

ANÁLISIS DE DAÑOS Y COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS DE ALBAÑILERÍA PRODUCTO DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010.

P. Alcaíno R. ⁽¹⁾, **T. Ruiz** ⁽¹⁾, **R. Rivera** ⁽¹⁾.

(1) Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. CHILE.

E-mail: palcaino@puc.cl

RESUMEN

El 27 de febrero aproximadamente a las 03:34AM se registró un evento sísmico con epicentro en la zona litoral del centro sur de Chile (S35.85 W72.71) a una profundidad de 35km, con magnitud de momento M_w 8.8 y un área de ruptura ubicada aproximadamente entre Concepción y Matanzas.

La población afectada supera los 8 millones de personas en las ciudades más densamente pobladas del país, con cifras oficiales de 521 muertos, ½ millón de viviendas afectadas; más de dos millones de damnificados y un costo estimado en aproximadamente 12% del PIB del país.

En la zona afectada por el sismo, se encuentra una cantidad importante de obras críticas como industrias, puentes, carreteras, hospitales, represas e instalaciones mineras, también se hallan la mayoría de los edificios altos y modernos así como poblaciones de interés social (típicamente edificaciones de albañilería de mediana altura). El presente trabajo se concentra en un análisis de los daños más comunes observados en estos edificios de albañilería, intentando identificar y separar los aspectos propios del comportamiento, diseño y construcción.

Principalmente daños por corte fueron observados en muros de albañilería. Además fue posible constatar en terreno deficiencias en materiales, detallamiento y construcción de estas estructuras. Algunas conclusiones preliminares de este estudio indican alta sensibilidad de las estructuras de albañilería al detallamiento y a la calidad de la mano de obra que las ejecuta. También se pudo determinar que las estructuras de albañilería que alcanzaron elevados niveles de daño e incluso colapsos mostraron un comportamiento predominantemente lineal elástico frágil.

Tópico 4: Materiales cerámicos

Palabras clave: Albañilería, Comportamiento sísmico, Daños sísmicos.

1. INTRODUCCIÓN

El día 27 de febrero aproximadamente a las 03:34 de la mañana se registró un evento sísmico de gran magnitud (M_w 8.8), con epicentro en la costa centro sur de Chile (S35.85 W72.71) y profundidad focal de 35km. Posterior a ello, en varias zonas costeras se registraron tsunamis con diferentes niveles de destrucción.

El área de ruptura del sismo se ubicó aproximadamente entre Concepción y Matanzas, afectando una población que supera 8 millones de personas en las ciudades más densamente pobladas del país, con cifras oficiales de 521 muertos, aproximadamente ½ millón de viviendas afectadas; más de dos millones de damnificados y un costo preliminar estimado en treinta mil millones de dólares (aproximadamente 12% del PIB de Chile): fueron afectadas gran cantidad de obras críticas como industrias, puentes, carreteras, hospitales, represas, instalaciones mineras, edificios altos y modernos, así como poblaciones de interés social (viviendas subsidiadas por el gobierno) destinadas

a población de menor ingreso (viviendas sociales), las que, en la zona en cuestión corresponden típicamente edificios de albañilería de baja a mediana altura [1, 2].

Este tipo de construcción fue introducida a Chile en la década de 1930, como una técnica que usa materiales de construcción alternativos al adobe y de menor costo que el hormigón armado. Inicialmente ante la ausencia de códigos de diseño y poca o nula experiencia de la mano de obra en la ejecución de estas obras, se construyeron principalmente estructuras de muros sin ningún tipo de refuerzo las que durante el sismo de Chillán de 1939 experimentaron serios daños. A partir de esta experiencia comenzó un uso más masivo estructuras de muros de albañilería confinada por pilares y cadenas de hormigón armado.

