

EL MEGA TERREMOTO DEL MAULE DE 2010:
UNA LECCIÓN DE BUENA INGENIERÍA,
PERO CON SORPRESAS Y NUEVOS DESAFÍOS

Rodolfo Saragoni

RODOLFO SARAGONI

Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1968. Ph.D. Universidad de California, Los Ángeles (1972). Profesor Titular Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Premio OEA “Manuel Noriega Morales” (1983) en Ciencias Aplicadas y Tecnología. Premio “Ramón Salas Edwards” (1997) del Instituto de Ingenieros de Chile. Premio de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA, a la Excelencia en Ingeniería Sísmica (2005). Ex presidente de la Asociación Iberoamericana de Ingeniería Sísmica, AIBIS. Miembro del Comité Científico del International Center of Seismic Safety de la AIEA.

1. INTRODUCCIÓN

La sismicidad de Chile está controlada principalmente por la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, cuya alta velocidad de convergencia de 8 cm por año, hace de Chile el país más sísmico del mundo y nos convierte de paso en un laboratorio natural para la sismología y la ingeniería sísmica.

La concurrencia simultánea de esta alta velocidad de convergencia junto con la juventud geológica de estas placas, se traduce en que Chile tenga los terremotos de subducción de mayor magnitud del mundo, los cuales están siempre asociados con maremotos destructivos.

La ocurrencia del megaterremoto del Maule del 27 de febrero de 2010, el quinto a nivel mundial con una magnitud momento de 8.8, dio la oportunidad de medir y verificar el desempeño de prácticas de diseño sísmico en condiciones extremas.

Es importante mencionar que en la costa noroccidental de EEUU, en la zona de subducción de Cascadia en los estados de Washington y Oregon, ocurrió un terremoto similar en 1700, el cual no se ha repetido en los últimos 300 años. Por este motivo las medidas y el comportamiento de la estructura en este megaterremoto despertó gran interés en los EEUU y en la comunidad mundial.

A continuación se describen los estudios presísmicos, cosísmicos y postsísmicos del terremoto. Se entiende por estudios presísmicos aquellos que se realizaron antes de la ocurrencia del terremoto, y por cosísmicos a aquellos que se desarrollaron inmediatamente ocurrido el evento. En los estudios postsísmicos se describen las principales lecciones aprendidas del terremoto, y sus nuevos desafíos.

Especial mención se hace en este trabajo a las contribuciones de la Universidad de Chile al acervo de conocimientos que aportó este megaterremoto.

2. LOS ESTUDIOS PRESÍSMICOS

Después de la ocurrencia del terremoto de 1985 –de magnitud 7.8– que afectó la zona central de Chile, los departamentos de Geofísica e Ingeniería Civil de la Universidad de Chile identificaron la existencia de un hueco o gap sísmico contiguo al sur de la ruptura este último terremoto, más concretamente al sur de Matanzas.

Un hueco sísmico es una zona en que han ocurrido terremotos en el pasado, pero en la cual ha transcurrido un largo periodo sin terremotos, motivo por el cual se espera la próxima ocurrencia de uno de ellos.

El pronóstico para este hueco era la ocurrencia de un terremoto de magnitud 8.0 similar al terremoto de Talca de 1928, con un largo de ruptura estimado de 150 a 200 km. La ruptura hacia el sur produciría un efecto Doppler de directividad con la emisión de ondas sísmicas de periodos largos, las cuales afectarían seriamente a los edificios altos de hormigón armado de Santiago, materia que no estaba adecuadamente incorporada en la norma de diseño sísmico Nch 433 of. 96 “Diseño Sísmico de Edificios”, porque no se observó en el terremoto de la Zona Central de 1985. Además, el terremoto produciría el colapso y el daño no recuperable del último stock de viviendas rurales de adobe de Chile, ubicado principalmente en las provincias de Colchagua y Maule. Finalmente, se estimaba que el terremoto iría acompañado de un tsunami moderado.

El conocimiento de este hueco sísmico permitió al Departamento de Ingeniería Civil desplegar una red de acelerógrafos analógicos que mediría el terremoto en las principales ciudades y pueblos que afectaría el potencial terremoto.

El resultado real fue un terremoto de mayor magnitud (8.8) con un largo de ruptura de 500 km. Esta ruptura tuvo directividad bilateral dirigida principalmente hacia el Norte, con una liberación de energía controlada por dos asperezas dominantes, y un tremendo maremoto que afectó la costa en estos 500 km de ruptura y a la isla Juan Fernández.

El terremoto afectó seriamente, como se esperaba, a los edificios altos de Santiago, produciendo el colapso de unos pocos de ellos, siendo la primera vez que ocurre la muerte de compatriotas en edificios altos de hormigón armado diseñados por ingenieros.

El terremoto fue por este motivo más similar al terremoto de Concepción de 1835, de magnitud 8.25, que al pronosticado de Talca de 1928.

El terremoto produjo gran destrucción y colapso de viviendas de adobe, iglesias patrimoniales de adobe, alcanzándose la máxima intensidad Mercalli modificada de IX en Constitución bajo (Astroza et al. 2010).

A continuación se describen los estudios cosísmicos del terremoto.

3. CARACTERÍSTICAS DEL TERREMOTO DE 2010

El terremoto de epicentro marítimo del Maule ocurrió el 27 de febrero de 2010 a las 3: 34: 15 hora local con una magnitud momento de 8.8 determinada por el United States Geological Survey (USGS 2010). Este terremoto subductivo interplaca *thrust* ocurrió en la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, con una profundidad focal de 35 km. La ubicación del epicentro fue a 35,909°S y 72,733°W, en el mar frente a la localidad de Cobquecura.

El Ministerio del Interior confirmó las víctimas en 525, entre las cuales 158 son debidas al tsunami (se incluyen en ella los desaparecidos). Una de cada tres víctimas fue producto de este fenómeno.

El terremoto y el maremoto dejaron 800.000 personas desplazadas de sus hogares. Las pérdidas han sido estimadas por el Gobierno en U\$ 30.000.000.000, aunque las estimaciones económicas más recientes las ubican entre U\$ 29.663.000.000 y U\$ 24.000.000.000, representando un costo aproximado del 18% del PIB.

