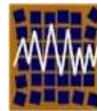




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

Nº A14-13 ENSAYE DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA DE LADRILLO CERAMICO CON ABERTURAS.

Maximiliano Astroza I.¹ y Oscar Ogaz N.²

1.-Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago, Chile

E-mail: mastroza@ing.uchile.cl

2.- IDIEM, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile

Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile

E-mail: oogaz@idiem.uchile.cl

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental de 12 muros de albañilería confinada a escala natural con y sin abertura en el paño de albañilería, construidos con unidades cerámicas del tipo rejilla con huecos. Las aberturas simulan la situación que se presenta por la presencia de una abertura de ventana centrada y de una abertura de puerta-ventana. El refuerzo de la abertura consistió en una barra vertical de 10 mm de diámetro, ubicada en los huecos de las unidades vecinas a la abertura, y una escalerilla electrosoldada ubicada en la primera junta de mortero bajo la ventana.

Los muros se ensayaron en voladizo sin carga vertical, aplicando una carga horizontal en forma cíclica, hasta alcanzar una distorsión angular o deriva igual a un 1.33 %. De los resultados se comprueba un efecto de la posición y del tamaño de la abertura en la respuesta del muro, produciéndose en algunos casos una asimetría del comportamiento. Además de este análisis se logra juzgar la aplicación de los criterios usados en la práctica para determinar la resistencia y la rigidez de muros de albañilería confinada con aberturas.

Palabras Clave: Albañilería confinada, muros con aberturas, diseño sísmico

1. INTRODUCCIÓN

Aunque los muros con aberturas son los más comunes de encontrar en los edificios y que las diferentes normas de diseño, indican los refuerzos que deben colocarse en las aberturas (INN, 2003a, GDF, 2004), el comportamiento de los muros de albañilería confinada con aberturas no es del todo conocido, por la falta de estudios experimentales que permitan cuantificar los efectos del tamaño y la posición de las aberturas. Teniendo en cuenta esta situación, en este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental relacionado con el efecto del tamaño y posición de una abertura en muros de albañilería confinada construidos con ladrillos cerámicos del tipo rejilla con huecos.

2. EFECTO DE LAS ABERTURAS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

Los estudios que se han realizado sobre los efectos de la presencia de aberturas en muros de albañilería confinada se pueden agrupar en dos.

2.1 *Estudios experimentales*

Entre estos estudios se destaca el realizado por Flores et al. (2004), en el cual se sometieron a la acción de cargas horizontales cíclicas dos muros de albañilería confinada a escala natural, construidos con piezas macizas de arcilla fabricadas en forma artesanal, con una abertura en forma de ventana ubicada al centro del paño. En uno de los muros la abertura no tenía refuerzo, mientras que en el otro muro la abertura se confinó con pilares y cadenas de hormigón armado de 120x120 mm reforzados con 3 barras longitudinales de 10 mm y estribos de 6 mm distanciados a 180mm.

Una comparación del comportamiento global de ambos muros, a partir de las envolventes de los ciclos de histéresis, permite observar que tanto la carga que genera el primer agrietamiento inclinado como la rigidez de la parte elástica no difieren de un muro a otro. Además, se comprobó que el confinamiento de la abertura permite alcanzar una mayor resistencia y aumenta la capacidad de deformación. Una vez que se entra en el rango inelástico de comportamiento, las deformaciones se concentraron en los segmentos de muro ubicados a ambos lados de la ventana; esta última situación hizo que en los machones del muro sin refuerzo de la abertura se formaran dos bloques triangulares totalmente desligados del resto del muro, produciéndose la pérdida de la capacidad de soportar la carga vertical.

Además, los resultados de los dos ensayos mostraron que el modelo sin refuerzo en la abertura tuvo mayor deterioro y su resistencia cayó rápidamente (30%) cuando la distorsión angular superó el 5‰. Al alcanzar una distorsión angular de un 6‰ el daño resultó severo y se detuvo el ensayo porque de otro modo el muro no se podía reparar. En cambio, en el modelo con la abertura confinada se alcanzó una mayor resistencia y la carga se mantuvo más allá de una distorsión de un 8‰, distorsión para la cual la posibilidad de reparar el muro puede considerarse como límite. Una vez que se produjo el agrietamiento inclinado, las grietas penetraron en los pilares, en especial en las esquinas de la abertura.

2.2 Estudios analíticos

Ante la falta de estudios experimentales, se han realizados muchos estudios analíticos para analizar los efectos de las aberturas en muros de albañilería confinada, usando para ello modelos elásticos lineales (Garrido et al., 1984, Palacios, 2001) y no lineales (Alvarez et al., 2001), basados en el método de los elementos finitos.

En particular, Alvarez et al. reconocen que el comportamiento de los muros de albañilería confinada presenta efectos no lineales para pequeñas distorsiones ($< 0,05\%$), por lo cual desarrollaron un modelo no lineal que reproducía el comportamiento de dos muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral y a partir de este modelo calibrado estudiaron el efecto de la incorporación de abertura de diferentes tamaños y posiciones en muros de albañilería confinada. Se analizaron 26 modelos en tres grupos: muros cuadrados, anchos y esbeltos, con relaciones de aspecto altura/longitud iguales a 1, 0,67 y 2, respectivamente. De los resultados obtenidos, Alvarez et al. proponen recomendaciones para el diseño, entre las que se destaca la necesidad de colocar pilares en los bordes verticales de la abertura cuando la dimensión horizontal de ésta sea mayor que el 25% de la longitud del muro, y la posibilidad de despreciar el efecto de la abertura cuando sus dimensiones sean iguales o menores que el 12,5% de las respectivas dimensiones del muro.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los muros ensayados están constituidos por un paño de albañilería confinado por dos pilares de borde, una cadena superior y una viga de fundación donde se anclan las armaduras verticales de los pilares y el refuerzo vertical de borde de la abertura. Alrededor de la abertura no se dispuso de un elemento de confinamiento adicional, considerando que uno de los objetivos del estudio es evaluar los efectos de la presencia de aberturas reforzadas con cuantías mínimas, del orden de las que recomienda la norma NCh2123 para muros poco solicitados (INN, 2003a). Las tipologías de abertura consideradas para la confección de las probetas se establecieron después de analizar 164 proyectos de viviendas de albañilería (Guzmán, 2004) y corresponden a las más comunes dentro de las utilizadas en Chile.

3.1 Características de los especímenes ensayados

Las probetas ensayadas corresponden a muros de 3600 mm de largo y 2200 mm de alto y 140 mm de espesor, dimensión que corresponde al ancho de las unidades empleadas. Todos los muros se construyeron con un aparejo trabado rellenando sólo los huecos donde se ubican las armaduras verticales del refuerzo de la abertura. En la Fig. 3.1 se muestra la geometría y las dimensiones de los muros ensayados. Las dimensiones de los elementos de confinamiento del paño de albañilería son 150 mm de espesor y 200 mm de ancho, en el caso de los pilares, y 200 mm de alto, en el caso de las cadenas.