A partir de inicios de los 70's se comenzaron a construir en Chile edificios estructurados en base a muros de albañilería armada hechos de unidades (ladrillos) con huecos por los cuales pasan barras verticales de acero dúctil (armadura de flexión) y con barras de acero horizontales embebidas en el mortero de pega. Sin embargo, la insatisfactoria experiencia recopilada en los sismos de Chillán (1939, Magnitud 8.0), La Ligua (1965, Magnitud 7.1), Papudo (1971, Magnitud 7.5) y Lolleo (1985) [2-3] llevó a desarrollar el primer código chileno de diseño en albañilería, la norma NCh1928 [4], para diseño de edificios de albañilería armada, modificada en 1993 [5] y en 2003 [6]; y en segunda instancia a publicar en 1997 la normativa para diseño de edificios de albañilería confinada NCh2123 [7].

Sin embargo, a pesar del desarrollo científico y de ingeniería, durante sismos recientes, como en Punitaqui (1997, Magnitud 6.8), Iquique (2005, Magnitud 7.9), Tocopilla (2008, Magnitud 7.7) [8] y el 27 de febrero de 2010 en la zona del Maule (M_w 8.8), se produjeron daños significativos en edificios de albañilería, mostrando claras deficiencias en la concepción de estos proyectos. Por lo anterior, el presente trabajo se concentra en un análisis de daños comunes, producto del terremoto del 27 de febrero de 2010, en edificios de albañilería, intentando identificar y separar los aspectos propios del comportamiento, diseño y construcción.

Un total de 162 edificaciones estructuradas en base a muros de albañilería, de 2 y hasta 5 pisos, en cuatro ciudades de la Región del Maule (Cauquenes, Constitución, Curicó y Talca) fueron inspeccionadas luego del sismo.

Daños por esfuerzo de corte fueron observados en muros, tanto de albañilería confinada como armada. Fue posible constatar en terreno deficiencias en materiales, detallamiento y construcción de estas estructuras.

Alta sensibilidad al detallamiento, calidad de la mano de obra y materiales empleados fue detectada. También se pudo determinar que las estructuras de albañilería que alcanzaron elevados niveles de daño e incluso colapsos mostraron un comportamiento predominantemente lineal elástico frágil.

2. PROCEDIMIENTO DEL ESTUDIO

Tras la ocurrencia del sismo, en cuatro de las ciudades más afectadas por el sismo, Cauquenes, Constitución, Curicó y Talca, se realizaron inspecciones visuales a un total de 162 edificaciones estructuradas en base a muros de albañilería. Estas 162 edificaciones contienen un total de 1624 unidades de vivienda, entendiéndose por ello tanto a departamentos como casas, las que fueron inspeccionadas por un equipo de 4 ingenieros civiles acompañados por 4 asistentes.

La inspección, realizada tuvo como objetivo reconocer la estructuración, calificar cualitativamente la calidad de construcción en cuanto a materiales, ejecución, disposición de elementos resistentes y evaluar en terreno los posibles daños estructurales, para de acuerdo a los mecanismos observados, niveles de severidad, porcentaje de ocurrencia y extensión de daños, emitir un juicio profesional sobre el estado de dichas estructuras principalmente desde un punto de vista estructural.

En la Tabla 1 se presentan algunos aspectos generales de las edificaciones inspeccionadas: los nombres de las villas y/o poblaciones inspeccionadas han sido reemplazadas pues parte de esa

información es confidencial. En las Fotografías de la Figura 1 se muestran vistas representativas de los diferentes tipos (alturas) de edificaciones inspeccionadas.

Una vez realizadas las inspecciones, se clasificaron las edificaciones por altura (cantidad de pisos) y estructuración: se observaron principalmente estructuraciones en base a muros de albañilería armada o confinada en ambas direcciones principales del edificio; o en base a muros de albañilería armada una de las direcciones principales del edificio y confinada en la otra, estructuración que en este documento es denominada “mixta” (ver Tabla 1).

Los niveles de severidad del daño se determinaron según las recomendaciones de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS [9], las que, para efectos de este estudio, fueron comparadas con escalas o índices de daños propuestos por Tomazevic [10] y Figueroa [11]. En la Tabla 2 se presenta una descripción resumida de los diferentes índices o grados de daño estudiados.

