

## **EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF MASONRY WALLS WITH DIFFERENT TYPES OF INTERFACES**

**Wilmer E. Castellanos** <sup>(1)</sup>, **Gonzalo S. Torrisi** <sup>(2)</sup>, **Francisco J. Crisafulli** <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, IMERIS, Mendoza, Argentina. [gasscle@hotmail.com](mailto:gasscle@hotmail.com)

<sup>(2)</sup>Ingeniero Civil, Ph.D., Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, IMERIS, Mendoza, Argentina. [gonzalo.torrisi@ingenieria.uncuyo.edu.ar](mailto:gonzalo.torrisi@ingenieria.uncuyo.edu.ar)

<sup>(3)</sup>Ingeniero Civil, Ph.D., Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, IMERIS, Mendoza, Argentina. [francisco.crisafulli@ingenieria.uncuyo.edu.ar](mailto:francisco.crisafulli@ingenieria.uncuyo.edu.ar)

Received: February 2020. Accepted: March 2020

Published: July 1, 2020

### **ABSTRACT**

An experimental program was carried out with the objective of evaluating the influence of the type of interface between the masonry panel and the reinforced concrete elements in the global and local response in masonry walls, for which three specimens with different interface conditions were constructed called infilled frame (IF), confined masonry (CM) and toothing confined masonry (TCM). The tests of these walls were performed only under cyclic lateral loading. The design of the walls was based on the Argentine code INPRES-CIRSOC 103 part III. The experimental results showed that the type of interface influenced the cracking pattern, the initial stiffness and the lateral strength. It was also observed that the adequate design of the reinforced concrete elements and their beam-column joints allowed better control of resistance degradation, allowing the development of large story drifts. In all cases, the experimental results confirm that the equivalent strut model is valid for not only for infilled frames but also for confined masonry walls.

**Keywords:** Infilled frames, confined masonry, interface, monolithic behavior.

## **COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CON DIFERENTES TIPOS DE INTERFACE**

### **RESUMEN**

Se realizó un programa experimental con el objetivo de evaluar la influencia del tipo de interface entre el panel de mampostería y los elementos de hormigón armado en la respuesta global y local en muros de mampostería, para lo cual se construyeron tres especímenes con diferente condición de interface denominados pórtico relleno de mampostería (PR), mampostería confinada convencional (MC) y mampostería confinada dentada (MCD, los cuales se

ensayaron ante carga lateral cíclica. El diseño de los muros se basó en el reglamento argentino INPRES-CIRSOC 103 parte III. Como resultado de los ensayos se observó que el tipo de interface influyó en el patrón de agrietamiento, en la rigidez inicial y en la resistencia. Se comprobó además que el adecuado diseño de los elementos de hormigón y sus nudos viga-columna permitió un mejor control de la degradación de la resistencia, permitiendo que los muros alcanzaran grandes distorsiones de piso. El patrón de agrietamiento observado en todos los casos confirma que el modelo de la biela de compresión equivalente es aplicable tanto a pórticos rellenos como a muros de mampostería confinada.

**Palabras Claves:** Pórticos rellenos, mampostería confinada, interface mampostería-hormigón, respuesta experimental, modelo biela equivalente.

## 1. INTRODUCCIÓN

En zonas de alta sismicidad a lo largo del mundo es práctica común utilizar construcciones con mampostería, dentro de esos sistemas constructivos se pueden encontrar la mampostería no reforzada, mampostería reforzada, pórticos rellenos con mampostería y mampostería encadenada [1].

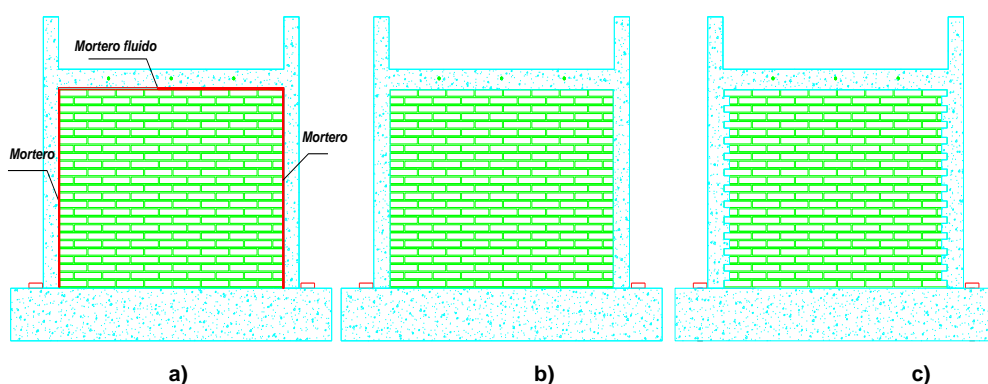
Los pórticos rellenos y la mampostería encadenada son sistemas estructurales que presentan diferencias constructivas entre sí, así como también la manera en que éstas estructuras resisten las cargas laterales y verticales en el plano ([2]; [3], [4], [5]).

En los pórticos rellenos (PR) con mampostería se construye primero el pórtico de hormigón armado y posteriormente se rellena el vano con un panel de mampostería no reforzada usada para cierres exteriores y divisiones interiores. Por tal razón, los códigos vigentes para el diseño sismorresistente de pórticos no consideran la mampostería de relleno como elemento estructural. A través de décadas de investigación y ensayos experimentales se ha demostrado que la presencia de mampostería de relleno modifica el comportamiento y desempeño de las estructuras aporticadas de hormigón armado. Esta práctica constructiva genera una separación (gap) en la interface entre el panel de mampostería y los elementos de hormigón armado (vigas y columnas) que son llenados generalmente con mortero (Figura 1a), dando como resultado una interface que permite integración de ambos elementos; esta integración dependerá de la adherencia del mortero usado entre ambas superficies.

En cuanto a la interacción de la interface panel-pórtico investigadores como Stafford Smith [6], Fiorato et al. [7] y Angel [8] han reportado que ante bajos niveles de deformación lateral no se produce separación en esta interface y el sistema se comporta de manera monolítica pero en la medida que la deformación lateral se incrementa se va produciendo una separación parcial y progresiva de

esta interface hasta que se produce la separación total entre el panel de mampostería y el pórtico, esto debido a que el pórtico intenta deformarse por flexión y la mampostería intenta deformarse por corte, y una vez separados, la mampostería queda comprimida diagonalmente entre las esquinas opuestas del pórtico. Singhal [9] reportó que el pórtico relleno se separó en una distorsión tan baja como 0.5%

En cambio, en la mampostería confinada se construye primero el panel de mampostería no reforzada (práctica común, aunque en algunos casos se usan barras de refuerzo en la junta horizontal) y luego se construyen los elementos confinamiento de hormigón armado (vigas y columnas) lo cual permite que ambos elementos queden íntegramente unidos debido a la alta adherencia que se genera entre el hormigón y el panel de mampostería. En cuanto a la mampostería confinada existen dos prácticas constructivas habituales: una es que los extremos del panel de mampostería donde estarán unidos con los elementos de confinamiento es recta sin presentar ningún tipo de rugosidad adicional más que la generada por los propios materiales (Figura 1b), conocida como mampostería confinada convencional (MC); y otra práctica es que el panel de mampostería termina con mampuestos que sobresalen de manera intercalada entre hiladas generando así una interface dentada (Figura 1c) y los espacios entre hiladas debe ser llenado con el hormigón de los elementos de confinamiento, conocida esta práctica constructiva como mampostería confinada dentada (MCD) que genera una llave corte, como generalmente se le conoce en la literatura al efecto de la superficie dentada. Existen códigos sismorresistentes en diferentes países que regulan el diseño de este sistema estructural como México, Chile, Argentina, Perú, China, Irán, entre otros [2].



**Figura 1** Identificación de los muros: a) portico relleno PR; b) mampostería confinada convencional MC; c) mampostería confinada dentada MCD.

No se encuentra en la literatura técnica información sobre la interacción de la interface en la mampostería confinada convencional y dentada durante el proceso de ensayo. Singhal y Rai [9] reportaron que ante cargas laterales no se

produce separación entre el panel de mampostería y los elementos de confinamiento hasta el último ciclo de carga a una distorsión de 1.75% y que estos sistemas se comportan como muros de corte.

