

MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA FRENTE A EXCITACIÓN SÍSMICA LATERAL

COMPUTATIONAL MODELING OF A CONFINED MASONRY WALL UNDER LATERAL SEISMIC EXCITATION

Cristopher Calvo^a, Elvis Santillan^a, Illarick Balarezo^{a,b} y George Gonzales^a

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. pccijbal@upc.edu.pe*

^b*Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI-LAME), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, UBA, Argentina*

Palabras clave: Albañilería Confinada, Modelo Numérico, Excitación Sísmica, Plasticidad, ABAQUS.

Resumen. Los muros de albañilería confinada son ampliamente utilizados en la construcción de viviendas debido a su bajo costo y buena resistencia estructural. En este tipo de estructuras, el esfuerzo predominante es el cortante, que puede conducir a fallas frágiles, caracterizadas por la formación súbita de grietas diagonales que atraviesan el paño de albañilería. Esta condición se torna más crítica cuando la estructura se encuentra sometida a cargas sísmicas laterales. Tanto la albañilería como los elementos de acero y hormigón experimentan una marcada degradación de sus propiedades mecánicas conforme aumenta la energía sísmica. Este trabajo presenta un estudio numérico sobre la respuesta lateral de un muro de albañilería confinada frente a una excitación sísmica lateral. Para ello, se desarrolla un modelo computacional tridimensional no lineal mediante el método de elementos finitos utilizando el software comercial ABAQUS. El modelo considera el comportamiento del material mediante la calibración del modelo de daño plástico para albañilería confinada, utilizando datos experimentales extraídos de la literatura científica. Los resultados obtenidos son validados comparándolos con ensayos numéricos y experimentales disponibles en la bibliografía y con las disposiciones de la normativa vigente.

Keywords: Confined Masonry, Numerical Model, Seismic Excitation, Plasticity , ABAQUS.

Abstract. Confined masonry walls are widely used in residential construction due to their low cost and good structural resistance. In this type of structure, shear stress is predominant, potentially leading to brittle failure characterized by the sudden formation of diagonal cracks that cross the masonry panel. This condition becomes more critical when the structure is subjected to lateral seismic loading. Masonry, steel, and concrete elements all experience significant degradation of their mechanical properties with increasing seismic energy. This paper presents a numerical study on the lateral response of a confined masonry wall subjected to lateral seismic excitation. A nonlinear 3D finite element computational model was developed using the commercial software ABAQUS. The model considers the material behavior through the calibration of a plastic damage model for confined masonry using experimental data from scientific literature. The results obtained are validated by comparison with numerical and experimental tests available in the literature and with current design code provisions.

1. INTRODUCCIÓN

La albañilería confinada es una de las soluciones estructurales más utilizadas en el diseño de obras civiles en los países de la Comunidad Andina (Perú, Colombia, Ecuador y Bolivia), debido a una combinación de factores técnicos, económicos, culturales y sísmicos. En este tipo de estructuras, los esfuerzos de corte se determinan principalmente en función de variables como la geometría del muro, la calidad de los materiales, el grado de confinamiento, el tipo y magnitud de las cargas aplicadas, y la calidad constructiva. La falla por corte en estos muros es especialmente peligrosa, ya que se presenta de manera repentina y sin previo aviso. Como consecuencia, sus efectos suelen ser devastadores, especialmente cuando las estructuras están expuestas a excitaciones laterales cíclicas, como ocurre durante un sismo, lo que provoca el desprendimiento y el colapso progresivo de los materiales.

Existen diversas investigaciones basadas en estudios experimentales que evalúan este tipo de falla frágil sometida a una acción sísmica lateral. En [Coral \(2017\)](#) se analiza un sistema estructural de muro de albañilería confinada a escala real con el fin de hallar las cargas y desplazamientos máximos que se manifiestan en la falla por corte y analizar cómo evoluciona el mecanismo de falla a través de las fisuras diagonales. Sin embargo, la literatura asociada a trabajos experimentales sobre este fenómeno tectónico se viene estudiando con diferentes tipos de ladrillo como pandereta y agregando cargas verticales; entre ellos pueden citarse [Araoz y Velezmore \(2012\)](#) y [Mamani \(2015\)](#). En cuanto a estudios numéricos, entre estos pueden citarse [Pérez et al. \(2025\)](#) y [Yacila et al. \(2019\)](#) que han propuesto el uso de macro-modelos en software de elementos finitos como ETABS y ABAQUS para simular el comportamiento de muros de albañilería, comparando cargas máximas, deflexiones y patrones de agrietamiento.

Este trabajo se centra en proponer y validar un macro-modelado numérico capaz de replicar el comportamiento y los patrones de falla de un muro de albañilería confinada sometido a cargas laterales. Para tal fin se realizará un análisis computacional en el entorno del programa comercial [Abaqus \(2014\)](#), basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) y utilizando modelos constitutivos de daño plástico para el hormigón, acero de refuerzo y albañilería.

