

# Estudio del comportamiento de elementos de borde en la mampostería estructural con ladrillos de alta resistencia<sup>1</sup>

## Studying boundary elements' behaviour using masonry walls built with high-resistance bricks

Juan Carlos Restrepo Mejía,<sup>2</sup> Caori Patricia Takeuchi Tam<sup>3</sup>

### RESUMEN

Esta investigación tuvo por objeto estudiar el comportamiento de muros de mampostería estructural construidos con elementos de borde en ambos extremos, y sin ningún elemento de borde, al ser solicitados ante cargas laterales monotónicas y cíclicas. Los muros se diseñaron por resistencia última, siguiendo las recomendaciones de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 con la excepción del refuerzo a corte. Se encontraron también las curvas capacidad carga axial-momento flector y curvas momento-curvatura, empleando el software XTRACT. Por cada tipo de muro se realizaron un ensayo monotónico y dos cíclicos. Con los ensayos de los muros y a partir de las curvas de carga lateral-desplazamiento se determinó la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico (factor de reducción de fuerzas sísmicas  $R$ ) y la ductilidad de desplazamiento y curvatura. En los ensayos se halló que las fallas presentadas en los muros sin elementos de borde fueron por corte con formación de grietas en escalerilla. Los muros con elementos de borde fallaron por cortante en el panel central con formación de grietas en escalerilla y por compresión, con presencia de grietas verticales en la parte inferior del muro y en el contacto entre el panel central y los elementos de borde. Al comparar los resultados de este estudio con otras dos investigaciones realizadas en la Universidad Nacional se encontró que el comportamiento fue similar entre todos los muros ensayados ante cargas cíclicas, sin importar la resistencia de la unidad de arcilla. Los valores obtenidos del factor  $R$ , para los dos tipos de muros ensayados fueron inferiores a los valores recomendados por la NSR-98. Los muros con elemento de borde presentaron una mayor ductilidad de desplazamiento respecto de los muros sin elementos de borde.

**Palabras clave:** elementos de borde, mampostería estructural, ensayos cíclicos, ensayos monotónicos, ductilidad, capacidad de disipación de energía.

### ABSTRACT

This research was aimed at studying the behaviour of masonry walls built with and without boundary elements at both ends when subjected to monotonic and cyclic lateral loads. The walls were designed to have the greatest resistance, following NSR-98 recommendations (*normas Colombianas de diseño y construcción sismo resistente*), except for shear reinforcement. XTRACT software was used for finding axial load *cf* bending moment and curvature *cf* bending moment curves. One monotonic test and two cyclic tests were performed for each type of wall. Experimental results from the walls' lateral load *cf* displacement curves were used for determining their ability to dissipate energy on an inelastic range (" $R$ " force-reduction factor for seismic loads) and displacement and curvature malleability. It was found that walls built without boundary elements suffered shear failure with cracks in a stepped configuration along the bricks' edge. The type of failure for walls built with boundary elements was shear failure in the central panel with cracks in a stepped configuration, in addition to compression failure at the edge of the boundary elements with vertical cracks on the lower part of the wall and at the contact between the wall and the boundary element. Comparison with two other studies carried out at the Universidad Nacional showed similar cyclic behaviour, regardless of the clay brick's strength. The " $R$ " values obtained for both types of walls were lower than the recommended values given by NSR-98. It was determined that walls having boundary element have greater displacement malleability than walls without boundary elements.

**Keywords:** boundary element, structural masonry, cyclic test, monotonic test, malleability, energy dissipation ability.

Recibido: febrero 22 de 2006

Aceptado: junio 5 de 2006

<sup>1</sup> Muros solicitados ante cargas laterales monotónicas y cargas laterales cíclicas, sin la aplicación en ambos casos de carga axial.

<sup>2</sup> Ingeniero civil. M.Sc. en estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. jcrestrepom@gmail.com

<sup>3</sup> Ingeniera civil. M.Sc. en estructuras. Docente, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. cptakeuchi@unal.edu.co

## Introducción

La mampostería estructural es uno de los sistemas de construcción más difundidos en Colombia y ha dejado de ser utilizado solamente en edificaciones de uno o dos pisos, pasando a ser empleada también en edificaciones de hasta de dieciséis pisos, como los construidos en la ciudad de Medellín-Colombia, requiriendo estas estructuras en algunos casos de muros con elementos de borde.

Para realizar el estudio de los elementos de borde se construyeron seis muros a escala natural con ladrillos extruidos de resistencia nominal de 40 MPa y se ensayaron por medio de la aplicación de carga lateral monotónica (empuje del muro en un solo sentido) y de carga lateral cíclica (ensayo al que es sometido el muro de empuje en un sentido y tiro en sentido contrario), ambos ensayos sin la aplicación de carga axial. Con los valores obtenidos en los ensayos cíclicos de cada muro ensayado se determinaron gráficamente su comportamiento, su ductilidad de desplazamiento y curvatura, y se encontró el coeficiente de disipación de energía  $R$ .

Se siguieron las recomendaciones de la Norma de Diseño Sismo Resistente de Colombia NSR-98, expuestas en el Capítulo D - *Mampostería estructural*, así como las recomendaciones de los documentos del FEMA 306 y FEMA 307, y se consultaron investigaciones recientes sobre mampostería con elementos de borde que se han desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.

## Marco teórico

El diseño a flexión de los muros se hizo por resistencia última, siguiendo las suposiciones de diseño indicadas en la sección D.5.1.6 de la NSR-98, y teniendo como criterio dimensional y geométrico el empleo de muros a escala natural que se lograran ensayar con los equipos existentes en el Laboratorio de Investigación y Ensayos de la Universidad Nacional de Colombia y Sede Bogotá.

Las cargas laterales máximas a las que estuvieron solicitados los muros fueron del orden de 180 kN para empuje y de 150 kN para tiro.

Para definir el factor de reducción de las fuerzas sísmicas elásticas  $R$  se utilizó el criterio de igualación de energías descrito en el documento de San Bartolomé, Ángel *et al.* (1999) y lo indicado por García (1998).

En el criterio de igualación de energía (ver Figura 1) se supone que la capacidad de absorción de energía inelástica,  $Eh$ , es equivalente a la energía que absorbería el sistema si se comportase elásticamente,  $Ee$ . Esto permite calcular la máxima carga elástica,  $V_e$ , en función de la energía inelástica y la rigidez inicial experimental,  $K_o$ , y con esto el factor de reducción  $R$  utilizando la expresión (1).

