

# Simulación numérica de muros de mampostería postensada no adherida con bloques de arcilla

*Numerical model of unbonded post-tensioned masonry walls with clay blocks*

Bregy Hassler Choque Jiménez <sup>1</sup>

Caori Patricia Takeuchi Tam <sup>2</sup>



Recibido: 22/09/2023

Aceptado: 14/11/2023

DOI: <https://doi.org/10.26495/icti.v10i2.2647>

## Resumen

La modelación numérica de la mampostería puede resultar compleja debido a que es un material compuesto heterogéneo y anisótropo, además si se requiere representar un presfuerzo longitudinal paralelo al eje del muro implicaría un factor adicional al análisis y evaluación estructural. En esta investigación se modeló a través de un software comercial de elementos finitos un muro de mampostería postensada con bloques de arcilla bajo carga laterales monotónicas. Se evidenció a través de un análisis de sensibilidad que a partir de una división de 72 elementos finitos el error relativo supera la tolerancia de 0.5 % y se obtiene los resultados de desplazamiento respecto a la carga incrementando gradualmente de manera monotónica. Los resultados del comportamiento mecánico de la modelación numérica presentaron una tendencia similar a los datos experimentales obtenidos en una anterior investigación, sin embargo, fue necesario calibrar el modelo numérico a través de las propiedades mecánicas del material encontradas previamente.

## Palabras clave:

Modelación numérica, mampostería postensada no adherida, bloques arcilla

## Abstract

Numerical modeling of masonry can be challenging due to its heterogeneous and anisotropic nature. Additionally, if it's necessary to represent longitudinal pre-stress parallel to the wall's axis, it would introduce an additional factor into the structural analysis and evaluation. In this research, a masonry wall made of clay blocks post-tensioned under lateral monotonic loads was modeled using commercial finite element software. A sensitivity analysis revealed that, with a division into 72 finite elements, the relative error exceeded the 0.5% tolerance, and displacement results were obtained as the load was gradually increased monotonically. The mechanical behavior results from the numerical modeling exhibited a similar trend to the experimental data obtained in a previous study. However, it was necessary to calibrate the numerical model based on the mechanical properties of the material previously determined.

## Keywords:

Numerical modelling, unbonded post-tensioned masonry, clay blocks

<sup>1</sup> Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia, [bregychoque@usantotomas.edu.co](mailto:bregychoque@usantotomas.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, [cptakeuchit@unal.edu.co](mailto:cptakeuchit@unal.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras en mampostería se construyen en diferentes regiones del mundo susceptibles a amenaza sísmica alta o intermedia (Figura 1), esta vulnerabilidad ha conllevado que se desarrollen diferentes estrategias para aumentar su resistencia ante cargas laterales, inicialmente se utilizó las barras de refuerzo en combinación con los mampuestos dando inicio a la mampostería reforzada, posterior a las barras refuerzo se han presentado otras estrategias para mejorar su comportamiento estructural, entre esas el uso de presfuerzo o el refuerzo mediante fibras.

Aplicar presfuerzo a los muros de mampostería mejora el comportamiento mecánico ante cargas paralelas y perpendiculares a su plano, según varias investigaciones (Arturo & Jason, 2012; Bean & Schultz, 2003; Mojsilovic & Marti, 2000; Wight, 2006; Zalamea, 2012), sin embargo, la implementación de ensayos experimentales puede resultar bastante costosa y demorar tiempos de realización considerables, es por eso que se desarrollan modelos numéricos para representar de manera aproximada y eficiente el comportamiento mecánico de un elemento o material. El presente trabajo desarrolló un modelo numérico que estimó de manera aproximada el comportamiento estructural ante carga monotónica de la mampostería postensada no adherida con bloques de arcilla.



Figura 1. Construcción en mampostería  
Fuente: Brzev & Pérez Gavilan, 2014

Los resultados obtenidos de la modelación numérica del muro de mampostería postensada se comparan con los datos experimentales de diferentes investigaciones previas, al igual se contrasta con el modelo numérico de un muro simplemente reforzado sin presfuerzo.

Para el presente artículo se muestra inicialmente la metodología empleada para elegir el tamaño del elemento finito del modelo numérico evaluando diferentes tamaños, una vez establecido el tamaño del elemento finito se procesan los datos de las propiedades del material para obtener los resultados de esfuerzos y desplazamientos del muro reforzado y el muro postensado, cabe resaltar que el muro reforzado se sometió a una carga horizontal monotónica paralela a su plano sin superar su rango elástico, y al muro postensado se le aplicó además de esta carga, un presfuerzo vertical que no sobrepasa el rango elástico.