Resultados de modelos refinados de elementos finitos indican que la mampostería y el hormigón de vigas y columnas trabajan en forma monolítica para niveles bajos e intermedios de carga. Ello se debe a la adherencia entre ambos materiales y a la traba mecánica cuando se usan conexiones dentadas. Sin embargo, cuando el nivel de carga y deformación aumenta, la fisuración del muro de mampostería produce un efecto conceptualmente similar al de la separación que se produce en pórticos rellenos, aun cuando las interfaces mampostería-hormigón no se separen. Es por ello que se han implementado macro-modelos (con una o varas bielas equivalentes) que permiten representar el comportamiento de ambos tipos de estructuras [10].

El modelo de la biela equivalente surgió como consecuencia de los estudios realizados por Polyakov (según se indica en [25]), quien sugirió que el efecto del panel podía reemplazarse por una biela de compresión conectada a dos nudos diagonalmente opuestos. Esta idea fue implementada luego por Holmes [26] y Stafford Smith [27] quien realizaron estudios analíticos y experimentales para determinar las propiedades de la biela equivalente. La principal ventaja de este modelo es que permite considerar el efecto global de los paneles de mampostería mediante una representación simple, si bien, presenta la limitación de no poder capturar adecuadamente efectos locales dentro de la mampostería o en las vigas y columnas de hormigón armado. Posteriormente, diversos autores [1, 3, 5, 24, 28, 29, 30] han modificado y mejorado el método de la biela equivalente mediante la consideración de dos, tres o más bielas, para lograr así una mejor representación del efecto del panel de mampostería y, especialmente, de los momentos flectores y esfuerzos de corte en las columnas de hormigón armado. Los macro-modelos de múltiples bielas representan actualmente una alternativa adecuada para el análisis lineal o no lineal de mampostería confinada o pórticos rellenos con mampostería, particularmente cuando se modelan estructuras complejas, como edificios de varios niveles.

Existen muchos factores de los cuales depende el comportamiento y desempeño de estos sistemas ante cargas laterales debido a sismo, como pueden ser: la calidad de la mano de obra, dimensiones y ubicación de las aberturas (puertas y ventanas), relación de aspecto del panel de mampostería, calidad de los materiales que componen la mampostería (mortero y mampuestos), calidad de los elementos de hormigón armado, detalle del nudo viga-columna, condiciones de la interface panel de mampostería-pórtico/elementos de confinamiento, controles de calidad, procesos constructivos, etc.; pero de todos estos factores mencionados el que juega un papel importante en el comportamiento y desempeño de estas estructuras es la interface panel de mampostería-pórtico/elementos de

confinamiento ante cargas laterales en el plano y cargas fuera del plano ([11], [12], [13], [9]).

Se han realizado estudios experimentales con el fin de estudiar el efecto que produce mejorar la interface panel de mampostería-pórtico ya sea utilizando conectores de corte como también diferentes materiales colocados en esta interface. Los resultados, en general, muestran un efecto benéfico de la mejora de la interface tanto en términos de resistencia, de rigidez, de disipación de energía y capacidad de deformación ([14], [15], [16], [17], [18]). También en el área de la mampostería confinada se han realizado estudios experimentales comparativos mejorando la interface panel de mampostería-elementos de confinamiento, aun cuando esta interface es considerada de alta adherencia que es generada por el hormigón en el panel de mampostería, se han utilizado en algunos estudios conectores de corte tanto para la mampostería confinada convencional como para la mampostería confinada dentada, todos muestran el efecto benéfico de la mejora de la interface tanto en términos de resistencia, de rigidez, de disipación de energía, de modo de falla y capacidad de deformación ([11], [19], [20], [21], [22]).

En el conocimiento de los autores, muy pocos estudios experimentales comparativos entre pórticos rellenos y muros de mampostería confinada han sido desarrollados para poder estudiar la influencia de la interface mampostería-elementos de hormigón armado en la respuesta de estos sistemas. San Bartolomé [11] reportó un estudio comparativo donde se construyeron tres muros: a) un muro de mampostería encadenada convencional M1, b) un muro con mampostería encadenada dentada M2 y c) un muro M3 donde primero se construyeron las columnas dejando conectores de corte y luego se construyó el panel de mampostería, posteriormente se construyó la viga, se reportó que la viga no se separó en ningún caso; el comportamiento de los muros M1 y M2 fue similar, el M3 experimentó separación de sus interfaces en bajos niveles de carga.

Singhal y Rai [9] realizó un estudio experimental donde se ensayaron cuatro muros: a) un pórtico relleno, b) un muro de mampostería confinada convencional y c) dos muros mampostería confinada dentada usando dos tipos de densidad de los dientes para verificar el comportamiento y desempeño de estas estructuras al tener diferentes condiciones de interface ante cargas laterales en el plano y cargas fuera del plano, concluyendo que la mampostería confinada dentada y confinada convencional exhiben un mejorado comportamiento en el plano como fuera del plano en comparación con el pórtico relleno, también concluyó que la mampostería confinada dentada mejora el comportamiento post pico en el plano, otra de las conclusiones es que la mampostería dentada con alta densidad de diente mostró una mayor ductilidad y reducida degradación de la resistencia comprada con los otros sistemas.

El estudio experimental que se presenta en este artículo tiene por objeto comparar la respuesta de un pórtico relleno de mampostería, un muro de mampostería confinada convencional y otro de mampostería confinada dentada

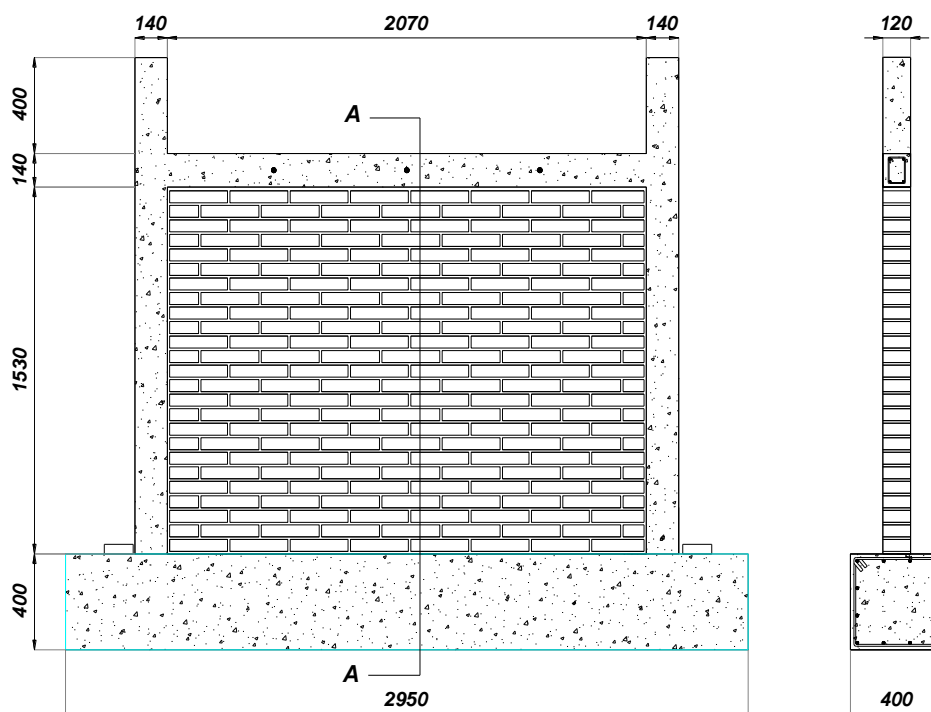
para comprender el rol que juega la interface entre el panel de mampostería y los elementos de hormigón armado ante cargas laterales en el plano.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Descripción general**

El programa experimental consistió en el ensayo de tres muros: a) un pórtico relleno con mampostería (PR), b) un muro de mampostería confinada convencional (MC) y c) un muro de mampostería confinada dentada (MCD). Como el objetivo principal del programa experimental es evaluar la influencia del tipo de interface entre la mampostería y los elementos de hormigón armado en el comportamiento y desempeño ante cargas cíclicas, ciertas variables constructivas y de diseño fueron mantenidas constantes para los tres muros. Estas son: el espesor del muro, las dimensiones del panel de mampostería, el tipo de mampuesto, el tipo de mortero, el ancho de las juntas, las dimensiones y cuantía de refuerzo longitudinal y transversal de los elementos de hormigón armado, detalles de armado del nudo viga-columna. Además, las tareas de construcción fueron realizadas por el mismo operario con la finalidad de reducir incertidumbres para realizar una comparación.