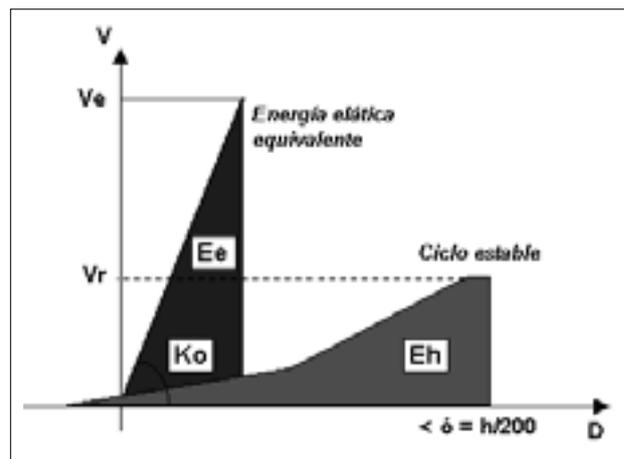


Figura 1. Representación gráfica de la energía elástica y la energía inelástica

$$R = \frac{V_e}{V_r} = \frac{\sqrt{2 * K_o * E_h}}{V_r} \quad (1)$$

Donde:

$V_e$  : Carga máxima elástica

$V_r$  : Carga lateral máxima del espécimen

$K_o$  : Rigidez inicial experimental rango elástico

$Eh$  : Energía inelástica

Para determinar la ductilidad de desplazamiento y curvatura se siguió la metodología descrita por Paulay y Priestle (1992) y lo indicado en los documentos FEMA 306 y FEMA 307. Las ecuaciones (2) a (7) describen la ductilidad por desplazamiento y curvatura,  $\mu_\Delta$ , que es la relación entre el desplazamiento máximo inelástico,  $\Delta$ , y el desplazamiento de fluencia,  $\Delta_y$ , obtenidos de una curva momento-curvatura, valor diferente al que comúnmente se conoce como *ductilidad de desplazamiento*, que es la relación entre un desplazamiento máximo de falla y el desplazamiento de fluencia, determinado a partir de una curva carga-desplazamiento.

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta}{\Delta_y} \quad (2)$$

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta}{\Delta_y} = \frac{\Delta_y + \Delta_p}{\Delta_y} = 1 + \frac{\Delta_p}{\Delta_y} \quad (3)$$

$$\theta_p = \phi_p * l_p = (\phi_m - \phi_y) * l_p \quad (4)$$

$$\Delta_p = \theta_p (h_e - 0.5l_p) = (\phi_m - \phi_y) * l_p (h_e - 0.5l_p) \quad (5)$$

Donde  $l_p = 0.20 * l_w + 0.04 * h_e$  (6)

$$\Delta_y = \frac{\phi_y * h_e^2}{3} \quad (7)$$

Donde:

$\Delta_y$  : Desplazamiento de fluencia a una altura efectiva

$\phi_y$  : Curvatura de fluencia de la sección

$\phi_m$  : Máxima curvatura plástica de la sección

$l_p$  : Longitud efectiva de la articulación plástica

$\Delta_p$  : Máxima capacidad de desplazamiento plástico

$h_e$  : Altura efectiva del muro

### Características de los muros

Para la investigación se utilizaron unidades de arcilla de perforación rectangular referencia Portante Trefilado No. 14 (ladrillos extrudidos de arcilla), con una resistencia especificada a compresión,  $f'cu$ , de 42 MPa.

Las propiedades mecánicas encontradas en el laboratorio para la mampostería y los materiales utilizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales

Parámetro	Unidad	Valor
<i>Unidad de mampostería</i>		
Área bruta unidad de mampostería	mm <sup>2</sup>	423330
Área neta unidad de mampostería	mm <sup>2</sup>	269990
Absorción	%	8,96
Resistencia a la compresión unidad de mampostería	MPa	46,3
Módulo de rotura	MPa	2,23
<i>Morteros</i>		
Resistencia a la compresión mortero de Pega Tipo M (35 días)	MPa	19,0
Resistencia a la compresión mortero de Inyección (35 días)	MPa	10,0
<i>Mampostería</i>		
Resistencia a la compresión	MPa	14,0
módulo de elasticidad	MPa	2850
<i>Acero de refuerzo</i>		
Esfuerzo de fluencia barra No. 3	MPa	427,5
Esfuerzo de fluencia barra No. 4	MPa	450,0
Esfuerzo de fluencia barra No. 5	MPa	471,0

El muro Tipo I se construyó con dos varillas longitudinales de acero de refuerzo No. 5 (15,9 mm) en cada extremo (Figura 2a) y el muro Tipo II con cuatro varillas de acero de refuerzo longitudinales localizadas en sus elementos de borde las dimensiones de los elementos de borde fueron de 0,45 m de largo por 0,30 m de ancho y una varilla de acero de refuerzo adicional de 1/2" (12,7 mm) (Figura 2b). En la pega horizontal de los elementos de borde se colocó un estribo de acero de refuerzo No. 3 (9,5 mm) cada 0,20 m.

Se colocó mortero de relleno en todas las celdas de ambos muros, excepto en la cavidad central de aligeramiento de las unidades de arcilla. A mitad de la altura de los

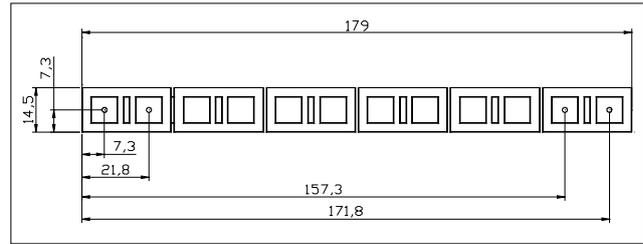


Figura 2a. Muro Tipo I sin elemento de borde

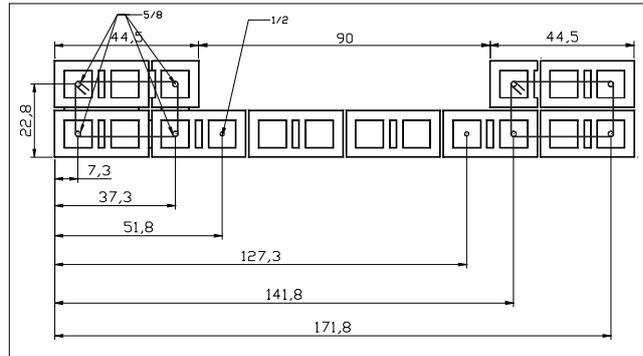


Figura 2b. Muro Tipo II con elemento de borde

Figura 2. Distribución en planta de las unidades de arcilla y localización del acero de refuerzo

muros se colocaron dos varillas de acero de refuerzo No. 4 (12,7 mm) para absorber el refuerzo a cortante; este refuerzo fue colocado en celdas especiales, como se muestra en la distribución en altura de las figuras 3 y 4, así como en la Fotografía 1.

