

## Modelado de paredes de mampostería confinada: revisión de métodos y aplicación utilizando macroelemento discreto

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8508>

S. A. Sunley<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica Estructural, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador  
E-mail: [ssunley@uca.edu.sv](mailto:ssunley@uca.edu.sv)

**Resumen** — Uno de los principales desafíos en la evaluación de estructuras de mampostería es la simulación numérica. Este artículo presenta una descripción general y clasificación de los desarrollos actuales y las técnicas disponibles para el análisis no lineal de estructuras de mampostería confinada. Como estudio exploratorio se realizó la aplicación de un modelo numérico utilizando el Método de Macroelementos Discretos, que consistió en la calibración de parámetros mecánicos para representar la curva de capacidad y progresión de daño de un muro de mampostería confinada ensayado bajo carga cíclica cuasi estática. Luego se realizó un análisis de sensibilidad. Se ha encontrado que el comportamiento global es aceptablemente capturado por el modelo con respecto a resistencia y deformación. Sin embargo, el modo de falla obtenido en los elementos de confinamiento no es consistente con el daño observado. La calibración se realizó solo para una prueba experimental, por lo que las conclusiones solo son válidas únicamente para este conjunto de resultados experimentales. Se considera que el Método de Macro Elementos Discretos es capaz para reproducir el comportamiento global de edificios de mampostería confinada, y que, con las modificaciones apropiadas, puede ser utilizado para estudiar también el comportamiento de las paredes como elementos estructurales.

**Palabras Clave** – macroelemento, mampostería confinada, modelación numérica

**Abstract** — One of the main challenges assessing masonry structures is numerical simulation. An overview and classification of the current developments and available techniques for nonlinear analysis of confined masonry structures is presented. As an exploratory study, an application of a numerical model using a Discrete Macro Element Method was carried out. It consisted on the calibration of mechanical parameters for representing the capacity curve and damage progression of a confined masonry wall tested under quasi static cyclic load. Then a sensitivity analysis was carried out. It has been found that global behavior is well captured by the model regarding strength and deformation. However, failure mode at confining elements was not consistent with the observed damage. Calibration has been made only for one experimental test; thus, conclusions are only valid for this set of experimental results. It is considered that the Discrete Macro Element Method is suitable not only to reproduce the global behavior of complete buildings, which is its original purpose, but also it may be used to study element behavior with appropriate modifications.

**Keywords** — confined masonry, microelement, numerical simulation

### I. INTRODUCCIÓN

Existen varios argumentos que apoyan el desarrollo de métodos robustos para llevar a cabo el análisis no lineal de estructuras de mampostería confinada (CM). En varios códigos de diseño [1,2,3] las fuerzas de los elementos se estiman a través de análisis elásticos lineales, además, en algunos procedimientos se proporciona suficiente capacidad a las estructuras CM para permanecer elásticas bajo las cargas sísmicas de diseño. Sin embargo, la mampostería tiene una naturaleza cuasi-frágil y una respuesta fuertemente no lineal [4], por lo tanto, en algunos casos el diseño elástico puede resultar demasiado conservador y presenta la desventaja de no ser suficientemente representativo del comportamiento bajo altas demandas sísmicas. Cuando se trata de mampostería confinada, los elementos de amarre de concreto reforzado (RC) proporcionan confinamiento que aumenta la ductilidad de los muros [5], con la ventaja de aumentar la energía disipada en el rango no lineal de la respuesta, una característica que no es posible considerar en el análisis estructural elástico lineal. En el campo de la evaluación estructural, es común -y racional- que los especialistas consideren que la mayoría de las estructuras de CM existentes han sido construidas sin seguir las reglas de diseño, por lo que el análisis no lineal es de particular interés ya que, si se implementa de manera confiable, permite obtener una visión completa de la capacidad estructural que se utilizará para la evaluación del desempeño. Este artículo está organizado en dos partes: primero se presenta una breve síntesis de las estrategias de modelación computacional para estructuras de CM, posteriormente, se presentan los resultados de una aplicación de prueba de un modelo constituido por macroelementos discretos (conocido como DMEM) calibrado con resultados experimentales de paredes de suelo-cemento ensayadas en el Laboratorio de Estructuras Grandes de la UCA. A partir del modelo se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros.

