



Daños estructurales y lecciones del terremoto del 27/f en el Gran Concepción

Structural damage and lessons of the 27/f earthquake in the Greater Concepción

Fecha de entrega: 18 de Noviembre 2010

Fecha de aceptación: 30 de Diciembre 2010

Rodrigo Betanzo

Departamento Civil, Parés y Álvarez, Marco Polo 8939 Hualpén, Concepción, Chile. rodrigo.betanzo@pyaing.cl

El terremoto de Maule – Bío Bío, de magnitud momento $M_w = 8.8$ ocurrido el 27 de febrero de 2010, fue el quinto evento sísmico de mayor magnitud del cual se tenga registro a nivel mundial. Los daños en la infraestructura urbana e industrial en el Gran Concepción, segunda conurbación más importante del país, fueron considerables y diversos. Los principales daños se produjeron en edificios de más de 35 metros de altura, en elementos de hormigón armado de los primeros pisos debido a la falta de confinamiento de sus armaduras verticales. Fueron observados daños y colapso en casi la totalidad de las estructuras de albañilería sin reforzar y mal proyectadas además de fallas en los sistemas de anclaje a pedestales en estructuras industriales. Evidencias de licuación de suelo y asentamientos en rellenos mal compactados se produjeron en algunas zonas de la ciudad. Un mapa de daños fue elaborado con el fin de diferenciar los niveles de daño ocurridos en superficie. El análisis del mapa de daños muestra zonas en las cuales se apreció una concentración del daño que no discriminó el tipo de estructura. Finalmente, son compartidas algunas lecciones post-terremoto que al día de hoy en un amplio consenso, distintos profesionales y reconocidos expertos han podido obtener, las cuales marcarán cambios importantes en la ingeniería antisísmica chilena.

Palabras clave: daño estructural, norma sísmica, estructuras industriales, mapa de daño

The Maule – Bío Bío earthquake of moment magnitude $M_w = 8.8$ occurred on 27th February 2010 and was the fifth strongest seismic event ever recorded worldwide. The damage in urban infrastructure and industrial facilities was significant and diverse in the Greater Concepción, second metropolis of the country. The principal damages were observed in tall buildings over 35 metres. Reinforced concrete elements of the lower floors presented large damage due to a lack of confinement of vertical reinforcement. Also it was observed large damage on old masonry shear walls and in some anchorage systems to the pedestal of foundation in industrial buildings. Soil liquefaction and large settlements were observed in many places around the city. A Damage Map was developed to define different damage levels on the ground. The damage map indicated that there were zones with damage concentration independent of the type of structure. Finally some lessons obtained by qualified professionals about the earthquake ground shaking and as a result of the behaviour of the structures are presented. These recommendations will determine great changes in the Chilean Earthquake Engineering.

Keywords: structural damage, seismic code, industrial structures, damage map

Introducción

El terremoto de magnitud momento 8.8 y posterior tsunami que afectó la zona centro-sur de Chile el pasado 27 de Febrero del 2010, fue registrado como uno de los eventos sísmicos más grandes de la historia moderna. Posterior a los daños y ya transcurridos algunos meses de la catástrofe, es posible comenzar a obtener lecciones y planificar estrategias que nos permitan enfrentar los desafíos futuros en la región del Bío Bío y el país. Consideremos la

estadística popular que señala que ineludiblemente quien viva más de 50 años estará presente en al menos 2 terremotos de magnitud mayor a 7. Si se compara esta afirmación con la sismicidad documentada de nuestro país (historial de la cantidad de sismos que ocurren), se ve que en términos cuantitativos, al año ocurren en promedio al menos 1 evento de magnitud mayor a 6.0 en algún punto de la zona costera del país (SSN 2010; USGS 2010), clasificada por las normas chilenas antisísmicas como zona sísmica 3, la más expuesta a eventos de gran magnitud.

El tema sísmico parece cobrar importancia cada vez que ocurre un evento de gran magnitud. Sin embargo, mientras no ocurre dicho evento, se dispone de mucho tiempo para desarrollar las lecciones que quedan luego del terremoto. Tal fue lo que sucedió para el terremoto de la zona central en 1985. Posterior a este evento se lograron importantes avances en normas sismorresistentes en Chile además de propiciar conceptos y bases teóricas de cómo debía ser la filosofía del diseño sísmico en el país. Se pudieron obtener y analizar registros sísmicos los cuales hasta el día de hoy siguen entregando información valiosa. Esta filosofía marca la investigación y el desarrollo de la ingeniería antisísmica en países como Estados Unidos, Japón o Nueva Zelanda que al igual que Chile, poseen una larga historia sísmica. Del pasado terremoto es posible apreciar que las consecuencias que se derivan de un evento de gran magnitud, que ocurre cada cierta cantidad de años, marcan significativamente a sus habitantes y al entorno económico, productivo y social que lo rodea por lo que es muy importante y trascendental obtener la mayor cantidad de lecciones posibles.

Puntualmente este artículo pretende mostrar los principales daños que afectaron a las edificaciones del Gran Concepción y también poner en conocimiento una síntesis de las principales lecciones del punto de vista de la ingeniería antisísmica que han sido obtenidas hasta la fecha por reconocidos expertos nacionales y dadas a conocer recientemente. Todas ellas otorgan puntos de partida en diversos aspectos relativos a mejorar la calidad y el desempeño de las estructuras. También se pretende abrir debate sobre lo que nos falta, lo que se está haciendo bien, lo que debemos corregir y los desafíos futuros en materia de ingeniería antisísmica. Junto con lo anterior, se muestra también un mapa de daño estructural del sector céntrico de la ciudad de Concepción. Este último, entre otras aplicaciones, es información base para conocer cómo se mueve el suelo en cada sector de la zona catastrada. Técnicamente hablando, el mejor y más ilustrativo de los laboratorios de ingeniería antisísmica es la observación posterior del escenario real de los hechos.

Edificios de altura en el centro de Concepción

En muchos lugares instrumentados con acelerómetros (estaciones), donde el terremoto fue sentido con mayor intensidad, la información entregada por los registros

sísmicos mostraron que la demanda sobre las estructuras sobrepasó los valores espectrales de respuesta que actualmente se utilizan para el diseño sismorresistente en nuestras normas nacionales (Boroschek *et al.*, 2010). Aun así, el desempeño de la gran mayoría de las estructuras, salvo lamentables episodios puntuales, fue bueno del punto de vista del no colapso de los sistemas sismorresistentes, tal como lo define la filosofía de diseño de protección a la vida de las normas sísmicas. Sin embargo, en la ciudad de Concepción y alrededores, segunda zona más poblada del país y distante 105 kilómetros del epicentro del terremoto, se produjeron daños irreversibles en muchas estructuras, siendo especialmente afectadas aquellas de más de 30 metros de altura. Los mayores daños se localizaron en el sector céntrico de la ciudad donde pudieron identificarse sectores específicos en donde el movimiento del terreno fue mayor que en otros (ver mapa de daños en Figuras 23, 24 y 25).

La demanda sísmica, en muchas variables, sobrepasó a la norma de diseño sísmico de edificios NCh 433Of96. En Concepción centro, casi en toda su extensión, los edificios con mayores daños fueron aquellos de más de 30 metros de altura, registrándose severos daños en las líneas resistentes de los pisos basales y subterráneos. Desplazamientos sísmicos del suelo mayores a 2 m fueron registrados por los instrumentos, dando cuenta de que el espectro de diseño propuesto en la NCh 433Of96, derivado de registros mayoritariamente captados el año 1985 en la zona central, es totalmente diferente a la respuesta sísmica del suelo de Concepción. La demanda sísmica en Concepción Centro, para estructuras con períodos de vibración entre los 0,9 s y 1,5 s fue del orden de 3 veces mayor que el espectro de diseño de NCh 433Of96 para zona sísmica 3 y suelo tipo III, por lo que los sistemas sismorresistentes de estos edificios fueron exigidos al máximo de sus capacidades sismorresistentes (Boroschek y Contreras, 2010).

