

MAMPOSTERIA NO REFORZADA BAJO CARGA AXIAL Y HORIZONTAL CON DESPLAZAMIENTO CONTROLADO

Nelson D. Agüera^a, Miguel E. Tornello^a, Carlos D. Frau^a

^a*Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina (5500).naguera@frm.utn.edu.ar*

Palabras Claves: Modelos de Plasticidad, Mampostería no Reforzada, Capacidad Estructural.

Resumen. Para conocer con cierta precisión la respuesta estructural de construcciones cuya estructura principal es la mampostería no reforzada, es necesario realizar ensayos destructivos y no destructivos para determinar sus características mecánicas y elásticas. Otros procedimientos, tales como el estudio de la mampostería a través de modelos de elementos finitos, podrían predecir con suficiente aproximación la respuesta de la estructura ante distintas acciones. El objetivo del trabajo es evaluar el comportamiento de muretes de mampostería no reforzada bajo carga axial y horizontal con desplazamiento controlado utilizando el método de los elementos finitos. Se realiza una micro-modelación de elementos homogéneos continuos, se definen leyes constitutivas de los materiales, ladrillos y morteros, en función de dos modelos constitutivos de plasticidad y daño, utilizando el algoritmo del programa Abaqus. Se presentan los resultados del análisis para un murete de mampostería no reforzada, solicitado a cargas axiales y horizontales. Se obtuvieron respuestas de los modelos de muretes en términos de carga versus desplazamiento para diferentes modelos constitutivos y para diferentes espesores. Los dos modelos constitutivos utilizados arrojan resultados similares, particularmente en las formas de las curvas de respuesta, sin embargo los valores de capacidades últimas presentan variaciones promedios del 30%.

1 INTRODUCCIÓN

Se utilizan diferentes alternativas para la predicción del comportamiento estructural de la mampostería no reforzada. Una de ellas es la construcción de especímenes de mampostería a escala natural, para ser ensayados en laboratorio (Lourenço P. et al., 2007). Otra forma de evaluar el comportamiento estructural es a través de simulaciones numéricas computacionales, considerando el comportamiento no lineal de los materiales componentes del muro de mampostería y la interacción entre ellos a partir de una combinación de cargas ficticias (Akhavessy A.H., 2011; Annecchiarico F. et al., 2009; Karapitta L. et al., 2010; Lourenço P., 1996; Lourenço P. et al., 2007; Lourenço P. et al., 2004; Giordano A. et al., 2002). En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos de una simulación numérica de un murete de mampostería utilizando dos criterios de plasticidad diferentes, conociendo a priori el comportamiento mecánico de los materiales que componen los muros de mampostería no reforzada.

Se utiliza el código comercial ABAQUS (Abaqus, 2003) como programa de elementos finitos para la simulación numérica de los muretes de mampostería no reforzada.

2 DESCRIPCIÓN DE LA TEORÍA DE PLASTICIDAD

En particular, las deformaciones irreversibles que resultan de mecanismos de deslizamiento, o de dislocaciones a una escala atómica, y que por lo tanto conducen a cambios dimensionales permanentes, son conocidas como deformaciones plásticas. Tales deformaciones únicamente tienen lugar a intensidades de tensión por encima de un cierto valor umbral conocido como límite elástico o tensión de fluencia. En la teoría de la plasticidad, la cuestión fundamental consiste en la formulación matemática de las relaciones tensión-deformación adecuadas para la descripción fenomenológica de las deformaciones plásticas, y en la adopción de un criterio de fluencia apropiado para predecir el comienzo del comportamiento plástico (Mase G. E., 1977).

2.1 Modelo Drucker-Prager

El modelo describe una familia de modelos de plasticidad en el comportamiento de los materiales donde la fluencia de los mismos depende de la tensión de compresión equivalente. Es utilizado para modelar materiales friccionales, donde la resistencia de fluencia a la compresión es mayor que la de tracción, permitiendo que el material tenga un endurecimiento y ablandamiento isótropo. Los criterios de fluencia para esta clase de modelos se basan en la forma de la superficie de fluencia en el plano meridional. La superficie de fluencia puede tener una forma lineal, una forma hiperbólica, o una forma exponencial (Abaqus, 2003).

La evolución de la superficie de fluencia con deformación plástica se describe en términos de la tensión equivalente, que puede ser elegida como cualquiera de las siguientes: tensión de fluencia a compresión uniaxial, tensión de fluencia a tracción uniaxial, o tensión de fluencia al corte (cohesión).

La superficie de tensión de fluencia hace uso de dos invariantes, definido como la tensión de presión equivalente:

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

Siendo “trace” la traza de la matriz. La tensión equivalente de Mises es:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}(S : S)} \quad (2)$$

Donde “S” es definido como el tensor desviatorio:

$$S = \sigma + pI \quad (3)$$

Siendo “ σ ” la matriz de tensiones y “ p ” la tensión de presión equivalente.

Además, el modelo lineal también utiliza el tercer invariante de tensión desviatoria.

$$r = \left(\frac{9}{2} S.S : S\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

En la cual “ r ” es el determinante del tensor desviatorio “S”.

2.2 Modelo Concrete Damaged Plasticity

El modelo presenta una muy buena capacidad para modelar hormigón y otros materiales cuasi-frágiles en todos los tipos de estructuras. Este modelo 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. También explica los efectos de recuperación de rigidez bajo carga cíclica.

2.2.1 Definición del comportamiento a compresión

Se puede 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. 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 se dan en términos 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 de elementos finitos Abaqus convierte automáticamente los valores de deformación inelástica a los valores de deformación plástica mediante la relación:

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5)$$

Donde:

ε_c^{pl} = deformación plástica.

