

Asociación Argentina  
de Mecánica Computacional



Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 2077-2091 (artículo completo)  
Martín I. Idiart, Ana E. Scarabino y Mario A. Storti (Eds.)  
La Plata, 7-10 Noviembre 2017

## APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LADRILLOS CERÁMICOS HUECOS MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS

Javier A. Duarte <sup>a</sup>, Fernando R. Detke <sup>a</sup>, Hugo O. Reinert <sup>a</sup>, Diego A. García <sup>a, d</sup>,  
Alicia E. Ares <sup>b</sup> y Oscar Möller <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Argentina, [jaduarate66ar@yahoo.com.ar](mailto:jaduarate66ar@yahoo.com.ar).*

<sup>b</sup> *IMAM, UNaM, CONICET, FCEQyN, Félix de Azara 1552, Posadas, Argentina.*

<sup>c</sup> *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Consejo de Investigaciones (CIUNR), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.*

<sup>d</sup> *CONICET, Buenos Aires, Argentina.*

**Palabras Clave:** Mamposterías, Cerámicas, Diferencias finitas, Elementos finitos.

**Resumen.** En la provincia de Misiones, Argentina, se destaca el uso frecuente de mampuestos conocidos como Ladrillos Cerámicos Huecos (LCH), los cuales son de fabricación industrial, moldeados con máquinas extrusoras, cocidos en hornos continuos. En términos de comportamiento mecánico y estructural es un elemento de rotura frágil, el cual suele estar solicitado en forma global a compresión dentro de las mamposterías que conforma, con valores de resistencia que dependen de varios factores propios de su proceso de fabricación. En cuanto a su geometría es destacable la aparente interacción entre las paredes internas y externas que conforman una estructura de marcos. El objetivo del presente trabajo es analizar mediante una herramienta de simulación numérica, el comportamiento mecánico de los mampuestos de la región, en forma aislada, considerando las diferentes variables que intervienen en su forma y composición material. Para ello, los ladrillos cerámicos individuales son modelados a través del método de los elementos finitos en el software SAP 2000 versión 14.1.0. El material es considerado según propiedades mecánicas y geométricas que son obtenidas a través de ensayos experimentales normalizados. Con los resultados experimentales de deformaciones y resistencia a compresión se calibra el modelo numérico, con el que se obtiene información sobre el comportamiento de interacción entre las paredes horizontales y verticales del ladrillo a efectos de poder avanzar en la formulación de macro modelos conformados por elementos finitos de área.

## 1 INTRODUCCIÓN

La simulación numérica en problemas de ingeniería toma protagonismo en las últimas décadas, habida cuenta de los importantes avances tecnológicos en el campo de la mecánica computacional que han dado lugar a la generación de herramientas y metodologías que logran resultados con mayor calidad de información (Reinert et al., 2013). En el campo de las estructuras de mamposterías se necesita apreciar el desempeño de la misma a diferente escala, según el objeto de análisis del problema a resolver (Duarte et al., 2014). Considerando que en este caso las propiedades de anisotropía y heterogeneidad varían en función a la escala seleccionada para el análisis del problema en cuestión, específicamente en el caso de mamposterías de ladrillos cerámicos huecos (LCH) se puede variar el enfoque en función a los siguientes factores: considerar el comportamiento del mampuesto en forma aislada, sin contemplar la interacción con los morteros de junta a efectos de establecer los modos de falla a estudiar. A efectos de plantear nuevas propuestas en términos de herramientas de análisis para el comportamiento de materiales compuestos como las estructuras de mamposterías de ladrillo cerámico hueco, las cuales son representativas de la región noreste del país, se propone como objetivo del presente trabajo, una herramienta de simulación numérica que permita predecir el comportamiento de los mampuestos de la región, considerando las diferentes variables que intervienen en su forma y composición material y analizar diferentes opciones de forma geométrica para los mampuestos de la región, con metas a futuro de poder utilizarla en procedimientos de optimización estructural con restricciones de confiabilidad.

Para ello se plantean tres modelos numéricos desarrollados en el software SAP2000 (versión 14.1.0) que representan al LCH conocido como 18x18x25 (dimensiones nominales en cm) con relación de vacíos mayor al 60 % en términos de su sección transversal (Cirsoc 501-E, 2013). El primero (modelo A) comprende un conjunto de elementos de barra (frame), cuyo espesor fue adoptado sobre base de datos experimentales, que se intersectan formando la sección transversal de un LCH. El segundo modelo (modelo B) simula un ladrillo formado por elementos de área (Shell layered) que se conectan en las aristas para formar el ladrillo en tres dimensiones. Las paredes tienen un espesor medio para las paredes horizontales diferenciado del espesor medio adoptado para las paredes verticales. El tercer modelo (modelo C) es un elemento plano modelado sobre base de datos experimentales. Los resultados obtenidos en los modelos numéricos se comparan con una base de datos experimental de ensayos a compresión efectuados en ladrillos de similares dimensiones.