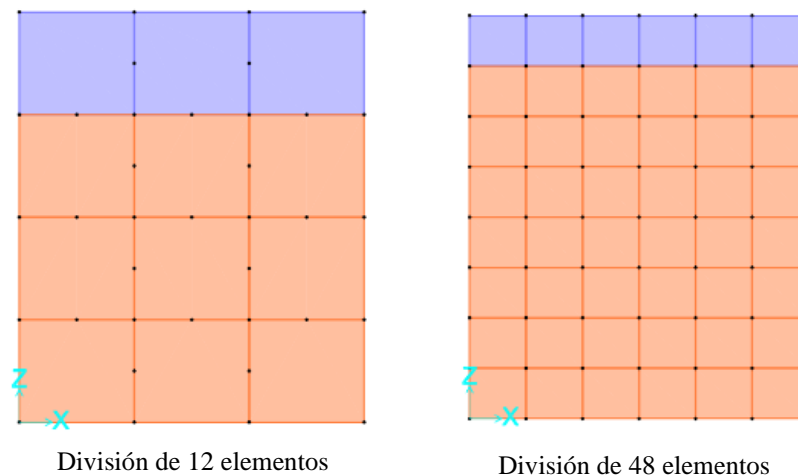
Para representar el comportamiento de la mampostería se pueden trabajar tres tipos de estrategias diferentes según el nivel de detalle y el problema físico a representar, la primera es a través de un meso-modelo detallado donde se representen cada uno de los componentes: mortero, ladrillo e interfaz ladrillo-mortero, la segunda es mediante un meso-modelo simplificado donde la interfaz ladrillo-mortero se analiza dentro de la misma unidad a través de una homogenización de los dos elementos y la última estrategia es mediante un macro modelo que representa el problema como un material homogéneo (Abdellatif et al., 2019; Campbell & Durán, 2017; Freddi & Royer-Carfagni, 2011; Lourenço, 1996; Lourenço et al., 2007; Lourenço & Silva, 2020; Marques et al., 2020; Medeiros et al., 2013a, 2013b; Obaidat et al., 2017; Shadlou et al., 2020; Smoljanović et al., 2017; Zucchini & Lourenço, 2009)

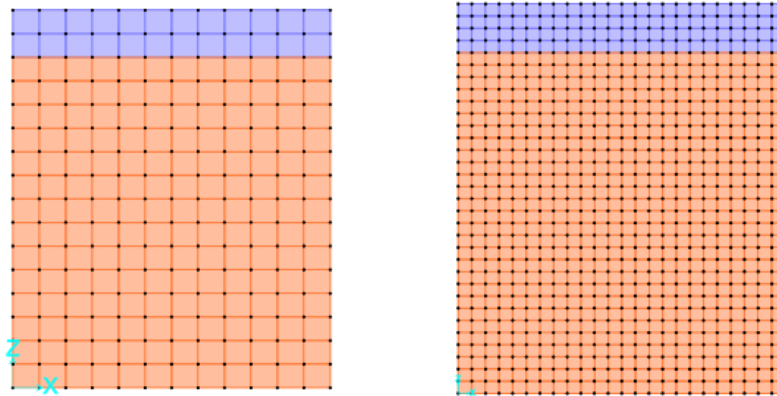
El presente trabajo utilizó un meso-modelo simplificado para representar el comportamiento de la mampostería postensada no adherida, a través de la homogenización del material se logró obtener un comportamiento aproximado del comportamiento mecánico de los muros de mampostería postensada no adherida

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la implementación del modelo fue usado un elemento bidimensional de cuatro nodos con dos grados de libertad por cada nodo para el ladrillo, y para representar el acero se utilizó un elemento finito por capas cuyas características se muestran en el manual de referencia del software (SAS IP, 2017), (Arturo & Jason, 2012; Mera Tapia, 2015), donde se muestra la descripción de las capas del refuerzo.

Trabajos recientes calibran el modelo de elementos finitos con ensayos experimentales de muros en mampostería postensada no adherida (Ryu et al., 2014). A partir de la metodología establecida en trabajos previos se definió diferentes divisiones del muro, con el que se logró diferentes tamaños del elemento finito como lo muestra la Figura 2.





División de 192 elementos                      División de 768 elementos  
 Figura 2. Tamaños de mallas establecidas para discretizar el problema  
 Fuente: Elaboración propia

Para estimar el cambio del tamaño del elemento finito se presentan la comparación y resultados del coeficiente de variación con los diferentes tamaños de elementos finitos.

