

# LOS MODELOS NUMÉRICOS FRENTE AL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE FÁBRICA ENSAYADOS EN LABORATORIO

(THE NUMERICAL MODELS FRONT TO THE BEHAVIOUR OF MASONRY ELEMENTS TESTED IN LABORATORY)

Jorge G. Rosas Rodríguez, Dr. Ingeniero Civil  
Prof. Titular de la Universidad Privada Boliviana

Luis M. Villegas Cabredo, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Catedrático de la Universidad de Cantabria

Domingo Lorenzo Esperante, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Prof. Titular de la Universidad de Cantabria

Fecha de recepción: 21-VII-2001

ESPAÑA

631-18

## RESUMEN

*El presente trabajo de investigación es una aplicación de los modelos numéricos más recientemente propuestos para el análisis de estructuras de fábrica. El objetivo global de este artículo es estudiar el comportamiento de muros de cortante sometidos a cargas coplanares. Se ha realizado la calibración de modelos numéricos, para ello se han utilizado muretes de ladrillo ensayados a compresión diagonal. Los muretes han sido sometidos a un análisis numérico utilizando dos técnicas diferentes (micro y macromodelización) basadas en el método de los elementos finitos, que permiten simular el comportamiento no lineal de la fábrica.*

## SUMMARY

*The present work of research is an application of the numerical models more recently proposed for the analysis of masonry structures. The global objective of this paper is to study the behaviour of shear walls subject to in-plane loads. The calibration of numerical models has been made, for it small walls of brick tested to diagonal compression have been used. The walls have been subject to a numerical analysis using two different techniques (micro and macro-modelling) based on the Finite Elements Method, that allow to simulate the non-linear behaviour of the masonry.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La fábrica, es un material compuesto, heterogéneo, constituido por dos materiales de características distintas: las unidades (ya sean ladrillos cerámicos, bloques de hormigón u otras) y las juntas de mortero.

Su comportamiento mecánico es muy complejo, y es función de las características mecánicas de las unidades y del mortero que la componen. Además, las condiciones de construcción y mano de obra tienen un gran efecto en el comportamiento mecánico de la fábrica. Las juntas horizontales y verticales actúan dentro de la fábrica como

planos de falla, ya que la interfase unidad-mortero tiene una unión débil.

Las propiedades mecánicas reales de la fábrica hacen que no se la puede tratar como un material elástico isótropo, como se hace con otros materiales utilizados en el campo estructural: acero, hormigón, etc. De este modo, en las dos últimas décadas, desde el desarrollo de las técnicas modernas de computación basadas en el Método de los Elementos Finitos, los investigadores han tratado de desarrollar modelos específicos para el análisis de estructuras de fábrica.

## 2. TÉCNICAS DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA

En general, la aproximación hacia una modelización numérica puede ser enfocada con *Micromodelos*, los cuales discretizan de forma detallada y tratan a las unidades y al mortero por separado. Para esta técnica de micromodelización existen dos formas diferentes de encarar el problema, dependiendo de la precisión y sencillez de la modelización, Rots [1] y Lourenço [2] distinguen entre:

*Micromodelización detallada:* en esta técnica, ladrillos y morteros son representados por elementos continuos, mientras que la interfase ladrillo-mortero se representa mediante elementos discontinuos.

*Micromodelización simplificada:* los ladrillos están representados por un elemento continuo y las juntas horizontales y verticales son representadas por elementos discontinuos.

En la primera técnica se toman en cuenta el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y, en caso de ser necesario, las propiedades inelásticas de las unidades y del mortero. En el presente trabajo, para el análisis de los muretes, se ha utilizado la micromodelización simplificada.

Por otra parte, existe la posibilidad de hacer un tratamiento con *Macromodelos*, donde las unidades, mortero e interfase unidad-mortero están englobados por un mismo elemento, asumiendo al compuesto fábrica como un todo.

### A) Micromodelización

Los micromodelos tienen su campo de aplicación en el estudio del comportamiento local de las estructuras de fábrica, Lourenço *et al.* [3]. Page [4] es el primer investigador que ha obtenido algunos resultados de la aplicación de micromodelización en fábrica de ladrillo. Chiostrini y Vignoli [5] han desarrollado un micromodelo simplificado para reproducir el comportamiento de un panel de fábrica de ladrillo bajo tensiones normal y de cortante. Ali y Page [6] han estudiado el comportamiento de paneles de fábrica bajo gradientes de tensiones altos debidos a cargas concentradas mediante un micromodelo completo. Riddington y Ghazali [7] han desarrollado un estudio experimental y numérico sobre el comportamiento de paneles de fábrica. Para el análisis numérico, ellos han trabajado con un micromodelo detallado en el cual unidades y mortero son representados por medio de elementos finitos de tensión plana y la interfase ladrillo-mortero por elementos de conexiones a manera de discontinuidades. Lotfi y Shing [8] y Lourenço [2], tienen en consideración la necesidad de la simulación numérica detallada de estructuras de fábrica para su mejor entendimiento. La técnica desarrollada por Lourenço, es