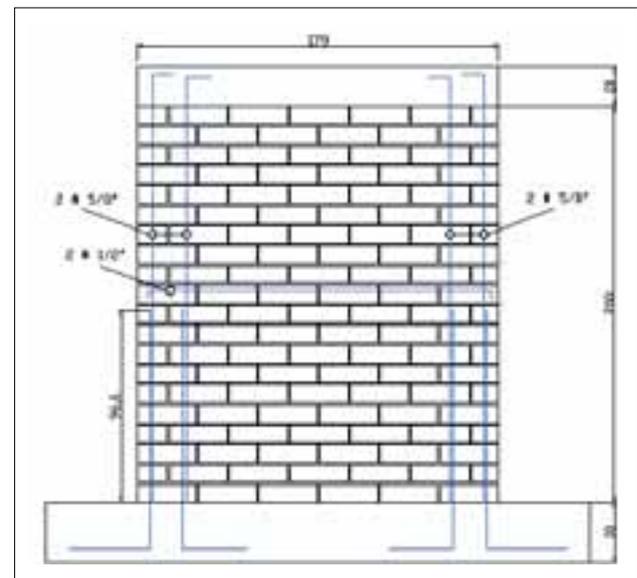


Figura 3. Muro Tipo I - Distribución en altura del acero de refuerzo y de las unidades de arcilla

Se utilizaron, adicionalmente, unidades especiales con celdas de inspección para verificar la limpieza vertical de las celdas de inyección y el correcto posicionamiento del acero de refuerzo. Las unidades especiales estaban ubicadas al inicio de los muros y sobre la viga conformada por unidades especiales para cortante localizadas en la mitad de la altura de los muros.

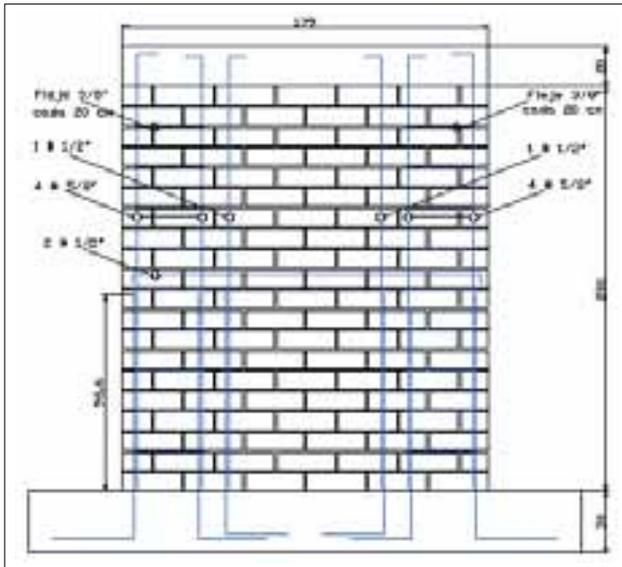


Figura 4. Tipo II - Distribución en altura del acero de refuerzo y de las unidades de arcilla



Fotografía 1. Acero de refuerzo localizado dentro de celdas especiales

## Instrumentación y ensayos de los muros

Para la instrumentación de los muros se colocaron dos deformímetros mecánicos (comparadores de carátula) para medir el desplazamiento vertical en la viga de cimentación, a una altura de 2,10 m se localizó un tercer deformímetro para medir el desplazamiento horizontal del muro, y un cuarto deformímetro ubicado en la mitad del muro para evaluar los desplazamientos laterales del mismo, como se observa en la Figura 5 (en recuadro blanco y letras D.M.).

Además, se colocaron deformímetros eléctricos (*strain gauge*) en las varillas del acero de refuerzo vertical de las celdas externas de cada muro, como se observa en la Figura 5 (en

recuadro amarillo y letras D.E.), cuatro deformímetros eléctricos en los muros con elementos de borde y dos deformímetros en los muros sin elementos de borde.

Se aplicó carga horizontal paralela al plano del muro, como se muestra en la Figura 5.

En las pruebas de los muros se realizaron ensayos monotónicos y cíclicos. El monotónico se hizo aplicando carga horizontal hasta llevar al muro a la falla, obteniendo la curva de carga-deformación. En el ensayo cíclico se empleó el criterio de carga horizontal controlada. Se efectuaron ciclos al 90% de la carga de agrietamiento, al 75%, 100%, 125% y al 150% de la carga de fluencia. Las cargas de agrietamiento y de fluencia fueron calculadas y para cada etapa de aplicación de carga se hicieron tres ciclos.

## Modelación de muros

En la modelación y diseño de los muros Tipo I y Tipo II se realizaron los siguientes análisis:

Determinación manual de la curva de interacción carga-momento en dirección paralela a su plano (hecha con la ayuda de hojas de cálculo y teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio, compatibilidad de deformaciones, los requisitos contenidos en la NSR-98 y la propuesta del bloque equivalente de Whitney (Park y Paulay, 1983) y comparación con los valores obtenidos por medio del *software* XTRACT (Imbsen, XTRACT, Versión Educativa 2.64, 2002). En la Figura 6 se muestra la discretización de las secciones de los muros Tipo I y Tipo II, respetando los espacios que no estarán llenos con mortero de inyección (cavidad central de aligeramiento de las unidades de arcilla) o en contacto con mortero de pega.

