fenómeno de licuación, sobre los jardines del hotel (USGS, 2000).



Figura 1.24. Desplazamiento vertical en la entrada al Hotel Sapanca, foto tomada por Thomas L. Holzer, (USGS, 2000)⁵⁴

Durante este sismo se reportaron edificios afectados por un desplazamiento horizontal y vertical, esta combinación de daños afectaron de forma severa a varias estructuras, principalmente casas habitación, de la ciudad de Adapazari provocando su colapso parcial o completo, tal como se muestra en la Figura 1.25.

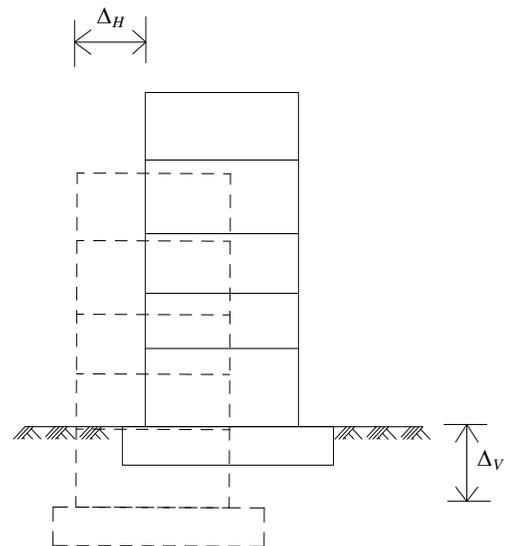


Figura 1.25. a) Edificio de dos niveles afectado por desplazamiento vertical y horizontal. (Sancio et al., 2004)⁵⁵ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible afectado por el desplazamiento vertical y horizontal



Continuando con los daños a edificios dañados por el fenómeno de licuación en la ciudad de Kocaeli, en la Figura 1.25 se muestran los daños a una estructura con cimentación rígida. Se trata de un edificio de 5 niveles, con una altura de 13.7 m, un ancho de 19.5 m y una longitud de 20.1 m, además la cimentación estaba desplantada a 1.5 m de profundidad (Bray *et al.*, 2000).



Figura 1.26. Edificio de concreto reforzado desplazado 57 cm hacia la calle (Bray *et al.*, 2000)⁵⁶

Como ya se ha mencionado en otros apartados de este capítulo, la inclinación y el desplazamiento diferencial vertical, no son los únicos daños que causa el fenómeno de licuación en los edificios. El desplazamiento horizontal, de igual forma causa severos daños en las estructuras, como se muestra en los casos registrados por Bray *et al.* (2000) y USGS (2000), es importante señalar que estas estructuras no presentaron daños estructurales severos. Por otra parte los edificios que sufrieron inclinación tampoco presentaron daños estructurales, sin embargo la pérdida del edificio se considera total ya que resulta incosteable su reparación.

1.7 Sismo de Perú en 2007

El Miércoles, 15 de agosto 2007, a las 6:40 PM hora local, un sismo de $M= 8.0$ sacudió la región de la costa central del Perú, este sismo ocurrió en una zona de alta actividad sísmica. El estado de Ica fue el más afectado debido a que causó graves daños en las ciudades de Pisco, Ica, Cañete y Chincha, además se sintió con gran intensidad en Lima, Perú, Bolivia Ecuador y Brasil. En la ciudad de Pisco se registraron 519 personas fallecidas, 42 personas desaparecidas y 1,874 heridos (GEER, 2007).

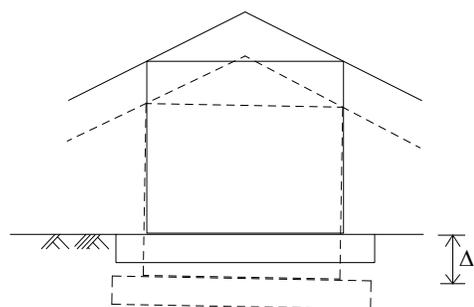


Durante este sismo se presentó el fenómeno de licuación en las costas de Perú, provocando severos daños en los servicios públicos y redes de comunicación, además varias estructuras colapsaron, sobre todo aquellas estructuras construidas a base de mampostería. Sin embargo varias estructuras de concreto reforzado también sufrieron graves daños o el colapso total, debido a un inadecuado diseño estructural, pero también en gran medida estos daños se debieron a los desplazamientos verticales diferenciales lo que indujo la falla en la cimentación (Elnashai *et al.*, 2008).

El distrito de Tambo de Mora, se encuentra en la provincia de Chíncha, el suelo en esta región se caracteriza por las grandes cantidades de depósitos aluviales, además el nivel freático se encuentra a poca profundidad (0.5 a 1.0 m), lo que aumentó los daños ocasionados por el fenómeno de licuación debido a esto varias estructuras de uso habitacional colapsaron. En la Figura 1.27 se muestra un caso de una estructura de un solo nivel la cual presentó un desplazamiento vertical de aproximadamente 1.0 m. Se observa que el daño estructural en la edificación es severo, además la pérdida de la estructura se considera total debido a que después del evento sísmico es inhabitable. Este modo de falla se presentó con frecuencia en casas de uno o dos niveles durante este sismo (Elnashai *et al.*, 2008).



a)



b)

Figura 1.27. a) Residencia de un nivel sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 1.0 m (Elnashai *et al.*, 2008)⁵⁷ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible que presentó un desplazamiento vertical

La Figura 1.28 muestra otro claro ejemplo de la magnitud del fenómeno de licuación, ya que se muestra una estructura de un nivel con un desplazamiento vertical de

aproximadamente 0.7 m, pero a diferencia de la Figura 1.27, el daño estructural fue completo debido a que los muros de carga presentan grietas extensas. Evidentemente el estado después del evento sísmico para este edificio es de pérdida completa ya que resulta imposible restaurarlo e inseguro para habitarlo.



Figura 1.28. a) Residencia de un nivel sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.7 m, y sus muros presentaron severas grietas (Elnashai et al., 2008)⁵⁸ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible que presentó desplazamiento vertical

En general los daños en las estructuras de uno o dos niveles con cimentación flexible, se debieron al desplazamiento vertical debido a la pérdida de capacidad de carga del suelo. En la Figura 1.29 se muestran casas que estaban ubicadas sobre la calle Alfonso Ugarte, estas casas al igual que los casos anteriores presentaron un desplazamiento vertical, a diferencia de los casos de las Figuras 1.27 y 1.28 se observa que los daños son moderados. También se aprecian las marcas que dejó el nivel del agua en los muros, después del evento sísmico.

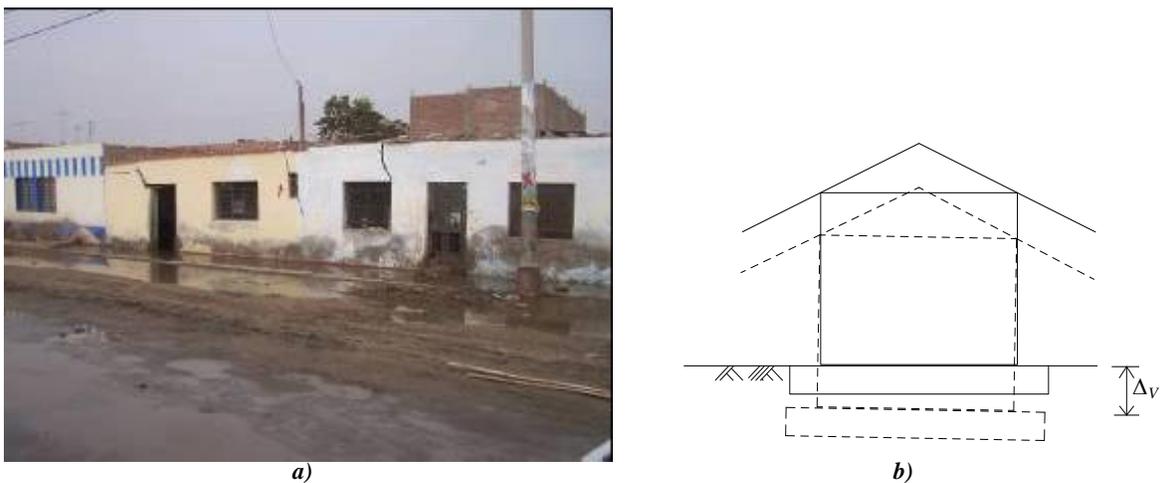


Figura 1.29. a) Residencia de un nivel, sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.5 m, (Elnashai et al., 2008)⁵⁹ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible

Continuando con las estructuras que sufrieron daños por licuación en la calle Alfonso Ugarte se presenta en la Figura 1.30 se trata del caso de una residencia de un nivel la cual presento un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.8 m, debido a la pérdida de capacidad de carga del suelo (GEER, 2007). En base a la fotografía se asume que la pérdida de esta casa es completa, a pesar de que la superestructura no presenta daños severos, sin embargo se considera como pérdida total debido a que después del sismo su estado es inhabitable.

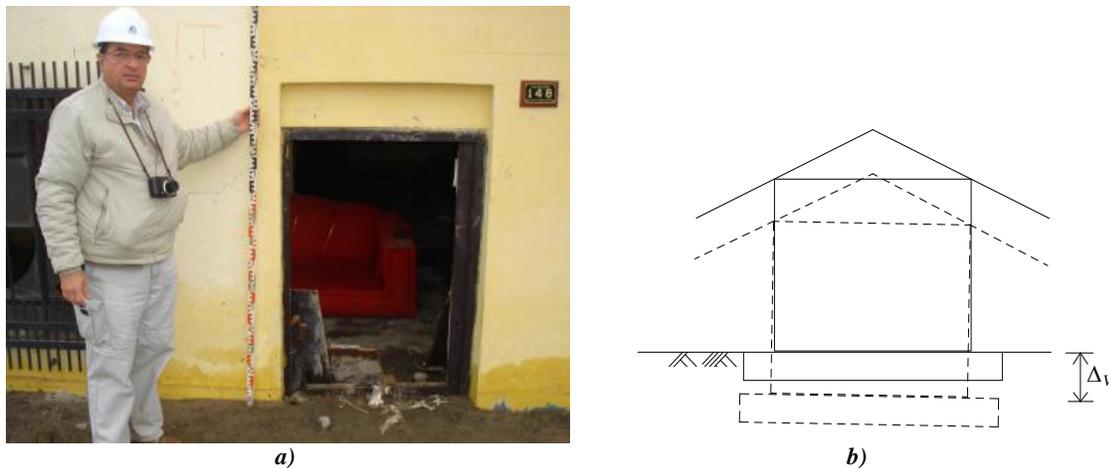


Figura 1.30. a) Desplazamiento vertical de aproximadamente 0.8 m en un residencia de un nivel localizada en el numero 148 de la calle Alfonso Ugarte en el distrito de Tambo de Mora, 08/24/07 9:35AM, S13.45682 W76.18277 (GEER, 2007)⁶⁰ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible

Inmediatamente después del sismo se observaron grandes cantidades de agua y arena que fueron expulsadas por las grietas formadas en el suelo, alcanzando hasta 1 m de altura. Debido a esto después del sismo el interior de las residencias de la zona afectada, fue ocupado por varios metros cúbicos de arena, además de presentar un desplazamiento vertical de gran magnitud.

Un ejemplo de este tipo de daños se muestra en la Figura 1.31, se trata de una residencia de un solo nivel, ubicada en la calle Alfonso Ugarte, se desconoce el número de la casa. Sin embargo se parecía el daño debido al desplazamiento vertical debido al fenómeno de licuación, el interior de la residencia se saturó del material sometido a licuación, debido a los efectos propios del fenómeno de licuación, como eyección de agua y arena, además de la formación de sismitas (GEER, 2007).



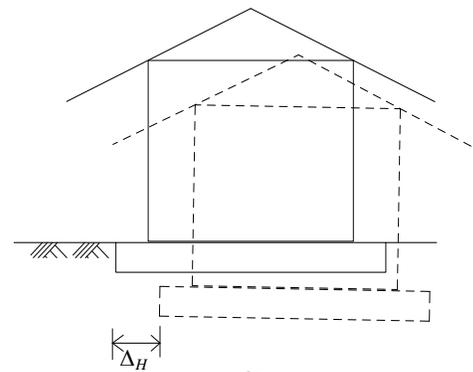
Figura 1.31. a) Residencia de un nivel afectada por un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.7 m, b) Vista del interior de la residencia, se aprecia la gran cantidad de metros cúbicos de arena que ocupan el interior de la estructura (GEER, 2007)⁶¹ y c) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible

Por otra parte en el sur de Lima se encuentra el complejo habitacional Las Lagunas, el cual tiene residencias de uno o dos niveles, generalmente construidas con mampostería de ladrillo confiando por columnas y vigas de concreto reforzado. Estas residencias fueron afectadas por el fenómeno de licuación el cual provoco desplazamientos horizontales y en algunos casos también por el desplazamiento vertical simultáneamente, ocasionando daños estructurales los cuales fueron clasificados en un rango de moderados a severos (GEER, 2007).

En la Figura 1.32 se muestra una residencia de un solo nivel, afectada por el desplazamiento lateral, de acuerdo a la fotografía y por los datos proporcionados por el grupo de investigadores de GEER, esta estructura tiene una cimentación flexible, la cual fallo ante los grandes desplazamientos laterales debidos al fenómeno de licuación.



a)



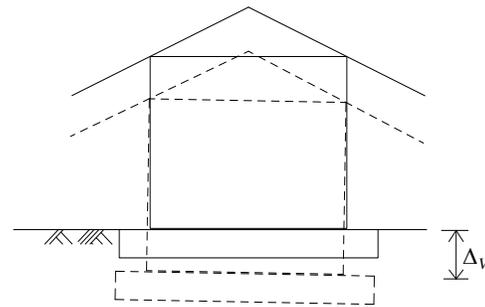
b)

Figura 1.32. Residencia afectada por el desplazamiento lateral de aproximadamente 0.9 m, fotografía tomada el 08/21/07 2:07PM, S12.57739 W76.70338 (GEER, 2007)⁶² y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible que presente un desplazamiento horizontal

A continuación se muestra la Figura 1.33, se trata de una estructura para uso habitacional ubicada en la misma área que la casa mostrada en la Figura 1.32. Esta estructura sufrió desplazamientos verticales de aproximadamente 20 cm, a pesar de que el suelo se desplazó horizontalmente, aproximadamente 3.9 m. Sin embargo los daños debidos al desplazamiento horizontal se presentaron principalmente en el patio, y ligeramente en la superestructura, por lo tanto esta estructura resultó dañada por los desplazamientos verticales. Por otra parte es importante observar la cercanía de la estructura con el lago, lo cual aumentó los daños por licuación en esta área, debido a que el suelo de esta zona es propenso a licuación (GEER, 2007).



a)



b)

Figura 1.33. Residencia afectada por el desplazamiento vertical de aproximadamente 0.2 m, fotografía tomada el 08/21/07 2:18PM, S12.57672 W76.70358 (GEER, 2007)⁶³ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un nivel con cimentación flexible

Los daños causados por este sismo ponen en evidencia la importancia de un correcto diseño de cimentaciones que resistan los desplazamientos verticales diferenciales en zonas donde



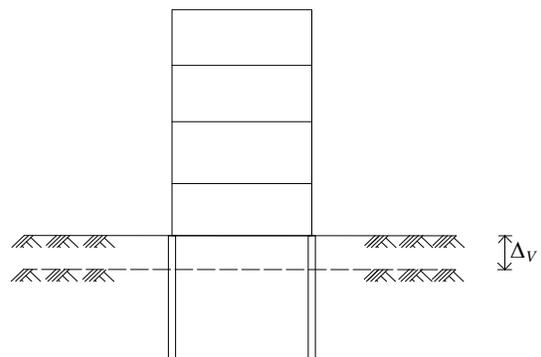
existen suelos propensos al fenómeno de licuación. Además es importante una adecuada planificación urbana para evitar la construcción en aéreas susceptibles al fenómeno de licuación.

1.8 Sismo de Niigata Chuetsu-Oki, Japón en 2007

El sismo de Niigata del año 2007 presentó una $M= 6.8$, ocurrió a las 10:13 A.M. hora local el 16 de Julio de 2007. El sismo sacudió la ciudad de Kashiwazaki y las aldeas de Lizuna y Kariwa en donde se registro la mayor intensidad sísmica. Durante este sismo lamentablemente hubo pérdidas humanas, se reportaron 10 muertos y 1,339 heridos; en lo que corresponde a pérdidas materiales se reportaron 908 edificios con pérdida completa o dañados severamente. El fenómeno de licuación se presentó durante los sismos de 1964 y 2004 en esta misma región de Japón ocasionando severos daños. En gran parte del área en donde se presentó este evento sísmico se encuentran arenas altamente propensas a licuación, esto favoreció la presencia de desplazamientos diferenciales verticales y horizontales. La mayoría de los edificios modernos que se vieron afectados por el sismo sufrieron daños moderados gracias a su cimentación a base de pilotes. Sin embargo otros edificios resultaron afectados por el desplazamiento diferencial vertical, como el caso de la Figura 1.34 en donde se muestra un edificio cimentado sobre pilotes, se reportó que los pilotes sufrieron daños moderados por desplazamiento diferencial vertical, por lo cual presentaron daños estructurales menores, mientras que el suelo se desplazó verticalmente de manera significativa, aproximadamente 30.5 cm (Global Risk Miyamoto, 2007).



a)



b)

Figura 1.34. a) Edificio de tres niveles con $\sim 5^\circ$ de inclinación con respecto a la vertical (Global Risk Miyamoto, 2007)⁶⁴ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida

El desplazamiento del suelo se observó en otras estructuras de la ciudad de Niigata, como es el caso de la torre de transmisión de alto voltaje, cimentada sobre pilotes, la cual se muestra en la Figura 1.35.

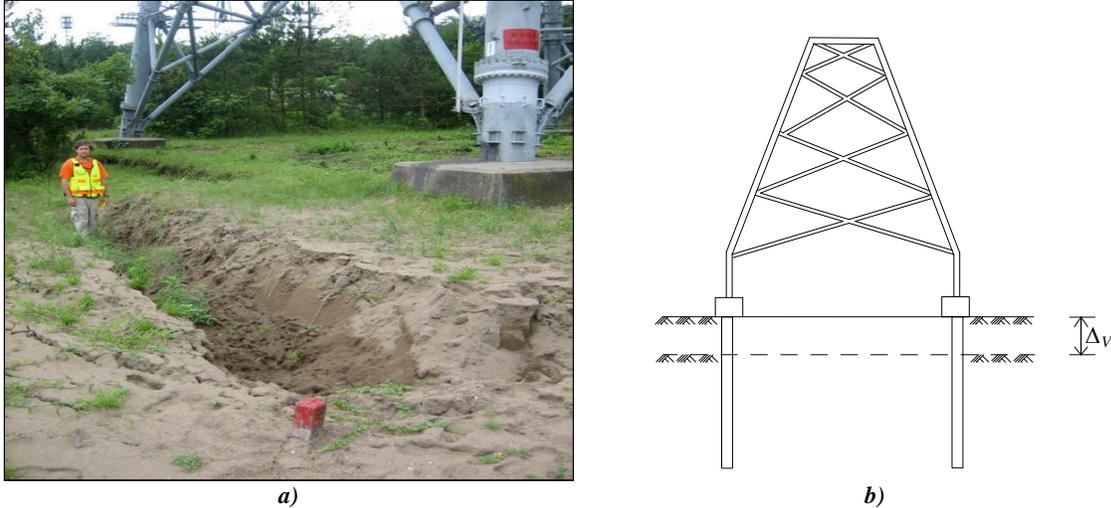


Figura 1.35. a) Asentamiento del terreno adyacente a la cimentación de una torre de transmisión de alto voltaje (EERI, 2007) y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo alrededor de una estructura de transmisión de energía eléctrica cimentada sobre pilotes

De estos dos últimos casos, se puede observar una vez más, que las estructuras cimentadas sobre pilotes tienen una respuesta favorable ante el fenómeno de licuación, ya que estructuralmente no presentan algún daño significativo y su funcionalidad no es afectada.

1.9 Sismo de Darfield, Nueva Zelanda en 2010

El edificio mostrado en la Figura 1.36 es la iglesia de St. Paul's, la cual falló ante la combinación del desplazamiento vertical de aproximadamente 33 cm y un desplazamiento horizontal de aproximadamente 10 cm. Por otra parte la grieta que se observa en la fotografía tiene aproximadamente un ancho de 90 cm, debido a que esta grieta atraviesa la cimentación de la estructura el daño se considera como severo (Green y Cubrinovski, 2010).

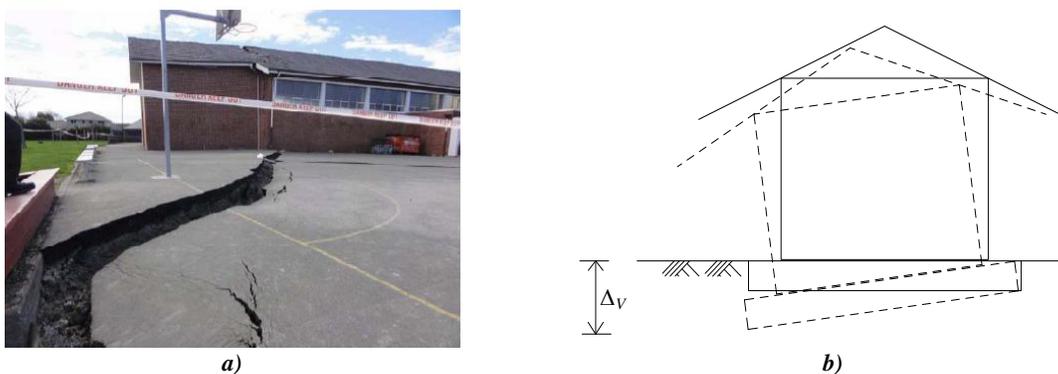


Figura 1.36. a) Edificio con $\Delta_v=33$ cm y $\Delta_H=10$ cm (Green y Cubrinovski, 2010)⁶⁵ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio de un solo nivel con cimentación flexible que presente desplazamiento vertical y horizontal

1.10 Sismo de Chile en 2010

El sábado 27 de Febrero de 2010 a las 03:34 a.m. hora local (06:34:14 UTC) ocurrió el sismo de $M = 8.8$ en la región centro sur de Chile, afectando a una población de ocho millones en las zonas urbanas de Santiago, Valparaíso, Viña del Mar y Concepción, el sismo provocó el fenómeno de licuación en la costa de Chile y un posterior Tsunami. El número de víctimas humanas oficialmente fue de 525 y el número de desaparecidos fue de 23, de acuerdo a estimaciones preliminares 50 edificios de varios niveles fueron dañados severamente, mientras que otros cuatro colapsaron totalmente, además medio millón de viviendas resultaron destruidas y por lo menos otro millón y medio resultaron con algún daño. (GEER, 2010).

