

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYOS MECÁNICOS EN MAMPUESTOS REGIONALES DE MISIONES, ARGENTINA

Javier A. Duarte^a, Hugo O. Reinert^a, Fabio D. Gattelli^a, Alicia E. Ares^b, Oscar Möller^c

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Juan Manuel de Rosas 325, 3360 Oberá, Argentina, duartej@fio.unam.edu.ar

^bCIC-CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, Félix de Azara 3200, Posadas, Argentina

^cInstituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Consejo de Investigaciones (CIUNR), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.

Palabras Clave: Simulación numérica, Ensayos mecánicos, Mamposterías.

Resumen. La Provincia de Misiones presenta en su territorio sistemas estructurales aplicados a la construcción de viviendas sociales que pueden considerarse característicos de la región, la mayoría de ellos ejecutados con mamposterías de diversas calidades. Las soluciones están generalmente condicionadas por la necesidad de minimizar el uso de recursos materiales, por la poca utilización de ciertos procesos productivos de tipo industrial, por el empleo de materiales que en las últimas décadas han crecido en su utilización pero que carecen de estudios de caracterización que permitan un uso más eficiente. En el presente trabajo se desarrollan comparaciones numéricas y conceptuales entre dos modelos: uno simulado numéricamente en un código de elementos finitos, y otro elaborado sobre la base de ensayos mecánicos de rotura. El objetivo buscado es poder constatar la factibilidad de aportar datos a los ensayos de laboratorio a través de procesos de simulación numérica y que promuevan a corto plazo el desarrollo de metodología de diseño con base probabilística.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los sistemas constructivos más difundidos en las últimas décadas en la Provincia de Misiones, se encuentran las mamposterías de ladrillo cerámico hueco con relación de vacíos mayor al 60 % en términos de su sección transversal [Cirsoc 501, 2013], lo que da a entender que este elemento presenta condiciones de rigidez disminuidas frente a otros tipos de mamposterías que se usan en la región, sumado al hecho que la estructura interna del ladrillo está orientada en dirección horizontal a los planos de carga predominantes de estas estructuras. Esto se puede apreciar en la imagen de la Figura 1(b), donde se observan las ranuras que generan adherencia por corte entre mampuestos y mortero de junta.



Figura 1: a) Sistema de mampostería Liviana y encadenados de H°A°; b) Ladrillo cerámico hueco 18-18-25

Respecto a la caracterización del material componente de este tipo de mampuesto, existen tantas como clases de arcillas se puedan emplear en el proceso de producción, por lo tanto depende en gran medida del material del lugar [Quinteros, 2014], y las comparaciones con estudios realizados en otros lugares se deben tomar con reservas, resultando de considerable dificultad unificar valores de parámetros mecánicos para estos elementos, lo que no implica en primera instancia el poder abordar modelos de diferente escala aplicables a problemas estructurales comunes.

Por otro lado es interesante el hecho que surge de la observación de las formas de construir que se dan en la Provincia de Misiones, que posicionan a este tipo de ladrillos en una situación de uso para elementos estructurales informales, lo cual plantea una carencia desde el punto de vista de la parametrización del elemento, así como de la metodología adecuada que provea pautas de diseño en un contexto racional, como la importancia, por ejemplo, de obtener datos tanto de rigidez como de resistencia de este tipo de material, así como su interacción con los elementos de confinamiento que pueda disponer, por ejemplo, encadenados tanto verticales como horizontales [Torrise, 2012].

Es conocida la importancia de los costos de ensayos mecánicos que permiten obtener parámetros de respuesta de los elementos estructurales, dado que es fundamental contar con un volumen de información que brinde datos representativos en términos de respuesta estructural de los sistemas de mampostería hueca liviana.

Entonces, surge la inquietud de comprobar la viabilidad de realizar procesos de simulación numérica que, sin reemplazar a los ensayos tradicionales, aporten la posibilidad de incrementar el volumen de resultados (experimentales y virtuales), a efectos de aproximar la respuesta en cuanto a comportamiento de mamposterías fabricadas de esta manera.

Este proceso debe seguir 3 etapas: la primera de caracterización de comportamiento de un mampuesto, una segunda fase en donde se selecciona una celda combinada de mampuesto y mortero de asiento [Oller et al., 1998], para finalizar en un análisis de un panel compuesto de varias celdas adheridas entre sí.

El propósito de este trabajo es avanzar sobre la primera etapa de análisis que corresponde al mampuesto aislado, revisando datos experimentales de diversas fuentes y ajustando sobre esta base un modelo numérico, confeccionado en un código de elementos finitos comercial, capaz de reproducir el comportamiento del mampuesto durante un ensayo a compresión.