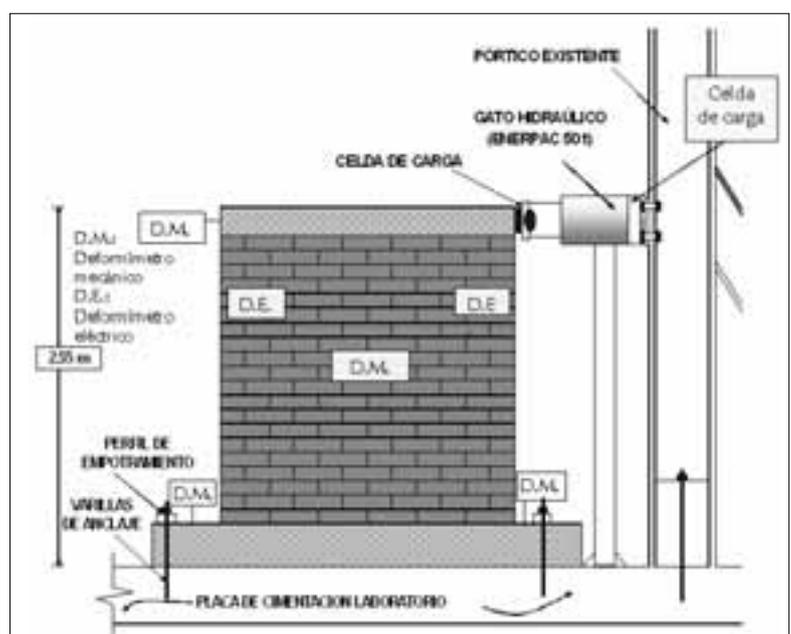


Figura 5. Esquema de aplicación de carga a los muros de prueba.



Figura 6a. Discretización del muro Tipo I



Figura 6b. Discretización del muro Tipo II

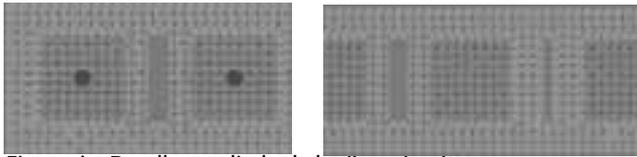


Figura 6c. Detalle ampliado de la discretización

Figura 6. Discretización de las secciones del muro Tipo I y Tipo II

En las figuras 7 y 8 se muestra el comportamiento esperado de capacidad de carga y de momento de los muros Tipo I y Tipo II (diagrama de interacción), donde la modelación manual y la realizada con el software XTRACT son similares, especialmente en el primer caso de muros, sin elementos de borde.

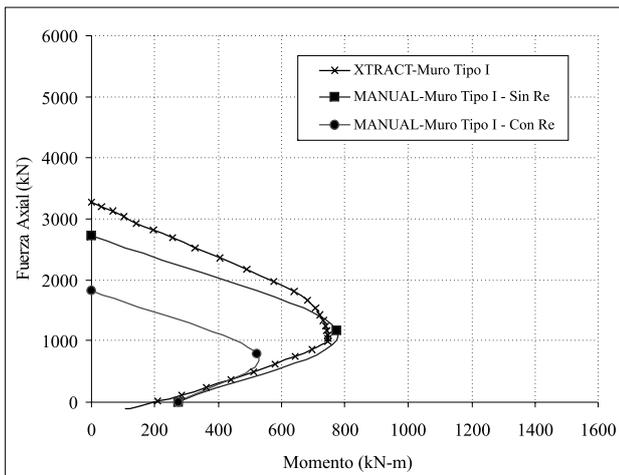


Figura 7. Curvas de interacción carga-momento Muro Tipo I

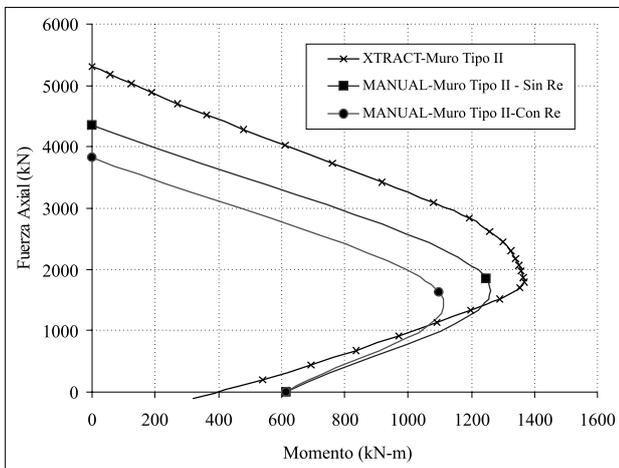
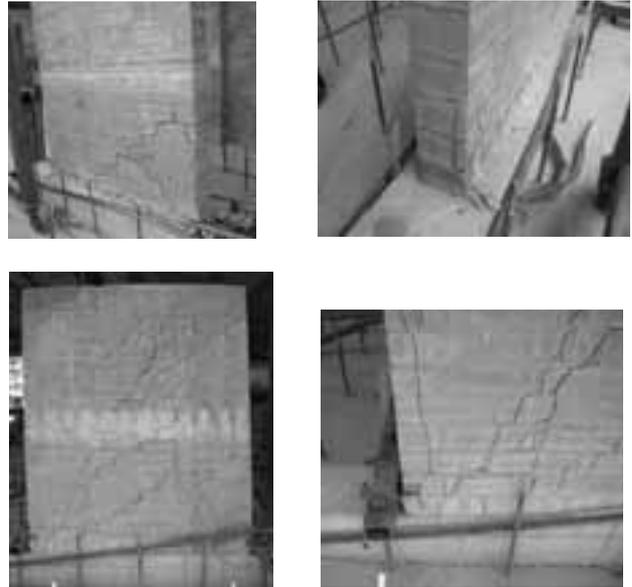


Figura 8. Curvas de interacción carga-momento. Muro Tipo II

En estas figuras se aprecia la reducción de capacidad a carga axial y momento flector a que es sometida la sección cuando la curva es afectada por el coeficiente  $R_e$ , coeficiente que tiene en cuenta los efectos de esbeltez en elementos a compresión.

### Ensayo de los muros

La Fotografía 2 muestra detalles del tipo de falla obtenida para los muros Tipo I y Tipo II en los ensayos monotónicos. Se presentó falla de corte con la presencia de fisuras en escalerilla



Fotografía 2. Ensayo monotónico - Detalles de fisuración muros Tipo I y Tipo II

En la Figura 9 se muestra el comportamiento obtenido de carga-desplazamiento en los ensayos monotónicos y la envolvente de carga-desplazamiento obtenida en los ensayos cíclicos. La envolvente de los ensayos cíclicos es levemente inferior a la lograda en los ensayos monotónicos, teniendo un comportamiento similar en el rango elástico.