Las variables de este estudio experimental fueron el tamaño y la ubicación de las aberturas. En la Tabla 3.1 se entrega los valores de los índices definidos para el análisis de los resultados, los cuales son:

- Relación entre el área de la abertura y el área total del muro, α , expresada en %.
- Relación entre el área neta y el área total de la sección transversal, β
- Esbeltez geométrica del “machón”, λ . Esta esbeltez se define como la relación entre la altura libre (medida hasta media altura de la cadena) y el largo (incluido el pilar) del “machón” para el cual el pilar de confinamiento se ubica en la zona traccionada al aplicar la carga. De acuerdo con la Fig. 3.1, el sentido positivo del ensaye corresponde a al caso en que la carga se aplica de izquierda a derecha.

Tabla 3.1. Valores de α , β y λ para los muros ensayados

Muro	a (%)	b	λ	
			Positiva	Negativa
Tipo 1	0	1,00	0,58	0,58
Tipo 2	28	0,44	1,54	1,54
Tipo 3	11	0,78	0,87	0,87
Tipo 4	16	0,70	1,49	1,00
Tipo 5	19	0,66	0,51	-
Tipo 6	12	0,87	1,22	1,49

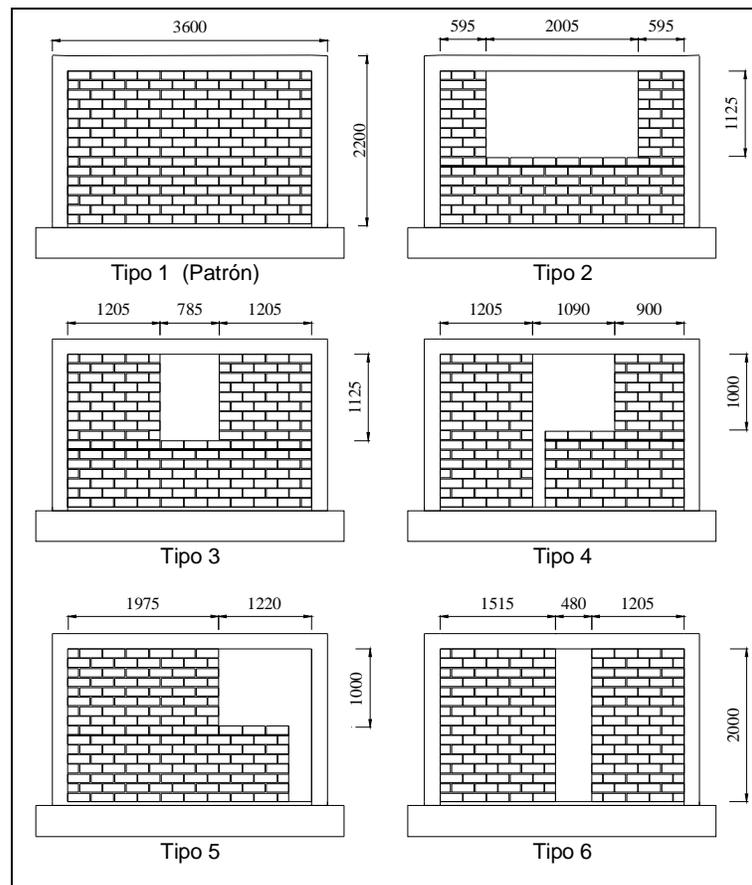


Figura 3.1. Geometría y dimensiones de los muros.

El refuerzo vertical alrededor de las aberturas de los muros consistió en una barra de acero de 10 mm de diámetro colocada en el primer hueco de la unidad vecino a la abertura, con una tensión de fluencia de 420 MPa. El refuerzo horizontal se dispuso en la junta de mortero bajo la primera hilada de la abertura, y consistió en una escalerrilla electrosoldada de acero de 4.2 mm de diámetro con una tensión de fluencia de 500 MPa. El refuerzo de los elementos que confinan el paño de albañilería consistió en 4 barras longitudinales de 10 mm de diámetro y estribos de 6 mm de diámetro separados a 150 mm, la tensión de fluencia de este refuerzo es 420 MPa. En la Fig. 3.2 se muestra un esquema que caracteriza la ubicación del refuerzo de los muros.

El mortero de junta utilizado, el hormigón empleado en la construcción de las columnas y de las vigas de confinamiento y el hormigón empleado en el relleno de los huecos donde se colocó el refuerzo vertical de las aberturas, corresponden a materiales premezclados en seco preparados por una fábrica local. La gravilla de los dos hormigones empleados tiene un tamaño máximo de 8 mm. En la Tabla 3.2 se entregan las resistencias de estos materiales.

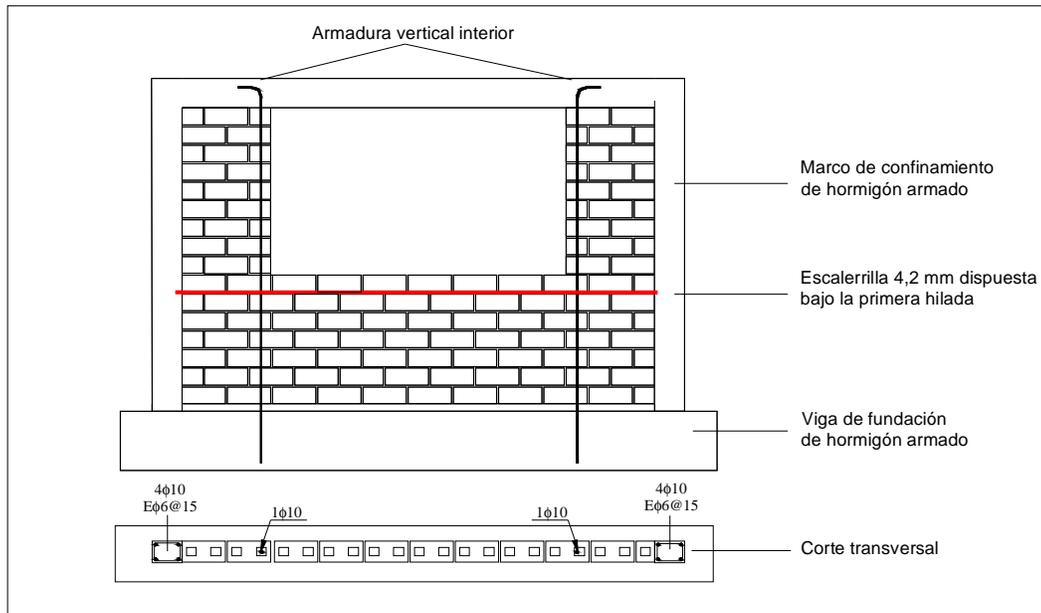


Figura 3.2. Refuerzo de los muros

Tabla 3.2. Resistencias de los materiales premezclados y de los aceros

Material	Índice de resistencia	Valor medio [MPa]
Mortero	Resistencia a la compresión	18,9
Hormigón de relleno	Resistencia a la compresión	31,7
Grout para anclaje	Resistencia a la compresión	59,4
Hormigón	Resistencia a la compresión (28 días)	23,9
Acero A 63-42H	Tensión de Fluencia	553
Acero AT56-50H	Tensión de Fluencia	587