#### A. Estrategias computacionales para la modelación de mampostería

Las estrategias de modelación en estructuras de mampostería actualmente pueden dividirse en 3 grupos: Modelos de elementos finitos (FEM), modelos de elementos discretos (DEM) y modelos de componentes estructurales (macroelementos).

### B. Métodos de elementos finitos (FEM)

Los métodos de elementos finitos (FEM) representan a la fecha una de las más (sino la más) versátiles herramientas numéricas para simular la respuesta de estructuras. Su progreso ha sido notable en los últimos años en estructuras de concreto reforzado y acero, aunque menor en estructuras de mampostería. Recientemente, la investigación del FEM para estructuras de mampostería no reforzada (URM) ha incrementado y progresado considerablemente debido su utilidad en aplicaciones de evaluación de estructuras antiguas. No obstante, la aplicación de estos métodos en CM es un campo de estudio menos estudiado [6].

En CM, la principal dificultad consiste en la representación de la interacción entre mampostería y elementos de concreto reforzado. De acuerdo con Lourenco [7], las estrategias de modelación con FEM se pueden dividir en: micromodelado detallado, micromodelado simplificado y macromodelado (fig. 1).

En el micromodelado detallado, las unidades y mortero en las juntas se representan como elementos continuos donde la interfaz mortero-unidad se representa con elementos discontinuos. Las juntas (sisas) actúan como planos de debilidad y su representación es explícita al igual que la de las unidades. Esta técnica permite representar mecanismos de falla de las unidades de mampostería (como *crushing*) y el deslizamiento o agrietamiento en las juntas [7]. Esto hace esta técnica apropiada para la investigación en modelos pequeños, para evaluar efectos locales. Sus principales desventajas son que requiere un conocimiento muy profundo de los materiales constituyentes (unidades, morteros, interfaces) para la definición de reglas constitutivas y que su demanda de recursos computacionales es elevada.

Los métodos de micromodelado simplificado difieren con las del detallado en que, en el segundo, cada junta con dos interfaces entre unidades y morteros se representa como una línea que acumula las “propiedades promediadas” de ambas interfaces, por lo que los bloques de unidades se encuentran modelados como si estuvieran unidos directamente unos con otros. Es decir que las juntas actúan como líneas de fractura/deslizamiento en medio de las unidades continuas de mampostería. La exactitud de este modelo respecto al detallado disminuye ya que no toma en cuenta el efecto Poisson del mortero. Sin embargo, ahorra recursos computacionales respecto al anterior.

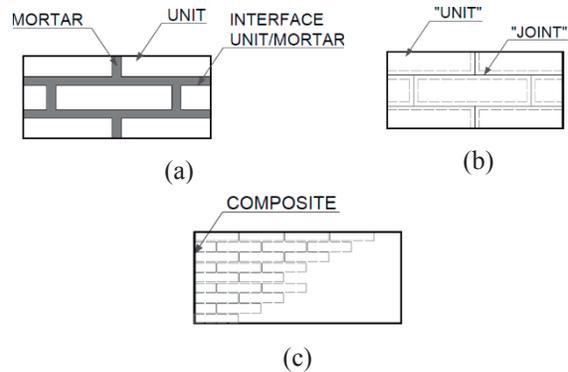


Fig. 1. Estrategias de modelación en mampostería. (a) micromodelado detallado, (b) micromodelado simplificado, (c) macromodelado

En el macromodelado de elementos finitos unidades, morteros e interfaces se modelan constituyendo un solo material continuo. Implícitamente, el material se considera homogéneo, lo que implica que no hay distinción entre agrietamiento o deslizamiento entre unidades y mortero. La representación de la mampostería como un solo material anisotrópico vuelve complicado el establecimiento de leyes constitutivas apropiadas, sin embargo, al analizar el comportamiento de estructuras grandes el comportamiento a nivel micro usualmente no condiciona considerablemente el comportamiento global.