La definición de la relación constitutiva es diferente para cada modelo: en el primero y el segundo modelos el material es considerado isótropo definiendo: peso unitario, módulo elástico longitudinal, coeficiente de Poisson y relación constitutiva. Estos modelos utilizan propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de probetas cerámicas. En el tercer modelo el material es considerado ortótropo lineal adoptando con base experimental los parámetros: peso unitario, módulos elásticos en direcciones principales, coeficientes de Poisson, relación tensión deformación no lineal considerando resistencia a tracción observada en ensayos experimentales y ángulos de dilatación fricción definidos por el criterio de Drucker-Prager. Este modelo utiliza propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de LCH. El análisis estructural adoptado es cuasi estático no lineal considerando efectos de segundo orden para diferente magnitud de cargas aplicadas al mampuesto, los cuales responde a los mismos escalones de carga aplicados en ensayo destructivos a compresión. 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). Para lograr ajustes eficientes en términos de

parámetros que definen el comportamiento estructural, es necesario visualizar el mecanismo interno que se forman entre paredes internas y externas de ladrillos huecos, el cual se presenta en principio como una sucesión de modos de falla. Estos modos de falla permiten proponer formas de simulación que aproximen adecuadamente el comportamiento (Lopez-Alba et al., 2012).

Es conocida la importancia de los costos de ensayos mecánicos para obtener los parámetros de respuesta de los elementos estructurales, siendo fundamental contar con un volumen de información que brinde datos representativos en términos de respuesta estructural de los sistemas de mampostería hueca liviana. Por esto surge la inquietud de comprobar la viabilidad de realizar procesos de simulación numérica que, sin reemplazar a los ensayos mecánicos de rotura, 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 ajustando un modelo numérico, confeccionado en un código de elementos finitos comercial, capaz de reproducir el comportamiento del mampuesto durante un ensayo a compresión. Se pretende comparar resultados de carga y deformación para utilizarlos en forma probabilística, para lograr avances en trabajos posteriores enfocados en el campo de la optimización estructural.

## 2 METODOLOGÍA

A continuación se describe el procedimiento, los parámetros seleccionados y la metodología de obtención de los mismos a efectos de la elaboración del presente trabajo. En principio Se intenta calibrar un modelo numérico que permita ampliar la base de datos obtenida en forma experimental y de esta manera estudiar el problema en posteriores trabajos desde el enfoque de optimización con restricciones de confiabilidad.

### 2.1 Análisis experimental

#### 2.1.1 Determinación de parámetros para LCH.

Se detalla la rutina experimental establecida en el presente trabajo para analizar el comportamiento mecánico de los LCH característicos de la región de Misiones, Argentina. La tipología de mampuesto seleccionada es la correspondiente a un ladrillo de 18 cm de ancho, 18 cm de alto, y 25 cm de largo, todas estas dimensiones en carácter nominal. Los parámetros medidos para el presente análisis son: carga de rotura [kgf], acortamiento vertical [mm], desplazamientos horizontales [mm], mientras que los parámetros calculados sobre la base de estas mediciones son la resistencia a compresión [MPa], la deformación específica vertical [adim], deformación específica horizontal [adim]. Para la obtención de los parámetros medidos se utiliza equipo de adquisición de datos a frecuencia de muestreo de 5Hz, con celdas de carga de capacidad nominal de 100 kN y extensómetros de longitud nominal de 10 mm. La máquina de ensayo utilizada es una prensa hidráulica capaz de trabajar a velocidad constante. La velocidad de carga adoptada para los ensayos es de 100 kgf/seg, la cual se rige por un criterio de visualización adecuada de los mecanismos de falla de este tipo de ladrillos. Las probetas se encabezan con un mortero de yeso y cemento en igual proporción, a efectos de asegurar planicidad y paralelismo de las caras en contacto con los cabezales de la máquina de

ensayo, Figura 1.



Figura 1: Izquierda: Encabezado de probetas de ladrillos. Derecha: Probeta preparada en máquina de ensayo a compresión.

El modelo C utiliza las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo en tres direcciones de cada mampuesto, en la  $E_1$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido longitudinal del ladrillo.*

$E_2$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido transversal horizontal del ladrillo.*

$E_3$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido Transversal Vertical del ladrillo.*

$\mu_{12}$ : *coeficiente de poisson modificado entre direcciones 1 y 2.*

$\mu_{13}$ : *coeficiente de poisson modificado entre direcciones 1 y 3.*

$\mu_{23}$ : *Coeficiente de poisson modificado entre direcciones 2 y 3.*

$G_{12}$ : *Módulo transversal para dirección 1 en dirección 2.*

$G_{13}$ : *Módulo transversal para dirección 1 en dirección 3.*

$G_{23}$ : *Módulo transversal para dirección 2 en dirección 3.*

Tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades mecánicas obtenidas.

	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
Valor medio	2116	769	836	0.269	0.264	0.190	833	304	349
Desvío estándar	132	138	180	0.035	0.034	0.087	46	57	57
Valor máximo	2248	908	1017	0.305	0.298	0.277	880	362	407
Valor mínimo	1984	630	656	0.233	0.230	0.103	786	247	292

$E_1$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido longitudinal del ladrillo.*

$E_2$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido transversal horizontal del ladrillo.*

$E_3$ : *Módulo de Young estimado experimentalmente en sentido Transversal Vertical del ladrillo.*

$\mu_{12}$ : *coeficiente de poisson modificado entre direcciones 1 y 2.*

$\mu_{13}$ : *coeficiente de poisson modificado entre direcciones 1 y 3.*

$\mu_{23}$ : *Coeficiente de poisson modificado entre direcciones 2 y 3.*

*G12: Módulo transversal para dirección 1 en dirección 2.*  
*G13: Módulo transversal para dirección 1 en dirección 3.*  
*G23: Módulo transversal para dirección 2 en dirección 3.*

Tabla 1: Resumen propiedades mecánicas ensayo LCH en tres direcciones, modelo C.