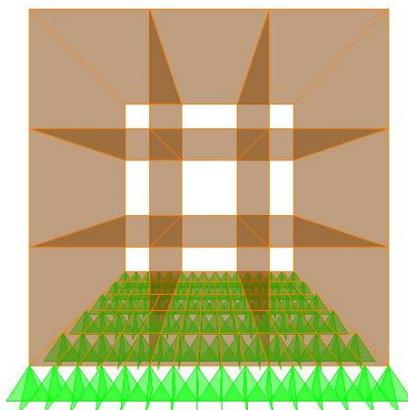


Figura 2: Ladrillo cerámico hueco simulado en código de elementos finitos.

2. METODOLOGÍA

A través de un código comercial de elementos finitos, se confecciona un modelo de elementos planos unidos por yuxtaposición, [SAP2000®Basic, 1978-2009] que representan las paredes del mampuesto según se puede observar en la Figura 2. Dichos elementos planos, se configuran con puntos y líneas que conforman un grupo de mallas, dentro del elemento plano propiamente dicho, con lo cual se reduce considerablemente el costo computacional del modelo. En la figura 3 se describe en forma esquemática la forma de configuración del procedimiento de refinamiento de malla.

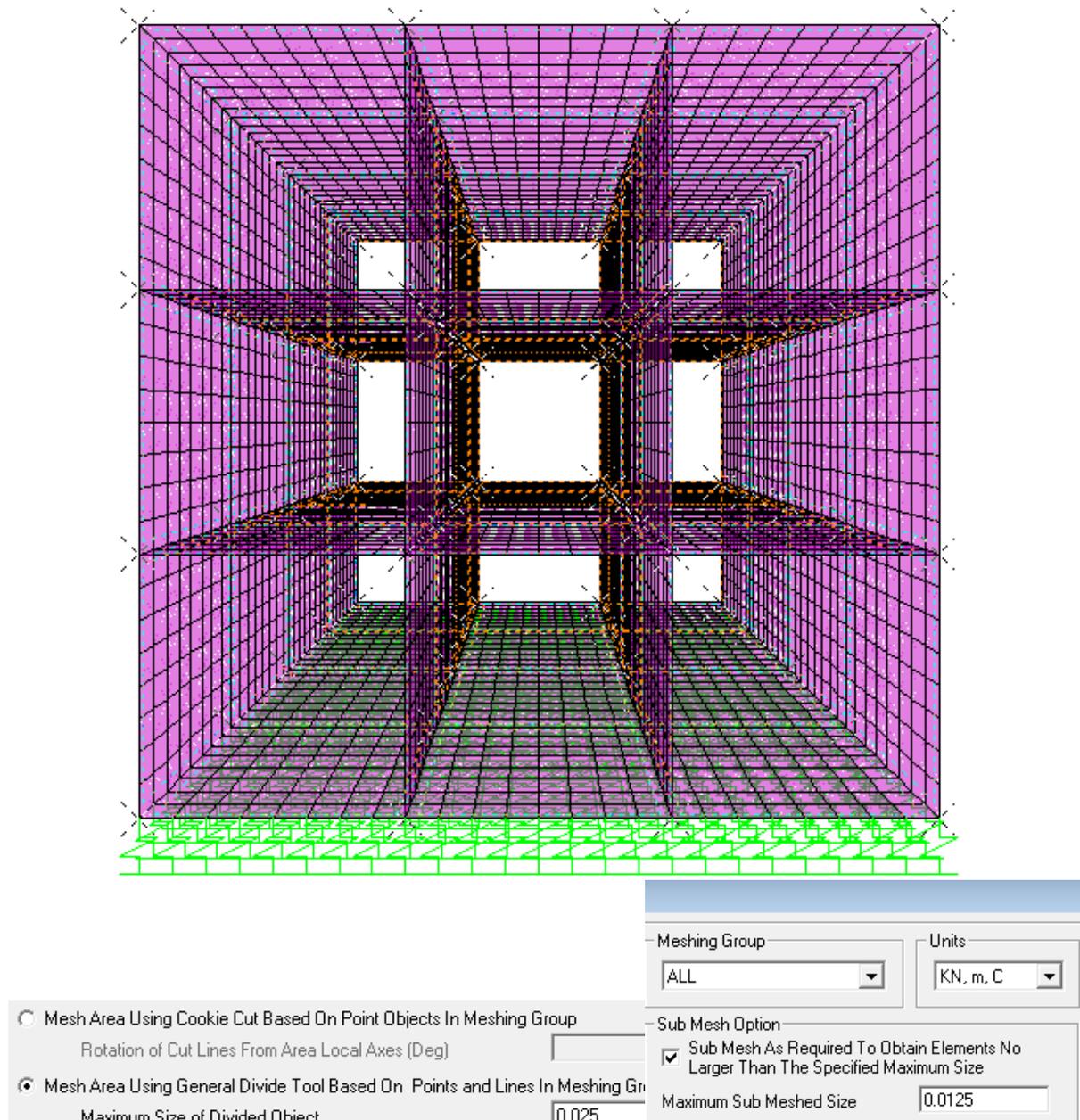


Figura 3: Esquema de discretización en malla de elementos planos yuxtapuestos.

