

# Un modelo para evaluar el comportamiento de pilas de mampostería no reforzada sometidas a cargas de compresión axial

Nelson D. Agüera & Miguel E. Tornello & Carlos D. Frau<sup>1</sup>

## Resumen

Muchas construcciones históricas emplazadas en regiones sísmicas poseen como estructura principal muros de mampostería no reforzada con espesores significativos. Trabajos de investigación orientados a evaluar las respuestas estructurales de dichas construcciones desestiman los espesores de los muros en la respuesta estructural de la construcción. El presente trabajo estudia la influencia del espesor del muro bajo cargas de compresión en pilas de mampostería no reforzada. Los espesores de muros ensayados corresponden a los efectivamente encontrados en las construcciones históricas emplazadas en la provincia de Mendoza, Argentina, las cuales aún se encuentran en servicio a pesar de no contar con una estructura sismorresistente que responda a los reglamentos actuales de diseño. Las pilas ensayadas se construyeron utilizando mampuestos y morteros con características similares a los encontrados en los edificios históricos con el objeto de correlacionar la respuesta analítica con la determinada a través de ensayos de laboratorio. Se realizaron predicciones de carga última a partir de una modelación numérica de elementos finitos en el código Abaqus que contempla el comportamiento plástico de los mampuestos y del mortero. Se realizó una calibración de los valores obtenidos en los ensayos con los que arrojan los modelos numéricos. Los resultados encontrados muestran que los modos de falla son dependientes de la posición de las juntas verticales de los muros y que la variación lineal de los espesores de los muros no se corresponde con una variación lineal de la carga última determinada.

Palabras claves: mampostería, ensayos, estructura.

---

<sup>1</sup> CEREDETEC, F. R. Mendoza, UTN. Email: [naguera@frm.utn.edu.ar](mailto:naguera@frm.utn.edu.ar)

## **Introducción**

En los últimos años, la mayoría de los autores destacan la modelación como método fundamental de carácter teórico. La modelación se considera un poderoso recurso auxiliar de la búsqueda teórica; ella permite caracterizar el fenómeno que se estudia en forma de imágenes visuales, de esquemas, de diseños. En algunos casos se llega a la descripción en término de fórmulas matemáticas, símbolos, matrices.

En particular se traza como objetivo estudiar la incidencia de la respuesta a compresión de la mampostería no reforzada en función de la variación de los espesores de muros. Se propone la construcción en laboratorio de pilas de mampostería para luego ser ensayadas hasta su rotura. Con las mismas condiciones de borde de los ensayos se realizan análisis numéricos de cada pila, los cuales son comparados con los resultados experimentales.

## **Características de las pilas de mampostería fabricadas en laboratorio**

En el laboratorio se fabricaron 3 pilas de mampostería, cada pila responde a un espesor diferente, manteniendo las otras dos dimensiones geométricas iguales para todos los especímenes.

En la Tabla 1 se indican las características geométricas de las pilas de mampostería.

Tabla 1: Características geométricas de las pilas de ladrillos y morteros

ID	Largo (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)	Foto
PL140	285	140	450	
PL290	285	285	450	
PL450	285	430	450	

Los ladrillos son cerámicos macizos de dimensiones 290mm x 140mm x 70mm.

Los morteros poseen un espesor promedio de 20mm y fueron elaborados con una dosificación en volumen con las siguientes proporciones:

- 1 Cemento
- 7 Arena
- 2 Cal Aérea Común

En la Figura 1 se observa la preparación de 3 probetas de mortero bajo Norma CIRSOC. Las dimensiones de cada probeta son de 70mm x 70mm x 70mm.



Figura 1: Probetas de Mortero

Para conocer el comportamiento mecánico de los ladrillos y morteros se evalúan los mismos a través de ensayos destructivos en laboratorio. En la Figura 2 se observa el ensayo a compresión de las probetas de mortero.

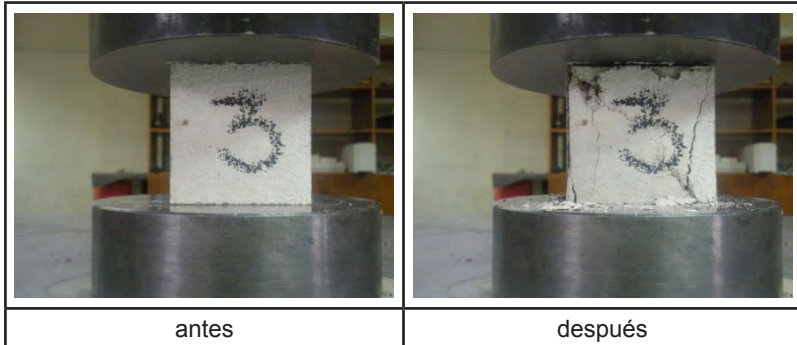


Figura 2: Ensayo a Compresión de morteros

En la Figura 3 se observa el ensayo a compresión de los ladrillos cerámicos macizos.