El fenómeno de licuación se observó principalmente en los ríos que tienen sedimentos saturados, afectando a las cimentaciones de puentes, edificios, presas, instalaciones portuarias y vías terrestres, entre otros. Sin embargo las afectaciones por licuación no representan los daños más graves durante este sismo, ya que el impacto más significativo es el alto costo que implica la reconstrucción de la infraestructura dañada y destruida.

En la zona urbana de Concepción, el edificio Riesco de ocho niveles, sufrió un desplazamiento vertical máximo de 40 cm en la esquina noreste y 10 cm en su extremo sur, estos asentamientos provocaron una inclinación de aproximadamente 1° hacia la cara norte y hacia la cara este del edificio, a pesar de estos percances el edificio no resultó con graves daños estructurales. La óptima respuesta de este edificio ante el fenómeno de licuación se



debe a que esta cimentado sobre pilotes, como se ha visto en casos anteriores reportados por Ohsaki (1966), los edificios cimentados sobre pilotes tienen una mejor respuesta ante la licuación del suelo que los edificios con cimentaciones rígidas y flexibles.



Figura 1.37. Edificio Riesco sufrió daños inducidos por licuación, la foto de la izquierda muestra la evidencia de sedimentos expulsados en la esquina noreste (S 36.79077°, W 73.08124°; 13:30 hrs 03/17/10). La foto de la derecha muestra daño en el interior del edificio debido al desplazamiento diferencial vertical. (GEER, 2010)⁶⁶

Al sur de de la ciudad de Concepción se encuentra la comunidad de San Pedro de La Paz, en este lugar también se presentó el fenómeno de licuación, los edificios que resultaron afectados fueron los de la escuela de esta comunidad. Se trata de edificaciones con cimentaciones superficiales en donde la licuación causó profundas grietas y un desplazamiento vertical de aproximadamente 60 cm. De la misma manera las casas resultaron afectadas por el desplazamiento vertical (Mendoza *et al.*, 2011).



Figura 1.38. Grietas causadas por el fenómeno de licuación en el patio de la escuela en San Pedro de La Paz. (Mendoza *et al.*, 2011)⁶⁷



Figura 1.39. Desplazamiento diferencial vertical de 60 cm en una casa de dos niveles debido al fenómeno de licuación. (Mendoza *et al.*, 2011)⁶⁸

Por otra parte sobre la margen izquierda del río Bio Bio se desarrollaron grietas que provocaron daños a restaurantes y casas que se habían construido cerca de este río, el cual tiene arenas propensas a licuación provenientes de la erupción del volcán Atunco (Mendoza *et al.*, 2011).



En la Figura 1.40 se muestra un restaurante dañado por el desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 40 cm (GEER, 2010).



Figura 1.40. Restaurante dañado por grietas y un desplazamiento vertical en la orilla del río Bio Bio (Mendoza et al., 2011)

Las investigaciones hechas por GEER (2010) muestran el buen desempeño que presentó el edificio Riesco ante el fenómeno de licuación. Considerando que se trata de una estructura de ocho niveles, cimentado con pilotes, un grado de inclinación no implica un daño estructural severo. Por otra parte el comportamiento de las estructuras, reportadas por Mendoza *et al.* (2011) con uno o dos niveles apoyados sobre cimentaciones flexibles, tuvieron una deficiente respuesta ante el fenómeno de licuación ya que fallaron ante el desplazamiento diferencial vertical que fue aproximadamente de 10 cm a 60 cm.

1.11 Sismo de Nueva Zelanda, Christchurch en 2011

Este sismo ocurrió el 27 de Febrero de 2011 con una $M= 6.2$ fue el sismo más costoso para Nueva Zelanda, se reportaron 181 muertes y severos daños a miles de residencias así como también edificios e infraestructura de toda la ciudad, cabe mencionar que seis meses antes de este evento tuvo lugar otro evento sísmico de $M = 7.1$ en el distrito de Darfield, estos dos eventos desde el punto de vista de la ingeniería son interesantes ya que se puede aprender mucho al comparar los diferentes niveles de licuación del suelo, así como las diferentes magnitudes y distancias epicentrales. De la misma manera resulta interesante conocer los efectos de estos importantes sismos en una ciudad tan moderna y con reglamentos de construcción muy rigurosos.

El fenómeno de licuación provocó desplazamientos horizontales y por lo tanto inclinaciones en edificios con cimentaciones superficiales, la licuación fue más severa en



las zonas residenciales en donde existe un nivel freático a poca profundidad y con arenas propensas a licuación. De acuerdo con informes oficiales 150,000 estructuras residenciales resultaron afectadas, de forma moderada por el fenómeno de licuación. También resultaron afectadas otras obras de infraestructura como son los puentes, servicios subterráneos, de igual forma se reportaron daños menores ocasionados por las inundaciones en el norte de la ciudad (GEER, 2011). La expulsión de depósitos de arena, inmediatamente después del sismo, así como la inundación son ejemplos de los daños causados por el fenómeno de licuación en las zonas residenciales. Durante este evento sísmico se crearon grietas de varios metros de longitud y como es típico en los daños por licuación algunas casas presentaron desplazamientos horizontales y verticales en sus cimentaciones como consecuencia de la pérdida de capacidad de carga del suelo. Tal como se muestra en las Figuras 1.41 y 1.42 en donde se observa la severidad de los efectos del fenómeno de licuación y las características típicas de este fenómeno, como la inundación, por eyección de agua y formación de fisuras.



Figura 1.41. Ejemplo de la severidad del fenómeno de licuación (GEER, 2011)



Figura 1.42. Inundación de calles por efectos del fenómeno de licuación (GEER, 2011)



Figura 1.43. Grieta de 30 m de longitud (GEER, 2011)



Figura 1.44. Desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 40 cm en una casa habitación (GEER, 2011)⁷⁵

En la Figura 1.44 se aprecia una casa con cimentación flexible, la cual fue dañada por un desplazamiento diferencial vertical de aproximadamente 49 cm, sin embargo de acuerdo a Bird *et al.* (2006) esta casa se considera como habitable y las reparaciones son solo por cuestiones estéticas. Una vez que se han presentado los casos de estructuras con cimentaciones rígidas y flexibles, ahora se presentan los casos de edificios cimentados sobre pilotes, como ya se ha visto en eventos sísmicos expuestos anteriormente (edificio Riesco en Chile documentado por GEER, 2010) los edificios cimentados sobre pilotes tienen una eficiente respuesta ante el fenómeno de licuación. Los edificios de Nueva Zelanda también presentaron un adecuado comportamiento durante el sismo debido a que sufrieron daños menores, sin embargo hubo casos en los que estructuras cimentadas sobre pilotes resultaron dañadas por el desplazamiento horizontal cerca del río Avon; como el caso que se muestra en la Figura 1.45a en donde el edificio se vio afectado por un desplazamiento vertical de aproximadamente 30 cm de su cara norte 17 cm en su cara sur, además de una inclinación de aproximadamente 5° , estos asentamientos provocaron daños no estructurales en el edificio como deformación en el pavimento del estacionamiento e interrupción en el servicio de abastecimiento de agua potable (GEER, 2011).

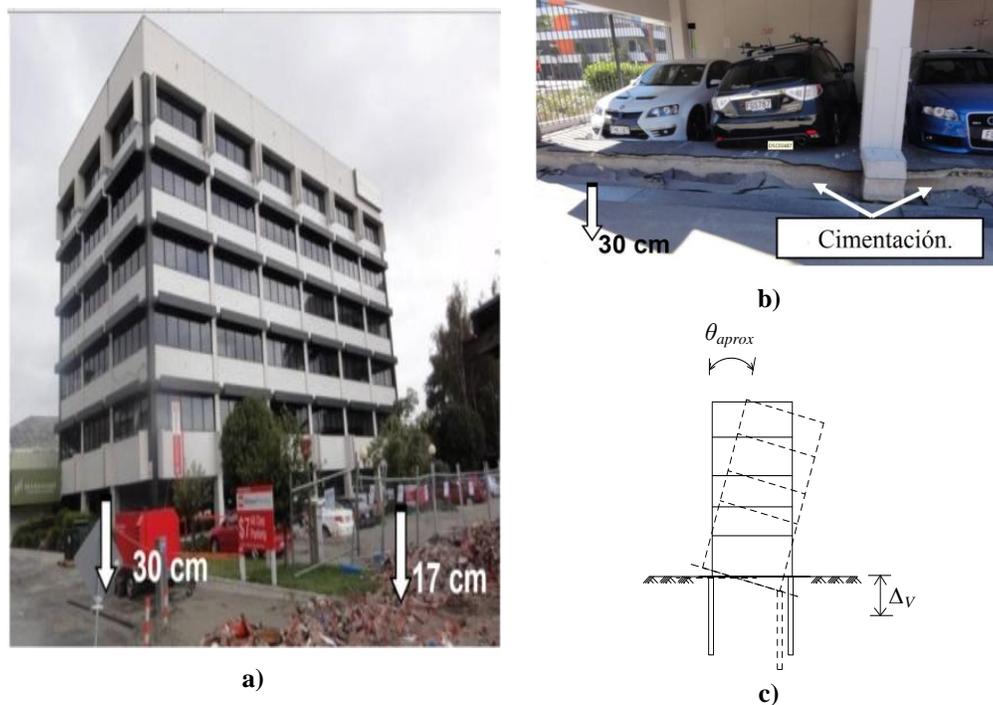


Figura 1.45. Edificio con desplazamientos diferenciales, a) Vista de ambas caras, b) Vista de la cara norte (GEER, 2011)⁷⁶ y c) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación a base de pilotes



El siguiente caso es un edificio de seis niveles, cimentado sobre zapatas aisladas de 2.4 x 2.4 m desplantadas a 0.6 m, este edificio sufrió desplazamiento diferencial vertical causado por el fenómeno de licuación. La Figura 1.46 muestra la vista del edificio en su cara oeste, se indican los asentamientos medidos desde el extremo norte hasta el extremo sur del edificio, el desplazamiento diferencial vertical es 1 cm para el primer y segundo tramo, después de 3 cm, 9 cm y 11 cm, respectivamente (GEER, 2011).

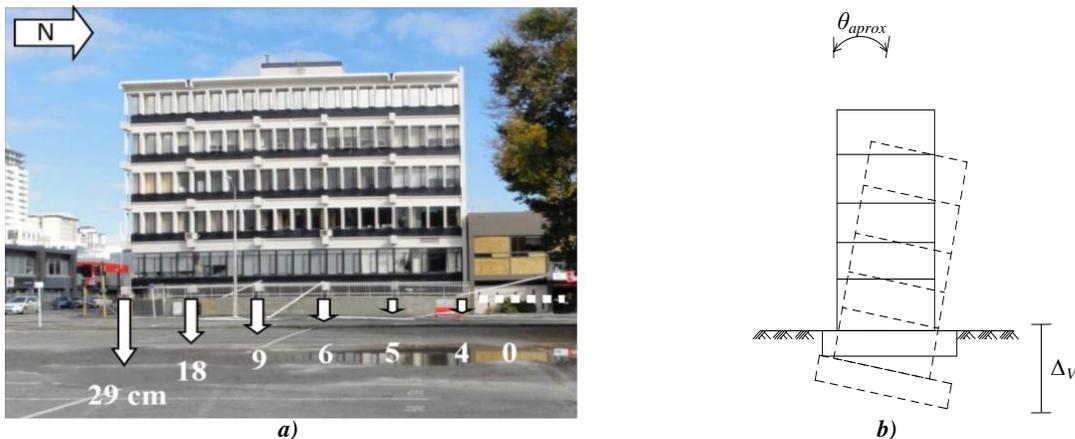


Figura 1.46. a) Edificio sometido a desplazamiento diferencial vertical cimentado en una zona propensa a licuación, 24 Mar 2011; -43.52878°, 172.64252° (GEER, 2011)⁷⁷ y b) Representación esquemática del tipo de falla para un edificio con cimentación flexible que presentó un desplazamiento diferencial vertical

Por otra parte se muestra en la Figura 1.47 un edificio vecino al mostrado en la Figura 1.42, el cual es una estructura de tres niveles apoyado sobre cimentación rígida, este edificio fallo por un desplazamiento vertical de aproximadamente 40 cm en su parte frontal, provocando una inclinación de $\sim 2^\circ$, además este edificio también sufrió un desplazamiento horizontal hacia el norte de aproximadamente 15 cm. Aparentemente el daño estructural en estos dos edificios es moderado, sin embargo los desplazamientos verticales que sufrieron estas estructuras provocaron que resultara económicamente viable restaurarlos, así que después del sismo se decidió demolerlos.

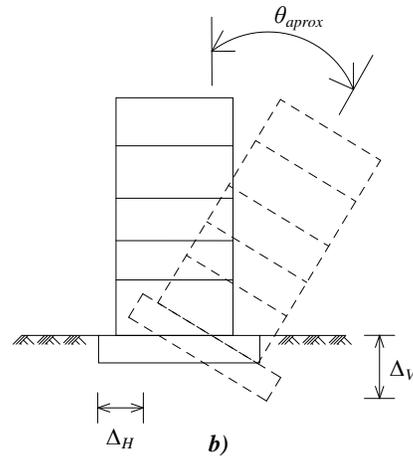


Figura 1.47. a) Este edificio sufrió desplazamiento diferencial vertical y desplazamiento horizontal, 24 Mar 2011; - 43.52878°, 172.64252° (GEER, 2011)⁷⁸ y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación rígida que presente un desplazamiento diferencial vertical y horizontal

Estos dos últimos casos resultan de particular interés ya que a pesar de no presentar daños estructurales severos, con aproximadamente 2° de inclinación, 29 y 40 cm de desplazamiento diferencial vertical se decidió demolerlos, comparando estos daños con los con los que afectaron al edificio Risco durante el sismo de Chile documentados por GEER (2010), se observa que presentan daños similares desplazamiento diferencial vertical e inclinación, la diferencia radica en la cimentación; el edificio Riesco esta cimentado sobre pilotes mientras que los edificios documentados por GEER. (2011) estaban apoyados sobre cimentaciones superficiales. Esta observación demuestra la gran importancia que tiene la cimentación para disminuir los daños por licuación en las estructuras.

1.12 Sismo de Tohoku, Japón en 2011

Este sismo ocurrió el 11 de Marzo de 2011, ha sido uno de los más fuertes y mejor documentados por la ingeniería sísmica. Durante este sismo se presentó el fenómeno de licuación ocasionando daños en diferentes tipos de edificios, como el caso de la Figura 1.48 en donde se observa el desplazamiento vertical que sufrió un edificio de tres niveles de aproximadamente 40 cm con respecto al nivel de la calle en una zona residencial y comercial de Urayasu, este edificio tenía con una cimentación flexible (EERI, 2011).

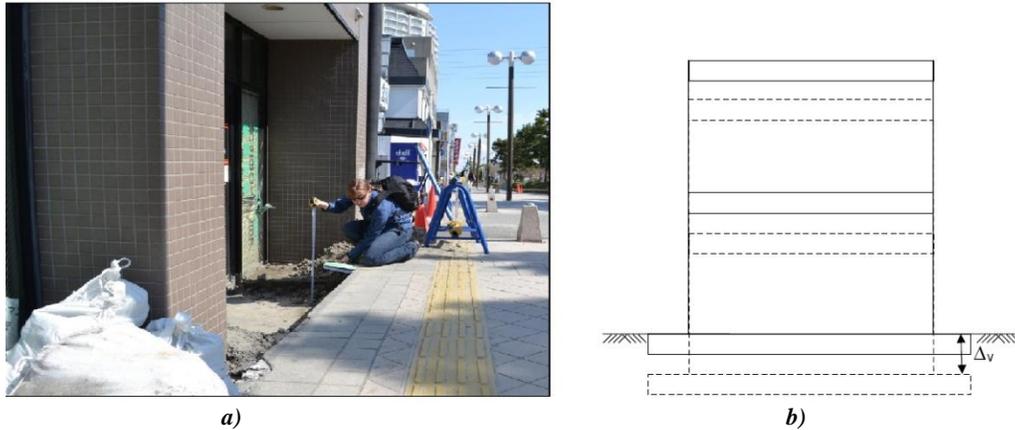


Figura 1.48. a) Edificio de tres niveles que presentó un desplazamiento vertical con respecto al nivel de la calle en Urayasu (N35.6485, E139.9178) EERI (2011)⁷⁹ y b) Representación esquemática de acuerdo a Bird *et al.*, (2006)

En el siguiente caso se aprecia el buen desempeño estructural de un edificio cimentado con pilotes (izquierda), mientras que se evidencia el asentamiento de otro edificio con cimentación flexible. Con estos casos una vez más se demuestra que las cimentaciones a base de pilotes tienen una eficiente respuesta ante los desplazamientos verticales, sin embargo se observa que son vulnerables a los desplazamientos horizontales aunque estos últimos no son muy comunes, tal como se mostrara más adelante en los casos documentados por Akai *et al.* (1995).



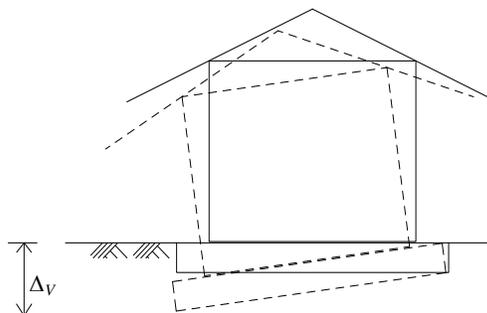
Figura 1.49. a) Desplazamiento vertical en relación con el edificio de la izquierda, el cual está cimentado sobre pilotes, ubicado en Urayasu (N35.6485, E139.9178) EERI (2011)⁸⁰ y b) Representación esquemática para el tipo de modo de falla de un edificio cimentado sobre pilotes y desplazamiento vertical del suelo circundante al edificio



A continuación se muestran los casos de estructuras con cimentación flexible, en la Figura 1.50 se aprecia una casa de dos niveles la cual presentó una inclinación de aproximadamente 5° y 40 cm de desplazamiento vertical.



a)



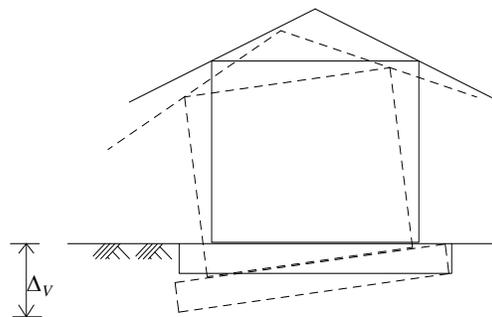
b)

Figura 1.50. a) Desplazamiento vertical diferencial e inclinación de edificios residenciales en la ciudad de Kamisu, Japón (N35.917, E140.642) Ashford et al. (2011)⁸¹ y b) Representación del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible que presente un desplazamiento diferencial vertical y una inclinación

El edificio mostrado en la Figura 1.51, al igual que el caso de la Figura 1.50, tenía una cimentación flexible, sin embargo su inclinación y desplazamiento vertical fueron menores (1° y 10 cm respectivamente), es importante señalar que estas cimentaciones están sobre un material de relleno que tiene diferentes propiedades y distintas fechas de colocación. Tomando en cuenta estas consideraciones podría entenderse porque algunos edificios presentaron diferentes respuestas ante el fenómeno de licuación en esta zona (Ashford *et al.*, 2011).



a)



b)

Figura 1.51. a) Desplazamiento vertical diferencial e inclinación de un edificio de dos niveles para uso residencial en la ciudad de Kamisu Japón (N35.917, E140.642) Ashford et al., (2011)⁸² y b) Representación del tipo de modo de falla para un edificio con cimentación flexible que presente un desplazamiento diferencial vertical y una inclinación

En la Tabla 1.1 se presentan los edificios reportados, durante el presente capítulo, con daños estructurales debidos al fenómeno de licuación, inducidos por eventos sísmicos en diferentes partes del mundo. En esta tabla se indica la siguiente información: (1) un



identificador del edificio, (2) la fecha del evento sísmico que provocó el fenómeno de licuación, (3) el país afectado por licuación, (4) número de pisos de la estructura, (5) tipo de cimentación de la estructura (flexible, rígida o pilotes), (6) ángulo aproximado de inclinación de la estructura (θ_{approx}), (7) desplazamiento vertical (Δ_V) reportado o estimado como más adelante se explica, (8) desplazamiento horizontal (Δ_H) reportado o estimado como más adelante se explica y (9) daños observados.

Por otra parte en la Tabla 1.1 se incluyen 35 edificios afectados por el fenómeno de licuación durante el sismo de 1964 en la ciudad de Niigata Japón. Esta base de datos fue tomada del trabajo elaborado por Yoshimi y Tokimatsu (1977), estos investigadores documentaron los 35 edificios que se incluyen en esta tabla. Sin embargo para fines de su investigación no registraron el ángulo de inclinación y desplazamiento horizontal de las estructuras estudiadas, si bien no se conocen estos dos parámetros, si se documentó el número de niveles, desplazamiento vertical y tipo de cimentación, por lo cual se decidió incluir la base de datos de Yoshimi y Tokimatsu (1977) en la Tabla 1.1, tal como se muestra a continuación.