En la Tabla 1 se detalla un relevamiento de datos geométricos de 10 muestras ensayadas. Esta permite apreciar la variabilidad de las dimensiones en este tipo de elementos, que expresan la incidencia de dos factores importantes a tener en cuenta: el cambio de volumen por el proceso de secado, y el mismo cambio producido por el proceso de cocción del mampuesto. Con estos datos geométricos se puede analizar la respuesta estructural para este tipo de elementos mampuestos, mediante técnicas de simulación numérica.

Esta información permitirá caracterizar probabilísticamente algunas de estas dimensiones que intervendrán como variables aleatorias en el proceso siguiente de optimización, una vez concluida esta etapa de aproximación de la respuesta estructural.

En este trabajo se adopta un valor medio para el espesor de pared, en función de los datos recopilados que se muestran en la Tabla 2.

Muestra	Espesores de paredes Verticales		Espesores de paredes horizontales	
N°	Paredes Exteriores [mm]	Paredes Interiores [mm]	Paredes Exteriores [mm]	Paredes Interiores [mm]
1	7.79	7.04	8.79	7.50
2	8.38	7.08	8.96	7.29
3	8.58	7.00	8.88	7.54
4	8.17	7.04	8.96	7.33
5	7.71	6.00	8.88	7.25
6	7.96	6.75	9.00	7.21
7	7.54	6.75	8.63	7.29
8	8.38	7.04	8.96	7.21
9	7.79	6.33	9.04	7.29
10	7.75	6.83	8.58	7.13

Tabla 1: Valores medios en espesores de pared de los mampuestos.

Muestra	Dimensiones Globales de los Mampuestos			Superficie Transversal de paredes verticales	Superficie de aplicación de la carga
N°	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	mm ²	mm ²
1	238.5	171.0	172.5	7075.50	40783.50
2	238.5	171.0	174.0	7373.63	40783.50
3	238.0	173.3	175.5	7417.67	41233.50
4	238.8	172.5	175.8	7261.98	41184.38
5	239.0	172.5	175.5	6552.58	41227.50
6	240.5	171.8	174.5	7074.71	41305.88
7	239.3	172.0	175.8	6838.56	41151.00
8	240.8	174.3	176.8	7423.13	41950.69
9	241.0	171.5	176.0	6808.25	41331.50
10	239.5	171.5	174.3	6985.42	41074.25
VM [mm]	239.4	172.1	175.1	7081.51	41202.42

Tabla 2: Resumen de parámetros geométricos de los mampuestos.

Respecto al material configurado en el modelo numérico, para la relación constitutiva del ladrillo se adoptan datos de curvas experimentales obtenidas en ensayos de laboratorio a compresión, que se muestran en la Figura 4.

Los datos utilizados para la confección de dichas curvas son: valores de carga y desplazamientos transformados a tensión y deformación específica, considerando el tramo de la función desde el punto en el que el mampuesto comienza a tomar carga, hasta la primera fisura, momento en que se puede apreciar distorsiones considerables en la curva P-D. (En lo que respecta a la curva real, el aparente gradiente positivo de la rigidez en el primer tramo de la curva se debe a la puesta en carga del material de encabezamiento, que muestra un comportamiento dúctil hasta su confinamiento, a partir de lo cual el mismo comienza a transferir efectivamente carga de compresión al mampuesto. Por lo tanto, para la relación constitutiva del material se adopta la curva real, adaptada para que inicie en el segundo tramo, tal como se observa en la Figura 4.