**Tabla 1. Malla 3x4 de 12 Elementos**

Elementos área	Tipo de losa	Nodo	S11Top kN/m <sup>2</sup>	S22Top kN/m <sup>2</sup>	S12Top kN/m <sup>2</sup>
21	Delgada	34	596.09	3115.54	2464.38
22	Delgada	34	634.82	2160.63	2816.09
29	Delgada	34	639.97	3474.55	3865.35
30	Delgada	34	601.24	2519.64	2217.06
Promedio			618.03	2817.59	2840.72
Porcentaje de error			3.55%	23.32%	36.07%
Desviación			22.56	588.99	725.96
COV			0.04	0.21	0.26

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2. Malla 6x8 de 72 Elementos**

Elementos área	Tipo de losa	Nodo	S11Top kN/m <sup>2</sup>	S22Top kN/m <sup>2</sup>	S12Top kN/m <sup>2</sup>
21	Delgada	34	400.48	184.42	3737.33
22	Delgada	34	398.3	175.72	3709.84
29	Delgada	34	395.66	174.61	3737.17
30	Delgada	34	397.84	231.31	3709.68
Promedio			398.07	191.515	3723.505
Porcentaje de error			0.61%	20.78%	0.37%
Desviación			1.98	26.89	15.87
COV			0.005	0.14	0.00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. Malla 12x16 de 192 Elementos**

Elementos área	Tipo de losa	Nodo	S11Top kN/m <sup>2</sup>	S22Top kN/m <sup>2</sup>	S12Top kN/m <sup>2</sup>
500	Delgada	38	225.87	134.14	3751.42
501	Delgada	38	213.48	24.3	3745.5
554	Delgada	38	227.02	138.73	3787.5
555	Delgada	38	212.34	28.89	3781.58
Promedio			219.6775	81.515	3766.5
Porcentaje de error			3.34%	70.19%	0.56%
Desviación estándar			7.84	63.47	21.11
Coeficiente de variación			0.04	0.78	0.01

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el coeficiente de variación, se toma el valor de los distintos esfuerzos en un punto central de 4 secciones del muro. Estas secciones están sometidas a una carga horizontal de 3 kN que actúa en paralelo a su eje. A continuación, se muestra la tabla 4, la cual representa el cálculo de errores relativos porcentuales para distintos tamaños de elementos finitos.

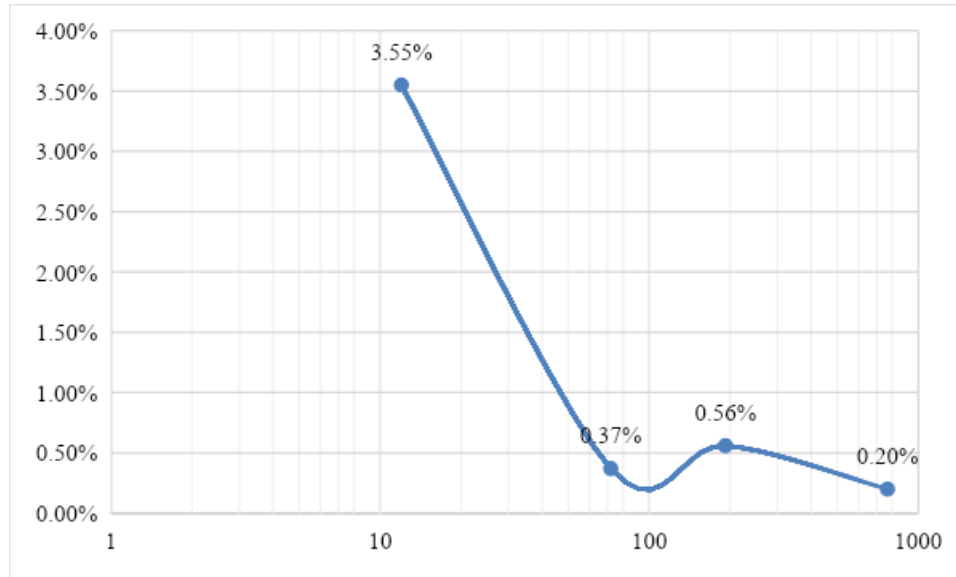
**Tabla 4. Resumen del error relativo obtenido con cada variación de elementos finitos**

Error relativo obtenido con diferentes tamaños de elemento finito		
Malla	Número de elementos	Error
3x4	12	3.55%
6x8	72	0.37%
12x16	192	0.56%
24x32	768	0.20%

Fuente: Elaboración propia

A través de la modificación en la cantidad de elementos finitos con diversas configuraciones de mallas y la posterior comparación de los resultados en términos de error, se nota que existe una relación positiva entre el aumento del número de elementos y la reducción del error representativo. Como resultado de este análisis, se opta por utilizar la malla de 6x8, ya que su porcentaje de error relativo es inferior al 0.5%, sobrepasando así la tolerancia requerida con precisión de dos cifras significativas.