Tabla 1.1. Edificios dañados por licuación en el mundo

ID	Fecha	País	No. de pisos	Tipo de cimentación	θ_{aprox} (°)	Δ_v (cm)	Δ_H (cm)	Daños observados
1	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	20	-	Moderado
2	16/06/1964	Japon ¹	2	Rígida	-	10	-	Ligero
3	16/06/1964	Japon ¹	1	Flexible	-	10	-	Ligero
4	16/06/1964	Japon ¹	8	Flexible	-	110	-	Completo
5	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	200	-	Completo
6	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	130	-	Completo
7	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	100	-	Severo
8	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	50	-	Severo
9	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	20	-	Moderado
10	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	240	-	Completo
11	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	257	-	Completo
12	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	154	-	Completo
13	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	345	-	Completo
14	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	15	-	Moderado
15	16/06/1964	Japon ¹	2	Rígida	-	16	-	Moderado
16	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	157	-	Completo
17	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	150	-	Completo
18	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	172	-	Completo
19	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	97	-	Severo
20	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	120	-	Completo
21	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	380	-	Completo
22	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	100	-	Severo
23	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	340	-	Completo
24	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	80	-	Severo
25	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	60	-	Severo
26	16/06/1964	Japon ¹	5	Desconocida	-	20	-	Moderado
27	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	30	-	Moderado
28	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	10	-	Ligero
29	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	30	-	Moderado
30	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	150	-	Completo
31	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	150	-	Completo
32	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	66	-	Severo
33	16/06/1964	Japon ¹	6	Rígida	-	100	-	Severo
34	16/06/1964	Japon ¹	3	Rígida	-	116	-	Completo
35	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	150	-	Completo
36	16/06/1964	Japon ²	4	Rígida	63 ^{&}	-	-	Daño completo, el edificio volcó
37	16/06/1964	Japon ²	4	Pilotes	0,5 ^{&}	-	-	Daño ligero, el edificio es habitable
38	16/06/1964	Japon ³	4	Rígida	15 ^{&}	-	-	Completo
39	16/06/1964	Japon ³	4	Rígida	8 ^{&}	300 [#]	-	Completo
40	16/06/1964	Japon ³	3	Rígida	5 ^{&}	300 [#]	-	Completo
42	16/07/1990	Filipinas ⁵	3	Flexible	5	100	-	Completo
43	16/07/1990	Filipinas ⁶	3	Flexible	5	100	-	Daño completo, *Desplazamiento vertical diferencial
44	16/07/1990	Filipinas ⁷	3	Flexible	12 ^{&}	-	350 [#]	Daño completo
45	16/07/1990	Filipinas ⁶	-	Flexible	-	40	20	*Daño completo
46	22/04/1991	Panamá ⁸	1	Flexible	-	40	200	Daño completo debido al colapso de muros de carga
47	17/01/1995	Japón ⁹	-	Pilotes	-	30	-	Daño moderado, *Pilotes dañados severamente
48	17/01/1995	Japón ⁹	-	Pilotes	-	-	20	*Pilotes dañados severamente
49	21/09/1999	Taiwán ¹⁰	4	Rígida	12 ^{&}	141 [#]	-	Completo
50	21/09/1999	Taiwán ¹¹	4	Rígida	5 ^{&}	-	-	Daño moderado
52	17/08/1999	Turquía ¹³	2	Flexible	-	150	-	Completo
53	17/08/1999	Turquía ¹³	4	Flexible	50 ^{&}	50 [#]	-	Pérdida completa
54	17/08/1999	Turquía ¹³	4	Rígida	-	30	50	Daño severo, *Hotel cerrado aproximadamente un año
55	17/08/1999	Turquía ¹⁴	2	Flexible	-	55	100	Daño severo
56	17/08/1999	Turquía ¹⁵	5	Rígida	-	-	57	Daño moderado
57	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	100	-	Daño completo, inmueble inhabitable
58	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	70	-	Pérdida total debido a que los muros colapsaron
59	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	50	-	Daño severo, inmueble reparable
60	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	80	-	Daño severo, inmueble inhabitable
61	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	70	-	Daño severo, inmueble inhabitable
62	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	-	90	Daño severo
63	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	20	390	*Daños ligeros, los daños por desplazamiento lateral fueron en áreas sin importancia estructural



Tabla 1.1. Edificios dañados por licuación en el mundo (continuación)

ID	Fecha	País	Nº. de pisos	Tipo de cimentación	θ_{aprox} (°)	ΔV (cm)	ΔH (cm)	Daños observados
64	16/07/2007	Japón ¹⁸	3	Pilotes	5	-	-	Daño moderado, buen desempeño de los pilotes
65	04/09/2010	Nueva Zelanda ¹⁹	1	Flexible	-	33	10	Daño severo
66	27/02/2010	Chile ²⁰	8	Pilotes	1	40	-	Daño ligero
67	27/02/2010	Chile ²¹	2	Flexible	-	60	-	Daño severo
68	27/02/2010	Chile ²²	2	Flexible	5 ^{&}	39 [#]	-	Daño ligero
75	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	1	Flexible	-	40	-	Funcionalidad afectada
76	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	6	Pilotes	5	30	-	Daño moderado
77	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	6	Pilotes	-	29	-	*Daño moderado pero el edificio fue demolido
78	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	3	Rígida	1.8	40	15	*Daño severo, el edificio fue demolido
79	11/03/2011	Japón ²⁴	3	Rígida	-	40	-	Daño severo, los daños son reparables
80	11/03/2011	Japón ²⁴	4	Pilotes	-	30	-	*Desplazamiento del suelo
81	11/03/2011	Japón ²⁵	2	Flexible	3 ^{&}	-	-	Daño severo
82	11/03/2011	Japón ²⁵	2	Flexible	3 ^{&}	-	-	Daño ligero

¹Yoshimi y Tokimatsu, 1977

²Mohammed y Maekawa, 2010

³Ohsaki, 1966

⁵Ishihara et al., 1993

⁶Orense, 2011

⁷EERI, 1990

⁸Camacho y Viquez, 1994

¹⁰Akai et al., 1995

¹¹Moh et al., 2001

¹²EEFIT, 2007

¹³USGS, 2000

¹⁴Sancio et al., 2004

¹⁵Bray et al., 2000

¹⁶Elnashai et al., 2008

¹⁷GEER, 2007

¹⁸Global Risk Miyamoto, 2007

¹⁹Green y Cubrinovski, 2011

²⁰GEER, 2010 (Chile)

²¹Mendoza et al., 2011

²³GEER, 2011

²⁴EERI, 2011

²⁵Ashford et al., 2011

θ_{aprox} = Ángulo de inclinación aproximado

ΔV = Desplazamiento vertical

ΔH = Desplazamiento horizontal

*Información proporcionada en el reporte correspondiente



Capítulo 2

Daños a edificios por licuación en México

2.1 Sismo de Lázaro Cárdenas Michoacán en 1985

2.1.1 Planta SICARTSA

Esta planta siderúrgica estaba ubicada en la región epicentral, en donde se registraron 5 personas muertas, además se reportaron daños que van desde moderados a graves en un 80% de las viviendas de esta zona, de la misma forma se reportaron daños en hoteles, edificios públicos y el hospital general. En las instalaciones de la siderúrgica SICARTSA se incendió la planta cogenizadora. Por otra parte la planta de laminación sufrió un desplazamiento vertical diferencial, además hubo daños en los altos hornos (revestimiento de refractarios) todos los daños fueron reparables, las labores de reparación iniciaron el mismo día del sismo (Farreras, Ortiz y Alcalá, 2003).



Figura 2.1. Desplazamiento vertical del piso en la terminal de usos múltiples de la planta SICARTSA, Lázaro Cárdenas, Michoacán 19 de Septiembre de 1985 (Farreras, Ortiz y Alcalá, 2003)

2.1.2 Planta FERTIMEX

En la planta de fertilizantes FERTIMEX, ubicada en la región epicentral, no hubo daños graves aparentes, en las estructuras, a excepción de la elongación de pernos de 1 1/2" en las bases de acero de la planta de fosfato diamónico fácilmente reparables. Por otra parte se presentaron fallas en el suelo debidas al fenómeno de licuación, las sismitas formadas en esta región son evidencia de la presencia en este fenómeno; lo que ocasionó desplazamientos verticales diferenciales de aproximadamente 15 cm en las vías de acceso



de la planta y en general en todas las edificaciones no piloteadas, además de la destrucción total de las vías férreas y parciales de muelles. La planta FERTIMEX también sufrió inundaciones causadas por un Tsunami, el cual inundó parte de sus instalaciones atrapando algunos obreros que fueron rescatados en lanchas horas más tardes (Lomnitz y Castaños, 1985).



Figura 2.2. Las vías del tren cerca de Paso de Burras en Lázaro Cárdenas, sufrieron deformaciones como resultado del Tsunami del 19 de septiembre de 1985 (Lomnitz y Castaños, 1985)

2.2 Sismo de Manzanillo, Colima en 1995

El lunes 9 de octubre de 1995 un sismo azotó el área cercana a Manzanillo, afectando la parte norte y la parte suroeste de los estados de Colima y Jalisco respectivamente, dañando de manera importante varias estructuras de estos estados y afectando de manera directa las poblaciones de Cihuatlán, Jaluco, Melaque, Barra de Navidad, La Huerta, Autlán, El Grullo y Tecolotlán. La cifra oficial es de 58 víctimas humanas, así como miles de damnificados, este evento sísmico se caracterizó por provocar el fenómeno de licuación y un posterior Tsunami (Juárez *et al.*, 1997). La ciudad de Manzanillo fue el área que sufrió más daños debidos a licuación, en la calle Aldama fueron observados volcancitos de arena (sismitas), así mismo se observó lodo que fue expulsado por chorros de agua de aproximadamente 1 m de altura, además se presentaron grietas de hasta 100 m de longitud y 1 m de ancho, estos tipo de daños son características típicas del fenómeno de licuación, lo que provocó el desplazamiento vertical de varias estructuras (Juárez *et al.*, 1997).



2.2.1 Patio de contenedores del puerto de Manzanillo

Esta zona sufrió un daño moderado debido al sismo, sin embargo el fenómeno de licuación provocó desplazamientos diferenciales verticales y desplazamientos horizontales en el suelo, después del evento sísmico el puerto solo trabajaba al 20% de su capacidad debido a grietas graves en el patio de los contenedores; este agrietamiento provocó daños moderados en las grúas de carga y descarga (Juárez *et al.*, 1997).

Las grúas de este puerto tuvieron un comportamiento eficiente debido a que estaban cimentadas con pilotes de concreto armado con una sección transversal de 50 x 50 cm. Una inspección detallada se llevo a cabo después del sismo para examinar el estado de los pilotes, los elementos dañados fueron divididos en dos categorías:

- a) pilotes agrietados, es decir, los elementos que fueron sufrieron daños estructurales con lo cual redujeron considerablemente su resistencia sísmica
- b) pilotes con fisuras, es decir los elementos sin daño estructural severo

Los resultados obtenidos de estas observaciones, demostraron que algunos pilotes sufrieron desplazamientos horizontales, a pesar de estas fallas las estructuras no estaban en riesgo de colapsar (Juárez *et al.*, 1997).

La Figura 2.3 muestra los daños debidos al fenómeno de licuación en el patio de contenedores del puerto de Manzanillo y en la Figura 2.5 se observan claramente las sismitas formadas por el fenómeno de licuación, estas evidencias son características típicas del fenómeno de licuación, como se ha expuesto en casos de eventos sísmicos en otras partes del mundo.

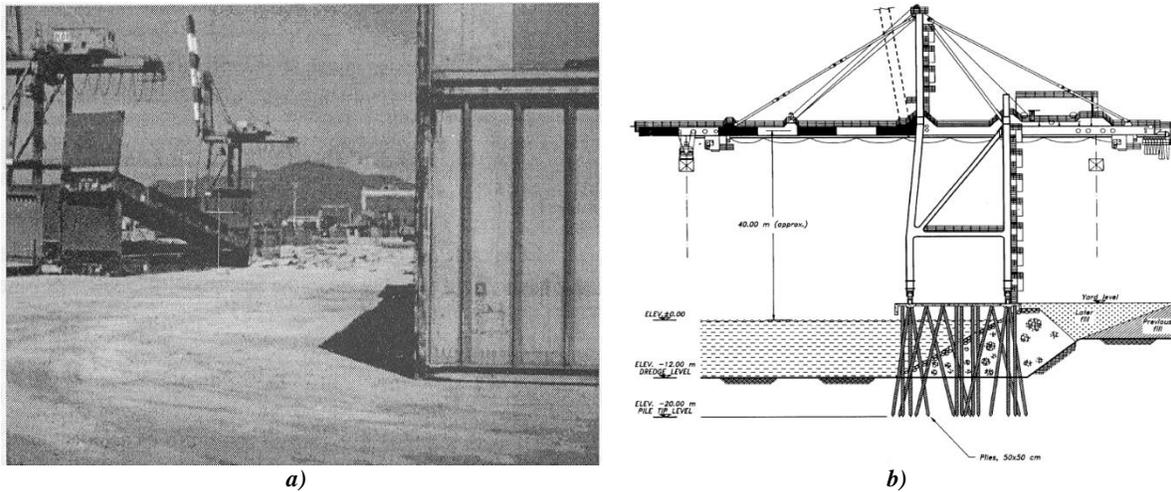


Figura 2.3. Las grietas y el asentamiento en el patio de contenedores causaron daños ligeros en las grúas de carga (Juárez et al., 1997) y b) Representación esquemática, se observa la distribución de los pilotes que sostienen a la grúa de carga y descarga (Ovando y Romo, 2000)

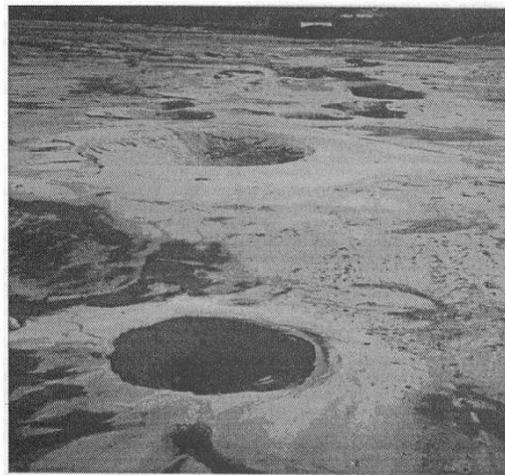


Figura 2.4. Evidencia del fenómeno de licuación en la zona de contenedores (Juárez et al., 1997)

2.2.2 Fenómeno de licuación en zonas residenciales

Los problemas y daños en casas habitación por el fenómeno de licuación de suelos arenosos fueron notables en dos sitios principalmente, la colonia Libertad y las colonias circundantes al puerto de Manzanillo. En ambos sitios se apreciaba bufamiento del suelo dentro de los inmuebles con la consecuente falla de los pisos. En la mayoría de los inmuebles de las zonas donde se observó este fenómeno, el piso estaba constituido básicamente por concreto simple, no existiendo ningún tipo de acero de refuerzo que pudiera contribuir a incrementar la resistencia de los pisos ante este efecto de supresión del suelo. Tampoco se contaba con

preparaciones que permitieran a la estructura del piso desplazarse libremente respecto al resto de la estructura, lo que provocó severos daños en muros de carga, traveses y techos de algunas de las construcciones. En varios casos el bufamiento del piso alcanzaba hasta un metro de altura máxima, inhabilitando totalmente a los inmuebles, provocando la pernoctación de los moradores de las mismas. El fenómeno de bufamiento se observó en banquetas y avenidas de ambas colonias es importante mencionar que de acuerdo a información del gobierno municipal, la zona donde se instaló la colonia Libertad era conocida como de alta probabilidad de presentar el fenómeno de licuación en suelos; sin embargo se permitió la construcción en ella, con lo cual aumentaron los daños en esta área (López y Teshigawara, 1997).

En la Figura 2.5 se muestra una estructura ubicada en la colonia Libertad la cual falló ante la pérdida de capacidad de carga del suelo debido al fenómeno de licuación, lo que provocó un desplazamiento vertical de aproximadamente 10 cm, sin embargo de acuerdo a Bird *et al.*, (2006) los daños se consideran como ligeros y la estructura es habitable.

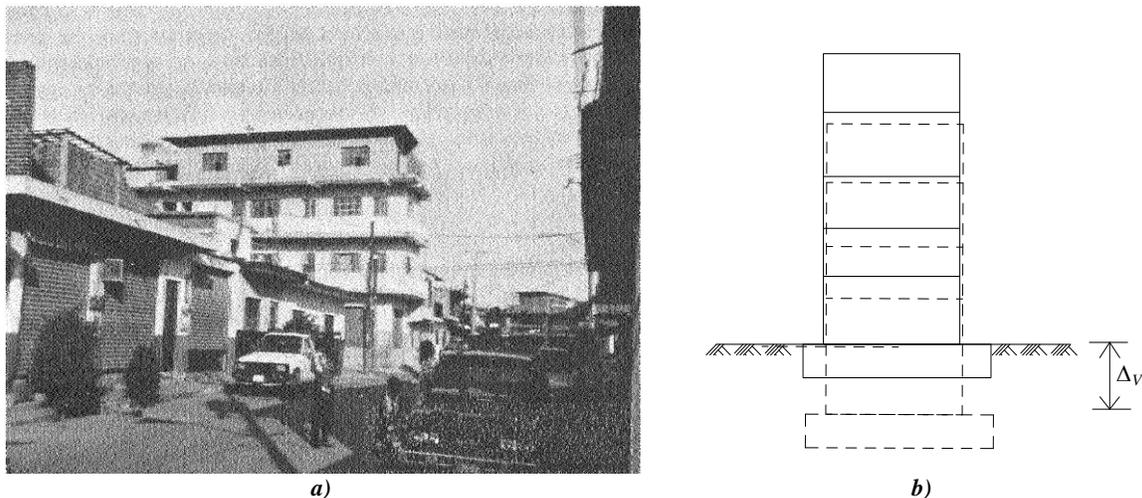
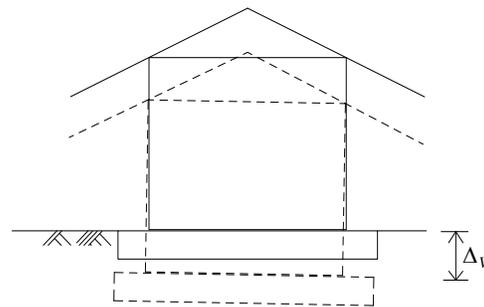


Figura 2.5 *Figura 2.5. a) Edificio de cuatro niveles en la colonia Libertad, sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 10 cm, no presentó daños estructurales (López y Teshigawara, 1997)⁵¹ y b) Representación esquemática del modo de falla para un edificio con cimentación flexible que presenta un desplazamiento vertical*

En la Figura 2.6 se muestra otro caso de una estructura de un solo nivel con cimentación flexible la cual resultó severamente dañada a causa del fenómeno de licuación lo que provocó un desplazamiento vertical. Estos daños fueron comunes en la mayoría de las casas de esta colonia, debido a un deficiente método constructivo y ausencia del control de calidad de los materiales (López y Teshigawara, 1997)



a)



b)

Figura 2.6. a) Casa habitación de un solo nivel sufrió desplazamiento vertical (López y Teshigawara, 1997) y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla ante el fenómeno de licuación de una estructura de un nivel con cimentación flexible que presentó un desplazamiento vertical

2.3 Sismo de Manzanillo Colima en 2003

El martes 21 de enero, un fuerte terremoto sacudió la región costera del estado de Colima, la magnitud estimada fue de $M= 7.6$ (USGS). Se reportaron 30 personas fallecidas, aproximadamente 300 personas heridas, así como 2,728 estructuras residenciales dañadas totalmente y otras 4,150 con daños parciales, además de severos daños en la red eléctrica y de comunicaciones (GEER, 2010).

Un grupo de ingenieros geotécnicos pertenecientes a Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER) realizó investigaciones preliminares las cuales se concentraron en la evaluación del fenómeno de licuación, deslizamientos de tierra y efectos del sismo en la zona epicentral, que comprende las ciudades de Colima, Tecomán y Villa de Álvarez, a continuación se presenta parte de sus investigaciones.

2.3.1 Puerto de Manzanillo

El fenómeno de licuación se concentró en los sitios cercanos a la costa, el daño en el puerto se produjo principalmente en las áreas de poca importancia para el funcionamiento del puerto y las operaciones portuarias no fueron significativamente afectadas por licuación. Es importante mencionar que durante el terremoto de 1995, el puerto de Manzanillo sufrió daños considerables debido al fenómeno de licuación, desde entonces diversas técnicas para



mejorar del suelo, como la vibro-compactación, fueron utilizadas durante la reparación en el puerto para aumentar la resistencia ante el fenómeno de licuación del suelo en los lugares esenciales para las operaciones diarias. A pesar de estas mejoras en el suelo los desplazamientos horizontales se presentaron en varios lugares, de aproximadamente 1.3 m (GEER, 2003).

En las Figuras 2.7 y 2.8 se aprecia la severidad de los desplazamientos horizontales cerca del puerto de Manzanillo, los adoquines que adornaban las calles de la ciudad fueron desplazados horizontalmente, las posiciones que conservaron después del sismo evidencian estos desplazamientos. En la ciudad de Villa de Álvarez, al noroeste de Colima, el desplazamiento horizontal, debido al fenómeno de licuación, provocó fallas en las cimentaciones de varias residencias en un colonia situada a 3 km al noroeste del centro de la ciudad. Las cimentaciones de estas casas eran superficiales desplantadas en un terreno construido con rellenos y sin una adecuada compactación (se desconoce en número exacto de casas dañadas por licuación y no se cuenta con evidencia fotográfica de las mismas). De acuerdo con residentes locales, inmediatamente después del sismo una gran cantidad de agua lodosa fue expulsada de las grietas en la superficie del pavimento dañado (GEER, 2003).



Figura 2.7. Desplazamiento vertical y horizontal del suelo debido al fenómeno de licuación de un paseo peatonal, cerca del centro de la ciudad de Manzanillo. La forma cóncava de la acera, a la derecha de la fotografía sugiere un asentamiento de la superficie del suelo (GEER, 2003)



Figura 2.8. Desplazamiento horizontal en el puerto de Manzanillo, esta parte fue cerrada temporalmente al tráfico (GEER, 2003)



Figura 2.9. Desplazamiento lateral hacia el mar en el Puerto de Manzanillo (GEER, 2003)



Figura 2.10. Vista aérea de la terminal de contenedores en el Puerto de Manzanillo, sobre el terreno en la parte frontal de la fotografía se observan las áreas de licuación (GEER, 2003)

2.4 Sismo de Baja California en 2010

El domingo 04 de abril, un terremoto sacudió el norte de Baja California, con una $M=7.2$ este sismo causó daños a la infraestructura eléctrica en la zona del Valle de Mexicali, provocando la interrupción del suministro de energía eléctrica en la ciudad de Mexicali y sus alrededores. Las vías terrestres también resultaron afectadas, como él es caso de la carretera Tijuana-Mexicali la cual colapsó a la altura de la Rumorosa en el kilómetro 21+000 (GEER, 2010).

2.4.1 Puente San Felipe

Se trataba en realidad de dos puentes uno para tráfico de automóviles, construido en el año 2001, y otro para el ferrocarril, construido en el año de 1962, ambos puentes sufrieron diferentes daños como consecuencia del fenómeno de licuación y desplazamiento horizontal del suelo. El diferente comportamiento de estos puentes hace de este un caso interesante de gran valor para el propósito de analizar los procedimientos de evaluación de ingeniería, ya que ambos puentes estaban sujetos a las mismas demandas del desplazamiento lateral. El mayor desplazamiento horizontal ocurrió en las llanuras de suelos aluviales, causando grietas de que tenían un ancho inicial de 1 m y un ancho final de aproximadamente 1.6 m, estas grietas se formaron a una distancia de 60 m de ambos puentes (GEER, 2010).

El puente del ferrocarril está construido con vigas de concreto reforzado apoyadas en columnas cimentadas sobre pilotes, el puente sufrió desplazamiento horizontal en las columnas más cercanas al río causando rotación y traslación, lo que provocó el colapso de un claro del puente en el lado este del río.

Por otra parte el puente de la autopista tiene cuatro columnas de 2 m de diámetro en cada claro, sobre las cuales se apoyan siete vigas “T” este puente sufrió un ligero desplazamiento horizontal de pocos centímetros, la evidencia indica que los pilotes del puente de la carretera resistieron más que los pilotes del puente de ferrocarril, esto probablemente debido a un mejor método constructivo y riguroso control de calidad de los materiales.

