

# Simulación numérica del comportamiento sísmico de muros de concreto reforzado

## *Numerical simulation of the seismic behavior of reinforced concrete walls*

Eduar Cuesvas<sup>a\*</sup>, Roger Ortega<sup>b\*</sup>, Pedro Torres<sup>c\*</sup>, Johannio Marulanda<sup>c\*</sup>, Peter Thomson<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup> Estudiante de Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle.

<sup>b</sup> Ingeniero Civil, M.Sc., Estudiante de Doctorado. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle.

<sup>c</sup> Ingeniero Civil, Estudiante de Maestría. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle.

<sup>d</sup> Ingeniero Civil, Ph.D., Profesor Titular. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle.

<sup>e</sup> Ingeniero Aeroespacial, Ph.D., Profesor Titular. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle

\*Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7).

### RESUMEN

En este estudio se propone el uso del modelo numérico Shell Layered de ETABS, para el análisis del comportamiento no lineal de muros de concreto reforzado. Se realiza una simulación computacional de ensayos cíclicos de muros reconocidos y se verifica mediante la comparación de las respuestas experimentales y numéricas, en términos de resistencia, desplazamiento, rigidez, y disipación de energía. Los resultados indican que este modelo, desarrollado con un software comercial de amplio uso, y con un bajo costo computacional, es una herramienta válida para estimar la capacidad de desplazamiento y resistencia de los muros de concreto reforzado.

### ABSTRACT

This study proposes the use of the ETABS Shell Layered numerical model for the analysis of the non-linear behavior of reinforced concrete walls. A computational simulation of recognized wall cyclical tests is performed and verified by comparing the experimental and numerical responses, in terms of resistance, displacement, stiffness, and energy dissipation. The results indicate that this model, developed with commercial software of wide use, and with a low computational cost, is a valid tool to estimate the displacement capacity and resistance of reinforced concrete walls.

**PALABRAS CLAVE:** simulación numérica, muro estructural, concreto reforzado, shell layered, ETABS.

**KEYWORDS:** numerical simulation, structural wall, reinforced concrete, shell layered, ETABS.

## 1. Introducción

Los muros estructurales de concreto reforzado (CR) son uno de los elementos más usados para rigidizar edificaciones, debido a su buen historial de comportamiento en eventos sísmicos. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado algunas deficiencias en su diseño y construcción. Estos elementos toman en ocasiones la mayor parte de la carga lateral de

una edificación, por lo tanto, sus solicitaciones son altamente exigentes. Estas razones indican la necesidad de continuar analizando su comportamiento, para estimar con un mejor margen su respuesta en el campo inelástico.

Desde la década de los 70's se han realizado varias campañas experimentales y analíticas con el fin de evaluar y/o estimar la

respuesta no lineal de muros de CR. Principalmente, se han desarrollado dos tipos de modelos numéricos, clasificados según [1] en: modelos microscópicos y modelos macroscópicos. Los modelos microscópicos están basados en el método de los elementos finitos y permiten una interpretación detallada del comportamiento local. Se caracterizan por una alta demanda computacional y cierto grado de complejidad en su desarrollo e interpretación de resultados. Los trabajos desarrollados por [2,3] son buenos ejemplos de este tipo de modelización. Por su parte, los modelos macroscópicos capturan el comportamiento general con buenas aproximaciones y pueden llegar a ser más prácticos. Aunque presentan ciertas limitaciones a la hora de calcular deformaciones y capturar adecuadamente la interacción flexión-cortante [4]; además de no estar, en su mayoría, implementados en plataformas computacionales de uso común [5]. Trabajos como los de [5,6] son realizados con este tipo de modelos. En la Tabla 1 se muestran algunos de los modelos numéricos disponibles más representativos utilizados para el análisis del comportamiento de muros de CR.

**Tabla 1. Modelos numéricos disponibles para el análisis de muros.**

MACRO MODELOS	MICRO MODELOS
Analogía de una cercha [7]	Método de los elementos finitos (MEF) [8,9]
Elemento TVLEM [10]	
Elemento MVLEM [11,12]	Elemento lineal con sección de fibras [13,14]
Elemento SFI-MVLEM [5]	

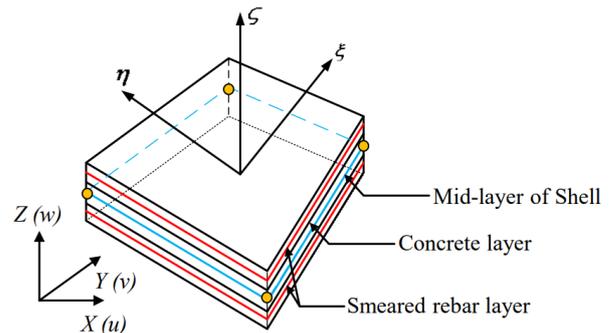
Por otro lado, con el auge del diseño basado en desempeño o desplazamiento, se requieren maneras de determinar el comportamiento realista de las estructuras bajo incursiones fuera del campo elástico [8]. Por lo cual, modelos numéricos que consideren el comportamiento no lineal podrían desempeñar un papel importante en el diseño sísmico de edificios nuevos y existentes.