Los seguros pagados por la industria aseguradora ascienden a U\$ 8.000.000.000 –valor que es 94 veces lo indemnizado por las aseguradoras para el terremoto de 1985– de los cuales U\$ 1.255.000.000 corresponden solo al desembolso en vivienda (casas, departamentos) con un número de 184.451 siniestros denunciados.

Los mayores siniestros pagados por las compañías de seguros se produjeron en el sector industrial, debido especialmente al lucro cesante, alcanzando a U\$ 6.745.000.000.

4. LAS RÉPLICAS Y SU SORPRESA

El mega terremoto de 2010 se ha caracterizado por un menor número de réplicas al esperado según la ley de Omori, y ellas no superaron la magnitud de 6.9, esperándose valores superiores a 7.0.

En particular la replica 6.9 del 11 de marzo de 2010 trajo una inesperada sorpresa, ya que su mecanismo cortical, asociado a una falla superficial en Pichilemu, no correspondía propiamente a un réplica pues no se desarrolló en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana. Esto demuestra que los megaterremotos son más complejos de lo que se creía y que las fallas superficiales de la costa chilena son capaces sísmicamente de producir terremotos, un hecho inédito hasta ahora.

Este nuevo descubrimiento trae nuevos desafíos para la evaluación de la amenaza sísmica de Chile.

5. LA NORMATIVA SÍSMICA CHILENA

Chile tenía vigentes las siguientes normas sísmicas al momento de la ocurrencia del terremoto:

- Nch 433 Of. 96 “Diseño Sísmico de Edificios”.
- Nch 2369 Of. 2003 “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”.
- Nch 2745 Of. 2003 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”.

Adicionalmente, Chile disponía de una guía de diseño sísmico de puentes del Ministerio de Obras Públicas (MOP): Manual de Carreteras del MOP. Tomo IV. Volumen N°3: “Introducción y Criterios de Diseño. Capítulo 3.1000 Puentes y Estructuras Afines. Sección 3.1004 Diseño Sísmico”.

Además existía un sistema de revisores estructurales independientes de acuerdo a la ley 1928 de 2001.

Todas estas normas, con la excepción de la guía de diseño de puentes del MOP, son obligatorias por ley. En particular, la norma Nch 433 Of. 96 de diseño sísmico de edificios en su Sección 5.1 sobre principios e hipótesis básicas, indica en el 5.1.1 c):

“Esta norma, aplicada en conjunto con las normas específicas para cada material, está orientada a lograr estructuras que, aunque presenten daños, eviten el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa”. En este sentido la norma, cuya orientación es la protección de vidas, no acepta el colapso de edificios y estructuras, aún para un terremoto de magnitud excepcional como el del 27 de febrero de 2010.

Lamentablemente, ocurrió el colapso de 6 edificios, la mayoría de ellos por incumplimiento de esta norma sísmica. Por este motivo se ha considerado, unánimemente y a nivel internacional, como un éxito el resultado de las normas y de la ingeniería sísmica chilena.

En el ámbito de los puentes también hubo que lamentar el colapso de algunos de ellos, que a otra hora podría haber aumentado el número de víctimas, debido principalmente al incumplimiento de los requerimientos del Manual de Carreteras del MOP.

6. INSPECCIONES TÉCNICAS EXTRANJERAS

La magnitud excepcionalmente alta del terremoto (8.8), de ocurrencia infrecuente en el mundo, unido a la aplicación de normas de diseño sísmico moderno y la

existencia de importantes edificios y estructuras, motivó la visita de más de 250 especialistas extranjeros de EEUU, Japón, Italia, México, Argentina, Perú, etc., entre los cuales cabe mencionar la misión del Earthquake Engineering Research Institute (EERI) de EEUU, el Council of Tall Buildings de Los Angeles, California, y de la American Society of Civil Engineers.

Este interés mundial estuvo motivado principalmente por el buen comportamiento de la estructura sometida a este megaterremoto, lo que demostraba que se podía diseñar exitosamente para enfrentar este tipo de movimientos telúricos de subducción.

7. ¿FUE EL TERREMOTO MÁS GRANDE?

A los ingenieros lo que les interesa es conocer las características del máximo terremoto posible, para poder incorporarlo en las normativas sísmicas. Por este motivo, se analizó si este era el máximo terremoto que podía afectar Santiago. Para ello se inspeccionó el comportamiento que tuvo la iglesia de San Francisco de Santiago para compararlo con lo sucedido en ella para los terremotos de Valparaíso de 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985.

La inspección de la iglesia en los días siguientes al terremoto no evidenció daño alguno, solo la caída de algunos pocos vidrios desde su linterna. Incluso parches de yeso adosados a sus columnas para controlar agrietamientos por asentamiento no mostraron huellas visibles de deterioro debido al terremoto.

A la luz de este resultado es posible concluir que este no es el mayor terremoto que puede afectar a Santiago, al menos para edificios bajos de carácter rígido. El máximo terremoto sería el de 1730, materia que deberá ser considerada en el perfeccionamiento de las normas sísmicas.

8. LOS REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

El terremoto fue registrado por 35 acelerógrafos de la Red Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC), obteniéndose por primera vez en el mundo acelerogramas de un megaterremoto de magnitud 8.8. La característica de estos acelerogramas es su larga duración, de alrededor de 2.5 minutos, lo cual está de acuerdo al largo de ruptura de 500 km de la fuente sísmica.

Se obtuvieron acelerogramas a nivel del suelo en las principales ciudades dañadas, en un edificio alto instrumentado en Santiago, en edificios y puentes aislados sísmicamente, en el Metro de Santiago y en represas.

Esta valiosa base de datos instrumentales aportada por la Universidad permitirá comprender mejor en el futuro las características del mecanismo de la fuente sísmica, el comportamiento de los edificios, especialmente el instrumentado, la respuesta de edificios aislados y puentes, así como la respuesta de los suelos en terremotos.

En la Tabla 1 se indican las aceleraciones máximas registradas por la RENADIC medida como porcentaje de aceleración de gravedad g en dos direcciones horizontales y una vertical.