ε^{in} = deformación inelástica.

d_c = variable de degradación de rigidez.

E_0 = módulo elasticidad inicial.

σ_c = tensión de compresión.

La tensión efectiva es definida como:

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (6)$$

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 de tensiones efectivas, es decir, la tensión de presión hidrostática:

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\sigma}) \quad (7)$$

Y la tensión efectiva equivalente de Mises:

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{S} : \bar{S})} \quad (8)$$

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

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I \quad (9)$$

3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

Los modelos estudiados en el presente trabajo son muretes de mampostería no reforzada. Las características de los mismos para espesor de 45cm puede observarse en la (Figura 1).

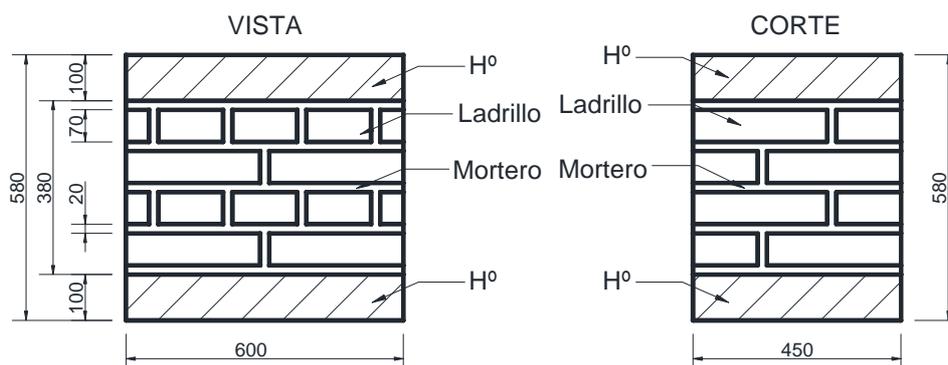


Figura 1: Esquema de murete de mampostería (medidas en "mm")

Los muretes están formados por elementos de ladrillo cerámico macizo (Figura 2), unidos entre sí por un mortero combinado de cemento y cal, el mortero posee un espesor promedio de 20mm.

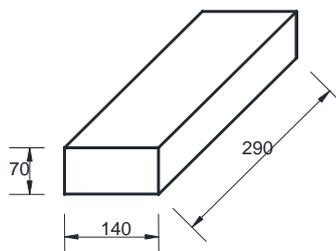


Figura 2: Ladrillos cerámicos macizos utilizados en los muretes (medidas en "mm")

3.1 Modelo de elementos finitos utilizado en ABAQUS

Para la modelación se utilizaron elementos sólidos deformables en tres dimensiones, denominados elementos C3D8R. Es un elemento estándar de ABAQUS para estos problemas, con 8 nodos de contacto, integración reducida y control de hourglass. Se utilizaron elementos de interacción para simular las juntas de contacto entre los mampuestos de ladrillo y el mortero. Los contactos entre superficies se definieron con la opción de ABAQUS "surface-surface", especificando superficies maestras (master) y esclavas (slave), las cuales tienen la característica que la superficie maestra no puede ser penetrada por la superficie esclava. La interacción de las superficies fue definida para un comportamiento longitudinal y transversal, para el primero se especificó un comportamiento de contacto rígido o duro (Hard Contact), y para el segundo se especificó un comportamiento friccional con penalización de fricción según el coeficiente de fricción definido. En la Figura 3 se observa el modelo de elementos finitos utilizado.

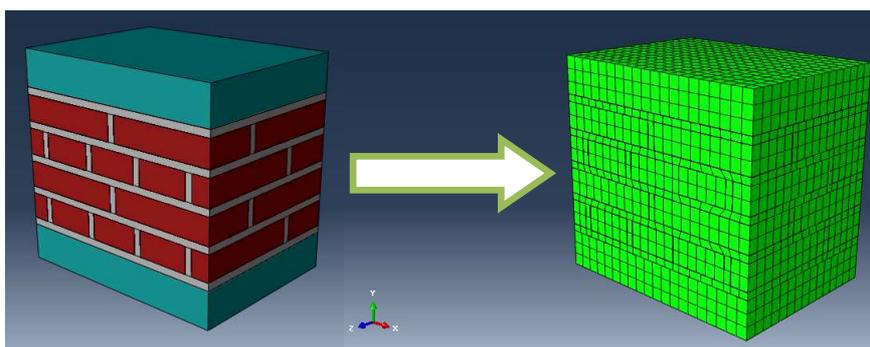


Figura 3: Modelo de elementos finitos utilizados en la plataforma ABAQUS

3.2 Especificaciones de los materiales utilizados

Las características de los materiales utilizados para la modelación, ladrillos y morteros, fueron obtenidos del laboratorio de ensayos de materiales del Departamento de Ingeniería Civil UTN-FRM (Martín P. E. et al., 2012).

3.3 Modelo Drucker-Prager en ABAQUS

Para el material Ladrillo se definieron los valores que se detallan en las Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Mass Density (Densidad de Masa)	E (módulo de elasticidad)	Coef. Poisson (coeficiente de poisson)
0.00143 x E-05	2170 x E-04	0.155

Tabla 1: Características elásticas del ladrillo. (kN-mm)

Angle of friction (ángulo de fricción)	Init Tension (tracción inicial)	Dilation Angle (ángulo de dilatación)
15.5	26 x E-04	7

Tabla 2: Características Drucker-Prager del ladrillo. Criterio de Corte Hiperbólico. (kN-mm)

Yield Stress (tensión de fluencia)	Abs Plastic Strain (deformación plástica)
51.67 x E-04	0
56.37 x E-04	0.001169
61.07 x E-04	0.003095
65.77 x E-04	0.005325
70.46 x E-04	0.009827
71.4 x E-04	0.017576
7.14 x E-04	0.2