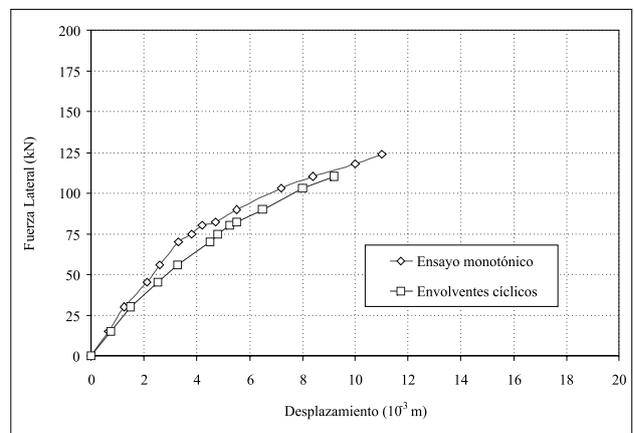
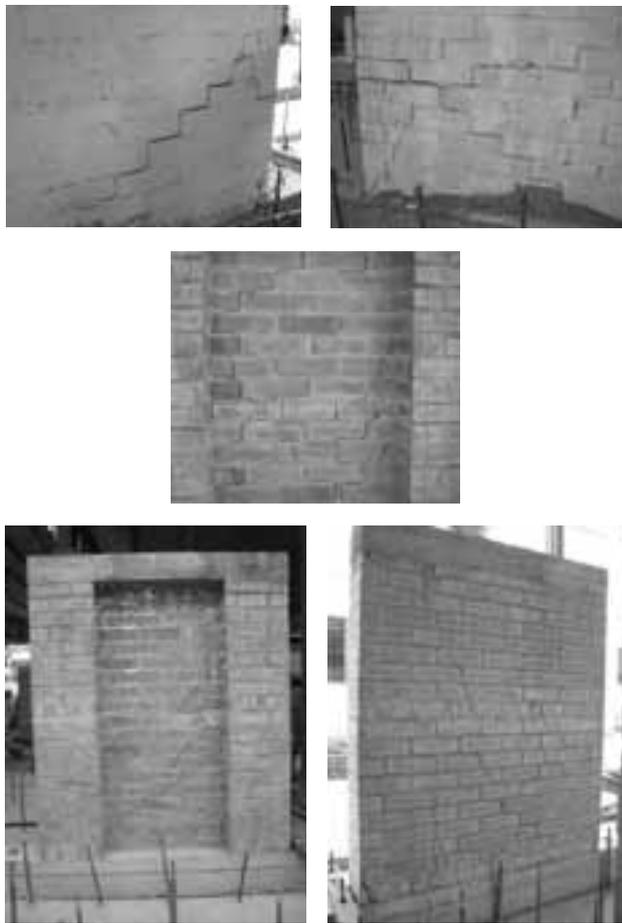


Figura 9. Curvas de carga-desplazamiento. Muro Tipo I

La Fotografía 3 muestra un detalle del tipo de falla obtenida para los muros Tipo I y Tipo II en los ensayos cíclicos. Se presentó una fisura en escalerilla desde la viga de cortante en el panel central. Los elementos de borde presentaron fisuras verticales en la frontera del panel central con el elemento de borde.



Fotografía 3. Ensayos cíclicos - Detalles de figuración muros Tipo I y Tipo II

La curva carga-desplazamiento que se presenta en la Figura 10 muestra que la envolvente de los ensayos cíclicos es levemente inferior a la curva obtenida en los ensayos monotónicos.

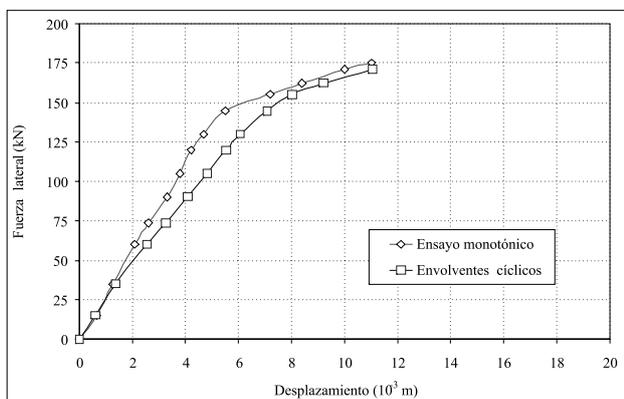


Figura 10. Curvas de carga-desplazamiento muro Tipo II

El muro Tipo II presentó una rigidez mayor en el rango elástico que el muro Tipo I.

En la Tabla 2 se evidencia que para el muro Tipo I en el ensayo monotónico la ductilidad por desplazamiento (calculada con la relación entre el desplazamiento último de falla,  $D_u$  y el desplazamiento de fluencia,  $D_y$ ) es superior a la ductilidad por desplazamiento obtenida para el muro Tipo II. La mayor ductilidad por desplazamiento obtenida en los ensayos cíclicos fue en el muro Tipo II.

Tabla 2 - Ductilidades por desplazamiento, ensayos monotónicos y ensayos cíclicos

Muro	Ensayo	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	Ductilidad por desplazamiento
Muro Tipo I	Monotónico	0,50	10,60	21,20
	Cíclico	0,48	8,85	18,44
Muro Tipo II	Ensayo	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	Ductilidad por desplazamiento
Muro Tipo II	Monotónico	0,70	10,60	15,14
	Cíclico	0,65	1052	16,18

En las figuras 11a y 11b se muestra el comportamiento obtenido en el ensayo cíclico de los muros Tipo I, donde es evidente la pérdida de rigidez y la energía disipada se ve reducida por el estrangulamiento que se presenta en los lazos de cada ciclo de aplicación de carga. La carga máxima promedio para los dos muros ensayados fue de 110 kN, y la deformación máxima obtenida fue de 7,6 mm. La ductilidad promedio por desplazamiento y curvatura fue de 8% aproximadamente.

Los lazos positivos y negativos de los ensayos cíclicos no son totalmente simétricos debido posiblemente a los defectos constructivos que pudieron haber ocurrido en los muros.