### 2.1.2 Determinación de parámetros para arcillas.

Se partió de probetas moldeadas en la fábrica, las cuales guardan una relación aproximada de 2:1 entre su altura y lados; dichas probetas se sometieron al mismo proceso de cocción de los ladrillos producidos en la fábrica. Una vez obtenida la probeta se prepararon sus caras para volverlas planas y paralelas, se procedió a determinar todas sus dimensiones mediante medición con calibre, y fueron sometidas a ensayos de compresión, hasta alcanzar la rotura.

Para su ensayo, se utilizó una prensa de accionamiento mecánico a velocidad constante, con una celda de carga de 500KN con la base para ensayos de mortero, suplementada, dadas las dimensiones de la probeta. La figura 2 muestra el montaje de la probeta en la máquina de ensayo a compresión. En ella se puede observar que se colocaron suplementos de material más rígido que el de las probetas. La deformación de estos suplementos no fue tenida en cuenta en la estimación del módulo de Elasticidad.



Figura 2: Dispositivo de ensayo a compresión.

La velocidad de giro fue de 249 rpm en el variador de voltaje adosado al motor (da como resultado una velocidad de carga de 80,427 kg/seg).

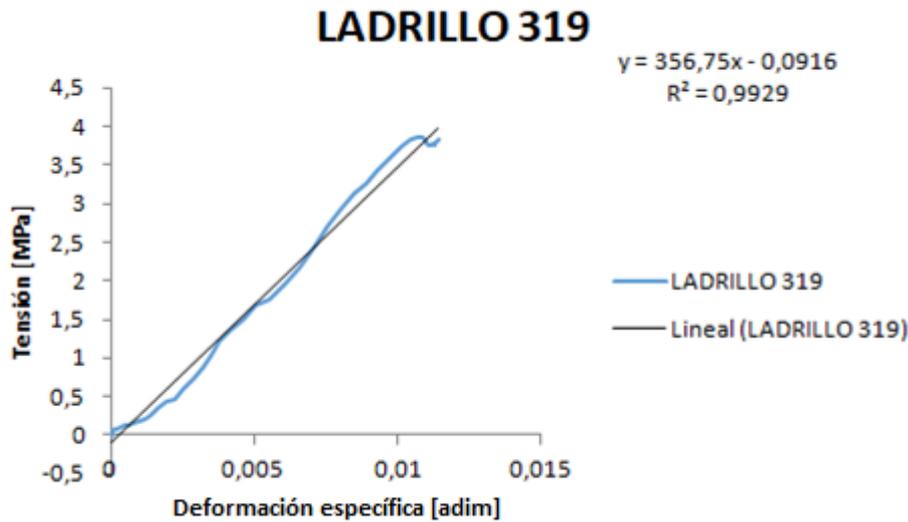


Figura 3: Curva Tensión-Deformación. L319.

Con los resultados de estos ensayos a compresión, se realizó un análisis estadístico consistente en la obtención de los parámetros de media, varianza, desviación, valores extremos, entre otros.

Para la obtención del módulo E se tomaron los datos de carga y desplazamiento registrados en los ensayos mediante una celda de carga y un flexímetro, se construyó la función Tensión-Deformación en hoja digital de cálculo, y aplicando línea de tendencia se obtuvo el valor de la pendiente en el segmento de mayor linealidad. Cabe aclarar que la primera parte de la curva sufre variaciones debidas a que la probeta está iniciando su proceso de toma de carga, y en el final (habida cuenta de la fragilidad de la cerámica como material estructural), se observan variaciones en la curva coincidentes con la aparición de fisuras en el material. Luego de efectuada la línea de tendencia se verifica la correlación con el parámetro R2, viendo que sea superior a 0,99 y se adopta como valor del módulo elástico longitudinal E a la pendiente de la recta (356.75 para L319 en la Figura 3). En dicha figura se han descartado los valores mencionados y correspondientes al segmento inicial y final de la curva real del ensayo.

También se realizaron ensayos de LCH a compresión, los cuales, se analizaron de manera similar a lo hecho con las probetas, en términos de la estimación del módulo E de Elasticidad Longitudinal, obteniéndose valores para la comparación de resultados por ambas metodologías.

Con los resultados de este proceso se obtuvo el rango de valores para el módulo de elasticidad de entre 646 y 1458 MPa. El valor medio utilizado en modelos A y B fue de 1052 MPa. Estos valores se utilizaron para configurar el material de los elementos de ambos modelos.

## 2.2 Modelos numéricos.

A continuación se detalla el proceso de elaboración de cada modelo numérico adoptado, definiendo las propiedades mecánicas de los materiales componentes, la forma geométrica seleccionada para representar el prototipo analizado, las condiciones de borde adoptadas para cada caso y la forma de compatibilizarlas con las condiciones reales ocurridas en los eventos experimentales: con el fin de reproducir en el modelo numérico las mismas condiciones de borde en el ladrillo, así como la forma de aplicación de la carga en concordancia con los

escalones de carga adoptados en los ensayos.

### 2.2.1 Modelo A: micro modelo de barras intersectas- sección transversal.

Consiste en un conjunto de elementos de barra finitos que representan las paredes del ladrillo hueco intersectándose entre sí formando la estructura de paredes horizontales y verticales que conforman la sección transversal del ladrillo en el prototipo real.

Con respecto a los espesores de los elementos de barra, se definieron en función a un valor medio calculado en base a un procedimiento de caracterización geométrica normalizada efectuado en la cara anterior y posterior de cada ladrillo, definiendo un valor de espesor de pared externa vertical, pared externa horizontal, pared interna vertical y pared interna horizontal.

