

Análisis Tenso-Deformacional A Compresión De Muretes De Ladrillos Con El Empleo De Técnicas De Modelación Numérica

1

Tenso-Deformational Analysis Under Compression Of Brick Low Walls Using Numerical Modeling Techniques

Autores

Javier Alejandro Tejeda Carreras

Ing. Civil, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

javiertejedakremi@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-8500-9395>

Alejandro Socorro Álvarez

Ing. Civil, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

alejandsocalv@civil.cujae.edu.cu

<https://orcid.org/0009-0009-5936-7409>

Janet Otmara Martínez Cid

Dra. Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

jcid0716@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1969-1553>

Nelson Fundora Sautié

Dr. Ciencias, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

nfsautie@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0452-8964>

Análisis Tenso-Deformacional A Compresión De Muretes De Ladrillos Con El Empleo De Técnicas De Modelación Numérica

Tenso-Deformational Analysis Under Compression Of Brick Low Walls Using Numerical Modeling Techniques

RESUMEN

La resistencia a compresión de la mampostería de ladrillo es determinada mediante la realización de ensayos de laboratorio a prismas y muretes o a través de formulaciones empíricas. El desarrollo computacional ha permitido el empleo de modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos como alternativa económicamente superior para el análisis del comportamiento de la mampostería. En el presente trabajo se obtiene un modelo matemático computacional, calibrado y validado a partir de los resultados experimentales de Thamboo en 2019 para el estudio de muretes de mampostería de ladrillo, usando el software ABAQUS. Se describen las invariantes del proceso de modelación del mismo: geometría, materiales, condiciones de borde y carga. Se realiza el análisis tenso-deformacional de los resultados derivados de la simulación computacional, donde son presentadas las tensiones verticales y transversales, las deformaciones plásticas y los desplazamientos. Se proporcionan resultados que reproducen correctamente el comportamiento estructural y el modo de falla del murete de ladrillos. Este modo de falla está caracterizado por grietas verticales paralelas a la dirección de la carga en las caras frontal y lateral de las muestras, originadas en la interfaz ladrillo-mortero y propagadas a través de los ladrillos.

Palabras Clave : Abaqus, análisis tenso-deformacional, Modelo de Daño Plástico, Muretes de ladrillo.

ABSTRACT

The compressive strength of masonry is determined by carrying out laboratory tests on prisms and wallets or through empirical formulations. Computational development has allowed the use of numerical models based on the Finite Element Method as an economically superior alternative for determining this property. In the present work, a computational model is obtained, calibrated and validated from the experimental results of Thamboo in 2019 for the study of brick masonry wallets, using the ABAQUS software. The invariants of the modeling process are described: geometry, materials, boundary conditions and loads. The stress-strain analysis of the results derived from the computational simulation is carried out, where the vertical and transverse stresses, plastic deformations and displacements are presented. Results are provided that correctly reproduce the structural behaviour and failure mode of the brick wall. This failure mode is characterized by vertical cracks parallel to the loading direction on the front and side faces of the samples, originating at the brick-mortar interface and propagating through the bricks.

Keywords: Abaqus, Brick low walls, Concrete Damaged Plasticity, Stress-Strain analysis.

Nota Editorial: Recibido: 13 de Febrero 2025 Aceptado: 10 de Mayo 2025

1. INTRODUCCIÓN

Cuba cuenta con una amplia tradición en el empleo de la mampostería de ladrillos para la construcción de viviendas y edificios sociales, con obras relevantes que datan de la primera mitad del siglo XX. En la actualidad, a pesar de no ser la pieza más utilizada en la construcción de muros, pues el bloque tiene el protagonismo, los ladrillos constituyen una vía conveniente para la construcción de viviendas dada la posibilidad del empleo de materiales locales para su conformación, así como la baja complejidad de su proceso de fabricación. Internacionalmente el ladrillo es ampliamente utilizado en América Latina por lo que se hace necesario rescatar esta técnica constructiva en Cuba, lo que obliga al desarrollo de investigaciones dirigidas a este fin.

La resistencia a compresión de la mampostería formada por ladrillos puede ser determinada a partir de ensayos experimentales en prismas o en muretes, o utilizando expresiones empíricas reflejadas en las normas [1-4]. La Norma Cubana de Mampostería NC 774: 2012 [4], si bien incluye el prisma y la ecuación empírica, no contempla la obtención de la resistencia a compresión de muros de ladrillos mediante muretes. El murete de ladrillos es un muro pequeño con varias hiladas de ladrillo y su ancho consiste, habitualmente, de tres o más ladrillos. De manera general, el murete contiene más unidades de mampostería que el prisma y permite un análisis más cercano al comportamiento de los muros con respecto al que puede alcanzarse con los prismas, ya que en los muretes se incluye la presencia de las juntas verticales de mortero. Lo anterior influye en que se reporte que la resistencia a compresión obtenida con prismas es aproximadamente un 25% mayor que la alcanzada con muretes, lo que permite definir factores de correlación entre uno y otro [5, 7].