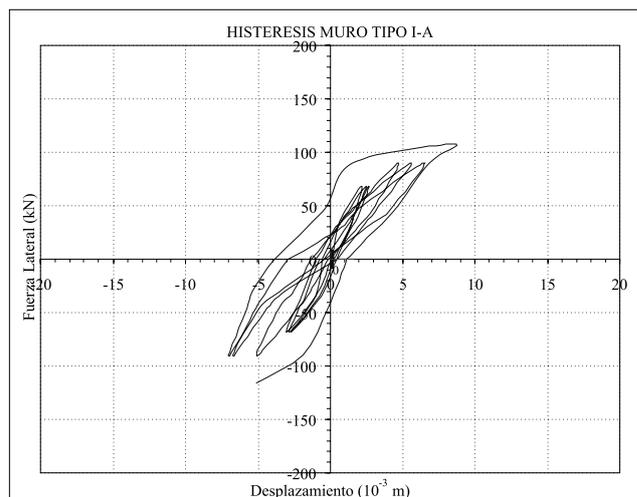


Figura 11a. Curvas carga desplazamiento ensayos cíclicos. Muro Tipo I

En las figuras 12a y 12b se observa el comportamiento histerético obtenido durante los ensayos cíclicos de los muros Tipo II. La carga máxima aplicada promedio fue

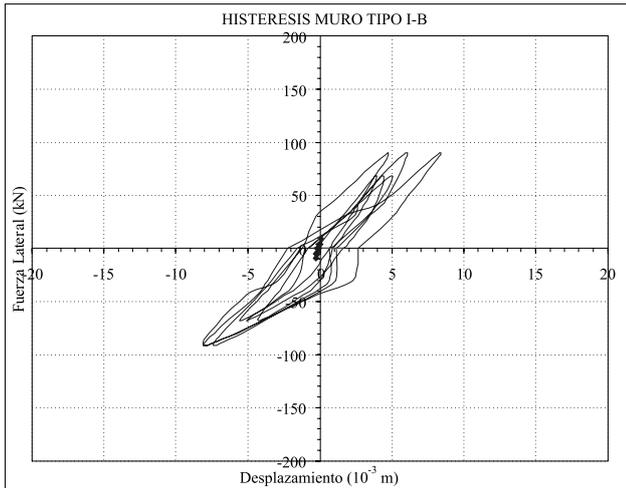


Figura 11b. Curvas carga desplazamiento ensayos cíclicos. Muro Tipo I

de 180 kN, y se obtuvo una ductilidad por desplazamiento y curvatura promedio de 12%, valor superior al obtenido para los muros Tipo I.

Se presentó falla a cortante con estrangulamiento de los lazos histeréticos; la pérdida de rigidez y la degradación de la resistencia fue igualmente pronunciada como en los ensayos cíclicos de los muros Tipo I.

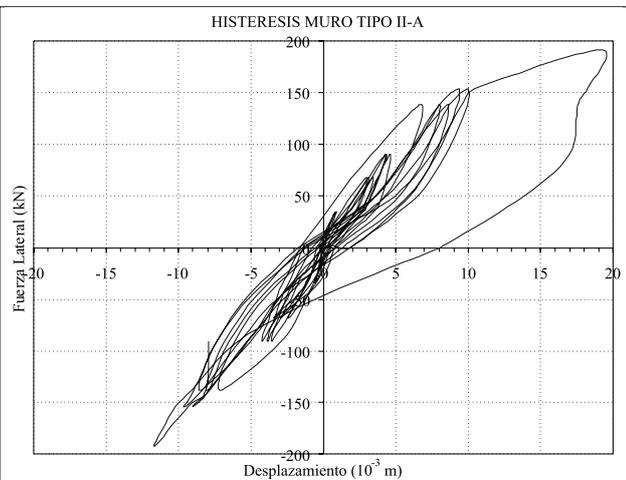


Figura 12a. Curvas carga desplazamiento ensayos cíclicos. Muro Tipo II

En los muros tipos I y II el comportamiento gráfico momento-curvatura es similar tanto para el método manual como por medio del software XTRACT, para ambos casos el desempeño en el rango elástico es igual. Para el muro Tipo I el valor máximo de momento fue de 295 kN-m, y para el muro Tipo II, de 650 kN-m (Figura 13).

El valor teórico obtenido de carga lateral máxima para el muro Tipo I fue de 140 kN, y para el muro Tipo II, de 309 kN. La carga máxima resistente aplicada a los muros fue de 130 kN para el muro Tipo I y de 180 kN para el muro Tipo II, valores inferiores a los calculados teóricamente.

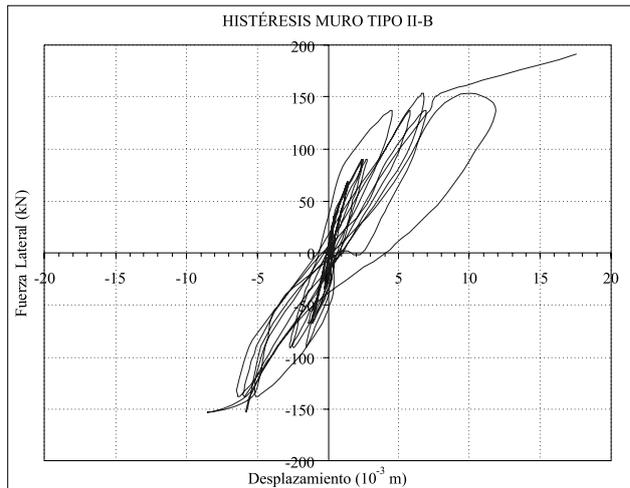


Figura 12b. Curvas carga desplazamiento ensayos cíclicos. Muro Tipo II

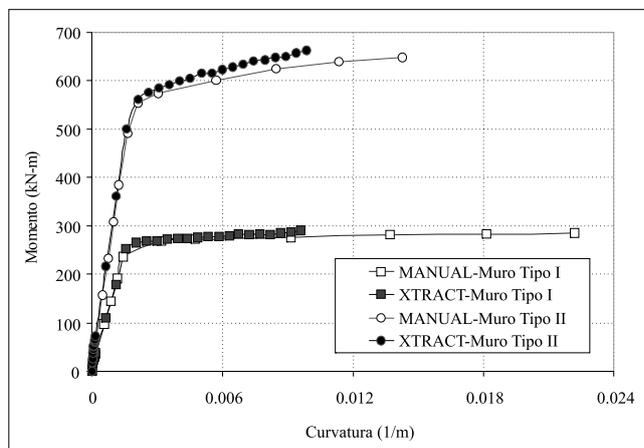


Figura 13. Muros tipo I y II - Curvas teóricas momento-curvatura

## Comparación de resultados

A continuación se exponen y se comparan los resultados obtenidos en dos investigaciones efectuadas recientemente en la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, con los presentados en el presente documento. En estas dos investigaciones se incluyeron los elementos de borde como parte del estudio realizado, y se utilizaron unidades de arcilla prensada de 29.8 MPa de resistencia especificada.