Las propiedades de las unidades usadas en la construcción de los muros, ver Fig. 3.3, se detallan en la Tabla 3.3. Las propiedades mecánicas de la albañilería se determinaron ensayando prismas en compresión axial y muretes en compresión diagonal, según los procedimientos recomendados en las normas NCh1928 [INN, 2003b] y NCh2123 [INN, 2003a]. En la Tabla 3.4 se entregan los valores promedios obtenidos de las cinco probetas ensayadas.



Figura 3.3. Unidades de ladrillo cerámico tipo rejilla con huecos

Tabla 3.3. Propiedades de las unidades de ladrillo cerámico.

Dimensión / Propiedades	Unidad	Ladrillos cerámicos
		Valor medio
Largo	mm	291
Ancho	mm	141
Altura	mm	115
Huecos	%	50,7
Resistencia a la compresión ¹	MPa	25,9

¹ Medido sobre el área bruta

Tabla 3.4. Propiedades de la albañilería.

Índice	Símbolo	Ladrillo cerámico
		[MPa]
Resistencia a la compresión ¹	f'_m	6,89
Resistencia a la tracción diagonal ¹	τ_m	0,55
Módulo de elasticidad ¹	E_m	4849
Módulo de corte ¹	G_m	528

¹ Medido sobre área bruta

3.2 Técnica de ensayo

Los muros fueron ensayados en voladizo sin carga vertical, sometiéndolos a una carga lateral aplicada en forma cíclica en el plano del muro, al nivel de la cadena, controlando el nivel de desplazamiento horizontal al centro del muro a la altura de aplicación de la carga. Para cada nivel de desplazamiento se aplicaron dos ciclos debido a que entre éstos se produce el mayor deterioro de la rigidez y de la capacidad de carga de los muros. La instrumentación de las probetas se muestra en la Fig. 3.4. Durante el ensayo se llevó un control del espesor de las fisuras en cada nivel de desplazamiento cuando se alcanza la deformación máxima y un registro de daños para caracterizar diferentes estados, entre los que se pueden destacar: el primer daño visible en la columna de confinamiento, el primer daño visible en el paño, el inicio del agrietamiento inclinado, la formación del agrietamiento diagonal primario y secundario y del patrón agrietamiento que se mantiene hasta el final del ensayo.

Para los efectos del análisis de los resultados, el término del ensayo se estableció cuando se alcanza una distorsión angular de un 13,3%, lo que corresponde a un desplazamiento horizontal de 28 mm. Sin embargo, con el propósito de observar el deterioro que se puede esperar en este tipo de muro frente grandes deformaciones, se aplicó un desplazamiento máximo de 40 mm.