Para la definición del material se definen los parámetros: módulo de Elasticidad, calculado a partir del ensayo experimental, mediante interpolación lineal de datos empíricos, coeficiente de Poisson obtenido a partir de los desplazamientos en dos direcciones medidos en el ensayo a compresión, relación constitutiva del ladrillo, calculada a partir de un listado de resultados que correlacionan carga con desplazamientos para un determinado instante del ensayo, tal como se observa en la Figura 4.

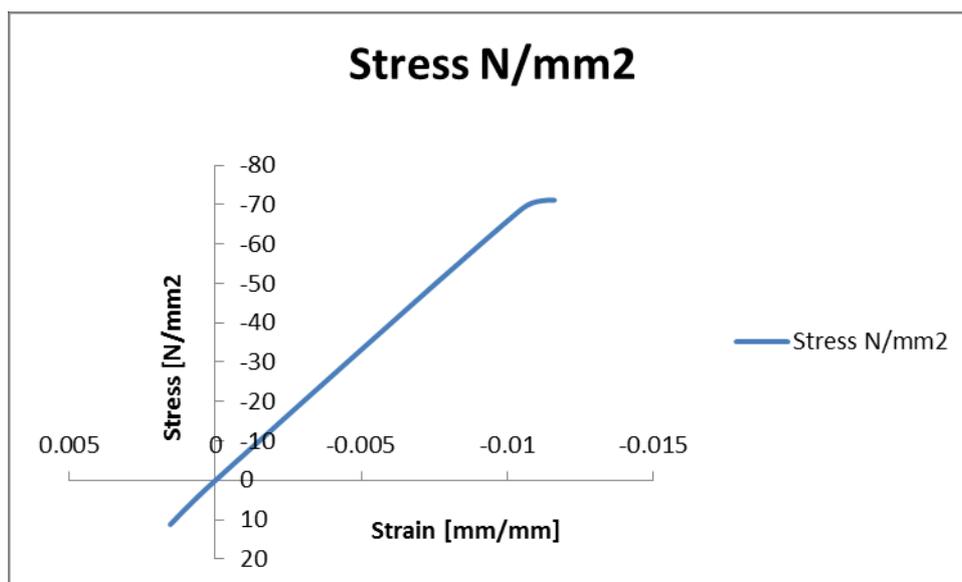


Figura 4: Relación constitutiva configurada para el micro modelo, para material cerámico considerado isótropo.

Para la aplicación de la carga, se considera una función carga tiempo representativo del proceso de aplicación de la carga, a la velocidad definida para el ensayo, utilizada a efectos de lograr varios estados de carga con menor demanda de recursos computacionales. La misma se aplica sobre la pared horizontal superior como patrón de carga discreto, para ajustar a la metodología real utilizada en los correspondientes ensayos a compresión. En la Figura 5 se pueden apreciar las condiciones de borde y la forma de aplicación de la carga.

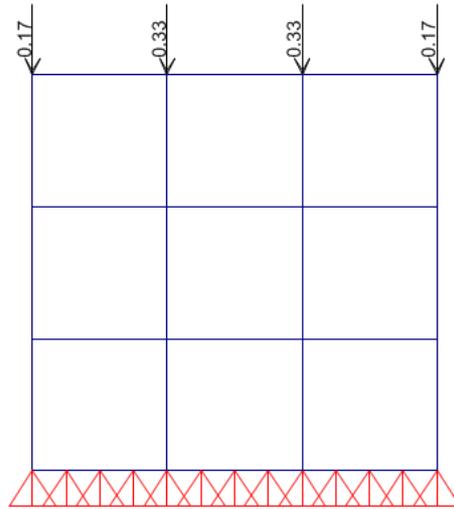


Figura 5: Configuración de condiciones de vinculo y aplicación de carga en modelo A.

### 2.2.2 Modelo B – Micro modelo de áreas intersectas.

El segundo modelo es una extensión del anterior por ser una intersección de elementos finitos de área, vinculados a través de nodos ubicados en aristas externas e intersecciones internas. La formulación del material es idéntica a la utilizada en el modelo A.

En este modelo denominado B, los vínculos del mampuesto se definieron conforme dos configuraciones: La primera es la definición y asignación de elementos de área tipo resortes “springs” a la cara horizontal inferior del ladrillo, la incorporación de los resortes permitiría simular el contacto friccional entre el ladrillo y la prensa (no de la placa de acero de la prensa). En la dirección normal a la cara de contacto (dirección de acción de cargas) se ha indicado un coeficiente de rigidez del resorte de  $10.000 \text{ kgf/cm}^2$  trabajando únicamente ante las sollicitaciones de compresión, mientras que la dirección paralela a la cara de contacto se definió un valor de  $100 \text{ kgf/cm}^2$  con el fin de restringir esfuerzos de tracción y compresión que se puedan generar por rozamiento de cabezal y mampuesto.

En la Tabla 6, se detallan las imágenes de configuración de los sistemas de vinculación definidos, lo cual ha permitido reproducir el comportamiento observado en el ensayo, en el cual ningún punto del mampuesto queda fijamente impedido de desplazarse. Asimismo en la Figura 7 se muestra una imagen del software donde se puede apreciar la disposición de los elementos de vinculación en el mampuesto.

Area Spring		Area Spring	
Spring T.type	Simple	Spring Type	Simple
Stiffness/Length2	10000.	Stiffness/Length2	100.
Springs Resists	Compression Only	Springs Resists	Tension and Compressi
Spring Tension Dir Type	Normal To Face	Spring Tension Dir Type	Parallel to Axes
Face	Bottom	Face	Bottom
Normal Orientation	Inward	Spring Direction	1

Tabla 6: Configuración de elementos de vinculación en SAP2000. Izquierda: Normal a la cara de contacto; Derecha: Paralela a la cara de contacto.