Los muros fueron construidos en una escala reducida de 1:2/3 basados en un prototipo de muro de una vivienda de un nivel, con dimensiones usuales 3400 mm de ancho y 2500 mm de alto. Por lo tanto, las dimensiones de los modelos a ensayar se adoptaron como 2210 mm de ancho y 1670 mm de alto, con una relación de aspecto (alto/ancho) del panel de 0.74, y un espesor de muro de 120 mm. La sección transversal de las vigas y columnas fueron de 140 mm x 120 mm, con refuerzo longitudinal en vigas y columnas de  $4\Phi 8$  mm y estribos de  $\Phi 4$  mm cada 40 mm en zona de rótula plástica y  $\Phi 4$  mm cada 120 mm fuera de la zona de rótula plástica. En la Figura 2 se muestran los detalles geométricos de los muros y en la Figura 3 se muestran los detalles del acero de refuerzo de los elementos de hormigón armado.



**Figura 2** Detalle geométrico de los muros (unidades en mm).

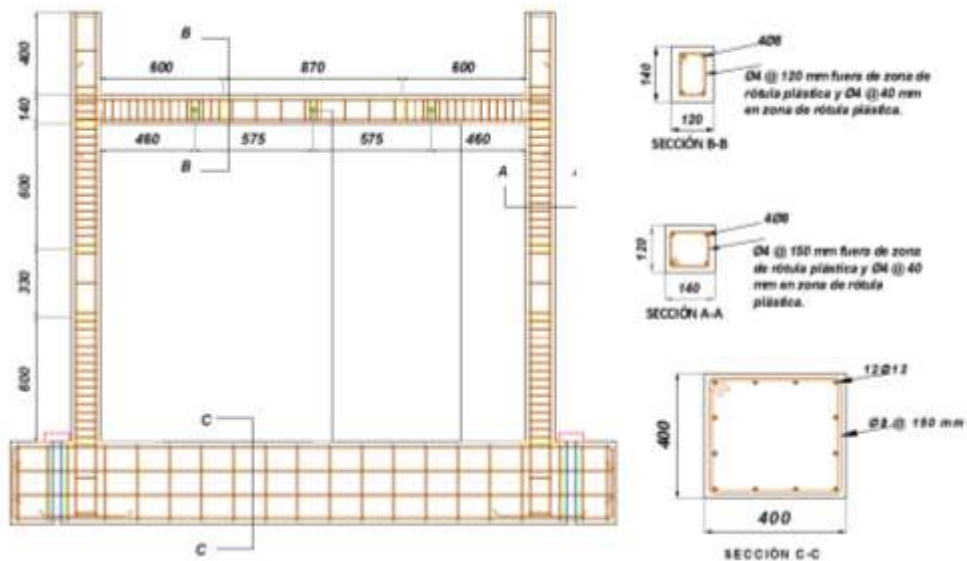
El diseño de los muros de mampostería confinada se basó en el reglamento argentino para construcciones sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103, PARTE III Construcciones de mampostería [23]. Los resultados del diseño de los elementos de confinamiento de hormigón armado tanto en dimensiones como en la cuantía de refuerzo longitudinal como transversal fueron usados para el pórtico.

## 2.2 Caracterización de los materiales

Como parte del programa experimental se realizaron ensayos de la mampostería y sus materiales componentes con el fin de caracterizar sus resistencias como lo especifica el reglamento argentino INPRES CIRSOC 103 parte III [23]. Todas las probetas de hormigón, acero, prismas, muretes y cuatripletos fueron extraídas y confeccionadas durante el proceso de construcción de los muros. Cabe mencionar que las probetas de hormigón y de mortero fueron sometidas a un proceso de curado; en cuanto a las probetas de mampostería su curado fue similar en tiempo y forma al de los muros. Todos los resultados obtenidos de los ensayos de los materiales y de la mampostería se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1** Resumen resultados de los ensayos de los materiales usados en los muros.

Descripción muros	Resistencias (MPa)				
	Ladrillos ( $f'_b$ )	Hormigón ( $f'_c$ )	Mortero ( $f'_j$ )	Prismas ( $f'_m$ )	Muretes ( $f'_v$ )
PR	12.42	35.6	7.65	4.7	0.29
MC	12.42	40.0	7.1	4.7	0.29
MCD	12.42	40.0	6.56	4.7	0.29



**Figura 3** Detalles del acero de refuerzo de los elementos de hormigón armado (unidades en mm).

En la construcción de los paneles de mampostería de los tres muros se emplearon ladrillos de arcilla (250mm x 120mm x 50mm) cuya resistencia característica a la compresión fue de  $f'_b=12.42$  MPa. Se utilizó un mortero tipo I (calidad intermedia) con una proporción de 1:1/2:4 (cemento: cal: arena) con una resistencia a la compresión de  $f'_j=7.65$ ,  $f'_j=7.1$  y  $f'_j=6.65$  MPa a los 28 días para los muros PR, MC y MCD, respectivamente.

La resistencia a compresión del hormigón usado en el pórtico y en las bases de los tres muros alcanzó un valor de  $f'_c=35.6$  MPa a los 28 días (obtenido mediante ensayo de probetas cilíndricas). Este hormigón fue provisto por una empresa local. El hormigón empleado en las vigas y columnas de los muros de mampostería confinada arrojó una resistencia a compresión de  $f'_c=40$  MPa a los 28 días. El hormigonado de estos elementos estructurales se realizó con hormigón elaborado in situ. Si bien se buscó una resistencia similar en ambos hormigones,



esto no se logró debido a la secuencia de construcción que requirió realizar el hormigonado en dos momentos distintos.

La resistencia de fluencia del acero longitudinal de diámetro  $\Phi 8\text{mm}$  fue de  $f_y=487\text{ MPa}$  y con una resistencia a la rotura de  $f_u=682\text{ MPa}$ ; en cambio el acero usado para los estribos de diámetro  $\phi 4,2\text{ mm}$  no presentó zona de fluencia, solo su resistencia a la rotura y fue de  $f_u=584\text{ MPa}$ .

Para obtener la resistencia a la compresión de la mampostería se construyeron prismas de mampostería, dando como resultado una resistencia básica a la compresión de  $f'_m=4.70\text{ MPa}$ . Para conocer el valor de la resistencia básica al corte de la mampostería se construyeron muretes, que ante compresión diagonal se obtuvo una resistencia especificada al corte de la mampostería de  $f'_v=0.29\text{ MPa}$ . También se construyeron cuatripletos para poder determinar la resistencia al corte de la junta de mortero ante diferentes niveles de esfuerzo de compresión, en la Tabla 2 se resumen los resultados del ensayo de corte en la junta.

**Tabla 2** Resultados del ensayo de corte en la junta de mortero.

Nomenclatura	Esfuerzos (MPa)		
	Horizontal ( $F_H$ )	vertical ( $F_V$ )	Coef. de fricción ( $\mu$ )
EC_1	0	0.015	0.88
EC_2	0.2	0.28	0.88
EC_3	0.2	0.39	0.88
EC_4	0.5	0.65	0.88

### 2.3 Proceso constructivo

Los muros se construyeron sobre unas bases de hormigón armado diseñadas para que responda elásticamente y cuya función es permitir anclar los muros a la losa reactiva y que también cumplan el rol de vigas de fundación. Las armaduras de las columnas de todos los muros fueron colocadas junto con la armadura de las bases de tal manera que quedaran embebidas en el hormigón.