innovadora en el sentido de utilizar elementos de interfase para modelar las juntas y de incluir la falla por tracción de las unidades. Lourenço y Rots [9] indican que un modelo preciso para fábrica debe incluir los tipos básicos de mecanismos de falla que caracterizan el material. Carol y López [10] han desarrollado un modelo de análisis para la simulación de materiales cuasi-frágiles.

### B) Macromodelización

Los modelos específicamente desarrollados para fábrica toman en cuenta, en su concepción, la anisotropía causada por las juntas de mortero. Samarasinghe *et al.* [11] proponen un macromodelo simple para el análisis no lineal de fábrica de ladrillo bajo estados de tracción-compresión biaxial. Dhanasekar y Page [12] han desarrollado un macromodelo más sofisticado. Adreus [13], para poder modelizar ciertas características de la fábrica (su comportamiento), que se hacen difíciles de analizar por técnicas estándar de la Mecánica de Medios Continuos y el Método de los Elementos Finitos uni y bidireccionales, discretiza el sólido fábrica en un número finito de celdas elementales compuestas por elementos barra a manera de una celosía, que poseen leyes constitutivas multilineales. Lourenço *et al.* [14] han propuesto un macromodelo continuo anisótropo. Molins y Roca [15] han desarrollado un modelo para el análisis no lineal por la geometría y el material de estructuras de fábrica formadas por elementos lineales de geometría curva y variable basada en la Formulación Matricial Generalizada.

## 3. CRITERIOS DE FLUENCIA PARA MATERIALES CUASI-FRÁGILES

Para que la modelización sea exitosa y se realice conforme al comportamiento real de la fábrica, es de suma importancia la elección de un criterio de fluencia conforme a los mecanismos de falla de la fábrica, ya que éste determinará el comportamiento no lineal del modelo.

No todos los mecanismos de falla en la fábrica son totalmente comprendidos y los criterios de fisuración no han sido del todo desarrollados, por lo que es usual la utilización de criterios de plasticidad aplicados a geomateriales.

Los datos experimentales han demostrado que existen ciertos criterios de fluencia que funcionan bien para algunos materiales de características específicas, y no muy bien para otros materiales. Los micromodelos, junto con los ensayos experimentales, representan una gran herramienta para poder entender el comportamiento real de la fábrica.

Para la modelación a un micro nivel de los mecanismos de falla por tracción y cortante se utiliza una superficie de fluencia combinada, con la superficie de fluencia de

Rankine para incorporar el modo de tracción y la superficie de fluencia de Mohr-Coulomb para el modo cortante, ver Figura 1.

Para la modelación a un macro nivel se han utilizado los criterios de Rankine para la falla por tracción y el criterio de Drucker-Prager para las fallas de cortante y compresión, Figura 2. Estas teorías de falla están formuladas para materiales isotrópicos, de modo que los resultados simplemente proporcionarán una idea global del comportamiento de la estructura de fábrica.

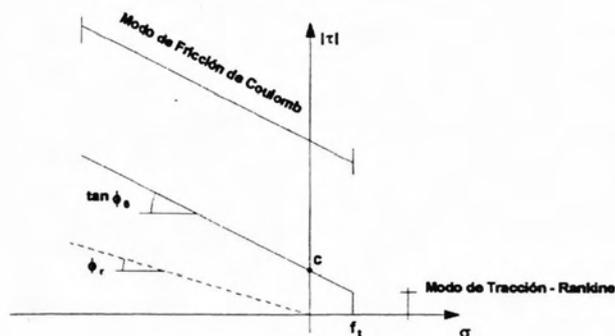


Figura 1.- Superficie de fluencia combinada de Mohr-Coulomb y Rankine.