### C. Modelos de elementos discretos (DEM)

De acuerdo con Lemos [8] los elementos discretos idealizan la mampostería como “un discontinuo, representando por separado el comportamiento mecánico de las unidades y la interacción entre ellas, y por lo tanto utilizando las juntas como superficies de contacto entre cuerpos distintos”. Los modelos de elementos discretos consisten en el ensamblaje de elementos rígidos o deformables, es decir bloques cuya interacción se lleva a cabo utilizando restricciones de contacto que pueden discretizarse con dos hipótesis diferentes: puntos de contacto y formulaciones borde a borde. Para determinar el estado de esfuerzos es necesario definir reglas constitutivas en las uniones de elementos.

Para su uso en estructuras de mampostería no reforzada Casolo et al. [9], propusieron un análisis simplificado en el plano adaptando elementos rígidos de cuatro lados conectados en cada lado por tres resortes elásticos, dos de ellos para comportamiento tensión-compresión y uno para deslizamiento por cortante, posteriormente los mismos autores [10] mejoraron su modelo para representar el comportamiento post-elástico definiendo reglas histeréticas para los resortes. Este enfoque es considerado un modelo de resortes de cuerpo rígido (Rigid Body Spring Model, RBSM), que se ilustra en la fig. 2. En la macroescala, la mampostería se comporta como un material compuesto, pero en la microescala (dentro del elemento discreto) cada elemento es

un material continuo. Este tipo de modelo ha dado origen a otros utilizados en CM.

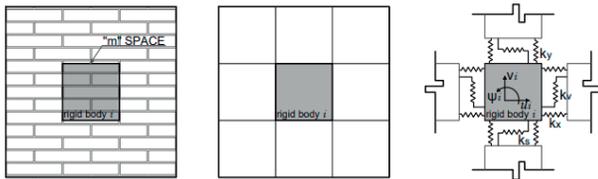


Fig. 2. Rigid Body Spring Model (RBSM) propuesto por Casolo

#### D. Modelos de elementos estructurales (Macroelementos)

Un modelo de macroelementos es un modelo numérico que aproxima el comportamiento de una región de una estructura, como una pared continua o en un entrepiso, a un solo elemento [11]. Este tipo enfoque permite representar el comportamiento global de las estructuras con la ventaja de reducir considerablemente los grados de libertad, lo cual reduce consecuentemente la complejidad del problema numérico y las demandas computacionales. Como desventaja, los modelos de macroelementos no son capaces de representar efectos locales, y dependiendo de la aproximación, ciertos mecanismos de falla pueden no ser apropiadamente bien capturados en la respuesta.

Se han propuesto varios tipos de macromodelos para paredes de mampostería. Una clasificación común agrupa los modelos de acuerdo a la cantidad de dimensiones de análisis, es decir en una (1D), dos (2D) o tres (3D) dimensiones. Los modelos 1D aproximan las paredes como elementos línea, es decir como columnas o puntales inclinados; los modelos 2D son planos, usualmente representado por un grupo de elementos lineales; los modelos 3D pueden incorporar el comportamiento fuera del plano [12][13]. Ya que en estructuras de CM el comportamiento en el plano suele determinar la respuesta global, la mayor parte de los modelos de macroelementos son 1D y 2D. A grandes rasgos en mampostería se identifican dos enfoques:

Modelos basados en marcos equivalentes: Están constituidos por arreglos de columnas anchas y vigas que en conjunto representan paredes. Las columnas concentran las propiedades mecánicas de las paredes mientras las vigas se modelan como elementos rígidos que conectan con otros miembros de las estructuras [14].

Modelos basados en puntales diagonales: Las paredes se representan como puntales diagonales (elementos línea) trabajando a compresión o tensión para modelar el mecanismo de cortante o tensión diagonal cuando la pared se encuentra bajo cargas laterales. La reducción de la parte resistente del panel determina la variación de las propiedades del puntal (Equivalent Strut Model, ESM). En aplicaciones 2D los puntales pueden utilizarse para construir modelos de armaduras equivalentes (Strut and tie models STM, Equivalent Truss Models, ETM).

Tabla 1. Modelos de macroelementos propuestos para CM

Modelo	Descripción
STM Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica [15]	STM
Brzev [16]	STM
Terán-Gilmore et al [17]	Columna ancha/EFM
Marques [18]	Columna ancha/EFM
Torrisi & Crisafulli [19]	EFM/ESM
Borah et al. [20]	EFM/ESM
Rankawat et al [21]	ETM

La tabla 1 muestra un resumen de modelos de macroelementos propuestos por distintos autores para la modelación de estructuras de CM. Actualmente se está trabajando en una comparación de los métodos para una futura publicación.