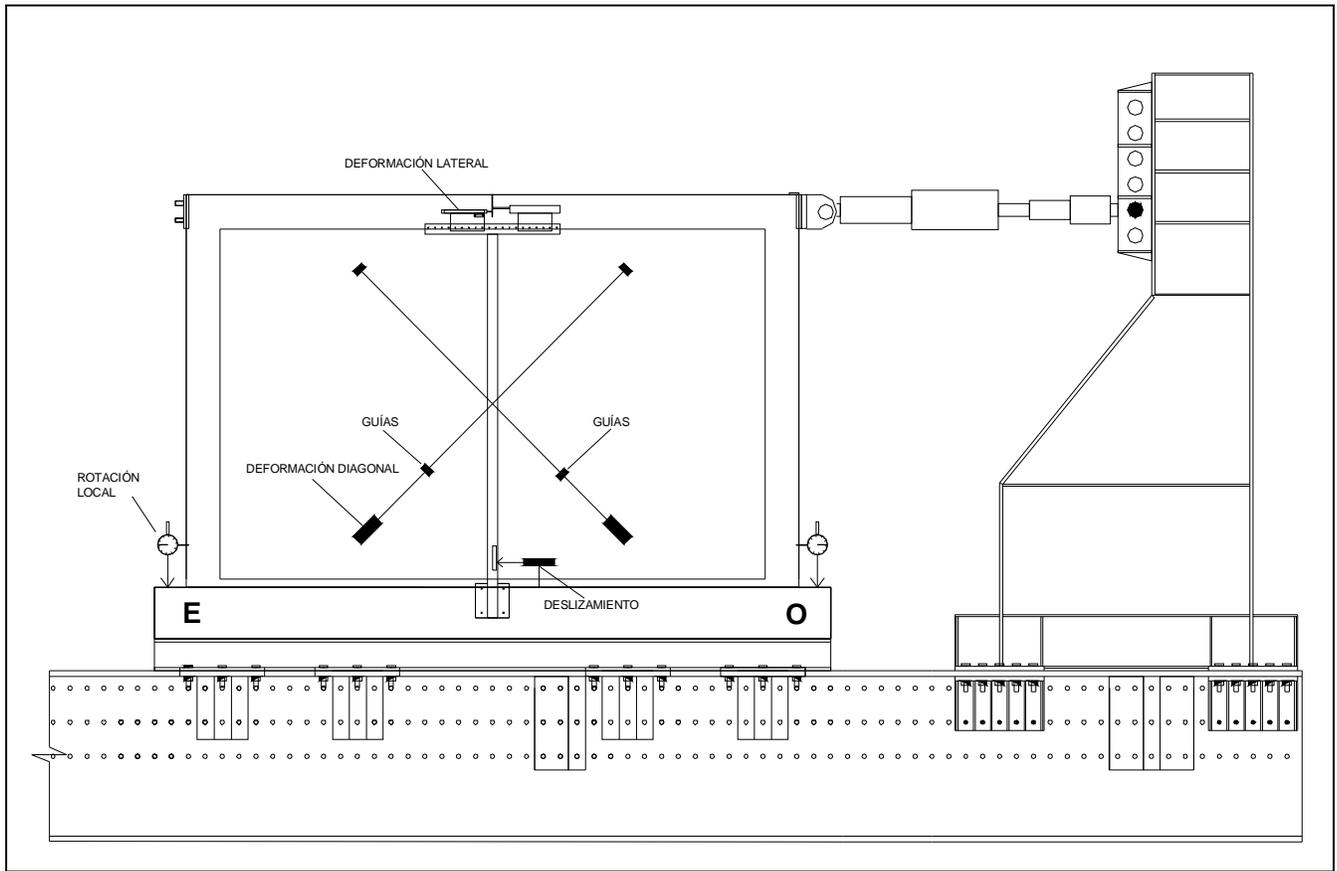


Figura 3.4. Instrumentación de la probeta

4. RESULTADOS

4.1. *Comportamiento cualitativo de los muros*

El comportamiento de todos los muros estuvo controlado por la fuerza de corte, presentándose dos tipos de patrones de falla: agrietamiento diagonal y agrietamiento mixto. El patrón de agrietamiento diagonal corresponde a una grieta inclinada que abarca más de la mitad del largo del muro y el patrón de agrietamiento mixto corresponde a una grieta que se propagó a través del paño de albañilería en forma horizontal e inclinada, en tramos de longitudes similares. Para ambos patrones de agrietamiento, las grietas se propagaron a través de las juntas de mortero producto de la baja adherencia entre el mortero y las unidades de albañilería.

La fisuración de los muros se observó desde los primeros ciclos de carga, formándose fisuras horizontales en las columnas de confinamiento y en las hiladas inferiores del paño de albañilería, producto de la ausencia de carga vertical y de la baja adherencia mortero-unidad y fisuras diagonales en los vértices de las aberturas. Posteriormente, el daño se concentra en el o los paños ubicados a ambos lados de la abertura, situación que se mantiene hasta que se produce el corte de la armadura horizontal, como se muestra en la Fig. 4.1 para un muro del Tipo 5. Los muros que no tenían armadura horizontal, la degradación de resistencia y el ancho de las grietas fue de una magnitud importante una vez que se alcanza el agrietamiento diagonal, como es el caso de machón izquierdo del muro Tipo 4 y ambos machones del muro Tipo 6.

4.2 *Comportamiento cuantitativo de los muros*

La cuantificación del efecto de una abertura en el comportamiento de los muros se realiza comparando los distintos muros ensayados con el muro sin abertura, el cual es considerado como patrón de comportamiento.

4.2.1 Capacidad de carga

En la Tabla 4.2a se entrega la carga correspondiente al estado de agrietamiento diagonal primario del “machón”, es decir la carga para la cual se forma el agrietamiento diagonal en el paño de albañilería ubicado a un lado de la abertura, cuando el pilar de hormigón armado trabaja como tensor, y en la Tabla 4.2b se entrega la carga máxima de cada uno de los muros. En la Fig. 4.2 se muestran las curvas envolventes de los ciclos de histéresis correspondiente al primer ciclo de cada nivel de desplazamiento, en estas curvas la carga lateral se ha normalizado con respecto a la menor carga máxima ($H_0 = 152$ kN) que resisten los muros sin abertura.

Tabla 4.2a. Carga de agrietamiento diagonal primario

Muro	Muro 1		Muro 2	
	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Tipo 1	159	150	144	141
Tipo 2	61	77	83	77
Tipo 3	135	157	122	126
Tipo 4	117	88	121	139
Tipo 5	125	63 ¹	129	85 ¹
Tipo 6	100	123	126	147

Tabla 4.2b. Carga máxima.

Muro	Muro 1		Muro 2	
	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Tipo 1	172	152	199	183
Tipo 2	85	87	96	100
Tipo 3	135	157	141	152
Tipo 4	117	116	121	139
Tipo 5	145	71	129	85
Tipo 6	100	127	126	147

¹ Corresponde al agrietamiento diagonal secundario, carga para la cual se forma el agrietamiento diagonal en el "machón" cuando la armadura vertical de borde trabaja como tensor.

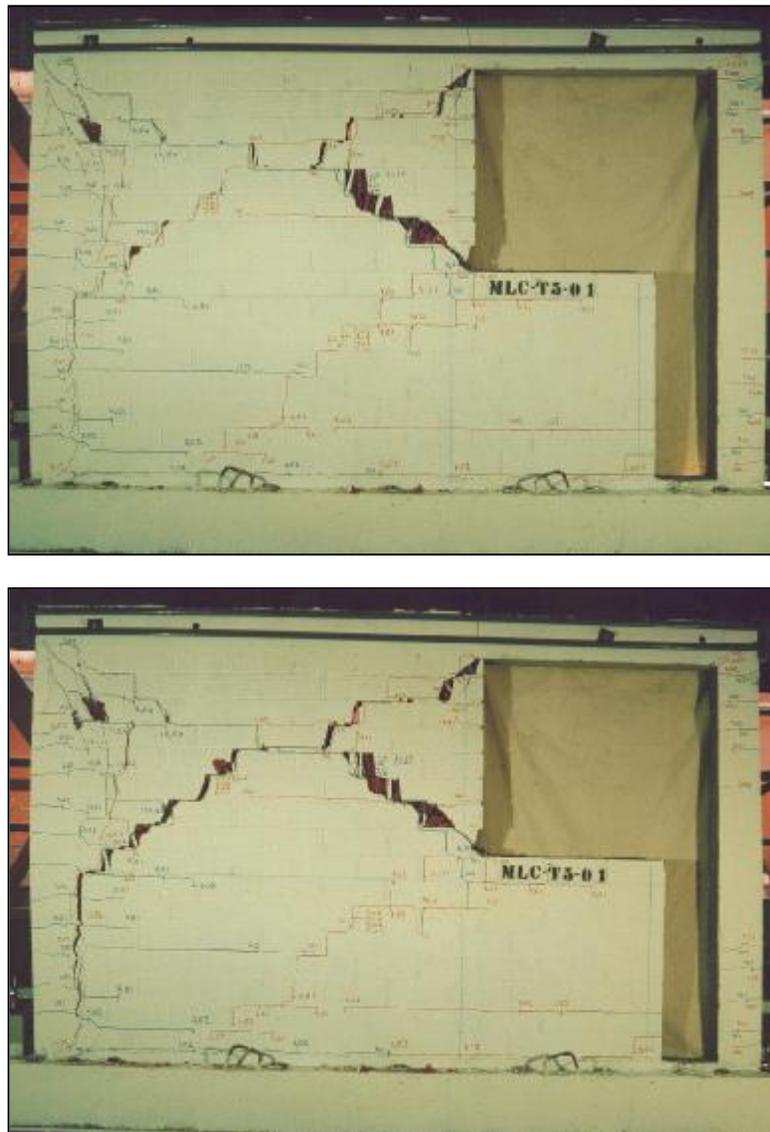


Figura 4.1. Estado de daño antes y después del corte de la escalerilla.