Tabla 3: Características no lineales del ladrillo. Endurecimiento por Compresión. (kN-mm)

Para el material Mortero se definieron los valores que se detallan en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

Mass Density (Densidad de Masa)	E (módulo de elasticidad)	Coef. Poisson (coeficiente de poisson)
0.0024 x E-05	7760 x E-04	0.21

Tabla 4: Características elásticas del mortero. (kN-mm)

Angle of friction (ángulo de fricción)	Init Tension (tracción inicial)	Dilation Angle (ángulo de dilatación)
15.5	6 x E-04	7

Tabla 5: Características Drucker-Prager del mortero. Criterio de Corte Hiperbólico. (kN-mm)

Yield Stress (tensión de fluencia)	Abs Plastic Strain (deformación plástica)
50.02 x E-04	0
60.02 x E-04	0.001776
66.02 x E-04	0.003619
6.602 x E-04	0.2

Tabla 6: Características no lineales del mortero. Endurecimiento por Compresión. (kN-mm)

3.4 Modelo Concrete Damaged Plasticity en ABAQUS

Para el material Ladrillo se definieron los valores que se detallan en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9.

Mass Density (Densidad de Masa)	E (módulo de elasticidad)	Coef. Poisson (coeficiente de poisson)
0.00143 x E-05	2170 x E-04	0.155

Tabla 7: Características elásticas del ladrillo. (kN-mm)

Dilation Angle (ángulo de dilatación)	Eccentricity (excentricidad)	fb0/fc0	k	Viscosity Parameter (parámetro de viscosidad)
7	0.1	1.16	0.66	0.0005

Tabla 8: Características Concrete Damaged Plasticity del ladrillo. (kN-mm)

Comportamiento a Compresión		Comportamiento a Tracción	
Yield Stress (tensión de fluencia)	Inelastic Strain (deformación inelástica)	Yield Stress (tensión de fluencia)	Cracking Strain (deformación de agrietamiento)
51.67 x E-04	0	26.1 x E-04	0
56.37 x E-04	0.001169	-	-
61.07 x E-04	0.003095	-	-
65.77 x E-04	0.005325	-	-
70.46 x E-04	0.009827	-	-
71.4 x E-04	0.017576	-	-
7.14 x E-04	0.2	-	-

Tabla 9: Características no lineales del ladrillo. (kN-mm)

Para el material Mortero se definieron los valores que se detallan en las Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12.

Mass Density (Densidad de Masa)	E (módulo de elasticidad)	Coef. Poisson (coeficiente de poisson)
0.0024 x E-05	7760 x E-04	0.21

Tabla 10: Características elásticas del mortero. (kN-mm)

Dilation Angle (ángulo de dilatación)	Eccentricity (excentricidad)	fb0/fc0	k	Viscosity Parameter (parámetro de viscosidad)
7	0.1	1.16	0.66	0.0005

Tabla 11: Características Concrete Damaged Plasticity del mortero. (kN-mm)

Comportamiento a Compresión		Comportamiento a Tracción	
Yield Stress (tensión de fluencia)	Inelastic Strain (deformación inelástica)	Yield Stress (tensión de fluencia)	Cracking Strain (deformación de agrietamiento)
50.02 x E-04	0	6.602 x E-04	0
60.02 x E-04	0.001776	0.6602 x E-04	0.2
66.02 x E-04	0.003619	-	-
6.602 x E-04	0.2	-	-

Tabla 12: Características no lineales del mortero. (kN-mm)

3.5 Condiciones de borde en la simulación numérica

El modelo de elementos finitos fue restringido en la parte inferior del murete de mampostería, en coincidencia con la plataforma de hormigón, en las tres direcciones posibles de desplazamientos. Al modelo se le asignaron dos pasos de carga, en el primer paso se le aplicó una precompresión constante, en coincidencia con el eje vertical o gravitacional del murete de mampostería, los valores de precompresión se fijaron en tres niveles: $p=1\text{MPa}$, $p=0.5\text{MPa}$ y $p=0.1\text{MPa}$. El segundo paso fue aplicar un desplazamiento horizontal de 20mm manteniendo el valor de la precompresión. (Figura 4).

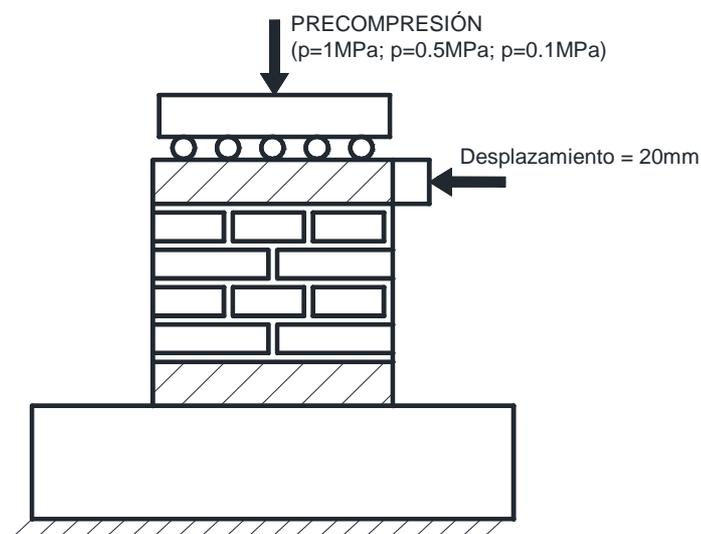


Figura 4: Condiciones de borde y esquema de carga en el murete de mampostería

4 RESULTADOS

Se obtuvieron para cada tipo de material, para cada valor de precompresión y para un desplazamiento de 20mm, curvas de fuerza versus desplazamiento en el plano del murete.