A medida que se aumenta el tamaño de elementos finitos en el modelo numérico obtenemos un error cada vez más pequeño, sin embargo, se presenta una pequeña anomalía cuando se pasa de 72 a 192 elementos debido a que se presenta un menor porcentaje de error con una cantidad de elementos menor, esto se deba probablemente al punto central elegido para tomar el valor del esfuerzo obtenido, pero es importante resaltar que aunque la división de 768 elementos se obtuvo el valor más pequeño de error se requiere un mayor costo computacional para obtener los resultados, por ese motivo la malla de 72 elementos se escogió para el modelo numérico como se muestra en la Figura 3.

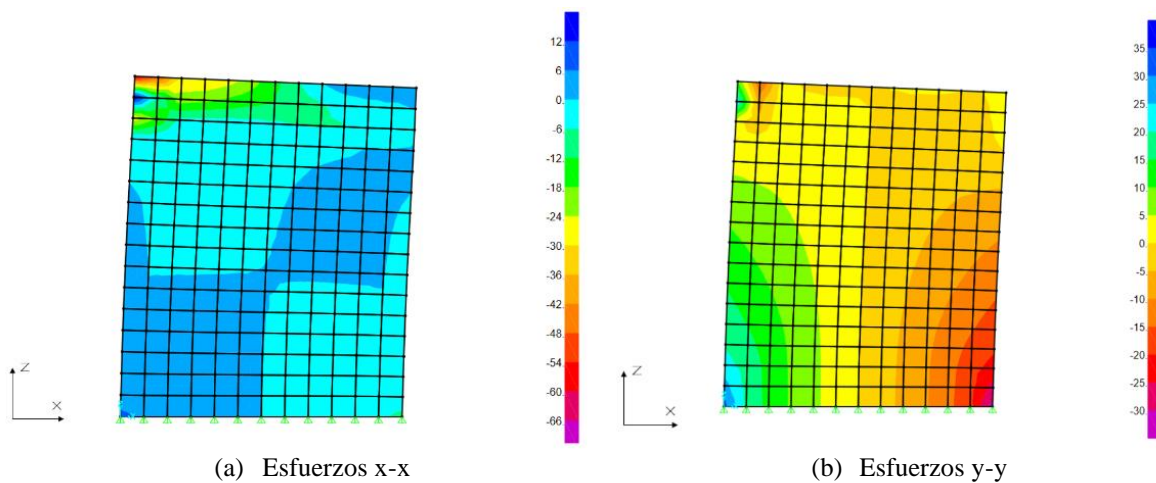


**Figura 3. Variación del error relativo de acuerdo con el tamaño del elemento finito**  
Fuente: Elaboración propia

### 3. RESULTADOS

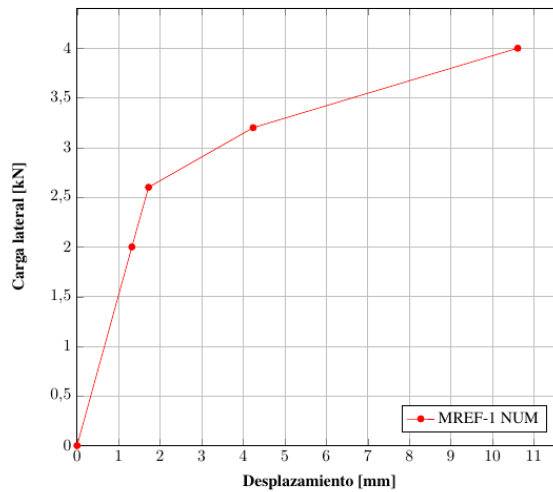
Una vez finalizado el análisis de sensibilidad para determinar el tamaño de elemento finito adecuado para el problema de modelación numérica, se obtiene para los dos diferentes tipos de muro los esfuerzos resultantes ante una carga de 3kN paralela el eje del muro. Las propiedades del material utilizadas para la modelación son tomadas de los resultados experimentales de una investigación previa (Choque, 2021).