Dadas estas razones, se propone en este estudio la implementación de un modelo numérico no lineal, disponible en un software comercial de uso común, que permita estimar de manera práctica la respuesta histerética general de muros de CR.

## 2. Modelo numérico Shell Layered

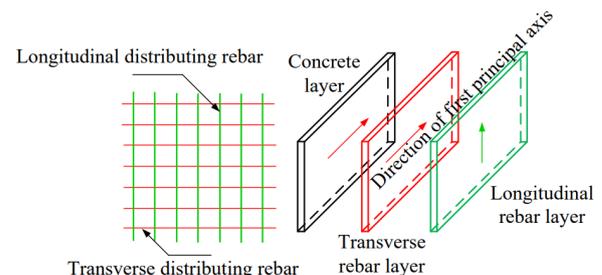
### 2.1 Descripción

ETABS permite modelar muros de concreto reforzado mediante objetos tipo área llamados Shell Layered. Esta formulación consiste en representar la sección transversal de un elemento, en la dirección del espesor, en distintas capas equivalentes, tal como se observa en la Figura 1. Cada capa se define con una ubicación, espesor, comportamiento y material independientes [15].



**Figura 1. Modelo Shell Layered. Fuente: [16].**

Un elemento Shell en capas puede considerarse lineal, no lineal, o con comportamiento de material mixto. En este sentido, un muro de concreto reforzado puede subdividirse en capas paralelas donde unas corresponderán al concreto confinado, al no confinado y otras al refuerzo (Figura 2).



**Figura 2. Representación del concreto y acero de refuerzo en un modelo Shell Layered. Fuente: [16].**

El refuerzo del muro se considera uniformemente distribuido en una dirección dada y se representa como una fracción del volumen de la sección, superponiéndose al concreto.

Un aspecto primordial en la modelización por capas es la definición de las propiedades no lineales de los materiales. Para modelar los muros, utilizando el modelo Shell Layered de ETABS, se deben ingresar las curvas esfuerzo-deformación, y un modelo de comportamiento histerético que represente el comportamiento no lineal de los materiales que lo componen. A continuación, se describen estas propiedades.

## 2.2 Comportamiento de los materiales

### 2.2.1 Comportamiento histerético de los materiales

El modelo de histéresis empleado, de los disponibles en el programa ETABS, fue el propuesto por Dowell et al., [17] (Figura 3). Este modelo se caracteriza por ser particularmente adecuado para miembros de concreto reforzado [15], debido a que permite reducir considerablemente el costo computacional frente a otros modelos, tiene parámetros que permiten controlar la degradación de la rigidez, y permite aplicar asimetría en sus ramas [18].

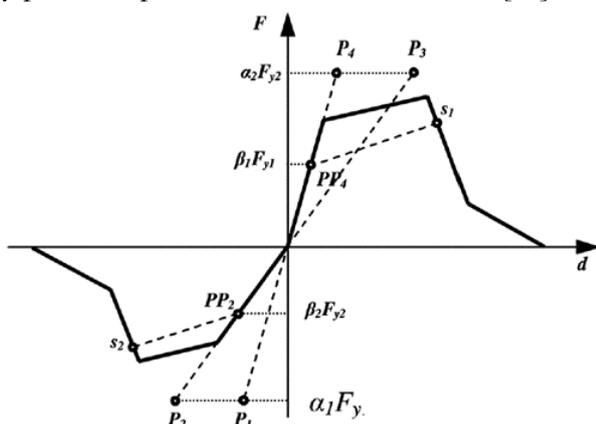


Figura 3. Modelo de histéresis Pivot; designación de puntos pivó y envolvente. Fuente: [19].

### 2.2.2 Modelo constitutivo del concreto

El modelo constitutivo para el concreto confinado y no confinado fue el propuesto por Mander et al., [20]. Este modelo se caracteriza por considerar los efectos del confinamiento, el

efecto de la carga cíclica y la velocidad de deformación del material [20], (Figura 4).

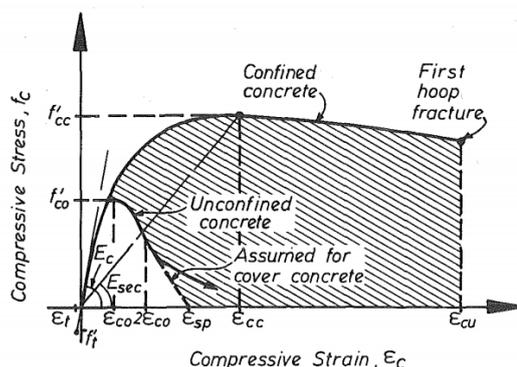


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación a compresión para el concreto. Fuente: [20].

### 2.2.3 Modelo constitutivo del acero

Para el caso del acero, se utilizó el modelo constitutivo propuesto por Park et al., [21] (Figura 5). Este modelo considera el endurecimiento por deformación (comportamiento inelástico) en la zona definida por el intervalo  $\epsilon_{sh} \leq \epsilon \leq \epsilon_{su}$ , donde  $\epsilon_{su}$  es la deformación última, y  $\epsilon_{sh}$  es la deformación donde se inicia el endurecimiento del material.