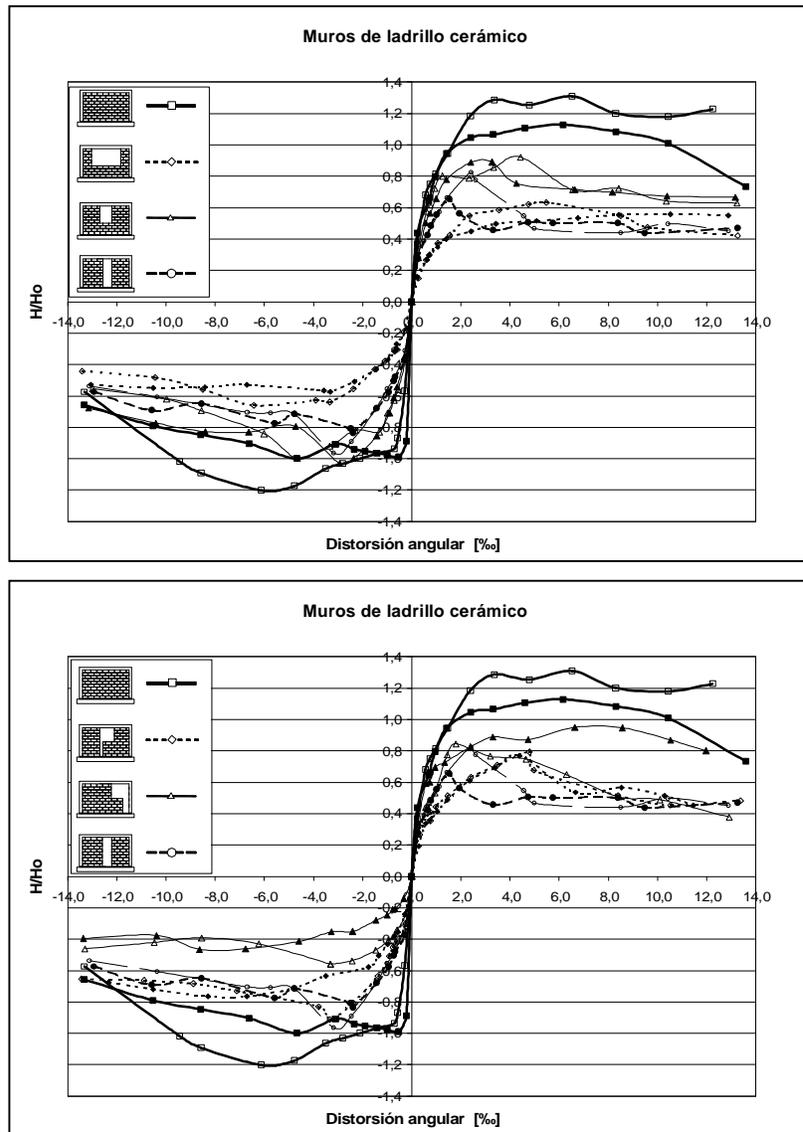


Figura 4.2: Envoltente de los ciclos de histéresis del primer ciclo de deformación.

4.2.2 Rigidez

Para los efectos de este análisis, se utiliza la “rigidez equivalente”. Esta rigidez se define por la pendiente de la recta que une el punto de carga nula con el punto de máxima carga o punto extremo para la carga considerada. La rigidez así definida permite detectar los efectos de asimetría que pueden presentarse en el comportamiento mecánico debido a abertura ubicadas en forma asimétrica.

En la Tablas 4.3a y 4.3b se entregan la “rigidez no agrietada” y la “rigidez post-agrietamiento” para cada uno de los muros ensayados. En las Fig. 4.3a y Fig. 4.3b se muestra la forma como degrada la “rigidez agrietada”, la cual corresponde a la rigidez equivalente luego de producirse el primer agrietamiento

visible en el paño de albañilería, hasta alcanzar una distorsión angular de un 8,0‰, nivel para el cual se ha producido una pérdida de la rigidez agrietada del orden de un 90%. De estas figuras se aprecia que parte importante del deterioro de la rigidez se produce para distorsiones menores que un 2,0‰, producto de la fisuración que se produce tanto en las columnas de confinamiento como en el paño de albañilería.

Tabla 4.3a. Rigidez no agrietada, K_e

Tipo	MURO 1	MURO 2
	K_e^+	K_e^+
	[kN/mm]	[kN/mm]
Tipo 1	140	114
Tipo 2	58	41
Tipo 3	78	101
Tipo 4	50	62
Tipo 5	96	79
Tipo 6	77	91

Tabla 4.3b. Rigidez post-agrietamiento, K_{agr}

Tipo	MURO 1	MURO 2
	K_{agr}^+	K_{agr}^+
	[kN/mm]	[kN/mm]
Tipo 1	82	101
Tipo 2	33	30
Tipo 3	59	67
Tipo 4	39	39
Tipo 5	53	50
Tipo 6	46	46