Tabla 1. Detalle de edificaciones inspeccionadas.

Ciudad	Villa o Pobl.	# Pisos	# Edif.	# Viviendas	Estructuración	Ladrillo
Cauquenes	A	2 ⁽¹⁾⁽²⁾	31	61	Confinada	Artesanal
Constitución	B	2 ⁽¹⁾⁽²⁾	3	20	Mixta	Artesanal/Cerámico
Constitución	C	2 ⁽¹⁾	3	28	Armada	Cerámico
Subtotal			37	109	-	-
Cauquenes	D	3	4	60	Mixta	Artesanal/Cerámico
Cauquenes	E	3	9	102	Mixta	Artesanal/Cerámico
Constitución	F	3	10	84	Confinada	Cerámico
Constitución	G	3	10	210	Confinada	Cerámico
Curicó	H	3	10	108	Confinada	Artesanal
Curicó	I	3	14	108	Confinada	Artesanal
Subtotal			57	672	-	-
Constitución	J	4	4	84	Confinada	Artesanal
Talca	K	4	8	256	Confinada	Cerámico
Talca	L	4	13	144	Confinada	Artesanal
Talca	M	4	8	144	-	Artesanal
Subtotal			33	628		
Talca	N	5	4	60	Confinada	Artesanal
Talca	O	5	31	155	Confinada	Artesanal
Subtotal			35	215	-	-
Totales			162	1624	-	-

(1) Primer piso: albañilería armada; Segundo piso: material ligero. (2) Segundo piso;

(2) Muros cortafuego de albañilería confinada.



(a)

(b)

(c)

Figura 1. Vistas de edificios tipo de 2 pisos (a), 3 pisos (b) y 5 pisos (c).

Tabla 2. Equivalencia entre escalas de daño consideradas en este estudio.

AIS	Figueroa		Tomazevic	
Daño	Grado	Descripción	I _d	Descripción
Sin daños	0	Sin daño	0	Sin daño
	1	Finas grietas horizontales en más del 50% de base del muro. Caída de trozos pequeños de estuco		
Leve	2	Grietas horizontales cubren el 100% de la base del muro. Grietas diagonales cortas (e<0.4 mm)	0.25	Formación de primera fisura Diagonal importante (70% de altura del muro)
Moderado	3	Grietas diagonales entre armaduras Horizontales no entran en cabezas de compresión (e<1.5 mm)	0.5	Presencia de red de fisuras diagonales. Se alcanza resistencia máxima
Fuerte	4	Grietas diagonales (e<5mm) en zona de compresión. Corte de algunas armaduras horizontales. Grietas verticales en encuentro de muros	0.75	Aumenta espesor de fisuras. Aplastamiento y agrietamiento de ladrillos y mortero en 50% del muro
Severo	5	Fuerte aplastamiento en zonas de compresión. Grieta principal en muro. Armaduras horizontales cortadas. Deformación permanente importante.	1.00	Daño intenso, no reparable o colapso del muro