Los acelerogramas más importantes se obtuvieron en el centro de Concepción, próximos a la Plaza de Armas de esta ciudad y al lugar donde colapsó el edificio Alto Río. Estos registros son de gran importancia para comprender las características de los megaterremotos de subducción de magnitud 8.8.

En particular, el acelerograma de Concepción se obtuvo después de mantenerlo funcionando ininterrumpidamente por casi 40 años, por ello se estima su costo en aproximadamente US\$ 1.000.000.

En la Figura 1 se muestra la componente horizontal longitudinal de la estación Centro de Concepción, mostrando los dos minutos y medio de duración.

La aceleración máxima horizontal registrada en la Tabla 1 corresponde a la estación Angol con 0.93 g , en tanto la máxima vertical corresponde a la estación Llolleo con 0.70 g .

Dado que en Chile aparte del hueco sísmico mencionado existe un segundo hueco sísmico, el que incluye el sur del Perú y Arica, en el cual podría ocurrir la repetición del terremoto de Arica de 1868, la RENADIC de la Universidad de Chile tiene desplegada en esa zona una red de acelerógrafos digitales, a diferencia de la red que registró el terremoto de 2010 que es de carácter analógico y de capacidad máxima de 1 g . Ello significó limitaciones, dentro del tremendo éxito de haber logrado estos registros, principalmente su capacidad de 1 g , la que fue superada en la estación Cauquenes, lo cual indica que en este terremoto se alcanzaron aceleraciones del orden de 1.4 g o más.

En el caso del terremoto de 1985 se disponía de instrumentos análogos con capacidad de 2 g .

Algunas importantes estaciones acelerográficas de la costa fueron perdidas debido al tsunami.

Tabla 1. Aceleraciones máximas registradas por la Red Nacional de Acelerógrafos de la Universidad de Chile (RENADIC) (Boroschek et al., 2010).

Station	Component	PGA	la	Pdh	Station	Component	PGA	la	Pdh
		[g]	[g*s]	[gs²*0,0001]			[g]	[g*s]	[gs²*0,0001]
1 Angol	EW	0,69	1,79	104,49	19 FCFM	ew	0,17	0,13	12,37
	NS	0,93	2,03	104,32		ns	0,17	0,12	10,95
	VERT	0,28	0,44	16,12		vert	0,14	0,08	1,47
2 Conce SP	1	0,61	1,45	131,50	20 Maipu	1	0,50	0,50	24,53
	2	0,64	1,77	179,84		2	0,54	0,58	47,63
	3	0,59	1,15	46,90		vert	0,23	0,18	9,09
3 Conce Centro	long	0,41	0,90	511,34	21 Peñalolen	ew	0,30	0,34	25,84
	trans	0,29	0,58	209,45		ns	0,29	0,33	26,22
	vert	0,38	0,79	122,87		vert	0,27	0,18	10,88
4 Hualañe	long	0,39	0,81	75,79	22 Puente Alto	ew	0,26	0,17	12,15
	trans	0,47	0,89	89,78		ns	0,27	0,26	18,40
	vert	0,39	0,65	18,48		vert	0,14	0,10	5,35
5 Constitucion	long	0,54	2,02	447,67	23 Valpo Almendral	long	0,22	0,23	94,57
	trans	0,63	2,68	684,76		trans	0,27	0,21	55,59
	vert	0,34	0,40	24,35		vert	0,15	0,07	6,53
6 Talca	long	0,47	1,18	108,24	24 UTFSM	long	0,14	0,03	3,17
	trans	0,42	1,13	100,64		trans	0,30	0,05	7,09
	vert	0,24	0,31	11,23		vert	0,02	0,02	1,75
7 Curico	EW	0,47	1,09	64,89	25 Marga Marga	long	0,34	0,45	43,85
	NS	0,41	1,13	77,46		trans	0,31	0,05	48,01
	VERT	0,19	0,30	11,47		vert	0,26	0,21	7,67
8 Matanza	long	0,33	0,72	175,47	26 Viña del Mar	ew	0,33	0,20	12,09
	trans	0,29	0,46	89,90		ns	0,22	0,11	5,18
	vert	0,25	0,23	10,36		vert	0,19	0,04	0,67
9 Lolleo	long	0,33	0,51	90,31	27 Olmue	x2	0,25	0,20	29,40
	trans	0,56	1,05	169,62		y2	0,36	0,41	73,53
	vert	0,70	0,67	51,79		z2	0,15	0,07	3,01
10 Marga Marga	long	0,34	0,45	43,85	28 El Roble	ew	0,14	0,09	5,33
	trans	0,33	0,48	48,01		ns	0,19	0,16	16,09
	vert	0,26	0,21	7,67		vert	0,11	0,04	1,34
11 Papudo	long	0,29	0,29	42,82	29 Zapallar	long	0,18	0,06	2,92
	trans	0,42	0,40	55,23		trans	0,18	0,06	2,51
	vert	0,16	0,04	1,12		vert	0,10	0,03	0,73
12 Melipilla	long	0,57	0,92	32,92	30 Papudo	long	0,29	0,29	42,82
	trans	0,77	1,29	54,06		trans	0,42	0,40	55,23
	vert	0,38	0,23	3,53		vert	0,16	0,04	1,12
13 Colbun	1	0,05	0,02	2,23	31 Cabildo	long	0,26	0,27	25,19
	2	0,04	0,02	2,17		trans	0,32	0,27	29,39
	3	0,04	0,02	2,02		vert	0,13	0,05	1,50
14 Casablanca	1	0,28	0,38	76,03	32 Los Molles	x	0,16	0,08	12,89
	2	0,33	0,39	77,30		y	0,15	0,09	18,89
	vert	0,23	0,13	5,90		z	0,07	0,02	0,88
15 Santa Lucía 1 Santa Lucía 2	1	0,31	0,28	15,77	33 Los Vilos	ew	0,03	0,00	0,16
	2	0,24	0,28	17,72		ns	0,03	0,00	0,17
	3	0,26	0,26	13,21		vert	0,02	0,00	0,09
16 Las Americas	1	0,22	0,31	39,67	34 Mendoza	ew	0,01	0,00	0,73
	2	0,30	0,38	70,86		ns	0,01	0,00	0,74
	3	0,16	0,16	16,81		vert	0,01	0,00	0,43
17 San José	1	0,47	0,77	36,34	35 Pichilemu	long	0,12	0,12	17,60
	2	0,47	0,67	35,41		trans	0,16	0,14	25,09
	3	0,24	0,21	7,15		vert	0,13	0,06	3,38
18 Andalucía	1	0,23	0,22	17,66					
	2	0,18	0,14	8,20					
	3	0,31	0,28	23,49					