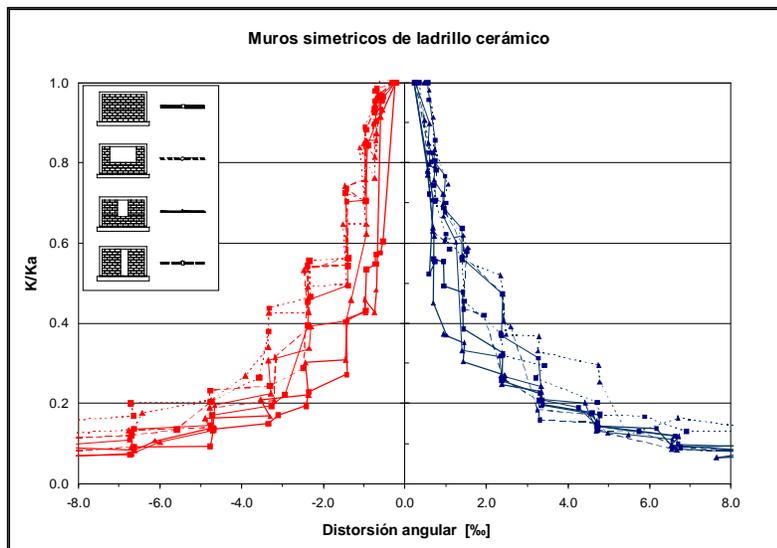


Figura 4.3a: Degradación rigidez de equivalente - Muros simétricos

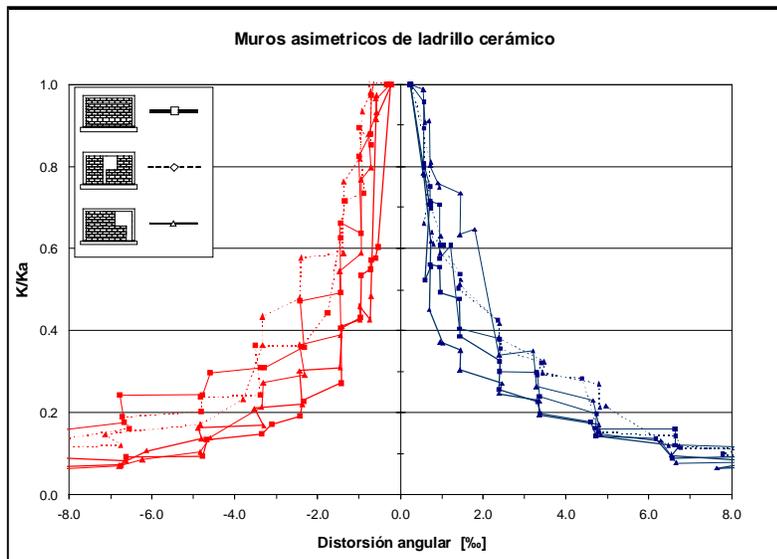


Figura 4.3b: Degradación rigidez de equivalente - Muros asimétricos

4.2.3 Capacidad de deformación

Esta capacidad se cuantifica para los diferentes niveles de daño y se expresa en términos de la distorsión angular. El primer daño visible en el paño de albañilería se produce para una distorsión angular mínima de un 0.2‰, la cual se puede considerar independiente del tamaño y ubicación de la abertura. Además, se observa que para una distorsión angular menor que un 1.2‰, ningún muro con abertura presenta el estado de agrietamiento diagonal primario y que todos los muros ensayados alcanzan este estado para una distorsión angular igual a un 2‰.

4.2.4 Capacidad de disipación de energía

Esta capacidad se cuantifica considerando la energía disipada acumulada hasta alcanzar una distorsión angular igual al 13,3‰, comprobándose que los muros Tipo 2 y 5 son los que presentan la menor capacidad de disipación de energía (Ogaz, 2004).

Además se pudo observar que para distorsiones angulares mayores que un 1.0‰, la energía disipada acumulada crece aproximadamente en forma lineal a medida que se aumenta la distorsión angular producto de la poca contribución del segundo ciclo en la energía disipada acumulada. Esta forma lineal implica que la energía disipada por unidad de desplazamiento permanece constante, es decir, todos los ciclos son igualmente disipativos.

Teniendo en cuenta el resultado anterior, no se justifica elegir el nivel de carga máxima como el estado límite de diseño puesto que el nivel de daño asociado es alto sin lograr un aumento significativo de la capacidad resistente y de la capacidad de disipación de energía.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Efecto del tamaño de la abertura en la carga máxima

En la Fig. 5.1 se presenta la carga máxima normalizada (H/H_0) en función de la relación entre el área neta de la sección transversal del muro, A_{net} , y el área de la sección transversal del muro sin abertura, A_{total} . De esta figura se aprecia que esta carga disminuye a medida que disminuye el área neta de la sección transversal. Además se comprueba que la recta $H/H_0 = \beta$ es un límite inferior de la resistencia de los muros, y se puede aceptar como primera aproximación que la resistencia de los muros con abertura es directamente proporcional al área neta de la sección transversal mientras exista un pilar de confinamiento actuando como tensor.

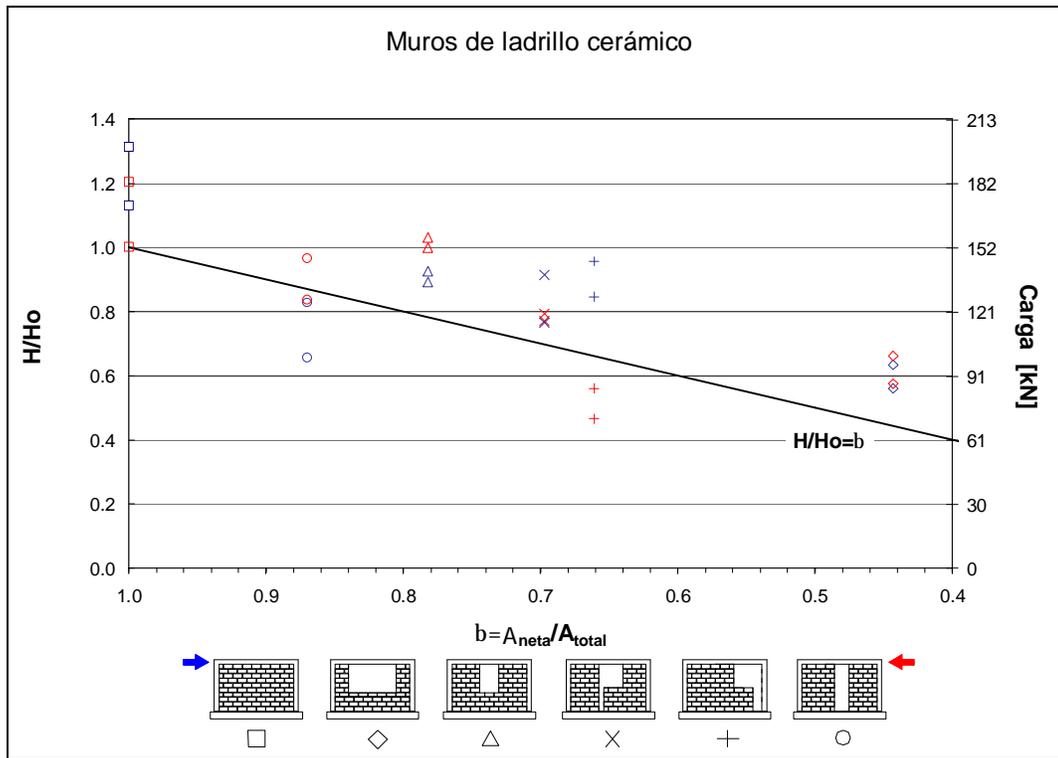


Figura 5.1: Carga máxima normalizada en función de la relación área neta/área total, β .

5.2 Efecto de la esbeltez en la capacidad de carga

Al incorporar una abertura se generan paños laterales de albañilería (machones) de diferente esbeltez, lo que produce cambios en la distribución de tensiones en el interior del muro y producto de ello se modifica la capacidad resistente. Para analizar la influencia de la esbeltez del “machón” (λ) en la capacidad resistente de los muros ensayados, en las figuras Fig.5.2a y Fig.5.2b se representa la carga de agrietamiento diagonal primario y la carga máxima respectivamente, normalizadas con respecto al menor valor de la carga máxima correspondiente del muro patrón, en función de esta esbeltez. En la Fig. 5.2b se aprecia que a medida que aumenta la esbeltez disminuye la carga, observándose que para muros con una relación alto/largo igual a 0,58 (Muro patrón), la capacidad de carga máxima normalizada, se puede calcular conservadoramente como: $H/H_o = 0,9$ para $\lambda \leq 0,9$ y $H/H_o = 0,81/\lambda$ para $\lambda > 0,9$, mientras exista un pilar que haga la función de un tensor en el “machón”.