## II. APLICACIÓN DE MACROELEMENTO DISCRETO PARA REPRESENTAR COMPORTAMIENTO DE PAREDES DE CM

### A. Macro modelo de elemento discreto DMEM

Calio et al. (2012) [22] propusieron un nuevo tipo de macroelemento para ser utilizado en URM, que combina características de los modelos de elementos discretos y macroelementos, identificado como Modelo de Macro Elemento Discretos (Discrete Macro Element Model, DMEM). Las características de este modelo permiten utilizarlo para representar estructuras de CM ya que puede conectarse a elementos de RC como vigas y columnas.

El elemento básico consiste en un cuadrilátero constituido por cuatro bordes rígidos conectados en las esquinas. Este elemento tiene un esquema mecánico que toma en cuenta tres posibles modos de falla representados por tres diferentes grupos de resortes no lineales: Los resortes perpendiculares a los bordes del cuadrilátero representan el modo de falla por flexión/*rocking*, los resortes paralelos a los bordes representan el modo de falla por deslizamiento y los resortes diagonales representan el modo de falla por cortante diagonal. El arreglo se muestra en las figs. 3 y 4. Para cada resorte del elemento discreto y nodo al que esté conectado, debe determinarse leyes constitutivas para calibrar los resortes. Para los resortes que representan el comportamiento a flexión/*rocking* puede obtenerse utilizando una aproximación apropiada una ley elastoplástica del material. Para los resortes correspondientes al deslizamiento los autores proponen utilizar una ley constitutiva rígida-plástica con un comportamiento gobernado por una superficie de cedencia de Mohr Coulomb. Para los resortes diagonales puede definirse por el cortante último, asumiendo un criterio de Mohr Coulomb y la pendiente inicial puede aproximarse por equivalencia elástica entre el panel de mampostería y la pared correspondiente considerando esta última como una placa homogénea deformable con módulo de rigidez a cortante elástica G. Los elementos de confinamiento se

pueden modelar como miembros unidimensionales de concreto reforzado con plasticidad concentrada rodeando los macroelementos y conectados a través de los nodos con los resortes de este (que representa solo a la mampostería).

Para los cálculos presentados en este artículo se utilizó el software 3D Macro [23], desarrollado para la aplicación del DMEM en casos prácticos de ingeniería, especialmente en evaluación de la vulnerabilidad estructural de estructuras existentes en Italia. Una importante ventaja del DMEM es que es posible subdividir un panel en tantos macroelementos como sea conveniente para el análisis, como se verá más adelante la discretización tiene una influencia considerable en los resultados.

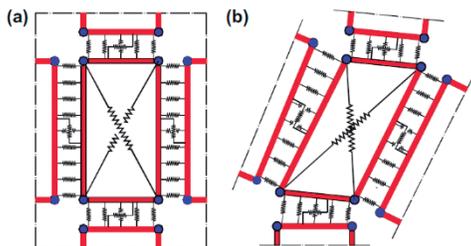


Fig. 3. Macromodelo de elementos discretos (a) no deformado (b) deformado [23]

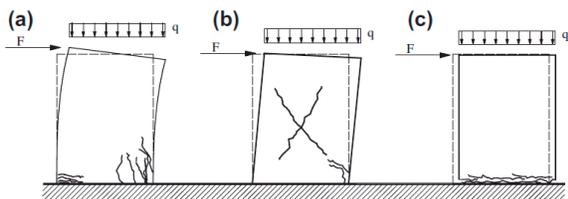


Fig. 4. Modos de falla del DMEM (a) flexión/rocking, (b) cortante diagonal, (c) deslizamiento [23]

### B. Descripción de estructura modelada

Se seleccionó un espécimen de mampostería confinada de suelo-cemento a escala natural de 3mx3mx0.15m, ensayado como parte del proyecto TAISHIN [24] con carla lateral cíclica estática aplicada paralela al plano a la altura de la solera de coronamiento y sin carga axial identificado como SPC. La fig. 5 muestra el esquema del espécimen ensayado.