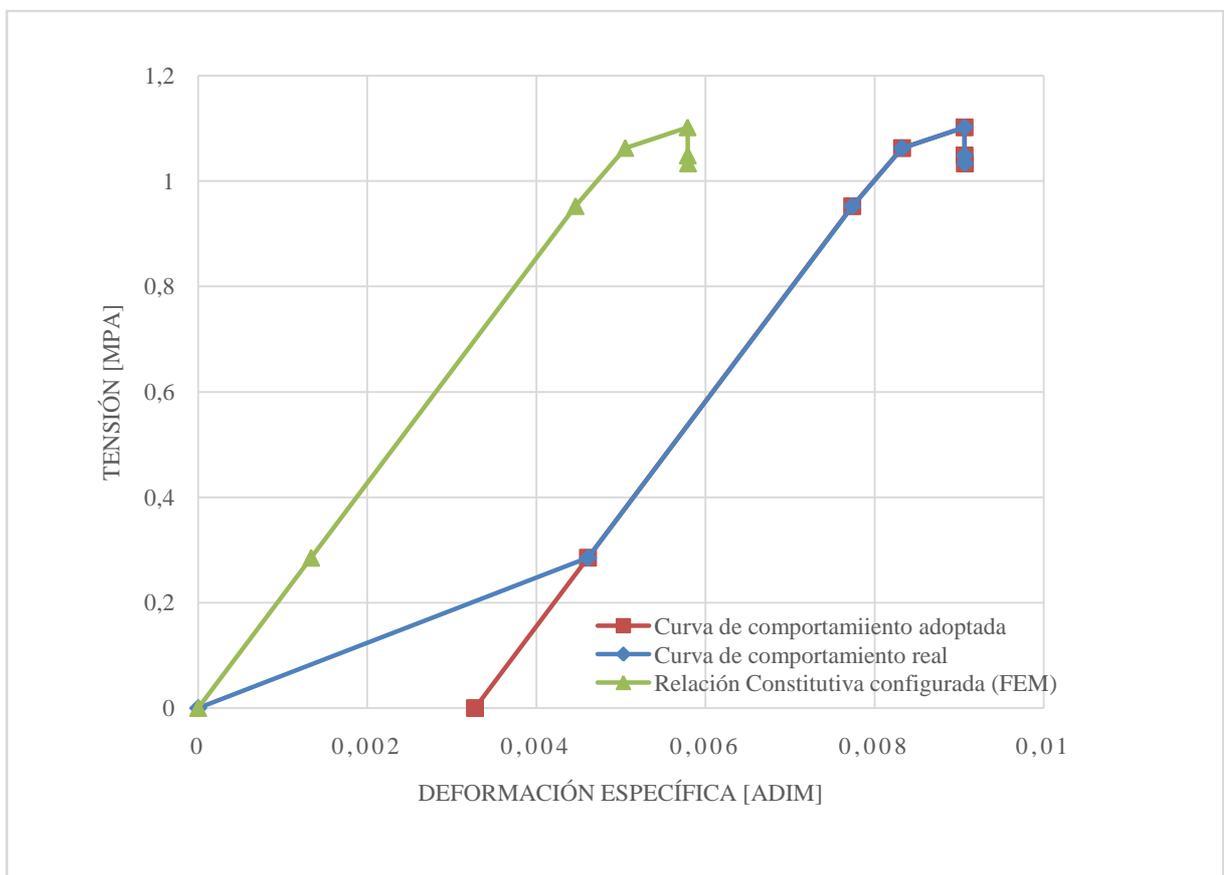


Figura 4: Relaciones constitutivas: experimental y adoptadas

En lo que respecta a la ejecución del ensayo de rotura de los mampuestos, los datos recolectados, se toman de ensayos a compresión de mampuestos comerciales de la zona sur de la provincia de Misiones, los cuales son encabezados según normas IRAM 12586 de resistencia a la compresión de mamposterías.

Con el fin de evitar que exista concentración de tensiones, y a efectos de estudiar las curvas de carga vs. Desplazamiento posible en este tipo de material, se interpone entre el encabezado del mampuesto y el elemento aplicación de carga, una placa de material elastómero que sobrepasa las dimensiones en planta del mampuesto, intentando confinar los

extremos y garantizar carga de compresión pura en el ensayo. Esto se intenta comparar con técnicas de simulación numérica implementadas a través de un código comercial de elementos finitos, en el cual se utilizan elementos de área para representar las paredes del mampuesto, y se considera un material con no linealidad física, con predominancia en el comportamiento a compresión del mismo. En la figura 5 se observan imágenes del modelo numérico y la discretización seleccionada, así como fotografías del ensayo a compresión, en la figura 6. Respecto al instrumental utilizado, se coloca una celda de carga con capacidad nominal de 1000 Kg, y dos dispositivos digitales de medición de distancias, uno para medir desplazamiento vertical, y otro para medir desplazamiento horizontal. Estos se conectan a una PC la cual registra en forma continua el ensayo, el cual se efectúa aplicando la carga a través de un cilindro de accionamiento manual a manivela, que se encuentra conectada al mismo por una caja de reducción que permite regular la velocidad de aplicación de la carga.