En primer lugar, se describirá brevemente el estudio experimental realizado por [Coral \(2017\)](#) para evaluar la falla por cortante. En base a los resultados experimentales de [Coral \(2017\)](#) se calibrarán los parámetros de entrada del constitutivo/numérico. Posteriormente, se incorpora un análisis Pushover. Finalmente, se obtendrán predicciones de las curvas carga – desplazamiento frente a la acción sísmica lateral.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL ADOPTADO

Para evaluar el comportamiento a corte en muro de albañilería confinada, sometida a una acción cíclica lateral, se tomará como base el ensayo experimental de un espécimen en escala real incluido en [Coral \(2017\)](#). Las dimensiones tanto del muro, viga cimentación, viga solera como de la columna, dadas en términos de “alto × ancho × espesor” eran de $2,2 \times 2,2 \times 0,13$ m, $0,335 \times 3,6 \times 0,3$ m, $0,2 \times 2,7 \times 0,13$ m y $2,2 \times 0,2 \times 0,13$ m, respectivamente.

Cabe destacar que el mortero para la realización de las pruebas tuvo una proporción de cemento-arena de 1:4, la cual, según SENCICO ([2020](#)), es una dosificación adecuada en relación con muros portantes. Las columnas se anclaron a las vigas de cimentación y al paño de albañilería. Esto último se realizó mediante un endentado de aproximadamente 0,05 m. Las unidades de arcilla eran del tipo King Kong de 18 huecos, de fabricación industrial, con perforaciones perpendiculares a la cara de asiento. En la Figura(1) se muestra la geometría del conjunto del muro confinado ensayado por [Coral \(2017\)](#). Las medidas están dadas en metros.

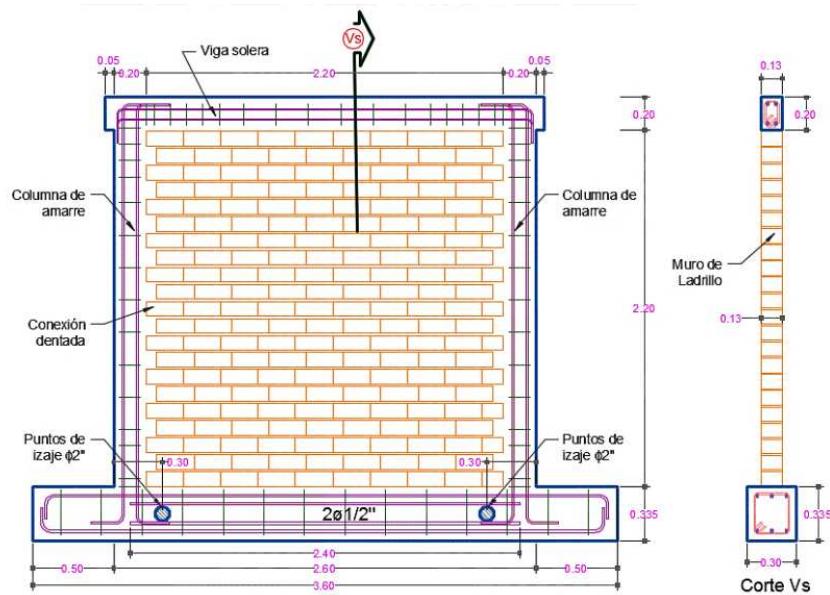


Figura 1: Detalle del diseño del muro de albañilería, [Coral \(2017\)](#) .

Respecto al armado se muestra en la Figura (2), en las vigas de cimentación se colocó un reforzamiento longitudinal de 4 varillas de $5/8"$ más 2 varillas de $1/2"$ de diámetro ($4\phi 5/8" + 2\phi 1/2"$) y estribos de $3/8"$ " los cuales estuvieron espaciados $1@0,05$ m, $2@0,10$ m y el resto cada $0,25$ m ($1@0,05$ m; $2@0,10$ m; $r@0,25$ m). En las columnas y las vigas soleras se dispusieron longitudinalmente $4\phi 1/2"$ ". Al igual que las vigas de cimentación, estos elementos tuvieron refuerzos de estribos, pero con un diámetro de $1/4"$ ", los cuales estuvieron espaciados $1@0,05$ m; $4@0,10$ m; $r@0,25$ m (a cada extremo del elemento para las columnas).