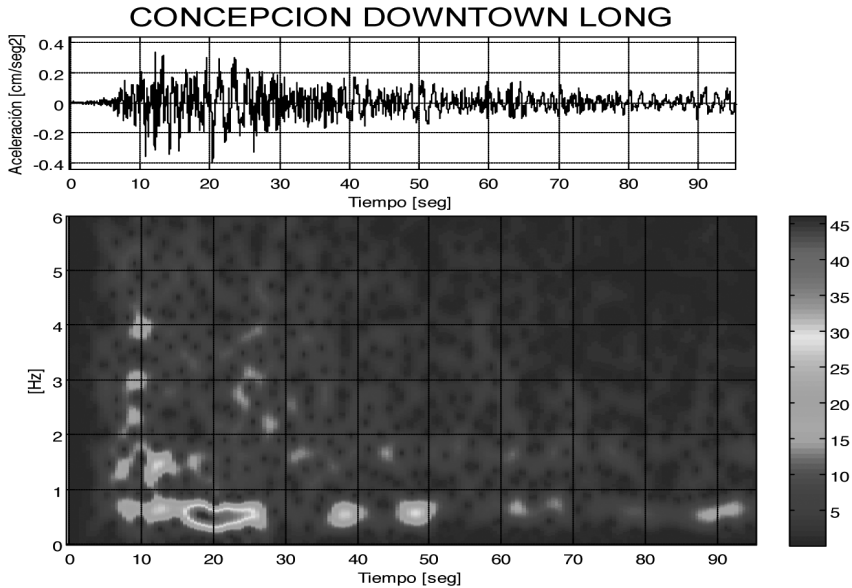


Figura 1. Acelerograma Centro de Concepción, dirección longitudinal.

9. EFECTOS DE LAS ASPEREZAS DOMINANTES

Una aspereza es un protuberancia en la placa de Nazca. En nuestro caso la aspereza principal se encuentra próxima a Pichilemu y la segunda al norte de Concepción. El terremoto se inició en esta última, propagándose la ruptura hacia el Norte para a continuación iniciar la actividad en la aspereza de Pichilemu. Los terremotos de subducción interplaca tipo *thrust* se caracterizan por la presencia de dos o más asperezas dominantes en la zona de contacto de ambas placas (Ruiz et al., 2011). En este sentido, el terremoto del Maule de 2010 mostró la misma característica con dos asperezas dominantes como se muestra en la Figura 2. La entrega de la energía sísmica en el tiempo está controlada claramente por estas dos asperezas, como se puede apreciar en la Figura 2, donde el acelerograma obtenido en Maipú, Santiago, muestra claramente dos entregas separadas de energía.

El análisis detallado del daño en estas estructuras rígidas de baja altura de un piso muestra que la entrega de energía está distribuida de acuerdo a la presencia espacial de estas dos asperezas, concentrándose el mayor daño en las ciudades vecinas a ambas asperezas. Similar situación se da con los acelerogramas, donde los mayores valores registrados se dan en las estaciones próximas a las asperezas.

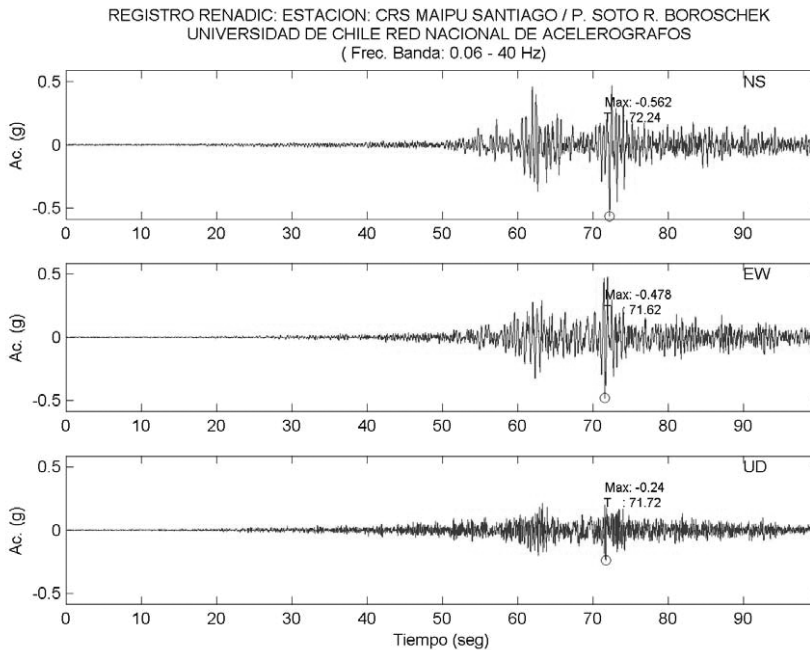


Figura 2. Acelerogramas Estación Maipú mostrando las dos entregas de energía de las asperezas.

Por este motivo, es más importante para estudios de riesgo sísmico futuro considerar la distancia mínima a las asperezas dominantes que la distancia al epicentro o a la falla.

Estas asperezas tienen una longitud estimada de 30 km, la cual comparada con los 500 km de largo de ruptura del terremoto, hace que su capacidad de daño en tierra sea más asimilable a un terremoto de magnitud 8.0, que al megaterremoto de magnitud 8.8, lo que explica parcialmente el reducido daño vibratorio observado para un terremoto de esta magnitud. Las características del megaterremoto quedan evidenciadas por el largo de ruptura, su larga duración, el tsunami, el daño a edificios altos y la extensa área de licuación de suelos observada, materias que serán tratadas en las siguientes secciones.