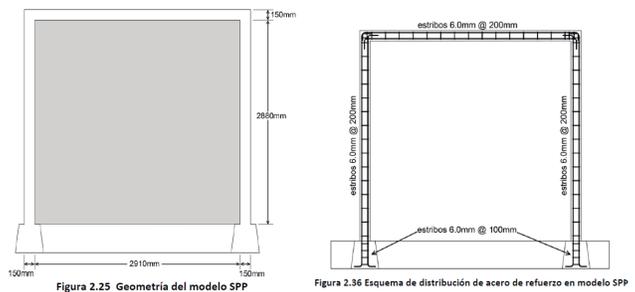


Fig. 5. Especimen SPC del proyecto TAISHIN [24]

### C Calibración

Se construyó un modelo DMEM basado en el espécimen presentado en B. La geometría y detalles del refuerzo se fijaron para ser los mismos del modelo experimental y pueden consultarse en [24]. Por lo tanto, la influencia de dichos parámetros queda fuera del alcance de esta prueba.

Las magnitudes de mayoría de los parámetros mecánicos del espécimen son desconocidos o se encontró en su determinación un alto grado de incerteza. A continuación, se describe el criterio adoptado para determinar los valores de los parámetros mecánicos:

- La resistencia a compresión del concreto y esfuerzo de fluencia del acero se tomaron directamente de los valores experimentales reportados
  - La resistencia a compresión de la mampostería y el esfuerzo cortante por deslizamiento a compresión cero se tomaron como los valores promedio de los resultados experimentales
  - El módulo de elasticidad del concreto se estimó a partir de la resistencia a compresión utilizando fórmulas empíricas
  - La resistencia a tensión del concreto se tomó como el 10 % de la resistencia a compresión
- Se adoptaron valores típicos para los siguientes parámetros:
- Peso unitario de concreto y mampostería
  - Módulo de elasticidad del acero de refuerzo
  - Coeficiente de ductilidad de la mampostería en compresión (la relación entre la deformación máxima y la del primer agrietamiento) como 1.5
  - Coeficiente de ductilidad de la mampostería en tensión (la relación entre la deformación máxima y la del primer agrietamiento) como 1, como si el material no tuviese ductilidad en tensión
  - El coeficiente de fricción se adoptó por defecto como el recomendado por el software (0.3).

Los parámetros restantes fueron determinados regresivamente a través de un proceso de prueba y error, tomando en cuenta un cierto rango aceptable de valores y criterio ingenieril. El objetivo principal fue reproducir la curva de capacidad y el modo de falla del espécimen

ensayado. Para este proceso, se inhibió el deslizamiento entre la mampostería y el concreto pues en los primeros intentos, este generó problemas de convergencia.

### III. RESULTADOS

Luego de realizar el proceso iterativo de calibración se obtuvieron los valores de propiedades que resultaron en el mejor ajuste, estos y los predeterminados se muestran en las tablas 2 y 3. La fig. 6 muestra la comparación de la curva calculada identificada como P-SC-00 contra la envolvente experimental de las curvas de histéresis de la pared ensayada en términos del cortante basal vs porcentaje de distorsión angular. Los resultados de la curva se evaluaron en términos del ajuste de las curvas de capacidad calculada y experimental, en términos de la rigidez inicial, deformación de cedencia y resistencia, y del modo de falla.

Tabla 2. Parámetros mecánicos de los elementos de concreto reforzado

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia a compresión del concreto ( $f_c$ )	16.2	Mpa
Módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ )	24000	MPa
Resistencia del concreto a la tensión ( $f_{ct}$ )	1.6	MPa
Peso unitario del concreto ( $W_c$ )	23.50	kN/m <sup>3</sup>
Esfuerzo de fluencia del acero ( $f_y$ )	40000	N/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad del acero ( $E_s$ )	290000	MPa