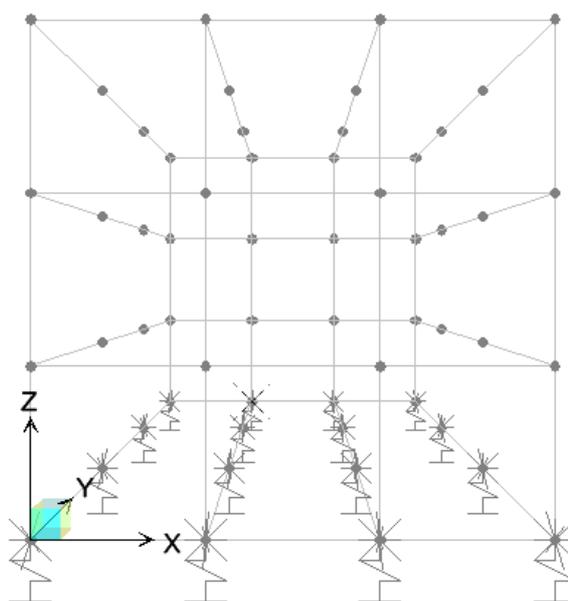


Figura 7: Disposición de los elementos de vinculación en el software. Modelo B – Macro modelo de área con Espesor equivalente.

### 2.2.3 Modelo C– macro modelo equivalente de área plana vertical.

A efectos de reducir el costo computacional y a expensas de una merma controlada en la precisión de los resultados se propone analizar el ensayo a compresión de un ladrillo cerámico hueco mediante un elemento plano de área de 4 nodos que cuenta con un espesor equivalente, calculado en primera instancia correlacionando la esbeltez de las paredes componentes del ladrillo con la esbeltez modificada del elemento.

Para la aplicación de la carga, se utiliza el procedimiento establecido en el modelo A. La misma se aplica sobre el elemento como patrón de carga superficial, según se muestra en la Figura 8.

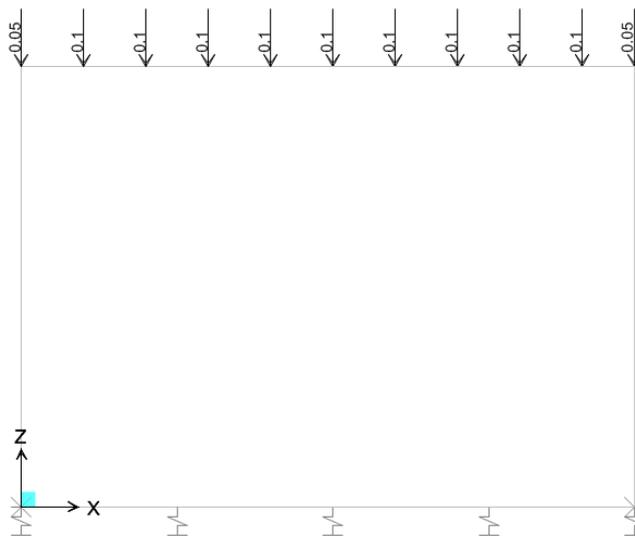


Figura 8: Configuración de aplicación de la carga y condiciones de borde en el macro-modelo representativo del mampuesto, modelo C.

Respecto a dichas condiciones de borde, se adopta lo siguiente: aplicación de un resorte puntual en cada uno de los extremos de magnitud idéntica a los utilizados en el modelo A. En la parte superior se disponen restricciones al desplazamiento en ambas direcciones paralelas a la base del ladrillo, para representar la fricción existente entre encabezado y cabezal de la prensa. Para el caso de carga adoptado, en ambos modelos se adopta lo descrito en la Figura 9, una rampa de carga adquirida a 5hz de frecuencia de muestreo en el ensayo experimental, que se incorpora a los modelos a través una función time-history que comanda el proceso de aplicación de la carga en el mismo.

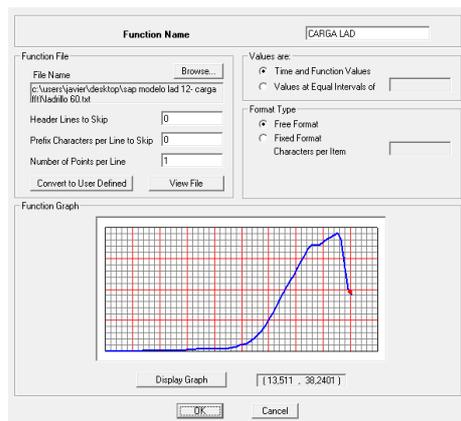


Figura 9: Configuración de rampa de la carga en los modelos A y B.

Cabe aclarar que el objeto utilizar la función time–history es para poder generar varios estados de carga a bajo costo computacional. Luego de logrado esto se analiza el modelo como un proceso de análisis estructural estático sin considerar efectos dinámicos en el modelo de elementos finitos.

La relación constitutiva del material para el Modelo B se establece considerando ortotropía en el material y los parámetros correspondientes se calculan en base a los resultados obtenidos en forma experimental. La Figura 10, muestra el panel de configuración de parámetros para el modelo C considerado ortótropo, junto con la relación constitutiva adoptada para el material.