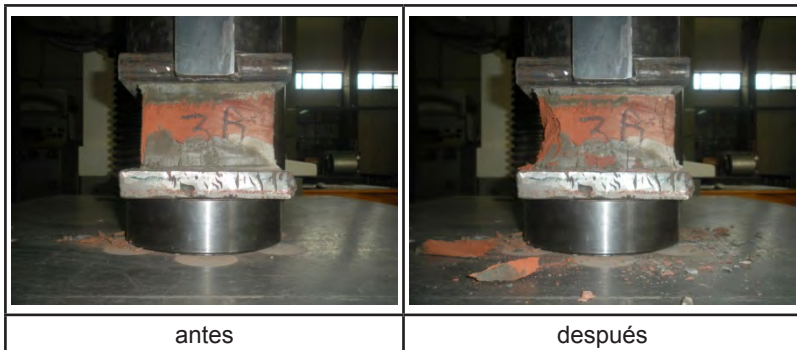


Figura 3: Ensayo a Compresión de ladrillos cerámicos macizos

En la Tabla 2 y Tabla 3 se indican los resultados obtenidos del ensayo a compresión para los morteros y para los ladrillos cerámicos macizos respectivamente.

Tabla 2: Resultados Ensayo a Compresión Morteros

ID	Fc [N]	Rc [MPa]	Promedio Rc [MPa]	Dispersión Rc
MC701	22900	4.67	4.56	0.12
MC702	21700	4.43		
MC703	22370	4.57		

Tabla 3: Resultados Ensayo a Compresión Ladrillos Cerámicos Macizo

ID	Fc [N]	$\sigma_{pk}^{\epsilon}$ [MPa]	Dispersión	$\sigma_{pk}^{\epsilon}$
<b>L1 - 1A</b>	211700	9.26	0.32	5.06
<b>L2 - 1B</b>	109200			
<b>L3 - 2A</b>	86200			
<b>L4 - 2B</b>	87000			
<b>L5 - 3A</b>	109000			
<b>L6 - 3B</b>	128700			
<b>L7 - 4A</b>	174000			
<b>L8 - 4B</b>	177700			
<b>L9 - 5A</b>	151500			
<b>L10 - 5B</b>	99000			

En la Figura 4 se observa la etapa final de construcción de las pilas de mampostería en el laboratorio.



Figura 4: Pilas de Mampostería en Laboratorio

### **Modelo Numérico**

En el programa computacional Abaqus se presenta el modelo de elementos finitos de las pilas de mampostería. Este modelo de elementos finitos tiene en cuenta los materiales componentes de las pilas y su interacción entre ellos. En la Figura 5 se observa el modelo realizado en el programa Abaqus.

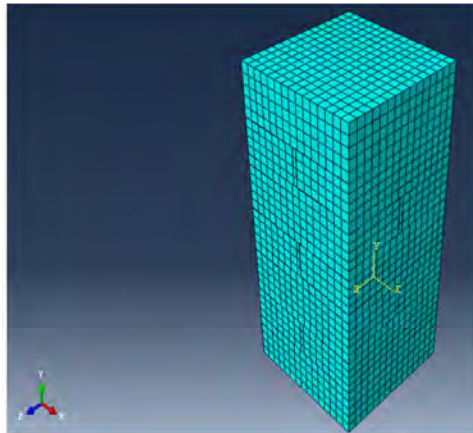


Figura 5: Modelo de elementos finitos de la pila de mampostería

La formulación matemática de las relaciones tensiones-deformaciones se realiza a través de modelos de plasticidad, en el presente trabajo se utiliza el modelo de plasticidad denominado CDP (Concrete Damaged Plasticity).

### **Modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP)**

El modelo tiene una buena capacidad para modelar hormigón y otros materiales cuasi-frágiles en todos los tipos de estructuras. Utiliza conceptos de elasticidad de daño isotrópica en combinación con la tracción isotrópica y plasticidad compresiva para representar el comportamiento inelástico de hormigón. El modelo tiene en cuenta la degradación de la rigidez elástica inducida por el esfuerzo plástico tanto en tracción como en compresión y explica adecuadamente los efectos de recuperación de rigidez bajo carga cíclica.