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

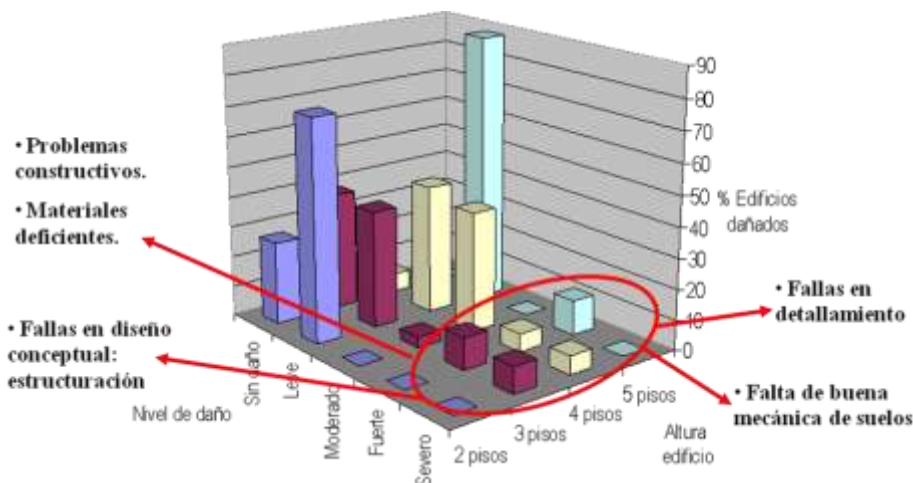


Figura 2. Distribución de daño según altura de edificios estudiados

En la Figura 2 se presenta un resumen de la cantidad de edificios que sufrieron un determinado nivel de daños producto del sismo del 27 de febrero. Esta información está separada por altura (número de pisos) del edificio y cantidad (en %) de edificios que presentaron cada nivel de daño definido en la Tabla 2.

De esta figura se puede apreciar, en primer lugar, que el 100% de las edificaciones con un primer piso de albañilería y un segundo piso de material ligero no experimentaron daños o presentaron daños de carácter leve, aún cuando las dos poblaciones ubicadas en la ciudad de Constitución experimentaron no sólo la acción del sismo, sino que también recibieron directamente el impacto del tsunami inundándose incluso el segundo nivel.

También es importante señalar que la mayor cantidad de unidades de viviendas sociales se encuentra concentrada en edificios de 3 y 4 pisos (ver Tabla 1), en los cuales predomina el uso de muros de albañilería confinada de ladrillos artesanales hechos en la zona, los que, por lo general,

presentan bajas resistencias y para fines estéticos se encuentran estucados en ambas caras, incrementando considerablemente el peso propio del edificio. Con menos frecuencia se puede ver que estos edificios presentan muros de albañilería armada de ladrillos cerámicos hechos a máquina, en sentido longitudinal (sentido largo) y de albañilería confinada de ladrillos artesanales en el sentido transversal, generando las divisiones entre departamentos. Estos edificios (los de 3 y 4 pisos) presentaron no solo daños moderados y fuertes en un porcentaje importante de ellos, sino cerca del 10% de ellos presentó daños severos, alcanzando algunos incluso el colapso. Respecto de los edificios de cinco pisos se puede indicar que éstos presentan mayor densidad de elementos de hormigón armado (marcos rígidos y/o muros) que limitan la extensión de los niveles más elevados de daño, pero que concentran el daño en los elementos de albañilería.

3.1. DAÑOS Y COMPORTAMIENTO EN EDIFICIOS DE 2 PISOS

Esta tipología de edificios consiste en una estructura de dos muros largos longitudinales paralelos y varios muros más cortos paralelos en sentido transversal, con un segundo piso de material ligero, con o sin la presencia de muros cortafuego de albañilería confinada de ladrillo artesanal.

No se observaron daños significativos en estos edificios, aún cuando, principalmente la acción del tsunami generó un impacto de gran magnitud por efecto del agua y múltiples impactos producto del arrastre de escombros, tal como puede apreciarse en la fotografía de la Figura 3a.

También cabe señalar que los daños más recurrente no corresponden a la acción sísmica, sino que a la acción del tsunami (daños no estructurales, fotografía de la Figura 3b) y a la de los mismos propietarios, que realizan ampliaciones y modificaciones inadecuadas (fotografía de la Figura 3c).

No obstante su satisfactorio comportamiento, estos edificios no cumplen con las dimensiones máximas que puede tener un paño de albañilería confinada, 12.5m^2 según NCh2123 [7], limitación que busca evitar el vaciamiento del muro.



Figura 3. (a) Escombros arrastrados por tsunami, (b) Viviendas de dos pisos sólo con daños no estructurales (c) Modificaciones no controladas de la estructura

3.2. DAÑOS Y COMPORTAMIENTO EN EDIFICIOS DE 3 PISOS

Esta tipología de edificios, consiste en una estructura de muros paralelos en ambas direcciones del edificio (ver fotografías de Figura 4a, 4b y 4d), generando una estructura fuertemente isostática en cada dirección, privilegiando un comportamiento frágil ya que existe muy poca redistribución de esfuerzos una vez que los elementos estructurales comienzan a experimentar daño.