Se indican los resultados para el caso del murete de espesor 45cm. En la Figura 5 y Figura 6 se observan las diferentes curvas de fuerza versus desplazamiento, para ambos modelos de materiales y para la terna de precompresiones asignadas.

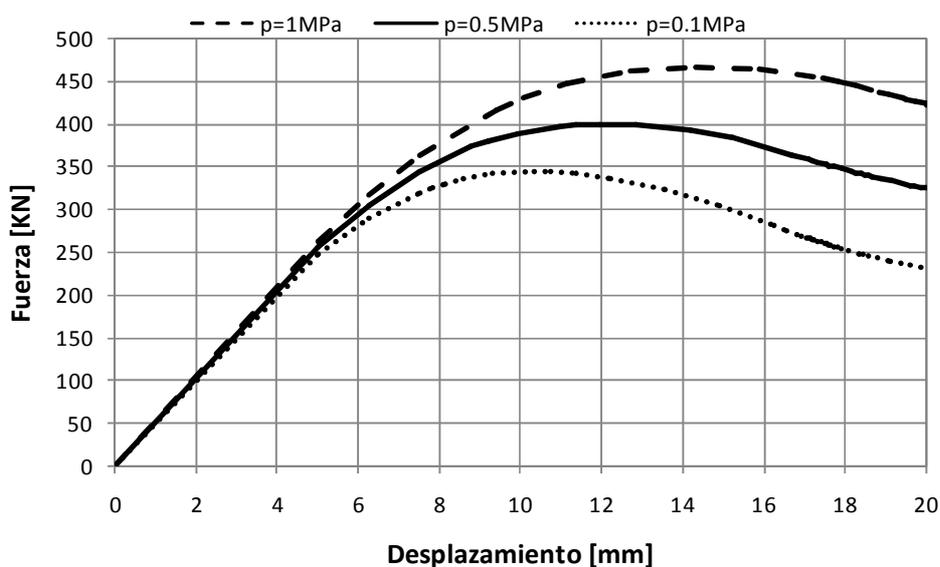


Figura 5: Curvas fuerza versus desplazamiento. Modelo Drucker-Prager. (p=1MPa, p=0.5MPa y p=0.1MPa)

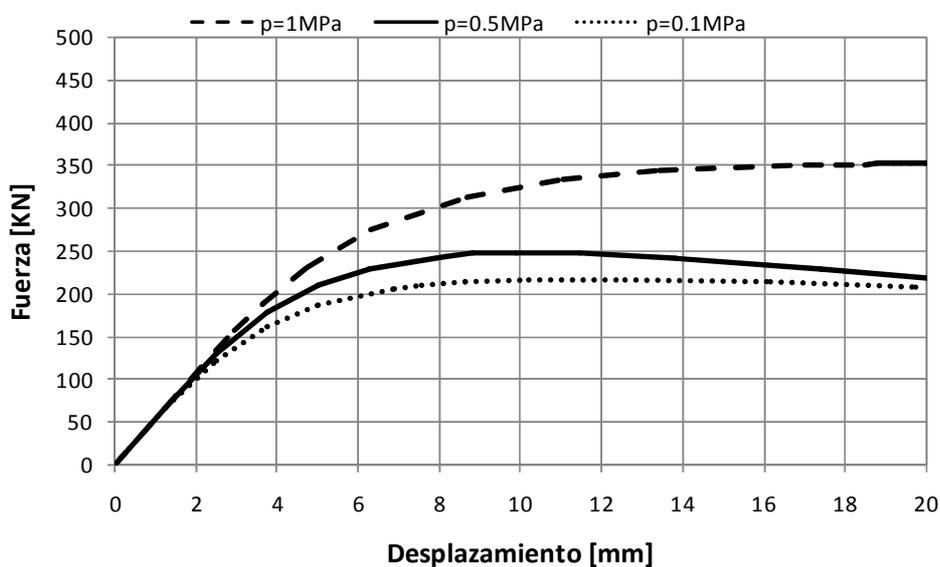


Figura 6: Curvas fuerza versus desplazamiento. Modelo Concrete Damaged Plasticity. (p=1MPa, p=0.5MPa y p=0.1MPa)

Se puede observar la distribución de tensiones cortantes, para el modelo de Drucker-Prager, con un valor de precompresión p=1MPa. (Figura 7)

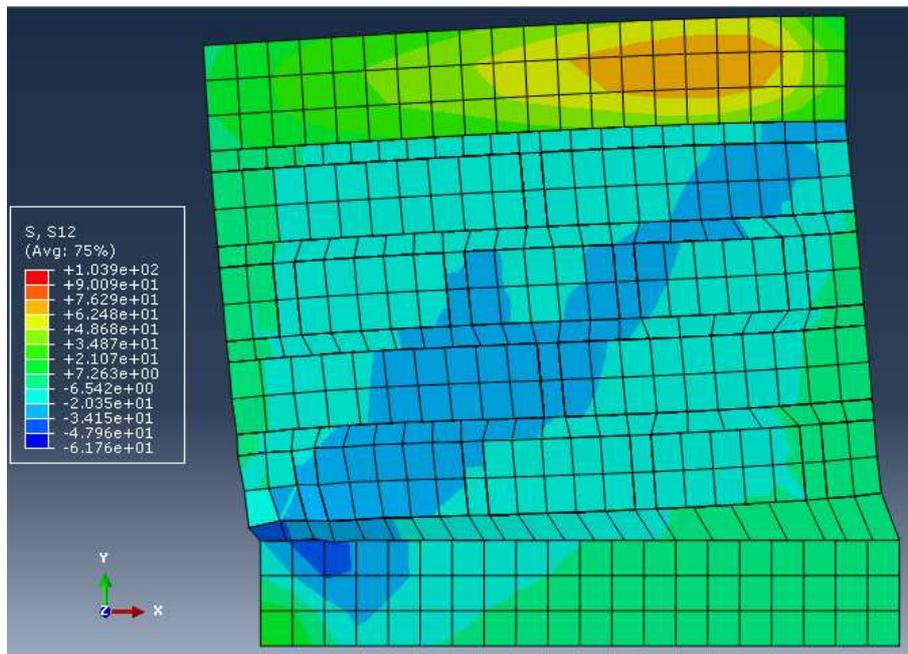


Figura 7: Estado de tensiones cortantes. Modelo Drucker-Prager, $p=1\text{MPa}$. ($\text{MPa} \times \text{E}-01$)