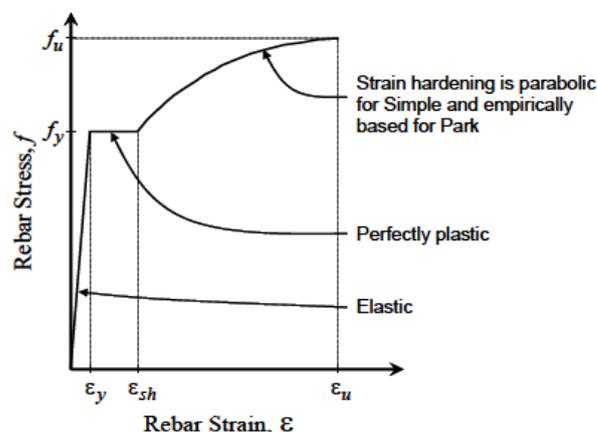


Figura 5. Curva paramétrica esfuerzo-deformación para el acero de refuerzo. Fuente: [22].

## 3. Muros modelizados

En la Tabla 2 se resumen las principales propiedades de algunos de los muros seleccionados para la calibración del modelo. Posteriormente se describen las condiciones bajo las cuales se realizaron los ensayos de cada uno de los muros.

Tabla 2. Propiedades de muros modelizados

Muro	$l_w$ [mm]	$h_w$ [mm]	$t_w$ [mm]	$f'_c$ [MPa]	$\rho_l$	$\rho_t$	$\rho_{borde}$	Shear-Span ( $M/Vl_w$ )	Carga axial ( $N/f'_c A_g$ )
M1R10	1200	2400	100	24.7	0.256%	1.46%	1 MES $\varnothing 7$ mm @ 150 mm 2 barras N°4	2.0	0.09 (260 kN)
R1	1910	4572	102	44.75	0.25% - 0.31%	1.47%	4 barras N°3	2.4	-
R2	1910	4572	102	46.44	Barras $\varnothing 6$ mm @ 228mm	4%	6 barras N°4	2.4	-
RW2	1219	3658	102	43.7	0.3%	2.93%	Barras N°2 @ 191 mm 8 barras N°3	3.0	0.07 (378 kN)
MQE257EP	2650	2400	80	17.16	0.26%	1.27%	1 MES $\varnothing 7$ mm @ 150 mm 3 barras N°4	0.9	0.04 (186 kN)

### 3.1 Muro M1R10

Este muro fue ensayado por [23] en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, de la Universidad del Valle. El refuerzo de este muro se dispone en una sola capa concentrada en la mitad de la sección, (Figura 6). El tipo de refuerzo vertical en el alma es malla electrosoldada (MES). Durante el ensayo se sometió a un protocolo de desplazamientos horizontales cíclicos con fases de 3.6, 6.0, 8.4, 12, 18, 24, 36, 48 y 60 mm de amplitud, cada una conformada por dos ciclos.

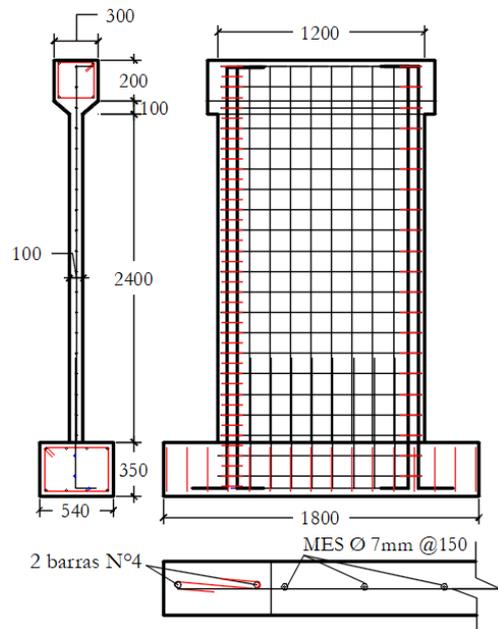


Figura 6. M1R10, [23].

### 3.2 Muros R1 Y R2

Los muros R1 y R2 formaron parte de la campaña experimental desarrollada por [24] en los laboratorios de Portland Cement Association. En estos ensayos se evaluó la capacidad de 16 muros, variando su geometría, la cuantía de refuerzo y el nivel de carga axial. Los muros fueron sometidos a un protocolo de desplazamientos horizontales con fases de 2.5, 5.8, 12.8, 26.0, 50.9, 102.0 y 128.0 mm de amplitud, con tres ciclos por cada fase (Figura 7).

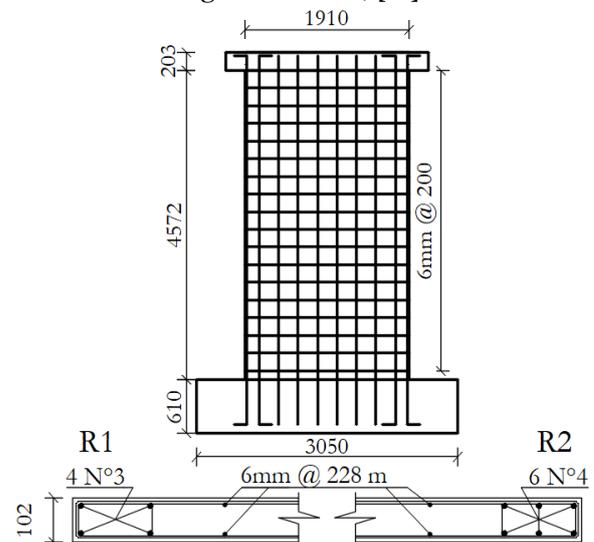


Figura 7. R1 y R2, [24].