Para el muro en mampostería simplemente reforzado (MMREF-1) se tienen los siguientes datos de entrada, Módulo de la elasticidad del muro:  $E_m = 9097.5$  MPa, Relación de poisson para el muro:  $\mu = 0.25$ , Resistencia a la compresión:  $f'_m = 12.7$  MPa, Resistencia a la compresión mortero de relleno:  $f'_r = 22.05$  MPa, Módulo de poisson mortero  $\mu = 0.2$



**Figura 4 - Esfuerzos en muro sometido a carga paralela al eje limite lineal**  
Fuente: Elaboración propia

La curva de carga contra desplazamiento en el modelo numérico del muro de mampostería se obtuvo estableciendo el valor del módulo de elasticidad experimental de 9097 MPa hasta que el muro alcanza su máximo desplazamiento lineal, luego de superar el rango lineal se reduce el valor del módulo de elasticidad hasta un 25% con 2274 MPa, por tal razón la curva obtenida tiene una forma bilineal donde el primer tramo representa el comportamiento lineal y proporcional de cargas y en el segundo tramo hace referencia a una idealización del comportamiento no-lineal mediante una pendiente que muestra una tendencia similar de los resultados experimentales, como muestra la Figura 5.

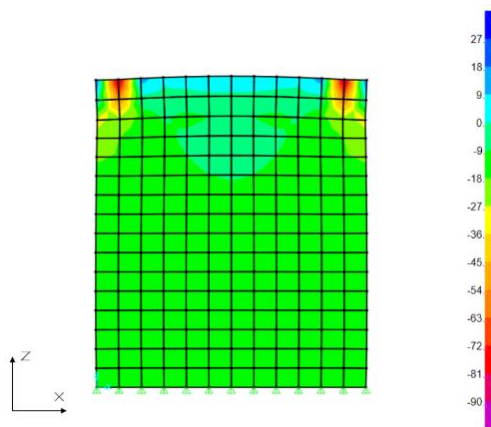


**Figura 5. Gráfica carga versus desplazamiento modelo numérico muro reforzado**

Fuente: Elaboración propia

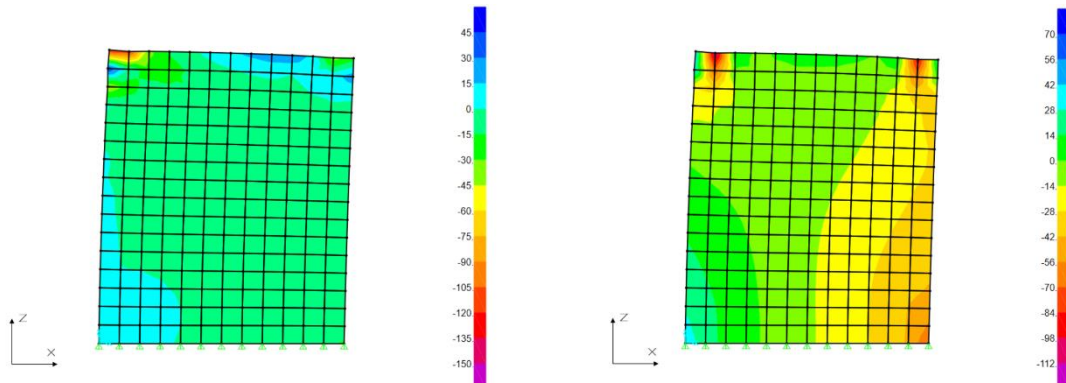
Para analizar el muro de mampostería postensada se aplica una fuerza de presfuerzo vertical en el extremo superior del muro. Esto permite evaluar los esfuerzos generados y las deformaciones en ese punto. Luego, se determina el desplazamiento resultante debido a la carga horizontal aplicada, que es paralela al eje del muro.

En el modelo numérico, se tomaron en cuenta las características mecánicas de los materiales, incluyendo su resistencia máxima a la compresión:  $f_m = 12.7 \text{ N/mm}^2$ , Módulo de la elasticidad de muro de mampostería:  $E_m = 9097.5 \text{ N/mm}^2$ , relación de poisson para el muro de mampostería:  $\nu = 0.25$ , resistencia a la compresión mortero de relleno:  $f_r = 22.05 \text{ N/mm}^2$ , módulo de poisson mortero  $\nu = 0.2$ , Fuerza de presfuerzo en cada barra  $F = 5 \text{ kN}$ .