El reducido daño observado concuerda con lo sucedido para el megaterremoto de Valdivia de 1960, el terremoto de mayor magnitud registrado a nivel mundial por la humanidad (Saragoni, 2010). De este modo se plantea una gran paradoja para la sismología y la ingeniería sísmica: megaterremotos de magnitud 9.0 o más que no van asociados a un gran poder destructivo.

10. TSUNAMI

Veinte minutos después de ocurrido el terremoto, previo al retiro inicial del mar, ocurrió el tsunami, produciendo casi 178 víctimas (incluyendo a los desaparecidos). El mayor número de víctimas del tsunami ocurrió en Constitución, en la Isla Orrego del Río Maule, y la mayor destrucción ocurrió en Talcahuano, Dichato, Iloca y Constitución.

Las olas mayores alcanzaron entre 12 y 15 metros, aunque hubo puntos aislados en que los *splash*, o choque de olas, llevaron estas alturas hasta 20 metros como en Putú.

El maremoto fue de naturaleza muy compleja debido a la ruptura temporal de las asperezas dominantes. La última ola –la más destructiva– que afectó a Talcahuano, llegó a las 3 horas de ocurrido el terremoto y como una inundación paralela a la costa, en tanto los modelos previos a la ocurrencia del maremoto consideraban que llegaría perpendicular a la costa.

Las características descritas corresponden al maremoto de campo cercano que ocurrió en las costas continentales chilenas, pero este tsunami también tuvo características de tsunami de campo lejano en la bahía de Cumberland en las islas de Juan Fernández.

Chile tiene el desafío en el futuro, en las zonas inundables por un tsunami, de garantizar el no colapso de estructuras, las cuales han quedado seriamente dañadas por el terremoto del 27 de febrero de 2010. Ello ha sido considerado en el proyecto de norma de emergencia del NTM 007 del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo.

11. LOS EFECTOS DINÁMICOS DE LOS SUELOS DE FUNDACIÓN

Este terremoto, como ningún otro de los que ha ocurrido en Chile durante el siglo XX, produjo importantes amplificaciones dinámicas de suelos, las cuales quedaron de manifiesto en los espectros de respuesta de los acelerogramas registrados.

Uno de los más importantes acelerogramas, en este sentido, fue el obtenido en el centro de Concepción, el cual muestra un importante efecto de amplificación dinámica de suelos en torno a un periodo de 2 segundos, lo que indica que durante el terremoto vibró en su totalidad la columna de arena de 120 m que existe entre la superficie del suelo y la roca basal. Valores como este solo se habían observado en el terremoto de la ciudad de México de 1985, pero no se consideraban posibles en Chile.

La vibración de la totalidad de las columnas de suelo durante este terremoto produjo una importante discordancia por el lado de la inseguridad sísmica, entre los periodos de los picos de los espectros de respuesta medidos y los espectros de diseño de la norma vigente al momento del terremoto, la Nch 433 Of. 96. Esta es una de las razones de las fallas observadas en numerosos edificios altos y que debió ser corregida en la norma de emergencia a la norma Nch 433 Of. 96 modificada el 2009: “Diseño Sísmico de Edificios”, que se promulgó en febrero de 2011, la cual considera ahora una clasificación dinámica de suelos y una modificación en los periodos de los espectros de diseño por efecto del suelo.

12. LICUACIÓN DE SUELOS

Este megaterremoto se caracterizó además por producir extensas áreas de licuación de suelos en toda la zona de la ruptura del terremoto comprendida entre Viña del Mar, por el norte, hasta Coronel, por el sur.

Este fenómeno casi no se había observado en Chile en suelos naturales no perturbados por el hombre en terremotos ocurridos en el siglo XX, habiendo numerosas discusiones e hipótesis en el campo de la mecánica de suelos a este respecto: se debatió acerca de si los suelos se habían licuado anteriormente debido a la alta sismicidad de Chile, si las arenas en Chile eran muy cementadas o si los terremotos chilenos eran incapaces de producir licuación.

La licuación es un fenómeno que ocurre especialmente en arenas naturales, bajo la napa freática, en que la presión de agua aumenta debido a la vibración sísmica del suelo, haciendo que la arena pierda su estructura, mezclándose con el agua y transformándose en un líquido, el cual sale expulsado a la superficie en forma de chorros de agua y arena que dejan los característicos cráteres de licuación en la superficie después de ocurrido el terremoto. Estos cráteres se observaron en varios puntos de la ciudad de Concepción, San Pedro de la Paz, Talcahuano y Coronel.

La licuación hizo que algunos edificios se inclinaran ostensiblemente durante el terremoto, así como casas de un piso sufrieran profundas grietas en San Pedro de La Paz en Concepción.

13. EL DAÑO EN EDIFICIOS ALTOS

Santiago al momento de la ocurrencia del terremoto se caracterizaba por un importante parque de edificios altos de hormigón armado, siendo el edificio

Titanium, de 55 pisos y 191.7 m de altura, recién terminado ese año, el más alto de Sudamérica.

Este edificio, que tiene amortiguadores sísmicos y considera 7 subterráneos y un helipuerto, se comportó sin daños de importancia durante el terremoto. Vecino de este edificio se encontraba en construcción la torre de 300 metros Costanera Center, que será en el futuro el edificio más alto de Sudamérica.

Existen además importantes parques de edificios altos de hormigón armado en Viña del Mar y Concepción.

Los edificios altos de acero en Chile, a diferencia de EEUU., son más bien una excepción que una regla.

No obstante el inaceptable colapso del edificio Alto Río de 17 pisos de Concepción, y el importante daño de decenas de edificios en Santiago, Viña del Mar y Concepción que fueron declarados como inhabitables, al no colapsar (lo que es aceptado por la norma Nch 433 Of. 96, basado en un criterios de protección de vidas) hacen que el comportamiento de los edificios altos en general fuera muy bueno.

La Tabla 2 resume el comportamiento de los 9.974 edificios de más de dos pisos con permisos de construcción emitidos entre 1985 y 2009 (Saragoni et al., 2011).

Tabla 2. Comportamiento sísmico de edificios residenciales con permisos de construcción emitidos entre 1985 y 2009.