Estos edificios presentaron daños fuertes a severos (fotografías de Figura 4c y 4e) en un porcentaje importante de ellos, observándose incluso colapsos con resultados fatales (fotografías de Figura 4e y 4f).

Es posible inferir que estos edificios desarrollaron un comportamiento fuertemente lineal elástico frágil, ya que en los casos mostrados en la Figura 4, conjuntos de edificios prácticamente idénticos entre sí (igual diseño estructural, mismos materiales, misma empresa constructora, igual data de

construcción) estos experimentaron niveles de daño dramáticamente diferentes. Lo anterior puede ser explicado mediante un comportamiento global como el mostrado en la Figura 5: un comportamiento fuertemente lineal elástico frágil (sin redistribución de tensiones), donde la diferencia entre estructuras con poco o mucho daño sólo radica en muy pequeñas diferencias en el movimiento que éstas experimentaron.

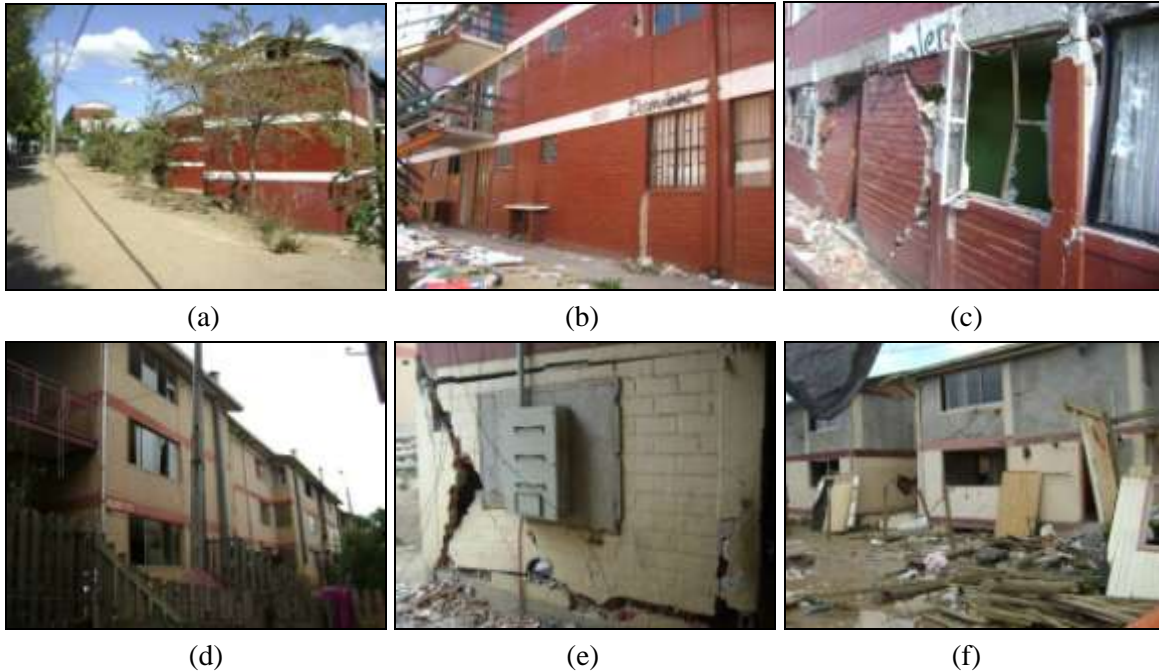


Figura 4. (a, b, d) Edificios de albañilería de 3 pisos con daños leves o moderados. (c, e) Edificios de albañilería con daños severos. (f) Edificios de albañilería colapsados, con víctimas fatales