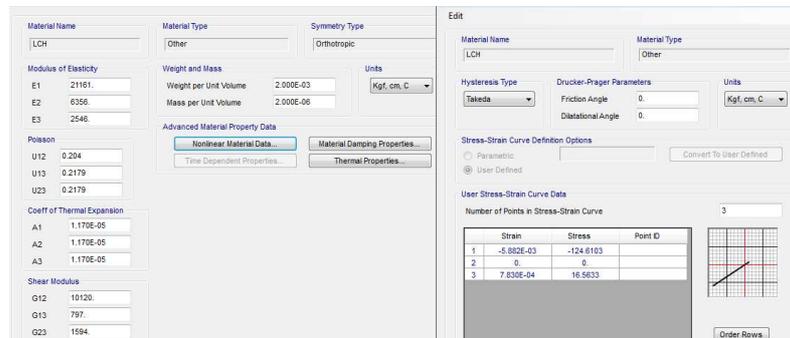


Figura 10: Configuración de parámetros constitutivos en el modelo C.

### 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Experimentalmente se puede constatar que durante el proceso de carga en el ensayo a compresión de estos mampuestos salvo caso de haber imperfecciones en el mampuesto como se muestra en la parte a) de la Figura 11, la primera falla ocurre en las paredes horizontales las cuales se desprenden por no resistir esfuerzos localizados de tracción los cuales ocurren por una combinación de solicitaciones de flexión y esfuerzo axial de tracción. Luego de esto las paredes externas al perder arriostramiento se deforman libremente y la carga se concentra en las paredes internas, las cuales al final del ensayo fallan por compresión. La Figura 11 muestra cómo se sucede la rotura en la mayoría de los ensayos de este tipo de mampuestos. En la imagen se puede ver una potencial falla inicial por esfuerzo de tracción y/ o corte en los laterales del mampuesto. Luego el sistema pierde estabilidad y alcanza el estado final de rotura.

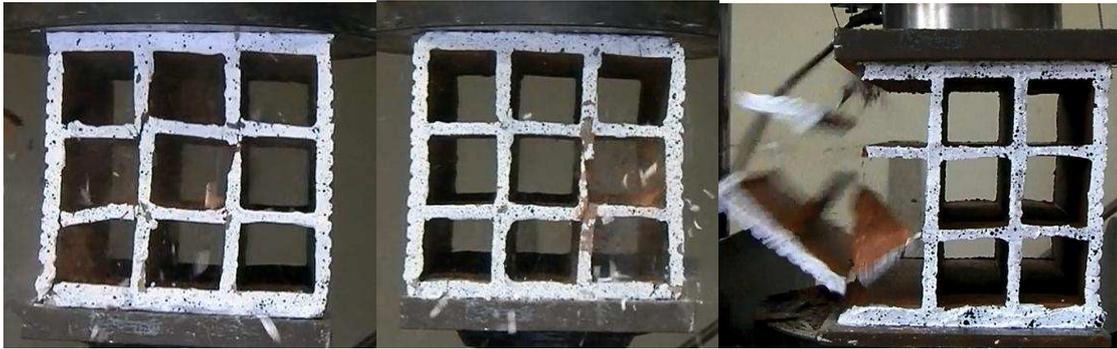


Figura 11: rotura de Mampuestos a Compresión.

Los modelos A y B fueron planteados como micro modelos a efectos de lograr concordancia entre el fenómeno observado en el experimento y lo analizado en el proceso numérico. La figura 12 se puede observar dicha concordancia entre resultados empíricos y numéricos, dada la similitud en el modo de falla que acusan tanto el modelo A como el modelo B.

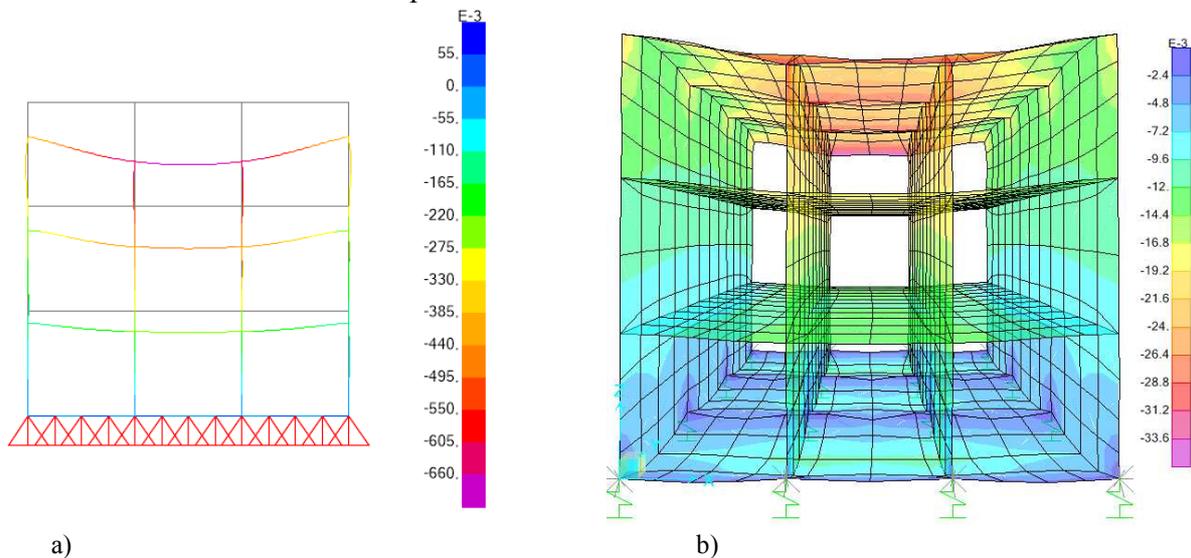


Figura 12: Desplazamientos Verticales: a) Modelo A, b) Modelo B.