En la Figura 8 se observa el mapeo de tensiones plásticas, para el modelo de Drucker-Prager, con un valor de precompresión $p=1\text{MPa}$.

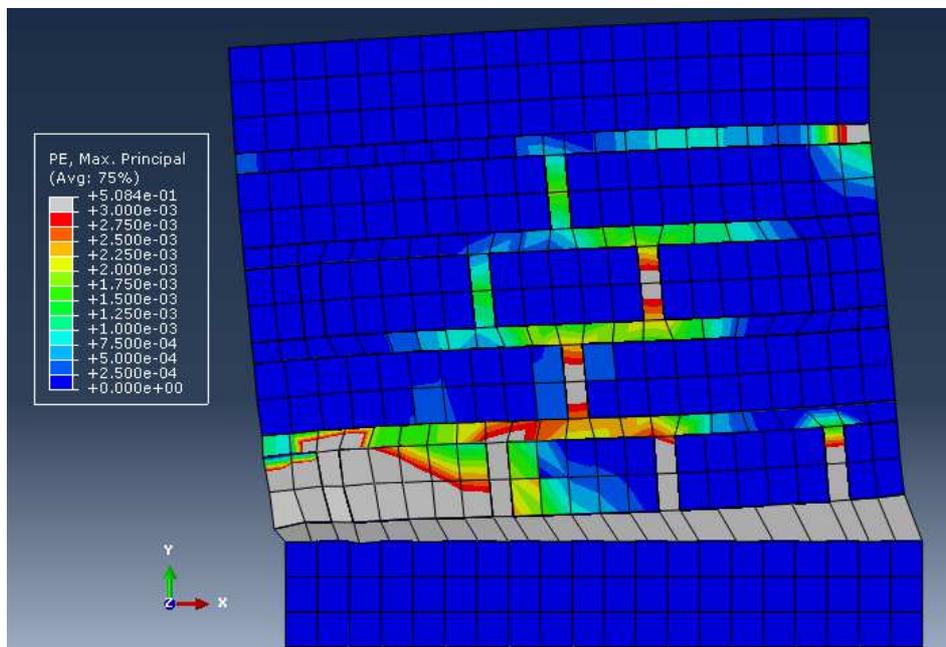


Figura 8: Mapeo de tensiones plásticas. Modelo Drucker-Prager, $p=1\text{MPa}$. ($\text{MPa} \times \text{E}-01$)

A continuación se indica la distribución de tensiones cortantes, para el modelo de Concrete Damaged Plasticity, con un valor de precompresión $p=1\text{MPa}$. (Figura 9)

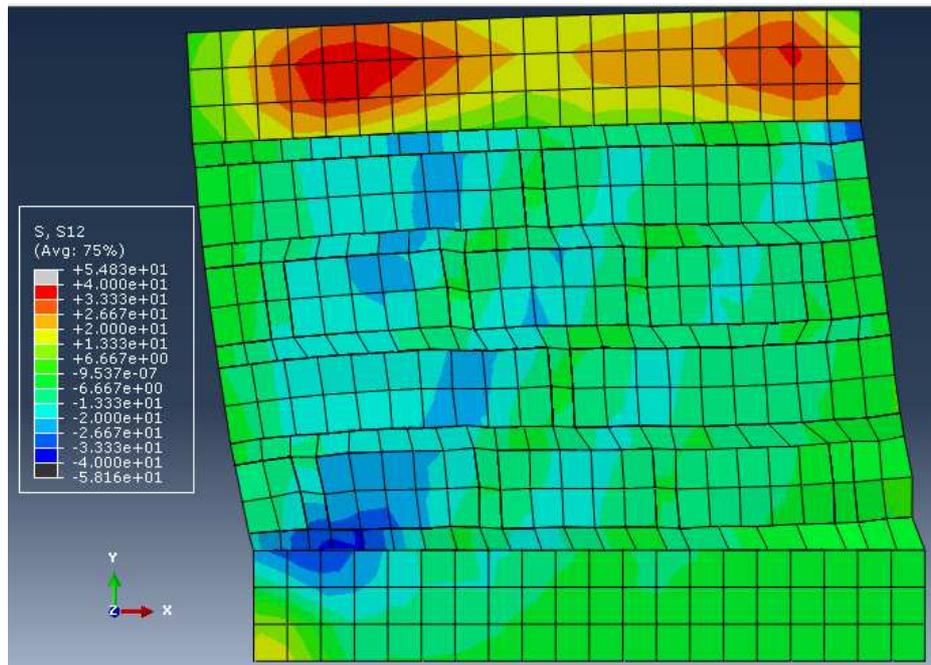


Figura 9: Estado de tensiones cortantes. Modelo Concrete Damaged Plasticity, $p=1\text{MPa}$. ($\text{MPa} \times \text{E-01}$)

En la Figura 10 se puede observar el mapeo de tensiones plásticas, para el modelo de Concrete Damaged Plasticity, con un valor de precompresión $p=1\text{MPa}$.