El tipo de daño más visible se manifestó en columnas y muros de primeros pisos incapaces de absorber rotaciones derivadas de los desplazamientos entre piso producidos por la gran demanda de desplazamiento sísmico impuesto al nivel basal (Bonelli 2010a). Un patrón importante, que pudo ser identificado y que tuvo directa relación con el nivel de daño de los sistemas estructurales, es la esbeltez global del edificio. Se entiende por esbeltez global de un edificio, en este caso, a la razón entre la altura total del

edificio **H** y la menor dimensión de la planta estructural o lado corto del edificio **b**. Se pudo comprobar que en el centro de Concepción edificios con una esbeltez H/b mayor a 2,5 sufrieron daños leves en sus ejes sismorresistentes pero importante daño no estructural, mientras que en edificios con una esbeltez global mayor a 3 se apreciaron daños importantes tanto en su estructura sismorresistente como en el contenido y en elementos no estructurales (ver Figura 1).

La esbeltez global del edificio incide directamente en las solicitaciones sísmicas de las columnas y muros de los primeros pisos. Una esbeltez mayor a 2,5 favorece grandes cargas cíclicas de compresión – tracción sobre los primeros pisos para contrarrestar el momento volcante sísmico total.

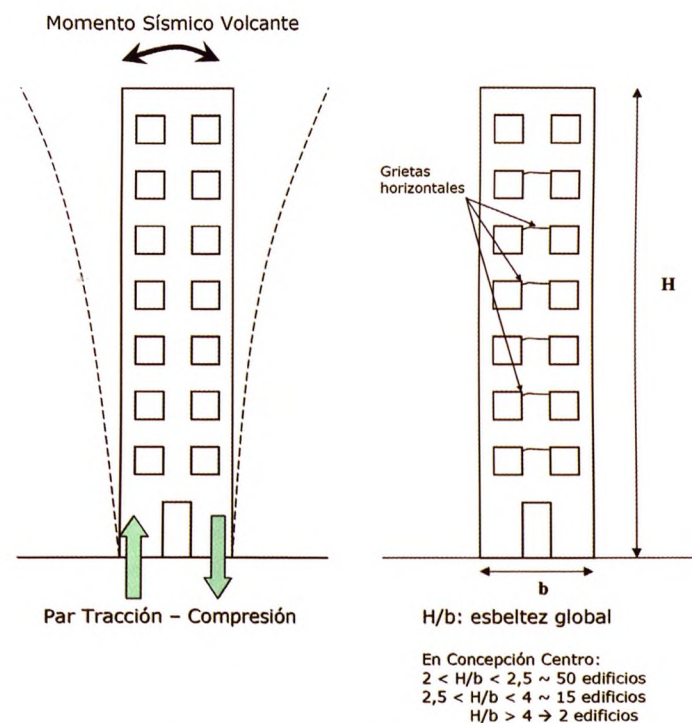


Figura 1: Esfuerzos basales y esbeltez global de un edificio

Fundamentalmente los daños en elementos verticales como columnas y muros se produjeron por un exceso de carga axial de compresión. En columnas de edificios de más de 15 pisos, la falla más frecuente fue el pandeo de las barras de acero de refuerzo por inadecuado o insuficiente confinamiento de la armadura vertical (Massone, 2010). En muros, los daños se concentraron en muros con secciones en planta en forma T o con cabezales. La Figura 2 muestra dos muros reventados de un estacionamiento de un edificio de 17 pisos. Se puede observar pandeo de armaduras verticales del muro. Además se puede

apreciar que aparentemente la cuantía de acero vertical es la apropiada, no así el confinamiento en la zona cabezal.

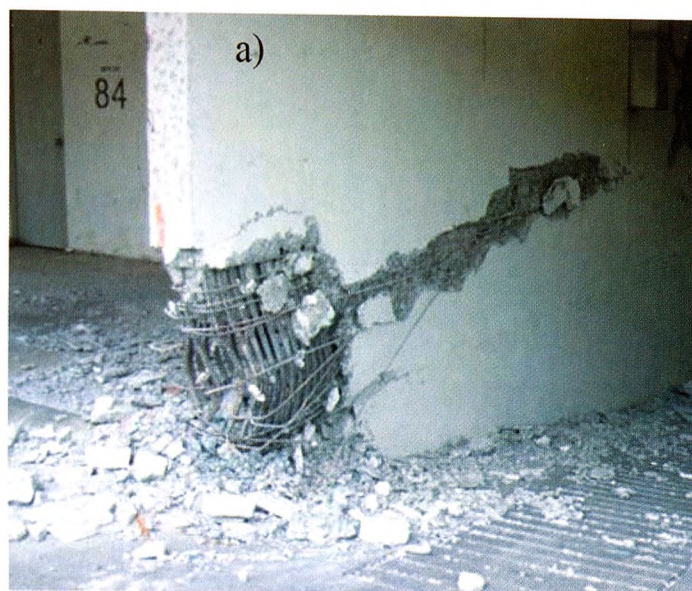


Figura 2: Muro de estacionamiento de primer piso edificio de 17 pisos

La Figura 3 muestra esta vez un muro también de primer piso en el estacionamiento, pero reventado en la parte superior. La falla ocurre en una línea resistente paralela y contigua al muro de la Figura 2 con hormigón molido por excesiva carga de compresión. La idea de limitar la carga axial en columnas y muros es no permitir que el hormigón alcance deformaciones de falla cercanas al 0.003.

La Figura 4 muestra el caso de muros de estacionamiento de un edificio de 12 pisos fundado en suelo blando. Las tres imágenes corresponden al mismo eje vertical. Debido al desplazamiento lateral de losas, los muros no son capaces de absorber el desplazamiento de entrepiso. La falla se concentra en las cercanías de las losas, cerca del empotramiento del muro, ocurre flexión en el eje débil.



Figura 3: Muro de estacionamiento de primer piso en una línea resistente paralela y contigua al muro de la Figura 2



Figura 4: Muros de un edificio de 12 pisos ubicado en suelo blando a) y b) falla en la base



Figura 4: Muros de un edificio de 12 pisos ubicado en suelo blando c) falla en la parte superior



Figura 5: Elevación lado corto edificio de 17 pisos

El edificio de 17 pisos de aproximadamente 48 m de altura con esbeltez $H/b \sim 3$, es nuevamente mostrado en la Figura 5, donde se ve la elevación del lado corto del edificio. La falla advierte el comportamiento de “viga en voladizo” debido al momento volcante del edificio completo. La Figura 6 muestra columnas perimetrales del mismo edificio con el hormigón molido, armadura vertical pandeada y cortada.

La Figura 7 muestra un edificio de 24 pisos de aproximadamente 50 m de altura con esbeltez $H/b > 4$. El edificio fue terminado en el año 2009 y se encuentra cubierto con paneles grises, por lo tanto no es posible ver agrietamientos o fallas menores. Sin embargo, en la Figura 7 aparece señalado con un círculo rojo la rotura de elementos resistentes. Se deduce que el daño corresponde a columnas del segundo y tercer piso debido a concentración de esfuerzos por momento volcante del edificio completo.



Figura 6: Columnas perimetrales falladas del edificio de 17 pisos, se observa pandeo de armadura vertical (Betanzo 2010)



Figura 7: Edificio de 24 pisos de no más de un año de construido presenta una rotura tapada por cubierta (Betanzo 2010)



Figura 8: a) Edificio de 11 pisos en la Plaza de la Independencia y b) piso 9 colapsado

En el caso de edificios de albañilería, colapsaron gran parte de las estructuras de 1 a 2 pisos que se encontraba mal proyectadas (no confinadas, sin reforzar), lo cual tiende a coincidir con antigüedades superiores a 15 años. En edificios de albañilería confinada bien proyectados se observaron agrietamientos menores en estructuras de hasta 6 pisos de altura.