### **Respuesta a Compresión en el modelo numérico**

Es necesario definir el comportamiento en el plano de tensión-deformación del material en compresión uniaxial fuera del rango elástico. Los datos de tensiones de compresión se presentan como una función de la deformación inelástica y la curva de tensión-deformación puede ser definida más allá de la tensión última, en el régimen de deformación de ablandamiento. Los datos de endurecimiento pueden expresarse en función de una deformación inelástica, en lugar de la deformación plástica. La deformación inelástica de compresión se define como la deformación total menos la deformación elástica correspondiente al material no dañado (Abaqus, 2003).

El programa Abaqus convierte automáticamente los valores de deformación inelástica a los valores de deformación plástica mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - dc)} \frac{\sigma_c}{E_0}$$

Donde:

$\varepsilon^{pl}$  = deformación plástica

$\varepsilon^{in}$  = deformación inelástica

$d_c$  = variable de degradación de rigidez

$E_0$  = módulo elasticidad inicial

$\sigma_c$  = tensión de compresión

La tensión efectiva se define como:

$$\bar{\sigma}_0 = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$$

Donde:

$D_0^{el}$  = matriz de elasticidad (no dañada) inicial

La función potencial de flujo plástico y la superficie de fluencia hace uso de dos invariantes de tensión del tensor tensiones efectivas, es decir, la tensión de presión hidrostática (ecuación 3) y la tensión efectiva equivalente de Mises (ecuación 4):

$$\bar{p} = - \frac{1}{3} \text{trace} (\bar{\sigma})$$

$$\bar{q} = - \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{s} : \bar{s})}$$

Donde  $\bar{s}$  tensión efectiva desviatoria, definida como:

$$\bar{s} = \bar{\sigma} + p\bar{l}$$



## Resultados

En la Tabla 4 se resumen los valores obtenidos de los ensayos a compresión en las pilas de mampostería.

Tabla 4: Resultados obtenidos de los ensayos a compresión en pilas

ID	Peso kg	Vol m <sup>3</sup>	Peso Específico kg/m <sup>3</sup>	Carga Máx. KN	Def. En Carga Máx. mm	Tensión Máxima MPa	Def. Espec. en Tensión Máxima mm/mm	Carga Máx. / Peso "CMP"	Carga Máx. / Vol. "CMV"
PL140	28.48	0.02	1586	397	3.43	9.97	0.0076	14	22
PL290	60.80	0.04	1663	596	4.22	7.34	0.0094	10	16
PL450	92.40	0.06	1675	664	4.00	5.42	0.0089	7	12

Siendo:

- "CMP": Carga máxima obtenida dividido el peso de la pila.
- "CMV": Carga máxima obtenida dividido el volumen de la pila.

En la Figura 6 se observan las curvas de tensión-deformación de las pilas de mampostería ensayadas en el laboratorio.

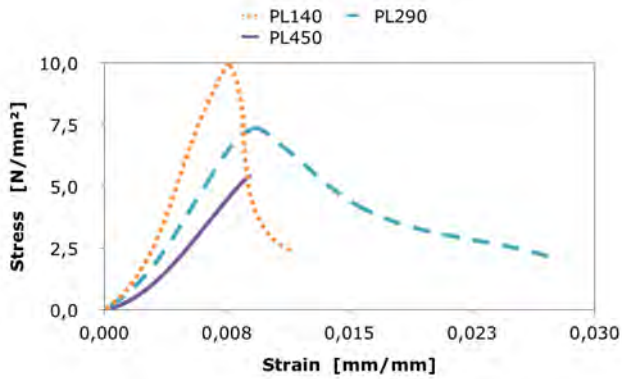


Figura 6: Curva Tensión Deformación Específica de las pilas

En las Figuras 7, 8 y 9 se observan las curvas comparativas entre los ensayos experimentales en laboratorio y los análisis numéricos.

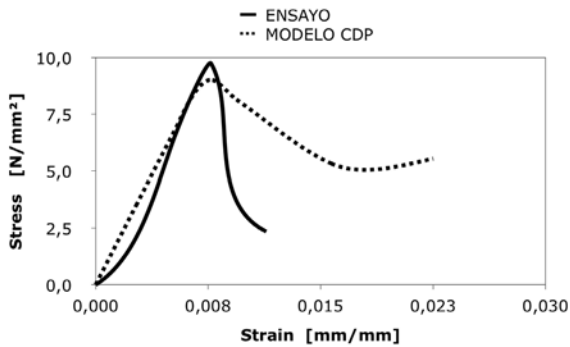


Figura 7: Tensión-Deformación Pila de Mampostería PL140

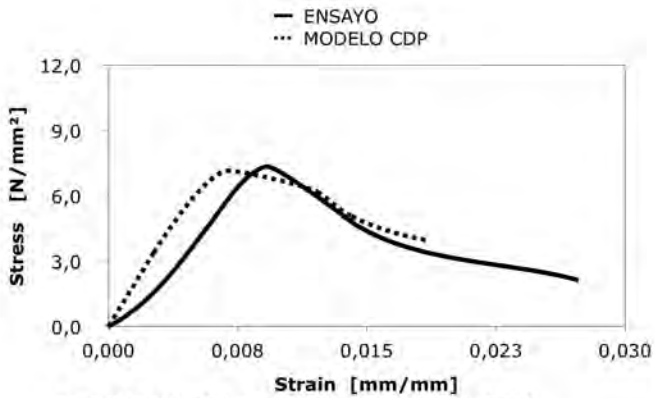


Figura 8: Tensión-Deformación Pila de Mampostería PL290.