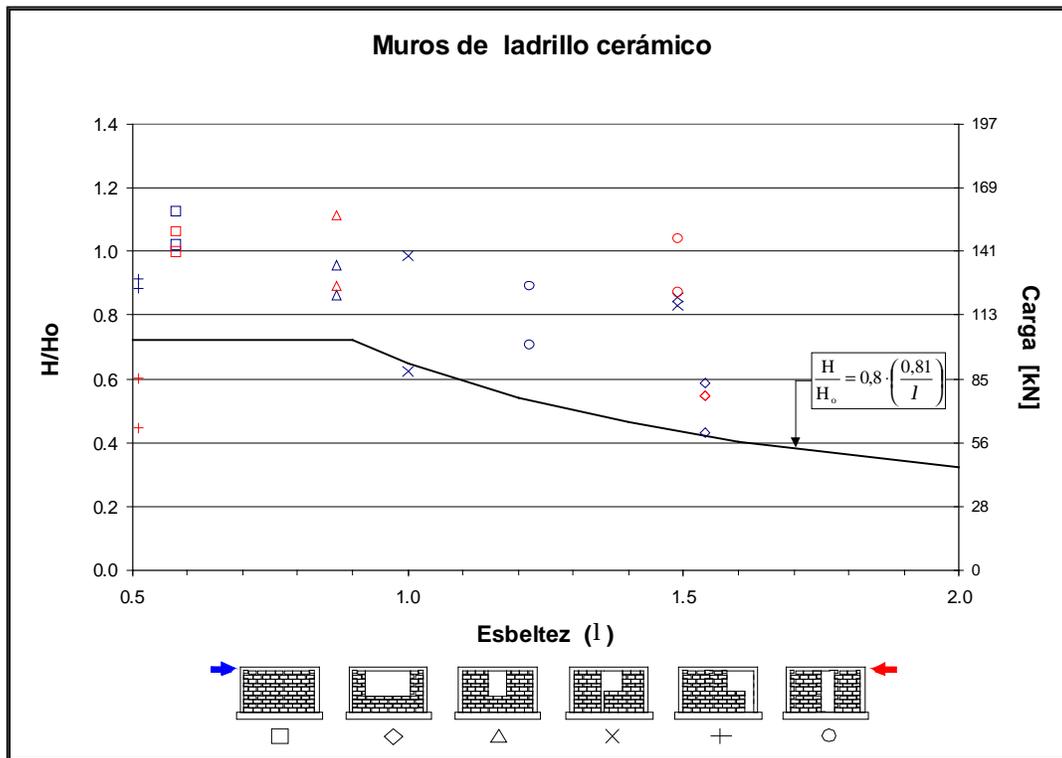


Figura 5.2a: Carga de agrietamiento diagonal primario en función de λ

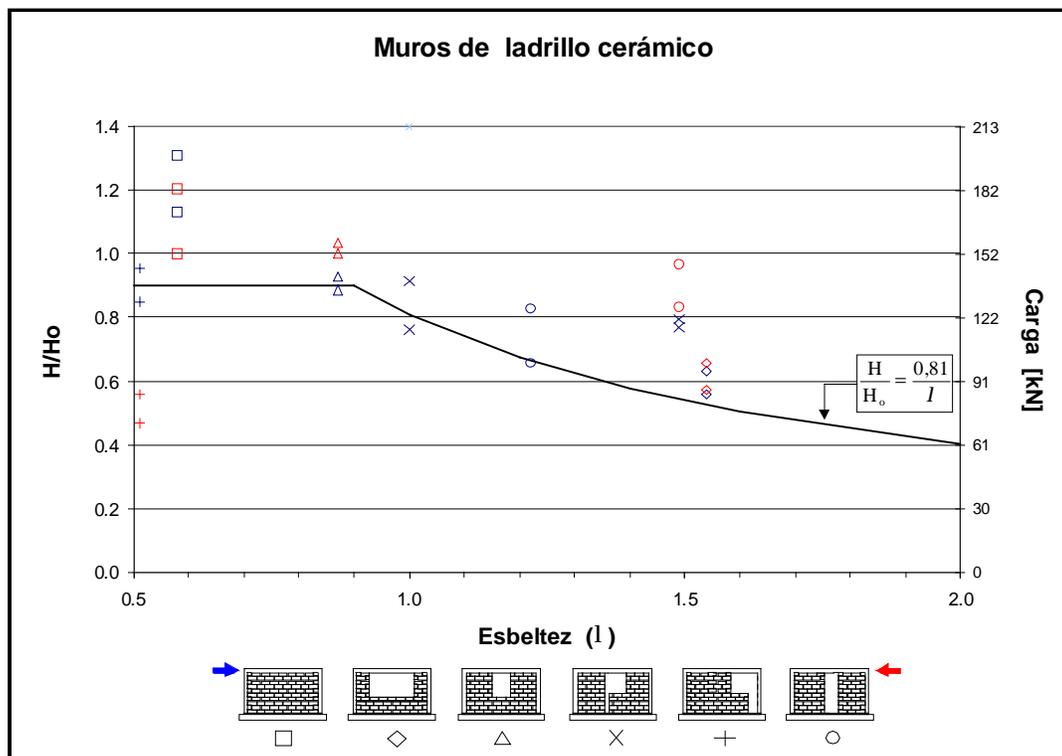


Figura 5.2b: Carga máxima en función de λ

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Considerando los resultados de este trabajo experimental, se puede concluir lo siguiente:

6.1 Capacidad resistente

- Para efecto de diseño, es recomendable considerar que la capacidad resistente al corte de un muro de albañilería con las características de los muros ensayados, corresponde a la carga de *agrietamiento diagonal primario*, debido a que la diferencia entre ella y la carga máxima no es significativa. Sin embargo, para alcanzar la carga máxima se debe aumentar en forma apreciable la distorsión angular sin lograr aumentar significativamente la capacidad de disipación de energía y produciendo un nivel de daño difícil de reparar.
- La capacidad resistente al corte de los muros con abertura puede estimarse conservadoramente multiplicando la capacidad al corte del muro sin abertura por el área neta de la sección transversal existente a la altura de la abertura.
- La reducción de la capacidad resistente es mínima cuando el área de la abertura es pequeña y el refuerzo de ella cumple con los requisitos establecidos en la norma NCh2123, como ocurre en el muro Tipo 3. Este resultado, valida la recomendación de la norma NCh2123 de no reforzar las aberturas cuya área es inferior al 5% del área del paño y que estén ubicadas en la zona central superior del muro.

6.2 Rigidez.

- La rigidez del sistema post-agrietamiento puede considerarse que es igual a un 30% de la rigidez no agrietada, Sin embargo, esta caída presenta una gran dispersión debido a la falta de refuerzo en los paños de albañilería.
- A medida que aumentan la distorsión angular, la rigidez del sistema agrietado se degrada rápidamente, especialmente en aquellos muros que tienen una menor esbeltez local. Para distorsiones del orden de un 2%, la rigidez agrietada puede alcanzar valores del orden de un 20% de la rigidez post-agrietamiento.

