

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CELDAS DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE APLICACIÓN DE TÉCNICAS BASADAS EN XFEM

STRUCTURAL ANALYSIS OF MASONRY CELLS BY APPLYING TECHNIQUES BASED ON XFEM

Javier A. Duarte^a, Matias Boni^a, Cinthia L. Ferreyra^a, Ariana Seufert^a, Alicia E. Ares^b y
Oscar Möller^c

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

^bIMAM, UNaM, CONICET, FCEQyN, Félix de Azara 1552, N3300LQD, Posadas, Argentina.

^cInstituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina,
moller@fceia.unr.edu.ar

Palabras clave: Estructura, Abañilería, Mecánica Computacional, XFEM.

Resumen. Con el objetivo de disminuir costos y lograr un mejor aprovechamiento de los recursos materiales para la ejecución de construcciones edilicias, en el análisis estructural se incorporan los cerramientos de mampostería como elementos portantes generando modificaciones en los estados tensionales. En la Provincia de Misiones se utilizan mamposterías de ladrillos huecos fabricados con materiales locales poco caracterizados y sistematizados. Los modos de falla incluyen fracturas y dislocaciones debido a la fragilidad de los materiales, que se deben tener en cuenta en la modelización numérica. Se presenta en este trabajo la simulación numérica del comportamiento de celdas de mampostería de ladrillos huecos fabricados en la región, utilizando un modelo de elementos finitos extendidos (XFEM). El modelo es ajustado con un conjunto de resultados experimentales de celdas de mampostería realizados en el Laboratorio de Estructuras de FIO-UNaM.

Keywords: Structures, Masonry, Computational Mechanics, XFEM.

Abstract. With the objective of reducing costs and achieving a better use of material resources for the execution of building constructions, in the structural analysis the masonry walls are incorporated as load-bearing elements generating changes in the tensional states. In the Province of Misiones hollow bricks masonry manufactured with local materials little characterized and systematized are used. Failure modes include fractures and dislocations due to the fragility of the materials, which must be taken into account in numerical modeling. This paper presents the numerical simulation of the behavior of masonry cells of hollow bricks manufactured in the region, using an extended finite element model (XFEM). The model is adjusted with a set of experimental results of masonry cells made in the FIO-UNaM Structures Laboratory.

1 INTRODUCCIÓN

La simulación numérica tiene importantes aplicaciones en los procesos de optimización de estructuras por la posibilidad de obtener numerosos resultados en tiempos reducidos, evitando el costo y tiempo de gran cantidad de ensayos destructivos (Zienkiewicz et al., 1991).

En el caso de los sistemas de mampostería de Ladrillos Cerámicos Huecos (LCH), constituida por los ladrillos y el mortero de junta, los modos de falla característicos son: (a) fallas por rotura en LCH; (b) fallas por rotura del mortero de junta y (c) fallas por desprendimiento de la interfaz LCH-mortero.

En las juntas verticales la unión entre ladrillos y mortero se ve reforzada por el efecto de adherencia por corte que resulta de la intrusión del mortero dentro de los tubos horizontales del LCH, con lo cual la falla probable en las juntas es preponderantemente horizontal. Luego, en la junta horizontal, el efecto de adherencia por corte se presenta en menor escala y en la dirección transversal del muro.

Es necesario contar con información y resultados experimentales a efectos de calibrar los modelos numéricos que permitan estudiar estos modos de falla, luego de haber caracterizado correctamente las propiedades físicas y mecánicas de los materiales componentes.

El presente trabajo pretende mostrar resultados de un modelo basado en un arreglo de mampuestos unidos por mortero de junta, el cual es sometido a un ensayo normalizado de compresión. La simulación numérica se realiza utilizando una plataforma multi-física que permite aplicar el método de elementos finitos extendido (XFEM) (Moes et al., 1999) con el objetivo de reproducir el comportamiento de dicha “celda” en el campo elástico, pasando luego de las primeras fisuras al estado plástico para intentar comparar patrones y secuencias de agrietamiento en el modelo analizado con los resultados obtenidos en forma experimental.