La forma de fallo a compresión de los muretes es aproximadamente similar para diferentes espesores de los especímenes y se caracteriza por grietas verticales paralelas a la dirección de la carga en las caras frontal y lateral de las muestras, originadas en la interfaz ladrillo-mortero y propagadas a través del centro de los ladrillos. Las curvas de tensión-deformación de compresión de los muretes muestran un comportamiento aproximadamente lineal hasta el 60-70% de la resistencia máxima y, posteriormente, se observa un comportamiento no lineal hasta el fallo [7, 8]. Investigaciones han demostrado que la respuesta estructural de los muros de ladrillos depende de diversos parámetros tales como las resistencias a compresión de las unidades y del mortero, el espesor de las juntas de mortero, la forma de las unidades, el tipo de espécimen usado en el ensayo (prisma o murete) y la relación de esbeltez de la prueba [5, 6].

En las dos últimas décadas, con el empleo del Método de los Elementos Finitos, se han desarrollado modelos numéricos que permiten describir el comportamiento no lineal de la mampostería de ladrillos, así como su forma de fallo [7, 9, 10]. Por medio de estas simulaciones matemáticas, las cuales son calibradas y validadas mediante resultados experimentales en muretes bajo compresión uniaxial, se obtiene información sobre el comportamiento estructural y se realizan estudios paramétricos que derivan en un análisis tenso-deformacional y comparaciones con resultados empíricos [5, 7, 9, 11]. Se destaca el empleo del programa ABAQUS como herramienta de modelación computacional [7, 10] y el Modelo de Daño Plástico como modelo constitutivo para describir el comportamiento del material durante su rango no lineal [10].

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo matemático computacional con el empleo del programa ABAQUS, calibrado y validado a partir de los resultados experimentales obtenidos por Thamboo en 2019 [5] para el estudio de muretes de mampostería de ladrillo. Se describen las invariantes del proceso de modelación del mismo: geometría, materiales, condiciones de borde y carga. En la representación de los materiales se emplea el Modelo de Daño Plástico como ley constitutiva para describir el comportamiento no lineal de estos y se realiza el análisis tenso-deformacional en términos de tensiones verticales y transversales, deformaciones plásticas y desplazamientos.

Lo anterior va dirigido a realizar a futuro, a partir del modelo calibrado y validado, investigaciones con el empleo de materiales del país, que permitan la determinación de la influencia de los parámetros ya mencionados en la resistencia a compresión de muros de ladrillo. Los futuros resultados permitirán definir pautas e indicaciones actualizadas para la Norma Cubana de Mampostería NC 774: 2012 [4], que incluyan además de prismas, los muretes y que estén encaminadas a rescatar el empleo de este material y mejorar la calidad de las construcciones a partir del correcto empleo de unidades y morteros.

2. DESARROLLO

Implementación del modelo numérico

Para el análisis tenso-deformacional realizado al murete de ladrillos se toma como patrón de comparación los ensayos realizados por Thamboo, (2019) [5]. Se ensayaron durante la investigación un total de 50 prismas y 40 muretes; en el caso de los muretes, fueron construidos según las indicaciones del Eurocódigo 6 [3] manteniendo los espesores de juntas de mortero en 10mm. Para las pruebas se utilizaron cinco tipos diferentes de ladrillos y dos tipos de mortero; de las unidades utilizadas, tres eran ladrillos de arcilla y dos de tierra comprimida.

La prueba se llevó a cabo en una máquina universal con una capacidad de carga de 350 kN con bisagras para evitar la desalineación de la carga. Se colocaron transductores de desplazamiento en las muestras para medir la deformación vertical de los muretes bajo compresión como se muestra en la figura 1.



Fig. 1- Ensayo de compresión del murete. Fuente: [5].

Los muretes fallaron debido a grietas verticales, tanto en las caras frontales como laterales. Las fisuras se iniciaron en la interfaz unidad-mortero en la etapa del 70-85% de la falla final. Las pruebas se detuvieron después de la caída de aproximadamente 20-50% de la carga máxima por la seguridad de la instrumentación, ya que se manifestaron aberturas severas. En la figura 2 se muestra el modo de fallo de los muretes ensayados.