Figura 8: Tensión-Deformación Pila de Mampostería PL290

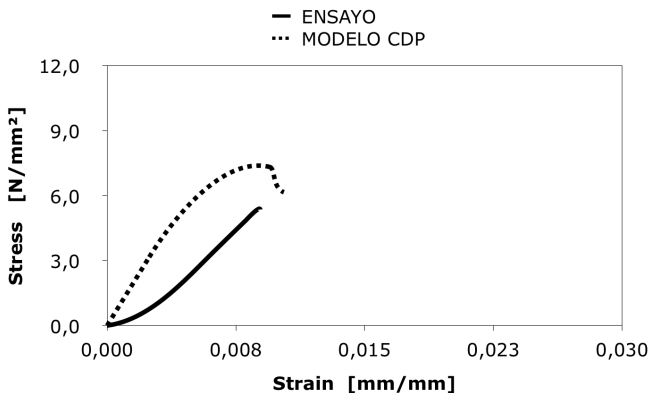


Figura 9: Tensión-Deformación Pila de Mampostería PL450

## Conclusiones

En función de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y de los análisis numéricos concluimos que un aumento lineal del espesor de las pilas de mampostería no corresponde con un aumento lineal en la capacidad última. Que la presencia de mayor volumen de mortero en las juntas verticales produciría una reducción en la carga última. El análisis numérico tiende a captar con cierta precisión los ensayos experimentales, aunque para la pila de espesor mayor el modelo numérico se aleja del ensayo experimental. El aumento del volumen de mortero en las juntas de las pilas de mampostería tiende a disminuir la capacidad axial de las mismas, y los análisis numéricos tradicionales tienen dificultades para reflejar estos fenómenos.

## Bibliografía

- ABAQUS 6.4-1. *Theory Manual*. Hibbit, Karlson and Sorenson, Inc.: Pawtucket, U.S.A., 2003.
- ANTHOINE A, MAGONETTE G, MAGENES G. Shear-compression testing and analysis of brick masonry wall. In *Proceedings of 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering 3*, Dumas G (ed). Balkema: Rotterdam, 1995; 1657-1662.
- AREF A.J., et al. A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures. *Computers and Structures*, Vol. 120, pp. 9-23, 2013.
- ATKINSON, R.H., AMADEI, B.P., SAEB, S., STURE, S. – Response of masonry bed joints in direct shear, *Journal of Structural Engineering*, 115 (9), 2277-2296, 1989.
- KARAPITTA L., et al. Explicit finite-element analysis for the in-plane cyclic behaviour of unreinforced masonry structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, pp. 175-193, 2010.
- LOURENCO, P. B., J. G. ROTS, J. BLAAUWENDRAAD. Two Approaches for the Analysis of Masonry Structures: Micro-and Macro-Modeling, *Heron*, Vol. 40, No. 4, 1995, pp. 313-340.

- LOURENÇO P. Computational strategies for masonry structures. *Thesis Delft University of Technology*. Delft University Press, (1996).
- LOURENÇO P. et al. Shear testing of stack bonded masonry. *Construction and Building Materials*. Vol. 18, Issue 2, pp. 125-132, 2004.
- LOURENÇO PB, MILANI G, TRALLI A, ZUCCHINI A (2007) Analysis of masonry structures: review of and recent trends of homogenization techniques. *Can J Civil Eng* 34:1443–1457.
- MAGENES, G. Seismic behavior of brick masonry: strength and failure mechanisms, *PhD Thesis, Department of Structural Mechanics*, University of Pavia, 1992.
- MASE G. E., *Theory and Problems of Continuum Mechanics*. Ed. McGraw-Hill Mexico, 247pp., 1977.
- PAGE, A. W., A Biaxial Failure Criterion for Brick Masonry in the Tension-Tension Range, *Int. Journal Masonry Constr.*, 1980, 1 (1), pp. 26-29.
- PAGE, A. W., An Experimental Investigation of the Biaxial Strength of Brick Masonry, *Proc. Sixth Int. Brick Masonry Conf.*, Rome, 1982, pp. 3-15.