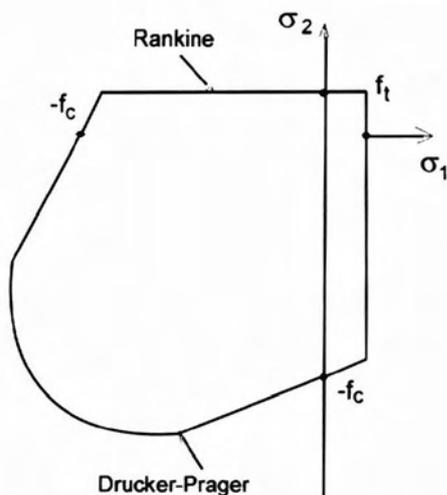


Figura 2.- Superficie de fluencia combinada de Drucker-Prager y Rankine.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL MICRO Y MACROMODELO

En el *micromodelo*, para modelar las unidades, se han adoptado elementos continuos cuadriláteros isoparamétricos de 8 nodos y las juntas son representadas con elementos de interfase de 6 nodos de espesor nulo. Asimismo, se ha incorporado la falla de las unidades por tracción por medio de elementos de interfase localizados verticalmente en el centro de la unidad (fisuras potenciales), que permiten simular una separación en dos partes de ésta.

La interpolación de este tipo de elementos es cuadrática. En el micromodelo se asume que las unidades tienen un comportamiento elástico, se adopta el esquema de integración de Gauss de  $2 \times 2$ , siendo éste el más habitual para este tipo de comportamiento, Rots [16]. Para la *interfase de unidad-mortero*, en el micromodelo se han utilizado elementos discontinuos. Estos elementos permiten discontinuidades en el campo de desplazamientos y su comportamiento se describe en términos de las relaciones entre tensiones y los desplazamientos relativos a lo largo de la interfase. Estos elementos son muy útiles en el método de los elementos finitos cuando los desplazamientos son discontinuos entre dos elementos, como es el caso de las juntas de mortero donde existen aberturas por tracción y deslizamientos por cortante. El elemento de interfase utilizado en el micromodelo tiene una configuración bidimensional. El elemento se basa en una interpolación cuadrática, y se ha utilizado un esquema de integración de tres puntos de Lobatto. Se escogió este esquema de integración dado el deficiente comportamiento con la integración de Gauss para elementos discontinuos de gran rigidez, Rots [16].

Para modelar los elementos del *macromodelo*, también se ha utilizado el elemento cuadrilátero de 8 nodos. Debido a que tienen un comportamiento no lineal, se adoptó un esquema de integración de  $3 \times 3$ , por ser un esquema más robusto para el análisis no lineal de materiales cuasi-frágiles, según Rots [16].

#### 5. MURETES DE LADRILLO ENSAYADOS A COMPRESIÓN DIAGONAL

##### 5.1 Estudios experimentales

Ensayos en muretes de ladrillo perforado sometidos a compresión diagonal, han sido realizados por Lijdens y Villegas [17] en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

El espécimen consiste en un murete de  $600 \times 600 \text{ mm}^2$ , constituido por 8 hiladas de dos y medio ladrillos cada una; el espesor del muro es de 125 mm. Las juntas horizontales y verticales tienen un espesor de 10 mm, ver Figura 3. Las dimensiones nominales del ladrillo perforado es de  $230 \times 125 \times 65 \text{ mm}$ .

Para la fabricación de los especímenes se ha utilizado un mortero de cemento y arena remolida, sin cal ni aditivos: Mortero M80 1:4. La cantidad de agua ha sido fijada para mantener una consistencia en Cono de Abrams de  $140 \pm 20 \text{ mm}$ .

Todos los muretes fueron fabricados sobre tableros de conglomerado de 40 mm de espesor previamente nivelados. Anteriormente a la elaboración, los ladrillos fueron

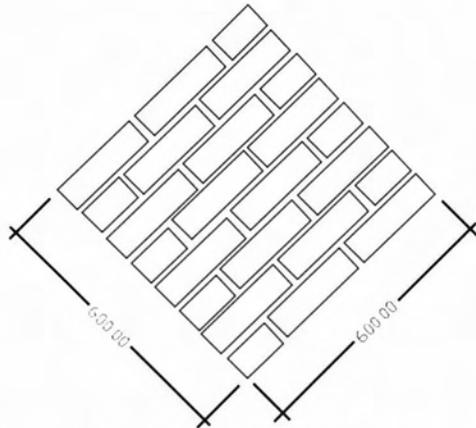


Figura 3.- Dimensiones del murete a compresión diagonal.