2 METODOLOGÍA

El presente trabajo consiste en replicar una celda (Figura 1-a) compuesta por un arreglo de LCH unidos por mortero de junta en forma vertical y horizontal cubriendo parcialmente la superficie del perímetro de los mismos (Oller et al., 2014). El prototipo posee dos encabezamientos normalizados según normas IRAM ejecutados en la parte superior e inferior del mencionado elemento. La Figura 1-b muestra el modelo adoptado.

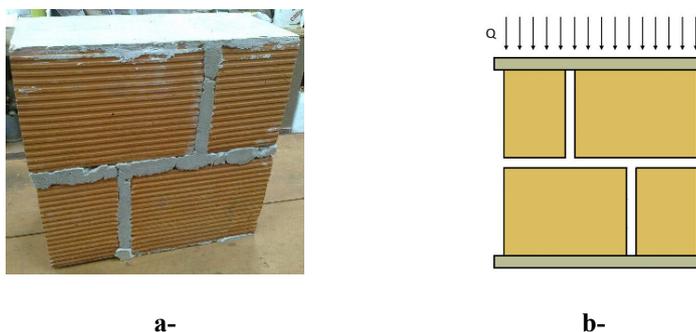


Figura 1: Celda. 1-a: Celda del ensayo físico. 1-b: Modelo

En la modelación de la celda se utilizó una plataforma multi-física de análisis numérico para resolución de problemas mecánicos de tipo no lineal y con posibilidad de incorporar interpolación en elementos dislocados a través del método de elementos finitos extendido (XFEM). Con el objetivo de representar la distribución de la carga y el apoyo rígido, se optó por disponer en el modelo dos placas de Acero SAE-1010 que aportan la rigidez suficiente al

sistema para simular este efecto. Para analizar los elementos mediante XFEM, la carga estática se aplica en forma lineal en el encabezamiento superior del conjunto. Las unidades utilizadas para el modelo son las consistentes con el Sistema Internacional.

Los pasos efectuados para la modelación del problema se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 2.

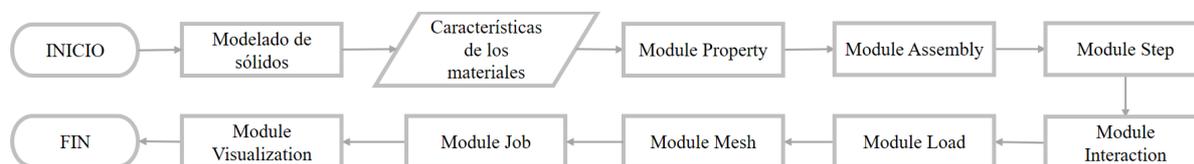


Figura 2: Secuencia de modelación

Modelado de sólidos: la Figura 3 muestra la modelación de los elementos componentes por medio del software AutCad, para luego exportarlo a Abaqus.

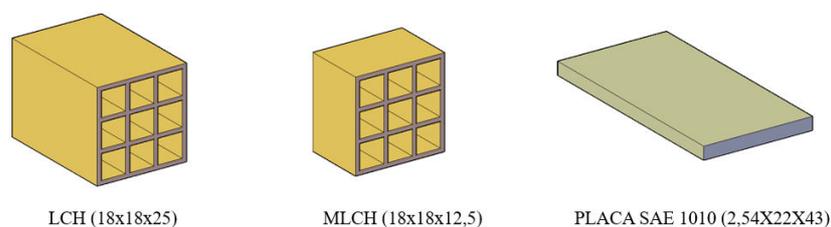


Figura 3: Elementos sólidos a exportar (en cm).

Características de los materiales: los parámetros se obtienen a partir de un análisis estadístico basado en los datos adquiridos de los ensayos físicos. Para la cerámica y el mortero: Densidad, Módulo Elástico de Young, Módulo de Poisson, Resistencia a tracción, Energía de Fractura experimental y factores de intensidad de tensión (Sukumar et al., 2000). La Figura 4 muestra los distintos ensayos físicos realizados: ensayo a compresión de una probeta cilíndrica del material cerámica (a), ensayo a tracción directa también para el material cerámica (b) y la probeta del ensayo a flexión del material mortero (c).

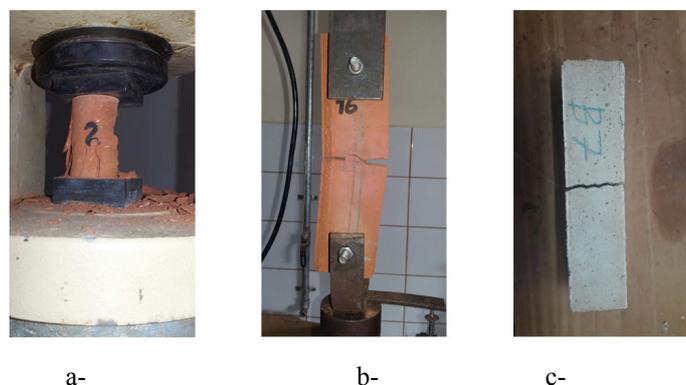


Figura 4: Ensayos físicos. a: Ensayo a compresión probeta cerámica. b: Ensayo a tracción directa probeta cerámica. c: Probeta de mortero del ensayo a flexión.

Se procesan los datos siguiendo las especificaciones de normas IRAM referidas a la geometría de las muestras y a valores de carga y deformaciones en función del tiempo. En

algunos ensayos se pudo relevar el inicio de la fisuración, aunque la cantidad no es suficiente para efectuar una evaluación probabilística. Seguidamente en la Figura 5 se presentan curvas de tensión – deformación específica de los ensayos a compresión de la probeta de cerámica (a) y del ensayo a flexión de la probeta de mortero (b).

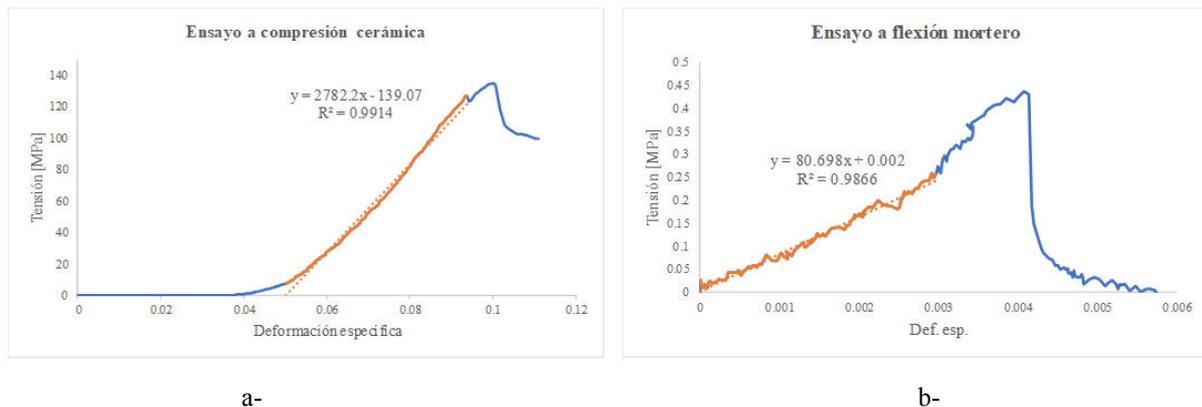


Figura 5: Curvas tensión-deformación de ensayos físicos. a: Ensayo a compresión cerámica. b: Ensayo a flexión del mortero.

Los resultados de ensayos a compresión de muestras cerámicas muestran al inicio una zona donde se produce el acomodamiento del cabezal hasta el comienzo de la toma de carga adicional. Ese sector no se tiene en cuenta, y el interés se focaliza en los tramos que pueden ser descriptos de manera adecuada por medio de una recta, la cual se define con un valor de regresión de 0.99 tomando la mayor cantidad de datos experimentales posibles.

Los resultados de ensayos a flexión de probetas de mortero presentan dos zonas definidas con pendientes diferentes entre las cuales se presenta un pico de tensión seguido por un descenso en la resistencia.

Las linealizaciones sirvieron de base para la obtención de valores de módulos de elasticidad, así como de limitantes de áreas para el cálculo de valores de energía de fractura de acuerdo con la ec.(1)

$$E_{fractura} = \frac{1}{A_t} \int \sigma dx \quad (1)$$

donde A_t es el área de la sección transversal de la probeta.

Respecto de las curvas constitutivas de los materiales modelados, se adoptaron valores promedio de los resultados experimentales, ver Tabla 1, que se utilizan en el gráfico de la Figura 6 para el material cerámico.

Valores Promedios				
	Carga [N]	Tensión [N/m ²]	Deformación específica	E [N/m ²]
Tracción Rotura	1.07E+03	2.53E+06	4.61E-02	5.49E+07
Compresión Fisuración	6.56E+03	1.34E+07	1.66E-02	8.06E+08
Compresión Rotura	8.88E+03	1.66E+07	2.35E-02	7.07E+08

Tabla 1: Valores promedios del material cerámico

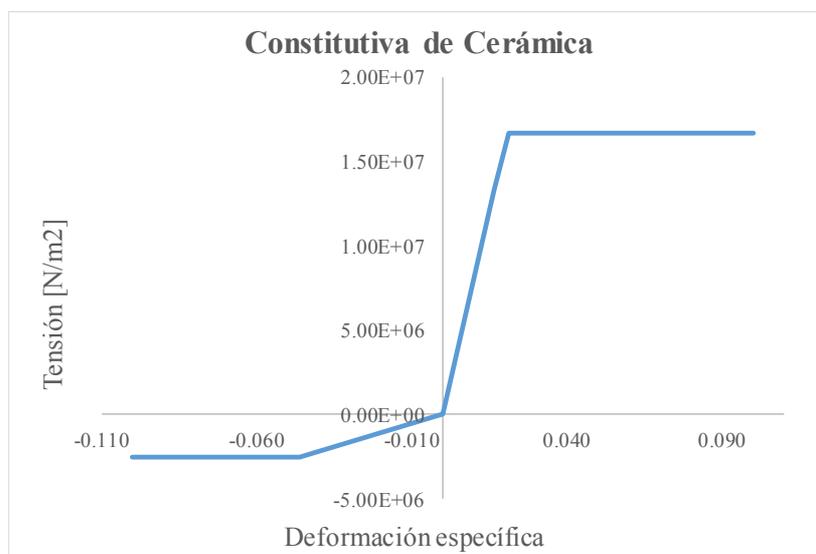


Figura 6: Relación constitutiva para el material cerámico

En la Tabla 2 se resumen los parámetros físicos de los materiales empleados en el modelo.

Cerámica		Mortero		SAE-1010	
Densidad	2.00E+03 kg/m ³	Densidad	1.70E+03 kg/m ³	Densidad	7.85E+03 kg/m ³
E _{comp}	8.06E+08 N/m ²	E _{comp}	8.13E+07 N/m ²	E	2.00E+11 N/m ²
Poisson	0.21	Poisson	0.21	Poisson	0.30
Max damage	2.53E+06 N/m ²	Max damage	3.60E+05 N/m ²	f _y	3.60E+08 N/m ²
Energy	2.00E+04 N/m	Energy	3.00E+04 N/m		

Tabla 2: Características de los materiales

Módulo de propiedades: se configuran los materiales utilizados, con los parámetros tabulados anteriormente. Se definen secciones para las cuales se asigna el material correspondiente a cada sólido.

Módulo de ensamble: se acopla la geometría del modelo como se observa en la Figura 7.

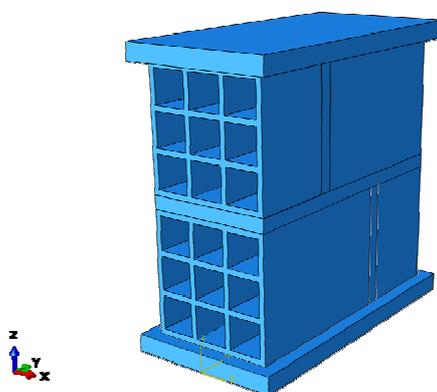


Figura 7: Celda de Mampostería modelada en plataforma multi-física.

Módulo de pasos: se define un análisis estático lineal, con 1000 incrementos como máximo de paso o escalón de tiempo unitario.

Módulo de interacciones: se configuraron las interacciones entre superficies: LCH con Placas, LCH con Mortero y Mortero con Placas.

Para estas interacciones se elige un contacto general con las siguientes características:

Comportamiento Tangencial: se define una anisotropía en cuanto al coeficiente de fricción en dirección longitudinal 0.3 y transversal 0.1. Se limita el esfuerzo tangencial a 200N y se especifica una distancia absoluta de 0,001m en cuanto al desplazamiento elástico.

Comportamiento Normal: se utiliza el sobre cierre de presión “hard contact” la cual minimiza la penetración de la superficie esclava en la superficie maestra en las ubicaciones de restricción y no permite la transferencia de tensión de tracción a través de la interfaz.

Además, en este módulo se configuran los sólidos que van a tener nodos enriquecidos por XFEM. El método de elementos finitos extendido plantea una extensión de las funciones de forma utilizadas para la interpolación del campo de desplazamientos del modelo (Cordero et al., 2010). Este punto del análisis se basa en incluir funciones de enriquecimiento de nodos en formato level-set (funciones de salto discreto) que se activan para un valor asignado de esfuerzo de tracción en los elementos de los modelos. Por razones de costo computacional, se indicaron las zonas de inicio de fisuración o punta de grieta en los lugares donde se manifestaron en los ensayos de laboratorio, utilizando el espesor de pared del LCH para definir las superficies que intersectan al sólido.

A continuación, se resume la formulación matemática de esta parte del problema

$$\phi(x) \begin{cases} > 0 & x \in \Omega_1 \\ = 0 & x \in \Gamma_{\text{int}} \\ < 0 & x \in \Omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$u_h = \sum_{i=1}^{N_{\text{point}}} N_i u_i \quad (3)$$

$$R = \sum_{i \in N_{\text{enr}}} N_i |\phi_i| - \sum_{i \in N_{\text{enr}}} N_i \phi_i \quad (4)$$

$$u(x) = \sum_{i=1}^{N_{\text{point}}} N_i u_i + \sum_{j \in N_{\text{enr}}} R N_j a_j \quad (5)$$

La ecuación (2) describe la distancia en formato level-set definida para el dominio circundante a la interfaz entre los nuevos dominios una vez que ha ocurrido la fractura del material. La ecuación (3) representa el campo de desplazamientos interpolado sobre la base de FEM. La ecuación (4) es la encargada de activar la discontinuidad necesaria para la definición de la interfaz en la zona fracturada. La ecuación (5) es la utilizada para interpolar el campo de desplazamientos considerando las zonas de nodos enriquecidos por XFEM.

Módulo de carga: la carga se modela como un sistema de fuerzas superficial uniforme y constante actuando en la parte superior del modelo. Se configura con un valor total (60.000N) que luego es distribuida en el área indicada. Respecto de las condiciones de borde, en forma global, se asignan restricciones a desplazamientos en la placa inferior, ver Figura 8.

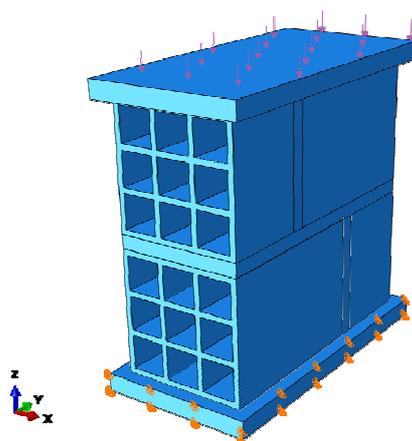


Figura 8: Carga y restricciones

Módulo de mallado: se utilizan elementos tipo C3D8R, ver Figura 9-a, los cuales comprenden un hexaedro lineal de 8 nodos, que contempla integración reducida reduciendo el costo computacional utilizando sólo un punto de integración. Para controlar el error de grandes desplazamientos que poseen los C3D8R, la plataforma utilizada posee un control llamado reloj de arena, el cual permite reducir el error en la interpolación del campo de desplazamientos. Este tipo de elemento se utiliza para los mampuestos, el mortero y las placas de carga y apoyo, como se muestra en la Figura 9-b.

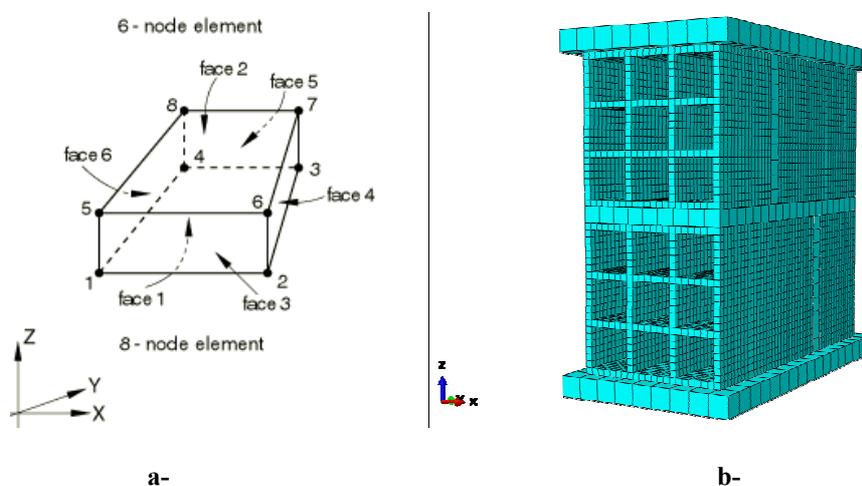


Figura 9: Mallado. a: Elemento C3D8R. b: Malla de la celda.

Con la finalidad de tener una distribución de elementos homogénea se emplea un control de malla hexaedro dominado, combinado con una especificación del tamaño global de los elementos que corresponde a los espesores de paredes de los LCH, de juntas de mortero y de placas.

Módulo de ejecución: en este paso se configuran los recursos computacionales disponibles para el análisis y la precisión de los resultados de cada nodo.

Módulo de visualización: se utiliza para extraer los resultados del análisis del modelo, presentando curvas, tablas y diagramas cromáticos de los outputs configurados en el Module Step. (U, S, STATUS XFEM, PHILSM).

3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el presente trabajo de simulación numérica. La Figura 10-a muestra los desplazamientos que ocurren en el modelo numérico, que se comparan con los medidos experimentalmente en la Figura 10-b. Luego se muestran mapas de trayectorias de fisuración y concentración de tensiones. Se observa concordancia aceptable entre valores obtenidos numéricamente y los medidos en experimentos de laboratorio.

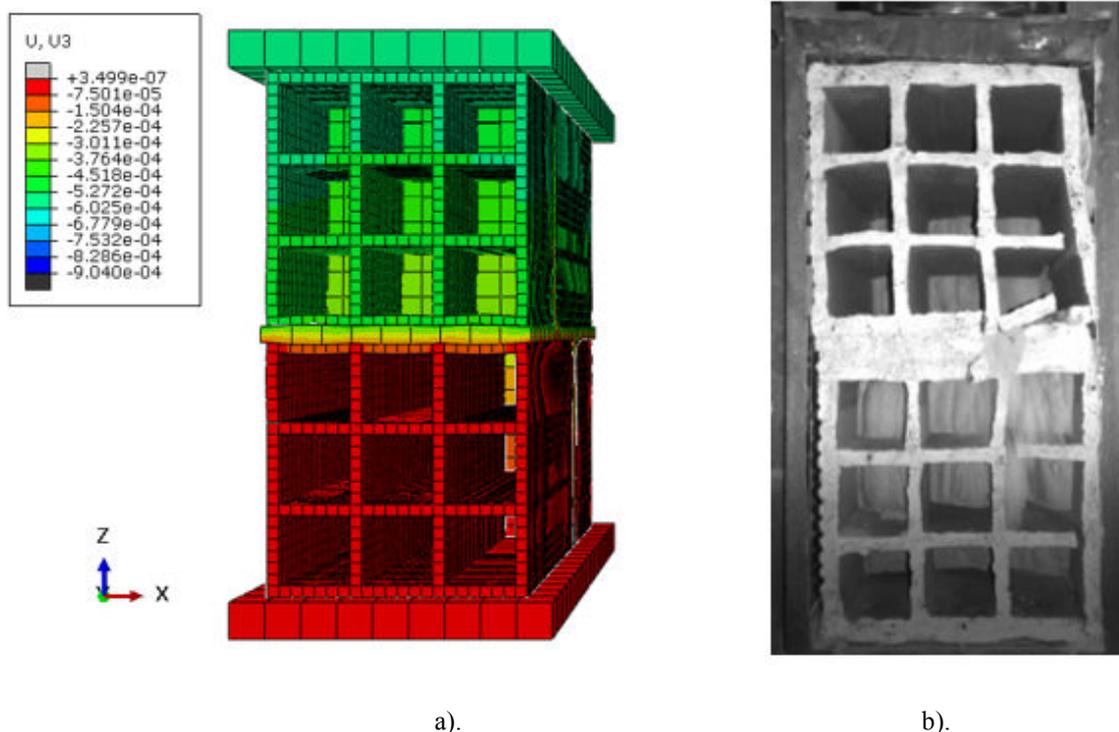


Figura 10: Imágenes del prototipo analizado. a) U3 en modelo numérico. b) Ensayo mecánico de laboratorio.

También se puede apreciar el acortamiento global de la celda tal cual sucede en el ensayo a compresión efectuado en laboratorio, observando una correlación aceptable entre modelo y prototipo. Se debe señalar que si bien los patrones de rotura no son exactos, se muestran concordantes en forma y posición geométrica dentro del modelo. Esto puede deberse a la necesidad de revisar con mayor detalle los parámetros utilizados para la configuración de los materiales.

Por otro lado, se revisó la concordancia de patrones de fisuración en el modelo respecto de lo observado en los experimentos. Según se observa en la Figura 11, se puede confirmar una proximidad razonable entre ambos al haber indicado en el modelo las zonas de inicio de grieta según lo observado en los ensayos. Al no indicar dichas zonas enriquecidas, el modelo se fisura pero su costo computacional es considerablemente mayor.

La Figura 12 muestra los valores escalares de energía de distorsión según criterio de Von Mises, donde se puede observar considerable actividad en la zona de interface entre mampuestos y juntas de mortero en la base del mampuesto superior del modelo.

Además de lo expuesto se destaca el hecho de poder recolectar más información como ser lo pertinente a esfuerzos de contacto en la zona de interface entre mortero y mampuesto, la

energía unitaria disipada en las zonas de generación de fisuras, y la tasa total de liberación de energía en las grietas.

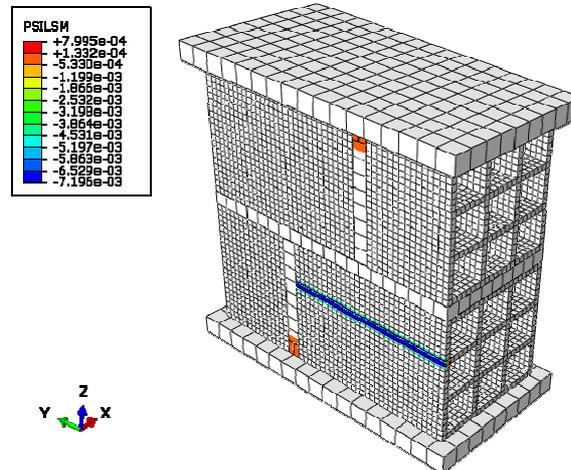


Figura 11: Trayectos de fisuras y grietas en el modelo numérico.

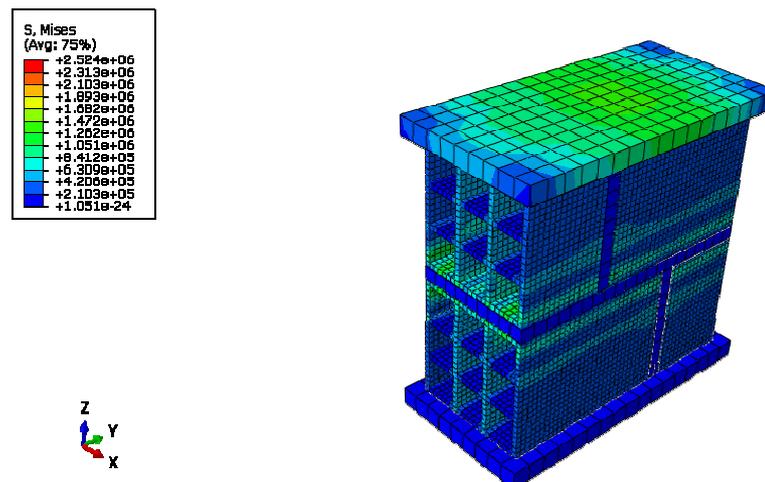


Figura 12: Energía de distorsión según Von Mises.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se modelaron celdas de mampostería y se utilizó la técnica XFEM para reproducir los patrones posibles de fisuración en elementos compuestos por materiales de comportamiento frágil. La aplicación de XFEM al análisis de elementos finitos es adecuada para el caso de simulación numérica de materiales frágiles y los resultados numéricos ajustan razonablemente a los datos obtenidos de forma experimental. A futuro se pretende mejorar la configuración del modelo para poder efectuar simulaciones en paneles de mampostería y a mediano plazo poder calibrar la técnica para utilizarla en modelos de mamposterías efectuadas con elementos equivalentes que den por resultados modelos numéricos de igual eficiencia, menor costo computacional y mayor aplicabilidad en el medio profesional a efectos de poder resolver problemas de diseño estructural en sistemas de mampostería con mejor precisión.

REFERENCIAS

- Cordero, F., Díez, P. XFEM+: una modificación de XFEM para mejorar la precisión de los flujos locales en problemas de difusión con conductividades muy distintas. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 26(2): 121-133, 2010.
- Moes, N., Dolbow, J., Belytschko, T. A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 46: 131-150, 1999.
- 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.
- Sukumar, N., Moes, N., Moran, B. and Belytschko, T. Extended finite element method for three-dimensional crack modelling. *Int. J Numer. Meth. Eng.*, 48(11):1549-1570, 2000.
- Zienkiewicz, O.C., and Taylor, R.L. *The finite element method, volume II*. McGraw Hill, 1991.