**Figura 6. Esfuerzos x-x debido a una fuerza de presfuerzo de 5 kN**

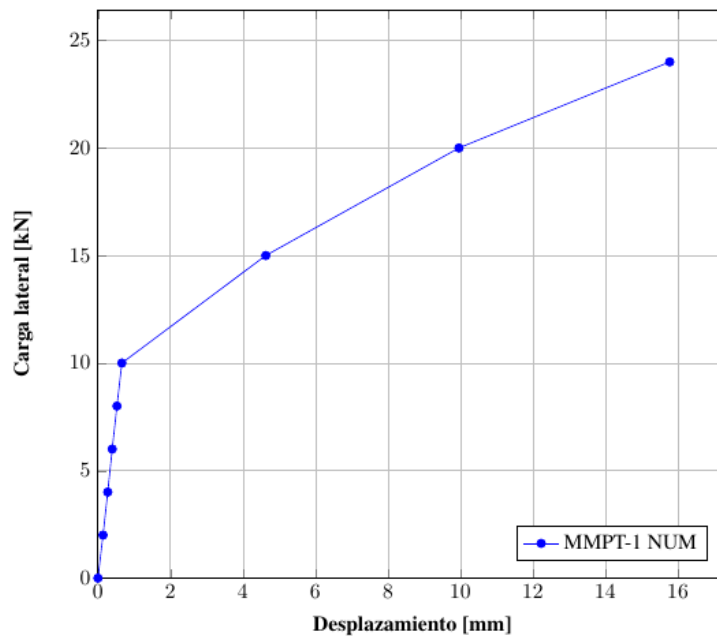
Fuente: Elaboración propia



(a) Esfuerzos x-x (b) Esfuerzos x-x  
**Figura 7. Esfuerzos debido a una carga lateral paralela al plano del muro**

Fuente: Elaboración propia

Para una carga máxima de 24 kN en el muro de mampostería postensado MMPT-1 se obtuvo un desplazamiento en la parte superior de 15.77 mm, como se puede observar en la Figura 7, este valor de carga y desplazamiento es considerablemente mayor a los resultados del muro de mampostería reforzado MMREF-1 en el cual se registro una carga máxima de 4 kN y un desplazamiento de 10.61mm.



**Figura 8. Gráfica carga versus desplazamiento modelo numérico muro postensado**

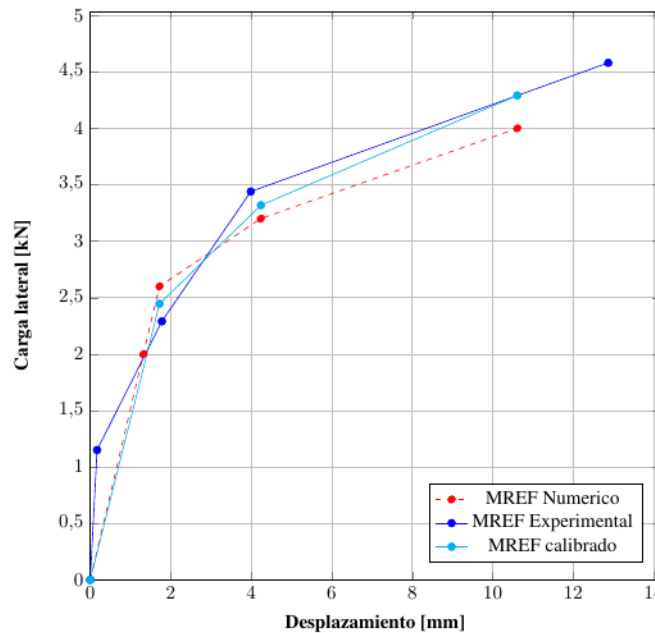
Fuente: Elaboración propia

#### 4. DISCUSIÓN

La gráfica de carga contra desplazamiento de los muros de mampostería en el modelo numérico con el módulo de elasticidad calculado a partir de los ensayos de materiales simples (mortero de relleno, mortero de pega y ladrillos) presenta una diferencia significativa con respecto a los resultados del ensayo experimental de carga monotónica, para que el modelo numérico representa de manera más



cercada la realidad se ajusta el módulo de elasticidad obtenido inicialmente promediando con el valor del ensayo experimental (Choque, 2021). Lo anterior se explica detalladamente en el siguiente párrafo. Después de realizar los ensayos de los materiales, se obtuvo un módulo de elasticidad para la mampostería de 9097.5 N/mm<sup>2</sup> que se empleó en el modelo numérico. Para calibrar el modelo, se estimó el módulo de elasticidad promedio mediante la comparación de la curva de carga lateral versus desplazamiento obtenida numéricamente con los datos experimentales. Los valores del módulo de elasticidad se determinaron como  $E_{m(num)} = 9097.5 \text{ N/mm}^2$  y  $E_{m(exp)} = 8075.6 \text{ N/mm}^2$