La Figura 2.11 muestra una vista aérea de la localización de ambos puentes, se indica la ubicación de las grietas que se formaron por efectos del fenómeno de licuación cercanas a los puentes. En la Figura 2.12 se observa el colapso parcial de un tramo del puente ferroviario debido al desplazamiento horizontal en una columna cimentada sobre pilotes, mientras que en la Figura 2.13 se aprecia otro tramo colapsado, del mismo puente, afectado por el desplazamiento horizontal en la columna cimentada sobre pilotes.

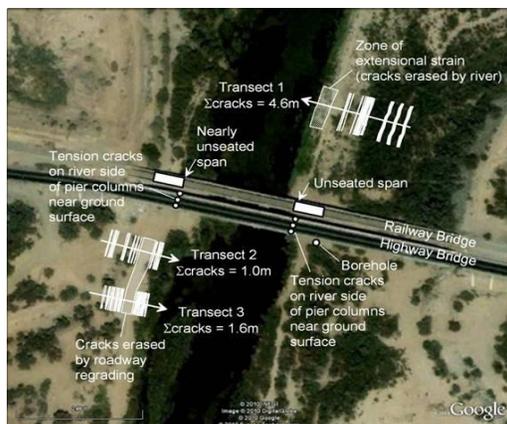


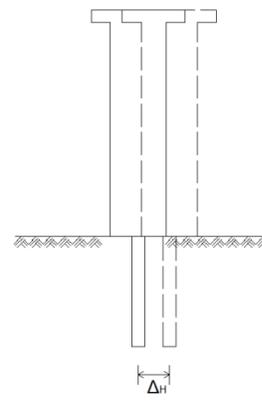
Figura 2.11. Desplazamiento lateral del suelo y los efectos sobre los puentes San Felipe (GEER, 2010)



Figura 2.12. Puente del ferrocarril casi colapsado debido al desplazamiento horizontal. Foto por Scott Brandenburg, 17 de abril de 2010 (GEER, 2010)



a)



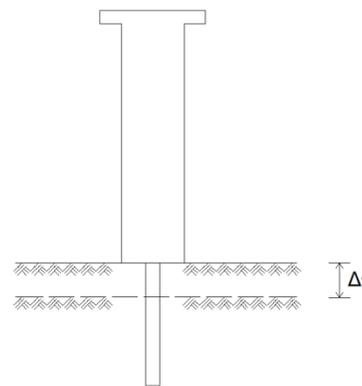
b)

Figura 2.13. Colapso de un claro del puente ferroviario cerca de Guadalupe Victoria, debido al desplazamiento horizontal hacia el río Colorado. Foto de Diane Murbach, 10 de abril de 2010 (GEER, 2010) y b) Representación esquemática del desplazamiento lateral que provocó el colapso de un claro del puente ferroviario San Felipe

En la Figura 2.14 se muestran las columnas cimentadas sobre pilotes que sostienen al puente de la autopista, en este caso los daños fueron menores ya que la respuesta de las columnas ante el desplazamiento horizontal, de acuerdo a GEER (2010), se puede considerar como adecuado. Estas columnas resistieron el desplazamiento vertical ya que un desplazamiento vertical del suelo de aproximadamente 0.5 m no afectó estructuralmente a los pilotes del puente.



a)



b)

Figura 2.14. Aproximadamente 0.5 m de asentamiento del terreno en el puente de la autopista, también se observa el puente del ferrocarril en el fondo. Foto tomada por Jim Gingery, 10 de abril de 2010 (GEER, 2010) y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo y comportamiento eficiente del pilote ante el fenómeno de licuación

Los dos puentes de San Felipe, expuestos anteriormente, demuestran una vez más el eficiente comportamiento que presentan las estructuras cimentadas sobre pilotes, ante los desplazamientos verticales debidos al fenómeno de licuación. Sin embargo, se observa que los daños más severos que sufren los pilotes, se deben al desplazamiento horizontal esto debido a que oponen una menor resistencia ante el empuje del suelo, lo que provoca



colapsos parciales o totales de las superestructuras, como son los casos del puente ferroviario documentado por GEER (2010) y el puente Magsaysay investigado por EERI (1990), analizado en el capítulo anterior. Comparando sus modos de falla se observa que ambas estructuras no resistieron un desplazamiento vertical lo que provocó el colapso de cada uno.

2.4.2 Edificios de la Universidad Autónoma de Baja California

El fenómeno de licuación se observó en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), principalmente en la Facultad de Ciencias Administrativas en el campus Mexicali. Este campus fue construido a lo largo de una curva en la margen izquierda del Río Nuevo sobre sedimentos aluviales no consolidados con un nivel de aguas freáticas poco profundo, este cauce fue canalizado con el tiempo en un canal que permitió la construcción de una carretera y el campus de la universidad. El fenómeno de licuación se presentó dentro de las áreas verdes y el patio que rodea los edificios del campus, el desplazamiento vertical de las estructuras era evidente. Se cree que el desplazamiento vertical de los edificios fue causado principalmente por la reconsolidación después de la licuación ya que el sitio era esencialmente zona de sedimentos aluviales.

En la esquina noreste del edificio “A” se observaron evidencias de desplazamiento horizontal del terreno, así como un desplazamiento vertical del edificio de aproximadamente 30 cm. El edificio “B” sufrió en su cara sur un desplazamiento vertical de aproximadamente 20 cm y un desplazamiento horizontal de aproximadamente 10 cm entre el piso del edificio y el suelo circundante. En el edificio “D” el desplazamiento vertical máximo que se registró fue de 15 cm (GEER, 2010).

Por otra parte el fenómeno de licuación causó grietas y desplazamientos verticales de la losa de cimentación y en todo el perímetro de cada edificio en el campus, se observó que las estructuras no presentaban signos de daño grave debido al desplazamiento vertical en las columnas, por lo tanto, se puede afirmar que los pilotes no presentaron ningún desplazamiento vertical grave debido al fenómeno de licuación. Sin embargo, las losas fueron desplazadas verticalmente de manera significativa entre los grupos de pilotes.

En la Figura 2.15 se muestra la ubicación de la universidad y la distribución de los edificios que componen el campus de la Universidad Autónoma de Baja California.

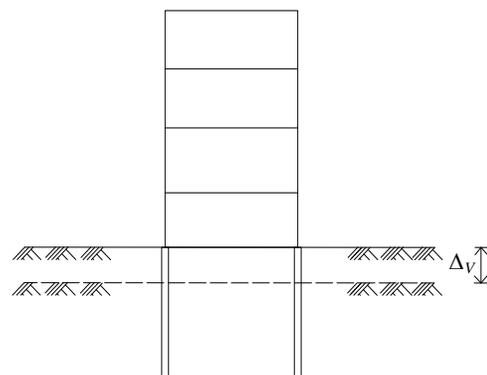


Figura 2.15. Mapa de la ubicación de los edificios de la Universidad Autónoma de Baja California en Mexicali. Google Earth imágenes del 31 de enero de 2008, N32.630260 °, W115.483642° (GEER, 2010)

En la Figura 2.16 se muestra parte del daño que sufrió el piso del edificio “D” ocasionado por el desplazamiento vertical del suelo, también se observa que los muros de carga no sufrieron daños estructurales debido a que estaban confinados por columnas cimentadas sobre pilotes, mientras que el piso no fue diseñado para estar apoyado sobre estos pilotes, por lo cual fallo ante el desplazamiento vertical.



a)



b)

Figura 2.16. a) Daños parciales al piso debajo del muro en la cara norte del edificio D (GEER, 2010)⁷¹ y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo debido al fenómeno de licuación

Por otra parte en la Figura 2.17 se muestra el eficaz desempeño de las estructuras cimentadas sobre pilotes, ya que estas estructuras solo sufrieron un moderado

desplazamiento vertical, el cual fue medido tomando como referencia las marcas que dejó el suelo al desplazarse, sobre el perímetro de cada edificio.



Figura 2.17. a) Medición del desplazamiento vertical diferencial entre piso de la estructura y el piso del patio. Foto de Scott J. Brandenburg, 17 de abril de 2010 (GEER, 2010) y b) Representación esquemática del desplazamiento vertical del suelo debido al fenómeno de licuación

En general la respuesta ante el fenómeno de licuación por parte de los edificios cimentados sobre pilotes de la UABC, fue eficiente, a pesar de sufrir desplazamientos horizontales y verticales de aproximadamente 30 cm los daños por licuación fueron menores.

Es necesario señalar que los daños severos que sufrieron los edificios de la UABC, no se deben al fenómeno de licuación, sino a un mal diseño estructural, en general los daños provocados por la pérdida de capacidad de carga del suelo son menores (GEER, 2010).

2.4.3 Residencias afectadas en el valle de Mexicali

Al sur de la ciudad de Mexicali se ubican pequeños poblados, con residencias que en general son estructuras de uno o dos niveles, probablemente construidas sin control de calidad de los materiales y procesos constructivos sin supervisión de un ingeniero. Estas deficiencias aumentaron los daños por licuación en toda la zona del valle de Mexicali, particularmente en los poblados de Zacamoto y Oaxaca, en donde se presentó la formación de grietas, expulsión de agua en chorros que alcanzaron los 2 m provocando pequeñas inundaciones, como bien se sabe estos eventos son características típicas del fenómeno de licuación (GEER, 2010).

El desplazamiento horizontal provocó los mayores daños en las estructuras residenciales, debido a que en numerosos casos causó el colapso de los edificios lo que implicó la pérdida total de los inmuebles, principalmente las estructuras que se ubicaban cerca del Río Hardy y Río Nuevo. Un ejemplo claro de la magnitud de estos daños se muestra en la Figura 2.18 en donde se observa una casa habitación de un nivel la cual contaba con una cimentación flexible, esta estructura resultó dañada severamente por un desplazamiento horizontal de aproximadamente 1 m y un desplazamiento vertical de aproximadamente 80 cm, lo que provocó inclinación hacia su lado posterior (GEER, 2010).

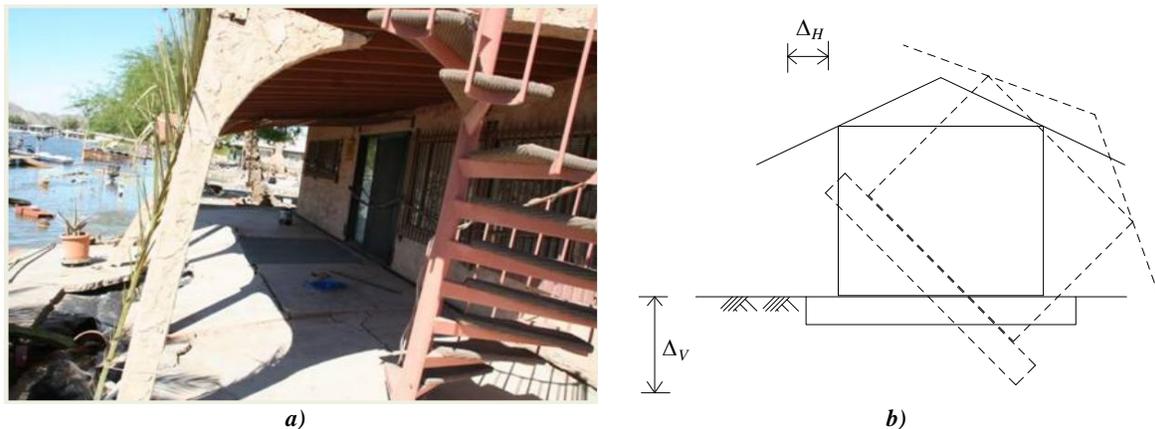


Figura 2.18. a) Casa habitación de un nivel dañada por el desplazamiento vertical y horizontal, ubicada sobre la margen del Río Hardy (GEER, 2010)⁷² y b) Representación esquemática del tipo de modo de falla para una estructura de un nivel dañada por desplazamiento vertical y horizontal con cimentación flexible

Por otra parte en la Figura 2.19 se muestra una estructura de dos niveles ubicada en el poblado llamado Oaxaca, en esta zona el fenómeno de licuación fue evidente, un gran número de casas sufrieron desplazamientos verticales, a pesar de estos grandes desplazamientos los casos de colapso total de las estructuras fueron pocos, por lo que el número de personas lesionadas fue bajo (GEER, 2010).

La casa mostrada en la Figura 2.19 tenía una cimentación flexible, la cual a diferencia de la casa mostrada en la Figura 2.18, falló principalmente por un desplazamiento vertical. Se observa que los daños en la superestructura son menores, como por ejemplo: (1) grietas en elementos no estructurales, (2) daño en acabado aparente de muros, y (3) daño moderado en la cimentación, en este caso no se aprecian grietas en el suelo que indiquen un daño severo en la cimentación. Sin embargo a pesar de estos daños menores de acuerdo a Bird *et al.*

(2006) la pérdida del edificio es completa debido a que el inmueble es inhabitable y una posible reparación sería incosteable.



Figura 2.19. a) Estructura de dos niveles en el poblado de Oaxaca sufrió desplazamiento vertical de aproximadamente 1 m (GEER, 2010)⁷³ y b) Representación esquemática para una estructura de dos niveles dañada por un desplazamiento vertical debido a la pérdida de carga del suelo

En la Figura 2.20a se expone un caso más de los daños ocasionados por el desplazamiento horizontal en una casa habitación, esta estructura tenía una cimentación flexible y debido a esto su resistencia fue menor ante los empujes laterales del suelo debidos al fenómeno de licuación. La Figura 2.20b muestra los daños estructurales y no estructurales, por ejemplo: (1) colapso de muros de carga, (2) grietas en muros y columnas, (3) daño en acabado aparente en muros, y (4) daños severos en la cimentación, de acuerdo a la grieta que se observa en la Figura 2.20b se asume que la cimentación de esta casa sufrió daños severos.

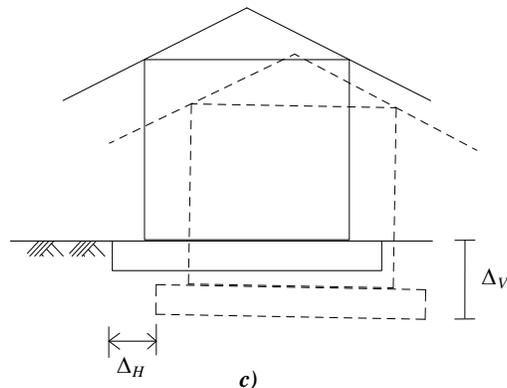
La casa dañada por un desplazamiento horizontal ($\Delta_H \sim 40 \text{ cm}$) y vertical (se desconoce la magnitud) mostrada en la Figura 2.20, estaba situada en las cercanías del Río Hardy ($\sim 60 \text{ m}$), una zona propensa al fenómeno de licuación, por lo cual aumentaron los daños en esta zona. Debido a los daños estructurales, de acuerdo a Bird *et al.* (2006) el inmueble se considera como pérdida total ya que es más económico demolerlo que intentar restaurarlo.



a)



b)



c)

Figura 2.20. a) Esta residencia, situada a unos 60 m del Río Hardy, sufrió severos daños debido al desplazamiento horizontal (N32.2380682° W115.301572°). Foto de Diane Murbach, 10 de abril de 2010, b) Vista interior de la residencia afectada por desplazamiento horizontal, N32.2383828° W115.3014691° GEER (2010)⁷⁴ y c) Representación esquemática de una estructura de un solo nivel dañada por el desplazamiento vertical y horizontal con cimentación flexible

Comparando los casos de los edificios de la UABC documentados por GEER (2010), con los edificios expuestos en el Capítulo 1, tomando en cuenta solo los daños ocasionados por fenómeno de licuación. Se observa un mejor comportamiento en las estructuras ubicadas en el campus de la Universidad Autónoma de Baja California, debido a que sus desplazamientos horizontales y verticales fueron menores. La diferencia más notable es la inclinación que presentaron las estructuras, en los edificios de la UABC la inclinación fue apenas perceptible, mientras que el ángulo de inclinación máximo registrado en el capítulo anterior fue de aproximadamente mayor a 70°, provocando que el edificio volcara sobre una de sus caras, como es el caso de los edificios dañados durante el sismo de 1964 en Japón, documentado por Ohsaki (1996) y el sismo de 1999 en Turquía documentado por Sancio *et al.* (2004). Sin embargo también se observan daños similares con estructuras apoyadas sobre una cimentación superficial, afectadas por el desplazamiento horizontal el cual provoco la pérdida total de las estructuras, tal como lo demuestran los casos ocurridos



durante los sismos de 1990 en Filipinas documentado por Orense (2011) y durante el sismo de 1991 en Costa Rica documentado por Sauter (1994).

Por otra parte tomando como base los casos anteriormente expuestos se llega a la Tabla 2.2 la cual es un resumen del presente capítulo, tomando en cuenta solo los daños ocasionados por el fenómeno de licuación a diferentes estructuras. Al igual que la Tabla 1.1, en esta tabla se indica la siguiente información: (1) un identificador del edificio, (2) la fecha del evento sísmico que provocó el fenómeno de licuación, (3) el país afectado por licuación, (4) número de pisos de la estructura, (5) tipo de cimentación de la estructura (flexible, rígida o pilotes), (6) ángulo aproximado de inclinación de la estructura (θ_{aprox}), (7) desplazamiento vertical (Δ_V) reportado o estimado como más adelante se explica, (8) desplazamiento horizontal (Δ_H) reportado o estimado como más adelante se explica y (9) daños observados.

Tabla 2. 1. Edificios dañados por licuación en México

ID	Fecha	País	No. de pisos	Tipo de cimentación	θ_{aprox} (°)	Δ_V (cm)	Δ_H (cm)	Daños observados
41	19/09/1985	México ⁴	2	Flexible	-	15	-	Sin daños estructurales, edificios de acceso a la planta FERTIMEX
51	09/10/1995	México ¹⁰	4	Rígida	-	10	-	Daño ligero
69	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	30	-	Daño ligero en el edificio A de la UABC
70	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	20	10	Daño ligero en el edificio B de la UABC
71	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	15	-	Daño ligero en el edificio D de la UABC
72	04/04/2010	México ²²	1	Flexible	15 ^{&}	30 [#]	100	Pérdida completa
73	04/04/2010	México ²²	2	Flexible	-	100 [#]	-	Pérdida completo
74	04/04/2010	México ²²	1	Flexible	-	-	40 [#]	Pérdida completa

⁴Farreras et al., 2003

¹⁰López y Teshigawara, 1997

²²GEER, 2010 (México)

θ_{aprox} = Ángulo de inclinación aproximado

Δ_V = Desplazamiento vertical

Δ_H = Desplazamiento horizontal

[&]Dato estimado a partir de la fotografía correspondiente

[#]Valor calculado usando el programa Auto Cad 2010



Capítulo 3

Propuesta de estados límite de daño para estructuras afectadas por licuación en base a criterios existentes

3.1 Criterios existentes para estimar estados límite de daño en edificios afectados por el fenómeno de licuación

En el presente capítulo se proponen estados límite de daño para estimar la pérdida de edificios afectados por el fenómeno de licuación, estos criterios se sustentan en las investigaciones hechas por Kishida (1966) después del sismo de Japón en 1964. Este investigador estudió principalmente edificios de concreto reforzado (en la ciudad de Niigata) dañados por la licuación en suelos, analizando en forma detallada el comportamiento de las cimentaciones de estos edificios.

Entre las diversas aportaciones que ofrece el Dr. Kishida, para el presente trabajo es de particular interés la clasificación que hace para cimentaciones dañadas por licuación, esta información se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de daños a cimentaciones (Kishida, 1966)

<i>Clasificación</i>	Δ_v (cm)	θ_{aprox} (°)	<i>Daño a la estructura de cimentación</i>
I	$0 \leq 20$	$0 \leq 20'$	Ninguno
II	$20 \leq 50$	$20' \leq 1.0^\circ$	Ligero
III	$50 \leq 100$	$1.0^\circ \leq 2.30^\circ$	Intermedio
IV	~100	~2.3°	Severo (se necesitan reparaciones)

Δ_v = Desplazamiento vertical y θ_{aprox} = Ángulo aproximando de inclinación

En la Tabla 3.1 se propone un criterio riguroso y conservador para la inclinación de los edificios, ya que un edificio que presente un $\theta_{aprox} > 2.3^\circ$ se considera que tiene un daño Severo. Por otra parte la clasificación hecha en base al desplazamiento vertical e inclinación es para estimar el daño a cimentaciones, sin embargo, para fines del presente trabajo se asume que la magnitud del daño que se presenta por efectos de licuación en la cimentación es el mismo o muy parecido al que se presenta en la superestructura. Bajo esta consideración se decidió usar los criterios propuestos por Kishida (1966) como sustento para proponer límites de daños en edificios dañados por licuación.



Por otra parte, en el presente trabajo también se consideran las aportaciones hechas por Bird *et al.* (2006). Este equipo de investigación propone una clasificación muy similar a la realizada por Kishida (1966), ya que el asentamiento o desplazamiento vertical y la rotación o ángulo de inclinación tienen rangos de magnitud similares en ambas investigaciones, tal como se muestra más adelante.

En las investigaciones hechas por Bird *et al.* (2006) se propone una clasificación para edificios con marcos de concreto reforzado dañados por licuación, a diferencia de Kishida (1966) quien hace su propuesta solo para cimentaciones. Sin embargo, se asume que los daños que sufren los marcos de concreto reforzado son los mismos que sufre el edificio en toda su estructura. Bajo esta consideración se decidió usar la información de Bird *et al.* (2006) expuesta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Estados límite de de daño sugeridos, considerando el asentamiento y rotación para cuerpos rígidos debidos a la deformación del suelo, inducido por sismo debajo de edificios con marcos de concreto reforzado (Bird *et al.*, 2006)

<i>Estado de daño</i>	<i>Daño estructural</i>	<i>Descripción adicional</i>	$\Delta_V (m)$	$\theta_{aprox} (^{\circ})$
Ligero	Solo fisuras	Las reparaciones podrían ser necesarios por cuestiones estéticas	$\Delta_V \leq 0.1 m$	$\theta \leq 0.6^{\circ}$ 1/100
Moderado	Algunas grietas en elementos de carga	Daños reparables, servicio y/o funcionalidad afectados	$0.1 m < \Delta_V \leq 0.3m$	$0.6^{\circ} < \theta \leq 2.3^{\circ}$ 1/100-1/25
Extenso	Grietas anchas y pandeo de los elementos de fuerza longitudinal	Inhabitable, pero reparable	$0.3m < \Delta_V \leq 1.0 m$	$2.3^{\circ} < \theta \leq 4.6^{\circ}$ 1/25-1/12.5
Completo	La reparación no es posible, fallas por cortante	La demolición es más barata que la reparación, la integridad estructural es afectada	$\geq 1.0 m$	$\theta \geq 4.6^{\circ} \geq$ 1/12.5

$\Delta_V =$ Desplazamiento vertical y $\theta_{aprox} =$ Ángulo aproximando de inclinación

Como ya se menciona anteriormente en la Tabla 3.2 se asignan rangos similares, para el asentamiento y la rotación, a los que se proponen en la Tabla 3.1 lo que sugiere que Bird *et al.* (2006) tomo como base el trabajo hecho por Kishida (1966) para elaborar sus propuestas de clasificación de marcos de concreto reforzado. Sin embargo en el presente trabajo se consideran las dos propuestas para elaborar criterios propios de clasificación de edificios dañados por licuación.