Edificios colapsados	5 (aproximado)
Edificios a demoler	50 (estimados)
Nº total de edificios de más de 2 pisos	9.974
Nº total de edificios de más de 9 pisos y más	1.939
% de fallas en edificios de más de 2 pisos	0.5 %
% de fallas en edificios de 9 pisos o más	2.8 %

La norma Nch 433 Of. 96 de diseño de edificios es muy similar a la norma de EEUU. Por este motivo, el buen comportamiento de los edificios altos en Chile es un resultado muy promisorio a nivel mundial, considerando que fueron sometidos a un movimiento del suelo severo y de larga duración, que no se había experimentado anteriormente.

Desde la exitosa experiencia de los edificios altos durante el terremoto de Chile de 1985, los edificios han experimentado incrementos en altura como es la tendencia en el resto del mundo. Sin embargo, en este lapso se redujeron además el espesor de los muros de hormigón armado por razones económicas, de arquitectura y de requerimiento de estacionamientos. Adicionalmente, los muros en los subterráneos fueron reducidos en su largo con respecto a los del primer piso, para dar pasada a los vehículos, produciendo concentraciones de altas compresiones en estos muros.

Espesores de muros de 15, 17 y 20 cm fueron comunes en los edificios dañados, que corresponden a la generación de los últimos 10 y 5 años, aunque algunos edificios de 25 cm de espesor también sufrieron el mismo daño.

La falla de corte en estos edificios no fue el modo de falla dominante como lo fue la falla de flexo-compresión. La falla característica de los muros de corte fue una banda de falla horizontal de unos 25 cm de altura bajo la losa del primer subterráneo. La armadura de acero vertical muestra un corte seco sin extrusión. Esta falla puede deberse además a la presencia de pulsos sísmicos verticales, que se manifiestan en todos los acelerogramas debido a la energía liberada por la aspereza del norte de Concepción (Saragoni, 2010).

La mayoría de estas fallas fueron debidas a la falta de confinamiento en los bordes de los muros de corte de hormigón armado requerida por el código del American Concrete Institute (ACI) y eliminando en el Anexo B, disposición B.2.2 de la norma de diseño sísmico Nch 433 Of. 96. Esta disposición fue eliminada en la modificación de 2009 pero no estaba vigente al momento del terremoto. Sin embargo, ella había sido eliminada en el código chileno de hormigón armado Nch 430 de 2008. Lo más preocupante de esta falla es que tiene un carácter frágil, no dúctil con la esperada elongación de la armadura de acero, que permite absorber energía sísmica. Esta situación no permite distinguir entre los edificios próximos al colapso, como los descritos, de los sin daño que también podrían estar en las vecindades de la falla. Esta preocupación se incrementa cuando se considera que en este caso la ruptura del terremoto fue predominante hacia el Norte, y que de haber sido de la misma magnitud pero con directividad hacia el sur podría haber producir el colapso de los edificios declarados como inhabitables.

Estos temas han sido resueltos parcialmente en las normas de emergencia de la norma Nch 433 de diseño sísmico de edificios y Nch 430 de diseño de hormigón armado promulgado en febrero de 2011. Estas normas serán estudiadas en más detalle durante 2011, para garantizar la seguridad sísmica pero a un costo adecuado.

En la falla de estos edificios también contribuyó en numerosos casos la mala clasificación del suelo, así como la subestimación comentada de la norma Nch 433 Of. 96 del efecto del terremoto lejano en su espectro de diseño.

14. COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS HABITACIONALES DE MEDIA ALTURA

El comportamiento de casas y edificios de hasta 4 pisos de albañilería confinada fue en general excelente, incluso en la zona epicentral y próximas a las asperezas, en la mayoría de los casos sin agrietamiento. Ello ha sido muy bien evaluado por la comunidad internacional, la cual ha propiciado la difusión del uso de este tipo de albañilería en países en desarrollo, considerando su menor costo y uso intensivo en mano de obra.

En todo caso, este megaterremoto subductivo interplaca no es la exigencia extrema para este tipo de estructuras, sino que los terremotos subductivos intraplaca de profundidad intermedia como el de Chillán de 1939, en que esta albañilería también se comportó exitosamente.

15. COMPORTAMIENTO DE CASAS Y EDIFICIOS PATRIMONIALES DE ADOBE

El terremoto afectó seriamente al último stock de casas y edificios patrimoniales de adobe de Chile. Este stock está localizado en los numerosos pueblos y ciudades del valle de Colchagua, vecina a la aspereza de Pichilemu, lo que significó un gran daño y extendido colapso de este tipo de edificios, el que incluyó la pérdida de numerosas iglesias patrimoniales.

Las casas de adobe lejos de las asperezas o en suelo de buena calidad sobrevivieron el terremoto incluso sin daño, dando la sensación equivocada de que las casas de adobe pueden sobrevivir en general a un megaterremoto.

La ciudad de Talca tuvo gran daño patrimonial debido a la falla del adobe, lo que se evidenció por la cantidad de m³ de escombros que fueron recogidos.

Las intensidades modificadas de Mercalli informadas por Astroza y otros (2010) son en general bajas para ser un megaterremoto de magnitud 8.8. Sin embargo, debe tenerse presente que un alto número de víctimas del terremoto (367, excluidas las debidas al maremoto) posiblemente son debidas al colapso del adobe, materia que deberá ser investigada en el futuro.

La gran pérdida de edificios patrimoniales y zonas típicas de adobe representa un gran desafío de cómo reconstruirlas reduciendo la vulnerabilidad del adobe. Ello ha sido considerado en el proyecto de norma del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo NTM002: “Proyecto de Intervención Estructural de Construcciones Patrimoniales de Tierra”.

16. COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

Uno de los aspectos más negativos de este terremoto fue el comportamiento de los elementos no estructurales, tales como caída de cielos falsos, rotura de tabiques y atascamientos de puertas de acceso. Numerosas personas quedaron encerradas en sus departamentos después del terremoto por no poder abrir las puertas. Este nivel de inseguridad y daño no estructural en sus departamentos es algo que la comunidad no ha aceptado y queda dentro de los nuevos desafíos a resolver. Esto ha sido considerado por el Ministerio de la Vivienda y Urbanismo en la norma de emergencia NTM001: “Diseño Sísmico de Componentes y Sistemas No Estructurales”.