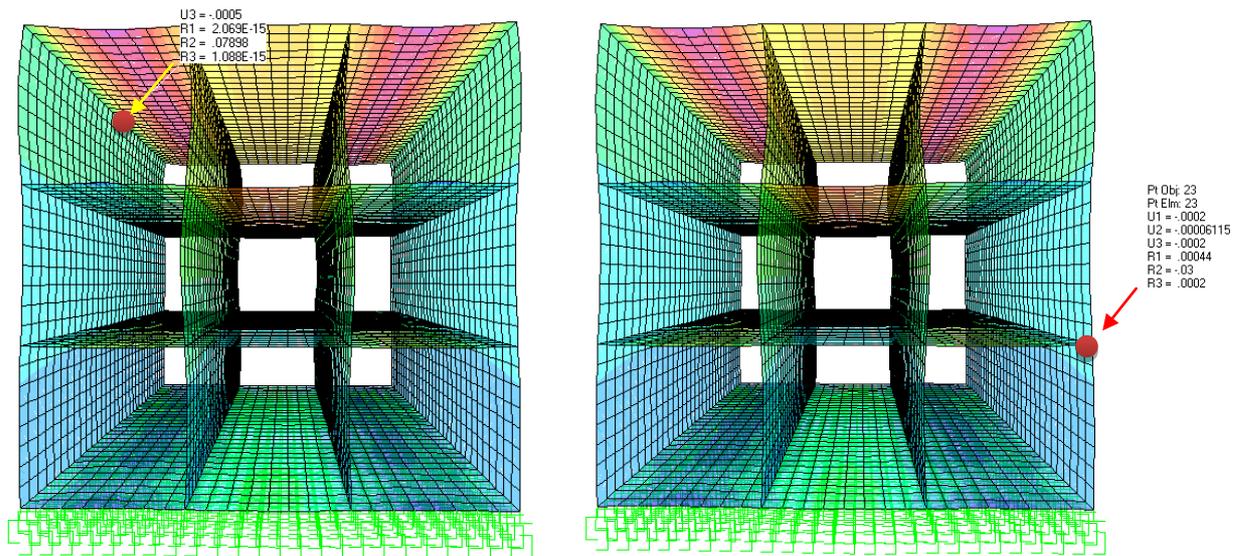


Figura 5: Vista de modelos numéricos analizados, y los puntos de comparación seleccionados.

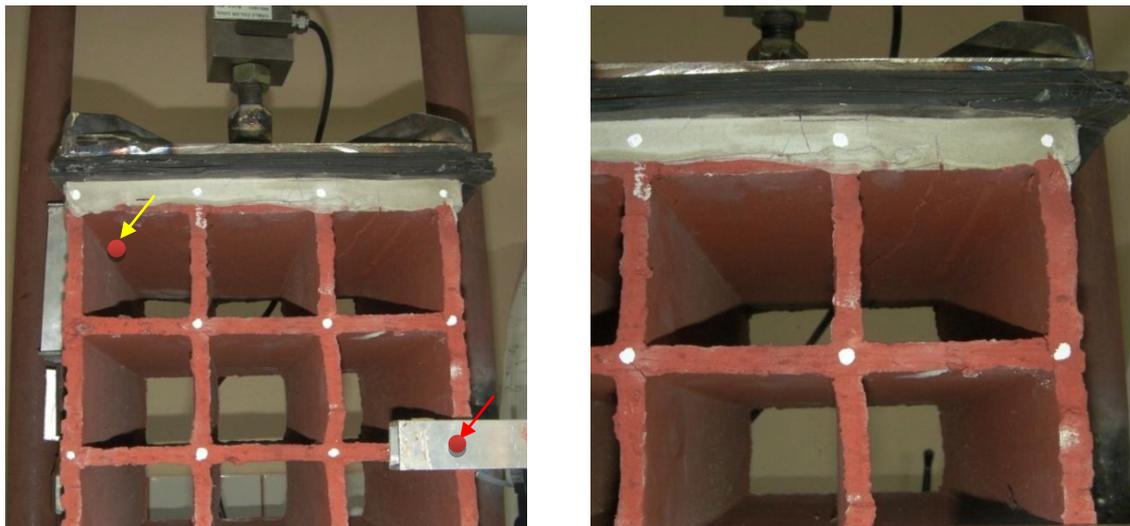


Figura 6: Vista de mampuestos ensayados a Compresión, y los puntos de comparación seleccionados.

En cuanto a los mampuestos ensayados a compresión, se observan líneas de rotura longitudinales, que recorren el tercio central de los planos superiores que toman contacto con el elemento de carga.

Respecto a la forma de considerar el módulo de elasticidad longitudinal, al presentar una geometría de paneles conformados por elementos de área, se adopta un material isotrópico no lineal, y se efectúan algunas pruebas en un modelo similar, conformado por elementos sólidos a los cuales se asigna un material de características ortotrópicas, con parámetros basados en datos experimentales. Entre los resultados presentados en este trabajo se muestran curvas carga y desplazamiento.

Se analizan tres formas principales de estados de carga, más una complementaria que consiste en un análisis lineal sin efectos de segundo orden, que contempla el peso propio de los elementos de área, asignando valores de unidad a la opción especificada en el software.

Luego se analiza un estado de carga no lineal calculando desplazamientos de diferentes puntos del modelo por integración directa, esto es, aplicando en 90 pasos de carga diferentes y progresivos.

3. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se presentan los valores de tensión y deformación obtenidos a partir de los resultados en el modelo numérico, paralelamente con los obtenidos en forma experimental, calculando en base a valores monitoreados en puntos de comparación elegidos para que sean coincidentes con los evaluados en los ensayos de mampuestos, tanto vertical (U_z) como horizontal (U_y).

