

APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE FRACTURA A LA FISURACIÓN DE FÁBRICAS DE LADRILLO

G. Hussein, G.V. Guinea y M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid

Resumen. La aparición de grietas y fisuras es probablemente la lesión más habitual de los tabiques y muros de ladrillo empleados en edificación. Estos defectos, que generalmente tienen poca repercusión estructural, son muy frecuentes y consumen un porcentaje elevado del presupuesto total dedicado a conservación de edificios. Por ello, antes de acometer su reparación es necesario investigar adecuadamente sus causas, pero la falta de una herramienta de análisis adecuada hace que el estudio de estos defectos se confíe casi siempre a la experiencia. Este trabajo presenta el primer paso hacia un estudio sistemático de las fisuras basado en las técnicas de la Mecánica de la Fractura y se muestra como con éste modelo se pueden predecir adecuadamente las trayectorias observadas en la práctica.

Abstract. Cracking is probably the most frequent case of masonry performance failure and has been an engineering concern for at least 150 years. Most building develop cracks and most of this cracking is not structurally significant, but they reduce building performance and increase maintenance costs. Diagnosis of specific causes of cracking is often difficult but must be carried out necessary before repair. Otherwise an inappropriate, and consequently ineffective repair technique may be selected. This work shows how Fracture Mechanics can assist building professionals in assessing crack trajectories in an effective and simple way.

1. INTRODUCCIÓN

La fisuración es probablemente la lesión más frecuente en los tabiques y muros de ladrillo normalmente usados en edificación. Aunque casi siempre poco trascendentes para la integridad estructural del edificio, las lesiones por fisuración suman alrededor del 40% de los defectos señalados, y consumen un porcentaje muy elevado de los fondos que se dedican a mantenimiento y conservación.

Los efectos indeseables de la fisuración afectan sobre todo a la función estética del edificio y a sus condiciones de servicio. El agrietamiento empeora la resistencia a los agentes meteorológicos, permitiendo la entrada del agua de lluvia y aumentando la conductividad térmica de los paramentos. También disminuye el aislamiento acústico y puede producir lesiones en conducciones de servicio así como en puertas y ventanas. Estas lesiones que inicialmente afectan sólo a la funcionalidad del edificio, pueden, de no ser tratadas a tiempo con las medidas oportunas, conducir a la ruina de la estructura.

La reparación de los daños originados por fisuras y grietas debe empezar por realizar una correcta diagnosis

de su origen, que ayudará a decidir el tratamiento más adecuado. Por ejemplo, si la fisuración es debida a deformaciones bajo cargas permanentes de vigas o columnas bastará realizar un tratamiento superficial de la zona afectada. Si por el contrario la causa es el asiento de una zapata de cimentación será preciso determinar con exactitud su origen y recalzar si es preciso la estructura.

El análisis de la fisuración de un edificio es un trabajo que en la actualidad se realiza de forma casi artesanal por empresas especializadas. Para diagnosticar las causas, estas empresas utilizan procedimientos que se basan en la experiencia. Las grietas que aparecen en los paramentos se comparan con patrones conocidos, obtenidos de la experiencia (figura 1). El método de análisis es cualitativo y su éxito depende en gran medida del buen criterio y de la experiencia del técnico que lo aplica.

Cuando la fisuración es compleja o cuando la morfología del edificio no se adapta bien a los patrones conocidos la predicción correcta del origen de las fisuras resulta difícil. En estos casos el técnico apenas dispone de algo más que su intuición.

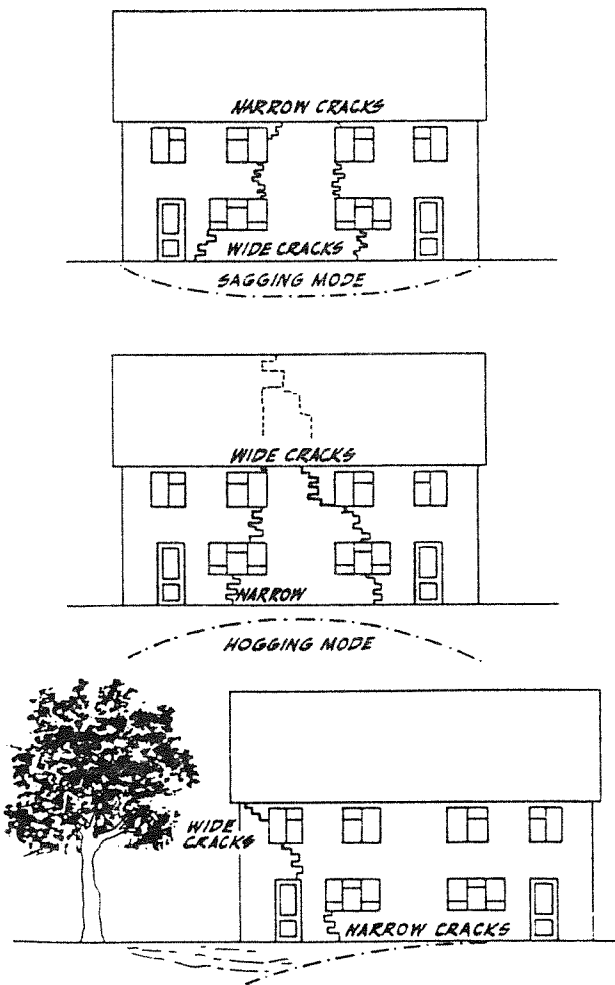


Fig. 1. Algunos patrones de fisuración (según [1])

Este artículo aborda el análisis de la fisuración en paramentos de edificación mediante las técnicas de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal. En los siguientes apartados se presentan los fundamentos del modelo y se muestra su aplicación a dos casos reales. Los resultados obtenidos predicen adecuadamente las trayectorias observadas y son de gran utilidad para conocer los movimientos que han originado la fisuración. El artículo se cierra con las conclusiones más importantes.

2. MODELOS DE ANÁLISIS

2.1 Introducción

El análisis tradicional de la fisuración de paramentos de ladrillo (tabiques y muros) de un edificio se ha venido realizando a través de un modelo muy simplificado basado en la elasticidad lineal. El material se supone elástico-lineal, homogéneo e isótropo, y se toma despreciable su resistencia a tracción. De acuerdo con el modelo, las fisuración sigue las líneas de igual tensión principal mayor (isostáticas de compresión), que pueden determinarse fácilmente con un sencillo cálculo elástico (figura 2.). Además esta red de líneas es independiente de las características elásticas del material y sólo depende de su geometría y de la relación de las cargas aplicadas.

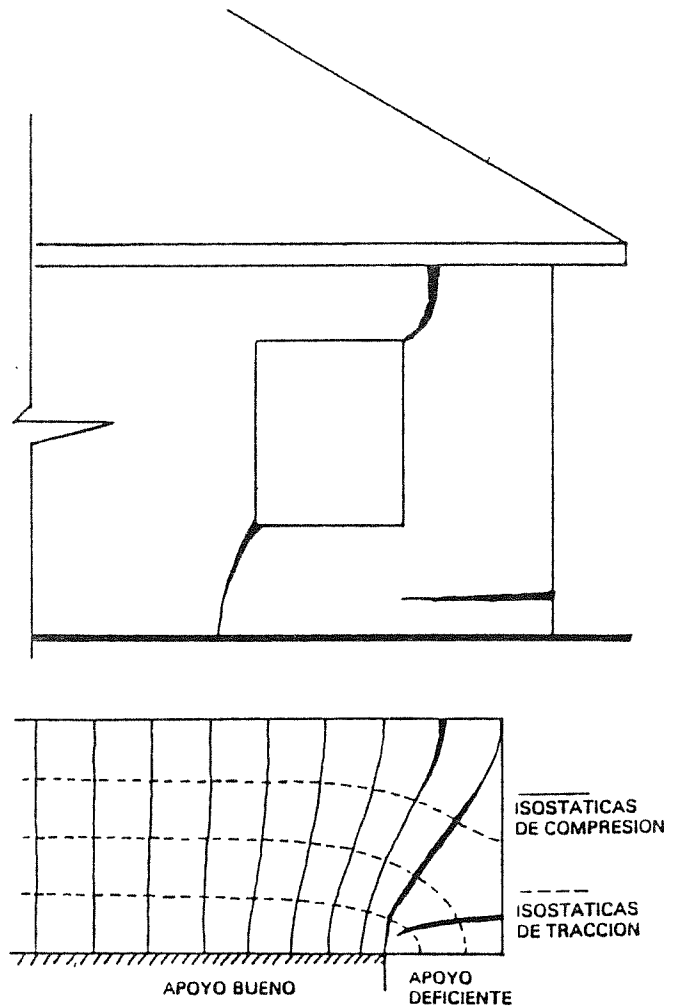


Fig. 2. Modelo de líneas isostáticas (según [3])

Este modelo es el utilizado en numerosos textos técnicos dedicados a la fisuración de edificios [2,3] y por la mayoría de arquitectos e ingenieros que trabajan en este campo. Su sencillez, junto con su capacidad de justificar cualitativamente algunas trayectorias que se observan en la práctica están en la base de su éxito.

Sin embargo, el modelo en sí es inconsistente pues no tiene en cuenta que la aparición y propagación de fisuras modifica sustancialmente el estado tensional del elemento estudiado. De ahí que las trayectorias calculadas con la red de líneas isostáticas iniciales no sean válidas una vez iniciada la fisuración, cuando ha cambiado la geometría y, por tanto, la sollicitación del elemento.

Más recientemente han aparecido varios modelos que pretenden incorporar con detalle la interacción mortero-bloque de ladrillo durante el proceso de fractura. En general podemos clasificar estos modelos en dos grandes grupos en función del método de aproximación al material. En el primer grupo, que podemos denominar modelos *macroscópicos*, se encontrarían aquellos en los que se busca una relación constitutiva macroscópica para el conjunto mortero+bloque de ladrillo, supuesto homogéneo [4,5,6]. Esta relación se infiere a partir de las propiedades de los elementos constitutivos (mortero

y ladrillo). Una vez obtenida la ecuación del material, ésta se implementa en un programa estándar de cálculo numérico por elementos finitos con el que se modeliza la estructura deseada.

El segundo grupo de modelos, llamados *microscópicos*, centra su atención en la modelización detallada de cada bloque de ladrillo y de su interacción con las juntas de mortero [7, 8, 9]. Evidentemente, y por limitaciones de cálculo, estos modelos sólo son aplicables a elementos pequeños, que contengan un número no muy elevado de bloques, y para analizar aquellas situaciones en las que el interés se centra en la interacción entre el mortero y los bloques (p. ej. bajo una carga concentrada).

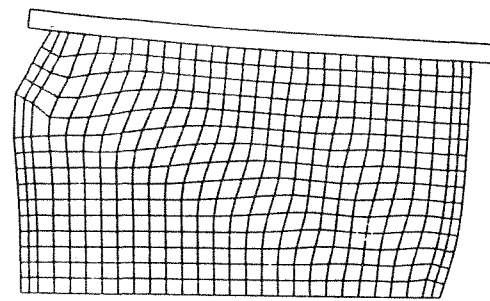
La necesaria incorporación de las propiedades mecánicas del mortero y de los bloques de ladrillo, tanto en los modelos macroscópicos como en los microscópicos, hace enormemente difícil su aplicación práctica. Estas propiedades se han de medir en el laboratorio sobre piezas construidas con el mismo material que compone el elemento bajo estudio, lo que suele ser difícil de conseguir en la mayoría de los casos. Además el procedimiento de cálculo es muy especializado, utilizando programas desarrollados específicamente para cada modelo. Por último, y dado que todos los modelos propuestos hasta ahora descansan en una formulación plástica del problema, los resultados del análisis no proporcionan trayectorias de fisuración propiamente dichas, sino zonas con mayor densidad de daño, a veces difíciles de relacionar con las observaciones prácticas, donde las fisuras aparecen bien definidas (figura 3).

Como veremos en el próximo apartado, mediante la utilización de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal, es posible realizar un estudio adecuado de los patrones de fisuración presentes en paramentos de edificación. Con esta técnica comprobaremos que se pueden determinar con buena aproximación las trayectorias de una manera sencilla, sin que sea necesario conocer las características concretas del mortero o bloque de ladrillo utilizado.

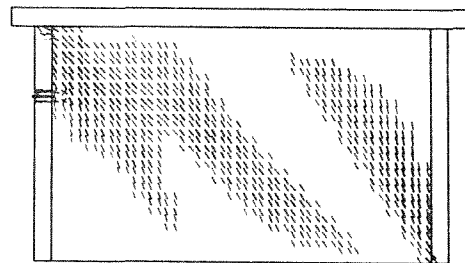
2.2 Modelo basado en la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal

La Mecánica de la Fractura Elástica Lineal es una teoría hoy en día bien conocida que se desarrolló en los años 50-60 para el estudio de las roturas frágiles en elementos metálicos.

Las hipótesis básicas son que el material bajo estudio es homogéneo, elástico y lineal, y que la propagación de una grieta en su seno sucede cuando el factor de intensidad de tensiones K alcanza un valor crítico K_{IC} característico del material [11]. Este modelo es una extensión natural del modelo tradicional de rotura según las líneas isostáticas que, como vimos en el apartado anterior, presentaba algunos inconvenientes. Aunque las hipótesis realizadas parecen muy restrictivas, los resultados del modelo son buenos siempre que no se estudien zonas muy pequeñas en comparación con el tamaño de los bloques de ladrillo.



(a)



(b)

Fig. 3. Análisis del agrietamiento de un muro sujeto a un desplazamiento horizontal en su parte superior. (a) Malla deformada. (b) Patrones de fisuración (según [10])

En este artículo el análisis se ha limitado al caso bidimensional, que es la situación más frecuente en paramentos de edificación.

Condiciones de propagación de una fisura

Una fisura en un sólido elástico bidimensional cargado en su propio plano puede estar solicitada de dos modos diferentes, I y II, según se muestra en la figura 4 [11]. En el modo I los desplazamientos de los labios son perpendiculares al plano de la fisura mientras que en el modo II son paralelos a ésta. Para conocer la dirección de la propagación y el valor de la carga que inicia la rotura se han propuesto diferentes teorías [12, 13, 14] de entre las que hemos seleccionado la propuesta por Erdogan y Sih [12] de la *tensión circunferencial máxima* por su sencillez y claridad conceptual.

Siguiendo a Erdogan y Sih, una fisura sujeta a una sollicitación en modo mixto I+II se propaga desde su extremo en dirección radial y perpendicular a la tensión circunferencial máxima (figura 5). La dirección de propagación, θ , puede calcularse por la ecuación:

$$\text{tg}(\theta/2) = \frac{1}{4} (\rho \pm \sqrt{\rho^2 + 8}) \tag{1}$$

siendo ρ la relación entre los factores de intensidad de tensiones K_I y K_{II} aplicados a la fisura, $\rho = K_I/K_{II}$, y seleccionando en (1) el signo que proporciona un valor positivo (tracción) de la tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ (figura 5).

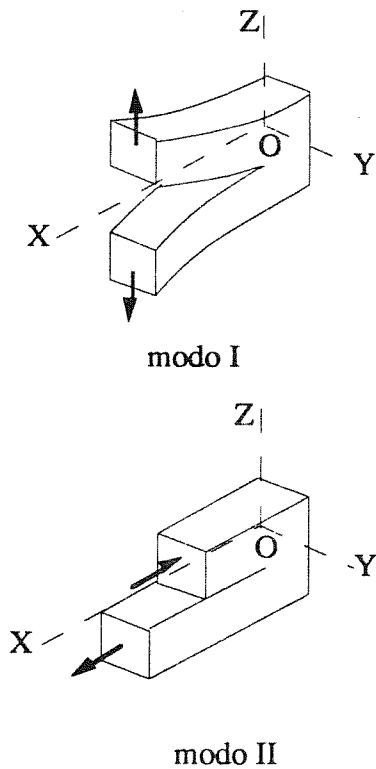


Fig. 4. Modos de fractura en un sólido bidimensional

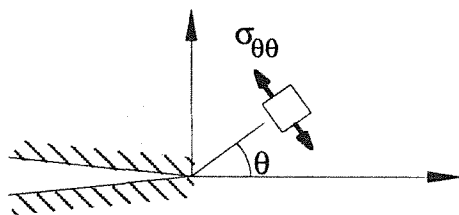


Fig. 5. Propagación de una fisura en modo mixto

El valor de la carga que inicia la propagación de la fisura se calcula mediante la ecuación:

$$K_{IC} = K_I \cos^3(\theta/2) - 3K_{II} \cos^2(\theta/2)\text{sen}(\theta/2) \quad (2)$$

en la que la carga aplicada interviene a través de los factores K_I y K_{II} .

Cálculo de las trayectorias de fisuración

El cálculo de las trayectorias de las fisuras para una geometría y sollicitación dadas es un problema complejo que requiere solución numérica. Para resolverlo hemos modelizado cada problema mediante el programa de elementos finitos FRANC2D [15] que implementa el criterio de propagación de la tensión circunferencial máxima y que permite trabajar con varias fisuras

propagándose al mismo tiempo. Además, este programa rehace automáticamente la malla de elementos finitos cada vez que se produce la propagación, lo que simplifica enormemente el proceso de cálculo.

Dado que la fractura elástica lineal no contempla la nucleación de fisuras, éstas se han introducido 'a priori' en los puntos más solicitados de la estructura, en la dirección perpendicular a la tensión principal mayor. Estos puntos fueron obtenidos de un primer cálculo elástico sobre la geometría sin fisurar.

Una de las grandes ventajas de utilizar un modelo elástico lineal es que para la determinación de las trayectorias de las fisuras no es preciso conocer los valores de los parámetros del material (módulo de Elasticidad, E, coeficiente de Poisson, ν , tenacidad de fractura, K_{IC}) ni el valor exacto de las cargas aplicadas. Estos datos sólo interviene si se desean relacionar desplazamientos y cargas, o cuando durante la propagación varían no proporcionalmente éstas últimas.

Para verlo, considérese un sólido elástico lineal de espesor B sometido a la acción de su peso y de fuerzas P_i (figura 6).

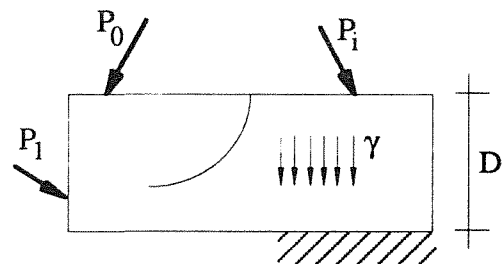


Fig. 6. Sólido elástico fisurado

Si analizamos las variables que intervienen en el problema podemos ver que la tensión en un punto del cuerpo siempre puede expresarse como:

$$\sigma = \frac{P_0}{BD} f(\text{geometría}, \frac{P_i}{P_0}, \frac{\gamma D}{P_0/BD}) \quad (3)$$

siendo B el espesor, D una dimensión característica, P_0 una de las fuerzas aplicadas que tomamos como referencia, γ el peso específico del material y f una función adimensional que dependerá del punto considerado. En el término 'geometría' de la ecuación (3) se incluirán todas las relaciones geométricas que definen completamente el problema.

Procediendo de igual forma, el valor de los factores de intensidad de tensiones podrá escribirse como:

$$K_I = \frac{P_0}{BD} \sqrt{D} g_I(\text{geometría}, \frac{P_i}{P_0}, \frac{\gamma D}{P_0/BD}) \quad (4)$$

$$K_{II} = \frac{P_0}{BD} \sqrt{D} g_{II}(\text{geometría}, \frac{P_i}{P_0}, \frac{\gamma D}{P_0/BD}) \quad (5)$$

siendo g_I y g_{II} funciones adimensionales.

A la vista de las ecuaciones (4) y (5) y de que en la ecuación (1) que determina el ángulo de propagación de las fisuras sólo interviene la relación K_I/K_{II} , resulta evidente que, siempre que se mantengan constantes las relaciones adimensionales P_i/P_0 y $\gamma BD^2/P_0$, la trayectoria de las fisuras dependerá sólo de la geometría, y no del valor de las cargas aplicadas o de otros parámetros.

Un razonamiento similar muestra que cualquier desplazamiento admitirá la forma:

$$\delta = \frac{P_0/BD}{E'} D h \left(\text{geometría}, \frac{P_i}{P_0}, \frac{\gamma D}{P_0/BD} \right) \quad (6)$$

siendo E' el módulo de elasticidad generalizado (E en tensión plana y $E/(1-\nu^2)$ en deformación plana). De nuevo podemos comprobar que la relación de desplazamientos entre diferentes puntos del cuerpo depende sólo de la geometría, siempre que se mantenga la proporcionalidad entre las cargas aplicadas.

La consecuencia práctica más importante es que no es necesario conocer las propiedades mecánicas del material o el valor concreto de las cargas aplicadas para determinar las trayectorias de fisuración o las relaciones entre desplazamientos de diferentes puntos de la estructura. Estos valores se pueden calcular sin dificultad analizando una estructura que sea geoméricamente proporcional.

En el próximo apartado mostraremos las predicciones realizadas con este modelo sobre algunos casos conocidos.

3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para contrastar el modelo hemos analizado las trayectorias de fisuración para dos casos documentados en la literatura. Ambos casos corresponden a la fisuración por gravedad de un tabique de ladrillo con una abertura. En el primero, el hueco del tabique está situado asimétricamente, en el mismo lado en el que se produce el asentamiento de la cimentación. En el segundo caso el hueco está emplazado en el centro del tabique.

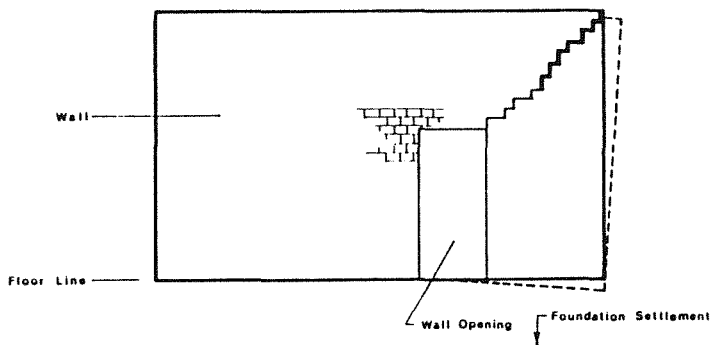


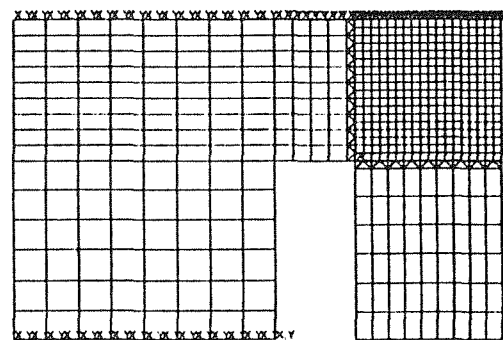
Fig. 7. Fisuración en un tabique asimétrico debida al asiento de la cimentación (según [15])

3.1 Tabique con un hueco asimétrico

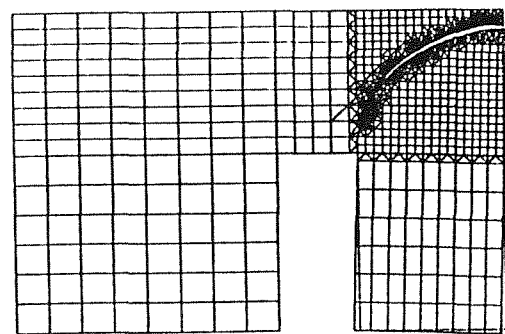
La figura 7 muestra la fisura formada en el tabique de una vivienda por asiento del terreno en uno de sus lados [15]. Obsérvese que se desarrolla una sola grieta que crece desde la esquina superior derecha hacia el hueco de la puerta.

Este problema ha sido estudiado mediante la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal conforme lo descrito en el apartado anterior. El tabique se ha modelizado por elementos finitos con la malla mostrada en la figura 8a. Las condiciones de contorno reproducen las del tabique real y la única carga aplicada es la gravitatoria.

Como puede apreciarse en la figura 8b los resultados del modelo son buenos. En particular, el modelo predice la trayectoria y dirección de la fisuración, iniciada en la esquina superior derecha.



(a)



(b)

Fig. 8. (a) Modelo de elementos finitos para el tabique de la figura 7. (b) Patrón de fisuración obtenido

3.2 Tabique con un hueco simétrico

La configuración de este problema se reproduce en la figura 9. Al igual que en el problema anterior, la única carga sobre la estructura es la gravitatoria pero ahora son dos las grietas producidas por el asiento de la cimentación. Como se muestra en la figura 10, el modelo predice adecuadamente la disposición y trayectoria de ambas grietas.

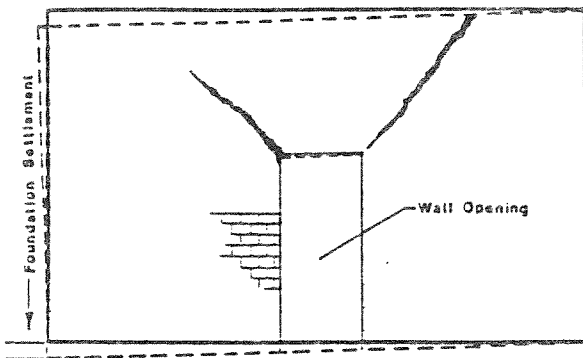


Fig. 9. Fisuración en un tabique simétrico debida al asiento de la cimentación (según [15])

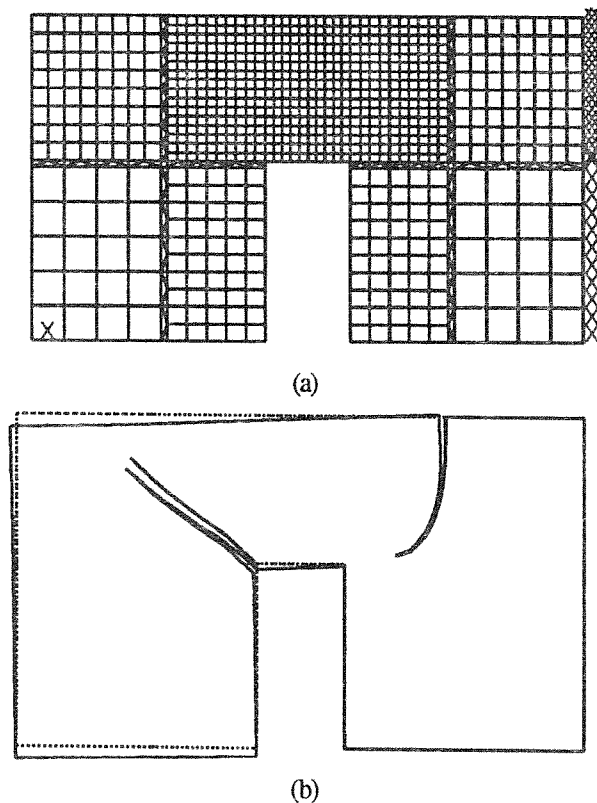


Fig. 10. (a) Malla de elementos finitos para el tabique de la figura 9. (b) Patrón de fisuración obtenido

4. CONCLUSIONES

Como resumen y conclusión de este trabajo podemos afirmar que la Mecánica de Fractura Elástica Lineal constituye un método sencillo y accesible de análisis que puede ayudar en gran medida a la determinación de patrones de fisuración en paramentos de edificación. Hemos mostrado además que para realizar este tipo de predicciones no es necesario un conocimiento profundo del estado de cargas ni de las propiedades de los elementos que componen el paramento. Esta técnica puede ayudar a comprender mejor cómo se forman las grietas en los edificios, y, en consecuencia, simplificar el análisis del problema, contribuyendo así a la búsqueda del mejor tratamiento para estas lesiones.

5. REFERENCIAS

- [1] Building Research Establishment, "Assesment of damage in low-rise buildings", BRE-Digest 251, August (1990), Dept. of the Environment, U.K.
- [2] Maña, F., "Patología de las cimentaciones", Ed. Blume, Barcelona (1978)
- [3] Uriel, A., "Patología de las cimentaciones", Informes de la construcción, 350, 5-35 (198)
- [4] Dhanasekar, M., Kleeman, P.W. and Page, A.W., "Biaxial stresse-strain relations for brick maonry", J. Struct. Engng. ASCE,111(5), 1085-1100,(1985)
- [5] Scarpas, A. and Blaauwendraad, J., "Non local plasticity softening model for brittle materials", Fracture and Damage of Concrete and Rock-FDCR2 (H.P. Rosmanith Ed.), 44-53, E&FN Spoon, London, (1993)
- [6] Feenstra, P.H. and Borst, R. De, "A plasticity model and algorithm for mode I cracking in concrete", International Journal of Numerical Methods in Engineering, 38, 2509-2529 (1995)
- [7] Page, A.W., "Finite element model for masonry", J. Struct. Div. ASCE, 104(8), 11267-1285 (1978)
- [8] Rots, J.G., "Numerical simulation of cracking in structural masonry", Heron, 36(2), 49-63 (1991)
- [9] Rots, J.G., Berkers, W.G.J. and Heuvel, H.A.J.G. Van Der, "Towards fracture mechanics based design rules for movement-joint spacing", Proc. 10th Int. Brick and Block Masonry Conference (N.G. Shrive amd A. Huizer Eds.), 707-717, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada(1994)
- [10] Lourenco, P.B., "Computational strategies for masonry structures", Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (1996)
- [11] Elices, M., Mecánica de la Fractura, Publicaciones de la E.T.S.I. Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (1996)
- [12] Erdogan, F., and Sih, G.C., "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", J. Basic Engng., 85, 519-527 (1963)
- [13] Hussain, M.A., Pu, S.L. and Underwood, J., "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II", ASTM STP 560, 2-28 (1974)
- [14] Sih, G.C., "Strain energy density factor applied to mixed mode crack problems", International Journal of Fracture, 10, 305-321 (1974)
- [14] Wawryzynek, P. and Ingrassia, A., FRANC2D: A Two-Dimensional crack propagation simulator, Version 2.7 (1974)
- [15] Grimm, C.T., "Masonry cracks: A review of the literature", Masonry: Materials, Design, Construction and Maintenance (H.A. Harris Ed.), ASTM STP-992, 257-281 (1988)

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica la ayuda recibida a través de los proyectos de investigación MAT94-0120-C03 y PB93-0031.