La falla más significativa se registró en un edificio de 11 pisos cuyos últimos 3 pisos eran parte de una ampliación de albañilería con unidades de ladrillos con gran cantidad de huecos. Este edificio de 11 pisos, ubicado en la Plaza de la Independencia, es mostrado en la Figura 8. El piso colapsado es el piso 9, donde puede observarse que unidades de albañilería con gran cantidad de huecos no son adecuadas para cargas sísmicas. Astroza (2010) señala lo mismo, la excesiva cantidad de huecos disminuye

significativamente la resistencia del elemento ante cargas sísmicas de corte.

La Figura 9 muestra el colapso del primer piso de un edificio de albañilería de tres pisos. Se aprecia que el segundo nivel no presenta mayores daños.



Figura 9: Colapso de primer piso en edificio de albañilería de 3 pisos

Otro edificio de altura que presentó daños importantes en sus sistemas sismorresistentes fue una torre de oficinas de 22 pisos ubicada en la Avenida O'Higgins en el centro de la ciudad. Las Figuras 10a y 10b muestran 2 elevaciones del edificio en las cuales pueden apreciarse que en la primera de ellas existen variadas aberturas para ventanas y la segunda tiene como eje resistente un gran muro que recorre toda la altura del edificio. Debido a las características de la demanda sísmica en el lugar, puede haber existido una amplificación del efecto torsional en planta sobre el edificio completo. Evidencia de esto es que se apreciaron fallas tipo columna corta en el eje resistente perimetral del edificio.

La Figura 11a muestra fallas de columna corta en el eje perimetral del edificio y la Figura 11b muestra el colapso de columnas de entrepiso perimetrales lo que produjo caída parcial de losas con grandes luces libres. La increíble inclinación de estas losas también puede haberse visto favorecido por grandes aceleraciones verticales sumado a las aceleraciones horizontales amplificadas por el período de vibrar de la estructura que cae dentro del rango entre 0,9 s y 1,5 s, siendo justamente el rango de periodos más afectado por las características del movimiento.

Instalaciones industriales

También diversas instalaciones industriales del Gran Concepción se vieron severamente afectadas, especial-

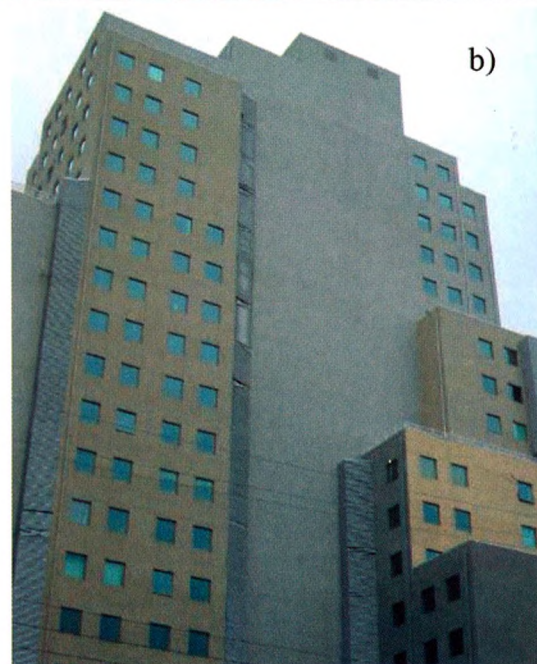
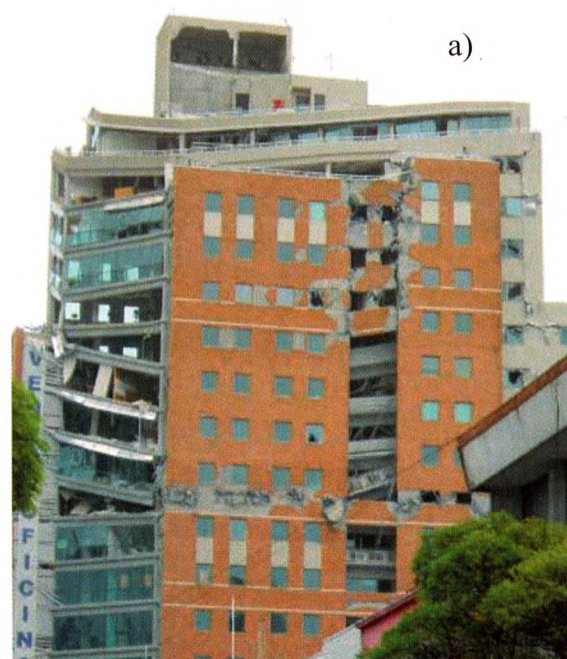


Figura 10: Vista frontal y posterior del edificio de Avenida O'Higgins

mente estructuras esbeltas tales como chimeneas, reactores y estanques, además de estructuras de hormigón prefabricado y edificios de albañilería. Sin embargo, en líneas generales las fallas del sector industrial fueron en su gran mayoría en elementos estructurales localizados y no en líneas resistentes completas. Las recomendaciones y disposiciones de la norma de diseño sísmico para instalaciones industriales, NCh 2369Of2003, han resultado satisfactorias en lo referente a su filosofía de diseño (Verdugo, 2010).

Las fallas más comunes en el sector industrial se produjeron principalmente en estanques de almacenamiento, pernos



Figura 11: a) Fallas de columna corta en eje perimetral y b) colapso de columnas de entrepiso perimetrales provoca caída de losas con grandes luces libres

de anclajes y estructuras prefabricadas. En el caso de estanques y torres de proceso se observaron daños en todo tipo de estanques, ya sea montados sobre torres con arriostramientos, con faldones, con mantos anclados a piso y con patas. Al día de hoy el sector productivo en Chile concuerda en que debe desarrollarse una línea de investigación cada vez más fina para reducir los daños en la producción por la falla de estanques de almacenamiento.

En el caso de los pernos de anclaje se produjeron múltiples fallas en pernos de anclaje y también ocurrieron daños no menores en pedestales de hormigón armado. Esto último atribuible principalmente a la poca distancia al borde de los pernos de anclaje y en algunos casos al insuficiente empotramiento de los pernos en el hormigón. Las guías de diseño AISC recomiendan que el empotramiento de los pernos con tuercas y/o golillones deben empotrarse una longitud tal que la capacidad en tracción del pedestal sea

capaz de tomar al menos una carga de tracción equivalente a $1,25F_y$, donde F_y es la tensión de fluencia del perno de anclaje para así evitar fallas por arrancamiento en caso de un evento fuerte como el registrado. Así mismo una adecuada distancia al borde reduce la probabilidad de generar fallas por estrangulamiento en el hormigón debido a las cargas de corte que toman los pernos. En cuanto a los pernos con gancho, en muchos casos quedó demostrado que son incapaces de tomar grandes cargas de tracción debido a que su capacidad queda dada por el hormigón encerrado en el área del gancho. Comentario aparte merece el comportamiento de pernos de anclaje post-instalados ya sea pernos químicos o de expansión. El fuerte sismo puso en evidencia que se necesita mayor regulación sobre el proceso de instalación de los pernos así como del real alcance de su uso y del comportamiento en un evento sísmico extremo. Actualmente muchos proveedores de estos pernos están innovando en nuevos sistemas de anclajes post-instalados que están diseñados para resistir cargas sísmicas de mayores magnitudes. En cuanto a los equipos eléctricos y mecánicos la principal evidencia que dejó el terremoto, mayoritariamente aquellos traídos de países no sísmicos y que no cuentan con certificación o validación sísmica en Chile, presentaron fallas en sus sistemas de anclaje o en ciertos elementos estructurales.

