
Estudio del comportamiento de edificios de hasta cuatro niveles en el sismo de Chile de 2010

C.Julian², G.Gerbaudo^{1,2}, C.Gerbaudo²

¹ Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, e-mail: ggerbaudo@efn.uncor.edu, web: <http://www.efn.uncor.edu>.

² INGROUP, Oficina de Proyectos, e-mail: ingroup@ingroup-op.com.ar, web: <http://www.ingroup-op.com.ar>

RESUMEN

El día 27 de Febrero de 2010 se produjo uno de los sismos de mayor magnitud ($M_w = 8.8$) registrados en el mundo. Este sismo ocurrió en la Región del Maule de Chile y sus efectos fueron sentidos a lo largo de 600 km de la costa central de dicho país. Los daños ocasionados por este sismo abarcaron todo tipo de estructuras. Este trabajo pretende relacionar los daños relevados, por una expedición de profesionales argentinos, en edificios educacionales de diferente sistema estructural con el estado del arte actual de fallas de este tipo de estructuras. Para ello se ha realizado una comparación entre los daños relevados y la literatura especializada sobre este tema. Además se han realizado modelos numéricos que intentan explicar los daños observados, como así también proporcionar criterios y aspectos de diseño a tener en cuenta en la etapa de proyecto de nuevos edificios para evitar o controlar daños por sismo. A lo largo de este trabajo se podrá observar el análisis de cuatro establecimientos educacionales que presentaban distinto sistema estructural, como así también diferentes daños relevados. Por último se presenta un resumen de los principales aspectos y conclusiones del comportamiento sísmico para este tipo de edificios educacionales.

Palabras clave: Comportamiento sísmico, daños, edificios educacionales.

ABSTRACT

The 27th of February of 2010 one of the largest earthquakes registered in the world has occurred ($M_w = 8.8$). This earthquake occurred in the Maule Region of Chile and its effects were felt along 600 km of the central Chile cost. The damages caused by this earthquake involved all kind of structures. This work pretends to relate the damages observed in the field, by an expedition of Argentinean professionals, in educational buildings with the current state of the art of failure of this kind of structures. In order to do this, a comparison has been made between the damages encountered and the specialized literature on this theme. In addition numerical models has been performed with the aim of getting an insight and explanation of the damages observed, also this models would provide some criterions to be enhanced at the design level. Through out this work it could be observed the analysis of six educational buildings, which presented different structural systems and also different types of damages. Finally, a summary of the principal aspects and conclusions of the seismic behavior of this type of educational buildings is presented.

Keywords: Seismic behavior, damages, educational buildings.

Autor de contacto: G. Gerbaudo

1. INTRODUCCIÓN

El terremoto que ocurrió la madrugada del sábado 27 de febrero de 2010 en Chile, fue un sismo que alcanzó una magnitud de 8.8 en la Escala de Richter, siendo este uno de los sismos de mayor magnitud registrados en el mundo. El hipocentro se ubicó en el Mar Chileno, frente a la ciudad de Cobquecura y a 150 kilómetros al noroeste de Concepción. Su profundidad fue de 30,1 kilómetros bajo la corteza terrestre [1].

Las zonas más afectadas por el terremoto fueron las siguientes regiones chilenas: Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Biobío y La Araucanía, que acumulan cerca del 80% de la población del país. En las regiones del Maule y del Biobío, el terremoto alcanzó una intensidad de IX en la escala de Mercalli.

En este trabajo se estudia el comportamiento de edificios educacionales pertenecientes a la Región del Maule, los cuales fueron relevados por un grupo de Ingenieros de la Universidad Nacional de Córdoba. Dicha región sufrió intensidades entre 7.0 y 9.0 grados en la escala MSK.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ANÁLISIS

En este trabajo, se analizan cuatro edificios educacionales con diferentes tipologías estructurales. Dos de las escuelas analizadas, las de estructura de mampostería de adobe, se encuentran en la zona rural cercana a la ciudad de Linares, la cual es un importante centro urbano de esta Región. Las restantes escuelas se encuentran en la ciudad de Talca, capital de la Región del Maule, centro administrativo, económico y cultural de la región, es la segunda urbe más poblada del Valle Central chileno.