3.2 Propuesta de estados límite de daño para estructuras afectadas por el fenómeno de licuación

En base a la información recopilada de estructuras dañadas por licuación en los Capítulos 1 y 2 del presente trabajo, así como en los criterios de Kishida (1966) y Bird *et al.*, (2006). Se proponen criterios para establecer estados límite de daño, estos criterios se sustentan en los daños observados en los casos expuestos en los primeros capítulos del presente trabajo;

Por otra parte el estado de daño propuesto está directamente relacionado con el porcentaje de pérdida del edificio, este porcentaje expresa cuantitativamente la parte de la estructura que resulto afectada por el fenómeno de licuación y está en función de los desplazamientos horizontales y verticales máximos. Así mismo, en el estado de daño que se propone se considera si el edificio analizado, después del sismo está en condiciones de ser habitado o es recomendable demolerlo.

En la Tabla 3.3 se muestra el límite de daños propuesto para los edificios con cimentación flexible (zapatas aisladas y zapatas corridas) y rígida (losa de cimentación).

Tabla 3.3. Clasificación de daños en edificios con cimentación flexible y rígida por licuación (basado en Kishida, 1966 y Bird *et al.*, 2006)

ID	Estado de daño	Δ_V (cm)	θ_{aprox} (°)	Descripción del daño	Descripción adicional
I	Ninguno	$\Delta_V \leq 5$	$\leq 0.3^\circ$	Ningún daño en la cimentación	Edificio habitable
II	Ligero	$5 < \Delta_V \leq 10$	$0.3^\circ < \theta \leq 0.6^\circ$	Daño ligero en la cimentación. Pequeñas fisuras en muros. Daño de acabado aparente de muros	Reparación podría ser solamente por razones estéticas, edificio habitable
III	Moderado	$10 < \Delta_V \leq 30$	$0.6^\circ < \theta \leq 2.3^\circ$	Daño ligero en la cimentación. Algunas grietas en elementos estructurales con un espesor ≤ 1 mm en muros. Colapso de balcones	Servicio y funcionalidad afectado, pero daño reparable, edificio habitable
IV	Severo	$30 < \Delta_V \leq 100$	$2.3^\circ < \theta \leq 4.6^\circ$	Daño intermedio en la cimentación pero reparables. Posible colapso parcial de muros	Inhabitable, pero con daños reparables
V	Completo	$\Delta_V > 100$	$\theta > 4.6^\circ$	Daño severo en la cimentación (necesidad de reparación completa). Grietas severas en los muros de carga mayores de 2 cm de ancho	Demolición es más económica que la reparación. Integridad estructural es afectada y posiblemente inestable

Δ_V = Desplazamiento vertical y θ_{aprox} = Ángulo aproximado de inclinación



La Tabla 3.3 combina las propuestas de clasificación hechas por Kishida (1966) y Bird *et al.* (2006). Los criterios propuestos en esta tabla se usaron para clasificar a los edificios documentados en los Capítulos 1 y 2, dicha clasificación se analiza con mayor detenimiento en el Capítulo 4 de este trabajo.

Para ejemplificar los cuatro principales estados límite de daño que se proponen en la Tabla 3.3, se presenta la Figura 3.1 en la cual se representan estos estados límite en forma esquemática.

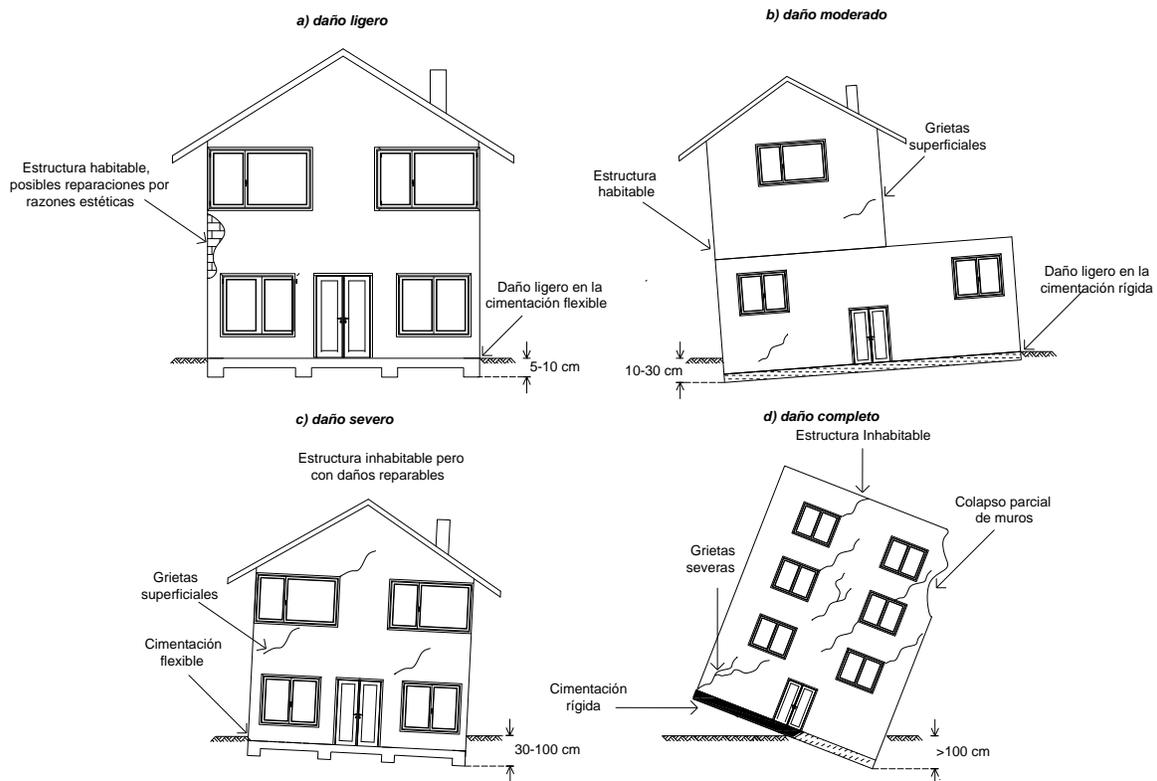


Figura 3.1. Representación esquemática de los estados límite de daño propuestos en la Tabla 3.3: a) ligero, b) moderado, c) severo y d) completo



Capítulo 4

Análisis de edificios dañados por licuación en México y el mundo acorde al tipo de cimentación

En este capítulo, se presentan funciones de fragilidad para estructuras dañadas por licuación, documentadas en el Capítulo 1 y 2 del presente trabajo. El análisis para generar estas funciones de fragilidad se basa en el tipo de cimentación: (1) cimentación flexible, (2) cimentación rígida y (3) cimentación a base de pilotes. Considerando los criterios propuestos por Kishida (1966) y Bird *et al.* (2006).

Las curvas de fragilidad, que se muestran en este capítulo, representan la probabilidad de que un edificio exceda un determinado estado límite daño: (1) ninguno, (2) ligero, (3) moderado, (4) severo y (5) completo, en función del desplazamiento vertical (Δ_V). Las curvas de fragilidad sirven para estimar el daño estructural de un grupo de edificios con características similares, en este caso el tipo de cimentación. Las estructuras dañadas por licuación se clasificaron en base a los criterios de la Tabla 3.3, después fueron sometidas a un análisis probabilístico usando el método de distribución lognormal.

4.1 Análisis de los edificios con cimentación flexible

4.1.1 Edificios clasificados con un estado de daño completo

En base a la Tabla 3.3 se asignó el nivel de daño completo para los edificios apoyados sobre cimentaciones flexibles, que presentaron desplazamientos verticales mayores o iguales a 100 cm ($\Delta_V \geq 100$ cm). Esta clasificación fue hecha sin considerar el daño provocado por la inclinación y desplazamiento horizontal, debido a que el desplazamiento vertical es la principal causa de daño en los edificios con cimentación flexible con cualquier número de pisos. Este nivel de daño representa la pérdida completa de las estructuras, tal como se puede observar en la Tabla 4.1 en donde se clasificaron edificios dañados por licuación tanto de México como del mundo.



Tabla 4.1. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño completo

Edificio	Δ_V(cm)
4	110
5	200
6	130
10	240
11	257
12	154
13	345
18	172
20	120
31	150
52	150

El mayor número de los edificios clasificados en la Tabla 4.1 son estructuras que tenían dos o tres niveles, dañadas durante el sismo de Niigata en 1964 (Yoshimi y Tokimatsu, 1977) estas estructuras estaban apoyadas sobre cimentaciones flexibles, por lo cual presentaron grandes desplazamientos verticales lo que ocasiono la pérdida total del inmueble.

Aplicando una distribución lognormal a la base de datos de la Tabla 4.1 se obtiene la curva de fragilidad para edificios con cimentación flexible que presentaron un nivel de daño o completo, la cual se muestra en la Figura 4.4.

4.1.2 Edificios clasificados con nivel de daño severo

En esta categoría se clasifican los edificios, tanto de México como del mundo, apoyados sobre cimentación flexible con un estado de daño considerado como severo. De acuerdo a la Tabla 3.3 estos edificios presentan un desplazamiento vertical entre 30 y 100 cm. Este nivel de daño es el que agrupa un mayor número de edificios, tal como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño severo

ID	Δ_V(cm)
7	100
8	50
19	97
22	100
24	80
32	66
42	100
43	100
45	40
46	40
53	50
55	55
57	100
58	70
59	50



Tabla 4.2. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño severo (continuación)

ID	Δ_V (cm)
60	80
61	70
65	33
67	60
68	39
73	100
75	40
79	40

Los edificios clasificados en la tabla 4.2 son estructuras de uno a cinco niveles, que presentaron colapso parcial de muros debidos al desplazamiento vertical, sin embargo hay otros edificios que también presentaron un desplazamiento horizontal, por ejemplo, el caso de la estructura número 45 se trata de un edificio afectado por licuación en el sismo de Filipinas en 1990, el cual presentó un $\Delta_V = 20$ cm pero los daños principales en la estructura se debieron a un $\Delta_H = 40$ cm (Orense, 2011). Aplicando el análisis probabilístico con una distribución lognormal se obtiene la curva de fragilidad que genera la gráfica de la Figura 4.1.

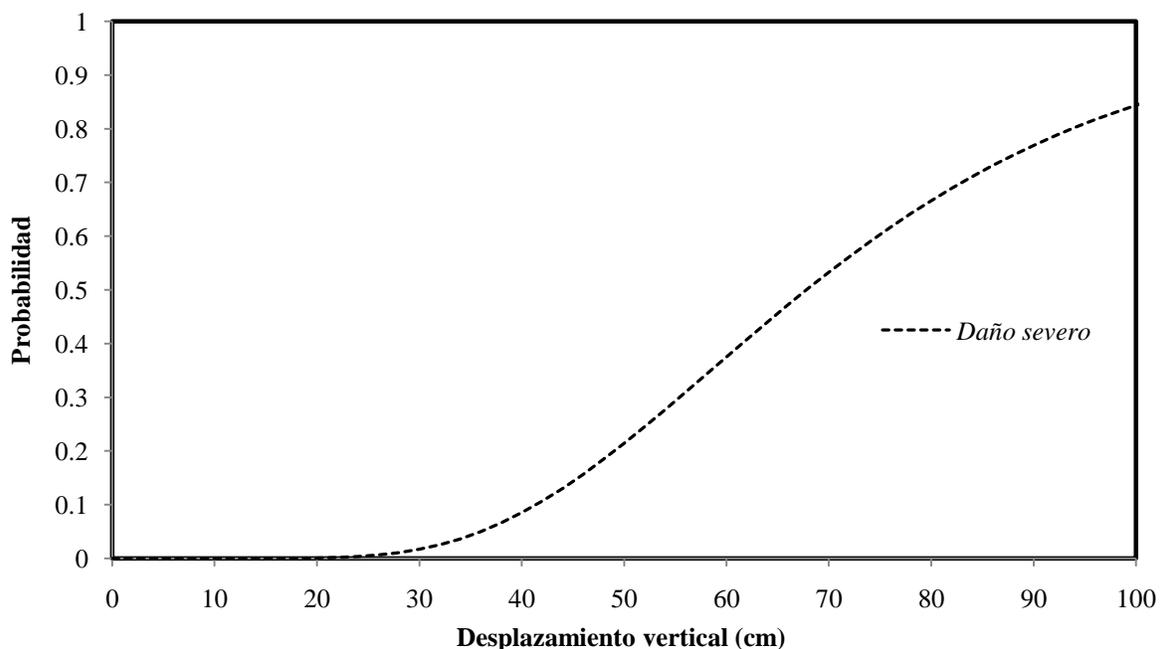


Figura 4.1. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño severo

De la Figura 4.1 se observa que la probabilidad de falla es de aproximadamente 0.8 para un edificio que presente un desplazamiento de 100 cm. Como es el caso del edificio número 7 dañado por el fenómeno de licuación en el sismo de Japón en 1964, o el caso de la estructura número 73 dañada en el sismo de Mexicali en 2010. Ambos casos afectados por



sismos de diferentes magnitudes pero con un desplazamiento vertical similar lo que causo la perdida completa de ambas estructuras.

4.1.3 Edificios clasificados con nivel de moderado

A continuación se presentan los edificios con cimentación flexible que de acuerdo a los criterios de la Tabla 3.3 fueron clasificados con un estado de daño moderado, con un rango de desplazamiento de 10 a 30 cm.

Tabla 4.3. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño moderado

ID	Δ_V (cm)
1	20
9	20
14	15
27	30
41	15
51	10
63	20
72	30

A partir de la base de datos de la Tabla 4.3, se genera la gráfica correspondiente aplicando el análisis probabilístico, tal como se muestra a continuación en la Figura 4.2.

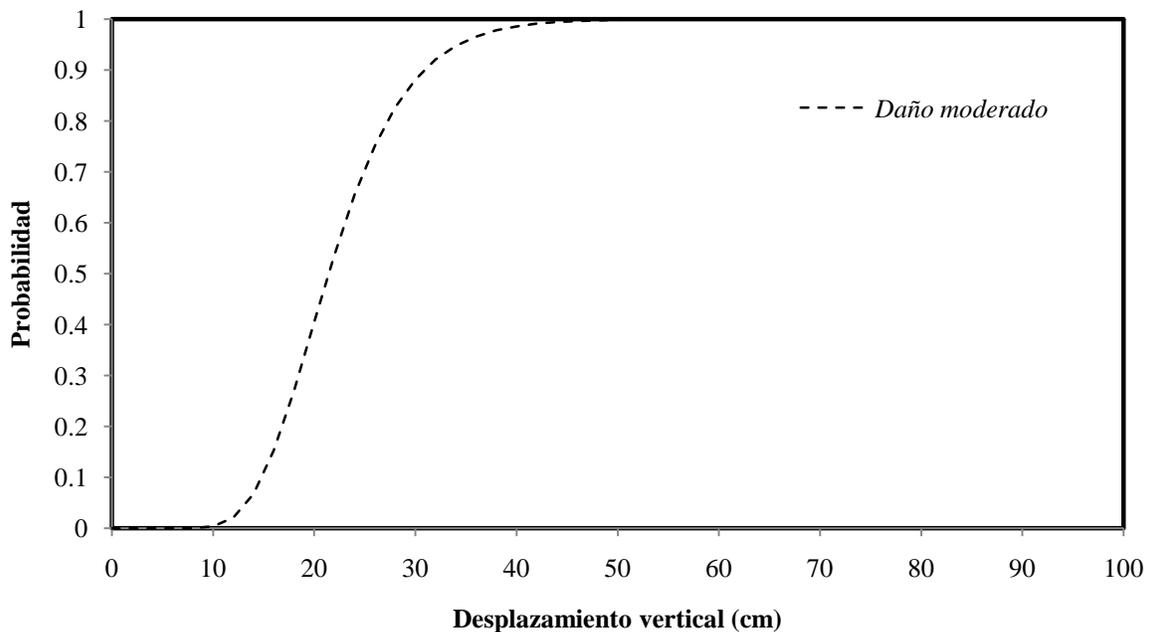


Figura 4. 2. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño



4.1.4 Edificios clasificados con nivel de daño ligero

Finalmente se presenta el grupo de edificios que de acuerdo a la Tabla 3.3 resultaron con un estado de daño ligero y por lo tanto son habitables y sus posibles reparaciones son por cuestiones estéticas.

Tabla 4.4. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño ligero

ID	Δ_V (cm)
3	10
28	10

Este par de edificios tiene un desplazamiento vertical igual, debido a esto no es posible calcular la desviación estándar, necesaria para aplicar el análisis probabilístico. Sin embargo se tomo el promedio de la desviación estándar de las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Bajo esta consideración se procedió con el análisis probabilístico, obteniéndose la gráfica de la Figura 4.3.

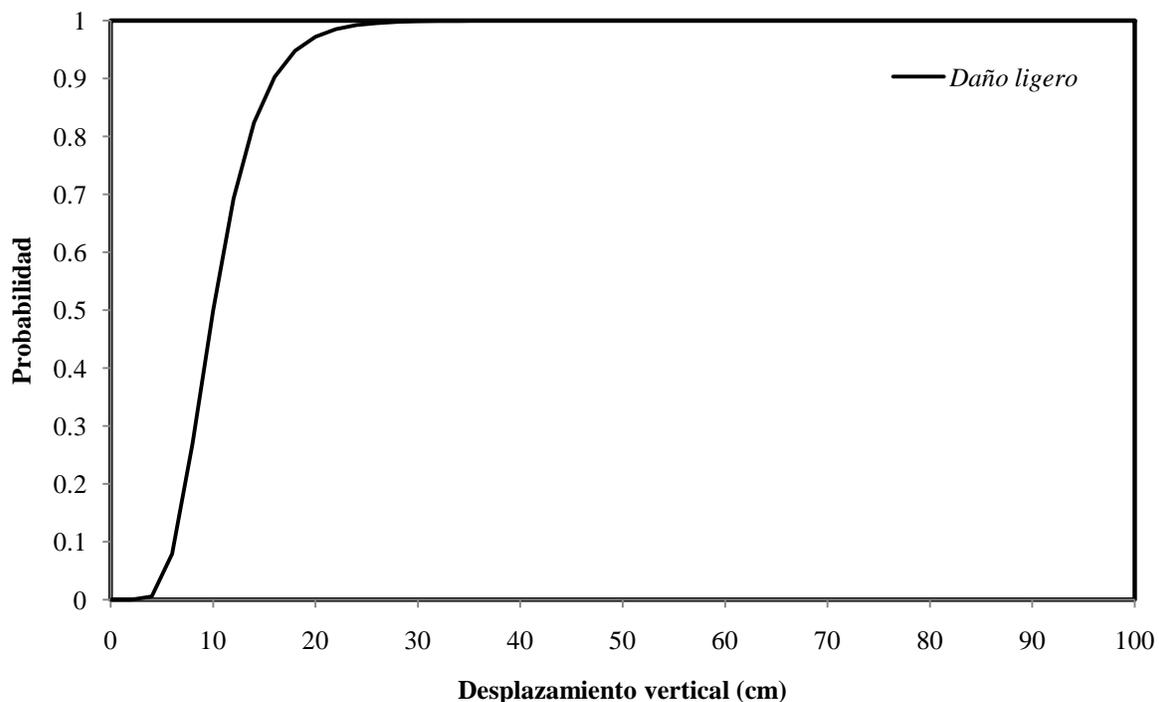


Figura 4. 3. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño ligero

A partir de los resultados del análisis probabilístico de diferentes edificios con distintos estados de daño, se obtuvieron funciones de fragilidad, la Figura 4.4 muestra las curvas de



fragilidad para los cuatro estados de daño de edificios con cimentaciones flexibles analizadas anteriormente.

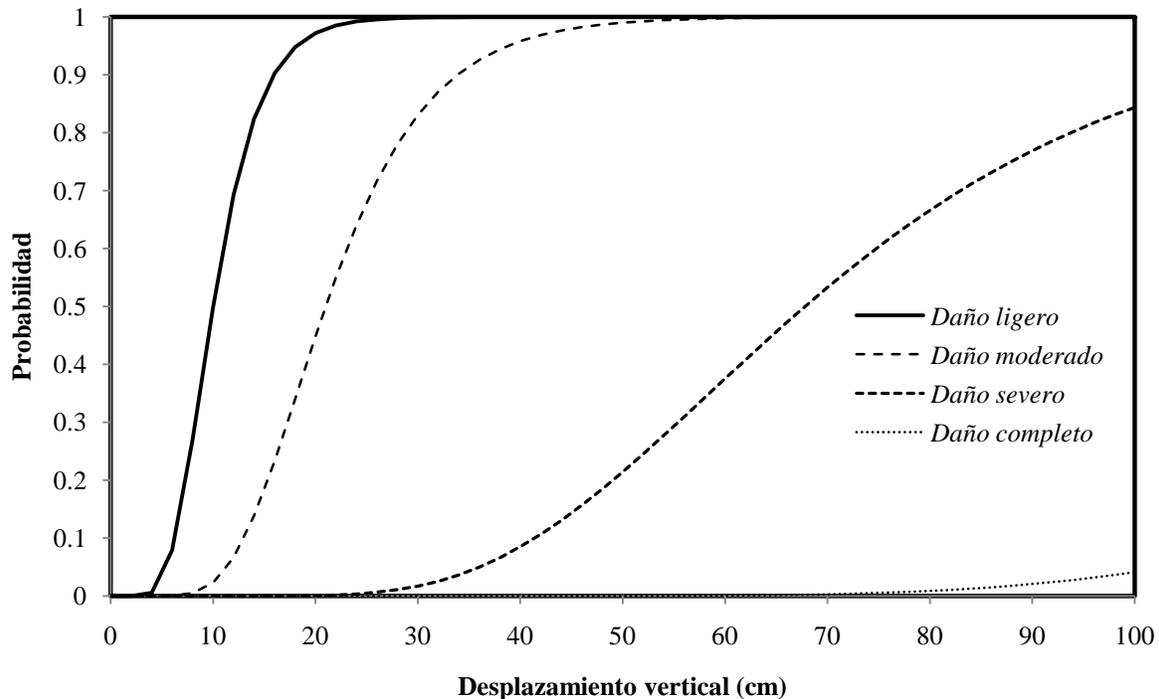


Figura 4. 4. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible

La fragilidad de un edificio con cimentación flexible, afectado por el desplazamiento vertical (Δ_V), está relacionada con su vulnerabilidad debida al fenómeno de licuación. Las curvas de fragilidad de la Figura 4.4 representan la probabilidad de alcanzar o exceder uno de los cuatro estados de daño propuestos, dado un desplazamiento vertical.