En estructuras prefabricadas también se registraron daños asociados a las uniones de los elementos. En muchos casos quedaron en evidencia dos aspectos. El primero se refiere a las conexiones entre elementos estructurales y entre elementos estructurales y no estructurales las cuales, en algunos casos, fueron materializadas con elementos de anclaje muy superficiales o bien con elementos de forma inadecuada. El segundo tiene relación con la insuficiente longitud de consolas de apoyo que permitan absorber las demandas de desplazamiento sísmico (*gap* de deformación), tal como ocurrió en el acceso principal del puente Llacolén y en muchos accesos similares de autopistas urbanas e interprovinciales. De todas formas el comportamiento global de las líneas resistentes de estructuras prefabricadas bien proyectadas fue satisfactorio en aquellos casos en que estuvo presente una buena estructuración del sistema sismorresistente.

La Figura 12 muestra el colapso de una línea de silos de almacenamiento de trigo con manto continuo a piso, soldado. La viga de acople en el techo de la línea posterior de silos evitó una falla generalizada.



Figura 12: Colapso de silos de almacenamiento de trigo en sector Costanera

La Figura 13 muestra una falla de tipo “pata de elefante” en un estanque con manto continuo. La Figura 14a muestra la inclinación de un reactor químico de aproximadamente 40 m de altura ubicado en zona sísmica 3 suelo tipo III, de acuerdo a la NCh 433Of96. Esta inclinación fue debida a la fluencia del manto en la parte inferior del reactor. Las Figuras 14b y 14c muestran la fluencia del manto en la base del reactor que proveyó de gran ductilidad a la estructura permitiendo que no colapsara abruptamente. Notar que no se advierte evidencia de falla en anclajes.



Figura 13: Falla tipo “pata de elefante” en estanques con manto continuo (tomado de Herrera 2010)

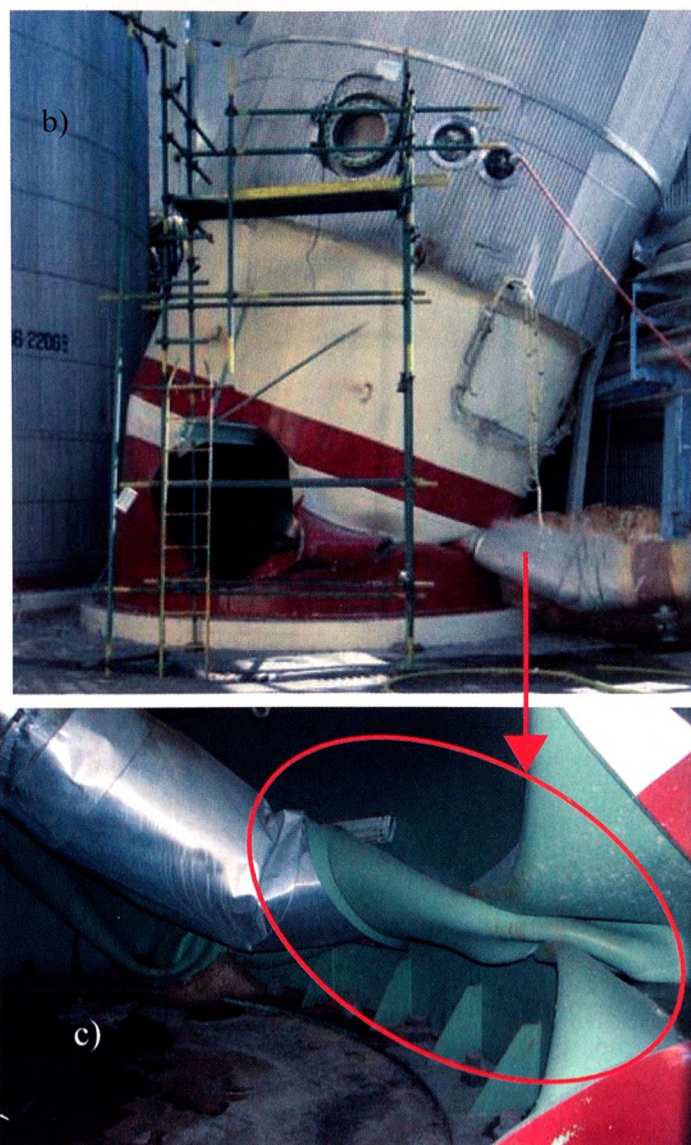


Figura 14: a) Inclinación de reactor químico, b) y c) fluencia del manto en la base del reactor

La Figura 15 presenta el caso de colapso de un elemento de almacenamiento debido a la falla de los anclajes de fundación. La Figura 16 muestra una falla frágil en diagonal sísmica. Según la norma Nch 2369Of2003, diagonales sísmicas deben conectarse para resistir el 100% de la capacidad en tracción del perfil.



Figura 15: Falla en pila de almacenamiento



Figura 16: Falla frágil en diagonal sísmica (tomado de Hidalgo 2010)

La Figura 17 muestra una falla por inestabilidad de diagonal sísmica con sección cajón generada a partir de dos perfiles canal. La Figura 18 muestra el colapso de altillo de hormigón armado con gran carga de peso propio. Notar la gran pérdida de hormigón en las columnas situadas al lado izquierdo. La Figura 19 muestra ejemplos de innumerables fallas de pedestales de hormigón armado encontradas.



Figura 17: Falla por inestabilidad de diagonal sísmica (tomado de Hidalgo 2010)



Figura 18: Colapso de altillo de hormigón armado con gran carga de peso propio (tomado de Hidalgo, 2010)



Figura 19: Fallas en pedestales de hormigón armado



Figura 19 (continuación): Fallas en pedestales de hormigón armado

La Figura 20 muestra anclajes deficientes entre elementos estructurales y no estructurales prefabricados, debido a lo cual planchas laterales y de techumbre se desprendieron.



Figura 20: Anclajes deficientes en elementos prefabricados

Las estructuras de puentes sobre el río Bío Bío, en Concepción, se vieron seriamente dañadas. El puente Llacolén es el más nuevo construido sobre el río Bío Bío en el año 1999. La Figura 21 muestra el colapso de toda una línea de vigas que soporta el tablero en el sector de aproximación al acceso del puente Llacolén. Desmontaje producido por desplazamiento en sentido longitudinal y transversal del viaducto. Notar la diferencia del tipo o sección de las vigas al lado izquierdo y derecho de la cepa de apoyo (Figura 21a).



Figura 21: Colapso vigas y tablero de aproximación en acceso puente Llacolén, a) cepa de apoyo



Figura 21: Colapso vigas y tablero de aproximación en acceso puente Llacolén, b) caída en apoyo de estribo del puente

La Figura 22 muestra el colapso completo de una de las secciones del puente Viejo sobre el Bío Bío. Notar que los tableros descansan sobre las cepas sin restricción al movimiento lateral. Es por ello que se produjo un mecanismo de falla de tipo dominó, al caer un tablero golpeaba la siguiente cepa y así sucesivamente. También observar cepas cortadas horizontalmente debido a la caída de tableros. Este puente estaba clausurado al paso de vehículos desde el año 2002.



Figura 22: Colapso de tableros y cepas del Puente Viejo sobre el río Bío Bío

Mapa de daños del centro de la ciudad

El actual paisaje urbano de la ciudad de Concepción es en gran parte resultado de los frecuentes terremotos que la

han afectado desde su fundación en 1550 en lo que hoy es Penco y en su actual emplazamiento después del terremoto de 1751. A diferencia de otras ciudades, Concepción no tiene construcciones que superen los 100 años, muy pocas han sobrevivido a los eventos sísmicos que han ocurrido en este período de tiempo. Los terremotos han sido factor importante en la transformación de la ciudad puesto que cada vez que ha sido destruida por un sismo, su reconstrucción ha dado origen a una nueva ciudad. Luego del terremoto del 27 de febrero hoy puede apreciarse que esto es verdaderamente cierto. Grandes claros en manzanas, en que antes se encontraban diversas edificaciones, pueden apreciarse en un rápido recorrido por el centro de la ciudad.