Se utilizó hormigón elaborado para las bases y el pódico. Durante 7 días se controló un proceso de curado adecuado usando el encofrado para mantener la humedad, pasado los 7 días se procedió al levantamiento del pódico (Figura 4a), el cual se había hormigonado en forma horizontal teniéndose sumo cuidado de no generar fisuras en este proceso. Tanto las caras internas de las columnas y la parte superior de la base (donde se asentaron los mampuestos) presentan una superficie lisa debido al encofrado. Posteriormente el vano del pódico se rellenó con mampostería (Figura 4b), el espacio (gap) existente entre el panel de mampostería y el pódico (típico en estos sistemas) de aproximadamente 1cm, se

rellenó con el mismo mortero usado para pegar los mampuestos y se humedecieron las superficies del pórtico en contacto con el mortero para lograr una mejor adherencia; el espacio (gap) existente entre la viga y el panel se rellenó con mortero más fluido. Un proceso de curado por 7 días también se llevó a cabo para la mampostería y la interface panel-pórtico con la finalidad de evitar que la retracción del mortero produjera fisuras previas al ensayo.



a)



b)

**Figura 4** Proceso constructivo del muro PR: a) pórtico; b) vano relleno con mampostería.

El proceso constructivo de la mampostería confinada convencional consistió en la construcción primero del panel de mampostería (Figura 5a), tratando de generar una superficie pareja de los mampuestos en los extremos del panel, posteriormente se procedió al encofrado y llenado de los elementos de confinamiento. También se siguió un proceso de curado del panel por 7 días. El hormigón utilizado para los elementos de confinamiento fue elaborado manualmente en el laboratorio y se trató de alcanzar la misma resistencia del hormigón elaborado en planta usado en el pórtico. Para mantener la humedad y producir así un adecuado curado de los elementos de hormigón se mantuvo el encofrado colocado. Al proceder al desencofrado se verificó que las interfaces panel-elementos de confinamiento no presentaran defectos o superficies no adheridas (Figura 5b).

Para la mampostería confinada dentada se procedió de la misma manera constructiva que para la mampostería confinada convencional (Figura 5a). Se realizó la limpieza de la superficie dentada para evitar que quedaran rastros de mortero que pudieran evitar una adecuada adherencia del hormigón a la mampostería. La longitud del dentado fue de  $1/5$  la longitud del mampuesto, que en este caso fue de 50mm, esto para evitar problemas de llenado o fractura de los mampuestos producto del vibrado (Figura 5b).

Antes de proceder a la construcción del panel de mampostería se siguieron algunos cuidados en el manejo de los materiales, los mampuestos

fueron humedecidos 24 horas antes de su colocación, la arena usada para el mortero se limpió de impurezas.



**Figura 5** Proceso constructivo de los muros MC y MCD: a) llenado de los elementos de confinamiento de hormigón armado; b) panel de mampostería.

Siguiendo las consideraciones del reglamento INPRES-CIRSOC [23] los encadenados fueron protegidos en las zonas de rótula plástica con una mayor densidad de estribos para evitar una falla frágil de corte y dar una mayor capacidad de deformación inelástica al sistema (Figura 3). Los estribos se colocaron también en los nudos viga-columna y en esas zonas se anclaron con gancho a 90° las barras de acero longitudinal de las vigas (Figura 6).



**Figura 6** Detalle del nudo viga-columna.

### 3. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

#### 3.1 Sistema de aplicación de carga

El ensayo se realizó aplicando una carga lateral cíclica por medio de un gato hidráulico de 250 kN de doble acción; dicha carga fue transmitida al muro por medio de dos perfiles UPN-120 (según IRAM-IAS U500-509-2) colocados en ambas caras de la viga por medio de 3 barras roscadas de  $\Phi$  22mm embebidos en el hormigón de la viga y ajustados por medio de tuercas y arandelas; estas barras roscadas fueron distribuidas en la longitud de la viga para simular la transmisión de las fuerzas sísmicas de la losa de techo (diafragma rígido) al muro (Figura 7). Con este método de aplicación de carga se evitó la concentración de esfuerzos sobre el nudo viga-columna que pueden generarse en la aplicación directa de la carga en el nudo, tratando de esta manera de reproducir en el laboratorio condiciones de carga similares a las que ocurren en los muros sometidos a la acción sísmica ([24]).

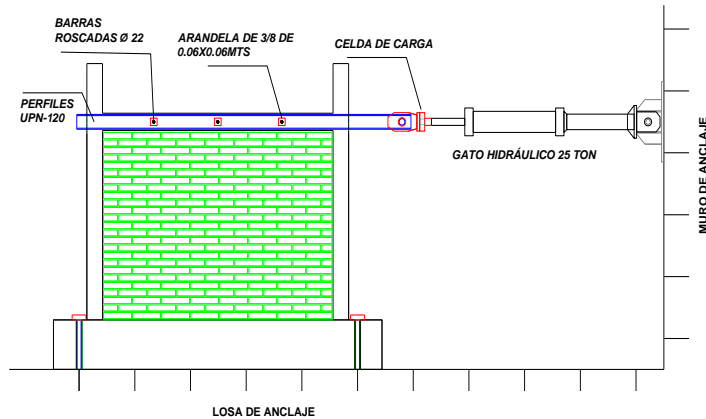
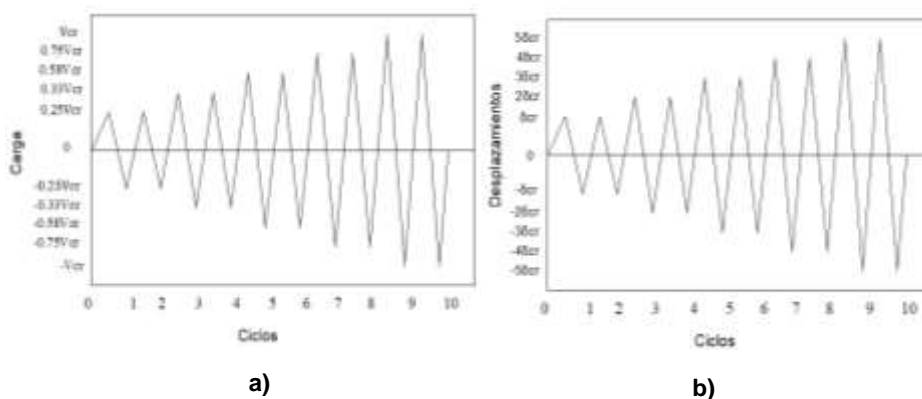


Figura 7 Sistema de aplicación de carga.

### 3.2 Protocolo del ensayo cíclico

El protocolo del ensayo cíclico consistió de dos fases, la primera fase se llevó a cabo por medio de un control de carga hasta alcanzar la carga que produjo el primer agrietamiento diagonal del panel ( $V_{cr}$ ) y que el sistema entrara en el rango no lineal; la segunda fase consistió en un control de desplazamientos, y se llevó a cabo cuando se produjo el primer agrietamiento diagonal del panel en un desplazamiento de agrietamiento ( $\delta_{cr}$ ). Se aplicaron dos ciclos por cada paso de carga y de desplazamiento. La Figura 8 muestra las fases de la historia cíclica.



**Figura 8** Fases de la historia cíclica de ensayo: a) fase control de carga; b) fase control de desplazamiento.

### 3.3 Instrumentación

La carga aplicada por el actuador hidráulico sobre los modelos de ensayo se midió con una celda de carga Honeywell de 10t de capacidad (Figura 7). Los desplazamientos verticales y horizontales de la base y el desplazamiento horizontal en la parte superior del muro se midieron a lo largo de los ensayos con LVDTs (*linear variable differential transformer*) dispuestos para tal fin. Se usaron también potenciómetros lineales para poder monitorear la distorsión angular del muro, elongación y/o acortamiento del panel de mampostería y elementos de confinamiento vertical, separación y/o deslizamientos relativos en las interfaces entre el panel de mampostería y el pórtico/elementos de confinamiento vertical. En la Figura 9 se muestra la ubicación de los diferentes sensores y sus nomenclaturas para su identificación.

Todos los instrumentos de medición se conectaron a un sistema de adquisición de datos de 32 canales, marca National Instruments, utilizando el programa Labview para la visualización y registro de los datos.

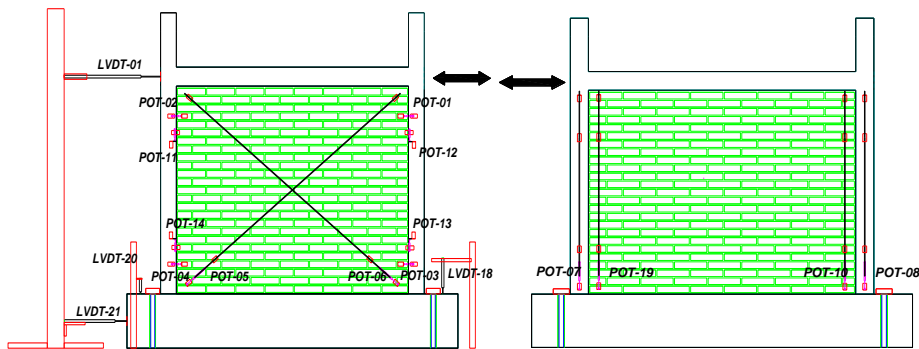


Figura 9 Detalles de la instrumentación de los muros.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

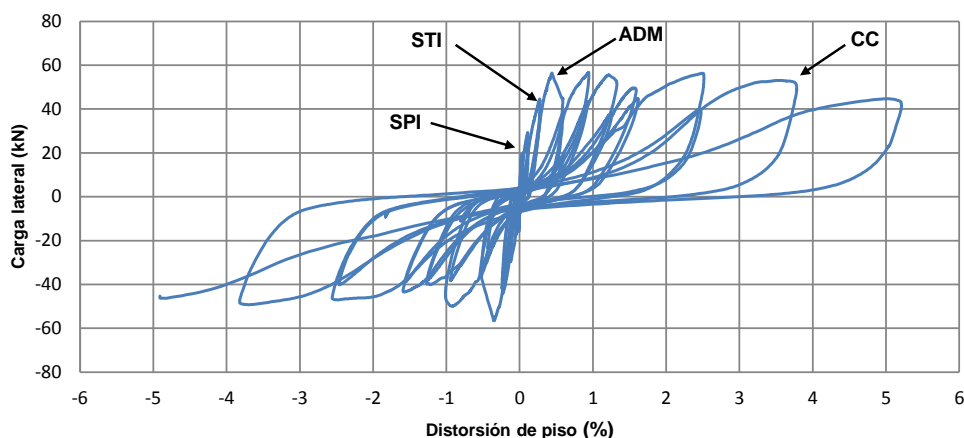
Se presenta en las secciones siguientes los aspectos relevantes de cada uno de los ensayos, mediante una descripción del comportamiento observado y de las curvas de respuesta cíclica fuerza lateral-distorsión de piso. En estas curvas se identifican puntos importantes, tales como: separación parcial de las interfaces (SPI), separación total de la interface (STI) en las columnas del pórtico relleno PR, inicio del agrietamiento diagonal de la mampostería (ADM) y falla de corte por deslizamiento en el extremo superior de las columnas (CC). Es importante aclarar que la falla CC es una falla típica en este tipo de estructuras, que ha sido observada tanto en el laboratorio como en muros sometidos a sismos reales.

### 4.1 Respuesta del pórtico con relleno de mampostería (PR)

La Figura 10 muestra la respuesta cíclica del muro PR. En el primer ciclo del ensayo el sistema experimentó una distorsión de piso (*drift*) de  $\theta=0.01\%$ , con una rigidez inicial de 76 kN/mm, sin ningún tipo de daño en la interface mampostería-hormigón armado. En el siguiente ciclo se produjo una fisura total entre la interface viga-mampostería (esta interface es la más frágil del sistema ya que se usó un mortero fluido para poder sellar el gap dejado por el proceso constructivo) y se propagó generando una fisura parcial (SPI) en la interface columnas-mampostería, en la parte superior del muro. La separación parcial en las interfaces provocó que los ciclos de histéresis comenzaran a experimentar un leve estrechamiento (*pinching*) y una reducción en la rigidez secante.

Las fisuras en las interfaces columnas-mampostería se propagaron hasta alcanzar la fisuración total (STI), para una distorsión  $\theta=0.27\%$ , y también se observaron fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en los nudos viga-columnas. En la mampostería se produjeron fisuras en la junta horizontal a unos 200mm de la base (Figura 11a). Este proceso de daño provocó ciclos de histéresis más amplios, incrementando la disipación de energía. Cabe mencionar

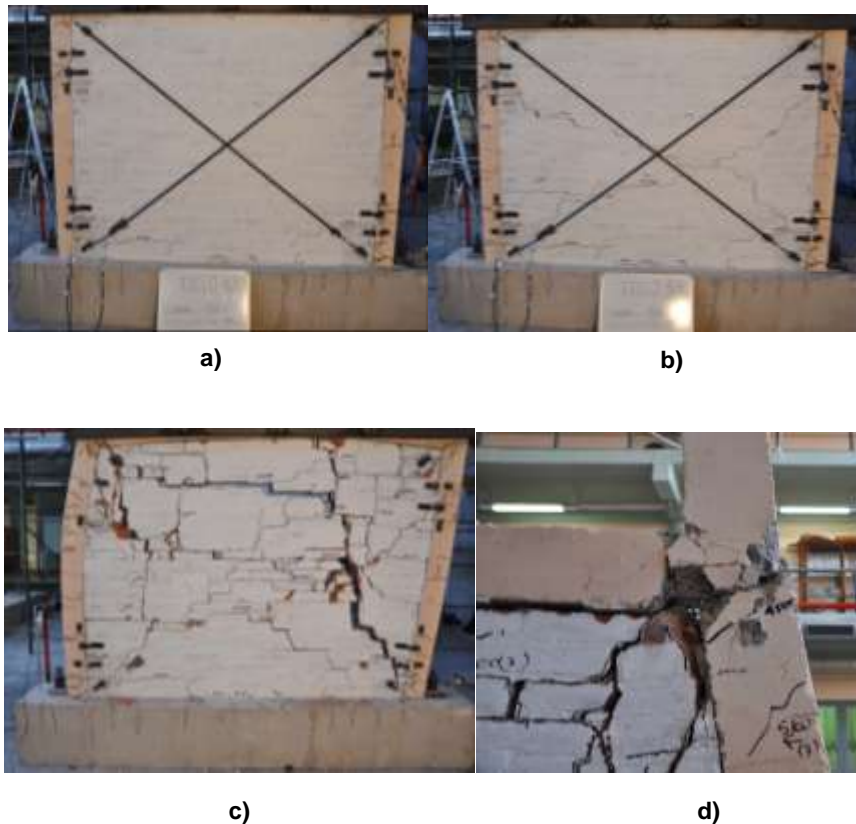
que la separación en las interfaces mampostería-hormigón se produjo en la superficie de las columnas y el mortero siguió adherido a la mampostería.



**Figura 10** Respuesta cíclica del pórtico relleno de mampostería, PR

Al alcanzar una distorsión de  $\theta=0.44\%$  se generó el primer agrietamiento diagonal de la mampostería (ADM) en una grieta que comenzó a unos 150mm del nudo sur en la parte superior de la mampostería (dirección de la carga sur-norte) y se propagó escalonadamente hacia la esquina inferior opuesta de la mampostería (lado norte), en la reversión de la carga (norte-sur) el agrietamiento diagonal fue muy similar (Figura 11b). En este estado se disipa energía a través de la interacción entre la mampostería-elementos de hormigón, en la apertura y cierre de fisuras en las columnas y por un mecanismo friccional en el panel agrietado; los ciclos de histéresis se estabilizan hasta una distorsión de  $\theta=1.22\%$ .

Como consecuencia del agrietamiento diagonal el panel quedó dividido en bloques que generaban un efecto de empuje en las columnas y que a su vez generó una rótula plástica aproximadamente a la mitad de la longitud de las columnas. La rotura de estribo en el extremo superior de la columna se produjo para una distorsión de  $\theta=3.5\%$ , como se puede observar en la Figura 11c. En las bases de las columnas se observaron algunas fisuras diagonales de corte, pero estas no produjeron ningún tipo de falla en esa zona; no se observó aplastamiento del hormigón en las bases de las columnas. En la medida que se incrementó la deformación lateral hasta el estado final del ensayo (Figura 11d) en una distorsión de  $\theta=5.04\%$  se incrementó el patrón de agrietamiento en la mampostería y debido a la capacidad de deformación del pórtico las grietas en la mampostería experimentaron separaciones importantes. En estos últimos pasos de carga los ciclos muestran una importante disipación de energía y estrechamiento de los ciclos de histéresis (*pinching*).

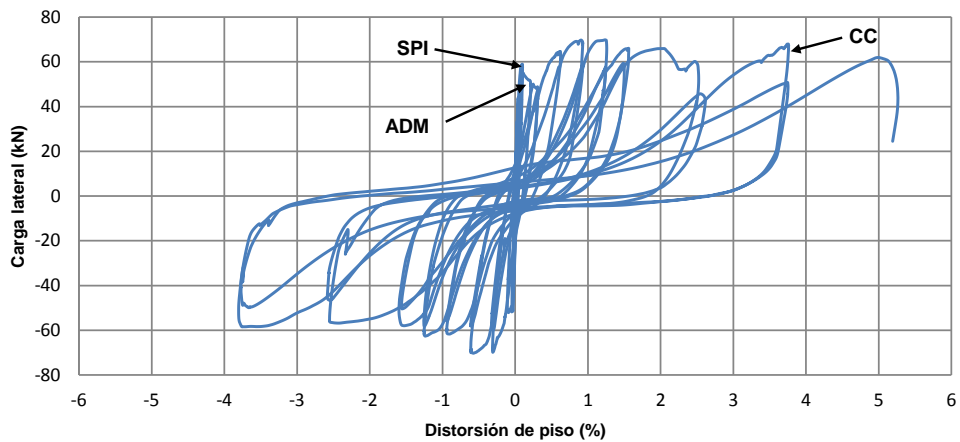


**Figura 11** Patrón de agrietamiento en diferentes estados de carga del pórtico relleno PR: a) STI, b) ADP, c) CC y d) Estado final del ensayo.

#### 4.2 Respuesta del muro de mampostería confinada convencional (MC)

La respuesta cíclica del muro MC se presenta en la Figura 12. En los ciclos iniciales no se observó ningún tipo de daño en los elementos de confinamiento, ni en la mampostería, ni separación en las interfaces. La rigidez inicial del muro fue de 120 kN/mm. Al continuar el ensayo, se produjo la fisuración de la interface mampostería-base de hormigón (que es la interface es la más frágil del muro debido al proceso constructivo) para una distorsión de  $\theta=0.17\%$ , provocando una separación parcial (SPI). Al repetir este ciclo se observó el agrietamiento diagonal (ADM) se inició para una distorsión de  $\theta=0.1\%$ , (Figura13a) y la rigidez lateral se vio redujo en un 42% con respecto a la inicial. La grieta diagonal se originó en la esquina superior de la mampostería propagándose escalonadamente (dirección de la carga norte-sur) hasta aproximadamente a la mitad de la columna sur, luego la grieta se propagó verticalmente siguiendo la dirección de la interface hasta llegar a la base de la columna sur. Al invertir la dirección de carga, el agrietamiento fue similar a lo largo de la otra diagonal. Este nivel de daño provocó una reducción de la rigidez y el panel de mampostería quedó dividido en cuatro bloques. Se observaron también fisuras diagonales de corte en los nudos viga-columnas.





**Figura 12** Respuesta cíclica del muro de mampostería confinada, MC



a)

b)



c)



d)

**Figura 13** Patrón de agrietamiento en diferentes estados de carga del muro MC: a) ADP; b) SPI; c) CC; d) Estado final del muro.

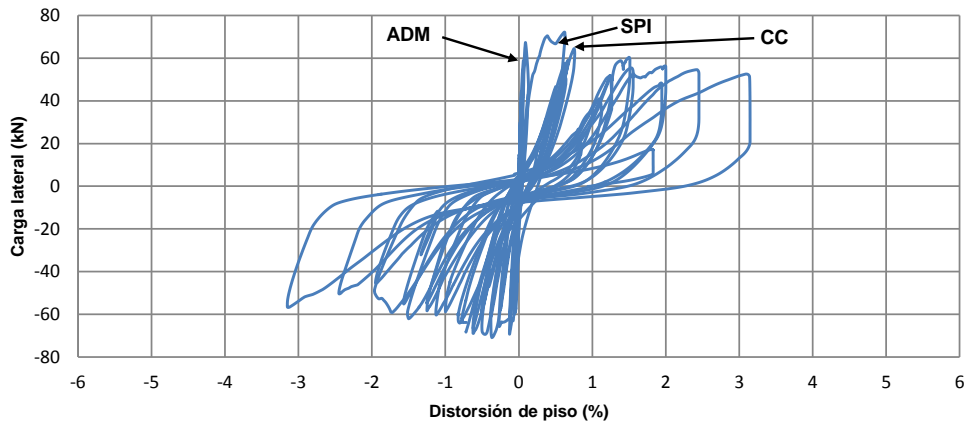
En los pasos de carga sucesivos hasta alcanzar una distorsión de  $\theta=0.9\%$ , las columnas comenzaron un mecanismo de fisuración horizontal, distribuidas en toda su altura, producto de los esfuerzos de tracción, y mayor cantidad de fisuras

diagonales en la parte superior de las columnas; en cambio la mampostería no experimentó más daño, pero si un mecanismo de separación (SPI) y fricción en toda la trayectoria de las grietas diagonales con la reversión de las cargas (Figura 13b). Los ciclos de histéresis comenzaron a presentar un estrechamiento (*pinching*) y mayor disipación de energía.

En los pasos finales de carga, la columna sur falló por corte (CC) en la parte superior en una distorsión de  $\theta=3.76\%$  (Figura 13c). Las zonas inferiores de las columnas presentaron fisuras diagonales (producto de la combinación de esfuerzo de corte y compresión) y horizontales (por efecto de la tracción). La Figura 13d muestra el estado del muro al final del ensayo.

### 4.3 Respuesta del muro de mampostería confinada dentada (MCD)

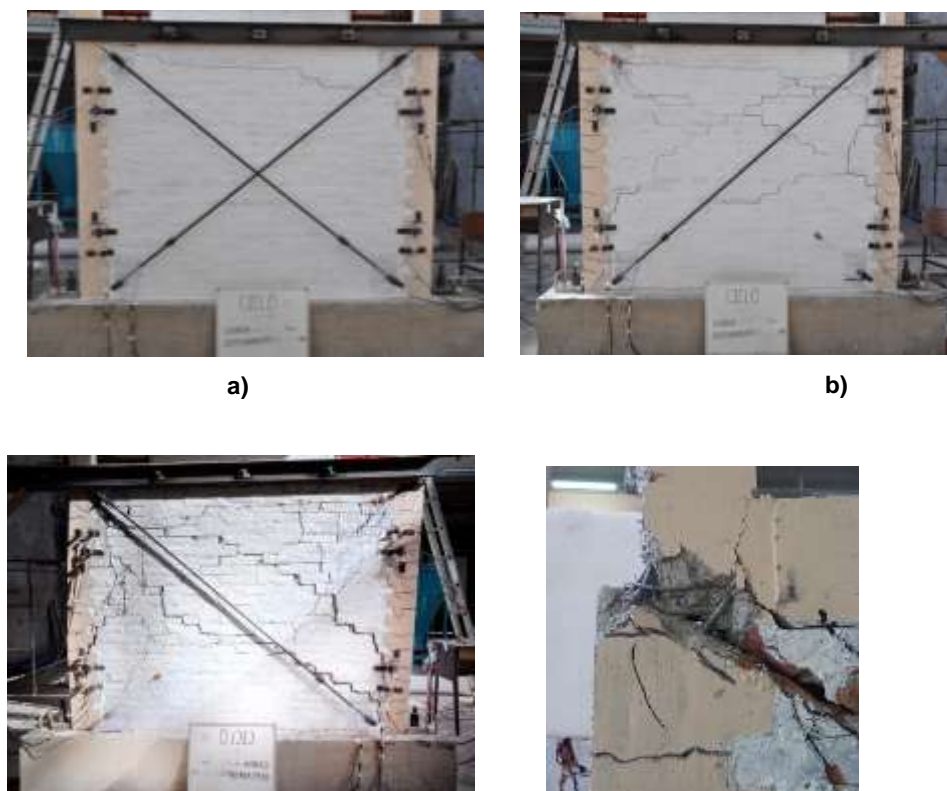
La Figura 14 muestra la respuesta cíclica del muro MCD. En el ciclo de carga inicial el muro no experimentó ningún tipo de fisuración y las interfaces mampostería-hormigón permanecieron adheridos. Este comportamiento monolítico generó una alta rigidez inicial (en comparación a los otros modelos) de 158 kN/mm.



**Figura 14** Respuesta cíclica del muro mampostería confinada dentada, MCD

En los ciclos iniciales, con distorsiones del orden de  $\theta=0.07\%$  la mampostería experimentó grietas diagonales (ADM) en ambos sentidos comenzando en las esquinas superiores del panel, Figura 15a. Posteriormente, se observó un aumento de la fisuración en las zonas aledañas a las interfaces mampostería-columna, Figura 15b, y como resultado de ello se inició la separación parcial del panel (SPI) con respecto a las columnas para distorsiones del orden de  $\theta=0.6\%$ . Es importante destacar que, en el caso del muro con interface dentada, la separación parcial se produce luego que el agrietamiento diagonal de la mampostería. Ello se debe a las mejores condiciones de adherencia y resistencia al corte de dichas interfaces.

La columna norte experimentó daño severo por corte (CC) al alcanzar una distorsión de  $\theta=0.81\%$  (Figura15c) provocando una rápida degradación en la resistencia lateral. A partir de este punto no se incrementaron las fisuras en la mampostería, pero sí el ancho de las existentes. Las columnas mostraron mayor cantidad de fisuras horizontales en toda su altura. La Figura 15d muestra el estado final del muro. Es necesario aclarar que el ensayo se detuvo al alcanzar una distorsión de 3.1% debido a problemas no deseados del sistema de aplicación de cargas.



**Figura 15** Patrón de agrietamiento en diferentes estados de carga del muro MCD: a) agrietamiento horizontal; b) ADP; c) CC y d) estado final del muro.

Es importante resaltar que la interface dentada no evita la separación parcial entre el panel de mampostería y las columnas, como resulta evidente al observar la Figura 16. Las tensiones inducidas en el panel por la fuerza lateral producen la fisuración de los ladrillos en la zona cercana a la interface e incluso la fisuración de los “dientes” de hormigón. Es por ello que el patrón de fisuración en ambos muros de mampostería confinada refleja la formación de una biela diagonal de compresión, con separación estructural parcial en las esquinas no cargadas. Los resultados experimentales obtenidos validan las conclusiones presentadas previamente por [3] y Torrisi y Crisafulli [4] a partir de modelos refinados de elementos finitos, con respecto a la validez del modelo de la biela equivalente no

solo para pórticos rellenos sino también para muros de mampostería confinada con interfaces convencionales y dentadas.



**Figura 16** Separación del panel de mampostería por fisuración del hormigón y/o de los ladrillos en las interfaces dentadas.

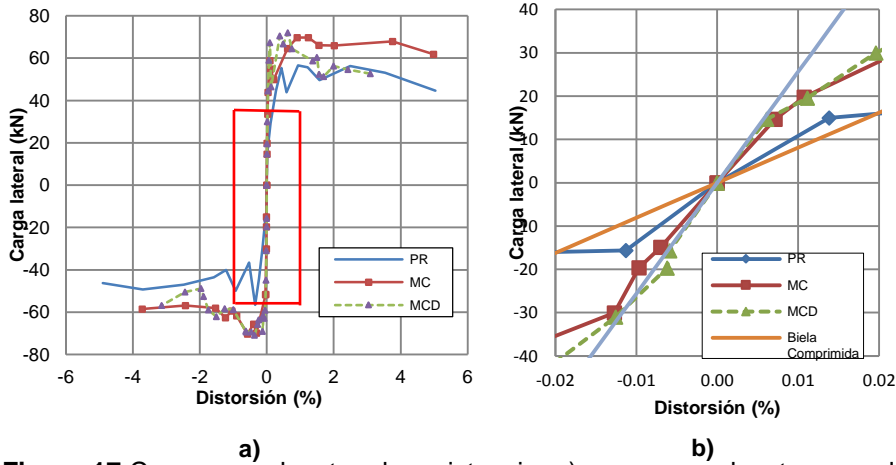
#### 4.4 Análisis comparativo de los resultados

A los efectos de comparar los resultados de los tres modelos, se presentan en la Figura 17a las curvas envolventes de la respuesta cíclica medida experimentalmente. En términos de resistencia lateral se observa que los muros de mampostería confinada presentaron valores similares, siendo el cortante máximo  $V_{\max}=69.8/-70.27$  kN para el muro MC y  $V_{\max}= 72.0/-70.9$  kN para el muro MCD (se indican los valores de resistencia en cada dirección de carga). El pórtico relleno PR registró valores inferiores,  $V_{\max}= 56.6/-55.1$  kN. La reducción de la resistencia lateral se atribuye a las condiciones desfavorables de las interfaces mampostería-hormigón, como así también al hecho involuntario de que la resistencia del hormigón usado en el modelo PR fue menor.

Los tres modelos ensayados mostraron la falla debida a corte por deslizamiento horizontal en el extremo superior de las columnas. El patrón de fisuración en la mampostería se caracterizó en todos los casos por el hecho de que las fisuras se ubicaron a lo largo de las diagonales del panel. Si bien estos patrones presentaron diferencias entre ellos, resultó evidente el efecto de las tensiones principales inducidas en el panel por las acciones laterales. El patrón de fisuración mostró claramente la formación de una biela diagonal de compresión como mecanismo principal para transferir la fuerza lateral en el panel.

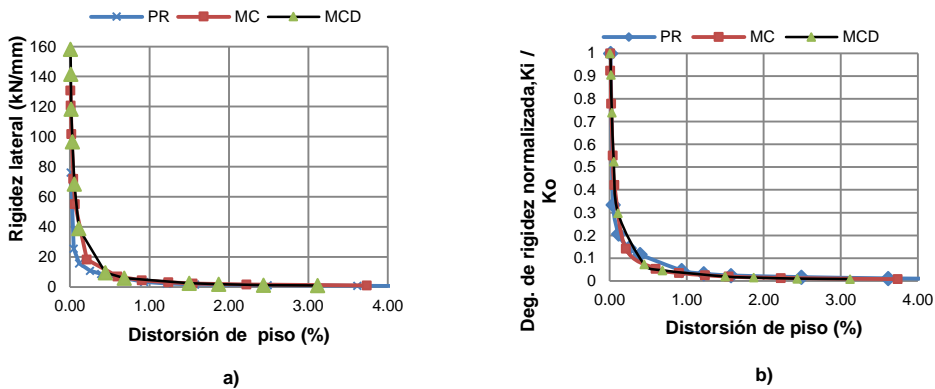
En la Figura 17b se presenta la respuesta inicial en el rango de pequeñas distorsiones de piso (para lo cual se amplía la zona recuadrada en la Figura 17a) con el objetivo de comparar la rigidez inicial de cada uno de los modelos. Se incluye también en esa comparación la rigidez calculada a partir de la hipótesis de comportamiento monolítico de los muros [10] y también la obtenida mediante el

modelo simplificado de biela equivalente (ancho de la biela igual a 0.25 de la longitud de la diagonal del panel). Se concluye de esta comparación que la rigidez inicial de los muros MC y MCE es similar y que puede predecirse adecuadamente considerando el muro como monolítico. Por el contrario, la rigidez inicial del pórtico relleno es menor (por efecto de la falta de adherencia en las interfaces mampostería-hormigón) y es similar a la calculada con el modelo de la biela equivalente.



**Figura 17** Curvas envolventes de resistencia: a) curvas envolventes completas; b) antes del agrietamiento diagonal.

Finalmente, para completar la comparación de resultados, se muestra en la Figura 18 la degradación de la rigidez de los tres modelos a medida que se avanza con el ensayo. Estos resultados se presentan en términos de la rigidez secante medida en cada ciclo (en kN/mm) y en forma relativa, como cociente entre rigidez secante y la rigidez inicial. Se observa en todos los casos la significativa degradación, resultado del comportamiento no lineal de las estructuras.