A la primera investigación, denominada "Estudio del comportamiento de elementos de borde en la mampostería estructural", de Medina, 2005, se la llama en el presente artículo "Investigación # 1". A la segunda, "Comportamiento inelástico de muros en mampostería reforzada", de los autores Cortés y Medina, 2005, se la nombrará "Investigación # 2", en ella el diseño de los muros cumplió con los requisitos de la NSR-98, incluyendo el acero de refuerzo requerido a corte. Los datos de la presente investigación, consignados en este artículo, se referencian como "Investigación # 3".

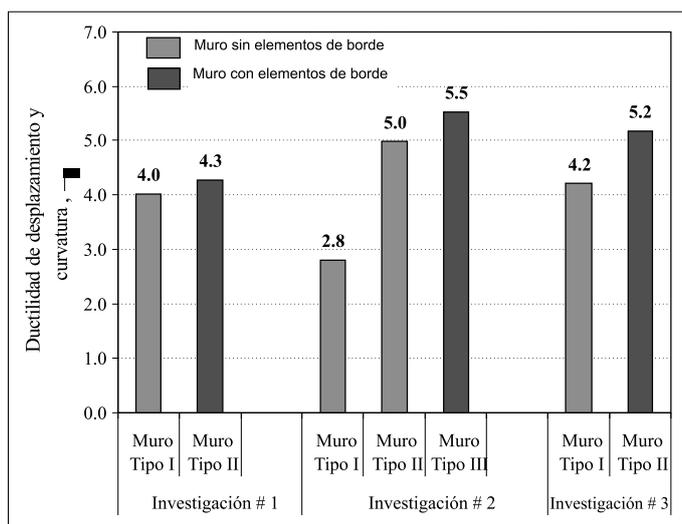
La Tabla 3 muestra las características de los muros con y sin elementos de borde que se emplearon en las investigaciones # 1, # 2 y # 3.

**Tabla 3. Dimensiones de los muros de las investigaciones # 1, # 2 y # 3**

Investigación /Tipo de muro	Elemento de borde	Largo del muro (mm)	Alto del muro (mm)	Longitud elemento de borde (mm)
<b>Investigación # 1</b>				
Muro Tipo I	NO	1.800	2.000	0
Muro Tipo II	Sí	1.800	2.000	450
<b>Investigación # 2</b>				
Muro Tipo I	NO	1.350	1.800	0
Muro Tipo II	NO	1.350	1.800	0
Muro Tipo III	Sí	1.350	1.800	300
<b>Investigación # 3</b>				
Muro Tipo I	NO	1.800	2.000	0
Muro Tipo II	Sí	1.800	2.000	450

Los valores promedios obtenidos de ductilidad de desplazamiento y curvatura,  $\Delta u$ , se muestran gráficamente en la Figura 14. Se evidencia que los muros con elementos de borde tienen mayor ductilidad de desplazamiento y curvatura. Se identifica que los muros sin elementos de borde de las investigaciones # 1 y # 3 presentaron valores similares de ductilidad de desplazamiento y curvatura, mientras que los muros sin elementos de borde de la investigación # 2 no son comparables entre sí.

El muro Tipo I de la investigación # 2 tuvo un valor de ductilidad de desplazamiento y curvatura igual a 2,8, y el muro Tipo II, de 5,0; este último valor es relativamente alto en comparación con la media de ductilidad obtenida para los muros con elementos de borde.



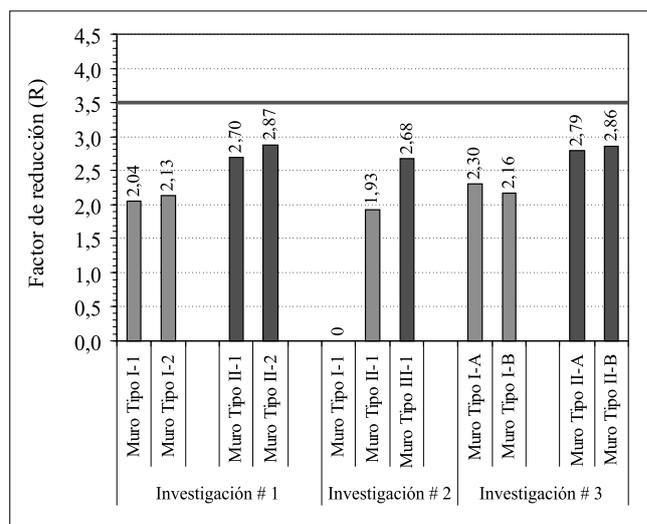
**Figura 14. Ductilidad de desplazamiento y curvatura obtenidas a partir de las investigaciones # 1, # 2 y # 3**

En la Figura 15 se muestran los valores obtenidos del factor de reducción de capacidad  $R$ . La NSR-98 en la Tabla A.3-1 indica que para muros de mampostería reforzada de bloque de perforación vertical con capaci-

dad moderada de disipación de energía (DMO) se debe emplear un factor de reducción  $R_0$  de 3,5, y si se encuentra con todas las celdas llenas, el valor de  $R_0$  es 4,5. En la investigación # 2 no todas las celdas se rellenaron con mortero de inyección, mientras que en las # 1 y # 3 sí lo estaban.

Tomando los valores obtenidos de  $R$  calculado de las tres investigaciones, se determinó que el valor promedio de  $R$  para todos los muros es de 2,45.

Para los muros sin elementos de borde se obtuvo un valor promedio de  $R$  igual a 2,11, y para los muros con elementos de borde de 2,78, valores que siguen siendo inferiores a los requeridos por la NSR-98.



**Figura 15. Valores obtenidos del factor  $R$  de las investigaciones # 1, # 2 y # 3**

Cabe anotar nuevamente que en ninguna de las tres investigaciones se aplicó carga axial a los muros durante el ensayo cíclico. Si en esta clase de ensayo se aplica carga axial al muro durante el ensayo, el valor de  $R$  puede variar.

## Conclusiones

Se verificó que la resistencia especificada a la compresión,  $f_{cu}$ , por los fabricantes de los ladrillos de arcilla extruida (treilados portantes) se cumplió, obteniéndose en los ensayos un  $f_{cu}$  igual a 46,3 MPa contra el valor especificado en la ficha técnica de 40 MPa.

En el ensayo de los muretes de prueba de mampostería con todas las celdas llenas se obtuvo una resistencia a la compresión  $f'_m$  igual a 14.2 MPa.

El módulo de elasticidad obtenido a partir del ensayo de los muretes de prueba fue muy inferior a los valores propuestos por la NSR-98, ya que en los ensayos se determinó un módulo de elasticidad,  $E_m$ , igual a 2482 MPa, equivalente a  $E_m = 175 * f'_m$ , mientras que la NSR-98 recomienda utilizar una relación de  $E_m/f'_m$  igual a 750.