Lo que diferencia el cambio actual de la ciudad post-terremoto, comparado con eventos anteriores, es que al día de hoy existen grandes edificios de altura, resultado del desarrollo inmobiliario de las últimas dos décadas. Los daños en las estructuras que dejó el pasado terremoto de febrero fueron muy variados y afectaron tanto a edificaciones nuevas como antiguas. Viviendas de albañilería mal proyectadas y de construcción deficiente colapsaron a raíz del terremoto. Daños en casas con construcciones modernas pero emplazadas en rellenos de suelos mal compactados o pertenecientes a antiguas zonas de escurrimiento superficial o humedales, fueron severamente afectadas por agrietamientos y asentamientos derivados del mal comportamiento sísmico del suelo. Daños en el contenido de edificios, principalmente en elementos no estructurales tales como tabiques, ventanales, muros cortina, cielos falsos e instalaciones fueron apreciables en un gran porcentaje en edificios habitacionales y de oficinas. En edificios altos, el patrón común fue un fuerte daño estructural en elementos resistentes de los primeros pisos. En resumen, un amplio espectro de estructuras resultó en mayor o menor medida con algún tipo de daño.

La planificación urbana resulta vital a la hora de tomar decisiones referentes al crecimiento y desarrollo urbanístico de una ciudad. En países sísmicos como Estados Unidos existen detalladas zonificaciones sísmicas de los sectores de la ciudad llegando a clasificar e identificar sectores en donde se ha registrado a lo largo de los años el movimiento del terreno llegando a determinarse que en algunos sectores el movimiento es más severo que en otros, para el mismo evento sísmico. Esta zonificación permite a las autoridades planificar la expansión de la ciudad y tomar medidas

de mitigación de riesgo sísmico necesarias para las edificaciones futuras e igualmente prevenir potenciales daños mayores a las estructuras ya existentes. Estos mapas de zonificación es posible generarlos a partir de mapas de daños observados en superficie post-terremotos (*Damage Map*). Luego del análisis de los datos recopilados en la etapa de catastro de daños, es posible obtener un segundo nivel de zonificación llamado *Shaking Map* (mapa de movimiento del terreno). Este *layout* de la ciudad entrega información técnica de cuán fuerte fue el movimiento del terreno en un determinado lugar. Esta valiosa información, obtenida a partir de observaciones en terreno, es de vital importancia para la calibración de modelos matemáticos que puedan hacerse de la respuesta del suelo de fundación.

La investigación abordada en este estudio permitió generar 3 mapas de la ciudad con catastros realizados pocos días después del evento mayor del terremoto. El primer mapa

es el mapa de daño que se genera a partir de la inspección visual de las estructuras luego del terremoto. El segundo mapa destaca zonas del mapa de daños en donde se hace repetitivo un cierto nivel de daño y finalmente un tercer mapa que muestra la calidad de la construcción, también clasificada en niveles, en el sector considerado. A continuación se presentan los 3 *layouts* de la ciudad que describen en un primer nivel el comportamiento sísmico global del sector céntrico de Concepción.

El *Damage Map* mostrado en la Figura 23 es un catastro de los daños observados en superficie. Para definir el mapa se requiere fijar niveles de daño que reflejen el nivel de alteración de la estructura post-evento sísmico. Se entiende por daño estructural toda manifestación física en la estructura o en elementos de ella que produce alteración en sus sistemas resistentes de cargas (gravitacionales, sísmicas, viento, operacionales, etc.), y que afectan en mayor o menor grado su funcionalidad.

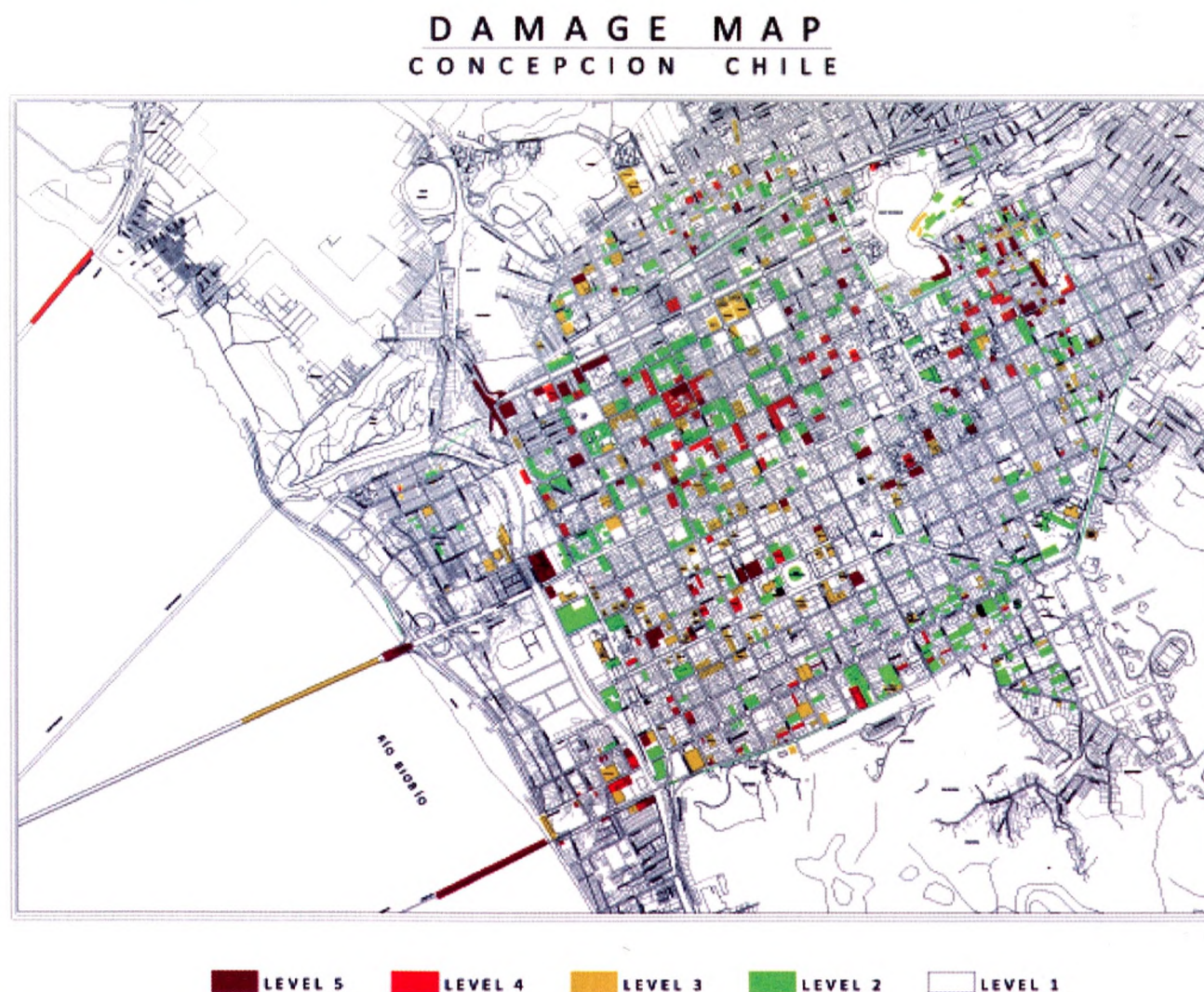
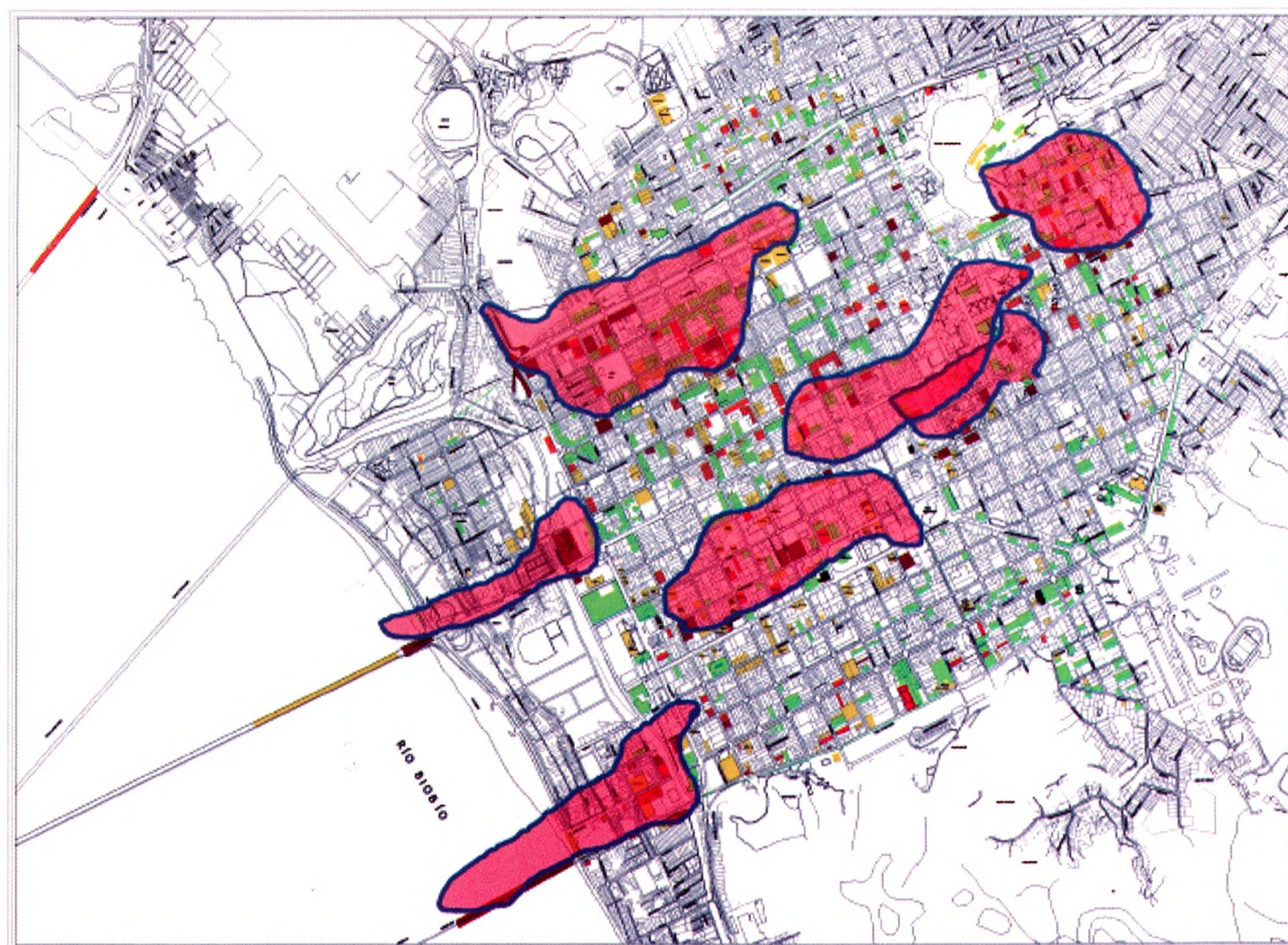