El caso más simbólico de este terremoto fue la caída de los cielos falsos del Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago en la noche del terremoto, que junto al colapso de las pasarelas de acceso dejó inservible al edificio de operaciones del principal aeropuerto internacional del país. De haber ocurrido el terremoto durante el día se habría tenido que lamentar un aumento considerable de víctimas y heridos.

17. COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS INDUSTRIALES Y EQUIPOS

El diseño sísmico de edificios industriales y equipos se hace en Chile de acuerdo a la norma Nch 2369 Of. 2003: “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”. El objetivo de esta norma es diferente a la comentada norma Nch 433 Of. 96 “Diseño Sísmico de Edificios”, en el sentido en que el diseño sísmico de estructuras y equipos industriales se hace en Chile con un criterio económico, y en que la continuidad de operación después del terremoto es un requisito inevitable. A objeto de comparación la Norma Nch 433 Of. 96 es menos estricta, ya que al ser su objetivo la protección de vidas acepta altos niveles de daños sísmicos, mientras ello no implique el colapso de las estructuras y cuya reparación posterior requiera, como se ha observado en este terremoto, del abandono de los edificios por meses, asunto que económicamente no es aceptable por la industria.

Este terremoto, a diferencia del de 1985, afectó el importante polo industrial de Talcahuano y Concepción, permitiendo con ello evaluar el cumplimiento de los objetivos de la norma Nch 2369 Of. 2003.

A diferencia del sector habitacional cubierto por la norma Nch 433 Of. 96, que se refiere esencialmente a edificios de hormigón armado y albañilería, la construcción en el sector industrial se desarrolla principalmente con estructuras de acero diseñadas de acuerdo a la norma Nch 2369 Of. 2003.

La inspección de las instalaciones industriales afectadas dio un excelente resultado para esta norma, lo cual se debe principalmente a que ella estaba basada en el buen comportamiento que desarrollaron las instalaciones industriales durante el terremoto de Concepción del 21 de mayo de 1960, que también afectó el polo industrial de Talcahuano y Concepción.

Este buen comportamiento de la norma sísmica Nch 2369 Of. 2009 no se condice con los altos valores pagados por las empresas de seguros al sector industrial –U\$ 6.745.000.000–, lo cual posicionó al terremoto del Maule de 2010 como el mayor siniestro pagado por el sector asegurador en Sudamérica, en el cual la mayor parte del costo del siniestro se debe al ya mencionado lucro cesante.

La razón de estos altos valores se deben a:

- a) La caída de techos falsos en salas de control diseñadas de acuerdo a la norma de edificios Nch 433 Of. 96, sin exigencia de continuidad de operación, que implicó que los controladores abandonaran las salas sin seguir los protocolos de detención de las maquinarias en operación.
- b) La falla de estructuras y equipos que no fueron diseñadas de acuerdo a la norma Nch 2369 Of. 2003.

La detención de parte importante del sector industrial después del terremoto quedó evidenciada al constatar un menor consumo eléctrico, lo que en muchos casos no concuerda con lo informado por las industrias, las cuales mantuvieron sus ventas gracias a los stocks acumulados en un año de menor demanda como fue el de 2009. Adicionalmente, muchas de estas industrias se encontraban en suelos susceptibles de licuación y sufrieron por ello importantes daños.

Las industrias más afectadas fueron CAP, con su siderúrgica Huachipato, Vidrios Lirquén, la industria de la celulosa y la vitivinícola, junto a algunas centrales termoeléctricas.

No obstante este gran impacto, la economía chilena se recuperó rápidamente durante 2010, porque entre otras razones operó bien la norma Nch 2369 Of. 2003 y a que la gran minería del cobre no se vio afectada por el terremoto.

18. COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN PREFABRICADO

La industria del prefabricado en hormigón armado, que incluye hormigón pretensado y postensado, ha tenido un notable desarrollo en el país en los últimos 20

años. El diseño sísmico de estructuras de hormigón armado prefabricado se hace de acuerdo a las disposiciones de la norma Nch 23693 Of. 2003.

El comportamiento de las estructuras fue disímil. Mientras el comportamiento del prefabricado basado en uniones húmedas –el que considera hormigonado de las uniones en obra– fue excelente, el del prefabricado que considera uniones secas: soldaduras o apernados –sin hormigonado en obra– fue en general pobre, incluyendo numerosos colapsos estructurales inaceptables.

Muchas de estas fallas se debieron a incumplimientos de las disposiciones de la norma Nch 2369 Of. 2003 y/o a malas clasificaciones de los suelos de fundación. Esta es un área que requiere mejoramiento en el futuro y representa un nuevo desafío para la ingeniería sísmica chilena y la industria de la construcción.

19. EL COMPORTAMIENTO DE LOS PUENTES VIALES

El terremoto se caracterizó por el colapso de pocos, pero importantes puentes, pasos sobre nivel y pasarelas. Como se ha comentado, el diseño sísmico de estas estructuras se hace según el Manual de Carreteras del MOP.

La mayoría de los puentes en Chile, debido a las características hidráulicas de sus ríos, son simplemente apoyados. Los puentes y pasos sobre nivel colapsados tienen también esta característica. La principal razón del colapso de estos puentes es debido a la eliminación de las vigas transversales en el cabezo de los tableros, entre las vigas longitudinales prefabricadas pretensadas. El manual permitió eliminar estas vigas transversales en las zonas sísmicas 1 y 2 de menor y media demanda sísmica, lo cual no era la práctica chilena hasta 2005, que exigía siempre su presencia independiente de la zona sísmica. Después del terremoto del 2010 el MOP repuso esta exigencia de diseño.

Otra razón del colapso de puentes fue el uso de topes sísmicos débiles contraviniendo el Manual de Carreteras, que no permitieron la adecuada absorción de la energía sísmica del terremoto.