4.2 Análisis de los edificios con cimentación rígida

4.2.1 Edificios clasificados con nivel de daño completo

De la misma forma con la que se efectuó la clasificación y análisis para las cimentaciones flexibles, se presenta ahora la clasificación y análisis para las estructuras con cimentaciones rígidas. Se generan curvas de fragilidad para estimar la vulnerabilidad de estructuras con cimentación rígida, en términos probabilistas. Debido a que los desplazamientos verticales de las estructuras dañadas por licuación, tiene un comportamiento no lineal, se utiliza una distribución lognormal para hacer el ajuste de esta base de datos, de tal forma que es



posible determinar las probabilidades de exceder o igualar un estado de daño para un determinado desplazamiento vertical.

En la Tabla 4.5 se presenta el desplazamiento vertical debido al fenómeno de licuación en edificios con cimentación rígida, tanto de México como del mundo.

Tabla 4.5. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño completo

<i>ID</i>	Δ_V (cm)
16	157
17	150
21	380
23	340
34	116
35	150

De la tabla anterior se observa que el desplazamiento vertical máximo de este grupo de edificios es de 380 cm y el mínimo de 116 cm. Comparando este valor con el desplazamiento vertical máximo y mínimo, 345 cm y 110 cm respectivamente, en estructuras con cimentación flexible (ver Tabla 1.1) se observa que son magnitudes similares, lo que indica que el fenómeno de licuación afecta en igual proporción de magnitud a las cimentaciones flexibles y rígidas.

Por otra parte aplicando el análisis probabilístico de distribución lognormal a la base de datos de la Tabla 4.5 se obtiene la curva de fragilidad para edificios con cimentación rígidas que presentaron un estado de daño completo, la cual se presenta en la Figura 4.8.

4.2.2 Edificios clasificados con nivel de daño severo

A continuación se presentan los edificios con cimentación rígida clasificados con un nivel de daño severo.

Tabla 4.6. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño severo

<i>ID</i>	Δ_V (cm)
33	100
78	40

En esta clasificación de daño, solo se presentaron dos edificios, sin embargo es suficiente para aplicar el análisis de regresión no lineal y obtener la gráfica de la Figura 4.5.

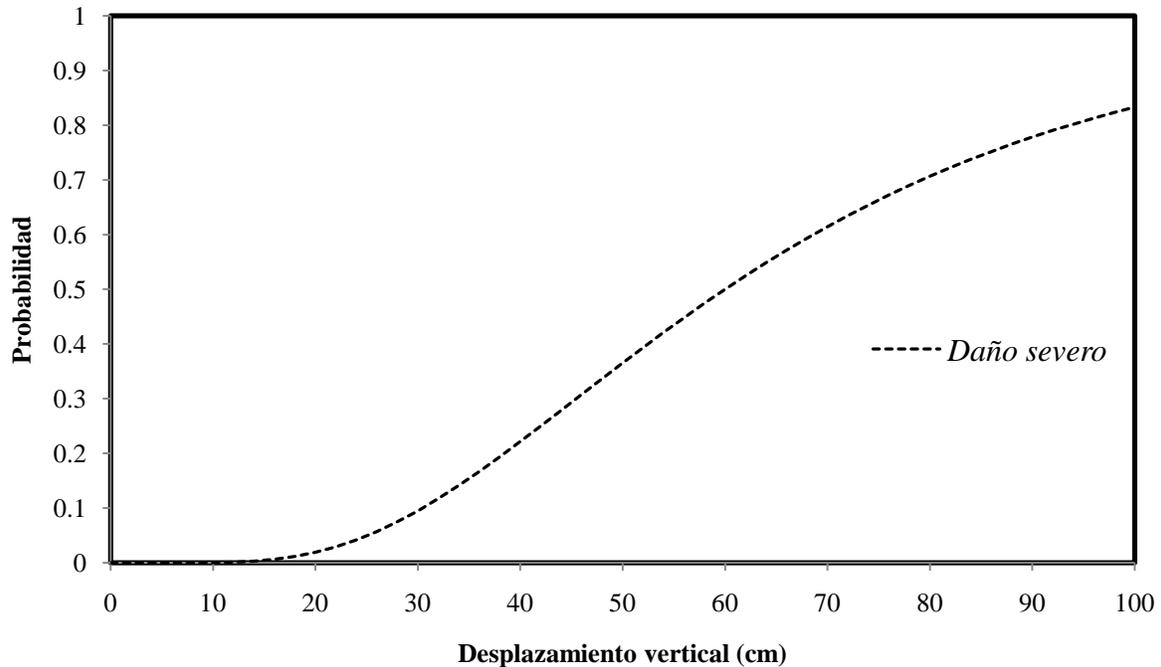


Figura 4. 5. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño severo

4.2.3 Edificios clasificados con nivel de daño moderado

Para este rango solo los casos número 15 y 54, se clasificaron bajo los criterios que se proponen en la Tabla 3.3. Debido a que la mayor parte de los edificios presentaron desplazamientos verticales superiores a 30 cm por lo que fueron clasificados en los estados de daños completo y severo.

Tabla 4.7. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño moderado

ID	Δ_V (cm)
15	16
54	30

Aplicando la distribución lognormal se obtiene la curva de fragilidad para edificios con cimentación rígida, tal como se muestra en la Figura 4.8.

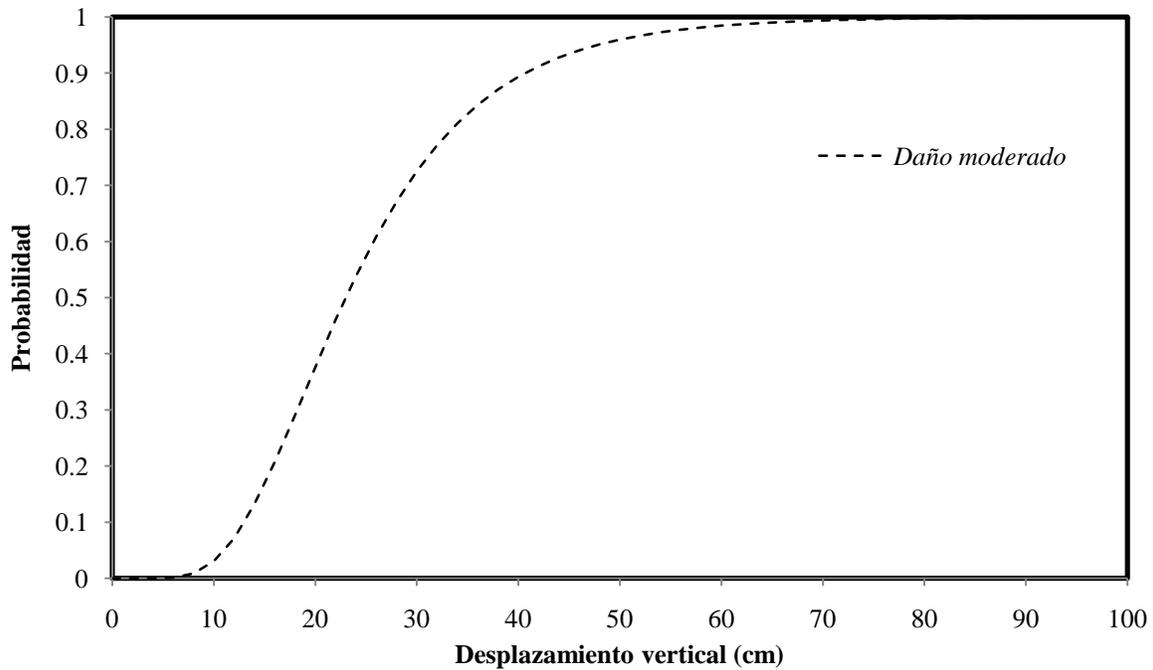


Figura 4. 6. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño moderado

4.2.4 Edificios clasificados con nivel de daño ligero

Al igual que la Tabla 4.7 fueron pocos los edificios clasificados con un estado de daño ligero.

Tabla 4.8. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño ligero

ID	Δ_V (cm)
2	10
51	10

Debido a que el desplazamiento vertical es de la misma magnitud no es posible calcular la desviación estándar, sin embargo para fines de cálculo se tomo el promedio de la desviación estándar del grupo de edificios clasificados con un daño completo, severo y moderado. Aplicando la distribución lognormal se obtiene la curva de fragilidad para edificios con cimentación rígida.

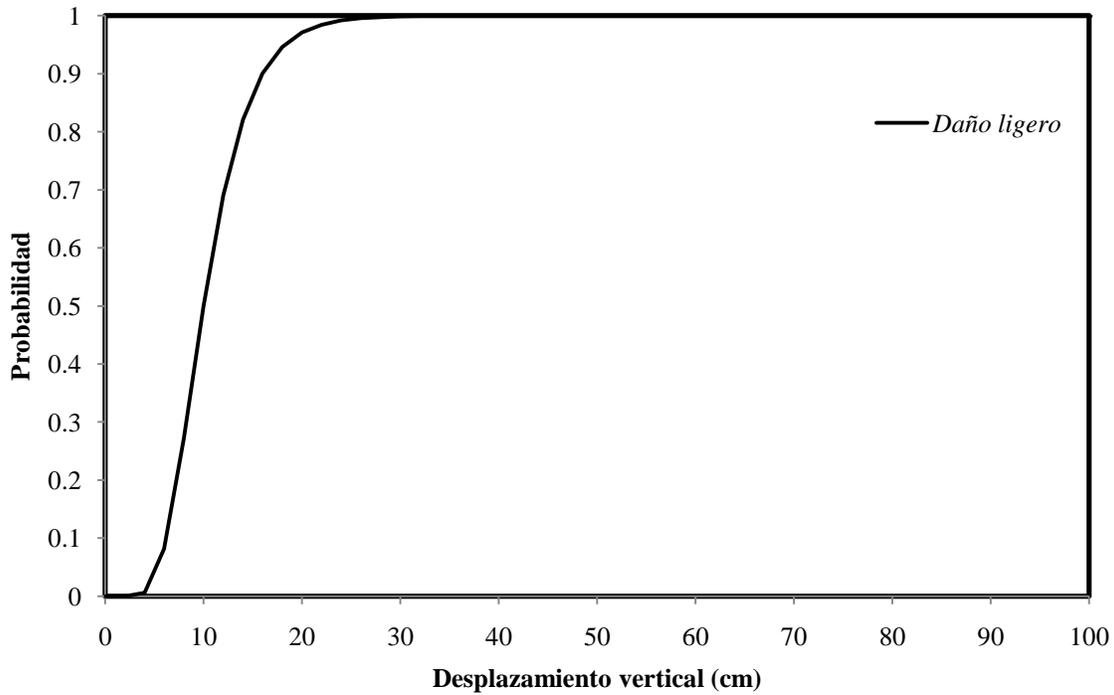


Figura 4. 7. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño ligero

Finalmente se presenta la Figura 4.10, en esta gráfica se agrupan las curvas de fragilidad de los cuatro estados de daño para estructuras con cimentación rígida,

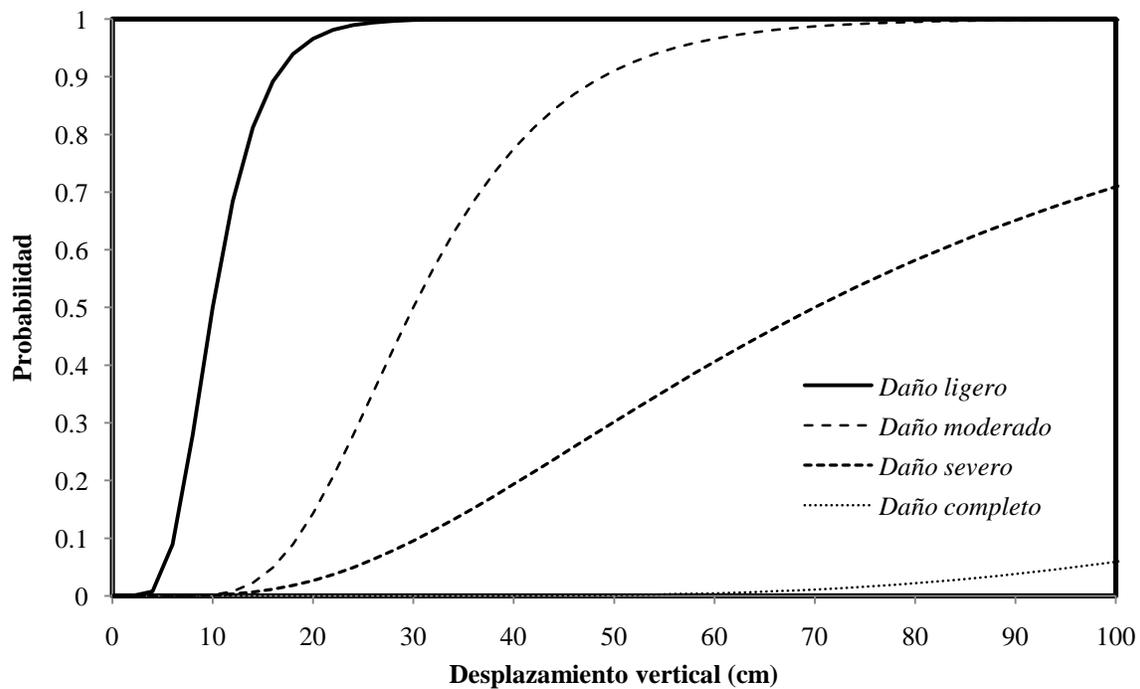


Figura 4. 8. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación rígida



4.3 Análisis de los edificios cimentados con pilotes

4.3.1 Edificios clasificados con nivel de daño severo

Como es de esperarse las estructuras cimentadas sobre pilotes tienen una óptima respuesta ante el fenómeno de licuación, sobre todo para los daños causados por el desplazamiento vertical. En los casos documentados durante el presente trabajo no se clasificaron edificios cimentados con pilotes con un estado de daño completo, y solo un edificio con un nivel de daño considerado como severo. Se trata del caso del edificio número 66, el edificio Riesco sufrió un desplazamiento vertical de aproximadamente 40 cm, inducido por el fenómeno de licuación (GEER, 2010). Para este caso los daños son reparables y el edificio fue habitado nuevamente.

Tabla 4.9. Edificios con cimentados con pilotes y nivel de daño severo

ID	Δ_V (cm)
66	40

4.3.2 Edificios clasificados con nivel de daño moderado

A continuación se presenta el grupo de edificios con un estado de daño moderado, este estado de acuerdo a la Tabla 3.3 es un estado con un rango de desplazamiento vertical entre 10 cm y 30 cm.

Tabla 4.10. Edificios cimentados con pilotes y nivel de daño moderado

ID	Δ_V (cm)
47	30
69	30
70	20
71	15
76	30
80	30

El número de estructuras de este grupo de edificios es reducido, como se mencionó anteriormente, los edificios cimentados sobre pilotes tuvieron una óptima respuesta ante el fenómeno de licuación. Debido a que solo se presentaron daños en acabados de los muros, grietas en elementos no estructurales y daño ligero en los pilotes (GEER, 2011). Aplicando la distribución lognormal se obtiene la gráfica de la Figura 4.12 en la cual se agrupan las dos curvas de fragilidad de los estados de daño para estructuras cimentadas sobre pilotes.

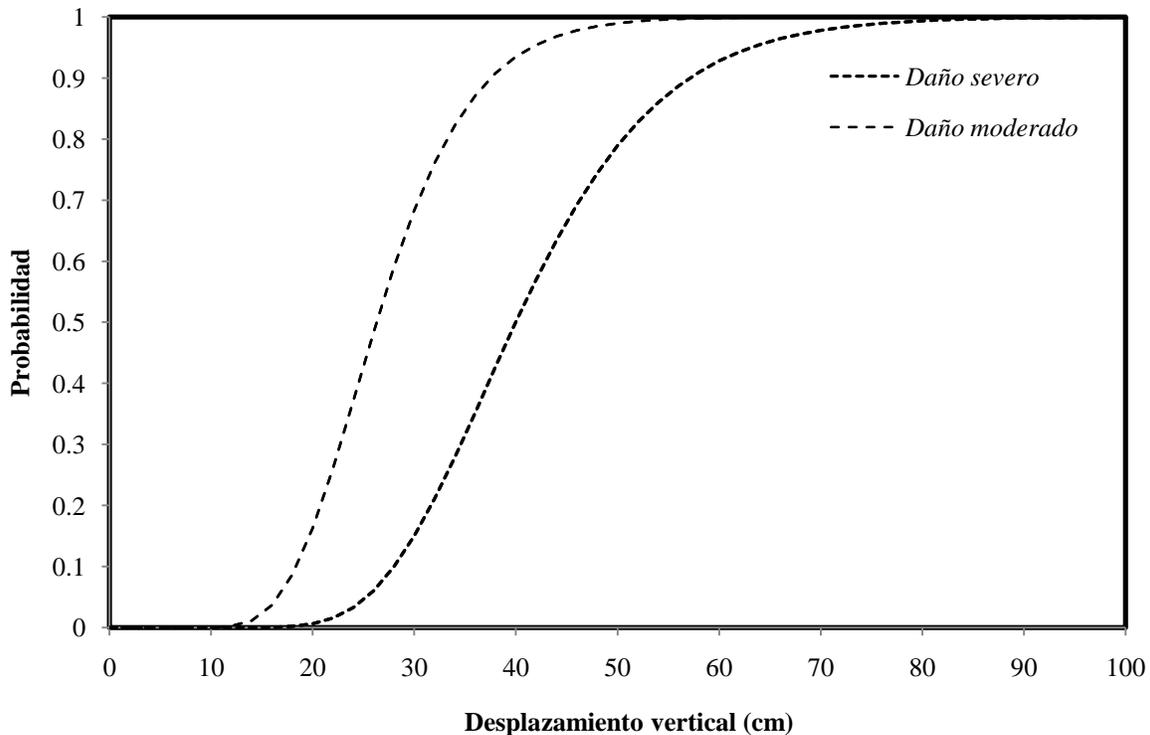


Figura 4. 9 Funciones de fragilidad para edificios cimentados sobre pilotes

Comparando los estados de daño propuestos para cada grupo de edificios, se observa que los edificios cimentados sobre pilotes (cimentaciones profundas) son los que poseen una mejor respuesta ante los desplazamientos verticales, debidos al fenómeno de licuación. Por el contrario las cimentaciones flexibles y rígidas (cimentaciones superficiales) son propensas a fallar ante estos desplazamientos. De los casos documentados un gran número de estructuras con cimentación flexible colapsaron totalmente y otras más resultaron con un estado de daño se considerado como severo y por lo tanto con altos costos de reparación.

4.4 Análisis de los edificios que presentaron inclinación acorde al tipo de cimentación

En esta parte se clasifican y analizan los edificios, tanto de México como del mundo, que presentaron una inclinación debida al fenómeno de licuación. Las clasificaciones de estos edificios se basan en los criterios propuestos en la Tabla 3.3. Clasificación de daños en edificios con cimentación flexible y rígida por licuación (basado en Kishida, 1966 y Bird *et al.*, 2006), tomando en cuenta el tipo de cimentación y ángulo de inclinación que sufrió cada uno de los edificios documentados



El análisis de los edificios clasificados por el ángulo de inclinación y tipo de cimentación, es el mismo método que se usó para el análisis de los edificios clasificados por el desplazamiento vertical y tipo de cimentación, es decir se realizó un análisis probabilístico de distribución lognormal, para generar las respectivas curvas de fragilidad. A continuación se muestran los resultados de estas clasificaciones.

4.4.1 Edificios con cimentación flexible

Como ya se mencionó anteriormente se utilizó una distribución lognormal para generar las gráficas que resultan del análisis de las bases de datos que surgen a partir de la clasificación de los edificios dañados por licuación.

A continuación se presenta la Tabla 4.11, en la cual aparecen los edificios con cimentación flexible que debido al ángulo de inclinación presentaron un nivel de daño completo.

Tabla 4.11. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño completo

<i>ID</i>	<i>θ_{aprox} (°)</i>
42	5
43	5
44	12
53	50
68	5
72	15

Para el caso del nivel denominando como severo en la Tabla 3.3, se registraron dos edificios en esta clasificación, debido a que no es posible determinar una desviación estándar ya que los el ángulo de inclinación es de la misma magnitud para ambos casos. Con el fin de aplicar una distribución lognormal se consideró que el valor de la desviación estándar para el nivel de daño severo es el mismo que el valor de la desviación estándar del nivel completo.

Tabla 4.12. Edificios con cimentación flexible y nivel de daño severo

<i>ID</i>	<i>θ_{aprox} (°)</i>
81	3
82	3



Aplicando el análisis probabilístico de la distribución lognormal se obtiene las curvas de fragilidad para los estados de daño completo y severo de edificios con cimentación flexible, que presentaron inclinación, tal como se muestra en la Figura 4.10.