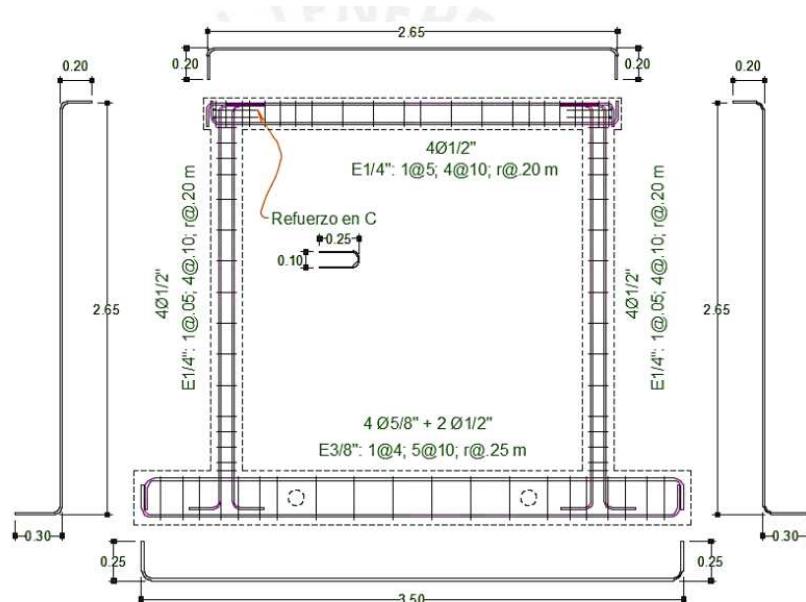


Figura 2: Detalle del refuerzo de las vigas y columnas, [Coral \(2017\)](#).

En cuanto a las características de los materiales, la resistencia a compresión uniaxial (f'_c) del hormigón era de 17,5 MPa en la columna y viga solera, respectivamente, mientras que la compresión uniaxial (f'_c) del hormigón era de 21 MPa y 30 MPa en la viga cimentación y el mortero, respectivamente. La resistencia característica a compresión axial de la unidad de albañilería (f'_b) era de 11,04 MPa y la resistencia a compresión axial de las pruebas de albañilería era de 9,45 MPa. Finalmente, la tensión de fluencia del acero (f_y) era de 420 MPa. Se ejecutaron los ensayos cíclicos en los muros construidos siguiendo el protocolo de ensayo del [FEMA 461](#).

3. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA DEL MURO CONFINADO

Para simular el ensayo de [Coral \(2017\)](#), y teniendo en cuenta el dentado del muro de albañilería, se inició con la creación de una pieza 3D deformable y sólida mediante extrusión, con el objetivo de obtener un modelo monolítico. Posteriormente, se definieron los elementos de confinamiento (viga solera, viga de cimentación y columnas) y se asignó el espesor de la viga de cimentación, generando un dentado de 50×100 mm en el muro que se muestra en la Figura (3a). Para el refuerzo, se modelaron las barras de acero como piezas 3D deformables (tipo cable y planar). Luego, estas se instanciaron, duplicaron y colocaron en la viga de cimentación, la viga solera y las columnas, que se muestran en la Figura (3b).

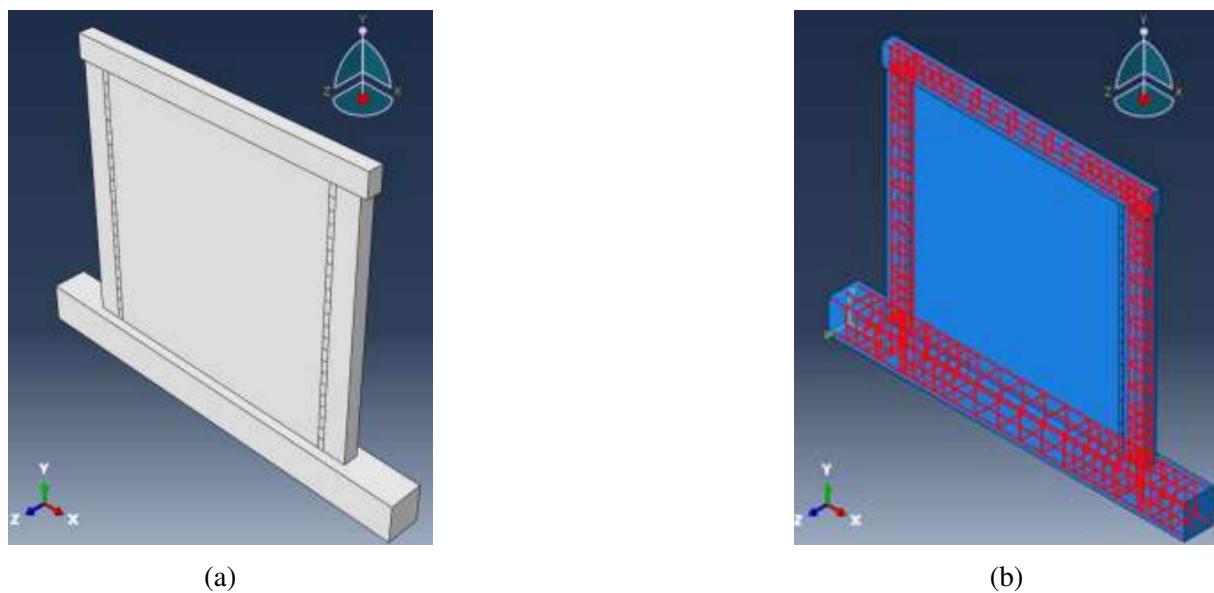


Figura 3: Características geométricas del modelo implementado en: (a) muro de albañilería y elementos de hormigón y (b) acero de refuerzo.