Figura 23: *Layout* general de daños de Concepción Centro. Nivel 1 (blanco) corresponde al nivel sin daño o daño leve, Nivel 5 (rojo), corresponde al nivel de daño colapso total.

El material fotográfico disponible, la inspección visual directa en terreno post-terremoto y las evaluaciones hechas por la autoridad pertinente (I. Municipalidad de Concepción, Cuerpo de Bomberos de Concepción y Ministerio de Obras Públicas), constituyen la principal fuente de información para calificar el daño en superficie. Para generar criterios de evaluación con cierto grado de objetividad se tomará en cuenta lo expuesto en la norma chilena de Escala de Fenómenos Sísmicos. En este estudio, debido al gran volumen de edificaciones que se ubican en el centro de Concepción, se definieron cinco niveles de

daño. Idealmente, y en el caso de estudios de zonificación sísmica con tiempos de desarrollo más prolongado, es frecuente que se utilicen entre 12 a 13 niveles de daño. En la escala simplificada utilizada en este estudio, se incorporan los doce niveles de la escala de fenómenos sísmicos Mercalli, adaptadas a los daños estructurales de las construcciones en superficie. De forma general, y según los criterios utilizados por la autoridad local para el reconocimiento y evaluación en terreno, el daño de manera cualitativa puede clasificarse en colapso total, daño severo con riesgo de colapso, daño fuerte, daño moderado, daño leve y sin daño.

DAMAGE MAP CONCEPCION CHILE



LEVEL 5 LEVEL 4 LEVEL 3 LEVEL 2 LEVEL 1

Figura 24: Sectores más afectados del centro de Concepción en secciones rosadas

El daño estructural registrado en las edificaciones del perímetro de estudio fue clasificado en 5 niveles siendo el nivel 1 el que presenta el menor daño y el nivel 5 el de mayor daño (ver Tabla 1). La escala de daño estructural en sí no da cuenta del comportamiento sísmico de los suelos de fundación sobre el cual se encuentran las edificaciones sino que entrega información sobre el desempeño de las diferentes estructuraciones y materiales de construcción en superficie. Además constituye un punto de partida para elaborar un mapa de movimiento del terreno (*Shaking Map*). La Figura 24 presenta una sectorización en color rosado de las áreas más fuertemente afectadas de la ciudad. Dentro de estos sectores se pueden destacar el eje de calle Barros Arana entre Av. Prat y Castellón, el eje de calle Freire entre Av. Paicaví y Tucapel, el eje de calle Manuel Rodríguez entre Av. Prat y Castellón y los ejes de calle Prieto, Cruz, Bulnes entre Anibal Pinto y Rengo. Todos

estos ejes son paralelos y parten desde Prat próximo al río y continúan alejándose del río hacia la derecha en la Figura 24.

Tabla 1: Escala de daños utilizada en la investigación

NIVEL	ESPECIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO
1	Sin daño o daño leve	Construcciones que no presentaron daño o daños menores. Existe leve agrietamiento en muros perimetrales y en elementos de sistemas resistentes aunque éstos se conservan íntegros. Existe agrietamiento menor en encuentros de muros resistentes y tabiquería. Funcionalidad normal.
2	Daño Moderado	Muros de albanilería armada y confinada con grietas apreciables pero poco profundas. Desprendimiento de algunos elementos de techumbre tales como tejas o planchas de zinc. Desprendimiento de porcelanatos, recubrimientos y revestimientos de muro y pilares. Grietas apreciables en cajas de escalas y vigas de acople. Agrietamiento en antepechos y dinteles. Funcionalidad normal a poco limitada.
3	Daño Fuerte	Daño considerable en líneas resistentes y muros de corte, colapso parcial de sistemas resistentes. Gran daño en fachadas panderetas y muros de albanilería. Daño considerable en losas y sistemas de diafragmas rígidos de piso. Daño considerable en tabiquería y muros divisorios. Fallas por estrangulamiento en tabiquería y muros de edificios. Daños por asentamientos diferenciales. Estructuras con riesgo de colapso ante réplicas de intensidad moderada a fuerte. Es necesario un estudio avanzado para determinar su recuperación o demolición. Fluencia de armaduras en pilares y en elementos puntuales pertenecientes a las líneas resistentes. Funcionalidad limitada.
4	Daño Severo	Daño irreversible a tal punto de inutilizar la estructura y sus instalaciones. Grietas profundas por corte en muros de albanilería. Desnivel y agrietamiento considerable en losas de piso y sistemas de diafragmas. Elementos de líneas resistentes parcialmente colapsados y desaplomados con deformaciones apreciables e irreversibles. Estructuras dañadas por grandes asentamientos producidos por licuación de suelo. Funcionalidad muy limitada a nula.
5	Colapso	Colapso total de la estructura. Se incluyen colapso total de estructuras de albanilería (fallas por corte y vaciamiento) y colapsos de fundaciones de estructuras de madera.