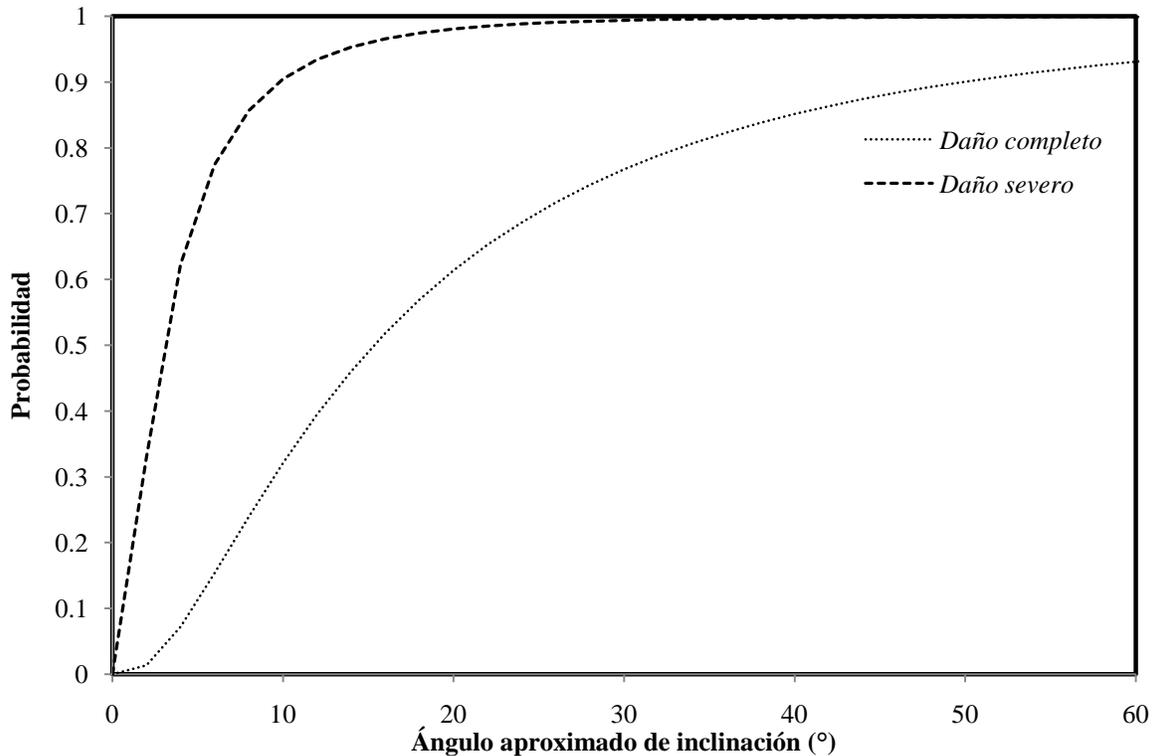


Figura 4. 10. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible

4.4.2 Edificios con cimentación rígida

A continuación se clasifican y analizan edificios, los cuales en su mayoría son casos de estructuras ubicadas en diferentes partes del mundo, dañadas por distintos eventos sísmicos. Estos edificios estaban apoyados sobre una cimentación rígida al momento de ser dañados por el fenómeno de licuación y debido a esto presentaron una inclinación. De igual forma en que se analizaron los edificios con cimentación flexible, para los casos de edificios con cimentación rígida, se utilizó una distribución lognormal para generar las funciones de fragilidad que resultan de analizar las bases de datos que surgen a partir de los criterios de de clasificación de daños propuestos en la Tabla 3.3.

A continuación se presenta la Tabla 4.13, en la cual aparecen los edificios con cimentación flexible, que debido al ángulo de inclinación presentaron un nivel de daño completo.



Tabla 4. 13. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño completo

<i>ID</i>	θ_{aprox} (°)
36	63
39	15
39	8
40	5
49	12
50	5

Por otra parte, para los casos de edificios con cimentación rígida, solo se presentaron dos estados de daño, el nivel de daño completo expuesto anteriormente y el nivel de daño moderado. Sin embargo en este último nivel solo clasifiqué un edificio el cual resultó con daño severo pero reparable, se trata de un edificio de tres niveles el cual presentó un desplazamiento diferencial vertical de ~40 cm, lo que provocó que sufriera una inclinación de 1.8° (GEER, 2011).

Debido a que no existe suficiente información para realizar una distribución lognormal y generar la curva de fragilidad del estado de daño moderado. Solo se dejó indicado el número de edificio y su respectivo ángulo de inclinación.

Tabla 4. 14. Edificios con cimentación rígida y nivel de daño moderado

<i>ID</i>	θ_{aprox} (°)
78	1.8

Finalmente se presenta la gráfica de la Figura 4.11 la cual es representada la curva de fragilidad para el estado de daño completo.

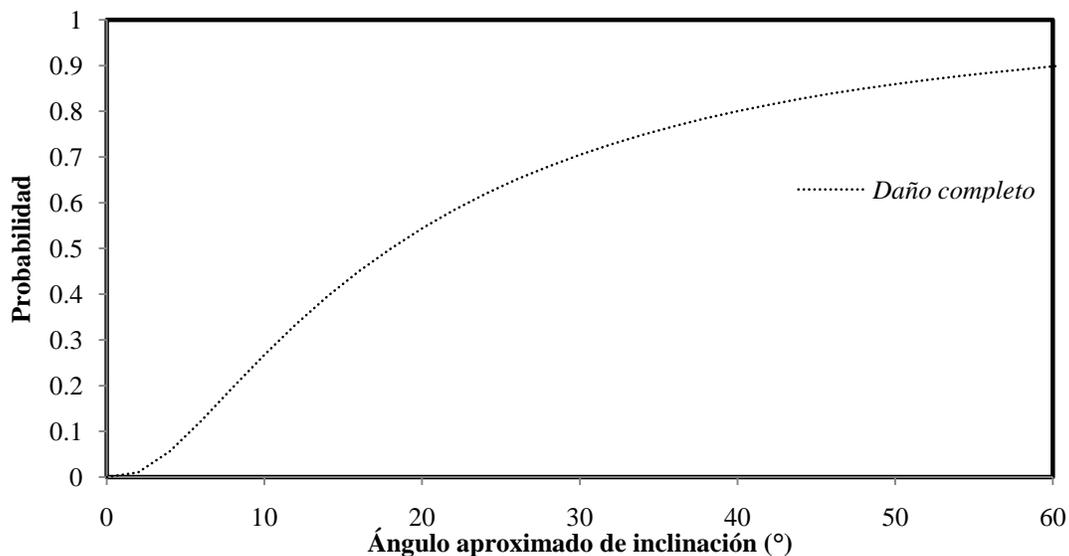


Figura 4. 11. Edificios con cimentación rígida que presentaron rotación y un estado de daño completo



Las funciones de fragilidad generadas a partir del análisis de edificios con cimentación flexible y rígida considerando el desplazamiento vertical, implican un mayor grado de confiabilidad para la estimación del daño estructural. Debido a que están sustentadas en un mayor número de casos documentados tanto en México como en otras partes del mundo. A diferencia de las funciones de fragilidad generadas a partir del análisis de edificios con cimentación a base de pilotes, considerando el desplazamiento vertical o ángulo de inclinación, las cuales se originaron con un menor número de información.

4.4.2 Edificios cimentados con pilotes

Para este caso no es posible hacer el análisis probabilístico usando una distribución lognormal ya que no existe suficiente información. Debido a que los edificios cimentados sobre pilotes por lo general presentaron una adecuada respuesta ante el fenómeno de licuación, principalmente ante el desplazamiento vertical. Los edificios que presentaron una inclinación se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4. 15. Edificios con cimentación a base de pilotes que presentaron inclinación

ID	θ_{aprox} (°)
37	0.5
64	5
66	1
76	5

4.5 Comparación entre las funciones de fragilidad propuestas para edificios con desplazamiento vertical y funciones de fragilidad existentes

En esta sección, se presentan las funciones de fragilidad generadas a partir de la base de datos de edificios con cimentación flexible, tanto de México como del mundo que sufrieron desplazamientos verticales, presentadas en la sección 4.4 de este trabajo. Estas funciones de se compararan con las funciones de fragilidad propuestas por Bird *et al.* (2006), en las cuales se estima la probabilidad de falla para edificios que han sido dañados por desplazamientos verticales, debidos al fenómeno de licuación. Los limites propuestos por Bird *et al.* (2006), se sustentan en reportes de sismos elaborados para el estudio de los niveles de daño de las cimentaciones afectadas por la licuación del suelo, los estados limite de daño, están basados en los rangos definidos en la Tabla 3.2.



En las curvas de fragilidad mostradas en la gráfica de la Figura 4.12 se proponen tres estados límite de daño:

1. Límite entre un daño ligero y moderado
2. Límite entre un daño moderado y extenso, y
3. Límite entre un daño entre extenso y completo

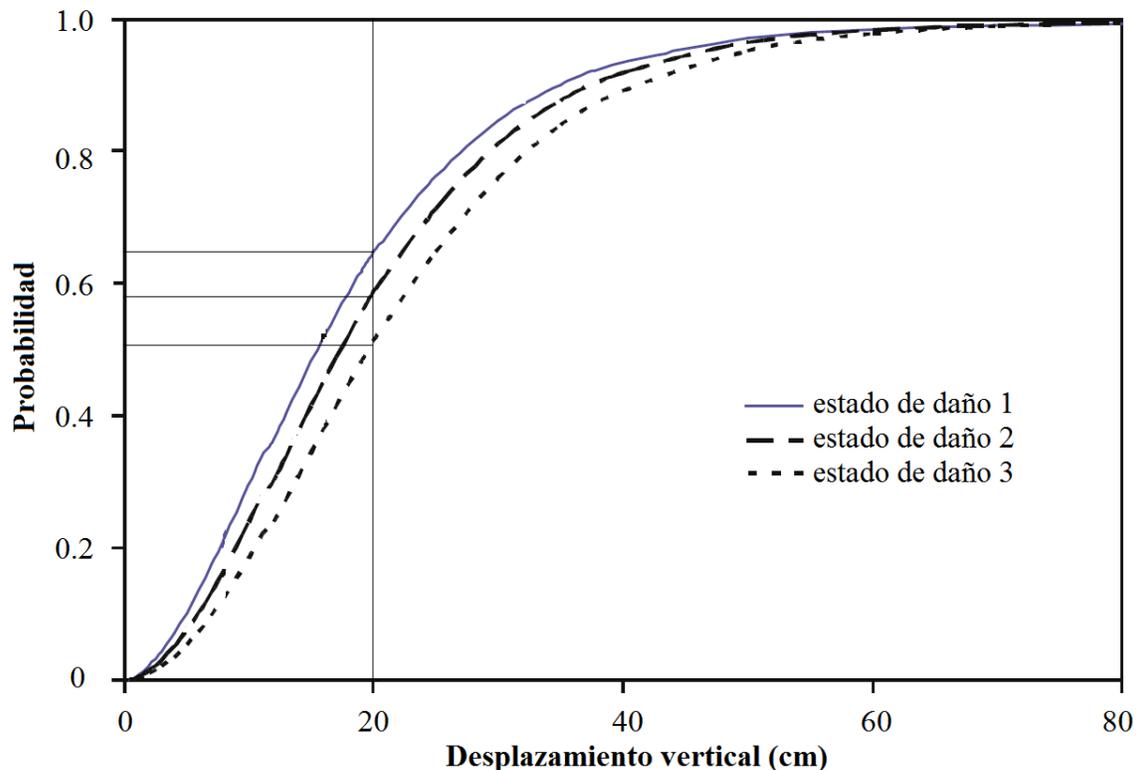


Figura 4. 12. Curvas de fragilidad para edificios con cimentación flexible afectados por desplazamientos verticales (Bird et al., 2006)

La línea vertical que se muestra sobre la Figura 4.12 la cual que intercepta a las funciones de fragilidad. Indica que un edificio sometido a un $\Delta_V= 20$ cm tendrá 35 % de probabilidad de sufrir un daño ligero, un 6% de probabilidad de sufrir un daño moderado, un 8% de probabilidad de sufrir un daño extenso y un 51% de probabilidad de sufrir un daño completo. Las curvas de fragilidad para los tres estados límite son muy cerradas, debido a que indican que la falla de un edificio que ha alcanzado un estado límite, por ejemplo el estado 1, alcanzara muy rápidamente el segundo y tercer estado de daño. A diferencia de las curvas de fragilidad desarrolladas en el presente trabajo tal como se muestra en la Figura 4.13.

A continuación se muestran las funciones de fragilidad para cimentaciones flexibles que presentaron un desplazamiento vertical.

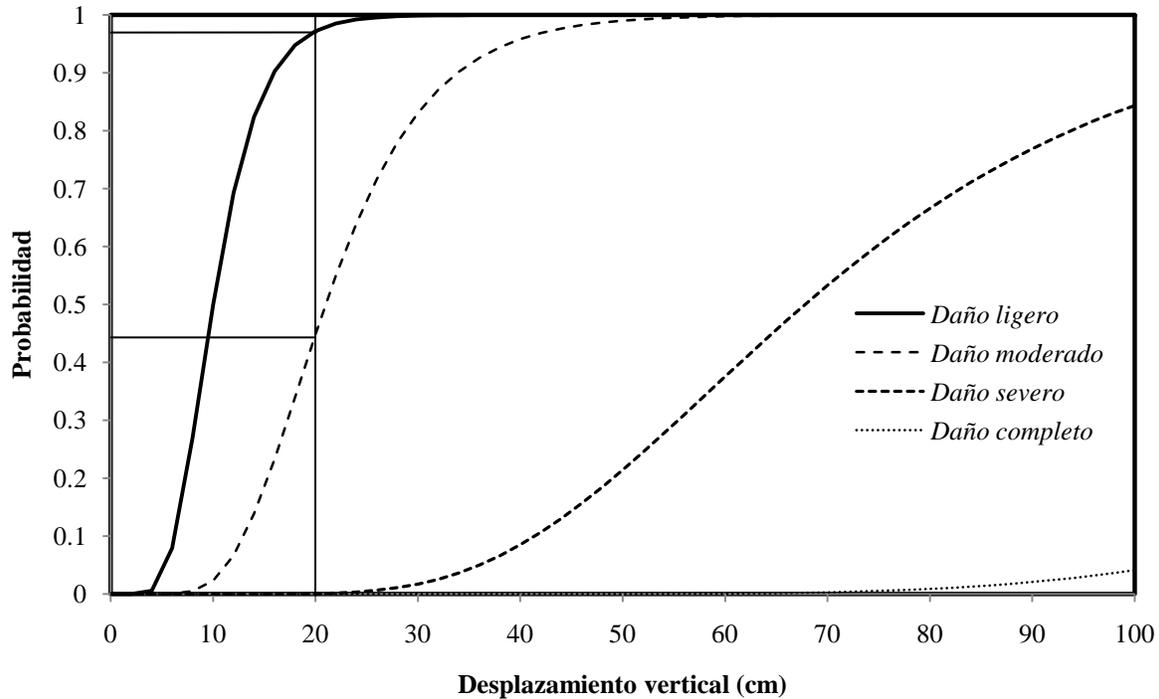


Figura 4. 13. Funciones de fragilidad para edificios con cimentación flexible

De la misma forma en que se trazo una línea vertical sobre las funciones de fragilidad de la Figura 4.12 para estimar la probabilidad de daño de un edificio con cimentación flexible que presento un $\Delta_V= 20$ cm. En las curvas de fragilidad de la Figura 4.13 se estima la probabilidad de daño para un edificio que alcance un $\Delta_V= 20$ cm, de tal forma que presentaría un 3% de daño ligero, un 53% de daño moderado, un 44% de daño severo y 0% de daño completo.

Las funciones de fragilidad de la Figura 4.12, generadas por Bird *et al.* (2006) son más conservadoras, debido a que para un $\Delta_V= 20$ cm, se espera que el máximo daño sea completo con un 51% de probabilidad de que esto ocurra. Mientras que para la misma magnitud de desplazamiento vertical, con las funciones de fragilidad de la Figura 4.12 generadas en el presente trabajo se espera que el máximo daño sea moderado con un 53% de probabilidad de que esto ocurra.



Conclusiones

En base a los casos de edificios dañados por licuación, documentados durante los Capítulos 1 y 2, se observó que las cimentaciones superficiales, tanto flexibles como rígidas, poseen una deficiente respuesta ante los desplazamientos verticales y horizontales debidos al fenómeno de licuación, lo que provoca en muchos casos daños severos o completos de las superestructuras que soportan.

Por otra parte, las estructuras apoyadas sobre cimentaciones profundas, tienen un eficiente comportamiento ante los desplazamientos horizontales, sin embargo ante desplazamientos horizontales su eficiencia disminuye debido a los esfuerzos cortantes, como en los casos de edificios dañados durante el sismo de Kobe, Japón en 1995 (Akai *et al.*, 1995).

En casos expuestos durante los dos primeros capítulos, se observó que los edificios que presentaron daños, debidos al desplazamiento vertical, horizontal o rotación, la superestructura no presento daños considerables. Por lo cual se llega a la conclusión de que el daño estructural, no basta para estimar la pérdida de un edificio dañado por licuación, se debe considerar si el edificio, después del sismo es habitable o no. Por otra parte, también se debe de considerar el costo de recuperación que implica regresar un edificio dañado por licuación a las condiciones estructurales previas al evento sísmico.

Una conclusión más a la que se llega, al final del presente trabajo, es que a la falta de tiempo y recursos económicos para realizar investigación directa después de un evento sísmico o un laboratorio en donde se puedan someter modelos de edificios a efectos de licuación en una mesa vibradora, la recopilación de información en reportes técnicos es confiable para proponer límites de daño y clasificar edificios dañados por licuación.

Por último, en mi opinión, me parece que es de vital importancia, que los ingenieros a cargo de la supervisión en las construcciones, sean rigurosos en cuanto al cumplimiento del reglamento de construcciones para cada ciudad, ya que estos factores son de gran importancia para disminuir los efectos por licuación, así mismo también es recomendable evitar, en la medida que sea posible, asentamientos humanos en zonas altamente propensas a licuación, como es el caso de la colonia Libertad ubicada en Manzanillo, Colima.



Referencias

- Akai, K., Bray, J.D., Boulanger, R.W., Christian, J.T., Liam Finn, W.D., Harder, L.F., Idriss, I.M., Ishihara, K., Iwasaki, Y.T., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Nakagawa, K., O'Rourke, T.D., Seed, R.B., Sitar, N., Soga, K., Somerville, P., Towhata, I. y Youd, T.L. (1995), "**Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan**", *Liquefaction and Related Effects*, College of Engineering University of California at Berkeley, Cap. 3(8), pp. 27-69.
- Ashford, S.A., Boulanger, W., Donahue J.L., y Stewart J.P. (2011), "**Geotechnical Quick Report on the Kanto Plain Region during the March 11, 2011, Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan**", *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)*, pp. 1-20.
- Bird, J.F., Bommer, J.J., Crowley, H. y Pinho, R. (2006), "**Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation**", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 26, pp. 15-30.
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, H.T., Onalp, A., Seed, R.B., Stewart, J.P., Youd., T.L., Baturay, M.B., Cetin, K.O., Christensen, C., Karadayilar, T. y Emrem, C. (2000), "**Ground Failure in Adapazari, Turkey**", *University of California, Berkeley*, pp. 1-10.
- Camacho, E. y Viquez, V. (1994), "**Licuefacción y hundimientos costeros en el noroeste de Panamá durante el terremoto de Limón**", *Terremoto de Limón*, Revista Geológica de América. Central, Vol. especial, pp. 133-138.
- EEFIT. (2007), "**The Ji-Ji, Taiwan Earthquake of 21 September 1999**", *Short Report*, pp. 1-19.
- EERI. (1990), "**The Luzon, Philippines earthquake of July, 1990**", *Newsletter*, pp. 1-12.
- EERI. (2007), "**Preliminary observations on the Niigata-Chuetsu Oki, Japan, Earthquake of July 16, 2007**", *Learning From Earthquake*, pp. 1-12.
- EERI. (2011), "**Geotechnical Effects of the Mw 9.0 Tohoku, Japan, Earthquake of March 11, 2011**", *EERI Special Earthquake Report*, pp. 1-12.
- Elnashai, A.S., Alva, J., Pineda, O., Kwon, O.S., Moran, L., Huaco, G. y Pluta, G. (2008), "**The Pisco-Chincha Earthquake of August 15, 2007**", *Seismological, Geotechnical and Structural Assessments*, *Geotechnical Aspects*, Cap. 5(10), pp. 56-64.
- Farreras, S., Ortiz, M. y Alcalá, G. (2003), "**Riesgo de maremotos en ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán, medidas de prevención**", *Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada*, pp. 17-44.
- García, J.L. (2008), "**Manual técnico de construcción**", *Grupo Holcim Apasco*, Cimentaciones, Cap. 9(11), pp. 165-180.
- GEER, (2003) "**Preliminary Reconnaissance Report on the Geotechnical Engineering Aspects of the January 21, 2003 Tecoman (Colima), Mexico Earthquake**", *Soil Liquefaction*, Cap. 4, web report.
- GEER. (2007), "**Preliminary Reconnaissance Report on the Geotechnical Engineering Aspects of the August 15, 2007 Pisco, Peru Earthquake**", *Soil Liquefaction*, Cap. 3(4), web report.
- GEER. (2010), "**Geo-Engineering Reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake**", *Liquefaction and Lateral Spreading*, Cap 6(7), web report.
- GEER. (2010), "**Preliminary report on seismological and geotechnical engineering aspects of the April 4 2010 Mw 7.2 el Mayor-Cucapah (Mexico) Earthquake**", *Liquefaction and ground failure*, Cap. 5, web report.
- GEER. (2011), "Geotechnical Reconnaissance of the 2011 Christchurch, New Zealand Earthquake", *Liquefaction and Lateral Spreading*, Cap. 4(9), web report.
- Global Risk Miyamoto. (2007), "**2007 Niigata Chuetsu-Oki Japan Earthquake**", *Reconnaissance Report*, pp. 1-14.
- Green, A. y Cubrinovski, M. (2010), "**Geotechnical Reconnaissance of the 2010 Darfield (New Zealand) Earthquake Version 1: November 14, 2010**" Liquefaction and lateral spreading, *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance*, Cap. 4(7), 1-42.
- Ishihara, K., Acacio, A. y Towhata, I. (1993), "**Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon earthquake**", *Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. XXXIII, No. 1, pp. 133-154.
- Juárez, H., Guerrero, J.J, Gama, A., Whitney, R.A, Vera, R. y Hurtado, F. (1997), "**El sismo del 9 de Octubre de 1995 en Manzanillo, Colima**", *Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco*, pp. 316-326.