Para la calibración del modelo numérico, se aplicó una carga horizontal dinámica y explícita con un desplazamiento de 20 mm. Se crearon piezas 3D con comportamiento rígido y tipo cáscara, añadiendo un punto de referencia (Coupling Constraint). En la base, se definió el apoyo hidráulico inferior y, en la parte superior, el actuador dinámico, los cuales se montaron sobre el modelo. En la base, se aplicó una condición de borde inicial (step Initial) con restricción de desplazamiento/rotación. De igual forma, se estableció el apoyo de la gata hidráulica, mientras que para el actuador dinámico se permitió el movimiento libre en el eje x - x; se restringieron los ejes y - y, además del soporte de la gata en la parte superior de la viga de cimentación.

Se definió la condición del actuador dinámico seleccionando la carga horizontal y una amplitud tipo paso suave (Smooth Step). Asimismo, se crearon las superficies de contacto entre los apoyos y el modelo numérico. Para representar correctamente el comportamiento, se asignaron propiedades de interacción mediante Hard Contact y se definió la interacción de contacto general (explícito) con el step Initial. En la Figura (4a), se muestran las condiciones de vínculo y la zona de aplicación de los desplazamientos impuestos. Se utilizaron elementos finitos sólidos hexaédricos de 8 nodos, tipo C3D8R, para modelar hormigón y albañilería. Sin embargo, en elementos barra, tipo T3D2, para las barras de acero. Cabe destacar que se consideró adherencia perfecta en la interfase entre el hormigón y la armadura de acero. Con ello se procede a generar la división del enmallado; para cada elemento, se le asignó un tamaño de 25 mm y se generó el enmallado, excepto en los apoyos, así como se ve en la (4b).

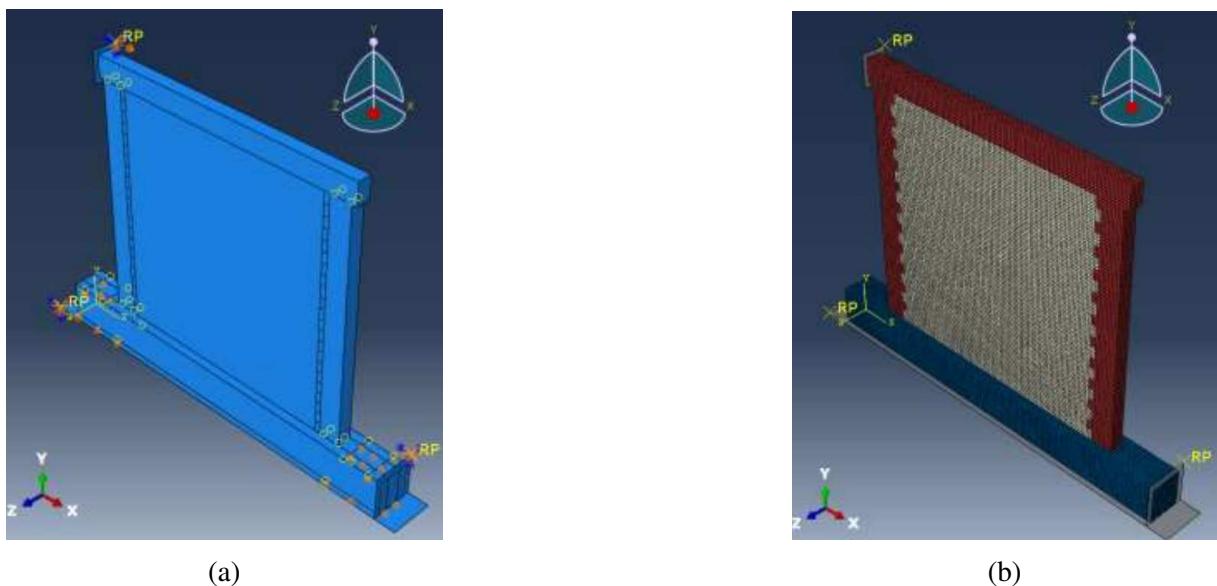


Figura 4: Características del modelo implementado en: (a) condiciones de borde y (b) enmallado del muro de albañilería confinada.

Para modelar el comportamiento del hormigón y la albañilería, se utilizó el modelo de plasticidad de daño (CDP - Concrete Damage Plasticity) provisto por ABAQUS ([Abaqus, 2014](#)). Este modelo fue propuesto originalmente por [Lubliner et al. \(1989\)](#) y posteriormente modificado por [Lee y Fenves \(1998\)](#) para introducir el daño. En la Ecuación (1) está dada la expresión de la superficie de fluencia del modelo CDP, donde $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ es la deformación plástica equivalente a compresión, $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ es la deformación plástica equivalente a tracción, \bar{q} es la presión hidrostática efectiva, \bar{p} es la tensión efectiva equivalente de Von Mises y $\hat{\sigma}_{max}$ es la tensión efectiva principal máxima, siempre positiva. En la Figura (5) puede verse claramente la forma que adopta la expresión de la Ec. (1) para un estado plano de tensiones.

$$F = \frac{1}{1-\alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}; \tilde{\varepsilon}_c^{pl})\langle\hat{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\sigma}_{max}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \leq 0 \quad (1)$$

Cabe aclarar que los parámetros de daño asociados al modelo CDP son funciones escalares que varían entre 0 y 1, donde 0 indica la inexistencia de daño y 1 corresponde a un material completamente dañado. Para evitar problemas numéricos, en este trabajo el valor máximo de daño se fijó en 0.98.