Si se analizan los dos casos previamente presentados, la Figura 6 muestra la distribución espacial y de daños de los edificios. En ella se puede ver que los edificios con mayor gravedad de daño se encuentran afectados por condiciones levemente diferentes al resto: orientación y cota diferente o cercanía a taludes con leve pérdida de confinamiento del suelo. Lo anterior, sumado a la presencia de fallas corte en los muros de albañilería deficientemente confinados, seguidas o precedidas por fallas de corte en pilares de confinamiento por el efecto de “columna corta” que se presenta en zonas de aberturas de ventanas donde los refuerzos alrededor de ésta no funcionaron como lo supone la norma NCh1928 [6], generó comportamientos como el mostrado en la Figura 5. En ambos casos, un factor común es que el detallamiento inadecuado (o ejecución de él), no provee a la estructura de la ductilidad requerida por diseño.

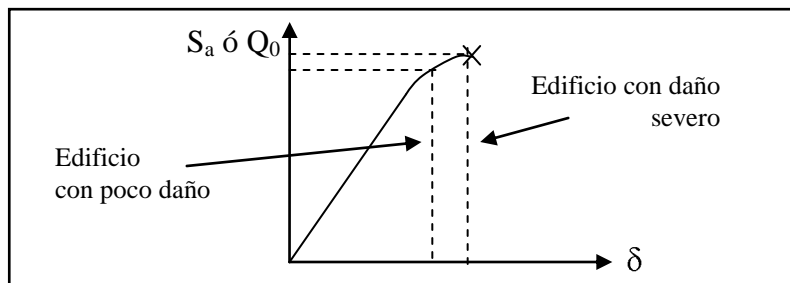


Figura 5. Hipótesis del tipo de comportamiento experimentado por los edificios.

Otro de los factores importantes de destacar es la evidente insuficiente y extremadamente dispersa resistencia de los ladrillos artesanales. En varios de los casos estudiados se pudo apreciar problemas de resistencia a niveles estáticos de peso propio. También problemas importantes por alta permeabilidad de estas unidades fueron observados.

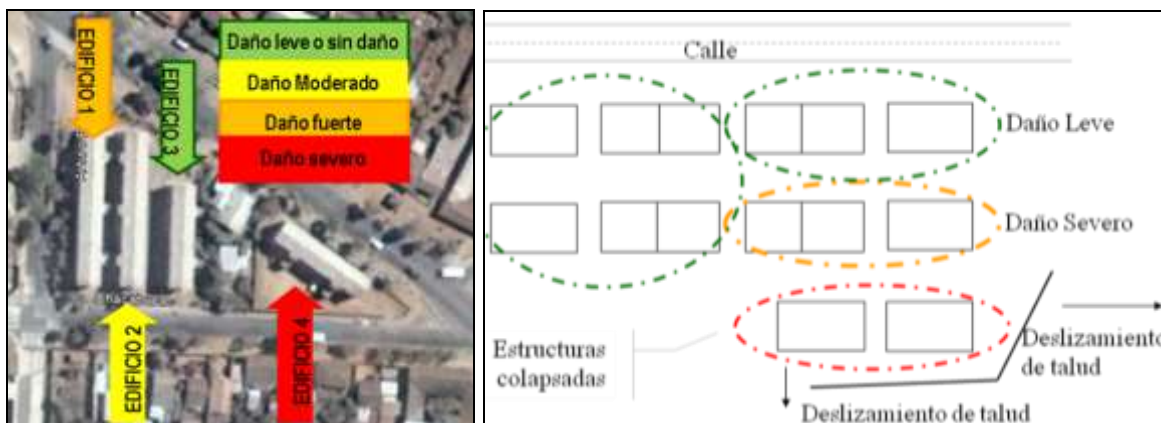


Figura 6. Distribución de edificios de tres pisos en poblaciones con mayores daños.

3.3. DAÑOS Y COMPORTAMIENTO EN EDIFICIOS DE 4 Y 5 PISOS

Esta tipología de edificios, consiste en una estructura de muros paralelos en ambas direcciones del edificio (fotografía de Figura 7a), generando una estructura fuertemente isostática en cada dirección, privilegiando un comportamiento frágil ya que existe muy poca redistribución de esfuerzos una vez que los elementos estructurales comienzan a experimentar daño.