6.3 Capacidad de deformación.

- La incorporación del marco de confinamiento permite mantener los niveles de carga hasta altos niveles de distorsión angular, como se aprecia en las curvas envolventes de los ciclos de carga y descarga.

- Cuando se alcanza el estado de *agrietamiento diagonal primario*, los muros ensayados presentan una grieta diagonal que cruza completamente el machón o el muro. Mecánicamente, este estado se caracteriza por marcar el límite para el cual la capacidad de disipación de energía por unidad de desplazamiento es creciente. De acuerdo con los resultados obtenidos, al limitar la distorsión angular a un 1.2‰, se asegura que los muros ensayados no presenten este estado; en cambio para una distorsión angular igual a un 2‰, todos los muros ensayados alcanzaron este estado.
- La presencia de la armadura horizontal bajo la primera hilada de la abertura, detuvo el propagación del agrietamiento que se inicia en los vértices de las aberturas, concentrando el daño en los machones. Estas armaduras se cortaron cuando se alcanzaron distorsiones angulares del orden de un 1%.

6.4 Consideraciones para el diseño

Teniendo en cuenta las recomendaciones que establecen las normas de diseño de edificios de albañilería confinada y los resultados de los ensayos realizados tanto en Chile como en México, se pueden destacar lo siguiente:

- La presencia de los antepechos, como es el caso de los muros Tipo 2, Tipo 3, Tipo 4 y Tipo 5, modifica el patrón de agrietamiento, desarrollándose una grieta diagonal desde el extremo superior del pilar hasta el vértice inferior de la ventana. Esta situación debe tenerse en cuenta cuando se define la posición de las zonas críticas en los pilares ubicados a los lados de una abertura de ventana.
- Las aberturas de puertas y ventanas deben confinarse cuando se espera que las distorsiones entre pisos sean mayores que un 1.5‰. De este modo, los criterios establecidos en la norma NCh2123 para los refuerzos de aberturas son adecuados cuando se trata de edificios en los que la demanda sísmica supera este valor.
- En la medida que se requiera reforzar las aberturas con elementos de hormigón armado, deben usarse pilares cuyas dimensiones cumplan con las dimensiones mínimas exigidas en la norma NCh2123, de lo contrario se producirá la penetración de las grietas del paño por las zonas críticas, como se pudo observar en los ensayos realizados por Flores et al. (2004).
- En la medida que se puedan usar armaduras incluidas en los huecos de las unidades como refuerzo de aberturas, es recomendable incorporar refuerzos adicionales (Escalerillas) en las juntas horizontales de mortero de los paños laterales. Con estos refuerzos se logrará reducir el daño observado en los paños laterales (machones) producto que las deformaciones se concentran en ellos, una vez que se produce el agrietamiento. Si no se incluye este refuerzo, en los paños laterales se forman dos bloques triangulares totalmente desligados del resto del muro, perdiéndose la capacidad de soportar la carga vertical.

- En relación con los vanos de puertas, de acuerdo con la definición de abertura de la norma NCh2123, éstos no corresponden a una abertura y deben reforzarse colocando un pilar de hormigón armado (Borde libre de un muro). Los resultados experimentales obtenidos para los muros Tipo 4 y 6, confirman la necesidad de respetar esta recomendación ya que en estos muros se pudo observar una importante degradación de la capacidad de carga y un espesor de las grietas de magnitud importante una vez que la grieta diagonal cruza la cabeza comprimida donde se ubica la armadura vertical de borde.
- En relación con aberturas del tipo 5 (Puerta-ventana lateral), se recomienda reforzarlas como un vano de puerta, colocando un pilar al borde de la ventana para evitar la degradación de carga y de rigidez observada en los ensayos.
- Si bien las diferencia entre los muros ensayados no fue notoria entre algunos de ellos, por ejemplo los muros Tipo 1 (Patrón), Tipo 3 y Tipo 4, se debe cumplir con los requisitos que establece la norma NCh2123, especialmente si se tiene en cuenta la capacidad de disipar energía y la ductilidad de desplazamiento de cada tipo de muro (Ogaz, 2004). Respetar estos requisitos permite usar los factores de reducción recomendados por la norma NCh433 (INN; 1996) para esta modalidad de refuerzo. Es conveniente destacar que si no se cumple con todos los requisitos establecidos por la norma NCh2123, no basta con calificar la estructura como “Cualquier tipo de estructura o material que no pueda ser clasificado en alguna de las categorías anteriores” para determinar el factor de reducción.
- En relación con los resultados obtenidos en los estudios analíticos, en los estudios revisados no se ha podido cuantificar la capacidad de disipación de energía y los niveles de daños asociados a los distintos niveles de deformación.

7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada gracias al financiamiento aportado por el Fondo de Desarrollo e Innovación de la CORFO a través del proyecto CORFO-FDI sobre “Desarrollo de Recomendaciones Especiales de Diseño para Viviendas Sociales de 1 y 2 pisos”. En este trabajo colaboraron el personal del laboratorio del Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile, agradeciendo en especial, a los Señores Fernando Yañez U., Victor Aguila O. y Guillermo Sierra R.

REFERENCIAS

Alvarez, J.J., S.M. Alcocer y J. Contreras (2001), Comportamiento analítico no lineal de muros de mampostería con aberturas sujetos a fuerzas laterales, 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Madrid, España.

Flores, L., J.A. Mendoza y C. Reyes S.(2004), Ensaye de muros de mampostería con y sin refuerzo alrededor de la abertura, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., México.

Garrido M.I., J. Cassis M. y M. Astroza I. (1984), Análisis de muros de albañilería reforzada sometidos a cargas horizontales, Publicación SES I6/84 (195), Sección Ingeniería Estructural, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

GDF (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, Diario Oficial del D.F., Gobierno del distrito Federal, México, D.F.

Guzmán, F. (2002), Estudio del comportamiento sísmico de muros de albañilería mixta en viviendas sociales de uno y dos pisos, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

INN (1996), Norma Chilena Oficial NCh433.Of1996 : Diseño Sísmico de Edificios, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2003a), Norma Chilena Oficial NCh2123.Of1997.Modificada en 2003: Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

INN (2003b), Norma Chilena Oficial NCh1928.Of1993.Modificada en 2003: Albañilería armada – Requisitos para el diseño y cálculo, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

Ogaz, O.(2004), Estudio experimental de muros de albañilería con aberturas y cuantía reducida de refuerzo sujetos a carga lateral alternada, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Palacios F. (2001), Efecto de las aberturas en la respuesta estructural de muros de albañilería confinada, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.