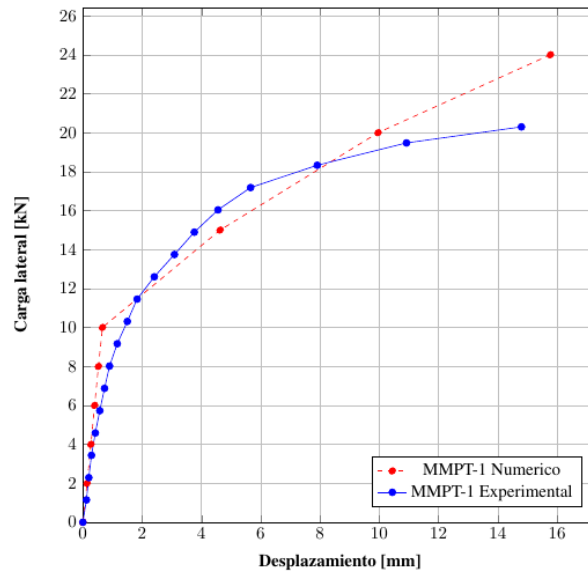
**Figura 9. Contraste de carga lateral contra desplazamiento en MREF-1**  
Fuente: Elaboración propia

$$E_{muro} = \frac{E_{muro(num)} + E_{muro(exp)}}{2} = \frac{9097,5 \text{ MPa} + 8074,6 \text{ MPa}}{2} = 8586,55 \text{ MPa} \quad (1)$$

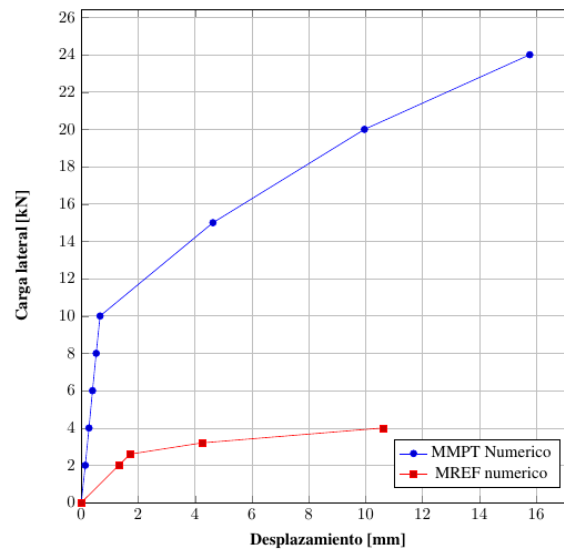
$$E_m = 8586 \text{ MPa}$$

Los datos del modelo numérico se basaron en las propiedades de los materiales que se sometieron a ensayos experimentales, lo que facilitó la determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería y su módulo de elasticidad correspondiente. Es relevante destacar que las muestras de mampostería ensayadas en compresión presentaban celdas completamente llenas, lo que permitió la creación de un modelo homogéneo entre el mortero de relleno y las unidades de mampostería.

En la Figura 8 muestra las curvas de carga-desplazamiento para dos clases de muros: el muro reforzado MREF y el muro postensado MMPT. Se puede apreciar que la ductilidad y la carga máxima del MREF son representativamente menores en comparación con el MMPT. Este contraste se debe al postensado y su sistema autocentrante. El postensado desempeña un papel activo que mejora el comportamiento tanto en el rango elástico como en el inelástico a diferencia de la mampostería simplemente reforzada. Se contrasta el valor de ductilidad que es la relación entre la carga de fluencia y la carga última en los ensayos del muro de mampostería reforzada y el de mampostería postensada.



**Figura 10. Diferencia de curva carga lateral contra desplazamiento en MMPT-1**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 11 - Diferencia de curva carga lateral contra desplazamiento de MMPT-1 y MMREF-1**  
Fuente:Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

El análisis de sensibilidad permitió identificar que no se necesitan una cantidad de elementos finitos superior a 72 elementos, para obtener resultados con una tolerancia aceptable, este condujo a que se pudiera obtener resultados del muro de mampostería postensada de manera eficiente sin un gran consumo computacional, estos datos de la simulación numérica se aproximaron acertadamente a los datos experimentales.

En el gráfico de carga-desplazamiento que representa el muro reforzado MREF y el muro postensado MMPT, se aprecia que la ductilidad y la carga máxima del MREF son considerablemente inferiores a las del MMPT. Esta diferencia se atribuye al postensado y su sistema autocentrante. En contraste con la mampostería simplemente reforzada, el refuerzo postensado opera de manera activa, lo que conduce a un mejor desempeño tanto en el rango elástico como en el inelástico. Esto se compara con el valor de la relación entre la carga de fluencia y la carga última en los ensayos de mampostería reforzada y mampostería postensada.