No obstante que el número de fallas de puente fue reducida, su falla fue sistemática, quedando por ella numerosos puentes en el país construidos con estas indeseables características esperando su colapso en futuros terremotos.

Debe recordarse que el colapso de estructuras no es aceptado en el diseño sísmico, porque de haber ocurrido el terremoto a horas del día, el colapso de estos puentes modernos habría contribuido significativamente a las víctimas fatales del terremoto.

El efecto del colapso de estos puentes tuvo un serio efecto en la conectividad del país. Concepción –la segunda ciudad de Chile– se mantiene hasta hoy día, a

un año de ocurrido el terremoto, con varios problemas de conexión por la falla de los puentes sobre el río Bío-Bío,

20. COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS AISLADAS: EL PRIMER EDIFICIO AISLADO

En general los edificios y hospitales aislados tuvieron un buen comportamiento durante el terremoto del 2010. Sin embargo, la mayoría de ellas estaban ubicadas en Santiago y Viña del Mar, lejos de la ubicación de las comentadas asperezas dominantes. Por ello se debe reevaluar la demanda considerada en la norma Nch 2475 Of. 2003.

Los profesores Moroni y Sarrazin (2010) llevaron a cabo el proyecto de un primer edificio aislado en Chile, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile en conjunto con el Ministerio de la Vivienda y Urbanismo. Este proyecto consideró la construcción en 1991 de dos edificios gemelos de 3 pisos, uno aislado y el otro sin aislar, en la comunidad Andalucía, en Santiago. Como estos edificios además se instrumentaron para comprender sus respuestas, los registros obtenidos en estos edificios durante el terremoto permitieron medir el grado de reducción de la demanda sísmica y su buena efectividad.

21. CRITERIO DE CONTINUIDAD DE OPERACIÓN TOTAL DESPUÉS DEL TERREMOTO

Entre las numerosas estructuras aisladas que tuvieron buen comportamiento durante el terremoto deben destacarse los puentes y entre ellos las estructuras elevadas del Metro de Santiago. En este caso el criterio de diseño sísmico es más estricto que el de la norma Nch 2369 Of. 2003 “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”, la cual solo exige continuidad de operación después del terremoto, pero acepta detenciones de operación de una semana a diez días para inspección y reparación. En el caso del Metro el criterio es de continuidad de operación total después del terremoto, lo que implica mantener los rieles alineados en kilómetros de puentes simplemente apoyados en la superficie.

Las estructuras aisladas del tramo elevado de la Línea 5 del Metro se comportaron sin agrietamiento durante el terremoto, permitiendo su uso normal un día después de ocurrido el fenómeno.

Sin lugar a dudas esta es una de las mayores lecciones del 27 de febrero: es posible hacer diseños sísmicos que permitan una continuidad de operaciones inmediatamente después de un sismo de 8.8.

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, ubicado en la comuna de Providencia en Santiago, es el único edificio instrumentado en Chile. Este edificio registró el terremoto en su subterráneo, en altura media y en el techo, pero lo más notable es que tuvo continuidad de operación total después del terremoto. Los registros obtenidos sumados a la continuidad total de operación plantean un nuevo desafío para el diseño sísmico de edificios altos sin aislación sísmica en Chile.

22. LOS NUEVOS DESAFÍOS Y CONCLUSIONES

El terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010, como la mayoría de los grandes terremotos del pasado, ha dejado importantes lecciones. Sin embargo la más importante de todas es que es posible desarrollar normas sísmicas sin colapso de estructuras en el área epicentral de terremotos de magnitud 8.8, caracterizados por su larga duración.

Finalmente, la réplica de 6.9 –del 11 de marzo de 2010– asociada a una falla superficial significó la sorpresa y nuevos desafíos en la evaluación de la amenaza sísmica de Chile, por su potencial mayor destructividad.

Los grandes daños no estructurales observados en el terremoto en edificios hacen necesario considerar un diseño sísmico por comportamiento que permita total operación después de ocurrido el terremoto. Ha quedado demostrado que es una aspiración posible.

La necesidad de la reconstrucción del patrimonio de adobe destruido, con soluciones menos vulnerables, plantea otro gran desafío a la ingeniería sísmica chilena.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Astroza, M., Cabezas, F., Moroni, M. O., Massone L., Ruiz S., Parra, E., Cordero F. and Mottadelli, A. "Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de febrero de 2010". <<http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/wp-content/uploads/2010/04/Informe-de-Intensidades-M.-Astroza-y-otros.pdf>>. Fecha de consulta: 31/10/2010.

- Boroscheck, R., Soto, P., León, R. y Comte, D. “Terremoto Centro Sur de Chile, 27 febrero 2010. Informe Preliminar N°5”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas <<http://www.renadic.cl>> Fecha de consulta: 6/4/2010.
- Moroni, M.O. y Sarrazin, M. “Primer Edificio con Aislación Sísmica en Chile”. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 122 (3): 99-106, dic. 2010.
- Ruiz, S., Kausel, E., Campos, J., Saragoni, G.R. y Madariaga, R. “Identification of High Frequency Pulses from Earthquake Asperities Along Chilean Subduction Zone Using Strong Motion”. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, pp.125-139.
- Saragoni, G.R. “The Giant 1960 Chile Earthquake, A Paradox of Earthquake Engineering. A Large Magnitude-Moderate Earthquake”. En: AGU Chapman Conference on Giant Earthquakes and Their Tsunami: mayo, 2010. Valparaíso, Chile.
- Saragoni, G.R. “Lesson of the Mw=8.8 Chile Earthquake”. En: Proc. Cost Action C26 Final Conference. Urban Habitat Constructions Under Castestrophic Events: septiembre, 2010. Naples, Italia. Keynote Lecture. Vol. 1, pp. 61, CRC Press.
- Saragoni, G.R., Lew, M., Naeim F., Carpenter L.D., Youssef N.F., Rojas F. y Schachter M. “Accelerographic Measurements of the 27 February 2010 Offshore Maule, Chile Earthquake”. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 19(8): 886-875, 2010.
- U.S Geological Survey 2010 Earthquake Hazard Program-Magnitude 8.8-offshore Maule, Chile. <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/egithenews/2010/us2010tfan/>>.