SEISMIC CONSTRUCTION QUALITY MAP
CONCEPCION CHILE
(MARCH, 2010)

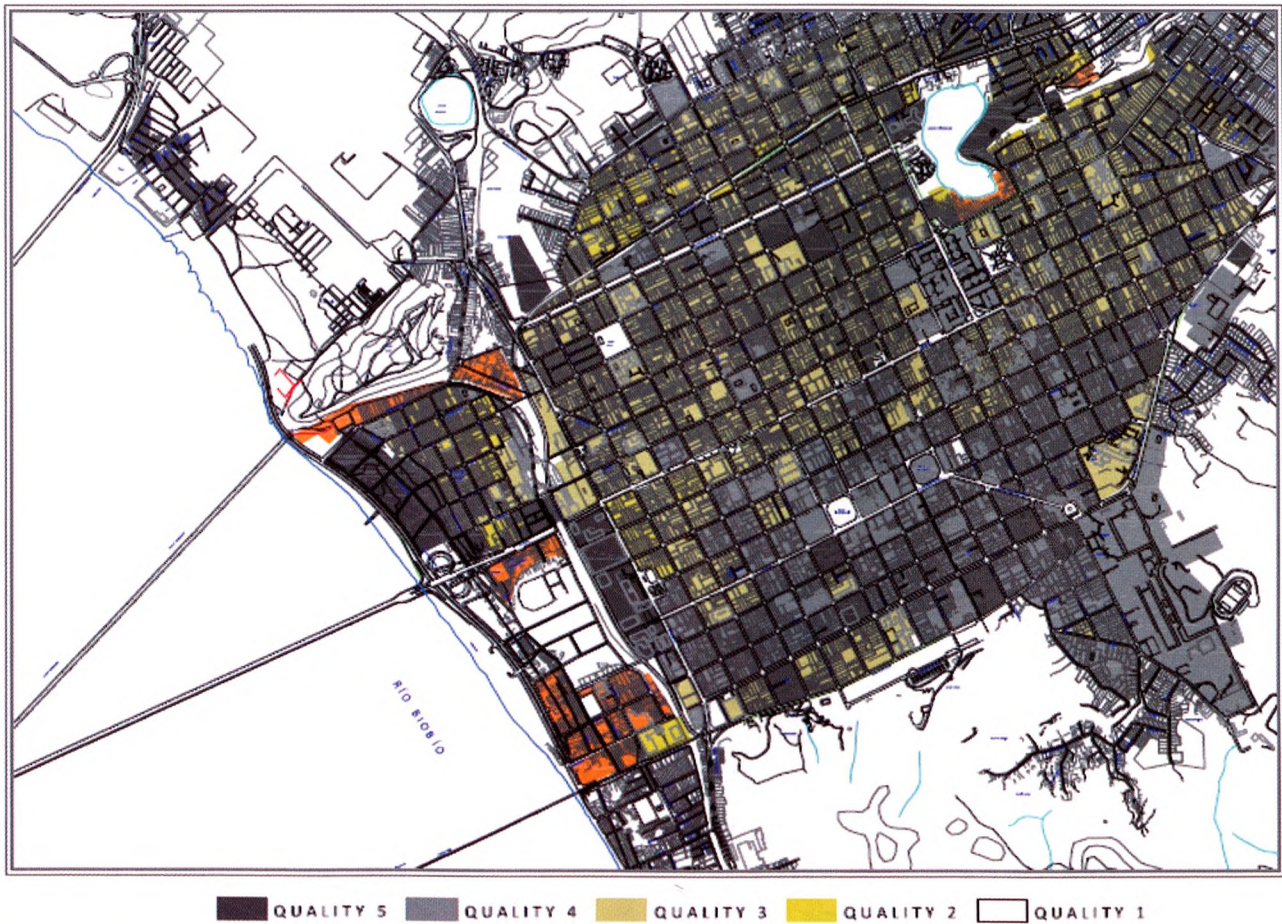


Figura 25: Mapa de calidad de las edificaciones en el perímetro analizado. Calidad 5 (gris) representa a edificaciones predominantemente de hormigón armado y/o acero estructural con diseño consolidado de ingeniería.



Una primera forma de contrastar la información recopilada en terreno post evento sísmico, es comparar el nivel de daño registrado en superficie con la calidad de construcción de las edificaciones y la materialidad de las estructuras. Las actuales técnicas de construcción han disminuido enormemente los daños de las viviendas frente a los terremotos a lo largo de los años, situación que se puede apreciar comparando los daños producidos por los dos eventos más intensos vividos en la zona en el siglo XX (1939 y 1960). Al superponer la información del mapa de daños con el mapa de calidad de construcción puede verse que para este evento sísmico, a pesar de que el centro de la ciudad posee un alto porcentaje de edificaciones con buena calidad de diseño y construcción sigue existiendo un alto porcentaje de incertidumbre en el desempeño sísmico de algunas estructuras. Esto último es consecuente con el hecho de que existieron edificios con diseños más actuales y que superan el promedio de altura de la mayoría de los edificios, que tuvieron grados de daño nivel 3 y 4, e incluso nivel 5 correspondiente al caso de 1 edificio colapsado (ver Figura 25).

Hacia el futuro

Modificaciones en normas post-terremoto

La magnitud del terremoto y el comportamiento de muchas estructuras obligan a repasar y revisar ciertos aspectos de las normas sísmicas de diseño estructural y también las recomendaciones de detallamiento de elementos estructurales. El pasado mes de noviembre en la ciudad de Santiago un connotado grupo de ingenieros expertos en análisis y diseño, dieron a conocer una serie de medidas que afectarán el diseño sísmico de edificios y estructuras en general en los próximos años, dentro de las cuales pueden destacarse las siguientes:

-Se modificarán por decreto especial las normas NCh430 “Diseño de hormigón armado” y NCh433 “Diseño sísmico de Edificios”. Se introducirán cambios en el detallamiento de elementos de hormigón armado y espectros de diseño, respectivamente.

- En el caso de la norma NCh430 se adoptarán como disposiciones oficiales las recomendaciones del código ACI 318-2008 (Yañez, 2010). Dentro de los cambios más significativos se incluyen limitaciones para deformación en zonas críticas de muros de ejes sismorresistentes (deformación en compresión menores a 0.003 y

deformaciones para el acero en tracción mayores a 0.004). Estas limitaciones impondrán que el diseño de elementos como pilares y muros quede por debajo de la condición de balance en el diagrama de interacción. En términos prácticos se pretende asegurar que el elemento no quede diseñado por compresión (falla frágil). Junto con esto, también se agrega una disposición que limita la separación entre armadura de confinamiento en zonas críticas de muros sismorresistentes con el fin de evitar el pandeo por compresión en carga cíclica de las barras de refuerzo longitudinales (Bonelli, 2010b). Del punto de vista del análisis estructural, se requiere que los edificios sean analizados con los grados de libertad suficientes y que describan el real comportamiento como conjunto de varios elementos. Esto último implica, por ejemplo, diseñar los muros de secciones con alas (muros sección T, L o C), sin utilizar simplificaciones en elementos rectangulares.