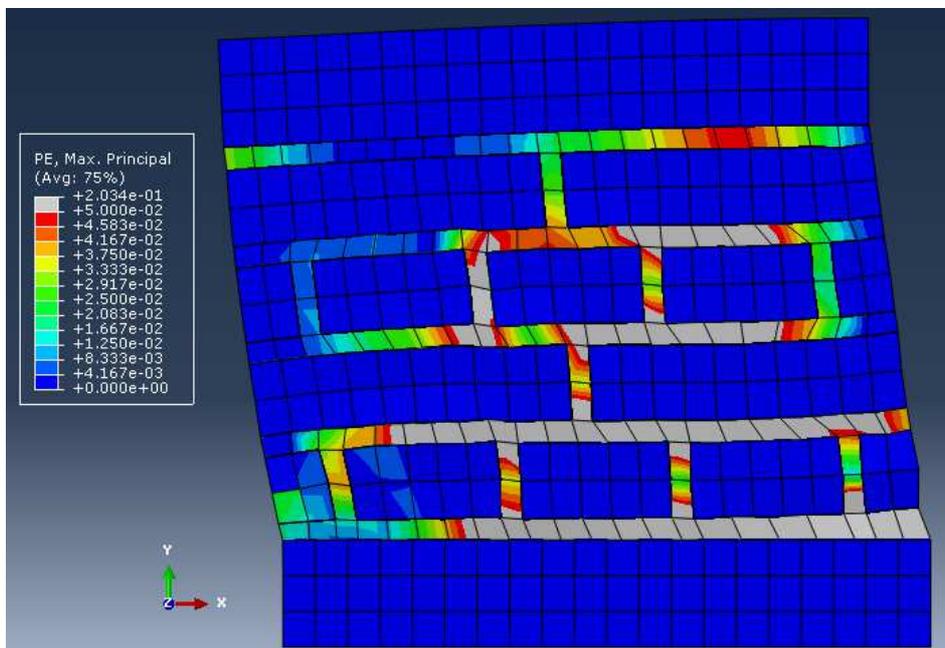


Figura 10: Mapeo de tensiones plásticas. Modelo Concrete Damaged Plasticity, $p=1\text{MPa}$. ($\text{MPa} \times \text{E-01}$)

A continuación se presentan los resultados comparativos entre los dos modelos utilizados. (Figura 11), (Figura 12) y (Figura 13)

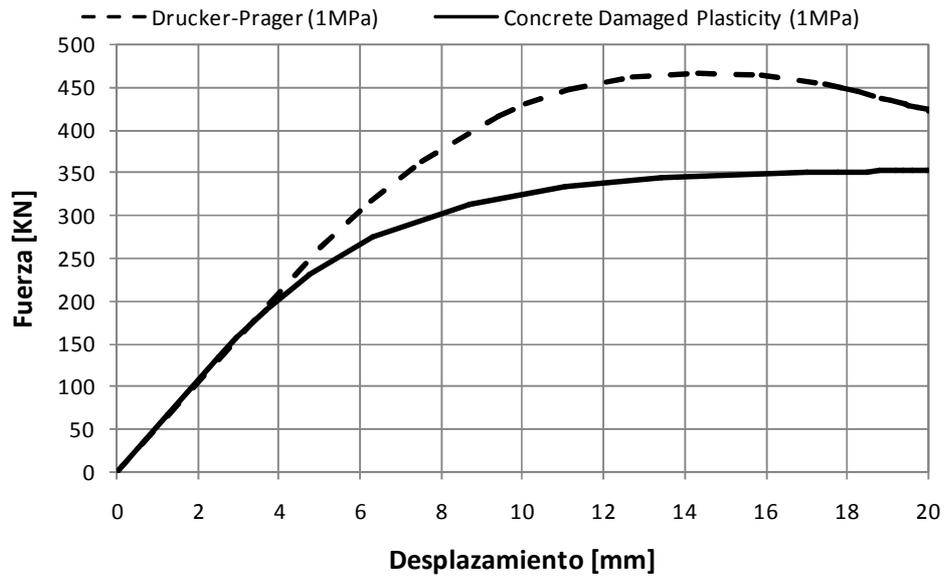


Figura 11: Curvas fuerza versus desplazamiento. Comparación entre los dos modelos de materiales utilizados. (p=1MPa)

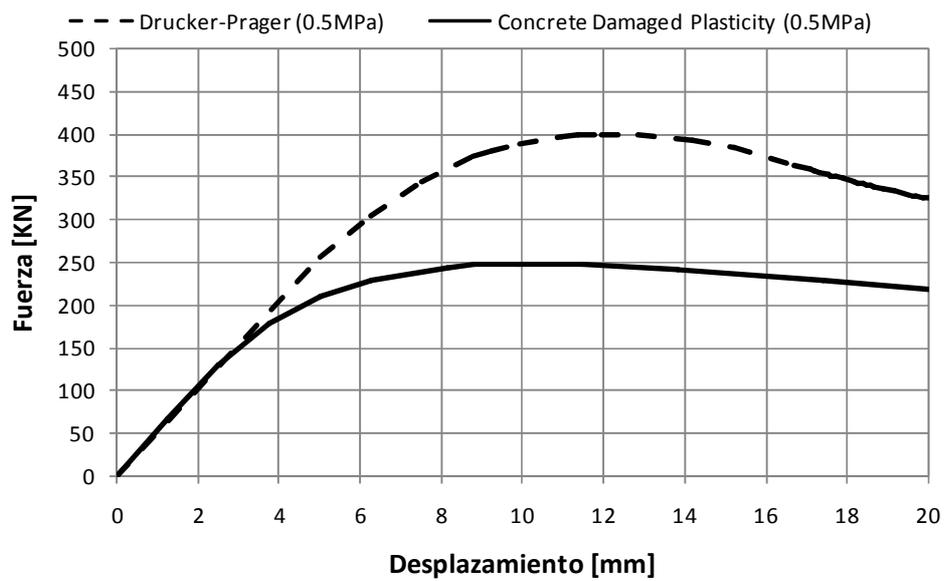


Figura 12: Curvas fuerza versus desplazamiento. Comparación entre los dos modelos de materiales utilizados. (p=0.5MPa)