- Kishida, H. (1966), "**Damage to reinforced concrete buildings in Niigata city with special reference to foundation engineering**", *The Japanese Geotechnical Society*, pp. 1-18.
- Lomnitz, C. y Castaños, H. (1985), "**A same-day overflight in the epicentral area of the great Mexico earthquake of 19 September 1985**", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 6, pp. 1837-1841.
- López, O. y Teshigawara, M. (1997), "**Informe de daños en edificaciones durante el sismo del 9 de Octubre de 1995 en la zona epicentral, Informe sobre las ciudades de Manzanillo, Cihuatlán, Barra de Navidad, Melaque y Jaluco**", *Sistema nacional de protección civil*, Centro nacional de prevención de desastres, pp. 1-79.
- Martínez, J.V. (1998), "**Construcción de una cimentación de arriba hacia abajo en edificios de más de dos sótanos, niveles gemelos**" Facultad de ingeniería, UNAM. Tipos de cimentaciones, Cap. 3(6), pp. 38-51.
- Mendoza, M.J., Ovando, E., Villalobos, F.A., Rodríguez, M. y Oróstegui, P. (2011), "**Geotechnical aspects of damages in Concepción, due to the Mw 8.8 Chile earthquake on February 27, 2010**", *Geotechnical Conference 2011, Pan-Am CGS*, pp. 1-10.
- Moh, Z.C., Hwang, R.N., Ueng, T.S. y Lin, M.L. (2001), "**1999 Chi Chi Earthquake of Taiwan**", *Civil Engineering Department, National Taiwan University, Taipei, Taiwan*, pp. 1-8.
- Mohammed, M.Y. y Maekawa, K. (2010), "**Efficiency Investigation of steel sheet pile wall permanent use for improving the stability of multi-story buildings supported on liquefiable soil foundation**", 4ta Conferencia Internacional ACF, Taiwan.
- Muzás, F. (2002), "**La rigidez de las cimentaciones superficiales**", *Ciencia y técnica de la ingeniería civil, Rev. de Obras públicas*, No. 3.419, pp. 27-33.
- Ohsaki, Y. (1966), "**Niigata earthquakes, 1964 Buildings damage and soil condition**", *The Japanese Geotechnical Society*, Vol. VI, No. 2, pp. 14-37.
- Orense, R.P. (2011) "**Soil liquefaction during the 2010 Darfield and 1990 Luzon Earthquakes: A comparative study**", *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-8.
- Ovando, E. y Romo, M. (2000), "**Behavior of the main wharf in san Pedrito port in Manzanillo, Mexico**", *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*, pp. 1-8.
- Paniagua, W.I., Rangel, J.L., Ibarra, E. (2006) "**Perspectiva actual de las cimentaciones profundas**", *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta Jalisco, pp. 2-17.
- Sancio, R.B., Bray, J.D., Durgunoglu, T. y Onalp, A. (2004), "**Performance of Buildings Over Liquefiable Ground In Adapazari, Turkey**", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, No. 935, pp. 1-14.
- Sauter, F. (1994), "**Evaluación de daños en puentes y otras estructuras civiles causados por el terremoto de Limón**", *Terremoto de Limón*, Revista Geológica de América. Central, Vol. especial, pp. 171-186.
- Unutmaz, B. (2008), "**Assessment of soil – structure – earthquake interaction induced soil liquefaction triggering**", *A Thesis Submitted To The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University For The Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering*, pp. 1-252
- USGS. (2000), "**Implications for Earthquake Risk Reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999**", *Liquefaction*, Cap. 9(15) pp. 37-40.
- Yoshimi, Y. y Tokimatsu, K. (1977), "**Settlement of buildings on saturated sand during earthquake**", *Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-16.



Anexo 1. *Explicación del método usado para estimar el θ_{aprox} , Δ_V y Daños observados en las estructuras donde no se especificaba este valor en las referencias*

En algunos casos, del presente trabajo no fue posible conocer el ángulo de inclinación aproximado (θ_{aprox}) de cada edificio, debido a que en las referencias consultadas no se especificaba esta información. Por lo cual se decidió estimar este ángulo mediante el uso del programa Auto Cad 2010, de la siguiente forma:

- 1) La fotografía del edificio en estudio se colocó en el ambiente gráfico del programa, después se trazó una recta paralela al eje Y de la estructura analizada
- 2) Se trazó una recta vertical sobre la estructura inclinada
- 3) Se midió el ángulo que forman estas dos rectas

Para ejemplificar de forma sencilla el método propuesto para estimar el ángulo aproximado de inclinación (θ_{aprox}) se representan en la Figura A.1 los pasos anteriormente descritos. Se toma como ejemplo el caso número 49 de la Tabla 1.1. Se trata de un edificio con cimentación rígida, dañado por el fenómeno de licuación en el sismo de Taiwán de 1999. En la referencia correspondiente para este caso, no se especifica el ángulo de inclinación, sin embargo, por lo posición en la que fue tomada la fotografía, es posible aplicar los pasos anteriormente mencionados.

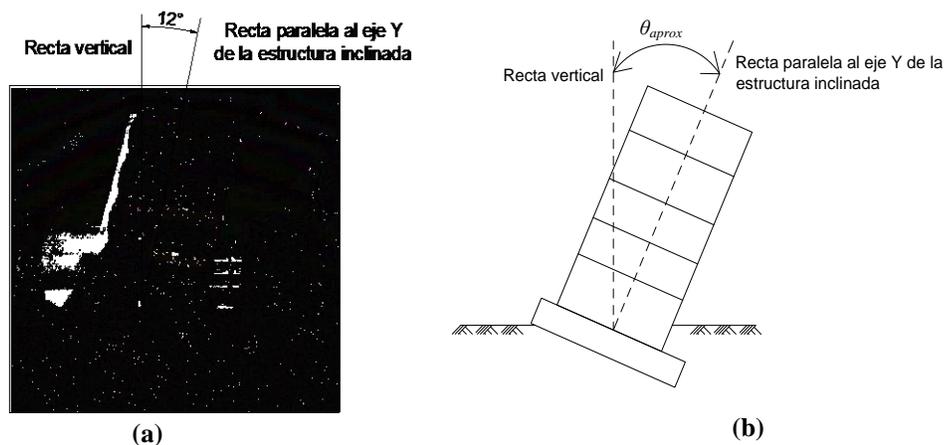


Figura A. 1a) Falla de una cimentación rígida debido al fenómeno de licuación, la superestructura presentó una inclinación de $\sim 12^\circ$ (Moh et al., 2001) y b) Representación esquemática del método propuesto para estimar el ángulo aproximado de inclinación de una estructura con cimentación rígida y flexible cuando no es especificado en las referencias correspondientes



Después de obtener un ángulo de inclinación, con los pasos anteriores se asume que este ángulo es el ángulo aproximado de inclinación (θ_{aprox}) de la estructura analizada. Este método se usó para estructuras con cimentación flexible y rígida. Los edificios en los cuales se aplicó este criterio para estimar el ángulo aproximado de inclinación se identifican con el símbolo “&” indicado como superíndice en la Tabla 1.1 y 2.1.

Estimación del desplazamiento vertical (Δ_V)

En algunos casos no se especificaba en las referencias consultadas, el desplazamiento vertical (Δ_V) y/o el desplazamiento horizontal (Δ_H). Sin embargo gracias a la posición en la que fue tomada la fotografía, se calculó el desplazamiento vertical (Δ_V) de la siguiente forma:

- 1) Se propuso una altura de entrepiso acorde al tipo de uso del edificio analizado (casa habitación, oficinas, escuelas, entre otros). Asumiendo que las alturas de los diferentes niveles del edificio son iguales se estimó la altura total del edificio (H_T)
- 2) Se midió el ancho del edificio en la fotografía, para establecer una sencilla *regla de tres* entre la altura conocida total del edificio (H_T) y el ancho desconocido de la estructura (x)
- 3) De la porción de edificio que se desplazó verticalmente en el suelo, se asume que toma la forma de un triángulo rectángulo. De esta forma, la distancia del cateto adyacente representa la magnitud del desplazamiento vertical (Δ_V)
- 4) Conocida la distancia del cateto opuesto y el ángulo de inclinación (θ_{aprox}) se usó la *ley de senos* para determinar el valor del cateto adyacente y de esta forma el desplazamiento vertical (Δ_V). Tal como se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{\Delta_V}{\text{sen}(\theta_{aprox})} = \frac{x}{\text{sen}(90)} \quad (1)$$

Despejando Δ_V de la ecuación 1 y nombrando a “ x ” como el cateto opuesto, se obtiene la expresión usada para calcular el desplazamiento vertical de una estructura dañada por licuación, tal como se muestra en la ecuación 2.

$$\Delta_V = c. o [\text{sen}(\theta_{aprox})] \quad (2)$$

A continuación se presenta la Figura A.2, en la cual se explican de forma esquemática los pasos anteriormente descritos.

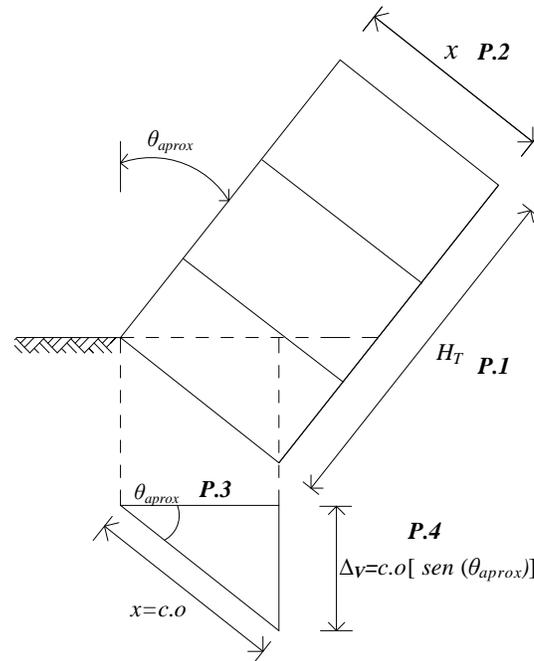


Figura A. 2 Representación esquemática de los pasos para estimar el desplazamiento vertical (Δ_V) de una estructura afectada por el fenómeno de licuación

Es importante mencionar que este procedimiento solo se pudo aplicar a edificios en los que se reportó o estimó el ángulo de inclinación (θ_{aprox}). Los valores estimados de esta forma se identifican con el símbolo “#” indicado como superíndice en la Tabla 1.1 y 2.1. Este procedimiento no se usó para estimar el desplazamiento horizontal (Δ_H).

Daños observados

La información de daños observados, hace referencia a los estados de daño, propuestos en la Tabla 3.3. Por ejemplo, el caso 73 de la Tabla 2.1, se trata de una estructura de dos niveles, dañada por el fenómeno de licuación durante el sismo de Mexicali en 2010. Esta estructura presentó un $\Delta_V= 100$ cm, sin embargo la superestructura no sufrió daños importantes, pero se considera un daño completo (implícitamente pérdida total de la estructura). Se decidió asignar este nivel de daño porque de acuerdo con la Tabla 5, un edificio que presente un $\Delta_V > 100$ y un $\theta_{aprox} > 4.6^\circ$ se considerara como una estructura con daño completo. Debido a que el edificio ya no garantiza las condiciones necesarias de seguridad para ser habitado o su costo de reparación es insostenible. En algunos otros casos de la Tabla 1.1 y 2.1 se especificaba el estado del edificio después del sismo, en los reportes consultados, esta información está indicada mediante el símbolo “♣”.



Anexo 2

Edificios afectados por licuación en México y el mundo

Tabla A-2.1. Edificios afectados por licuación en México y el mundo

ID	Fecha	País	Nº. de pisos	Tipo de cimentación	θ_{aprox} (°)	Δ_V (cm)	Δ_H (cm)	Daños observados
1	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	20	-	Moderado
2	16/06/1964	Japon ¹	2	Rígida	-	10	-	Ligero
3	16/06/1964	Japon ¹	1	Flexible	-	10	-	Ligero
4	16/06/1964	Japon ¹	8	Flexible	-	110	-	Completo
5	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	200	-	Completo
6	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	130	-	Completo
7	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	100	-	Severo
8	16/06/1964	Japon ¹	2	Flexible	-	50	-	Severo
9	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	20	-	Moderado
10	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	240	-	Completo
11	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	257	-	Completo
12	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	154	-	Completo
13	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	345	-	Completo
14	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	15	-	Moderado
15	16/06/1964	Japon ¹	2	Rígida	-	16	-	Moderado
16	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	157	-	Completo
17	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	150	-	Completo
18	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	172	-	Completo
19	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	97	-	Severo
20	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	120	-	Completo
21	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	380	-	Completo
22	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	100	-	Severo
23	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	340	-	Completo
24	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	80	-	Severo
25	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	60	-	Severo
26	16/06/1964	Japon ¹	5	Desconocida	-	20	-	Moderado
27	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	30	-	Moderado
28	16/06/1964	Japon ¹	4	Flexible	-	10	-	Ligero
29	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	30	-	Moderado
30	16/06/1964	Japon ¹	3	Desconocida	-	150	-	Completo
31	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	150	-	Completo
32	16/06/1964	Japon ¹	3	Flexible	-	66	-	Severo
33	16/06/1964	Japon ¹	6	Rígida	-	100	-	Severo
34	16/06/1964	Japon ¹	3	Rígida	-	116	-	Completo
35	16/06/1964	Japon ¹	4	Rígida	-	150	-	Completo
36	16/06/1964	Japon ²	4	Rígida	63 ^{&}	-	-	Daño completo, el edificio volcó
37	16/06/1964	Japon ²	4	Pilotes	0.5 ^{&}	-	-	Daño ligero, el edificio es habitable
38	16/06/1964	Japon ³	4	Rígida	15 ^{&}	-	-	Completo
39	16/06/1964	Japon ³	4	Rígida	8 ^{&}	300 [#]	-	Completo
40	16/06/1964	Japon ³	3	Rígida	5 ^{&}	300 [#]	-	Completo
41	19/09/1985	México ⁴	2	Flexible	-	15	-	Sin daños estructurales, edificios de acceso a la planta FERTIMEX
42	16/07/1990	Filipinas ⁵	3	Flexible	5	100	-	Completo
43	16/07/1990	Filipinas ⁶	3	Flexible	5	100	-	Daño completo, *Desplazamiento vertical diferencial
44	16/07/1990	Filipinas ⁷	3	Flexible	12 ^{&}	-	350 [#]	Daño completo
45	16/07/1990	Filipinas ⁶	-	Flexible	-	40	20	*Daño completo
46	22/04/1991	Panamá ⁸	1	Flexible	-	40	200	Daño completo debido al colapso de muros de carga
47	17/01/1995	Japón ⁹	-	Pilotes	-	30	-	Daño moderado, *Pilotes dañados severamente
48	17/01/1995	Japón ⁹	-	Pilotes	-	-	20	*Pilotes dañados severamente
49	21/09/1999	Taiwán ¹⁰	4	Rígida	12 ^{&}	141 [#]	-	Completo
50	21/09/1999	Taiwán ¹¹	4	Rígida	5 ^{&}	-	-	Daño moderado
52	17/08/1999	Turquía ¹³	2	Flexible	-	150	-	Completo
51	09/10/1995	México ¹⁰	4	Rígida	-	10	-	Daño ligero
53	17/08/1999	Turquía ¹³	4	Flexible	50 ^{&}	50 [#]	-	Pérdida completa
54	17/08/1999	Turquía ¹³	4	Rígida	-	30	50	Daño severo, *Hotel cerrado aproximadamente un año
55	17/08/1999	Turquía ¹⁴	2	Flexible	-	55	100	Daño severo



Tabla A-2.1. Edificios afectados por licuación en México y el mundo (continuación)

ID	Fecha	País	No. de pisos	Tipo de cimentación	θ_{aprox} (°)	ΔV (cm)	ΔH (cm)	Daños observados
56	17/08/1999	Turquía ¹⁵	5	Rígida	-	-	57	Daño moderado
57	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	100	-	Daño completo, inmueble inhabitable
58	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	70	-	Pérdida total debido a que los muros colapsaron
59	15/08/2007	Perú ¹⁶	1	Flexible	-	50	-	Daño severo, inmueble reparable
60	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	80	-	Daño severo, inmueble inhabitable
61	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	70	-	Daño severo, inmueble inhabitable
62	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	-	90	Daño severo
63	15/08/2007	Perú ¹⁷	1	Flexible	-	20	390	*Daños ligeros, los daños por desplazamiento lateral fueron en áreas sin importancia estructural
64	16/07/2007	Japón ¹⁸	3	Pilotes	5	-	-	Daño moderado, buen desempeño de los pilotes
65	04/09/2010	Nueva Zelanda ¹⁹	1	Flexible	-	33	10	Daño severo
66	27/02/2010	Chile ²⁰	8	Pilotes	1	40	-	Daño ligero
67	27/02/2010	Chile ²¹	2	Flexible	-	60	-	Daño severo
68	27/02/2010	Chile ²²	2	Flexible	5 ^{&}	39 [#]	-	Daño ligero
69	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	30	-	Daño ligero en el edificio A de la UABC
70	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	20	10	Daño ligero en el edificio B de la UABC
70	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	20	10	Daño ligero en el edificio B de la UABC
71	04/04/2010	México ²²	4	Pilotes	-	15	-	Daño ligero en el edificio D de la UABC
72	04/04/2010	México ²²	1	Flexible	15 ^{&}	30 [#]	100	Pérdida completa
73	04/04/2010	México ²²	2	Flexible	-	100 [#]	-	Pérdida completo
75	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	1	Flexible	-	40	-	Funcionalidad afectada
76	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	6	Pilotes	5	30	-	Daño moderado
77	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	6	Pilotes	-	29	-	*Daño moderado pero el edificio fue demolido
78	27/02/2011	Nueva Zelanda ²³	3	Rígida	1.8	40	15	*Daño severo, el edificio fue demolido
79	11/03/2011	Japón ²⁴	3	Rígida	-	40	-	Daño severo, los daños son reparables
80	11/03/2011	Japón ²⁴	4	Pilotes	-	30	-	*Desplazamiento del suelo
81	11/03/2011	Japón ²⁵	2	Flexible	3 ^{&}	-	-	Daño severo
82	11/03/2011	Japón ²⁵	2	Flexible	3 ^{&}	-	-	Daño ligero

¹Yoshimi y Tokimatsu, 1977

²Mohammed y Maekawa, 2010

³Ohsaki, 1966

⁵Ishihara et al., 1993

⁶Oronse, 2011

⁷EERI, 1990

⁸Camacho y Viquez, 1994

¹⁰Akai et al., 1995

¹¹Moh et al., 2001

¹²EEFIT, 2007

¹³USGS, 2000

¹⁴Sancio et al., 2004

¹⁵Bray et al., 2000

¹⁶Elnashai et al., 2008

¹⁷GEER, 2007

¹⁸Global Risk Miyamoto, 2007

¹⁹Green y Cubrinovski, 2011

²⁰GEER, 2010 (Chile)

²¹Mendoza et al., 2011

²³GEER, 2011

²⁴EERI, 2011

²⁵Ashford et al., 2011

θ_{aprox} = Ángulo de inclinación aproximado

ΔV = Desplazamiento vertical

ΔH = Desplazamiento horizontal

*Información proporcionada en el reporte correspondiente



Anexo 3

Edificios afectados por licuación durante el sismo de Turquía en 1999

En este anexo se presenta una base de datos de edificios afectados por el fenómeno de licuación, durante el sismo de Turquía en 1999. Esta base de datos no satisfizo los propósitos del presente trabajo, sin embargo debido a la gran cantidad de información que contiene, se decidió anexarla para futuras investigaciones sobre el tema de licuación.

Tabla A-3.1. Resumen de casos disponibles de edificios después del sismo de Turquía en 1999 (Unutmaz, 2008)

Prueba SPT	Nombré del edificio	Tipo de suelo	EQ*	Propiedades estructurales					Asentamiento observado (cm)
				B (m)	L(m)	H (m)	Periodo (seg)	Sa (g)	
SPT-A1	A1	ML-CH	EQ1	9.9	11.9	14	0.36	0.86	10
SPT-A3	A2	CH-ML	EQ1	13.7	17	14	0.36	0.75	50
SPTB1	B1	SP-SM	ED 1	5.1	20	14	0.36	0.86	20
SPT-B2	92	SP-SM	ED 1	6	23.4	14	0.36	0.86	0
SPT-C1	3	ML-SP	ED 1	19.5	20	14	0.36	0.75	17
SPT-C2	C1	CH-MH	ED 1	19.5	20	14	0.36	0.75	17
SPT-C4	C2	CL-ML	ED 1	19.5	20	14	0.36	0.86	20
SPT-D1	Di	SW	ED 1	9.8	11	14	0.36	0.75	60
SPT-E1	E1	SP-SM	ED 1	12	17	14	0.36	0.75	20
SPT-F1	F1	ML-CL	ED 1	7.5	13	11.2	0.31	0.9	50
SPT-H1	H1	CH-CL	ED 1	10.5	14.5	11.2	0.31	0.79	18
SPT-H 1	H1	CH-CL	ED 1	9	18	11.2	0.31	0.9	2
SPT-11	11	ML-SP	ED 1	9	18.3	11.2	0.31	0.9	10
SPT-11	12	ML-SP	ED 1	13.3	14.9	16.8	0.41	0.91	12.5
SPT-11	13	ML-SP	ED 1	14.9	14.9	16.8	0.41	0.91	15
SPT-J1	J3	SM-ML	ED 1	22.2	24.6	14	0.36	0.75	20
SPT-K1	K2	ML-SP	ED 1	12.6	35.6	14	0.36	0.75	20
SPT-K1	K2	ML-SP	ED 1	12.6	35.6	14	0.36	0.86	35
SPT-L1	Li	ML-SM	ED 1	19.1	22.1	14	0.36	0.86	20
CSK-3	CASE-3	ML-MH	EQ 2	11	18	11.2	0.31	0.9	16
CSK-3	CASE-4	ML-MH	EQ 2	9.4	18	16.8	0.41	0.79	60
CPT-TIGCI-3	TIGCİLAR DIST.	ML	EQ2	12	14	11.2	0.31	0.9	42
TSK-2	CASE-1	ML	EQ2	8.9	24.6	15.4	0.39	0.91	21
SPT-SH4	SAPANCA HOT.	SW-SM	EQ2	30	55	9,0	0.26	0.83	15
SPT05	C2	CL-ML	EQ2	19.5	20	14	0.36	0.75	17
SPT-C6	C2	ML	E2	19.5	20	14	0.36	0.75	17
SPT-C1	C4	ML-SP	EQ2	23.4	24	14	0.36	0.75	17
SPT-D2	D1	ML-SW	EQ 2	9.8	11	14	0.36	0.86	40



Tabla A-3.1. Resumen de casos disponibles de edificios después del sismo de Turquía en 1999 (Unutmaz, 2008)

Prueba SPT	Nombré del edificio	Tipo de suelo	EQ*	Propiedades estructurales					Asentamiento observado (cm)
				B (m)	L(m)	H (m)	Periodo (seg)	Sa (g)	
SPT-E1	E3	SP-SM	EQ 2	15	21.6	14	0.36	0.75	25
CPT-A5	A2	SM-ML	EQ 2	13.7	17	14	0.36	0.86	50
CPT-05	C3	SM	EQ 2	19.5	20	14	0.36	0.86	17
CPT-05	C4	SM	EQ 2	23.4	24	14	0.36	0.86	17
CPT-E3	E1	SM-SW	EQ 2	12	17	14	0.36	0.86	20
CPT-E3	E3	SM-SW	EQ 2	15	21.6	14	0.36	0.86	25
CPT-CUM3	ORNEK APT	SM-ML	EQ 2	18	29	16.8	0.41	0.79	57
CPT-CUM3	CASE-4	SM-ML	EQ 2	10.2	17.5	11.2	0.31	0.79	0
CPT-TIGCI-1A	CASE-3	SM	EQ 2	7.5	10.9	11.4	0.31	0.79	20
CPT-TIGCI-1A	CASE-4	SM	EQ 2	9.3	10.9	11.4	0.31	0.79	24
CPT-TIGCI-1A	CASE-5	SM	EQ 2	11.8	12.5	8.4	0.25	0.7	15
CSK-3	KAYINCGL U A.	ML	EQ 2	11	19.4	14	0.36	0.75	15
SK-02	CASE-I	ML	EQ 2	17.6	25.3	11.2	0.31	0.79	40

* EQ 1 Indica el sismo de Kocaeli en 1999 y EQ 2 Indica el sismo de Duzce en 1999