En los resultados obtenidos para el modelo A se comparan gráficas de Carga-Desplazamiento para diferentes LCH ensayados a compresión en forma experimental con resultados numéricos a partir de propiedades del material presentadas en la sección 2.1.2 evaluando dichas propiedades en el rango de valores planteado. En la figura 13 se puede observar el grado de ajuste obtenido el cual es aceptable en términos de las comparaciones efectuadas, las cuales están definidas sobre la base de un tratamiento estadístico efectuado sobre los principales parámetros mecánicos y geométricos del modelo numérico.

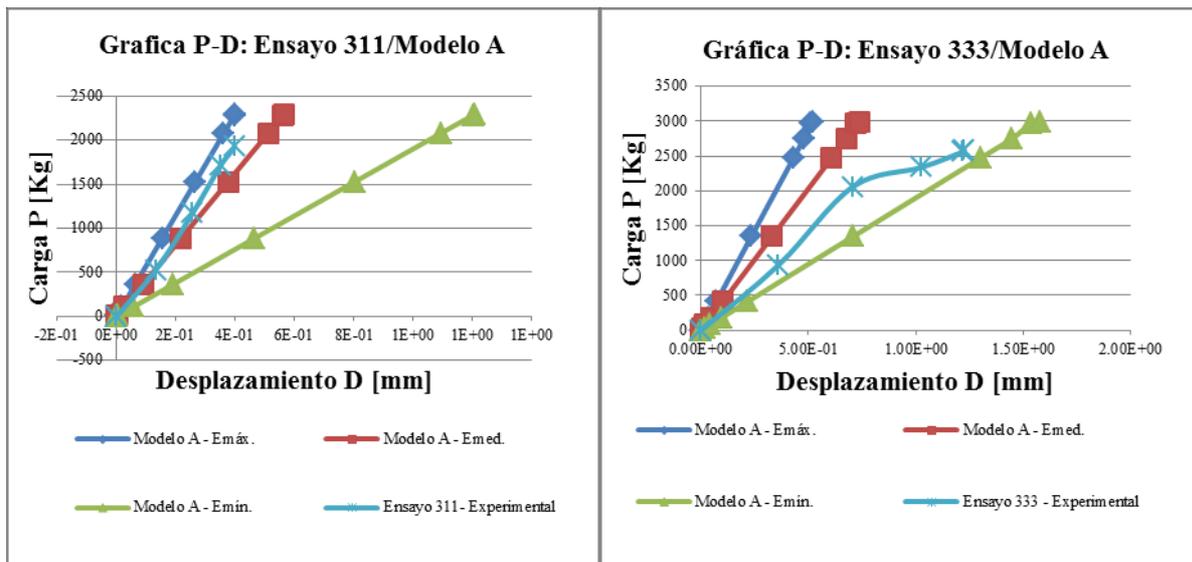


Figura 13: Comparación de resultados Experimentales y numéricos.

En la Figura14 los resultados análogos a lo expuesto en el párrafo anterior, esta vez comparando experimentos con el modelo B

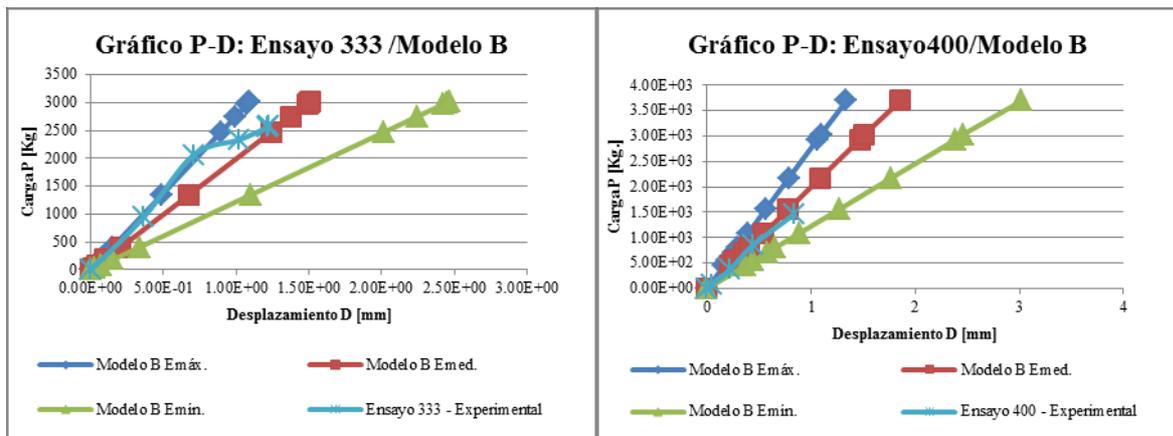


Figura 14: Comparación de resultados Experimentales y numéricos.

Se puede observar que si bien se aprecian ciertas diferencias al comparar los resultados experimentales con los resultados del modelo A, el ajuste con el modelo B resulta aceptable dado que los valores en su amplia mayoría caen dentro de los valores extremos obtenidos en el proceso numérico, definidos en términos del desvío estándar de los resultados experimentales.

En cuanto a los resultados obtenidos a partir del proceso numérico planteado en el modelo C, las comparaciones efectuadas mostraron cierto orden de dispersión, lo que lleva a la idea de prever para el modelo plano la incorporación de los efectos de la fisuración en estas piezas. Por otro lado se comparan resultados de carga vs. desplazamiento para diferentes magnitudes para los ensayos experimentales y para lo obtenido en la simulación numérica. En la figura 15 se puede observar que los resultados numéricos, obtenidos en términos de valores de carga y sus desplazamientos para un lote de más de 30 ensayos, en la región de cargas de baja magnitud muestran un ajuste aceptable frente a la nube de puntos obtenida de los ensayos experimentales. No es lo que ocurre para cargas de mayor magnitud por lo tanto la forma de

considerar la fisuración dentro del planteo numérico es un punto a desarrollar en futuros trabajos.

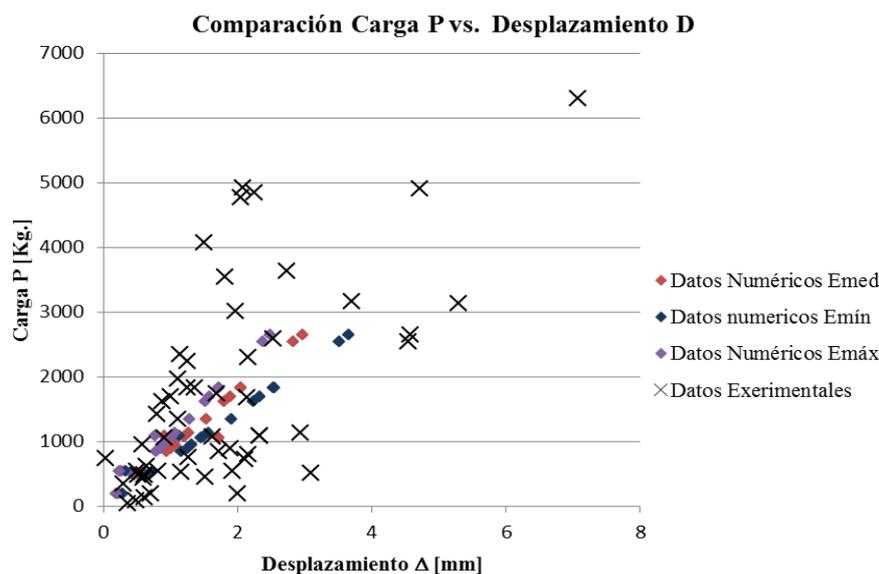


Figura 15: Comparación de resultados Experimentales y numéricos para el Modelo C.

#### 4 CONCLUSIONES

Se presentaron 3 formas de modelar mampuestos a efectos de efectuar comparaciones y definir los pasos futuros para la modelación de mamposterías de Ladrillos Cerámicos Huecos, para lo cual se pueden establecer las siguientes conclusiones: Los micro modelos A y B se mostraron confiables para valores de carga acotados al campo del comportamiento elástico del material, lo cual los hace aptos para estudiar los fenómenos localizados en este tipo de elementos estructurales, habida cuenta de que el modo de falla de estos ladrillos sugiere la presencia de cierto efecto de Pórtico entre sus paredes horizontales y verticales componentes así como también la importancia que tiene la resistencia a tracción del material cerámico en el comportamiento pos fisuración que tiene el sistema estudiado.

El modelo C ha mostrado ser bastante aceptable para valores de carga de rotura, previendo a futuro ajustar su precisión una vez que se incorpore al mencionado modelo criterios de falla que introduzcan los efectos de la fisuración localizada en el mampuesto. Esto es de suma importancia para poder lograr la formulación de un elemento plano el cual puede resultar adecuado en cuanto a costo computacional pero debe ser robusto en términos de representatividad del prototipo.

#### 4 AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo fue llevado adelante con la invaluable colaboración de los alumnos avanzados Matías Boni, Ariana Seufert, Ricardo Miranda, Maximiliano Galván y Maia Metraillier, integrantes del proyecto de investigación de optimización estructural en viviendas sociales de mamposterías que se lleva a cabo en la facultad de ingeniería de la universidad Nacional de Misiones, a la cual se le agradece la posibilidad y el espacio brindado para el desarrollo de la actividad de investigación.

## REFERENCIAS

- Duarte J., Reinert H., Gatelli F., Ares A., Moller O., Simulación Numérica De Ensayos Mecánicos En Mampuestos Regionales De Misiones, Argentina, XXI Congreso sobre métodos numéricos, Actas de Mecánica Computacional, Vol XXXIII, ISSN 1666-6070, Bariloche, Rio Negro, Argentina. (2014).
- Huu-Luyen N., Marwan Al H., Emeriault F., Method based on digital image correlation for damage assessment in masonry structures. *Engineering Structures*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.021>, 0141-0296/©2014 Elsevier Ltd. All rights reserved. (2014).
- López-Alba E, López-García R, Dorado R, Díaz F. A. Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. *XIX Congreso Nacional De Ingeniería Mecánica*. ISSN-0212-5072. Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Castellón, España. (2012).
- López-Alba E, López-García R, Dorado R, Díaz F. A. Análisis de deformaciones mediante correlación digital de imágenes en probetas planas. *XVIII Congreso Nacional De Ingeniería Mecánica*. ISSN-0212-5072. Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Castellón, España. (2010).
- CIRSOC 501-E *Reglamento Empírico para Construcciones de Mampostería de Bajo Compromiso Estructural*, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. (2013).
- Oller S., *Numerical simulation of mechanical behavior of composite materials*, Centre Internacional de mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), School of Civil Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain, Springer. (2014).
- 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.
- Torrisoni, G. Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería. *Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo*, 2012.