**Figura 18** Rigidez de ciclo vs. Distorsión de ciclo: a) degradación de la rigidez; b) degradación de la rigidez normalizada.

## 5. CONCLUSIONES

Se presentan en este trabajo resultados de un estudio experimental desarrollado con el objetivo principal de evaluar y comparar el efecto de distintas condiciones de adherencia en la interface mampostería-hormigón armado. Para ello se construyeron tres modelos que fueron ensayados bajo cargas horizontales cíclicas: un pórtico relleno con mampostería (PR), un muro de mampostería confinada convencional (MC) y un muro de mampostería confinada dentada (MCD). Los modelos de ensayo se construyeron con las mismas dimensiones geométricas y con materiales de similares características mecánicas. De los resultados obtenidos se pueden concluir que:

El pórtico relleno de mampostería exhibió una rigidez inicial menor que la de los muros de mampostería encadenada. La separación en las interfaces mampostería-hormigón se observó desde el inicio del ensayo. La resistencia lateral también fue menor que la desarrollada por los muros MC y MCE. Se alcanzaron distorsiones de piso máximas del orden del 5%, si bien se produjo daño severo en el pórtico, particularmente en la parte superior de las columnas.

Los muros de mampostería confinada MC y MCD mostraron una adecuada adherencia en la interface mampostería-hormigón armado. No obstante, se produjo la separación estructural parcial del panel para distorsiones de piso del orden de 0.17% (MC) y 0.60% (MCE). El muro MCD presentó una rigidez inicial ligeramente mayor que el muro MC, debido a las interfaces dentadas. Sin embargo, las resistencias laterales de ambos muros fueron muy similares y el muro MCD presentó una mayor degradación de resistencia.

En todos los casos se produjo la separación estructural parcial del panel de mampostería en las interfaces mampostería-hormigón, o en zonas cercanas a dichas interfaces (en mayor o menor medida según el caso). Este hecho confirma que el modelo de la biela equivalente, originalmente propuesto para pórticos rellenos, es aplicable también a muros de mampostería confinada (con interfaces lisas o dentadas), si los parámetros del modelo se adoptan adecuadamente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación, Internacionales y Posgrado de la Universidad Nacional de CUYO, Mendoza-Argentina, por el financiamiento económico para esta investigación, a través de los proyectos de investigación 06/B026 (2013-2015) y B055 (2016-2018). Se agradece también al personal directivo y técnico del Instituto de Mecánica Computacional y Riesgo Sísmico, IMERIS, donde se realizaron los ensayos estructurales. El primer autor de este trabajo agradece al CONICET por la beca doctoral que ha permitido la dedicación exclusiva en esta investigación.

## REFERENCIAS

1. Torrisi G.S. (2012). Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
2. Brzev S. (2007). Earthquake-Resistant confined masonry construction. National Information Center of Earthquake Engineering, Kampur (India).
3. Torrisi G.S., Crisafulli F.J, Pavese A. (2012). An innovative model for the in-plane nonlinear analysis of confined masonry and infill frame structures. 15<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal. Paper 0574.
4. Torrisi G.S., Crisafulli F.J. (2013). Efecto de la adherencia inicial en el comportamiento de la mampostería encadenada y pórticos rellenos. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Vol. XXXII, págs. 927-944.
5. Torrisi G., Crisafulli F. (2017). Computational Implementation of an Improved Masonry Panel Element. 16<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering. Santiago Chile. Paper 501.
6. Staffor Smith B., Carter C. (1969). A method of analysis for infilled frames. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, vol. 44, 1969, pp. 31-48.
7. Fiorato A.E., Sozen M.A., Gamble W.L. (1970). An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls. A technical report. University of Illinois, Urbana.
8. Angel R. (1994). Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills. Ph. D. thesis, University of Illinois at Urban-Champaign.
9. Singhal V., Rai D.C. (2014). Role of tothing on in-plane and out-of-plane behavior of confined masonry walls. DOI: 10.1061/(ASCE) ST. 1943-541X.000947. American Society of Civil Engineers.
10. Lang S., Crisafulli F.J., Torrisi G. (2014). Overview and assessment of analysis techniques for confined masonry buildings. 10 National Conference on Earthquake Engineering. EERI, Alaska, USA, Julio 2014. Paper 446.
11. San Bartolomé A., Bernardo J., Peña M., (2010). Efectos del peralte de las columnas de albañilería confinada. Pontificia Universidad Católica del Perú.
12. Shing P.B., Mehrabi A.B. (2002). Behaviour and analysis of masonry-infilled frames. Prog. Struct. Engng Mater. 2002; 4:320-331 (DOI: 10.1002/psc. 122).
13. Meli R., Brzev S., Astroza M., Crisafulli F., Dai J., Farsi M., Hart T., Mebarki A., Moghadam A.S., Quiun D., Toma zevic M., Yamin L. (2011). Seismic design guide for low rise confined masonry buildings. Confined Masonry Network, a proiect of the Word Housing Encyclopedia, EERI & IAEE.
14. Liaw T.C., Kwan K.H. (1985). Static and cyclic behaviour of multistorey infilled frames with different interface condicions. Journal of sound and vibration (1985) 99(2), 275-283.
15. Grubisic M., Sigmund V. (2014). Experimental studies of single bay RC frames with strengthened masonry infill. Conference paper.
16. Abdel-Hafez L.M., Abovelezz A.E.Y., Elzeferay F.F. (2014). Behavior of masonry strengthened infilled reinforced concrete frames under in-plane load. National and Building National Research Center (HBRC) Journal.

17. Thirumurugan V., Kumar S.M., Ahmed W.H., Ganasen T.P., Satyanarayanan K.S. (2015). Behavior of infilled frames with different interface materials. National Conference on Recent Advancement and Sustainability in Civil Engineering.
18. Ganesan T.P., Lakshmi pathy M., Thirumurugan V., Satyanarayanan K.S. (2015). Experimental studies on the effects of different interface materials on the behavior of infilled frames.
19. Gonzalez I., San Bartolomé A. (1994). Estudio de la conexión columna-albañilería en muros confinados diseñados a la rotura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
20. Wijaya W., Kusumastuti D., Suarjana M., Rildona., Pribadi K. (2011). Experimental study on wall-frame connection of confined masonry wall. The twelfth East Asia-Pacific conference on Structural Engineering and Construction. DOI: 10.1016/j.Proeng.2011007.263.
21. Mahdi T., AghaB.H., Tayebi A. (2013). Experimental assessment of confined masonry walls. COMPDYN 2013 4<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Kos Island, Greece.
22. Matosevic D., Sigmund V., Guljas I., (2014). Cyclic testing of single bay confined masonry walls with various connection details. Bull Earthquake Eng. DOI: 10.1007/s 10518-014-9627-8.
23. INPRES CIRSOC 103 parte III (1991). Reglamento argentino para las construcciones sismorresistentes, construcciones de mampostería. Edición 1991.
24. Crisafulli F.J. (1997). Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills. Ph D. thesis, Department of civil Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
25. Klingner, R. E. y Bertero, V. V. (1976). Infilled Frames in Earthquake-Resistant Construction, University of California, Berkeley, Report No. EERC 76-32.
26. Holmes, M. (1961). "Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 19, pp. 473-478.
27. Stafford Smith, B. (1966). "Behaviour of Square Infilled Frames", Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division, Vol. 92, No. ST1, pp. 381-403.
28. Chrysostomou, C. Z. (1991). Effects of Degrading Infill Walls on the Nonlinear Seismic Response of Two-Dimensional Steel Frames, Ph. D. Thesis, Cornell University.
29. König, G. (1991). "The State of the Art in Earthquake Engineering Research", Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering, Edited by J. Donea and P. M. Jones, pp. 2/1-22.
30. Syrmakizis, C. A. y Vratsanou, V. Y. (1986). "Influence of Infill Walls to R.C. Frames Response", Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Vol. 3, pp. 6.5/47-53.