Fig. 2- Formas de ruptura mostrados en los ensayos experimentales realizados. Fuente: [5]

En el actual trabajo se estudian los muretes construidos con el ladrillo CLB2 debido a que sus propiedades geométricas y mecánicas tales como dimensiones, densidad y resistencia a compresión se corresponden con el rango aceptado por las normas cubanas [4, 12, 13]. En la tabla 1 se referencian las propiedades de utilidad para esta investigación. Como se menciona anteriormente, se utilizaron dos tipos de mortero en combinación con los cinco tipos de unidades para el estudio. Para el mezclado del mortero los autores [5] designaron las proporciones de cemento a arena de 1:3 y 1:5, denominados MO1 y MO2 respectivamente. Ambos casos son de interés para este trabajo, el primero para la calibración matemática y el segundo para la validación del modelo. Las propiedades de los morteros se muestran en la tabla 1.

Tabla 1- Propiedades de la unidad de mampostería y de los morteros. Fuente: [5] .

Elemento	Densidad (<i>kN/m³</i>)	Resistencia a compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
CLB2 (210x100x60mm)	20,15	15,8	5294
MO1 (1:3)	19,29	6,46	4572
MO2 (1:5)	18,27	3,98	3537

Los resultados medios obtenidos durante el ensayo experimental al murete de mampostería con el ladrillo CLB2, con el coeficiente de variación entre paréntesis, son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2- Datos experimentales obtenidos en el murete. Fuente: [5].

Ladrillo	Dimensiones (mm)	Resistencia a compresión (MPa)		Módulo de elasticidad (MPa)		Deformación pico	
		MO1	MO2	MO1	MO2	MO1	MO2
CLB2	430x100x410	6,8 (4,1)	6,51 (4,8)	3951 (3,7)	3629 (5,5)	0,0023 (8,9)	0,0025 (8,6)

Geometría

Para la modelación numérica del murete de mampostería en ABAQUS/CAE 2017, se tuvieron en cuenta las partes componentes necesarias para concebir una micromodelación detallada que reproduzca todas las interacciones entre unidad y mortero. Además, es colocada una plancha sobre el murete, definida como un sólido indeformable, similar al ensayo experimental. Estas partes son referenciadas en la figura 3, junto a sus dimensiones en mm.

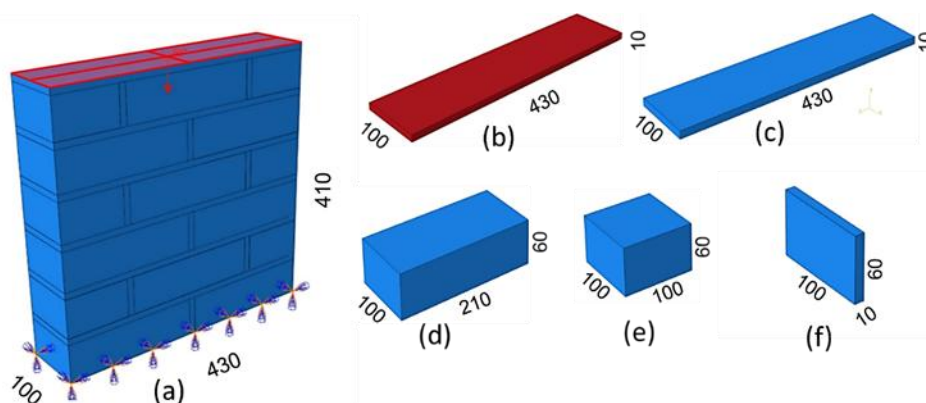


Fig. 3- Dimensiones en mm de las partes del modelo: a) Modelo ensamblado, b) Plancha, c) Mortero horizontal, d) Ladrillo, e) Medio ladrillo, f) Mortero vertical. Fuente: Elaboración propia.

Material

En la definición del comportamiento a compresión de los materiales componentes empleados (ladrillo y mortero), en el software son definidas la densidad y módulo de elasticidad, reportadas en la tabla 1 para la representación del régimen elástico. En el caso del coeficiente de Poisson fue empleado un valor de 0,2 [6, 9, 11, 14-16]. Para la descripción del comportamiento inelástico de estos materiales fue empleado el Modelo de Daño Plástico, ampliamente implementado en estudios de comportamiento de la mampostería [5, 7, 9, 11], en especial porque asume los principales mecanismos de fallo: agrietamiento por tracción y aplastamiento por compresión.

Como parte de la implementación del modelo de daño plástico, se considera la región elástica del material hasta el 30% de la carga final., además de las curvas de comportamiento a compresión y tracción uniaxial de los materiales que componen el modelo, son definidos en ambos materiales los parámetros ángulo de dilatación $\psi = 36^\circ$, factor de forma $K_c = 0,667$ y un factor que relaciona la resistencia a compresión biaxial y uniaxial $\sigma_{b0}/\sigma_{bc} = 1,16$ [9, 10, 17, 18].

Para la definición de la curva de tensión-deformación del material ladrillo CLB2 se utilizó la curva a compresión obtenida por [16] para este caso (Figura 4). En el caso de los morteros MO1 y MO2, las curvas empleadas fueron obtenidas a partir de las formulaciones propuestas por Guo, (2014) [19] (Figura 5).