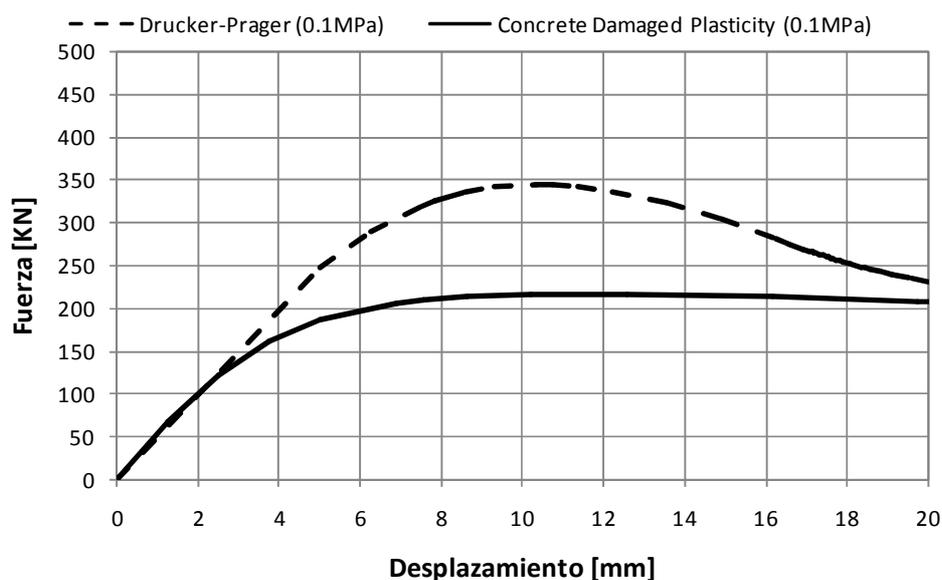


Figura 13: Curvas fuerza versus desplazamiento. Comparación entre los dos modelos de materiales utilizados. ($p=0.1\text{MPa}$)

Se indican los resultados comparativos obtenidos para los casos de espesores de muretes de 290mm, 450mm y 610mm respectivamente. Para estos análisis se aplicó una sola precompresión y se utilizó solo un modelo de material. (Figura 14)

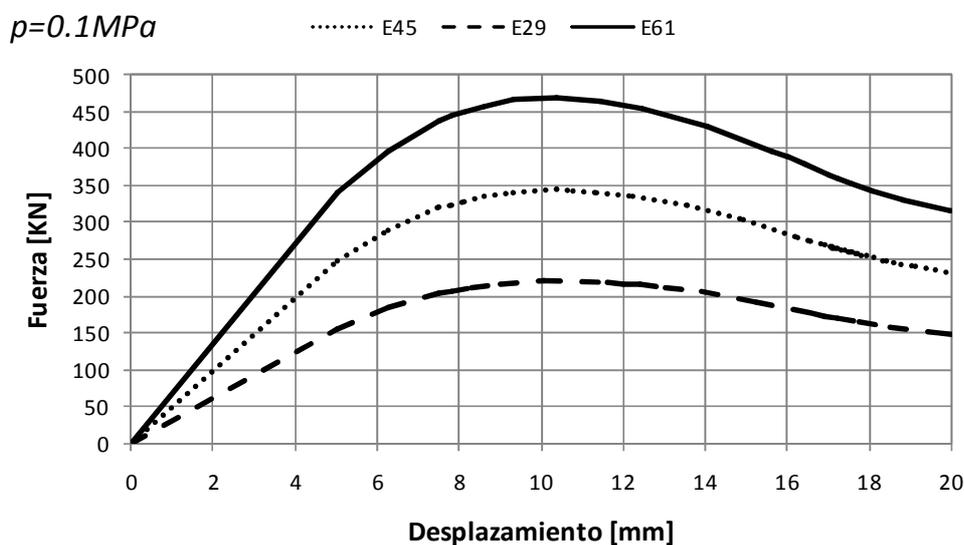


Figura 14: Curvas fuerza versus desplazamiento. Comparación entre los diferentes espesores. E29=290mm; E45=450mm; E61=610mm. (Modelo Drucker-Prager; $p=0.1\text{MPa}$)

En las figuras siguientes se observa la variación de los módulos de elasticidad y de la carga última en función de los espesores de muretes. (Figura 15 y Figura 16). El módulo de elasticidad está referido al murete en su conjunto, evaluado en rango elástico y obtenido de las curvas de la Figura 14.