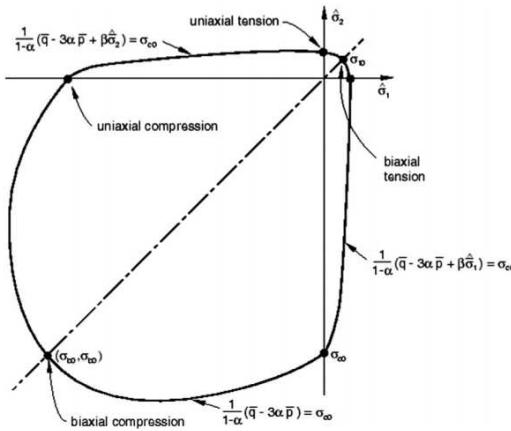


Figura 5: Superficie de fluencia del modelo CDP en estado plano de tensiones, ([Abaqus, 2014](#)).

Los siguientes parámetros a_c y a_t que sirven para hallar b_c y b_t , mediante las ecuaciones (2) y (3), respectivamente. Las expresiones propuestas por [Alfarah et al. \(2017\)](#) para el daño por compresión (d_c) y por tracción (d_t) están dadas en la ecuación (4) y (5), donde ε_{ch} y ε_{ck} son las deformaciones por agrietamiento a compresión y tracción, respectivamente, y L_{eq} , G_f y G_{ch} son el tamaño del enmallado del elemento finito (mm), energía de fractura (N/mm) y energía de agrietamiento (N/mm), respectivamente.

$$a_c = 7,873, \quad a_t = 1 \quad (2)$$

$$b_c = \frac{1,97 \cdot (f_{ck} + 8)}{G_{ch}} \cdot l_{eq}, \quad b_t = \frac{0,453 \cdot f_{ck}^{2/3}}{G_f} \cdot l_{eq} \quad (3)$$

$$d_c = 1 - \frac{1}{2 + a_c} \cdot [2 \cdot (1 + a_c) \cdot \exp(-b_c \cdot \varepsilon_{ch}) - a_c \cdot \exp(-2 \cdot b_c \cdot \varepsilon_{ch})] \quad (4)$$

$$d_t = 1 - \frac{1}{2 + a_t} \cdot [2 \cdot (1 + a_t) \cdot \exp(-b_t \cdot \varepsilon_{ck}) - a_t \cdot \exp(-2 \cdot b_t \cdot \varepsilon_{ck})] \quad (5)$$

La albañilería, al ser un material muy diferente al concreto, los parámetros de daño se hallaron según la publicación de [Park et al. \(1987\)](#) con la siguiente ecuación (6), para el daño por compresión (d_c) y por tracción (d_t), donde σ_{peak} , α_s , σ_{curr} , ε_{curr} y E_0 son el esfuerzo máximo de tracción o compresión (MPa), módulo de degradación, se asume con un valor de 2, esfuerzo actuante (MPa), deformación actuante y módulo de elasticidad de la albañilería en MPa, respectivamente.

$$d_{t/c} = 1 - \frac{\sigma_{curr} + \alpha_s \cdot \sigma_{peak}}{E_0 \cdot \sigma_{curr} + \varepsilon_s \cdot \sigma_{peak}} \quad (6)$$

El modelo CDP también requiere la entrada de las curvas tensión-deformación uniaxial a compresión y tracción del hormigón. Para la curva de compresión uniaxial se definieron tres regiones según lo propuesto por [Krätzig y Pölling \(2004\)](#): (1) una región lineal hasta una tensión equivalente al 40 % de la tensión máxima o pico (f_{cm}), (2) una región de endurecimiento parabólico hasta f_{cm} y su deformación asociada (ε_{cm}), y (3) una región de ablandamiento hiperbólico. En cuanto a la curva de tracción, se definieron dos regiones según la propuesta de [Krätzig y Pölling \(2004\)](#): (1) un comportamiento elástico lineal hasta la tensión pico y (2) una

región de ablandamiento post-pico con comportamiento lineal o exponencial y dependiente de la energía de fractura y de una longitud equivalente. En la Figura (6a), se muestran las curvas de compresión mencionadas, y en la Figura (6b) se muestra la curva de tracción. Por otra parte, para el comportamiento mecánico unidimensional del acero se utilizó un diagrama trilineal con comportamiento rígido-plástico con endurecimiento, con valores de [Yacila et al. \(2019\)](#).

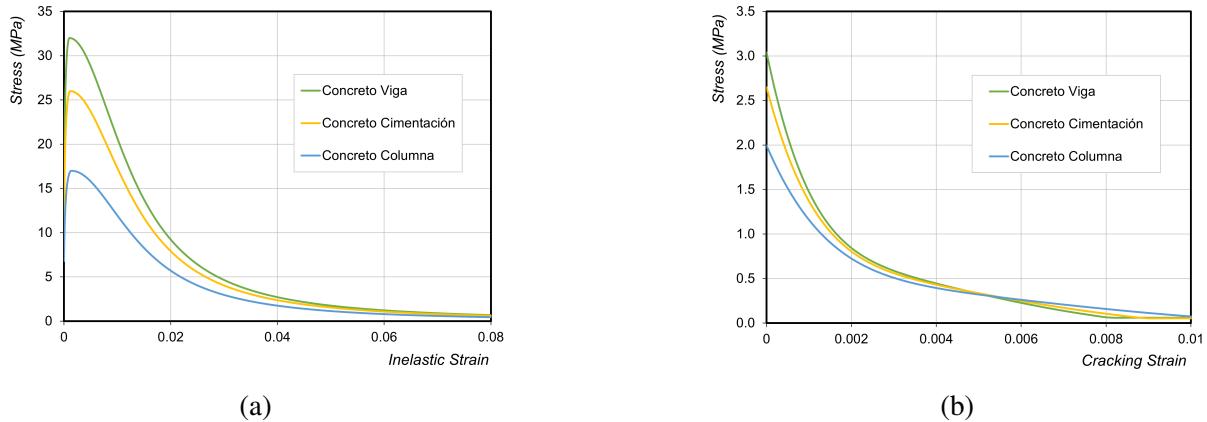


Figura 6: Curva tensión vs deformación específica uniaxial del hormigón para (a) compresión y (b) tracción ([Kräitzig y Pölling, 2004](#)).

Para la curva de compresión uniaxial de la albañilería, se definieron dos regiones según lo propuesto por [Kaushik et al. \(2007\)](#): (1) una región de endurecimiento parabólico hasta alcanzar f_m y, finalmente, llegar a $0,9, f'_m$, y (2) una región de ablandamiento en la zona post-fractura con comportamiento lineal, dependiendo de si el mortero contiene limo o no. En cuanto a la curva de tracción, se definieron dos regiones según la propuesta de [Hillerborg et al. \(1976\)](#): (1) un comportamiento elástico lineal hasta la tensión pico, y (2) una región de ablandamiento post-pico con comportamiento de decaimiento exponencial. En la Figura (7a), se muestran las curvas de compresión mencionadas, y en la Figura (7b) se muestra la curva de tracción.

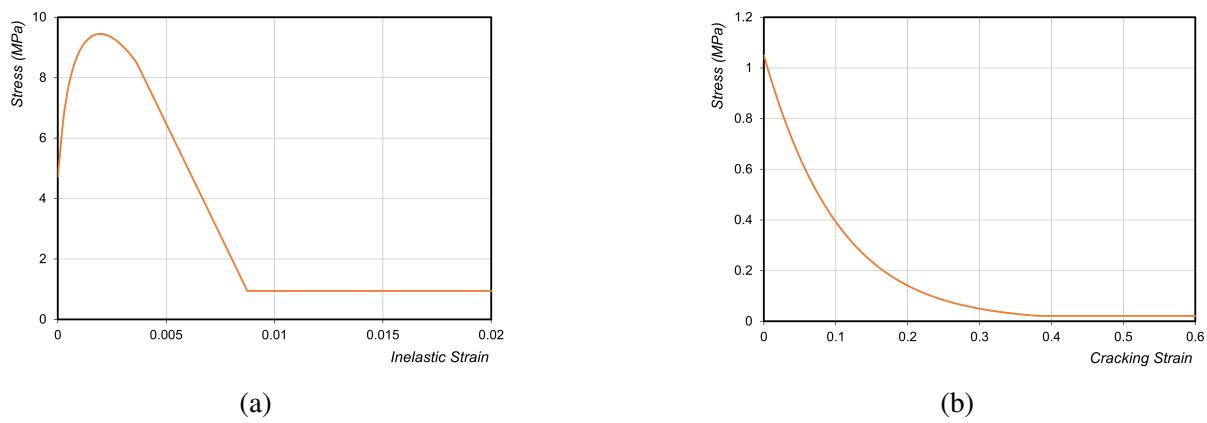


Figura 7: Curva tensión vs deformación específica uniaxial de la albañilería para (a) compresión ([Kaushik et al., 2007](#)) y (b) tracción ([Hillerborg et al., 1976](#)).

Las propiedades materiales utilizadas en el modelo numérico para el ensayo de albañilería están dadas en la Tabla (1), donde E es el módulo de elasticidad, ν es el coeficiente de Poisson, y ρ es la densidad, respectivamente.

| Material | E [MPa] | f_{cm} [MPa] | f_{tm} [MPa] | v [-] | ρ [$\frac{kg}{m^3}$] |
|---------------------|----------|----------------|----------------|---------|-----------------------------|
| Muro de albañilería | 5714.83 | 9.45 | 1.25 | 0.15 | $1,80 \times 10^{-6}$ |
| Columnas | 21563.70 | 17 | 1.99 | 0.15 | $2,4 \times 10^{-6}$ |
| Viga Solera | 25450.53 | 32 | 3.04 | 0.15 | $2,4 \times 10^{-6}$ |
| Viga de Cimentación | 27707.36 | 26 | 2.65 | 0.15 | $2,4 \times 10^{-6}$ |
| Acero | 200000 | - | - | 0.30 | $7,85 \times 10^{-6}$ |

Tabla 1: Propiedades mecánicas y físicas de los materiales.