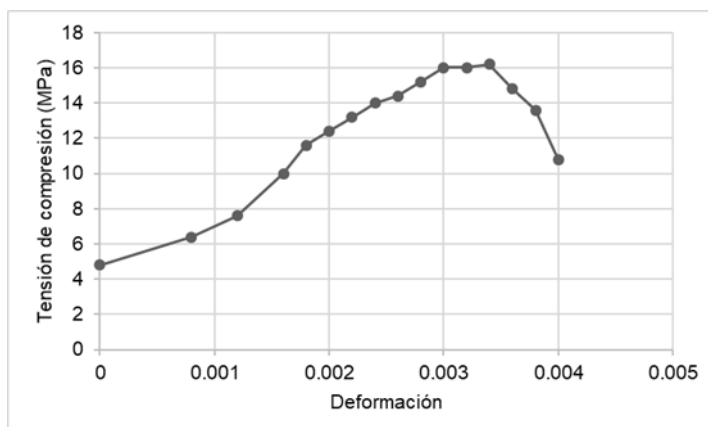


Fig. 4- Curva de comportamiento a compresión del ladrillo CLB2. Fuente: [16].

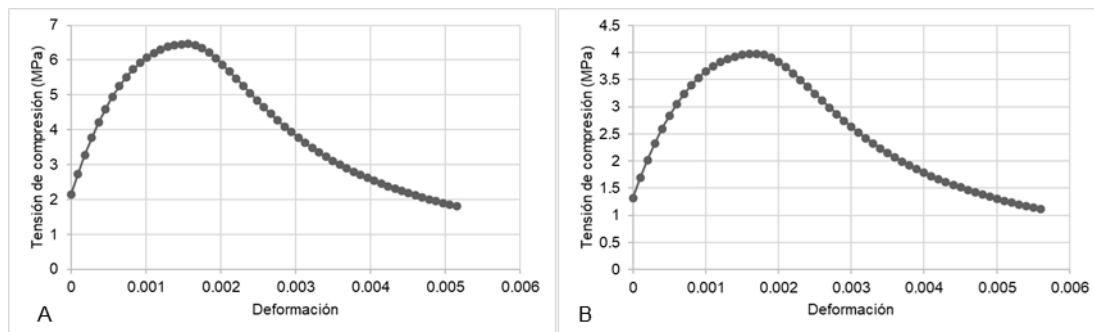


Fig. 5– Curva de comportamiento a compresión de los morteros: A) MO1, B) MO2. Fuente: Elaboración propia.

Para la definición del comportamiento a tracción, en el caso del ladrillo CLB2, se utilizó la curva genérica que considera el 10% de la resistencia a compresión como resistencia a tracción (Figura 6).

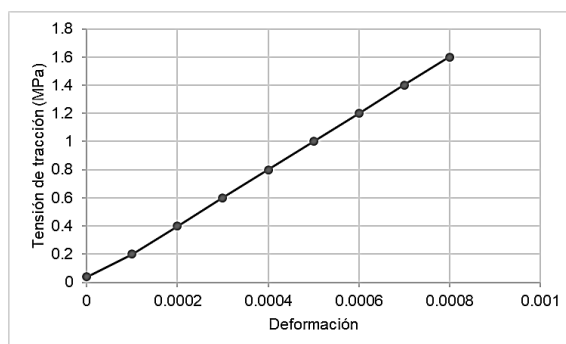


Fig. 6- Curva de comportamiento a tracción del ladrillo CLB2. Fuente: Elaboración propia.

Para los morteros MO1 y MO2 se emplearon las curvas obtenidas a partir de las formulaciones de [19], (Figura 7).

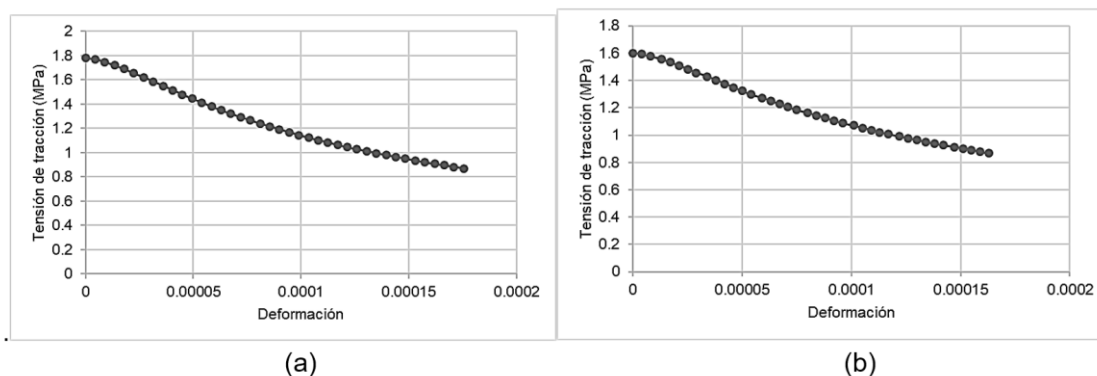
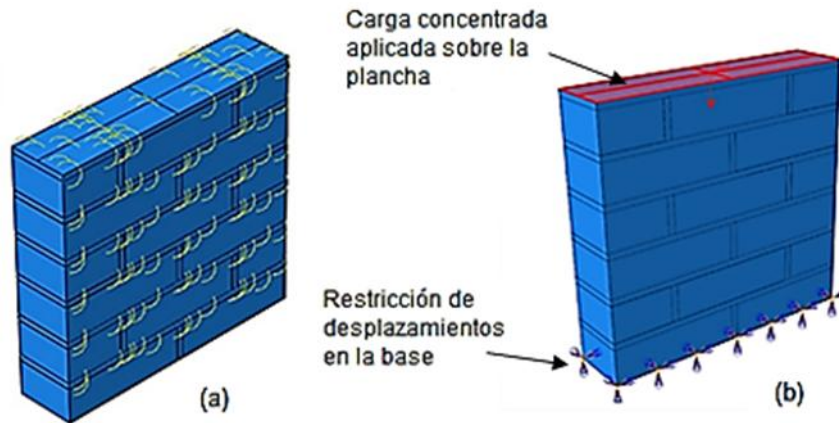


Fig. 7- Curva de comportamiento a tracción de los morteros: a) MO1, b) MO2. Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de borde, carga aplicada e interacciones

Siguiendo las indicaciones del ensayo experimental al murete de mampostería realizado por [5], se establecieron las condiciones de borde que restringen, en la base del murete, los desplazamientos verticales y horizontales, así como los movimientos rotacionales. Además, se aplicó una carga puntual de 344 kN, que genera una presión de 8 MPa en la parte superior de la plancha para recrear el ensayo de compresión uniaxial donde la tensión de rotura obtenida fue de 6,8 MPa. Fueron definidas restricciones tipo “Tie”, que permiten unir dos regiones, aunque el mallado de esas superficies sea distinto y no tiene en cuenta la presencia fricción entre las regiones en que se emplea (Figura 8).



Calibración matemática y validación del modelo

A partir de la geometría del murete, para la discretización del dominio de simulación fue utilizado un mallado estructurado con el empleo del tipo de elemento C3D8. La densidad óptima de malla obtenida generó tamaños de elementos de 14mm y 5mm para el ladrillo y mortero respectivamente. Se obtuvo un error relativo de 1,76% con respecto al ensayo experimental del murete con mortero tipo MO1 tomado como patrón de calibración, (Figura9).

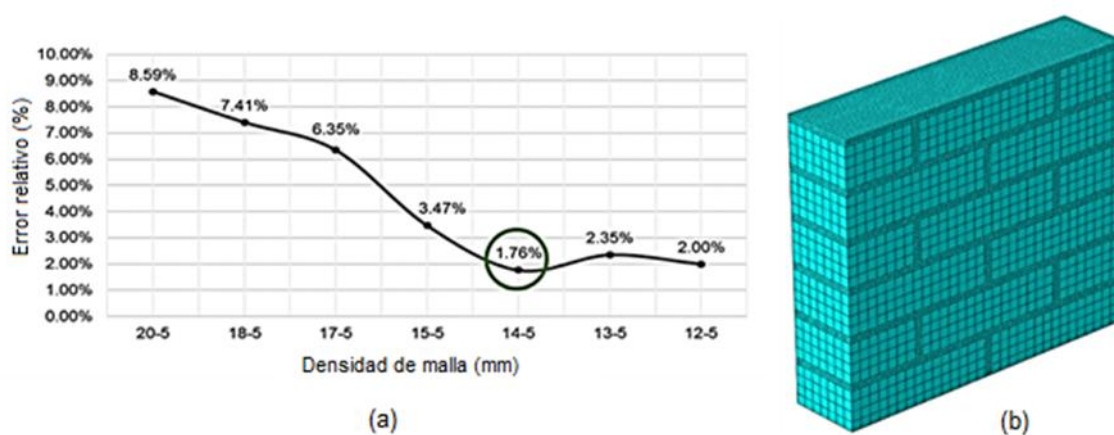


Fig. 9- Obtención de la densidad óptima de malla: a) Diferentes densidades de malla evaluadas para los tamaños de elementos mortero-ladrillo(mm) con su respectivo error relativo. b) Densidad de malla óptima 14-5 con el tipo de elemento C3D8. Fuente: Elaboración propia.

Para la validación del modelo computacional se utilizaron los resultados obtenidos para los muretes confeccionados con el MO2 que tuvieron una tensión de rotura de 6,51 MPa . En este caso se obtuvo un valor de tensión de rotura de 6,06 MPa en el modelo lo que representó un error relativo de 6,97%. En los procesos de calibración y validación los errores relativos obtenidos no superaron el 7% por lo que se considera el modelo calibrado y validado.

3. RESULTADOS

Se analizan las tensiones verticales y transversales del murete, así como los desplazamientos verticales y el ensanchamiento del mismo.

Tensiones verticales y transversales.

En la figura 10 se presenta la distribución de tensiones verticales (S22) y transversales (S11) de tracción y compresión en el murete y se destacan los máximos valores en tracción obtenidos y su ubicación en cada caso.

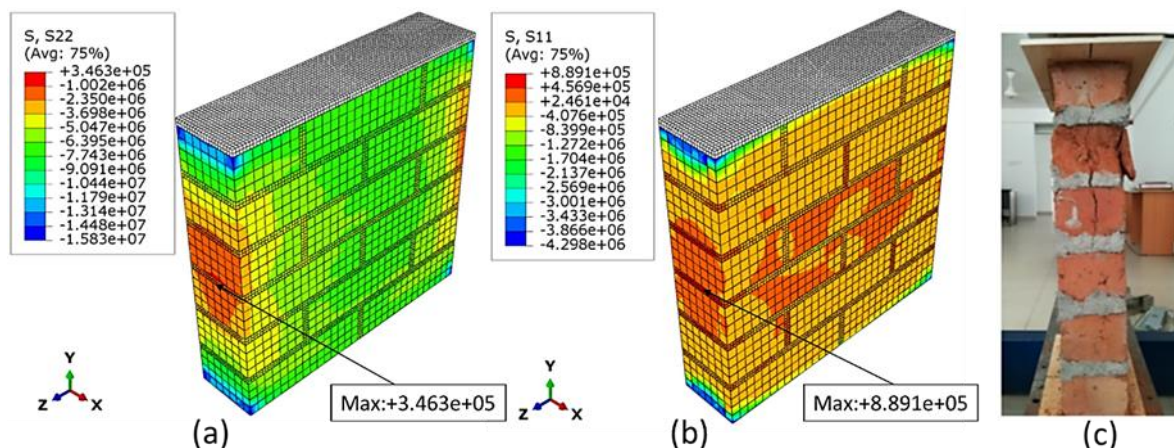


Fig. 10- Tensiones verticales y transversales en el murete: a) Tensiones verticales, b) Tensiones transversales c) Fisura vertical del ensayo experimental [5]. Fuente: Elaboración propia.

Existen tensiones de compresión en la mayor parte del contorno y los máximos valores fueron obtenidos en las zonas de contacto del murete con las planchas producto del confinamiento que estas ejercen cuando actúa la carga, típicas de este tipo de ensayo y que no son consideradas a los efectos del análisis del comportamiento. En la zona central del murete se destacan máximos valores de tracción originadas en la interfaz ladrillo-mortero con valor de 0,35 MPa, que da inicio al mecanismo de fallo y que coincide con lo descrito por varios autores [8].

Con respecto a las tensiones transversales S11, se evidencia una distribución de tensiones de compresión en las hiladas extremas del murete con valores similares. En las hiladas centrales existen concentraciones de esfuerzos de tracción fundamentalmente en las juntas de mortero verticales y horizontales con un valor máximo de 0,89 MPa. Este comportamiento concuerda con los modos de fallo de la mampostería de ladrillo, en los cuales surgen grietas causadas inicialmente por la incompatibilidad entre las propiedades del ladrillo y el mortero, creándose planos de debilidad en su interfaz y desarrollando tensiones de tracción que inducen a grietas que se inician en la junta y avanzan a través de las piezas de ladrillo en la zona central del murete [8, 20].

Desplazamiento vertical y ensanchamiento transversal.

En la figura 11 se presentan los desplazamientos obtenidos en la simulación computacional del murete en el sentido de la carga aplicada (dirección Y) y se muestran los desplazamientos transversales generados en el murete (dirección X).

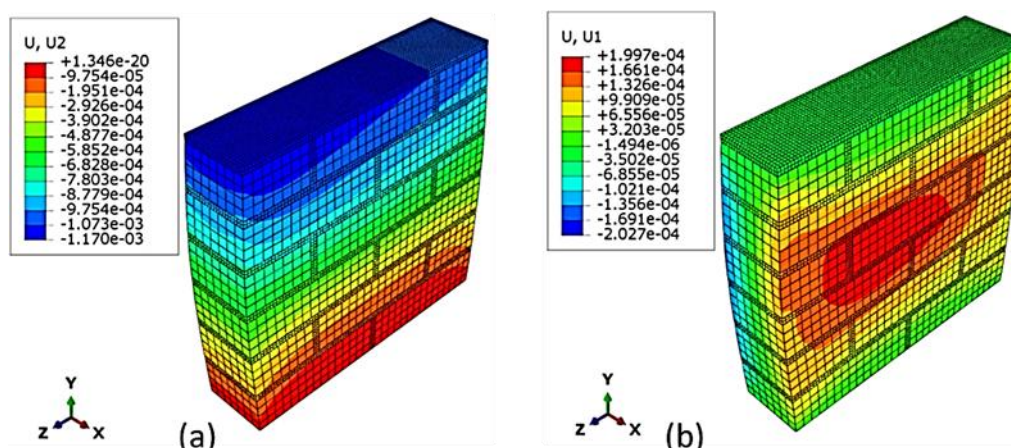


Fig. 11- Desplazamiento vertical y transversal: a) Desplazamiento vertical, b) Ensanchamiento transversal. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que los mayores desplazamientos se desarrollan en el tope del murete con un valor de 0,0029 m, lo cual constituye un resultado con una diferencia menor a 0,6mm con respecto a lo reportado por el ensayo experimental [5]. En el caso del desplazamiento horizontal se genera un ensanchamiento horizontal, con valores máximos aproximados de 0,0002 m en cada dirección, la relación entre acortamiento y ensanchamiento es de 2,925.

Deformaciones plásticas verticales y transversales.

Las deformaciones plásticas descritas en el modelo se presentan en la Figura 12.

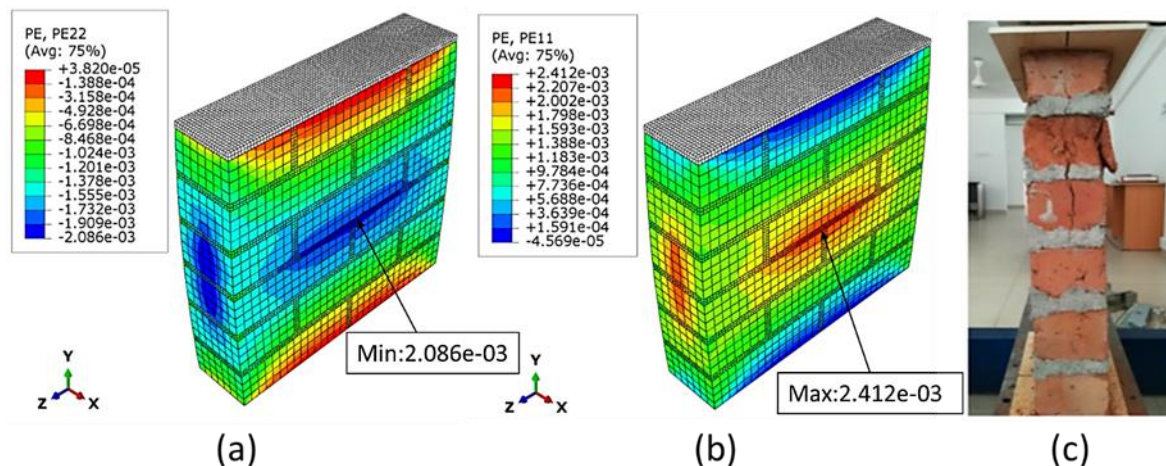


Fig. 12- Deformaciones plásticas: a) Deformaciones plásticas verticales, b) Deformaciones plásticas transversales, c) Vista lateral en el ensayo[5]. Fuente: Elaboración propia.

Las deformaciones describen a los desplazamientos adimensionalizados. Se obtuvieron resultados máximos en las zonas cercanas a las restricciones de borde, es decir, próximos a la plancha y la base. Los valores mínimos (máximos axiales) se encuentran en las áreas centrales de las caras y los laterales, específicamente en el mortero horizontal central, alcanzando un valor de 0,0021. Esta concentración de deformaciones restringidas del mortero en las juntas entre las unidades de mampostería se corresponde con el modo de falla del murete del ensayo. Los esfuerzos de tracción generan grietas que se desarrollan en la interfaz mortero-unidad. Las deformaciones plásticas transversales son presentadas en la figura 12 (b), este caso fue inverso a las deformaciones verticales ya que los efectos superiores se desarrollaron en la parte central en las caras y laterales (0,0024), mientras que los inferiores estuvieron cercanos a las áreas con limitaciones de deformación: plancha y base. Las máximas deformaciones plásticas están acordes a las zonas de los mayores valores de tensiones de tracción reportadas, lo que coincide con el patrón de fallo descrito por Thamboo 2019 [5].

Fue obtenido un modelo matemático computacional de un murete de ladrillos de arcilla, calibrado y validado a partir de los resultados experimentales de Thamboo 2019 [5]. A partir del mismo se verificó el comportamiento del murete y el mecanismo de fallo provocado por concentración de tensiones en la zona central y debilidad en los puntos de discontinuidad. Se destacan, en las tensiones verticales, máximos valores de tracción en la zona central del murete originadas en la interfaz ladrillo-mortero con valor de 0,35 MPa. Con respecto a las tensiones transversales, en las hiladas centrales existen concentraciones de esfuerzos de tracción fundamentalmente en las juntas de mortero verticales y horizontales con un valor máximo de 0,89 MPa. Los mayores desplazamientos verticales se desarrollan en el tope del murete con un valor de 0,0029 m, con una diferencia menor a 0,6mm con respecto a lo reportado por el ensayo experimental [5]. En el caso del desplazamiento horizontal se genera un ensanchamiento con valores máximos aproximados de 0,0002 m en cada dirección siendo la relación entre acortamiento y ensanchamiento de 2,925. Las máximas deformaciones plásticas se encuentran en las áreas centrales de las caras y los laterales del murete, específicamente en el mortero horizontal central, alcanzando un valor de 0,0021, acordes a las zonas de los mayores valores de tensiones de tracción reportadas, lo que coincide con el patrón de fallo descrito por Thamboo 2019 [5]. Este comportamiento concuerda con los modos de fallo de la mampostería de ladrillo, en los cuales surgen grietas en la interfaz ladrillo-mortero y avanzan a través de las piezas de ladrillo en la zona central del murete.

1. ACI-530, "Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures". Estados Unidos: Masonry Standards Joint Committee (MSJC), 2011.
2. CSA, "Design of masonry structures". S304.1-4 (R2010). Mississauga, Canadá., 2004.
3. EN, Eurocode 6: "Design of masonry structures-Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures". London: British Standards. Londres, Inglaterra, 2005.
4. NC-360, "Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Requisitos". Cuba, 2005.
5. Thamboo, J.A. and M. Dhanasekar, "Correlation between the performance of solid masonry prisms and wallettes under compression". Journal of Building Engineering, vol. 22: p. 429-438, 2019.
6. Soleymani, A., M.A. Najafgholipour, and A. Johari, "An experimental study on the mechanical properties of solid clay brick masonry with traditional mortars". Journal of Building Engineering, vol. 58: p. 105057, 2022.
7. Thamboo, J.A., M. Asad, and T. Zahra. "Compressive behaviour of bonded brickwork wallettes with various thicknesses: Experimental and numerical verification". Proceedings of the 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2021), International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2021.
8. Demaj, A., et al. "Study on the Effect of the Bedding Mortar Composition on the Shear and Compression Behavior of Old Brick Masonry Walls". International Conference on Testing and Experimentation in Civil Engineering. Springer, 2022.
9. Zahra, T., M. Asad, and J. Thamboo. "Effect of geometry on the compression characteristics of bonded brickwork". Structures. Elsevier, 2021.
10. Abdulla, K.F., L.S. Cunningham, and M. Gillie, "Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach". Engineering Structures, vol. 151: p. 349-365, 2017.
11. Mathew, A.A., et al. "Analysis of strains in Brick Masonry Prism using ABAQUS". Proceedings of SECON 2020: Structural Engineering and Construction Management 4. Springer, 2021.
12. NC-367, "Cerámica-Términos y definiciones". Cuba, 2005.
13. NC-774, "Código de buenas prácticas para obras de mampostería" (EN 1996-1: 2005, MOD). Cuba, 2012.
14. Van, T.C., T.L. Lau, and F.M. Nazri. "Investigation of brick masonry behaviour under uniaxial compression test at different scales". Proceedings of AICCE'19: Transforming the Nation for a Sustainable Tomorrow 4. Springer, 2020.
15. Cabané, A., L. Pelà, and P. Roca, "Influence of specimen slenderness and stacking on the experimental strength of solid fired clay bricks". Construction and Building Materials, vol. 404: p. 133294, 2023.
16. Thamboo, J. and M. Dhanasekar, "Assessment of the characteristics of lime mortar bonded brickwork wallettes under monotonic and cyclic compression". ConstructionBuilding Materials, vol. 261: p. 120003, 2020.
17. Abasi, A., et al., "Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry". Construction and Building Materials, vol. 264: p. 120182, 2020.
18. Santos, C., et al., "Numerical and experimental evaluation of masonry prisms by finite element method". Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 10: p. 477-508, 2017.
19. Guo, Z., "Principles of Reinforced Concrete". 2014, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann. Elsevier, 2014.
20. Bayón, E.C., et al., "Revisión bibliográfica sobre ensayos a compresión en prismas de mampostería". Revista Ciencia y Construcción, vol. 3(1): p. 90-109, 2022.