Tabla 3. Parámetros mecánicos de los paneles de mampostería

Parámetro	Unidad	Valor
Peso volumétrico (W)	(kN/m <sup>3</sup> )	18
Módulo de elasticidad (E)	(MPa)	1000
Módulo de elasticidad a cortante (G)	(MPa)	300
Coefficiente de degradación (alpha)	-	0.05
Resistencia a la Compresión $f_m$	Resistencia ( $f_m$ )	(MPa) 2.1
	Coefficiente de ductilidad	- 1.5
Resistencia a la tensión	Resistencia (ft)	(Mpa) 0.2
	Coefficiente de ductilidad	- 1
	Resistencia al cortante a compresión cero ( $\tau_0$ )	(MPa) 0.12
Cortante diagonal	Distorsión ultima por cortante	% 0.6
	Coefficiente de fricción	- 0.3
	Resistencia a compresión cero horizontal ( $\tau_{0h}$ )	(MPa) 0.12
Cortante por deslizamiento	Coefficiente de fricción horizontal	-
	Resistencia a compresión cero vertical	(MPa) Inhibido
	Coefficiente de fricción vertical	-

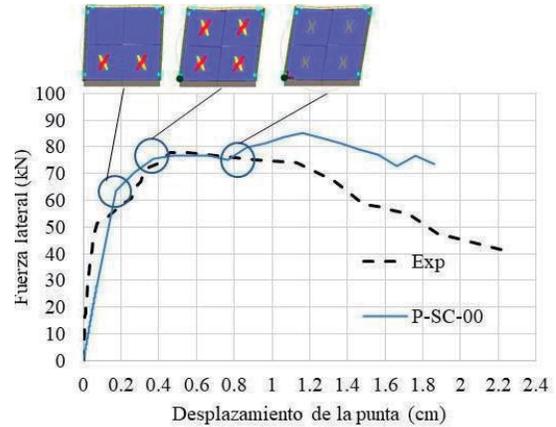


Fig. 6. Curva de capacidad experimental (Exp) vs calculada (P-SC-00)

#### A. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de evaluar la influencia de los parámetros mecánicos del modelo en la curva de capacidad y la progresión del daño se realizó un análisis de sensibilidad. El procedimiento consistió en cambiar uno a uno los valores de los parámetros sobre el modelo calibrado P-SC-00 mientras los restantes se mantuvieron constantes. A partir de los resultados de este procedimiento se clasificaron los parámetros cualitativamente en 3 grupos:

- Parámetros con baja sensibilidad: módulo de elasticidad del concreto, resistencia a la compresión del concreto.
- Parámetros con sensibilidad moderada: resistencia a la compresión y a la tensión de la mampostería, esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
- Parámetros con sensibilidad alta: módulo de elasticidad al cortante de la mampostería, resistencia al cortante diagonal de la mampostería a compresión cero, factor de degradación y tamaño del elemento (discretización). La tabla 4 muestra los valores de los parámetros que se variaron para evaluar la sensibilidad de estos parámetros este propósito. En la fig. 7, se muestran las curvas de capacidad que evidencian la influencia de cada uno de ellos en la respuesta estructural.

Tabla 4. Parámetros mecánicos de los paneles de mampostería con alta sensibilidad

Parámetro	Modelo	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad a cortante	G_200	200	MPa
	G_400	400	
	G_800	800	
Resistencia a cortante diagonal de la mampostería a compresión cero	t0_09	0.9	MPa
	t0_15	0.15	
	t0_18	0.18	
Coefficiente de degradación	alpha_01m	-0.1	-
	alpha_01	0.1	
	alpha_n	ninguno	
Discretización	D1	3.00x3.00	m <sup>2</sup>
	D2	1.00x1.00	
	D3	0.75x0.75	

#### IV. CONCLUSIONES

Para evaluar el desempeño de estructuras ante cargas sísmicas se requieren técnicas de análisis numérico que permitan representar apropiadamente el comportamiento no lineal. En estructuras de CM este tipo de análisis, adecuadamente implementado, también provee un entendimiento más exacto de su funcionamiento. Actualmente, se están realizando considerables progresos para que estas metodologías puedan llegar a utilizarse en diseños estructurales modernos y en evaluación del desempeño de estructuras existentes.

Los modelos de macroelementos ofrecen una alternativa razonable para ejecutar análisis no lineales de estructuras de CM debido a que requieren menor cantidad de recursos computacionales que los métodos de elementos finitos y sus resultados son de más fácil interpretación.