### 3.4 Muro RW2

El muro RW2 fue ensayado por [26]. En esta campaña experimental se estudió la respuesta inelástica ante cargas horizontales cíclicas de muros con sección rectangular y con forma de T. Este espécimen en particular fue sometido a una carga axial de  $0.07f'_cA_g$  y a un historial de desplazamiento cíclico lateral de 2 ciclos por cada fase, con niveles de desplazamiento de 3.65, 9.14, 18.3, 27.4, 36.6, 54.8, 73.16 y 91.4 mm, (Figura 8).

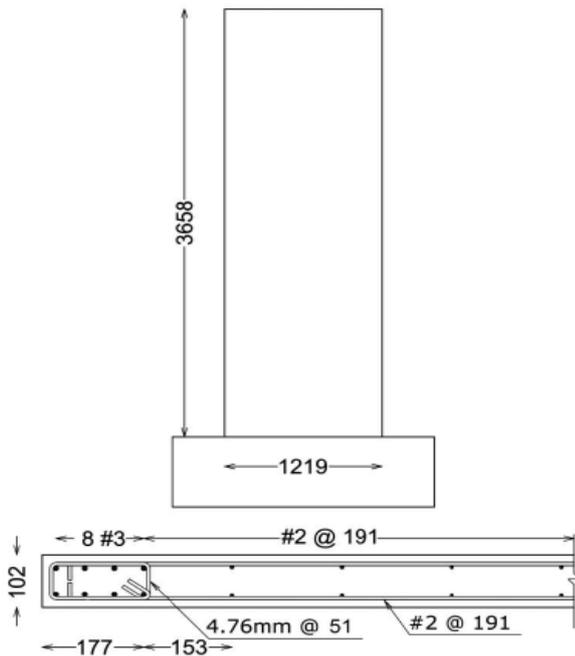


Figura 8. RW2, [26].

### 3.3 Muro MQE257EP

Recientemente, [25] desarrolló un estudio experimental de siete muros de CR de uso común en Perú. El muro MQE257EP representa en buena medida los resultados generales de esta investigación. Este muro presenta una sección transversal rectangular de 80 mm de espesor y su refuerzo principal consistió en una sola capa de refuerzo tipo MES, (Figura 9). El protocolo de desplazamientos horizontales fue aplicado en fases de dos ciclos, con niveles de desplazamiento de 0.75, 1.5, 3, 6, 12 y 24 mm.

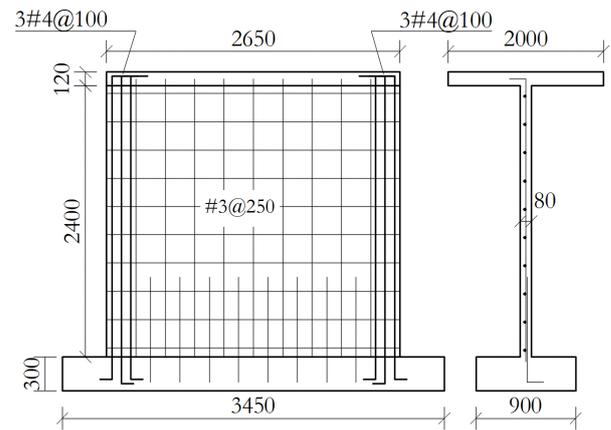


Figura 9. MQE257EP, [25].

## 4. Condiciones del análisis numérico

Las propiedades no lineales de los materiales se definieron según los reportes de cada ensayo experimental, y utilizando los modelos anteriormente descritos. Para todos los modelos se definió el protocolo de carga cíclico correspondiente, mediante un caso de carga tipo “direct-integration time-history analysis” con una solución basada en el método de “Hilber-Hughes-Taylor alpha” disponible en ETABS. El control de la solución se realizó habilitando la opción “Event-to-Event Stepping”, en los parámetros no lineales de la solución, esto redujo el consumo computacional y proporcionó mejores resultados que el uso de iteraciones.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Respuesta histerética de los muros

Mediante el análisis “time-history” de cada muro modelizado, se obtuvo la respuesta global en términos de la resistencia lateral y el desplazamiento en la parte superior de los muros. A continuación, en la Figura 10, se muestran estos resultados superponiendo la respuesta experimental y la numérica obtenida del modelo Shell Layered.