Estos edificios presentaron en un porcentaje en la incidencia de daños decreciente con la severidad de éstos, pero en ningún caso despreciable. Los daños más importantes fueron severos daños por esfuerzo de corte en la albañilería (fotografía de Figura 7b) con importantes daños en los elementos de confinamiento producto del corte en las zonas críticas y de la compresión por flexión (fotografía de Figura 7c). Estos daños se concentraron principalmente en el primer piso aunque en algunos casos se observaron importantes daños por corte en muros de los últimos niveles, produciéndose luego el vaciamiento del muro.



Figura 7. Edificios de albañilería de 4 pisos (a) y daños típicos por esfuerzo de corte (b) y compresión en los extremos del muro (c).

Detalles inadecuados de empalme de las barras de la armadura longitudinal de cadenas de confinamiento, nidos en la base las columnas de confinamiento y armadura de corte y confinamiento insuficientes pudieron ser reconocidos. Dada la naturaleza frágil de la falla por corte

y por compresión es que, resulta razonable suponer un comportamiento predominantemente lineal elástico frágil para estos edificios.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados preliminares de este estudio se puede concluir que las estructuraciones utilizadas en la construcción de viviendas sociales pueden mejorarse modificando levemente la arquitectura permitiendo generar elementos estructurales con diferente rigidez y resistencia permitiendo redistribución de esfuerzos una vez iniciado el proceso de agrietamiento, logrando un real grado de hiperestaticidad generando, al mismo tiempo un comportamiento más dúctil.

Serías deficiencias en el detallamiento del refuerzo al esfuerzo de corte de muros albañilería fueron detectadas. Del mismo modo, deficiencias en el detallamiento de las zonas críticas de cadenas y pilares de confinamiento fueron observadas.

Múltiples fallas constructivas importantes fueron halladas: unidades de albañilería hechas a mano con resistencias y permeabilidades inadecuadas; deficiencias en el hormigonado (nidos), mala ejecución de muros y de empalmes de barras de refuerzo.

Como primera aproximación y a partir de estas observaciones realizadas, el suponer que estas estructuras presentaron un comportamiento principalmente lineal elástico frágil aparentemente resulta razonable.

REFERENCIAS

1. C. E. Gómez, “Caracterización de sistemas estructurales usados en las viviendas de hormigón armado y albañilería reforzada en Chile”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil (2001), Universidad de Chile, Santiago, Chile.
2. M. O. Moroni, M. Astroza and C. Acevedo, “Performance and seismic vulnerability of masonry housing types used in Chile”; Journal of performance of constructed facilities. Vol. 18, No 3 (2004), p. 173-179.
3. E. Cruz, P. Hidalgo, C. Luders, R. Riddell, F. Rodríguez, J. Troncoso, M. Van Sint Jan, J. Vásquez, “Lecciones del sismo del 3 de marzo de 1985”; 1988, Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón, Santiago, Chile.
4. INN, “NCh1928 Of.1993. Albañilería Armada - Requisitos para el diseño y cálculo”; 1986, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
5. INN, “NCh1928 Of.1993. Albañilería Armada - Requisitos para el diseño y cálculo”; 1993, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
6. INN, “NCh1928 Of.2003. Albañilería Armada - Requisitos para el diseño y cálculo”; 2003, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
7. INN, “NCh2123 Of.1997. Albañilería Confinada - Requisitos de diseño y cálculo”; 1997, Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
8. P. Alcaíno and H. Santa María, “Shear response of masonry walls with external CFRP reinforcement”. 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008. Beijing, China.
9. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, “Guía técnica para la inspección de edificaciones después de un sismo, Manual de campo”; 2002. Bogotá, Colombia.
10. M. Tomazevic, “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings”. Series on Innovation in Structures and Construction, Vol. 1 (1999). Imperial College Press, London, England.
11. S. Figueroa, “Escala de daño sísmico para edificios de albañilería”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil (2000), Universidad de Chile, Santiago, Chile.