En este artículo se ha presentado la aplicación de un modelo de macroelemento discreto (DMEM) para representar el comportamiento de una pared de CM. Esta primera aplicación es de carácter exploratorio y de ella se derivan las siguientes conclusiones:

A partir de la calibración se ha encontrado que el comportamiento global fue capturado aceptablemente por el modelo, en términos de resistencia y deformación. La curva de capacidad se acomodó bien al cortante máximo de la base y deformación de cedencia, pero no se logró aproximar a la rigidez inicial y al modo de falla final de los elementos de confinamiento verticales. En estos elementos, el modelo experimental falló por cortante, mientras que, en el modelo analítico, fallaron por la formación de rótulas plásticas en flexión. Sin embargo, este comportamiento es consistente con resultados presentados en aplicaciones previas de este modelo [25], [26].

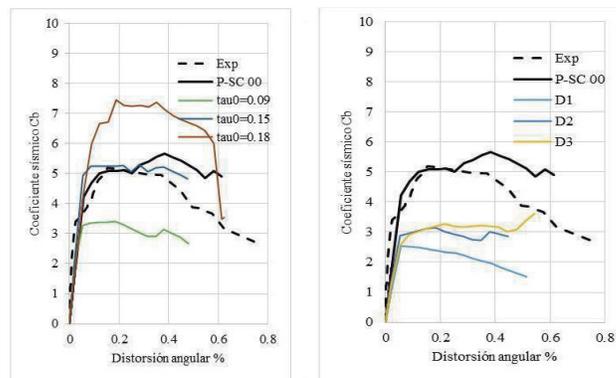
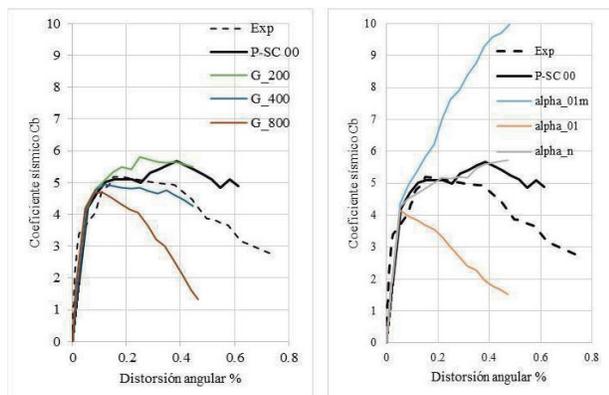


Fig. 7. Influencia del módulo de rigidez, coeficiente de degradación, resistencia cortante diagonal y discretización en la curva de capacidad

Del análisis de sensibilidad se encontró que el modelo es altamente sensible al módulo de elasticidad al cortante de la mampostería, la resistencia al cortante diagonal de la mampostería, al coeficiente de deterioro y al tamaño del elemento discretizado. Por otro lado, resulta poco o moderadamente sensible a las propiedades del concreto y el acero de refuerzo, así como al módulo de elasticidad de la mampostería.

Estos resultados son consistentes con las observaciones experimentales en paredes de CM, en las cuales la respuesta de la pared es altamente dependiente de la resistencia al cortante diagonal. El módulo de elasticidad al cortante es el único parámetro del modelo que afecta significativamente la rigidez inicial, a pesar de ello en esta calibración no fue posible aproximar aceptablemente dicha rigidez.

Es importante aclarar que, en la aplicación presentada en este artículo, la calibración ha sido realizada basándose únicamente en los resultados del experimento presentado y por lo tanto solo es válida para este conjunto de resultados.

A partir de estos resultados se verifica que el DMEM es una técnica que puede resultar apropiada no solo para aproximar el comportamiento global de estructuras de CM, sino también para estudiar el comportamiento de elementos estructurales con la definición precisa de sus leyes constitutivas y criterios para discretización. Las investigaciones futuras deberán enfocarse en estas tareas, calibrándose con más resultados experimentales.

#### REFERENCIAS

- [1] Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería con comentarios, Mexico, 2020.
- [2] Norma E.070 Albañilería, Perú, 2006.
- [3] INN (2003): Norma Chilena NCh2123.Of97 – Modificada en 2003. Albañilería Confinada, Disposiciones para el diseño y cálculo, Segunda Edición, Instituto de Normalización, Santiago, Chile.
- [4] G. Magenes, G.M. Calvi, IN-PLANE SEISMIC RESPONSE OF BRICK MASONRY WALLS, John Wiley & Sons, 1996.
- [5] S. Brzev, EARTHQUAKE-RESISTANT CONFINED MASONRY CONSTRUCTION, National Information Center of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 2007.