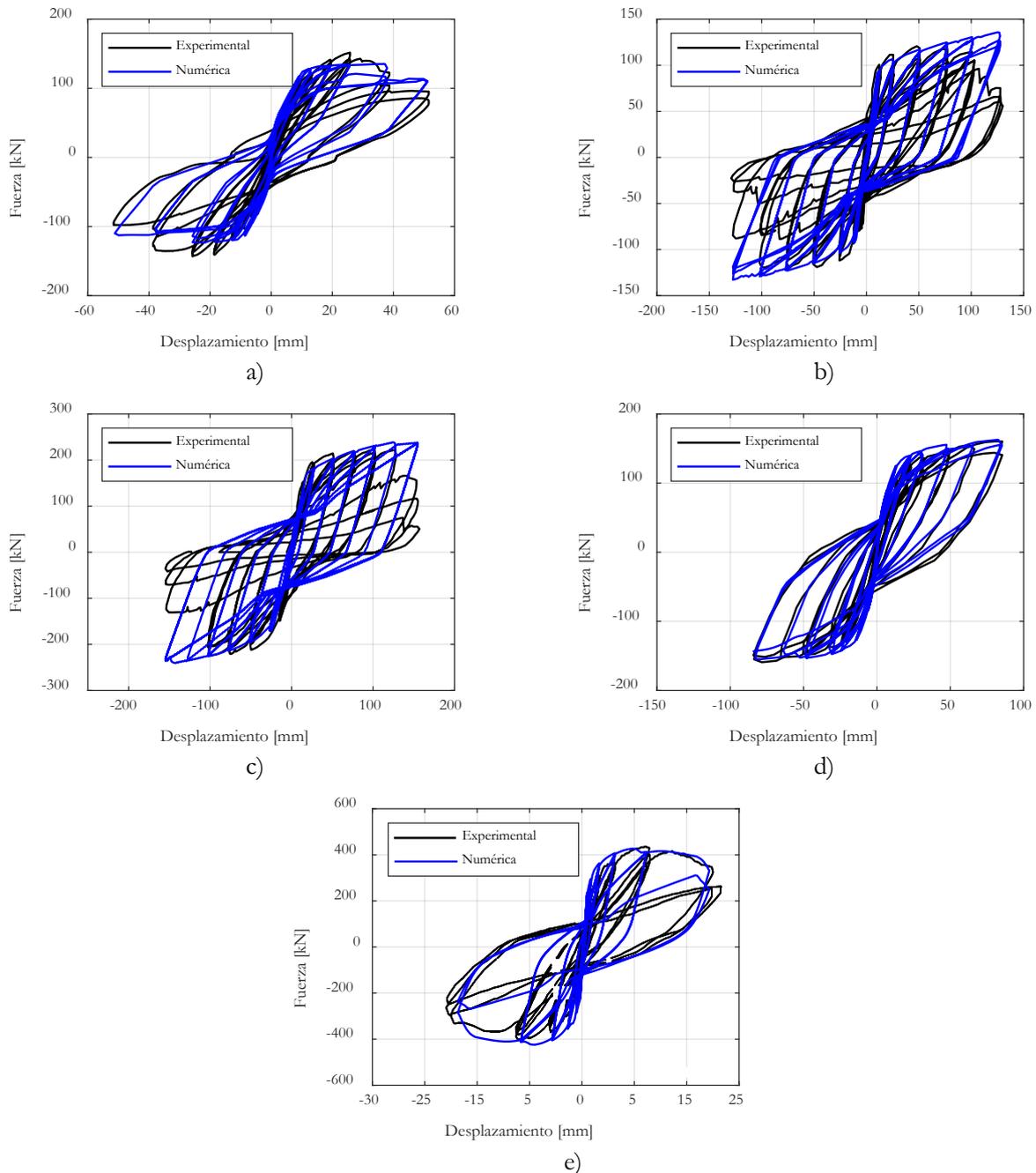


Figura 10. Comparación de la curva de histéresis experimental versus la numérica: a) Muro M1R10, b) Muro R1, c) Muro R2, d) Muro RW2 y e) Muro MQE257EP.

## 5.2 Capacidad de carga lateral y desplazamiento

La resistencia a carga lateral máxima ( $v_{max}$ ), el desplazamiento asociado a dicha resistencia ( $\delta_{max}$ ) y el desplazamiento último ( $\delta_u$ ), son tres de los parámetros más significativos en la respuesta

experimental de un muro de CR. De la curva de histéresis obtenida en la simulación de cada muro se extrajeron los resultados de estos parámetros, y se compararon con los resultados experimentales (Tabla 3).

Para el muro M1R10, el modelo determinó adecuadamente los desplazamientos, con un

margen de error aceptable en la estimación de la capacidad máxima de carga lateral. Respecto a los muros R1 y R2, el modelo fue capaz de capturar apropiadamente la respuesta hasta un nivel de deriva de 2.2% y 2.76%, respectivamente, instantes en los cuales la capacidad de carga lateral fue máxima. En ambos muros no fue posible capturar con precisión los últimos ciclos de la respuesta histerética. Adicionalmente, el muro R2 presentó falla por inestabilidad fuera del plano [24], condición que no fue posible representar con el modelo.

Para el muro RW2, el modelo numérico capturó bien los desplazamientos, capacidad de

carga lateral y las propiedades histeréticas, sin embargo, se sobreestimó la rigidez inicial. En la respuesta numérica del muro MQE257EP se estimó correctamente la carga lateral máxima y los desplazamientos, pero se sobreestimó en cierto grado la rigidez inicial y la energía disipada.

Respecto a los desplazamientos últimos, calculados en el instante donde la resistencia a carga lateral se reduce un 80% de la capacidad máxima, el modelo arrojó buenos resultados para los muros M1R10, MQE257EP y RW2. Para los muros R1 y R2, los errores porcentuales reflejan la dificultad que se tuvo para representar la respuesta en los últimos ciclos.