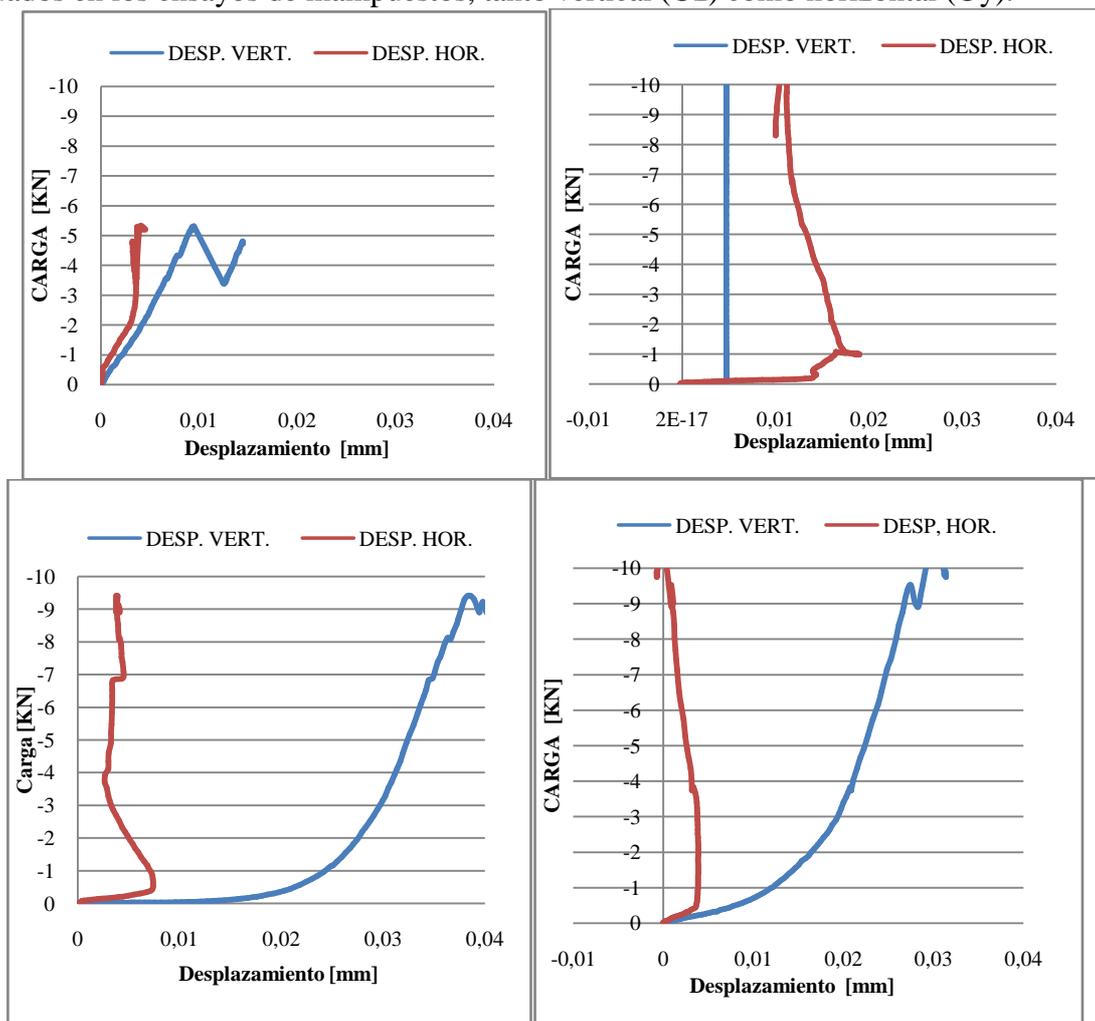


Figura 7: Gráficos de comportamiento de mampuestos sometidos a ensayos de compresión.

En la Figura 7 se comparan curvas de Carga vs. Desplazamiento, obtenidas de los ensayos mecánicos, donde se puede observar la diversidad de comportamiento en los diferentes ensayos, lo cual muestra la aleatoriedad del elemento en términos de comportamiento estructural, en principio como elemento aislado, luego en otras etapas queda por verificar si se mantiene esta tendencia.