3. DESCRIPCIÓN DE DAÑOS EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE

Las construcciones de mampostería de adobe son altamente vulnerables frente a los sismos por su despreciable resistencia a corte. Los tipos de fallas se pueden clasificar en dos grandes grupos: la falla de los muros por acciones perpendiculares al plano y la falla de los muros debida a fuerza horizontal actuando en su propio plano.

3.1 Daños causados por fuerzas perpendiculares al plano del muro

En la mayoría de las viviendas de mampostería de adobe no se puede considerar el techo como diafragma rígido, y por lo tanto, los muros trabajan independientemente. Por otro lado la masa de los techos es generalmente mucho menor que la de los muros, que puede alcanzar el 80% de la masa total de la edificación.

Cuando ocurre un movimiento sísmico en viviendas de techo liviano, la vibración normal al plano de muros ortogonales entre sí genera una concentración de esfuerzos de tracción en la parte superior de las esquinas. De esta forma se crea una grieta vertical que se propaga hacia abajo. Esta grieta vertical produce que el muro quede suelto y en vibración libre en sentido perpendicular a su plano; finalmente se produce el colapso fuera del plano.

En la *Fotografía 1* se observa cómo se produjo una concentración de esfuerzos de tracción en la esquina de la construcción. Esto provocó una grieta vertical que se propagó por toda la altura del muro, posiblemente debido a la falta de arriostramiento de la fundación. Además esta fotografía muestra la falla que se produce en las intersecciones de muros normales entre sí. El empuje que efectúa un muro que se apoya en otro perpendicular provoca en este último, una grieta vertical

generada por un esfuerzo de tracción causado por la flexión del muro. Este mismo fenómeno se muestra en la *Fotografía 2*.

La *Fotografía 3* muestra una grieta vertical en la totalidad del muro producida por las acciones normales al plano, del muro perpendicular al que presenta la grieta.



Fotografía 1: Grieta vertical en encuentro de muros y grieta vertical en esquina.



Fotografía 2. Grieta vertical en encuentro de muros.



Fotografía 3. Grieta vertical en esquina de muro.

3.2 Daños causados por fuerzas cortantes en el plano del muro

Las típicas grietas en forma de cruz debido a la fuerza cortante actuando en el plano del muro provocan que el muro quede dividido en grandes bloques que pueden disipar energía por fricción en las grietas, producto de la combinación de carga vertical y fuerza horizontal.

En este caso el colapso es por lo general parcial, cuando uno o más de los bloques independientes se tornan inestables, por acción de las fuerzas normales a su plano actuando conjuntamente con la fuerza cortante coplanar.

Las grietas cerca de los vanos son también causadas por la acción de fuerzas cortantes en el plano del muro y se presentan usualmente en las esquinas superiores o inferiores de las aberturas de puertas y ventanas extendiéndose en forma diagonal hacia la parte superior o inferior del muro respectivamente. Estas fisuras se deben a la concentración de esfuerzos en las esquinas de las aberturas y a la incompatibilidad de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe y el material de los dinteles.

La *Fotografía 4* muestra las fisuras diagonales debidas a esfuerzos cortantes, actuando en ambos sentidos, en el plano del muro. La *Fotografía 5* muestra fisuras cerca de un vano, originadas por esfuerzos de corte que actuaron en el plano del muro y a consecuencia de la mayor concentración de tensiones en las esquinas de las aberturas.



Fotografía 4. Fisuras en forma de cruz debidas a esfuerzos cortantes en el plano del muro.



Fotografía 5. Grieta diagonal en esquina inferior del vano. (Escuela El Emboque)

3.3 Daños causados por falta de vinculación entre elementos estructurales

Otra característica de las estructuras de mampostería de adobe, es la nula o débil unión entre los elementos que forman el edificio, es decir la unión entre los muros, entre los muros y los tabiques divisorios, y entre el techo y los muros. Como consecuencia, el sistema estructural no tiene integridad global. Además, generalmente estas estructuras se construyen sin ningún tipo de refuerzo que permita conservar la “integridad local” de los muros una vez que se produce su agrietamiento.

Cabe señalar, la escasa mantención que tienen estas escuelas, lo que implica mayores daños. Por esta razón hay zonas debilitadas, antes de que ocurra el sismo.

La *Fotografía 6* muestra la típica falla que se produce por la falta de vínculos entre muros perpendiculares: una fisura o grieta vertical en toda la altura del muro, en la intersección entre muros perpendiculares.



Fotografía 6. Fisura vertical en encuentro de muros.

Por otro lado, la zona de encuentro entre el techo y los muros es una zona crítica. Se produce un daño local en el muro por falta de un adecuado elemento que sirva de conexión entre el techo y el muro que impida los efectos de la vibración independiente del techo. Este fenómeno se puede ver en la *Fotografía 7*. Si el daño en el muro produce su colapso, el techo pierde apoyo lo que provoca la caída del mismo ocasionando graves daños. Por esta razón, en estas zonas hay que tener especial cuidado al momento de proyectarlas o repararlas.



Fotografía 7. Unión techo con muros.

4. DESCRIPCIÓN DE DAÑOS EN EL LICEO AMELIA COURBIS

Esta sección se basa en el análisis del Liceo Técnico Amelia Courbis. Los daños encontrados en este establecimiento se pueden clasificar en: conexión entre elementos estructurales, golpeteo en las juntas sísmicas y daños no estructurales.

4.1 Conexión entre elementos estructurales

En las conexiones entre distintos elementos estructurales se presentan elevadas concentraciones y complejas distribuciones de esfuerzos que han conducido a distintos y numerosos casos de falla; especialmente en las uniones entre muros y losas, entre vigas y columnas, y entre columnas y fundaciones.

La *Fotografía 8* muestra dos fallas: una se visualiza arriba a la izquierda, muestra desprendimiento de revoque en parte de la columna, este estallido del recubrimiento puede deberse a la corrosión existente en esta zona adicionándole la influencia del sismo en esta región debilitada. Por otra parte, a la derecha de la fotografía, en la unión entre la viga y la columna se puede apreciar que la columna, no tiene estribos en toda la altura de la viga, y por lo tanto, falta de confinamiento del hormigón en toda la altura de la viga, desencadenándose la falla del nudo.



Fotografía 8. Conexión viga-columna.

Si se continúa con el mismo análisis en la *Fotografía 9* se muestran uniones entre muro y losa. El movimiento independiente entre estos dos elementos se debe a la falta de un medio adecuado de conexión entre ellos. Esto provocó una grieta horizontal en toda la longitud de los muros, debido al deslizamiento en la interfaz muro-losa, provocado por los esfuerzos horizontales.



Fotografía 9. Conexión muro-losa.

4.2 Golpeteo en juntas sísmicas

Si entre edificios adyacentes no existe una separación suficiente, su distinto comportamiento dinámico ante la solicitación sísmica conduce al golpeteo entre ellos produciéndoles daños, generalmente locales. Este tipo de falla puede ser más grave cuando los cuerpos adyacentes no coinciden en la altura de sus entrepisos, ya que las losas de uno pueden golpear las partes intermedias de las columnas del otro. Cuando se produce el golpeteo hay una zona de contacto bien definida entre las distintas edificaciones: en dicha zona se produce una concentración de esfuerzos, amplificando la compresión.

En la *Fotografía 10* se observa la zona donde se produce el contacto. En dicha región se observa desprendimiento de revoque en la zona de mayor concentración de tensiones. Si bien se aprecia la existencia de la junta sísmica, esta resultó insuficiente, es decir su holgura no fue la apropiada. En consecuencia, la junta sísmica deja de cumplir su función de absorber movimientos, permitiendo el desplazamiento independiente de los bloques que separa. En la *Fotografía 10* también se puede ver que las losas del piso intermedio de cada edificio, coinciden en altura.



Fotografía 10. Juntas sísmicas.

4.3 Daños no estructurales en muros

Hay que tener en cuenta que, al momento de la reparación de un edificio que ha sufrido daños debido a un terremoto, el costo de reparación de elementos no estructurales dañados es elevado. Por esta razón, resulta apropiado analizar el comportamiento de los muros no estructurales. Cabe aclarar que dichos muros sufren el mismo tipo de fallas que los muros estructurales. Básicamente los muros sujetos a carga sísmica en su plano muestran dos tipos principales de falla: flexión y corte.

Las *Fotografías 11* y *12* muestran fisuras de orígenes diferentes. Por un lado, las grietas diagonales en cruz producidas por esfuerzos horizontales actuando en el plano del muro, es decir, fallas por corte. Y por otro lado, fisuras horizontales. La grieta horizontal que se observa en la

Fotografía 11 se debe a la insuficiente vinculación entre el pórtico de hormigón armado y la mampostería, por esta razón al deformarse el pórtico, la inercia del muro provoca la grieta horizontal, evidenciándose la insuficiente vinculación entre viga y muro.



Fotografía 11 Daños múltiples producidos por esfuerzos cortantes en el plano y falla en unión entre viga y muro.

El conjunto de grietas y fisuras de la *Fotografía 12* muestran la falla típica producida por acciones normales al plano, suele llamarse falla de reloj de arena, por su forma particular. Es una falla formada por una grieta horizontal a la mitad del muro y en sus extremos se abre en dos grietas diagonales correspondiente a la ubicación de máximos momentos en una placa apoyada en dos lados. Este daño se encontró en varios muros de la estructura.



Fotografía 12. Falla por flexión debido a acciones perpendiculares al plano y fisuras secundarias debido a corte en el plano.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS DAÑOS EN ESCUELA BÁSICA DE TALCA

El edificio analizado combina una tipología de mampostería confinada en el sentido transversal y pórticos de hormigón armado rellenos con mampostería de cerramiento en el sentido longitudinal. En este edificio hubo un adecuado desempeño de la estructura en los niveles inferiores, los cuales presentan fisuras menores, sin pérdida de rigidez y resistencia. Al llegar al último nivel, se ve un notorio cambio en el comportamiento estructural. Este nivel presenta severos daños que serán analizados a continuación.

5.1 Daños en muros de mampostería encadenada

La envolvente de comportamiento histerético aporta información relevante sobre el comportamiento de muros de mampostería sujetos a cargas laterales cíclicas. Dado que el comportamiento de la mampostería suele estar dominado por la componente de deformación por corte, su respuesta tiende a estar caracterizada, aún para deformaciones relativamente pequeñas, por un importante deterioro de sus propiedades estructurales.

La *Figura 1* identifica zonas bien definidas asociadas a la envolvente del comportamiento histerético de muros de mampostería confinada:

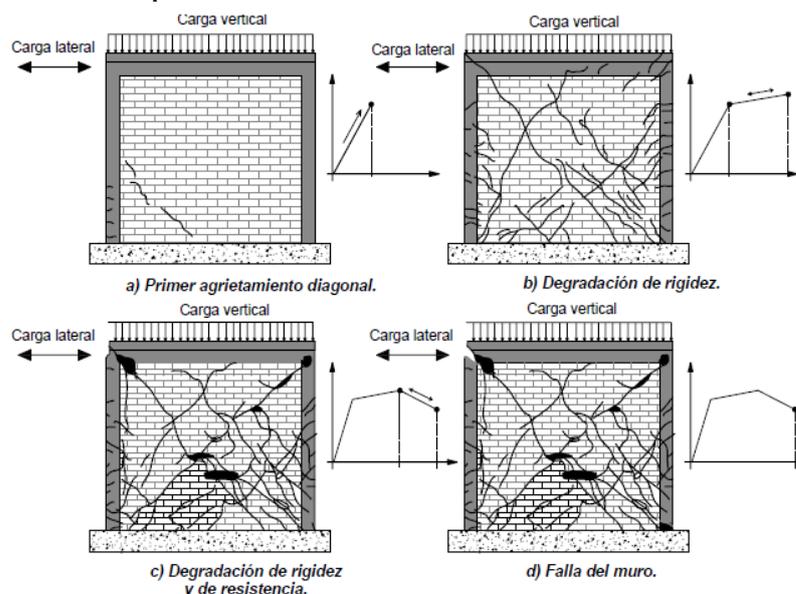


Figura 1. Evolución del daño estructural en muros de mampostería confinada.

Fuente: Revista de Ingeniería Sísmica 2008 [4].

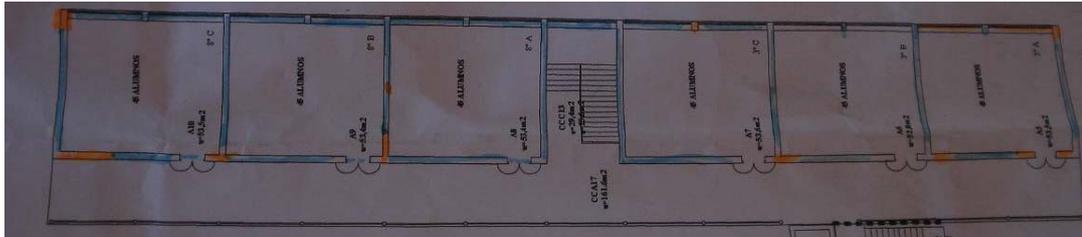
A partir de lo anteriormente expuesto, se analizan los muros de la estructura en estudio. En la planta baja del edificio se encontraron fisuras diagonales producto de esfuerzos de corte actuando en el plano del muro. Por la magnitud de las fisuras, los muros se comportaron dentro del rango elástico.

La *Fotografía 13* muestra alguno de los daños en el primer piso de la estructura. Los daños se han incrementado respecto a la PB, pero todavía se puede decir que son daños leves, en este momento comienza a degradarse la rigidez.



Fotografía 13. Muro de mampostería encadenada en primer piso.

Como se mencionara anteriormente, al llegar al último nivel se notó un importante cambio en el comportamiento de la estructura. La *Fotografía 14* muestra el plano utilizado en el relevamiento, en el que se indican los muros dañados y su nivel de daño. Con color naranja se señalan los elementos estructurales que han sufrido daño tal que no pueden ser considerados como elementos portantes o son portantes con serias limitaciones. En color azul se señalan los elementos estructurales que han sufrido daño severo, su resistencia se ve disminuida en un porcentaje significativo.



Fotografía 14. Planta del segundo piso con indicación de daños.

La *Fotografía 15* muestra los daños de los muros del último nivel, de izquierda a derecha del plano mostrado en la *Fotografía 14*. Se observa como los muros quedan divididos en bloques, superándose la resistencia máxima. La resistencia máxima se tiene cuando las grietas penetran en los extremos de las columnas de encadenado desintegrándose el hormigón y doblándose las barras longitudinales. Posterior a la resistencia máxima, la respuesta de la estructura se caracteriza por grandes deformaciones asociadas a degradaciones de rigidez y de resistencia. Eventualmente se alcanza una condición de inestabilidad ante la carga vertical que puede derivar en el colapso del último nivel de la estructura.



Fotografía 15. Daños en muros del último nivel.

5.2 Daños en vigas y columnas

En los lados longitudinales de la estructura, los cuales están formados por pórticos de hormigón armado, se encontraron daños en vigas y columnas. La *Fotografía 16* muestra la pérdida de recubrimiento en el extremo de la viga, no obstante se puede apreciar que se mantuvo confinado el hormigón del núcleo, esto demuestra el buen funcionamiento de los estribos, que aproximadamente están colocados cada 15 cm. Luego, en la intersección de la viga con la columna, se ve la ausencia de estribos que confinen el nudo. Lo cual provoca la pérdida de hormigón del núcleo. En este caso se tendría que haber continuado con los estribos de la columna en toda la longitud del nudo. Siempre hay que tener especial cuidado con los nudos (unión viga-columna) porque en ellos se produce una concentración de tensiones.



Fotografía 16. Falla en viga-columna.

La *Fotografía 17* muestra los daños en las columnas del último nivel. Queda evidenciada la rotulación de las columnas, mecanismo de colapso que debe evitarse. Las rotulas se formaron en el borde de la mampostería de relleno, lo que demuestra la influencia de elementos no estructurales en el comportamiento de elementos estructurales.



Fotografía 17. Falla en columnas.

6. CONCLUSIONES

El análisis realizado para los cinco establecimientos tratados en este trabajo, permite comprobar en forma general, que la mayoría de los daños que presentaron las estructuras son los daños típicos que se describen en la literatura.

El daño observado en las escuelas de mampostería de adobe se puede atribuir principalmente a la baja capacidad de resistir esfuerzos de corte de la mampostería de adobe. La inadecuada vinculación en los encuentros entre muros también es un factor importante en los daños observados. Además, la falta de mantenimiento provoca una estructura más débil y propensa a tener daños antes de la imposición de la carga sísmica. Por último, uno de los aspectos más importantes es la falta de un diafragma rígido en la cubierta de la estructura, y en consecuencia los muros no cuentan con un apoyo superior ante acciones normales al plano.

En cuanto a la estructura de pórticos analizada, la Escuela Amelia Courbis, no se encontraron grandes daños estructurales a pesar de la antigüedad de esta construcción, que data del año 1960. Se pudo apreciar la insuficiencia de las juntas sísmicas, sin embargo no hay que dejar de lado que el sismo del 27 de Febrero del año 2010 fue un sismo extraordinario, que superó ampliamente el sismo de diseño. Los daños más importantes se produjeron en los elementos no estructurales como los muros de cerramiento en todos los pisos de la estructura. Estos daños fueron debidos a

los esfuerzos de corte actuando en el plano del muro, esfuerzos normales al plano del muro y a la falta de vinculación entre elementos estructurales y la mampostería.

Respecto a la Escuela Básica de Talca los mayores daños que se encontraron en el último piso el cual aparentemente fue realizado con posterioridad. Se podrían atribuir los grandes daños a la falta de un diafragma rígido, ya que en este nivel la cubierta es una estructura de madera con cerramientos de chapa.

En todos los casos analizados, se podría concluir que: la falta de mantenimiento de las estructuras, el insuficiente detallado de armaduras al momento de llevar a cabo el proyecto, el no tener en cuenta la influencia de los elementos no estructurales y la falta de diafragmas rígidos, produjeron daños mayores que podrían haberse evitado. Igualmente, hay que destacar que dichas estructuras a pesar de haber soportado un terremoto de gran magnitud, no sufrieron el colapso total.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al DICTUC de la Pontificia Universidad Católica de Chile, a la empresa SIRVE S.A. de Santiago de Chile y a la empresa SIRVE Argentina, por permitir su participación en este proyecto.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Astroza, Maximiliano y otros. “Intensidades Sísmicas en el área del terremoto del 27 de febrero de 2010”, Universidad de Chile, Chile, 2010.
2. Dávila, Daniel T. “Caracterización de daños en construcciones de adobe”, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2003.
3. Bruschi, A. “Universidad Nacional de San Juan”.
4. Astroza, Maximiliano y Schmidt, Andrés. “Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño”, Revista de Ingeniería Sísmica N° 70 59-75, 2004. Astroza, M. y Schmidt, A.