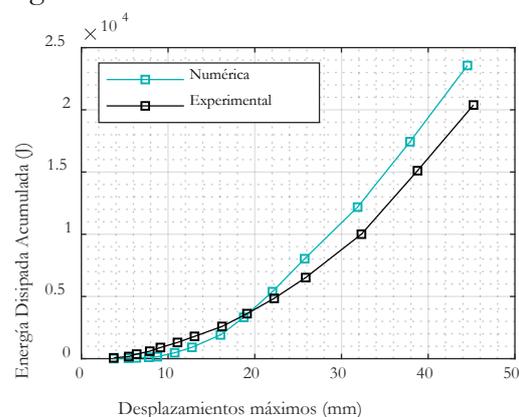
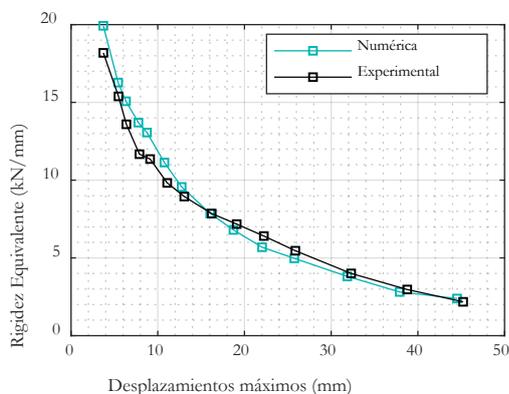
**Tabla 3. Estimación numérica y resultados experimentales de la capacidad de carga lateral y desplazamiento.**

Muro	$V_{max}$ exp. (kN)	$V_{max}$ num. (kN)	Error $V_{max}$ (%)	$\delta_{max}$ exp. (mm)	$\delta_{max}$ num. (mm)	Error $\delta_{max}$ (%)	$\delta_u$ exp. (mm)	$\delta_u$ num. (mm)	Error $\delta_u$ (%)
M1R10	151.7	134.4	11.4	25.81	25.51	1.2	38.74	37.8	2.4
R1	119.2	129.3	8.5	99.84	101.8	2.0	107.3	127.8	19.1
R2	222.3	238.2	7.2	126.2	125.5	0.6	125.1	155	24
RW2	160.3	160.8	0.3	85.46	82.7	3.2	85.46	83.79	2
MQE257EP	436	426	2.3	11.6	10	13.8	24.36	23.67	2.8

### 5.3 Evaluación de la energía disipada y degradación de la rigidez.

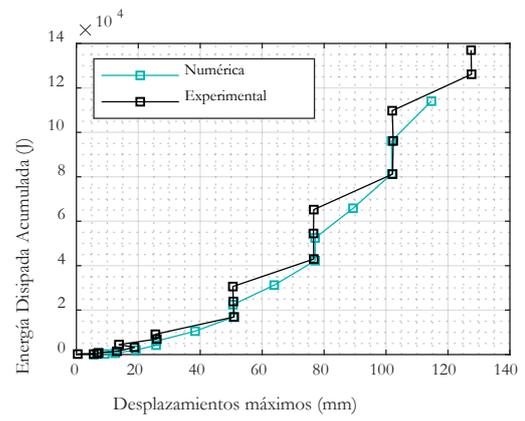
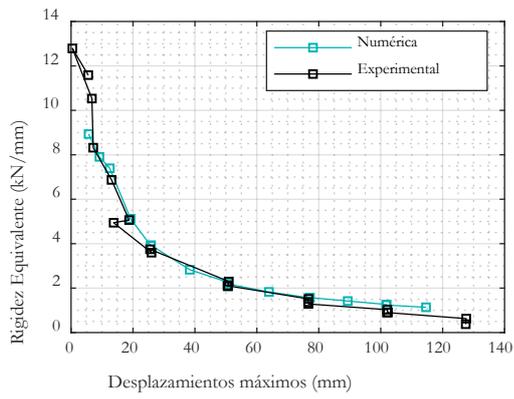
Otro aspecto importante en la simulación numérica es poder capturar parámetros que se correlacionen bien con el daño en los elementos estructurales. Para este modelo se comparó la

respuesta en términos de la capacidad de disipación de energía y la degradación de la rigidez. En la Figura 11 se muestra la comparación entre los resultados numéricos y experimentales de estas propiedades en función de los desplazamientos máximos de cada ciclo de carga.