El comportamiento de las curvas de interacción carga-momento son similares utilizando la modelación con el software XTRACT y el procedimiento manual basado en la resistencia última.

Se encontró que dependiendo de la fluidez del mortero de inyección, este, al ser inyectado y vibrado dentro de las celdas verticales, migra hacia las juntas de las unidades, contribuyendo a tener una mayor área neta de contacto de la mampostería.

La falla que se presentó en los muros Tipo I, sin elementos de borde, fue de cortante, presentando fisuración en diagonal.

La falla que se detectó en los muros Tipo II, con elementos de borde, fue de cortante, con fisuras en escalerilla en "X" siguiendo las pegas de mortero (por la aplicación de carga en ambas direcciones de empuje y de tirar); el refuerzo horizontal colocado fue aproximadamente el 75% al requerido por diseño con el fin de identificar el comportamiento dúctil o no dúctil de los muros. Con esta cantidad de acero de refuerzo para cortante se detectaron fisuras verticales entre la unión del panel central del muro con los elementos de borde y aplastamiento de las unidades en los extremos de los empotramientos del muro.

Las curvas de los ensayos cíclicos, comparadas con las curvas de las envolventes de los ensayos monotónicos de los muros Tipo I y Tipo II, muestran una gran similitud entre sí; sin embargo, no se evidencia un claro comportamiento al pasar la sección del rango elástico al rango inelástico.

Los muros sin elementos de borde presentaron una menor ductilidad de desplazamiento y curvatura con respecto a los muros con elementos de borde, esto significa aparentemente que los muros con elementos de borde tienen una mayor capacidad de disipación de energía en el rango inelástico.

Como la ductilidad por desplazamiento y curvatura fue determinada según las recomendaciones del FEMA 306 y del FEMA 307, se puede indicar que los muros construidos con y sin elementos de borde presentan un nivel de daño intermedio para una ocupación inmediata.

Los muros de mampostería fabricados con ladrillos de arcilla extruida (portantes trefilados), cuando son sometidos a cargas verticales presentan un buen desempeño. Pero ante cargas cíclicas, los muros con ladrillos extruidos se comportan de manera similar a los fabricados con ladrillos de arcilla prensada que fueron objetos de las investigaciones # 1 y # 2.

Los valores obtenidos para el factor de capacidad de disipación de energía  $R$ , fueron inferiores a los esperados. En esta investigación se encontraron valores de  $R$  para los muros sin elementos de borde de 2,11, y para los muros con elementos de borde de 2,78 se debe tener en cuenta la ausencia de carga vertical durante el ensayo.

Para determinar el valor del factor de capacidad de disipación de energía  $R$ , se empleó un desplazamiento máximo de 0,5% de la altura del muro, valor que es el indicado por la NSR-98 para la deriva máxima. Con este valor de desplazamiento se cumple que los muros sufren un daño intermedio con una ocupación inmediata.

## Recomendaciones

Es importante que se realicen otras investigaciones en la que se estudie únicamente el parámetro del módulo de elasticidad de la mampostería,  $E_m$ , tanto para muretes con celdas vacías y celdas llenas con mortero de inyección, ya que en la presente investigación y en la desarrollada por el autor Medina F. los valores de módulo elástico son inferiores a los exigidos por la NSR-98.

Se recomienda que en próximas investigaciones, si se realizan ensayos cíclicos a muros de mampostería, se simule la aplicación de carga axial, con una carga equivalente al peso que sostendría el muro si tuviera una carga de muro hasta de cinco pisos de altura. Lo anterior, con el fin de verificar el comportamiento inelástico y determinar la ductilidad por desplazamiento y curvatura y el factor de reducción de fuerzas  $R$ , más acorde a la realidad.

También, realizar una investigación similar a la presente, teniendo en cuenta la utilización del 100% del acero de refuerzo requerido a cortante que puede ser ubicado en toda la altura del muro.

Y, finalmente, complementar esta investigación y las ya efectuadas en estudios que impliquen el análisis de otras variables no estudiadas.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo que realizó la Universidad Nacional Sede Bogotá, en nombre de todo su personal, para hacer esta investigación; de igual manera, a la Ladrillera Santa Fe, empresa Colombiana productora de elementos de arcilla, por su colaboración.

## Bibliografía

Cortes, J. C. y Medina, J. D., Comportamiento Inelástico de Muros en Mampostería Reforzada., Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2005.

FEMA 306., Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Technical Resources., 1996.

FEMA 307., Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Technical Resources., 1998.

García, L. E., Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico., Universidad de los Andes, Colombia, 1998.

Imbsen, XTRACT, Versión 2.64, Copy 2002., Cross Section Analysis Software for Structural Engineers - Beginning Level - Example 1 and Example 2, 2002.

Mander, P. P., Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete., J. Structural. Eng., ASCE, 114, 8, 1988, pp. 1827-1849.

Medina, F., Estudio del Comportamiento de Elementos de Borde en la Mampostería Estructural., Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2005.

Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98., Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998, Decreto 034 de 1999, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 1999.

Park, R. y Paulay, T., Estructuras de Concreto Reforzado., Editorial Limusa, 1983.

Restrepo, J. C., Estudio del Comportamiento de Elementos de Borde en la Mampostería Estructural con Ladrillos de Alta Resistencia., Tesis de Maestría – Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.

San Bartolomé, A., Muñoz, A., Madueño, G. y Cavero, R., Comportamiento Sísmico de Placas de Concreto Reforzadas con Mallas Electrosoldadas., Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999.

Paulay, T. y Priestley, M.J.N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, 1992.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA  
SEDE BOGOTÁ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

#### ANÁLISIS, DISEÑO Y MATERIALES GIES

##### Líneas de investigación:

- Diseño Estructural
- Evaluación de Estructuras
- Guadua y Madera
- Hormigón
- Microhormigón
- Mampostería
- Metales
- Modelos de Análisis

##### Sector de aplicación:

- Construcción civil
- Desarrollo de programas (software)
- Educación
- Fabricación de estructuras metálicas, calderería pesada, tanques, reservorios y otros productos de metal, exclusive máquinas y equipos
- Planeamiento y gestión de las ciudades, incluso política y planeamiento de vivienda

**Mayor información:** Ing. Caori Patricia Takeuchi Tam. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Teléfono: (57 1)3165000 Ext. 13310. e-mail: [cptakeuchit@unal.edu.co](mailto:cptakeuchit@unal.edu.co)