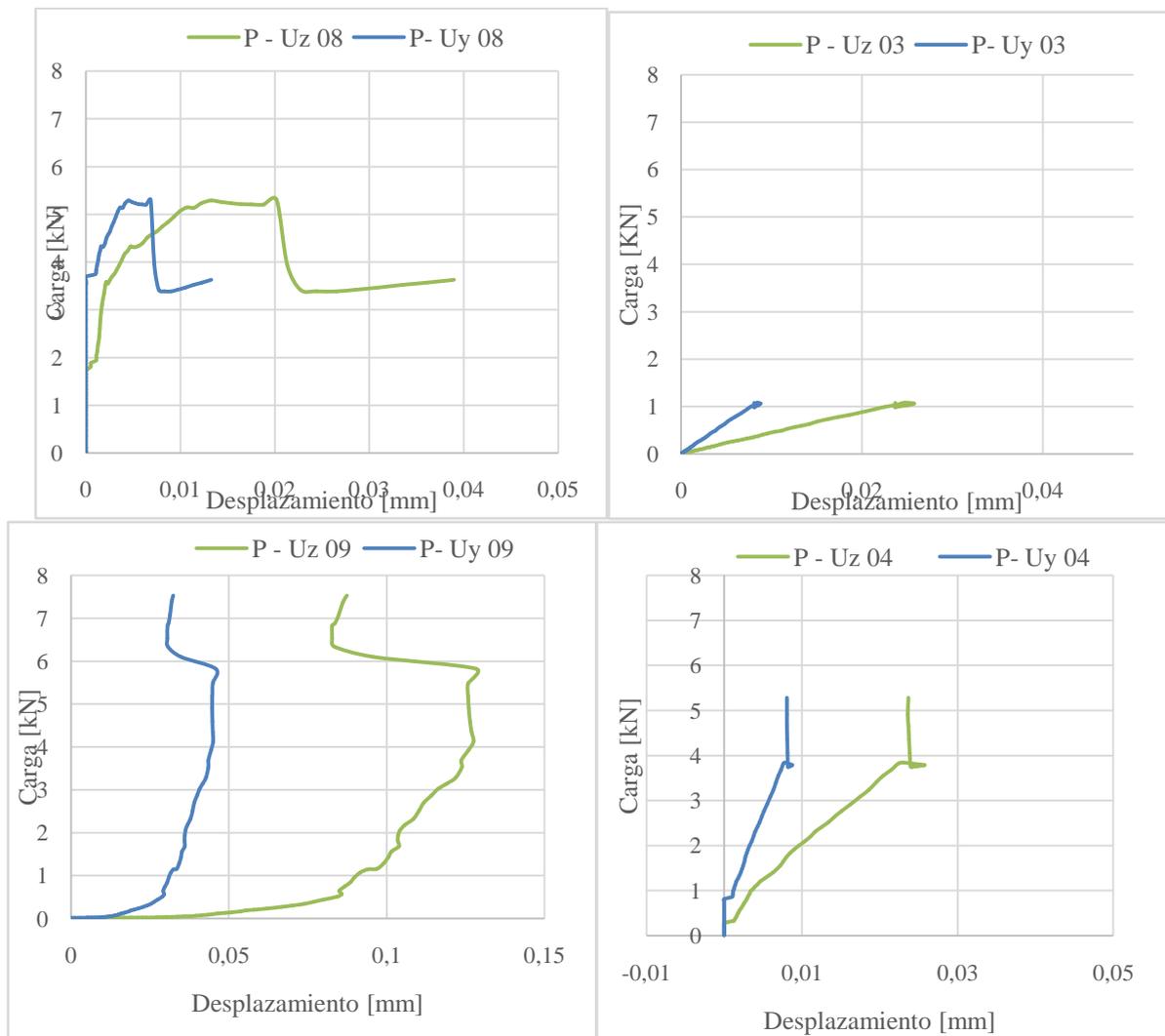


Figura 8: Gráficos de comportamiento de mampuestos a compresión, simulados numéricamente.

En la figura 8 se muestran gráficos de carga vs. Desplazamiento, de modelos numéricos confeccionados en el mencionado código de elementos finitos. En imágenes del modelo numérico, (ver Figura 5), se observa que la respuesta del mampuesto ante una eventual carga de compresión creciente, se asemeja a la deformada de una estructura apuntalada de tipo indesplazable.

En la figura 9 se presenta una comparación entre relaciones de tensión deformación para mampuestos simulados por FEM y ensayos mecánicamente, se puede observar una tendencia similar en la correlación entre comportamiento vertical y horizontal del mismo.

Paralelamente se comparan dos modelos numéricos, en uno de los cuales se considera no linealidad geométrica, incluyendo efectos de segundo orden. Para la medición de la tensión se considera la sección neta relevada en la tabla 1.