- [6] R. Marques, J.M. Pereira, P.B. Lourenço, Lateral in-plane seismic response of confined masonry walls: From numerical to backbone models, *Eng Struct.* 221 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111098>.
- [7] P.B. Lourenço, CURRENT EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ISSUES IN MASONRY RESEARCH, 2004.
- [8] J. v. Lemos, Discrete element modeling of masonry structures, *International Journal of Architectural Heritage.* 1 (2007) 190–213. <https://doi.org/10.1080/15583050601176868>.
- [9] S. Casolo, F. Peña, Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage, *Earthq Eng Struct Dyn.* 36 (2007) 1029–1048. <https://doi.org/10.1002/eqe.670>.
- [10] S. Casolo, Modelling in-plane micro-structure of masonry walls by rigid elements, *Int J Solids Struct.* 41 (2004) 3625–3641. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.002>.
- [11] Peter. Linde, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich., Numerical modelling and capacity design of earthquake-resistant reinforced concrete walls, Birkhäuser, 1993.
- [12] B. Pantò, F. Cannizzaro, S. Caddemi, I. Calì, 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches, *Advances in Engineering Software.* 97 (2016) 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.02.009>.
- [13] Vadalà F, S.C. Luis, F. Marco Francesco, L.B. Paulo, Seismic assessment of unreinforced masonry structures: a coupled mesoscale-DMEM approach, n.d.
- [14] Bazán E., Meli R., Diseño Sísmico de Edificaciones, n.d.
- [15] J.E. José Pérez Gavilán, Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería, n.d.
- [16] Brzev S., Pérez-Gavilán J., Application of Strut-and-Tie Model for Seismic design of confined masonry shear walls, in: *Brick and Block Masonry*, CRC Press, 2016: pp. 2257–2263. <https://doi.org/10.1201/b21889-296>.
- [17] A. Terán-Gilmore, O. Zuñiga-Cuevas, J. Ruiz-García, Displacement-based seismic assessment of low-height confined masonry buildings, *Earthquake Spectra.* 25 (2009) 439–464. <https://doi.org/10.1193/1.3111149>.
- [18] R. Marques, P.B. Lourenço, A model for pushover analysis of confined masonry structures: Implementation and validation, *Bulletin of Earthquake Engineering.* 11 (2013) 2133–2150. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9497-5>.
- [19] G.S. Torrisi, F.J. Crisafulli, An innovative Model for the In-Plane Nonlinear Analysis of Confined Masonry and Infilled Frame Structures A.Pavese, n.d. <http://www.confinedmasonry.org/>.
- [20] B. Borah, H.B. Kaushik, V. Singhal, Development of a Novel V-D Strut Model for Seismic Analysis of Confined Masonry Buildings, *Journal of Structural Engineering.* 147 (2021). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002941](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002941).
- [21] N. Rankawat, S. Brzev, S.K. Jain, J.J. Pérez Gavilán, Nonlinear seismic evaluation of confined masonry structures using equivalent truss model, *Eng Struct.* 248 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113114>.
- [22] [23] I. Calì, M. Marletta, B. Pantò, A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings, *Eng Struct.* 40 (2012) 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.039>.
- [23] B. Pantò, F. Cannizzaro, S. Caddemi, I. Calì, 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches, *Advances in Engineering Software.* 97 (2016) 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.02.009>.
- [24] P. Patricia Méndez De Hasbun, J. Adolfo, and R. Huevo, “PROYECTO DE COOPERACIÓN TÉCNICA Informe de resultados de la investigación del sistema estructural MAMPOSTERÍA SUELO CEMENTO CONFINADA-FASE II ‘Mejoramiento de la Tecnología para la Construcción y Sistema de Difusión de la Vivienda Social Sismo-Resistente.’”
- [25] F. Nucera, A. Santini, E. Tripodi, and I. Calì, “Seismic vulnerability assessment of confined masonry buildings by macro-element modeling: a case study.”
- [26] F. Nucera, A. Santini, E. Tripodi, F. Cannizzaro, and B. Pantò, “Influence of geometrical and mechanical parameters on the seismic vulnerability assessment of confined masonry buildings by macro-element modeling.”