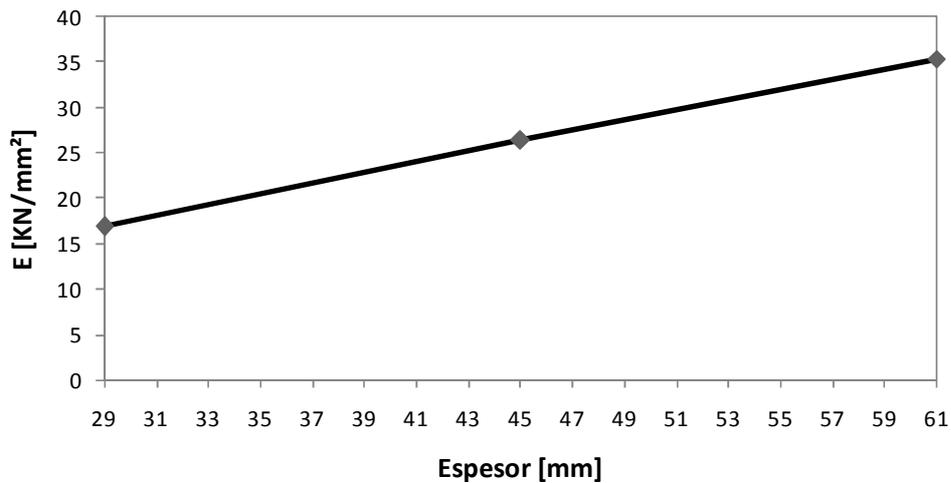


Figura 15: Variación del Módulo de Elasticidad en función de los espesores de muretes. E29=290mm; E45=450mm; E61=610mm. (Modelo Drucker-Prager; $p=0.1\text{MPa}$)

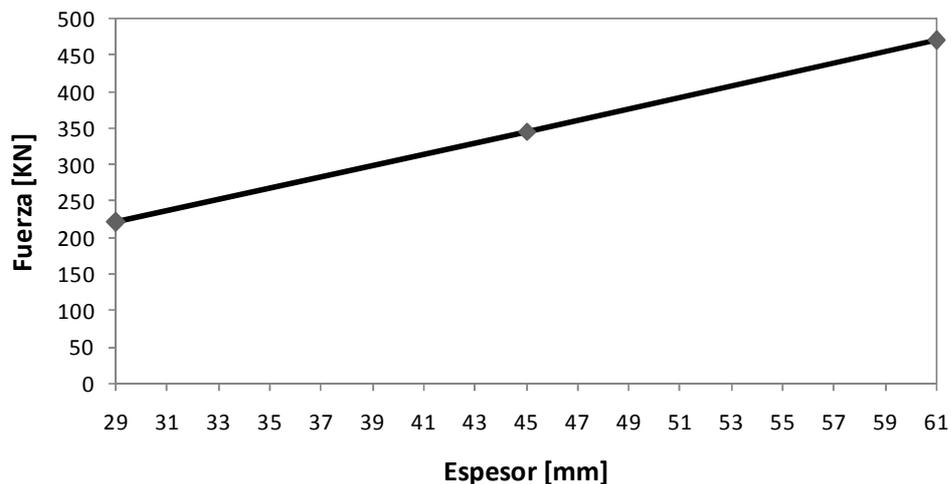


Figura 16: Variación de la carga última en función de los espesores de muretes. E29=290mm; E45=450mm; E61=610mm. (Modelo Drucker-Prager; $p=0.1\text{MPa}$)

Los resultados indican inicios de fluencias diferentes en los dos modelos de plasticidad estudiados. El modelo de Drucker-Prager presenta valores superiores a los del Concrete Damaged Plasticity. Para el modelo de Drucker-Prager, las tensiones plásticas se manifiestan en las juntas de mortero y en los mampuestos inferiores, mientras que para el modelo de Concrete Damaged Plasticity se observa una concentración de las tensiones plásticas en las juntas de mortero. En el modelo de Drucker-Prager se visualizan degradaciones de resistencia mayores que las del modelo de Concrete Damaged Plasticity.

5 CONCLUSIONES

Para ambos modelos de plasticidad, la aplicación de varios niveles de precompresión vertical conduce a respuestas de capacidades diferentes. Las diferencias son mayores en la medida que se aumenta la precompresión. El uso de modelos de plasticidad distintos arroja similitudes en las formas de las curvas de respuesta, aunque los valores de capacidades últimas presentan variaciones promedios del 30%. La respuesta de los modelos de muretes en

función de la variación de los espesores presenta linealidad debido a los modelos utilizados para evaluar su respuesta, de forma análoga para la carga última y el módulo de elasticidad del murete en su conjunto.

Los dos modelos numéricos utilizados para predecir la respuesta de los muretes en su conjunto presentan resultados similares a excepción de los inicios de fluencias y los valores últimos de capacidad de carga. Estos parámetros serán verificados experimentalmente en una próxima etapa de investigación.

REFERENCES

- Abaqus 6.4-1. Theory Manual. Hibbit, Karlson and Sorenson, Inc.: Pawtucket, U.S.A., 2003.
- Akhavessy A.H., Lateral strength force of URM structures based on a constitutive model for interface element. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 8, pp. 445-461, 2011.
- Anecchiarico F., et al. FE simulation of masonry wall samples of Mustafa Pasha mosque by homogeneous continuum models: Analysis and calibration. *Protection of Historical Buildings PROHITECH09*, Vol1, pp. 95-100, 2009.
- Giordano A., et al. Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1057-1069, 2002.
- 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.
- 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 P., et al. Cyclic behaviour of truss type reinforced concrete masonry walls. *7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica*, 2007.
- Lourenço P. et al. 3D homogenized limit analysis of masonry buildings under horizontal loads. *Engineering Structures*. Vol. 29, Issue 11, pp. 3134-3148, 2007.
- Martín P. E., et al. Análisis No Lineal de Muros de Gran Espesor Mediante Aplicación de Superficie de Interacción en Abaqus. *X Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, 2012.
- Mase G. E., Theory and Problems of Continuum Mechanics. Ed. McGraw-Hill Mexico, 247pp., 1977.

AGRADECIMIENTOS

- Programa de Becas Doctorales para Docentes UTN. Subsecretaría de Posgrado. Secretaría de Ciencia y Tecnología. Rectorado. UTN.
- Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.
- CeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica.