

Applying photoelasticity to masonry structures analysis

Mencías, David¹; García, Julián²; Magdalena, Fernando³

ABSTRACT

Photoelastic analysis is proposed to study the behaviour of discontinuous and orthotropic media subjected to loads. These media are considered to be a suitable model for certain types of materials such as dry masonry. A series of tests have been carried out on similar models previously proposed by other authors, to compare the results with two numerical simulation methods commonly used for this type of structures. The results show similarities in terms of irregularity in the distribution of stresses and differences in their dispersion degree. Hence, it appears that this is a phenomenon to consider for the local behavior of this type of structures and that the stiffness of the material plays an important role to be considered in further studies.

Keywords: masonry, walls, photoelasticity, blocky structures, fem analysis, stress fields

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La fotoelasticidad aplicada al análisis estructural

La fotoelasticidad es un procedimiento clásico para medir deformaciones y tensiones. Desarrollada a principios del siglo XX, requiere, como cualquier procedimiento experimental, de una cierta metodología práctica (extremadamente sencilla, ya que apenas son necesarios algunos aparatos ópticos de coste moderado y un modelo en material fotosensible de la pieza a estudiar) pero ofrece datos de gran interés: permite establecer fácilmente patrones de esfuerzo, áreas de concentración de tensiones, entender el comportamiento general del elemento estudiado, servir como método didáctico muy directo,.... El progresivo avance de los métodos numéricos apoyados en medios computacionales, a partir de los años 60 del siglo pasado, no permitió su uso generalizado, aunque ha sobrevivido en algunos ámbitos muy concretos.

Esta técnica, más habitualmente empleada en el estudio de sistemas continuos, apenas se ha aplicado para el estudio de obras de fábrica y en algunas investigaciones, como la de Robert Mark para las secciones transversales de catedrales góticas, los modelos empleados obviaban la condición discontinua de las fábricas, así como su organización interna, más o menos ortótropa. Por ello se ha llevado a cabo un método de ensayo con la idea de identificar, al menos a nivel cualitativo, el efecto de la discontinuidad del material sobre las corrientes de tensiones de contacto provocados por las acciones exteriores impuestas. La realidad constructiva y la experiencia en intervención del

¹ Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA). dameca@gmail.com (*Corresponding author*)

² Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA). julian.garciam@upm.es

³ Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA). fernando.magdalena@upm.es

patrimonio existente, demuestra que en las estructuras de fábrica, tanto más importante que las propias piezas, es la junta entre ellas y en muchos casos no es posible anticiparse numéricamente a su comportamiento. En otros casos un acercamiento mediante las leyes de la aleatoriedad permite conocer un determinado conjunto de situaciones posibles de comportamiento, pero no las más probables.

1.2. Antecedentes de fotoelasticidad aplicada en fábricas

Para la obtención de estas representaciones fotoelásticas, los modelos ensayados se fabrican bien mediante planchas de resinas epoxídicas o bien mediante metacrilatos (ya se vayan a aplicar bajas o altas cargas, respectivamente) a las que se realizan una serie de cortes, que reproducen la labra o los bloques de ladrillos. Debido a la propiedad óptica de la birrefringencia y empleando el polariscopio, al aplicar las cargas exteriores, es posible obtener imágenes muy explícitas del comportamiento de la estructura.

Los ensayos fotoelásticos resultan de probada utilidad en la visualización (y eventualmente de medición) de tensiones en medios discontinuos permitiendo visualizar el carácter anisótropo de la respuesta del material por la formación de corrientes de tensión. En medios discontinuos más organizados, como las fábricas, los ejemplos de su utilización son más recientes y más escasos.

La referencia más notable en la aplicación de esta técnica al análisis de estructura son los trabajos encabezados por Davide Bigoni (Bigoni et al. [1]), que analiza un modelo de 187 piezas de 20x10x6 mm de diferentes materiales como PC, PSM-9 o PMMA que conforman un paño de dimensiones totales 230x180x6 mm. En el trabajo que aquí se describe, se ha partido del mismo modelo a pesar de emplear técnicas y aproximaciones diferentes, que permite establecer, las semejanzas y diferencias que se comentarán posteriormente.

1.3. Comparación de métodos de análisis

Otro de los objetivos planteados en este trabajo es comparar los resultados de los ensayos fotoelásticos con otros métodos numéricos de análisis de fábrica más extendidos, para conocer el grado de aproximación entre ellos. Entre los métodos implementados está por un lado el análisis mediante bloques rígidos con condiciones de contacto aleatorias y por otro el método de los elementos finitos, con diferentes modelos ensayados.

2. ENSAYO FOTOELÁSTICO DE MODELO DE BLOQUES DE RESINA

La metodología empleada en este primer grupo de ensayos es la propia del análisis fotoelástico, llevada al estudio de la distribución de tensiones en medios discontinuos: en este caso, una fábrica en seco. La fotoelasticidad es considerada una técnica apropiada para el estudio de medios continuos, si bien diversos trabajos de otros autores (Bigoni et al. [2]) la han empleado ya para el análisis de fábricas.

2.1. Modelo. Materiales y condiciones de ensayo

El modelo físico es similar, en lo posible, tanto al empleado en los ensayos referencia como a los modelos matemáticos descritos en los apartados que siguen. Es, en esencia, un modelo compuesto por un conjunto de sólidos, en este caso bloques de resina, dispuestos en contacto seco y directo.

El material empleado es uno de los más habituales en ensayos fotoelásticos, una resina epoxídica de dos componentes polimerizada a temperatura ambiente. La base es una variante comercial de la epiclorohidrina; el agente endurecedor, un monómero tipo BPA. La resina curada resultante es un producto transparente, con matices amarillentos, para el que pueden estimarse una resistencias a compresión, tracción y flexión de 580, 460 y 570 kg/cm² respectivamente, y un coeficiente de contracción lineal del 0,1%. El material se ha mezclado y colado en moldes de vidrio, produciendo placas planas de un centímetro de espesor. Éstas se han cortado después con una cortadora laser estándar. El corte se ha realizado combinando una alta potencia (150 W), para que el haz de laser atravesase por completo la placa, con una velocidad media-baja del brazo (0,01 m/s), para evitar el quemado de la resina.

Los diferentes bloques se han montado en su posición de ensayo dentro de una caja de confinamiento de PMMA (Polimetil metacrilato de anilo). La caja se ha diseñado como un conjunto de placas y cercos que permita ensayar modelos planos de hasta 200 x 300 mm en posiciones vertical y horizontal. Las caras principales limitan frontalmente la tendencia al pandeo de los modelos; los cercos laterales pueden, cuando es necesario, contener los empujes, aunque ésta no ha sido la intención de los ensayos que se detallan a continuación. En las caras anterior y posterior de la caja de confinamiento se han añadido dos filtros polarizadores de polivinilo alcohol-iodino sin distorsión de color y de alta eficiencia de polarización (puede estimarse una transmisión cruzada de 0.002 a 570 nm), convirtiendo al conjunto, de facto, en un polariscopio diseñado específicamente para ensayos a compresión de modelos de bloques a pequeña escala.

2.2. Implementación

Se han realizado diferentes ensayos fotoelásticos. En todos ellos se solicitaron a compresión, dentro de la caja de confinamiento descrita, distintas piezas de resina epoxídica. La compresión se ejerció con medios mecánicos convencionales, empleando diversas piezas interpuestas de PMMA y, como durmiente, un pequeño bloque de resina, de 20x10x10mm. Los ensayos realizados son de carácter cualitativo, no cuantitativo (esto es: pretenden dar una idea de los rangos de distribución de las tensiones, no de su intensidad) por lo que los valores absolutos de cargas y tensiones internas no son relevantes. No obstante, puede estimarse una Q puntual de 100 N aplicada sobre durmiente, una tensión en las piezas más solicitadas de 0,5 N/mm² y una tensión media en la base de 0,09 N/mm².

El primer ensayo (Fig. 1a) se realizó sobre una pieza única, continua, de 180x220x10mm. La intención de este acercamiento inicial era la de confirmar las propiedades teóricas de material, ya que, al tratarse de productos obtenidos por colada, las irregularidades internas podían distorsionar, en alguna medida, el resto de los ensayos. El resultado, como puede observarse, se ajusta a los parámetros habituales para las resinas empleadas en el estudio de medios continuos: el bulbo de presiones que se manifiesta como efecto de la compresión ejercida es razonablemente simétrico; se aprecian líneas isocromáticas coherentes con los valores resistentes del material, antes

mencionados; y se puede estimar que la deformación obtenida es coherente con el módulo de elasticidad previsto.

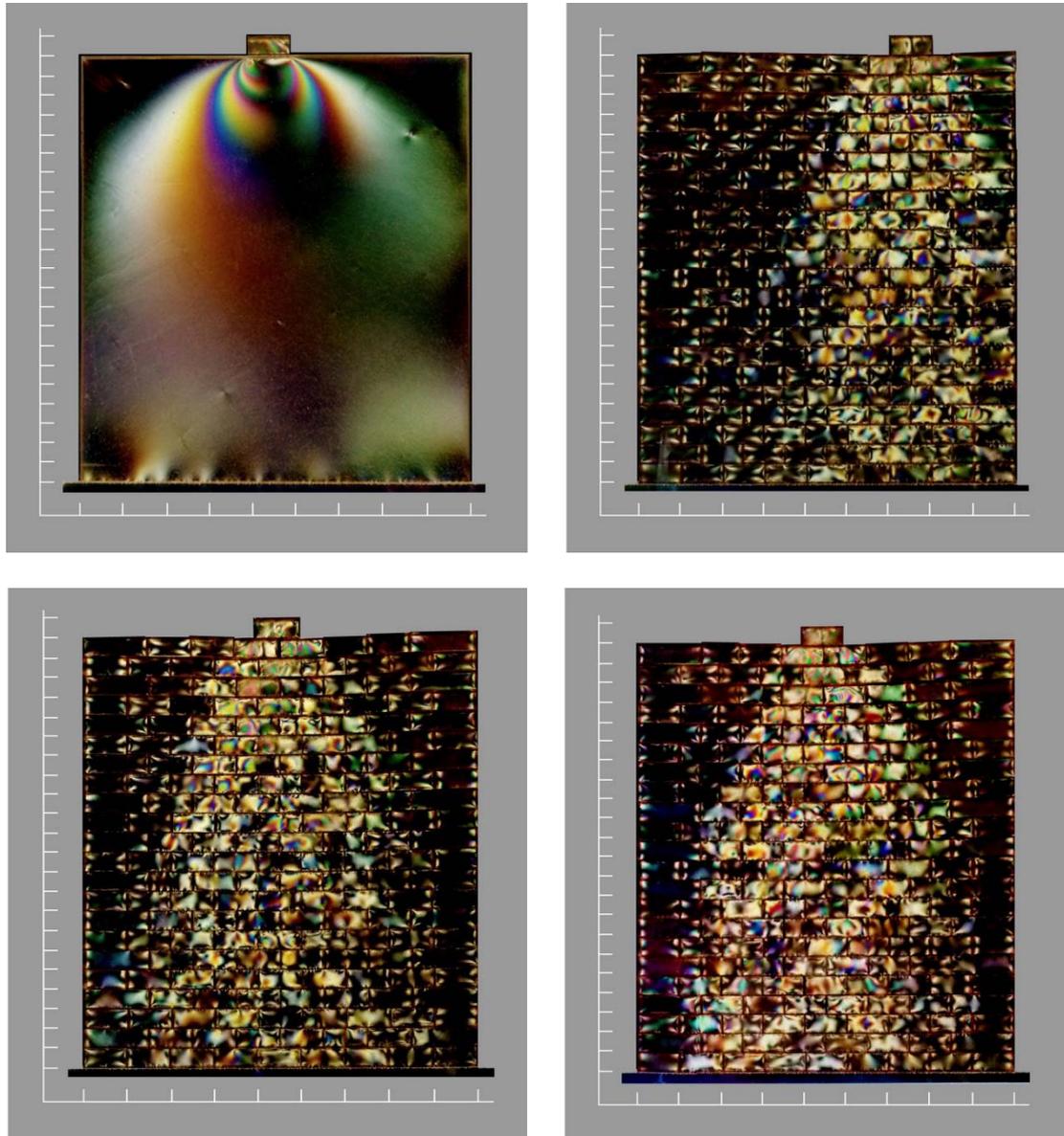


Figura 1a. Resultados obtenidos en el ensayo de una muestra continua. **Figuras 1b, 1c y 1d.** Resultados obtenidos en tres de los casos estudiados con modelos de bloques.

Los ensayos posteriores (Fig. 1b, 1c y 1d) se realizaron sobre un modelo cuya geometría replica la de una fábrica de bloque construida con un aparejo a soga convencional, en una disposición idéntica a la de los modelos matemáticos que se detallan en los apartados siguientes. Para ello se emplearon los pequeños bloques de 20x10x10 y 30x10x10 mm dispuestos en un conjunto de 180 mm de ancho por 220 de altura. Fueron necesarios 187 de estos bloques. Se realizaron 14 ensayos de este tipo, reordenando en todos los casos los 187 bloques de forma aleatoria.

2.3. Resultados

Se registraron fotográficamente los diferentes ensayos descritos, obteniendo diferentes patrones de irisación de los modelos ensayados. Como ya se ha dicho, la intención de estos registros es la de estudiar la relevancia de la aleatoriedad en la transmisión de esfuerzos. Ya el primer modelo (Fig. 1a) permite apreciar que, como sucede en la realidad, la superficie de contacto entre los bloques es imperfecta, lo que provoca una distribución aleatoria de los puntos de aplicación de las fuerzas de contacto. Esto es notable en las líneas isocromas del modelo: en la zona de la izquierda pueden observarse hasta cinco bulbos isocromas, mientras que apenas se manifiestan cuatro bajo el apoyo derecho del durmiente.

Ésta irregularidad se pone de manifiesto, en los ensayos de bloques colocados a hueso, en las amplias zonas sin carga y las corrientes de fuerzas que muestran los registros fotográficos. Comparando las figuras adjuntas puede observarse no solo la existencia de estas zonas sin carga, claramente visibles (Fig. 1b, 1c y 1d) sino su variabilidad, en tamaño y posición, en los distintos ensayos. Lo mismo puede decirse del grado de dispersión de las corrientes de tensiones, extremadamente concentradas en puntos concretos y variables debido en gran medida a la aleatoriedad en la sucesión de contactos. Este tipo de irregularidades en la distribución de las tensiones puede tener un efecto significativo en el comportamiento del muro a nivel local.

3. MODELO DE BLOQUES RÍGIDOS CON CONDICIONES DE CONTACTO ALEATORIAS

El método propuesto se encuadra entre los que Roca et al. [2], en su reciente revisión de métodos aplicables al estudio de las construcciones históricas de fábrica, clasifican como "**Advanced Computer Developments Based on Limit Analysis: Analysis of Blocky Structures**".

3.1. Modelo

Se emplea un modelo compuesto por un conjunto de sólidos rígidos en contacto unilateral, seco y directo, con rozamiento finito (Fig. 2). Se asume que la superficie de contacto entre los bloques es imperfecta y que esto provoca una distribución aleatoria de los puntos de aplicación de las fuerzas de contacto.

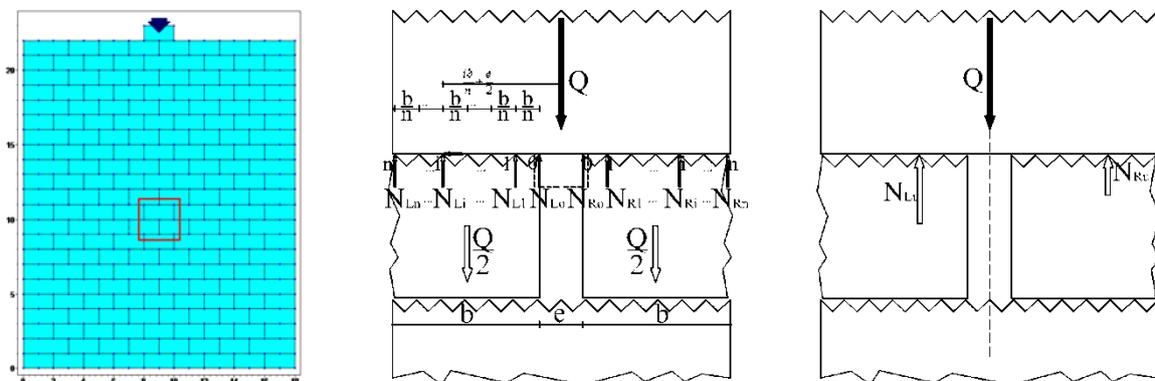


Figura 2. El modelo y su elemento básico constituyente: el contacto aleatorio en las superficies de contacto.

Tal tipo de modelo ignora la deformabilidad del material, y sus consecuencias sobre la distribución de tensiones, y resalta su carácter discontinuo. Trata de representar un material con resistencia a compresión muy superior a las compresiones a las cuales está sometido y escasa o nula resistencia a tracción.

No considerar la aportación de la resistencia a tracción del material de la junta está del lado de la seguridad. Un modelo de estas características es adecuado para un análisis simplificado de las construcciones históricas de fábrica, en las que no se dispone de un historial de los daños sufridos a lo largo del tiempo por dicho material y, en algunos casos, ni siquiera se tiene la seguridad de que éste exista en la actualidad.

3.2. Implementación

Dada la naturaleza elemental del problema en estudio su implementación es muy sencilla y consta de los siguientes pasos:

- 1) Se plantean las ecuaciones de equilibrio para cada uno de los bloques teniendo en cuenta que el contacto es unilateral y sólo se admiten tensiones de compresión en las superficies de contacto.
- 2) Se eligen aleatoriamente los puntos de aplicación de las fuerzas de contacto utilizando una distribución uniforme. Otro tipo de distribución sería posible pero dada la rigidez del material la uniforme se considera la más adecuada.
- 3) Se busca una solución de equilibrio factible para la fuerza externa aplicada utilizando Programación Lineal.
- 4) Si no se encuentra una solución factible, porque las condiciones de contacto añadidas han convertido el problema en sobredeterminado se rechaza.
- 5) Si se encuentra, ésta será una de las posibles soluciones buscadas.

Alternativamente, si el número de intentos que acaban en rechazo es demasiado alto, se puede optar por no determinar el punto de aplicación en todas las superficies de contacto. La Programación Lineal encontrará sin problemas una solución factible en el problema si éste está indeterminado. Esta segunda opción, aunque es mucho más eficaz en términos computacionales, puede producir un sesgo en los resultados.

3.3. Resultados

Dado que no se pretende realizar una comparación numérica con los otros métodos empleados, sino realizar tan sólo una comparación a nivel cualitativo con ellos, se incluyen a continuación (Fig. 3) tres casos bien diferenciados de entre los resultados obtenidos. Los trazos en rojo, en proporción a su anchura, representan las tensiones de contacto.

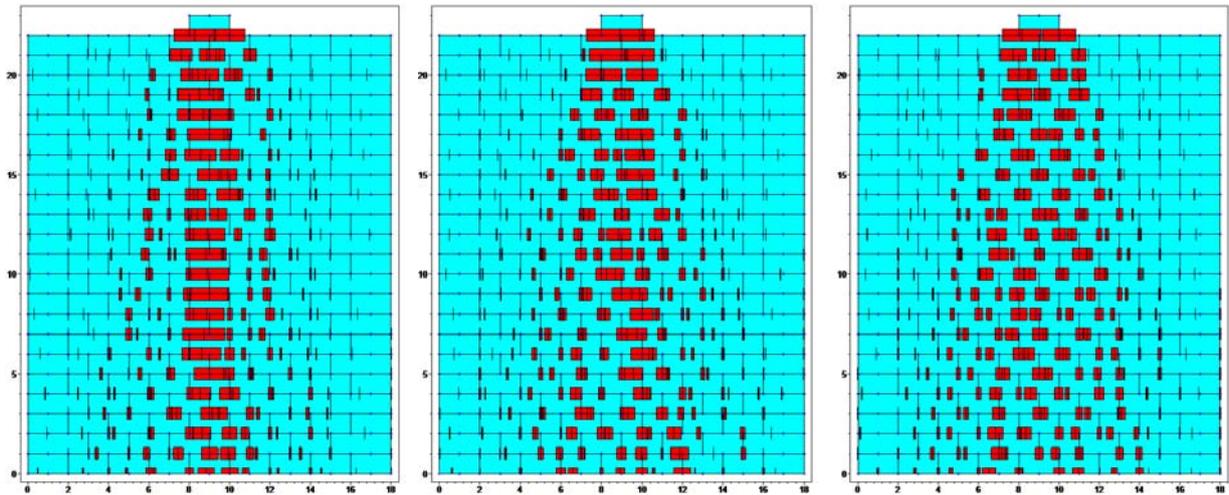


Figura 3. Resultados obtenidos en tres de los casos estudiados.

Se puede observar que debido a la aleatoriedad en los contactos, el grado de dispersión de las tensiones de contacto a lo ancho del modelo es muy variable. Cabe señalar que esta irregularidad en la distribución de las tensiones puede tener un efecto significativo en el comportamiento del muro a nivel local.

4. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El análisis que se describe a continuación tiene por objeto emplear el método de los elementos finitos para determinar las tensiones verticales producidas por una carga exterior y así servir para localizar el trazado de las cargas en el interior de un muro de fábrica, para lo que se emplea el software de análisis mediante el método de elementos finitos SAP2000 [3]. Con el fin de poder comparar con los ejemplos anteriormente descritos, el objetivo es determinar, mediante esta metodología, el “camino” que recorre las cargas en el interior de la fábrica en lugar de precisar las tensiones de cada uno de los bloques. Tampoco se tiene por objeto el describir las deformaciones, con lo que la caracterización del material no es de determinante en este análisis cualitativo.

4.1. Modelo

4.1.1. Modelo continuo (MC)

El modelo continuo que se analiza, denominado MC1, se configura mediante una malla de 71 x 87 elementos tipo “Shell - Thin” de espesor de constante de 10 mm y de dimensiones 2,5x2,5 mm. La placa analizada tiene, por tanto, unas dimensiones totales de 177,5 mm de ancho por 217,5 mm de alto. En la parte superior, con objeto de simular la aplicación de la carga de manera continua, se remata con un añadido de 17,5x10,0 mm, con el mismo mallado que el resto del modelo. Denominado por Baraldi et al. [4] como modelo continuo plano.

4.1.2. Modelo continuo con juntas verticales (MCV)

El segundo modelo se configura mediante la superposición de piezas básicas de 7 x 4 elementos tipo Shell – Thin” de las mismas características que los anteriores, que resulta en bloques rectangulares de 17,5 mm x 10,0 mm y en los extremos de las filas pares con piezas de “Shell – Thin” 27,5 mm x 10,0 mm, con el fin de cuadrar el rectángulo general. Con el objeto de simular la posibilidad de no

trasmisión de tensiones horizontalmente entre las piezas, se han separado las mismas un módulo, es decir 2,5 mm. Asimismo se aplica la carga mediante una pieza superior de transición.

4.1.3. Modelo discontinuo con juntas verticales (MJ)

Partiendo de las mismas dimensiones totales y de piezas del ejemplo anterior, en este caso se ha permitido un espacio entre las juntas verticales del paso de malla, esto es, 2,5 mm. Para modelizar el contacto continuo a través de la junta, y como el objetivo es conocer el comportamiento tensional cualitativo en el interior de las piezas que representan los ladrillos, se han situado una serie de barras tipo "frame" de rigidez infinita, en comparación con el resto del modelo y longitud el mismo módulo de 2,5 mm que conectan los nodos inferiores de la malla con los superiores. Para permitir la transmisión exclusiva de axiles, se ha impedido la transmisión de otro tipo de sollicitaciones entre los ambos extremos de las barras.

4.1.4. Modelo discontinuo sin juntas (MD)

El presente modelo se diferencia del anterior exclusivamente en que se permite la transmisión de axiles horizontalmente, mediante la modelización de la junta vertical de la misma manera que en el modelo MJ se realiza la horizontal. Esto es, mediante la incorporación de barras horizontales que conectan los nodos entre los bloques de ladrillo.

4.1.5. Modelo discontinuo con apoyo aleatorio (MDA1, MD3, MDA1)

Para la realización el modelo discontinuo, se ha partido de la misma malla y dimensiones de bloques que en todos los ejemplos anteriores, así como del tamaño del paño de fábrica. Para poder comparar con los modelos de contacto aleatorio, se ha introducido esta condición, mediante un contacto único entre las posibles nodos, tal y como muestra la Fig. 4. Las barras se colocan verticalmente siguiendo un patrón aleatorio de contacto, de manera que, de entre los tres bloques que pueden estar en contacto, sólo sea uno, mediante dos barras verticales con el bloque inferior. Este patrón se toma a partir de los datos obtenidos por una hoja de cálculo que determina la posición aleatoria entre 3 en el caso de piezas centrales y de 7 en los extremos. Este modelo se denomina por Baraldi et al. [4] como modelo de elementos finitos heterogéneos (FEM Hetero) añadiendo la particularidad del contacto entre piezas de manera aleatoria.

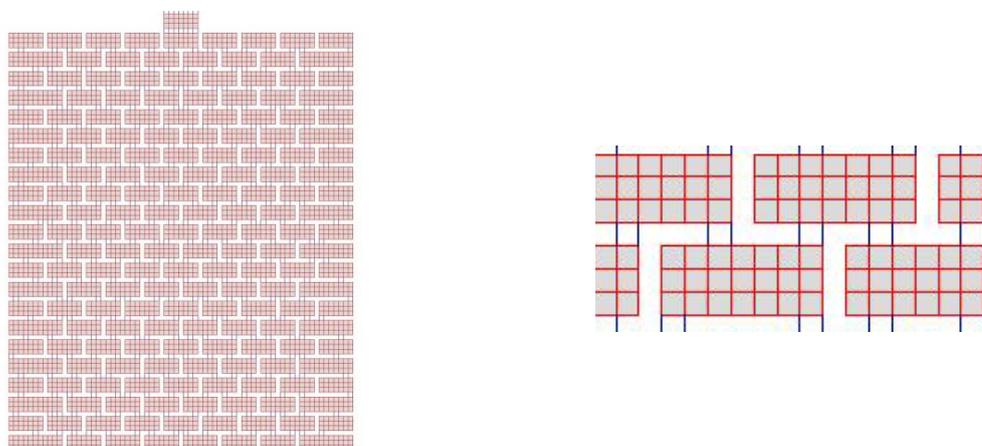


Figura 4. Descripción geométrica global y local de uno de los modelos analizados (MD3)

4.1.6. Material y coacciones.

Para la definición del material se han establecido los siguientes parámetros, obtenidos a partir de los trabajos de Narayanan et al. [5], que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del material para el análisis

Propiedad	Valor
	Fábrica de ladrillo
Peso específico	15 kN/m ³
Resistencia a compresión	4 N/mm ²
Resistencia a tracción	0.4 N/mm ²
Módulo de elasticidad	4.000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0,25

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el objetivo no es cuantificar las tensiones sino poder determinar el recorrido de las cargas, por lo que los valores mostrados en la Tabla 1, puede variarse sin modificarse sustancialmente los resultados, salvo en la relación peso propio – carga exterior, que habría que ponderarlo proporcionalmente.

En todos los modelos las coacciones se encuentran situadas en los vértices de la fila inferior y los apoyos empleados son de tipo rígido, quedando coartados todos los movimientos y giros. Asimismo tampoco se ha coartado lateralmente los modelos ensayados

4.1.7. Cargas y combinaciones de carga. Análisis

La carga aplicada tiene el valor de 1 N en el sentido negativo del eje Z, en cada uno de los 8 vértices del elemento superior. Con el objetivo de poder distinguir claramente las tensiones con origen en el peso propio de la fábrica y de las cargas exteriores, las tensiones se visualizan con una combinación de acciones de relación 250:1 entre las cargas exteriores y las cargas de peso propio. Se realiza un análisis plano, anulando las fuerzas en el eje Y, así como los giros en torno a los ejes X y Z. Se obtienen las tensiones S22, que corresponden son las tensiones principales en el eje Z.

4.2. Resultados

Como en los casos anteriores, como la intención es hacer un análisis cualitativo, no se han incluido los valores numéricos de tensiones pero sí los diagramas, que permiten conocer cómo se comporta en material. Para hacer más evidente y producir mayor contraste visual en la cuantificación de las tensiones se mostrado gráficamente un rango determinado, con el fin de destacar las tensiones a lo largo del eje vertical de la fábrica y reducir la importancia de la concentración de tensiones bajo los puntos de aplicación de la misma, visualizando un rango de tensiones entre los - 0.20 N/mm² y los 0 N/mm², en todos los modelos.

La Fig. 5 muestra los resultados del análisis para el MC ante peso propio Fig. 5a, carga exterior Fig. 5b y la combinación de ambas en el Fig. 5c. Asimismo se muestra el resultado de la combinación de acción exterior y peso propio para los modelos MCV en la Fig 6a, MJ en la Fig 6b, y MD en la Fig 6c. Por último se muestran las tensiones verticales de tres modelos de contacto aleatorio Fig. 7.

4.2.1. Modelo continuo (MC)

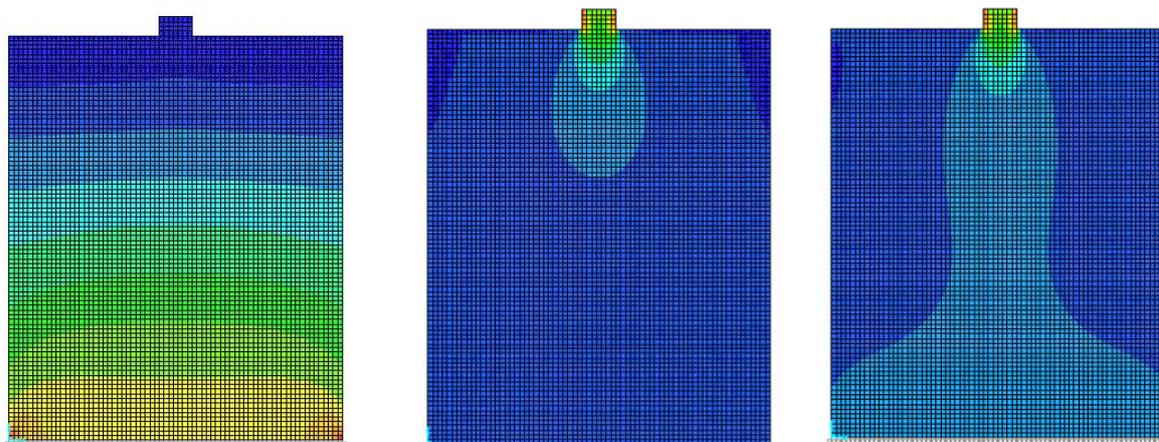


Figura 5. Resultados del análisis del MC: tensiones verticales

4.2.2. Modelos discontinuos MCV, MJ y MD.

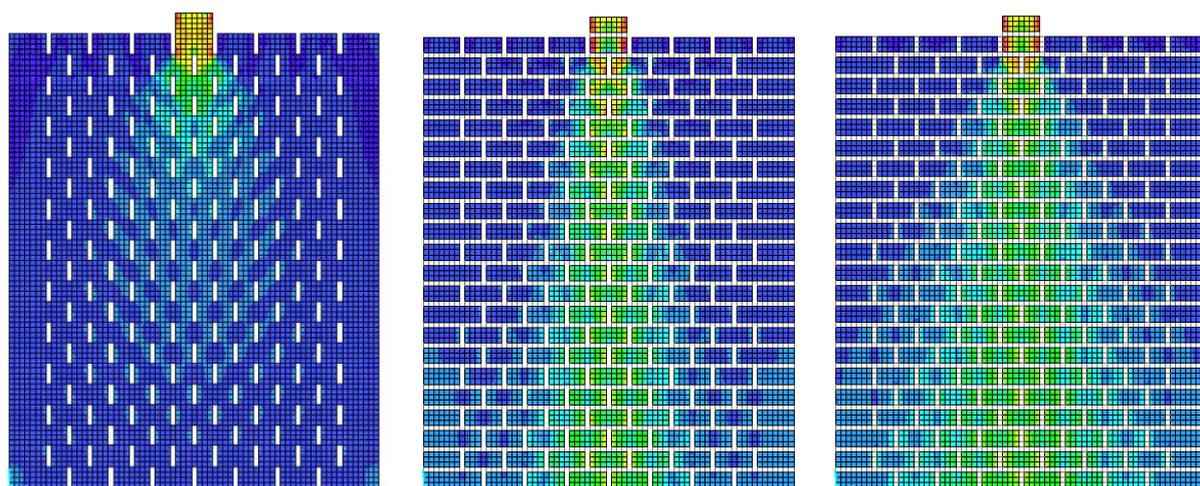


Figura 6. Resultados del análisis de los MCV, MJ y MD: tensiones verticales ante combinación de acciones

4.2.3. Modelo discontinuo con apoyos continuos (MDA1 – MDA2 – MDA3)

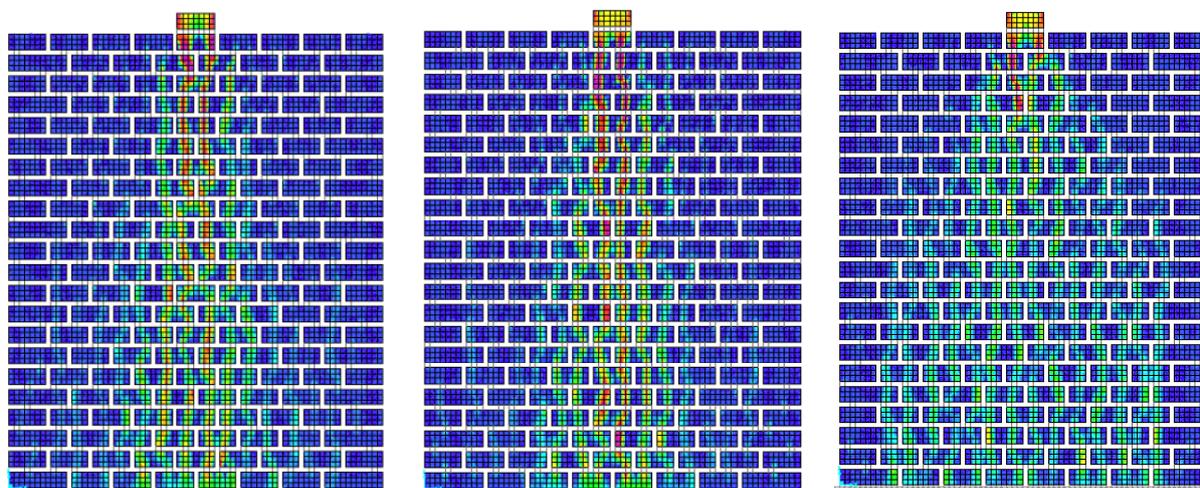


Figura 7. Resultados del análisis de los MCV, MJ y MD: tensiones verticales ante combinación de acciones

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La comparación entre los resultados de los tres métodos planteados, y entre estos y los ensayos de referencia (Bigoni et al. [1]) permitirá establecer algunas conclusiones de interés. Antes, sin embargo, es necesario realizar algunas precisiones.

Por lo que respecta a los ensayos fotoelásticos incluidos en la presente comunicación hay que resaltar que se han realizado con un único material, una resina epoxídica, a diferencia de los acometidos por Bigoni y Noselli, para los que emplearon diferentes materiales fotosensibles. Los resultados obtenidos en nuestros ensayos son coherentes con los registros fotoelásticos de los ensayos de referencia; sin embargo, al emplear un único material nuestro rango de respuestas es más limitado. La intención de estos ensayos, en todo caso, ha sido la de comparar los resultados fotoelásticos, de carácter indicial, no con otros del mismo tipo, sino con diferentes modelos matemáticos.

También es importante notar que la resina empleada es un material elástico, lo que puede, en alguna medida, distorsionar los resultados. Así, el ángulo de apertura obtenido entre la superficie de aplicación de la fuerza y la reacción en la base es algo mayor, en casi todos los casos, al obtenido en los diferentes modelos matemáticos, lo que puede ser atribuible a la mayor rigidez de estos últimos.

6. CONCLUSIONES

El comportamiento global de una fábrica no se diferencia notablemente si se analiza como medio continuo o discontinuo. A nivel local, si se aprecian grandes diferencias si se considera un medio u otro, especialmente si se tienen en cuenta los contactos no conocidos, que pueden producirse entre unas piezas y otras, efectos que ocurren en muchos casos en fábricas históricas. La aparición de islotes de tensiones muy bajas o nulas dentro de la fábrica, tiene gran relevancia en el comportamiento a nivel local, pasando desapercibidas cuando se analiza globalmente.

El método fotoelástico de análisis de estructuras de fábrica ha demostrado su utilidad para visualizar las corrientes de fuerzas en el interior de los elementos constructivos permitiendo reparar en el comportamiento cualitativo de la fábrica.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor quiere agradecer a la Fundación Juanelo Turriano, el apoyo a este trabajo por medio de la concesión de la beca para la realización de la tesis doctoral.

REFERENCIAS

- [1] Bigoni, D. & Noselli, G. (2010). Localized stress percolation through dry masonry walls. Part I – Experiments & Part II - Modelling *European Journal of Mechanics A/Solids*, 29, 291–298 & 299–307.

- [2] Roca, P., Cervera, M. & Gariup, G. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325. doi:10.1007/s11831-010-9046-1.
- [3] SAP2000 Advanced 14.0.0 (2009). Programa de análisis estructural. Computers and Structures, Inc.,
- [4] Baraldi, D., Cecchi, A., Tralli, A. (2015). Continuous and discrete models for masonry like material: A critical comparative study. *European Journal of Mechanics A/Solids* 50 (2015) 39e58
- [5] Narayanan, S. P. & Sirajuddin, M. (2013). Properties of Brick Masonry for FE modeling. *Recent Advances in Structural Engineering RASE2013. American Journal of Engineering Research (AJER)*. 1, 06-11