- En el caso de la norma de diseño de edificios, NCh 433, se modifica de forma significativa el espectro de diseño. Los cambios serán más notorios para estructuras de períodos altos, mayores a 1 segundo. La consecuencia más inmediata de la modificación del espectro se manifestará en un aumento significativo del momento volcante sísmico sobre la estructura. También se reformula totalmente la clasificación de suelos, la cual se hará principalmente por velocidad de onda de corte (Verdugo, 2010). Se exigirá prospectar a lo menos 30 m por debajo del sello de fundación. Durante los próximos dos años se aceptará obtener correlaciones entre la velocidad de onda con otros parámetros del suelo. Luego de este período de tiempo, serán obligatorias mediciones in situ de la velocidad de onda de corte. Pendiente queda la clasificación para tipo de suelo III-B (Concepción) ya que los registros del 27/F, totalmente atípicos y fuera de todo rango esperado, requieren de más tiempo de análisis.

Propuestas y desafíos futuros

Apuntar a los desafíos técnicos que significa convivir con sismos de la magnitud y frecuencia que se producen en nuestro país es asumir que un país sísmico como el nuestro, necesita cada vez más investigación y profesionales competentes dedicados a asumir estos desafíos. En particular, de lo ocurrido en Concepción, las lecciones que se deben adquirir apuntan principalmente a reducir la incertidumbre del comportamiento sísmico de los edificios de altura, mejorar métodos constructivos y de

detallamiento en general, profundizar las fundaciones en terrenos de baja capacidad de soporte. También contemplar el uso de técnicas de mejoramiento de suelos sueltos o blandos. Aumentar el control e inspección en terreno.

Las labores de inspección en terreno deben tender a ser cada vez más técnicamente competentes en cuanto al detallamiento constructivo de los elementos estructurales, como por ejemplo la colocación de las armaduras, en el caso de los elementos de hormigón armado. En cuanto a los edificios de altura, especial cuidado debe ponerse en verificar el momento volcante sísmico de edificios esbeltos y en estimar la real demanda de desplazamientos que el sismo impondrá en el lugar. Junto a esto, el diseño y estructuración deben favorecer el limitar las cargas de compresión en columnas y muros de los primeros pisos.

Finalmente, a continuación se enumeran una serie de lecciones y propuestas que pretenden abrir el campo de la investigación y de sacar el máximo aprendizaje post-terremoto:

- No escatimar en invertir recursos económicos, técnicos y humanos, destinados a investigar en reducir las incertidumbres de la respuesta sísmica de cada zona de nuestro país. Invertir en el cómo mejorar e implantar filosofías de diseño cada vez más localizadas debido a la diversidad de nuestro país y a la diversidad en las características de los sismos que se producen. Urbanística y arquitectónicamente un edificio puede tener características similares al emplazarlo en Providencia o en Concepción, no así su comportamiento sísmico.

- Se requiere mayor instrumentación sísmica en el país. Cada registro es conocer un poco más sobre “cómo es el movimiento” en una zona determinada. No sería descabellado pensar en proponer una normativa tendiente a incluir el uso obligatorio de acelerómetros en ciertos proyectos.

- La magnitud de los daños registrados después del terremoto deben generar constante debate e intercambio tecnológico sobre cómo caracterizar la respuesta sísmica de una determinada zona, los diseños y las estructuraciones de los edificios de altura, los estudios de mecánica de suelos y geotecnia y la labor de la inspección técnica en las etapas de construcción y montaje.

- Es de vital importancia enseñar y capacitar a las

generaciones futuras de profesionales, de tal forma de ampliar y compartir el conocimiento generado en universidades, trabajando en conjunto con sectores público y privado.

- Invertir en profesionales, conocimiento y tecnologías de aislamiento sísmico para enfrentar desafíos de crecimiento de nuestro país. Lo requerirán obras críticas como futuras centrales energéticas de toda índole, el desarrollo inmobiliario, la diversificación de la producción y la minería.

- Lograr que las técnicas de aislamiento sísmico alcancen a las viviendas sociales y a proyectos de uso público. Se cree que es muy factible lograr introducir paulatinamente estas tecnologías. Actualmente una connotada empresa del diseño y aislamiento sísmico en conjunto con el MINVU de la región de O'Higgins han generado un proyecto para reconstruir un condominio de viviendas sociales en la ciudad de Santa Cruz (edificios de albañilería), con tecnología de aislamiento sísmico.

Agradecimientos

La recopilación fotográfica de este artículo fue posible gracias a fotos aportadas por los mismos vecinos del Gran Concepción y de manera especial por el Ingeniero Civil y voluntario de la 7a Compañía de Bomberos de Concepción, Alfredo Hernández Madrid. También se agradece al equipo de profesionales que realizaron el Mapa de daños del centro de Concepción, especialmente al sismólogo de la Universidad de Maryland, Dr. Nick Zoa, al Geólogo José Miguel López y el Arquitecto Jaime Salazar Lagos.

Referencias

- Astroza, M. (2010). Efectos sobre edificios de albañilería. X Congreso ACHISINA, Santiago, 27 de Mayo de 2010
- Betanzo, R. (2010). Daños del terremoto del 27/F en el Gran Concepción urbano e industrial. X Congreso ACHISINA, Santiago, 27 de Mayo de 2010
- Bonelli, P. (2010a). Exigencias necesarias para el buen comportamiento de edificios de Hormigón Armado. Seminario Efectos del Terremoto en el nuevo diseño sísmico y estructural en Chile, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile ICH. 11 Noviembre de 2010.
- Bonelli, P., (2010b). Modificaciones propuestas a las normas NCh 433 y NCh 430. X Congreso ACHISINA, Santiago, 27 de Mayo de 2010.



Boroschek, R. y Contreras, V. (2010). Registros del 27/F Nuevas propuestas para normativa. Seminario Efectos del Terremoto en el nuevo diseño sísmico y estructural en Chile, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile ICH, 11 Noviembre de 2010

Boroschek, R., Soto, P., León, R. y Comte, D. (2010). Terremoto Centro Sur Chile 27 de Febrero de 2010. Informe Preliminar N°4. Departamento de Ingeniería Civil y Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, 5 de Abril de 2010

Herrera, R. (2010). Daños observados en estructuras de acero. X Congreso ACHISINA, 27 de Mayo de 2010.

Hidalgo, P. (2010). Experiencia sismo 27.02.10 ARA WorleyParsons estructuras industriales. 20 de Abril de 2010.

Massone, L., (2010). Daños en edificios de hormigón armado, relación con el diseño y análisis. X Congreso ACHISINA, Santiago, 27 de Mayo de 2010

SSN Servicio Sismológico Nacional (2010). <http://ssn.dgf.uchile.cl/>

USGS United States Geological Survey (2010). Significant Earthquakes, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>

Verdugo, A. (2010). Comentarios para una revisión de la norma NCh 2369 of.2003. X Congreso ACHISINA, Santiago, 27 de Mayo de 2010.

Verdugo, R. (2010). Mejoras a la clasificación de suelos basada en la experiencia del 27/F. Seminario Efectos del Terremoto en el nuevo diseño sísmico y estructural en Chile, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile ICH. 11 Noviembre de 2010.

Yañez, F. (2010). ACI 318-08 como nueva exigencia para el 2010 cambios respecto al ACI 2005. Seminario Efectos del Terremoto en el nuevo diseño sísmico y estructural en Chile, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile ICH. 11 Noviembre de 2010.

EMPRO Ltda.

Ensayos de Materiales y Prospecciones Limitada

Suelos – Hormigones - Asfaltos

25 años *al servicio de la región y el país*

Ingeniería

Mecánicas de suelos

Fundaciones

Taludes

Mejoramiento de Terreno

Control de Obras Civiles

Densidades In Situ

Hormigones

Asfaltos

Prospección de Suelos

Sondajes Marítimos

Sondajes Terrestres

Calicatas

Laboratorio Acreditado bajo NCh-ISO 17025 y registro vigente MINVU

Paicaví #3001 / Fono 041-2741727 / e-mail: empro@entelchile.cl / Concepción