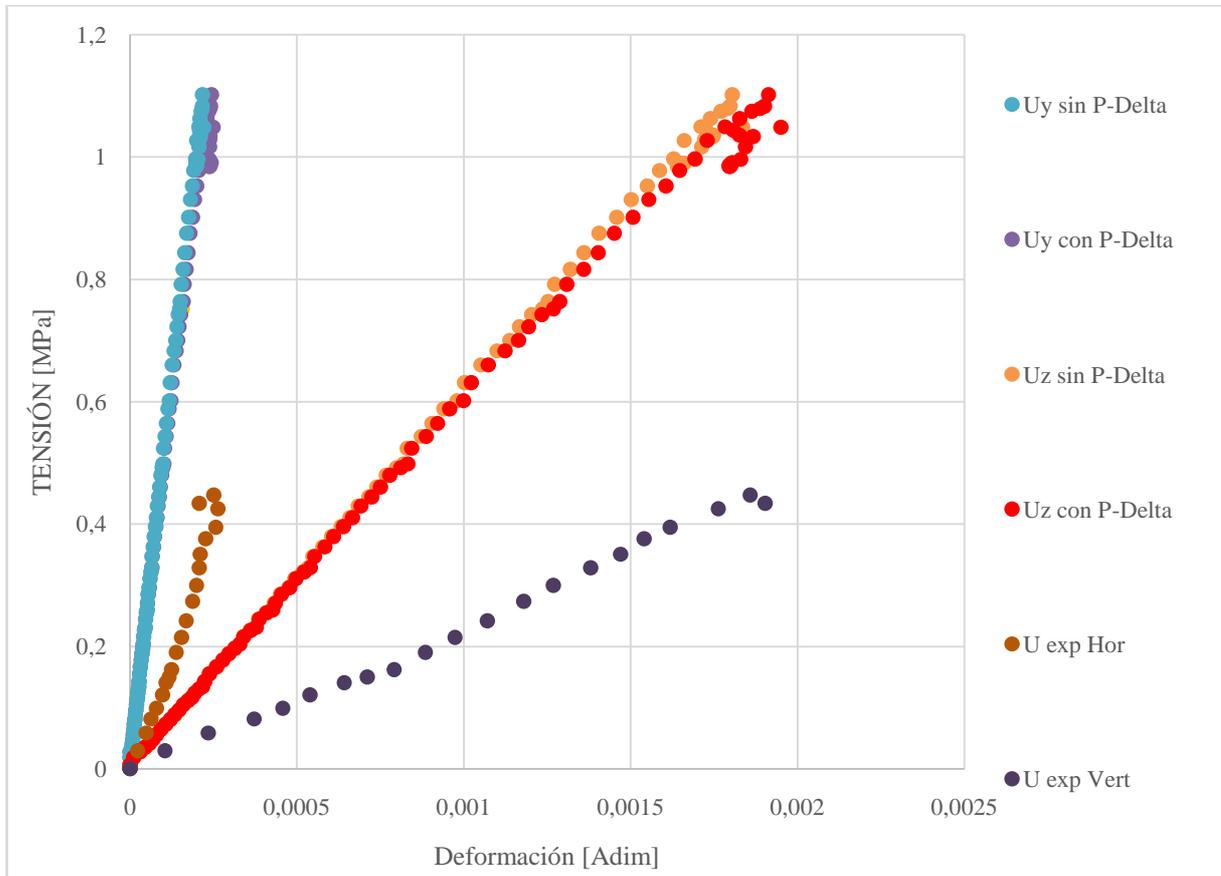


Figura 9: Comparación de resultados numéricos y experimentales

4. CONCLUSIONES

Se ensayaron experimentalmente a compresión ladrillos cerámicos huecos de fabricación regional en la provincia de Misiones También, esos mismos ladrillos se modelaron con la técnica del método de los elementos finitos utilizando el software SAP 2000 [CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, 1978-2009] y se obtuvieron resultados para los mismos tipos de cargas.

Las conclusiones de este primer trabajo sobre el tema son las siguientes

- La comparación entre los resultados experimentales y numéricos, para el comportamiento en dirección vertical y horizontal, muestra un razonable acuerdo cualitativo.
- Se necesitan hacer ajustes en los parámetros del modelo numérico para acercar los resultados a los experimentales.
- La gran dispersión de los parámetros característicos del material del ladrillo regional podrían indicar la necesidad de un tratamiento con variables aleatorias para lograr representar adecuadamente lo que se observa en los ensayos.

5. PROXIMAS ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

A futuro y una vez resuelto el problema de aproximación de la respuesta numérica respecto de la experimental, se propone el avance a la siguiente fase, en la configuración del modelo a otros problemas estructurales como por ejemplo paneles completos que simulen diafragmas de mamposterías, que puedan ser utilizados en análisis de viviendas completas [Reinert et. al, 2013].

REFERENCIAS

- CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, and SAFE®. Copyright © Computers and Structures, Inc., All rights reserved. 1978-2009.
- Oller S., Oliver J., Lubliner J., Oñate E. Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. Parte I: Variables fundamentales, funciones de fluencia y potencial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 4:397-431, 1988.
- Quinteros, R. D. Modelización del comportamiento de estructuras de mampostería mediante la teoría de homogeneización. *Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta*, 2014.
- Reinert, H. O., Duarte, J. A., Evaluación de solicitaciones por elementos finitos aplicada a medios continuos. *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones*, 2013.
- Reglamento CIRSOC 501-E, Viviendas de mampostería bajo compromiso estructural, *Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios*, 2005.
- Reglamento CIRSOC 501, Estructuras de mampostería, *Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios*, 2005.
- SAP2000® Basic Analysis Reference Manual, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional, Structures, Copyright © Computers and Structures, Inc., 1978-2009. All rights reserved.
- Torrise, G. Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería. *Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo*, 2012.