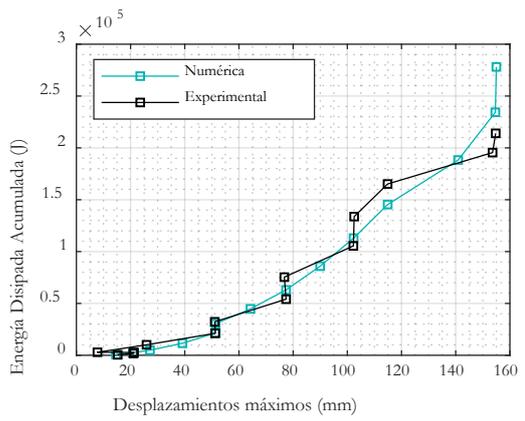
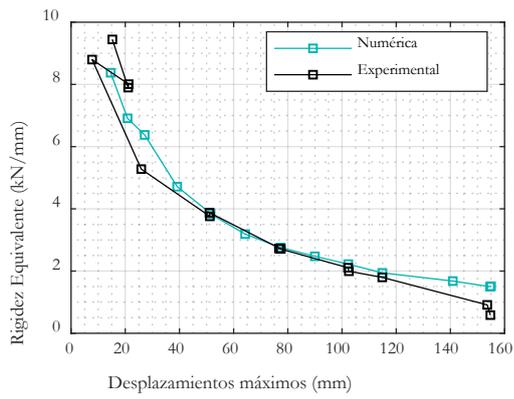


a)

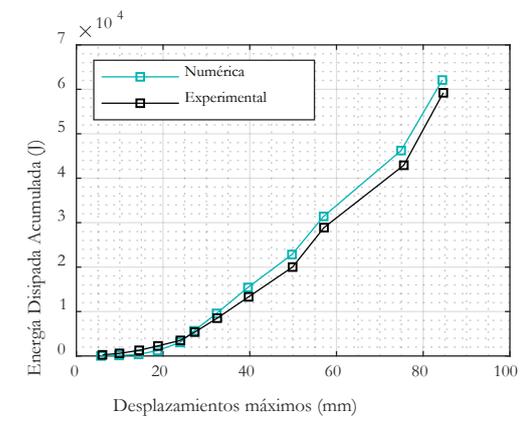
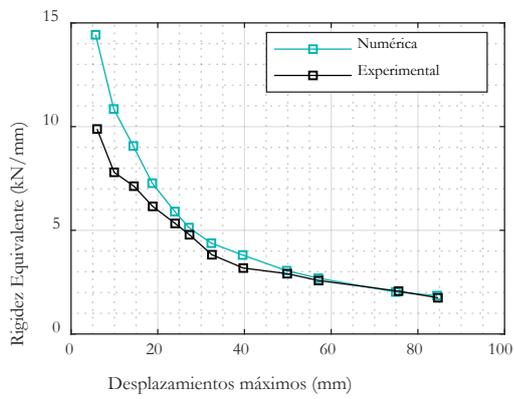
**Figura 11. Rigidez lateral y energía disipada acumulada, numérica versus experimental. a) Muro M1R10.**



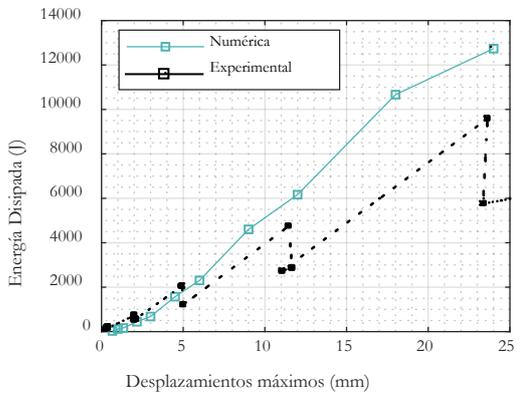
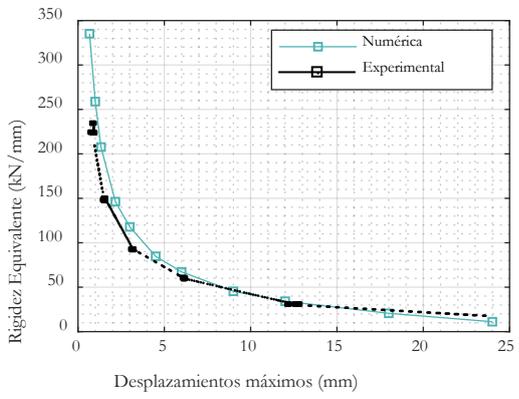
b)



c)



d)



e)

Continuación Figura 11. Rigidez lateral y energía disipada acumulada, numérica versus experimental. b) Muro R1, c) Muro R2, d) Muro RW2, e) Muro MQE257EP.

En la Tabla 4, se muestra la correlación de los resultados de la Figura 11 mediante el índice de correlación de Pearson. El cual indica, en un rango entre 0 y 1, siendo 1 el máximo grado de correlación, la similitud entre los valores numéricos y experimentales. Las correlaciones de los muros R1 y R2 son las más bajas, sin embargo, los resultados se consideran aceptables.

**Tabla 4. Índice de correlación Pearson.**

Muro	Rigidez equivalente	Energía disipada acumulada
M1R10	0.9939	0.9978
R1	0.9812	0.9955
R2	0.9415	0.9946
RW2	0.9903	0.9990
MQE257EP	-	-

## Conclusiones

En general, se obtuvo una buena correlación entre la respuesta experimental y numérica de los muros. La capacidad de carga lateral, el desplazamiento, la degradación de la rigidez, y la capacidad de disipación de energía fueron capturadas de manera apropiada con la simulación numérica.

El modelo numérico Shell Layered permite simular el comportamiento sísmico de un muro de CR de forma práctica, con bajo costo computacional y con una aceptable aproximación.