La mampostería es un sistema tradicional en el que de manera artesanal se unen ladrillos mediante mortero, actualmente su uso ha venido decreciendo siendo reemplazado por sistemas como el concreto reforzado o el acero, debido a su baja ductilidad ante cargas horizontales, pero mediante la implementación de nuevas estrategias de construcción como el postensado que funciona de manera activa se puede mejorar su desempeño, sin embargo es importante validar esto mediante modelos que permitan representar el presfuerzo sobre la mampostería, a través de este trabajo se modeló un muro postensado de mampostería no adherida, esto se comparó con los resultados experimentales

## REFERENCIAS

- Abdellatif, A., Shedid, M., Okail, H., & Abdelrahman, A. (2019). Numerical modeling of reinforced masonry walls under lateral loading at the component level response as opposed to system level response. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 435–451. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.12.003>
- Arturo, E., & Jason, M. (2012). *Out-of-Plane Seismic Performance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted Using Post-Tensioning*. June.
- Bean, B. J. R., & Schultz, A. E. (2003). *Flexural Capacity of Post-Tensioned Masonry Walls: Code Review and Recommended Procedure*. January, 28–44.
- Brzev, S., & Pérez Gavilan, J. J. (2014). *Masonry construction around the world: an Overview*. [https://confinedmasonry.org/wp-content/uploads/2014/06/masonry\\_const\\_around\\_world.pdf](https://confinedmasonry.org/wp-content/uploads/2014/06/masonry_const_around_world.pdf)
- Campbell, J., & Durán, M. (2017). Numerical model for nonlinear analysis of masonry walls. *Revista de La Construcción*, 16(2), 189–201. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.2.189>
- Choque, B. (2021). *Comportamiento estructural de muros en mampostería postensada en bloque de arcilla*. Universidad Nacional de Colombia.
- Freddi, F., & Royer-Carfagni, G. (2011). Variational fracture mechanics to model compressive splitting of masonry-like materials. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 2(2–4), 57–67. <https://doi.org/10.1007/s12356-011-0018-4>
- Lourenço, P. B. (1996). Computational strategies for masonry structures. In *PhD Thesis*. <https://doi.org/ISBN 90-407-1221-2>
- Lourenço, P. B., Milani, G., Tralli, A., & Zucchini, A. (2007). Analysis of masonry structures: Review of and recent trends in homogenization techniques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(11), 1443–1457. <https://doi.org/10.1139/L07-097>

- Lourenço, P. B., & Silva, L. C. (2020). COMPUTATIONAL APPLICATIONS IN MASONRY STRUCTURES: FROM THE MESO-SCALE TO THE SUPER-LARGE/SUPER-COMPLEX. In *International Journal for Multiscale Computational Engineering* (Vol. 18, Issue 1, pp. 1–30). [www.begellhouse.com](http://www.begellhouse.com)
- Marques, R., Pereira, J. M., & Lourenço, P. B. (2020). Lateral in-plane seismic response of confined masonry walls: From numerical to backbone models. *Engineering Structures*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111098>
- Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., & Gouveia, J. (2013a). Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls. *Construction and Building Materials*, 41, 968–976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.013>
- Medeiros, P., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., & Gouveia, J. (2013b). Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls. *Construction and Building Materials*, 41, 968–976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.013>
- Mera Tapia, C. (2015). *Comparación técnica y económica entre edificaciones de baja altura de mampostería reforzada y estructuras en base de pórticos de homigón armado*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Mojsilovic, N., & Marti, P. (2000). *Load Tests on Post-Tensioned Masonry Walls*. July, 65–70.
- Obaidat, A. T., Abo El Ezz, A., & Galal, K. (2017). Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements. *Engineering Structures*, 132, 562–575. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.043>
- Ryu, D., Anil C., W., ElGawady, M. A., & M.ASCE. (2014). Effects of Tendon Spacing on In-Plane Behavior of Posttensioned Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering*, 140(4), 13.
- SAS IP. (2017). *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference.pdf*.
- Shadlou, M., Ahmadi, E., & Kashani, M. M. (2020). Micromechanical modelling of mortar joints and brick-mortar interfaces in masonry Structures: A review of recent developments. In *Structures* (Vol. 23, pp. 831–844). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.12.017>
- Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž., & Munjiza, A. (2017). Numerical model for confined masonry structures based on finite discrete element method. *International Journal for Engineering Modelling*, 30(1–4), 19–35.
- Wight, G. D. (2006). *Seismic performance of a post-tensioned concrete masonry wall system*. 1994. <http://hdl.handle.net/2292/362>
- Zalamea, E. (2012). Mampostería Post-tensada. Una alternativa constructiva para Ecuador y regiones sísmicas Post tensioned masonry. A way to build in Ecuador and seismic regions. *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles RIOCI*, 1, 38–59.
- Zucchini, A., & Lourenço, P. B. (2009). A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls. *International Journal of Solids and Structures*, 46(3–4), 871–886. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.09.034>