De modo similar al ensayo real, en el modelo computacional las cargas se aplicaron mediante un desplazamiento de 20 mm impuesto en el actuador dinámico puesto en la viga solera. Para esto, se utilizó un método de resolución explícita que ofrece el programa [Abaqus \(2014\)](#) para la resolución de problemas dinámicos de baja velocidad de carga. En este sentido, se forzó a la energía cinética del sistema a permanecer por debajo del 1 % del valor de la energía interna con el fin de simular un evento cuasiestático y evitar efectos cinemáticos considerables ([Yacila et al., 2019](#)).

3.1. Calibración del modelo numérico

Para calibrar los parámetros del modelo material se buscó simular el patrón de fisuración obtenido en el ensayo de [Coral \(2017\)](#) a través del análisis cualitativo del daño en la losa, para una fuerza lateral máxima. Los parámetros finalmente adoptados se resumen en la Tabla (2), donde ε es la excentricidad, K_c es el umbral de la superficie de fluencia, Ψ es el ángulo de dilatancia, $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ es la relación entre la tensión en el límite elástico inicial en compresión biaxial y el límite elástico inicial en compresión uniaxial y μ es un parámetro de viscosidad. En la Figura (8b) se muestra el patrón de daño obtenido mediante simulación computacional, comparado con el patrón de fisuración obtenido experimentalmente por [Coral \(2017\)](#), el cual se presenta en la Figura (8a). Esta Figura (8b) captura el daño de elementos clave como la viga de cimentación, la columna y el muro.

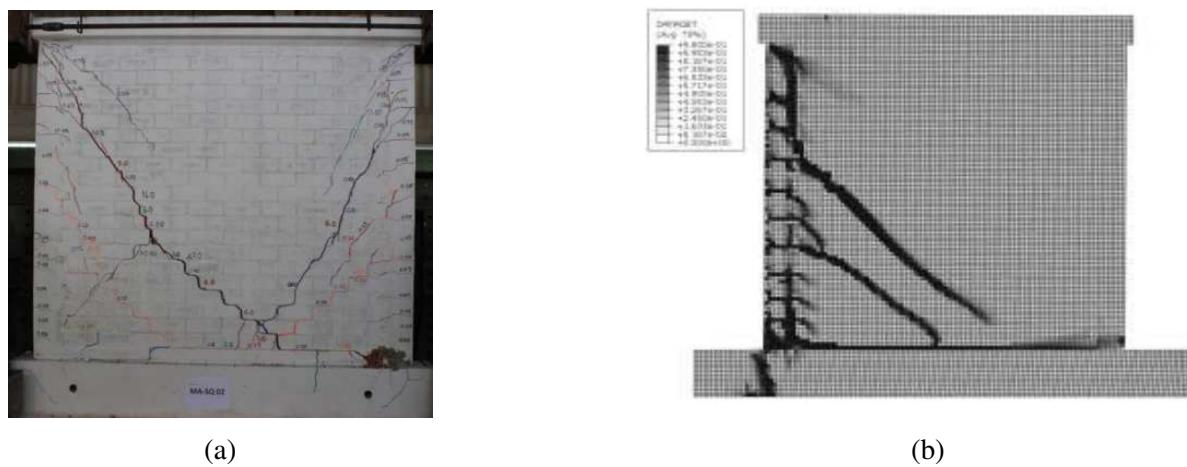


Figura 8: Patrón de fisuración obtenido en: (a) ensayo experimental ([Coral, 2017](#)) y (b) modelación numérica.

Finalmente, en la Figura (9) se comparan las curvas carga vs desplazamiento obtenidas para diferentes módulos de elasticidad de la albañilería, este factor nos indica qué tan rígido es un

elemento, resistencias a tracción de la albañilería (t_f), energía de fractura (G_f) con la curva experimental de [Coral \(2017\)](#), cuyos valores obtenidos del análisis de sensibilidad paramétrico son: 65 % E de albañilería que son 3714.64 MPa, t_f de 1.65 MPa y $G_f = 0.1$. Puede verse que la aproximación de los resultados obtenidos en este trabajo en términos de comportamiento carga vs desplazamiento es adecuada. Se obtuvo una diferencia del 1.19 % con respecto a la máxima fuerza lateral aplicada.

| Material | Ψ [-] | ε [-] | $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ | K_c [-] | μ [-] |
|------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Muro de albañilería | 35 | 0.1 | 1.16 | 0.667 | 0.0001 |
| Columnas y viga solera | 30 | 0.1 | 1.16 | 0.667 | 0.0001 |
| Viga de Cimentación | 30 | 0.1 | 1.16 | 0.667 | 0.0001 |

Tabla 2: Parámetros del modelo constitutivo.

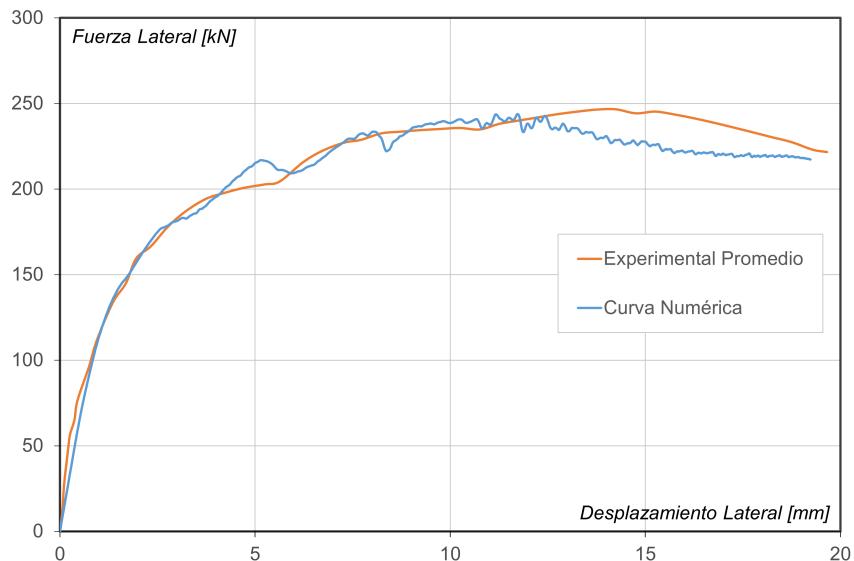


Figura 9: Curva experimental promedio vs. curva numérica.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó por medio de una simulación computacional la degradación de la resistencia a corte de un muro confinado bajo la acción de cargas laterales cíclicas. En base a la comparación de los resultados obtenidos por el modelo y los resultados experimentales, se demostró que el modelo es capaz de reproducir la resistencia a corte de la estructura. Posteriormente, en base a las predicciones de las curvas carga-desplazamiento obtenidas para distintas fuerzas laterales, pudo observarse una reducción de hasta una diferencia del 1.19 % del valor 243.62 MPa con respecto a la máxima fuerza lateral aplicada de 246.56 MPa del muro experimental. En estas curvas, se observó además una reducción de la rigidez del sistema estructural de albañilería confinada, producto del aumento del daño ocurrido en los materiales debido al incremento de la fuerza lateral. De los tres muros experimentales ensayados por [Coral \(2017\)](#), se tiene una mejor similitud con los patrones de agrietamiento del segundo muro (MA - SQ 02).

Uno de los aspectos más interesantes mostrados en el presente trabajo es la incorporación de la dependencia de las cargas cíclicas laterales de las variables de entrada del modelo Concrete Damage Plasticity (CDP) provisto por el programa comercial ABAQUS.

REFERENCIAS

- Abaqus D.S.S.C. *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*. 2014.
- Alfarah B., López-Almansa F., y Oller S. New methodology for calculating damage variables evolution in plastic damage model for rc structures. *Engineering Structures*, 132:70–86, 2017. doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.022.
- Araoz T. y Velezmoro J. *Reforzamiento de viviendas existentes construidas con muros confinados hechos con ladrillos pandereta – segunda etapa*. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú, 2012. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil.
- Coral M. Ensayos cíclicos en muros de albañilería confinada construidos con ladrillos king kong de fabricación industrial. 2017. Repositorio PUCP.
- FEMA 461. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. Informe Técnico FEMA 461, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C., USA, 2007.
- Hillerborg A., Modéer M., y Petersson P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6):773–781, 1976. doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- Kaushik H.B., Rai D.C., y Jain S.K. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9):728–739, 2007. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728).
- Krätsig W.B. y Pölling R. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. *Computers & Structures*, 82(15-16):1201–1215, 2004. doi:10.1016/j.compstruc.2004.03.002.
- Lee J. y Fenves G.L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8):892–900, 1998. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- Lubliner J., Oliver J., Oller S., y Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3):299–326, 1989. doi:10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- Mamani P. *Comportamiento mecánico de muros de albañilería tubular confinada reforzados con malla electrosoldada ante cargas sísmicas y gravitacionales*. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú, 2015. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil.
- Park Y.J., Reinhorn A.M., y Kunath S.K. Idarc: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures. Informe Técnico NCEER-87-0008, State University of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, 1987.
- Pérez G., Balarezo I., y Gonzales G. Seismic performance assessment of a peruvian public school “module 780-actual” using nonlinear static and dynamic analysis. *TECNIA*, 35(1):55–68, 2025. doi:10.21754/tecnia.v35i1.2460.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). Norma técnica e.070 – albañilería. 2020. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366661/56%20E.070%20ALBA%C3%91ILERIA.pdf>.
- Yacila J., Camata G., Salsavilca J., y Tarque N. Pushover analysis of confined masonry walls using a 3d macro-modelling approach. *Engineering Structures*, 201:109731, 2019. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109731.