La variación de los parámetros del modelo histerético, y del comportamiento no lineal de los materiales tiene un efecto importante en el estrangulamiento de los ciclos, en la degradación de la rigidez, y en la respuesta global, por lo que es clave una correcta definición de estos.

El modelo numérico no reprodujo de forma adecuada el mecanismo de falla por pandeo fuera del plano. No obstante, su versatilidad permite profundizar en la definición de propiedades para considerar este mecanismo.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad del Valle y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), entidades que financian el proyecto No. 110674558634, CT 015-2017.

## Referencias

- [1] A. Jalali, F. Dashti, Nonlinear behavior of reinforced concrete shear walls using macroscopic and microscopic models, *Eng. Struct.* 32 (2010) 2959–2968.
- [2] F. Dashti, R.P. Dhakal, S. Pampanin, Validation of a Numerical Model for Prediction of Out-of-Plane Instability in Ductile Structural Walls under Concentric In-Plane Cyclic Loading, *J. Struct. Eng. (United States)*. 144 (2018) 1–22.
- [3] P. Sengupta, B. Li, Hysteresis behavior of reinforced concrete walls, *J. Struct. Eng. (United States)*. 140 (2014) 1–18.
- [4] T.A. Tran, *Experimental and Analytical Studies of Moderate Aspect Ratio Reinforced Concrete Structural Walls*, University of California, 2012.
- [5] K. Kolozvari, K. Orakcal, J.W. Wallace, Shear-flexure interaction modeling for reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading. PEER Report 2015/12, Pacific Earthq. Eng. Res. Cent. (2015) 143.
- [6] K. Orakcal, J.W. Wallace, Flexural modeling of reinforced concrete walls - Experimental verification, *ACI Struct. J.* 103 (2006) 196–206.
- [7] J.M. Vallenás, V. V. Bertero, E.P. Popov, Hysteretic behavior of reinforced concrete structural walls, NASA STI/Recon Tech. Rep. N. 80 (1979) 27533.
- [8] G.G. Deierlein, A.M. Reinhorn, M.R. Willford, Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design, NEHRP Seism. Des. Tech. Br. No. 4. (2010) 1–32.
- [9] F. Dashti, R.P. Dhakal, S. Pampanin, Numerical Modeling of Rectangular Reinforced Concrete Structural Walls, *J. Struct. Eng. (United States)*. 143 (2017)

- 1–14.
- [10] S. Otanl, T. KabeyaSawa, H. Shiohara, H. Aoyama, Analysis of the Full Scale Seven Story Reinforced Concrete Test Structure, Spec. Publ. 84 (1984) 203–239.
- [11] Kolozvari, Kristijan, Analytical Modeling of Cyclic Shear - Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls, University of California, 2013.
- [12] V. Colotti, Shear behavior of RC structural walls, 119 (1993) 728–746.
- [13] M. Fragiadakis, M. Papadrakakis, Modeling, analysis and reliability of seismically excited structures: Computational issues, Int. J. Comput. Methods. 5 (2008) 483–511.
- [14] P. Martinelli, F. Filippou, Simulation of the shaking table test of a seven-story shear wall building, Earthq. Eng. Struct. Dyn. 38 (2009) 587–607.
- [15] I. Computer & Structures (CSI), CSI Analysis Reference Manual, in: Comput. Struct., 2017.
- [16] L. Xie, X. Lu, X. Lu, Y. Huang, L. Ye, Multi-Layer Shell Element for Shear Walls in OpenSees, Comput. Civ. Build. Eng. (2014) 955–1865.
- [17] R. Dowell, F. Seible, E. Wilson, Pivot Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members, ACI Struct. J. 95 (1998).
- [18] C.A. Martínez, C.O. Bay, G. Palazzo, M. Guzmán, Diseño de Sistemas de Disipación Pasiva de Energía para Rehabilitar Construcciones Antiguas en Zonas Sísmicas Validado Mediante Análisis Dinámico No Lineal, Mecánica Comput. 34 (2016) 583–599.
- [19] A. Sharma, R. Eligehausen, G.R. Reddy, Pivot hysteresis model parameters for reinforced concrete columns, joints, and structures, ACI Struct. J. 110 (2013) 217–227.
- [20] J.B. Mander, M.J.N. Priestley, R. Park, Theoretical Stress-Strain model for confined concrete, J. Struct. Eng. 114 (1989) 1804–1826.
- [21] R. Park, T. Paulay, Reinforced Concrete Structures, Christchurch, New Zeland, 1975.
- [22] I. Computer & Structures (CSI), Technical Note - Material Stress-Strain Cuerves, 2008.
- [23] R. Ortega, Evaluación experimental del desempeño sísmico de muros delgados de concreto reforzado sometidos cargas cíclicas, Universidad del Valle, 2018.
- [24] R. Oesterle, A. Fiorato, L. Johal, J. Carpenter, Earthquake Resistant Structural Walls- Tests of Isolated Walls, Washington, D. C., 1976.
- [25] L.G. Quiroz, Y. Maruyama, C. Zavala, Cyclic behavior of thin RC Peruvian shear walls: Full-scale experimental investigation and numerical simulation, Eng. Struct. 52 (2013) 153–167.
- [26] J.H. Thomsen IV, J.W. Wallace, Displacement—Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross-Sections, Nsf. (1995) 1–375.