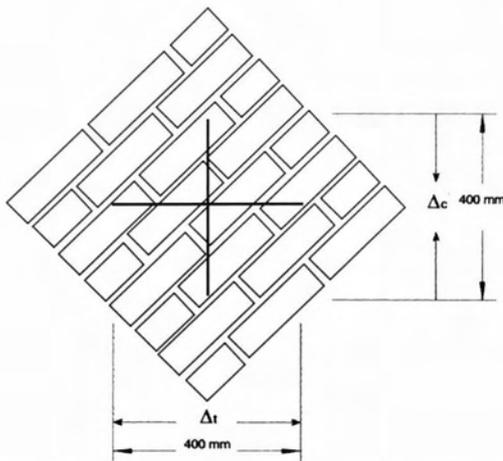


Figura 4.- Bases de medida para medir la deformación de las diagonales.

sumergidos y luego escurridos hasta presentar el aspecto de saturación con superficie seca, con el objeto de evitar el empobrecimiento del mortero por la succión excesiva de los mismos.

Todos los especímenes ensayados fueron instrumentados con el objeto de conocer las características de deformación del material (Figura 4). Para ello se utilizaron transductores de desplazamiento del tipo VRT largos con recorrido de  $\pm 50$  mm, calibrándose los mismos cada vez que se modificaba su instalación. Los especímenes han sido ensayados con una edad de 30 días.

Mediante este ensayo se ha dibujado el esquema de fisuración de los muretes. La instrumentación aplicada ha permitido trazar la curva de tensión de corte nominal-distorsión angular (Figura 5). La resistencia de corte nominal y la distorsión angular han sido calculadas con las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$f_{qN} = \frac{P_{\text{máx}}}{\sqrt{2} \cdot A} = \frac{P_{\text{máx}}}{A_d} \quad (1)$$

$$\gamma = \epsilon_v - \epsilon_h \quad (2)$$

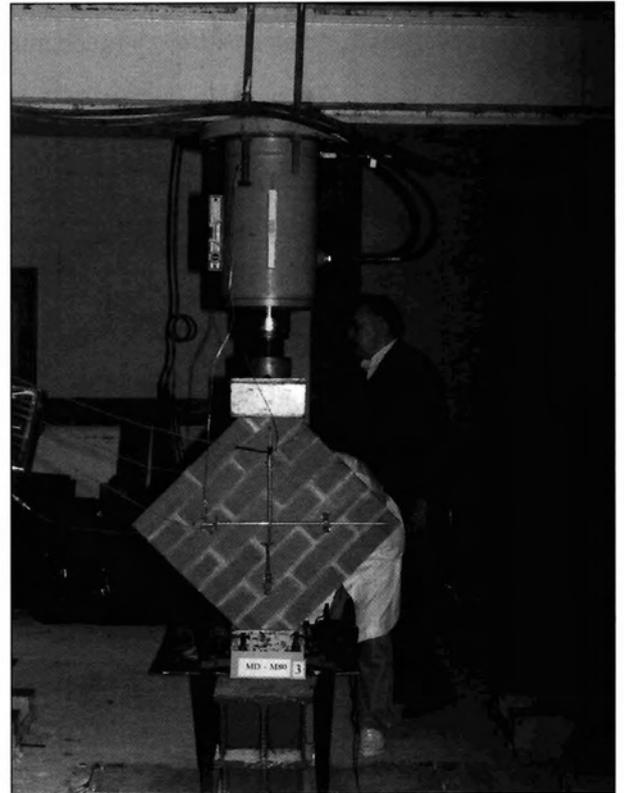


Figura 5.- Pórtico de cargas verticales para el ensayo de muretes a compresión diagonal.

TABLA 1.- Resultados experimentales de muretes a compresión diagonal

Probeta No	Carga de Rotura kN	Distorsión angular Máxima o / o	Tensión de Rotura N/mm <sup>2</sup>	Resistencia al Corte Media N/mm <sup>2</sup>
1	134,50	0,20	1,26	1,49
2	158,87	0,55	1,49	
3	160,80	0,50	1,50	
4	167,96	0,51	1,57	
5	172,02	0,41	1,61	

Fuente: Lijdens y Villegas [17].

siendo  $f_{qN}$  la resistencia al corte nominal,  $p_{\text{máx}}$  la carga de rotura,  $A$  el área de la sección de la probeta y  $A_d$  área de la diagonal.

$\epsilon_v$  y  $\epsilon_h$  son las deformaciones específicas en las diagonales vertical y horizontal respectivamente. Se considera positivo al acortamiento, por lo que debe observarse que al ser  $\epsilon_h$  una deformación de tracción, resulta  $\gamma$  de la suma de los valores absolutos de los componentes. Los resultados de los estudios experimentales se presentan de manera resumida en la Tabla 1.

Estos muros fueron sometidos a una carga vertical puntual a través de un gato hidráulico de doble efecto de capacidad 199 kN, la carga ha sido aplicada en forma incremental hasta producirse la falla, ver Figura 6.

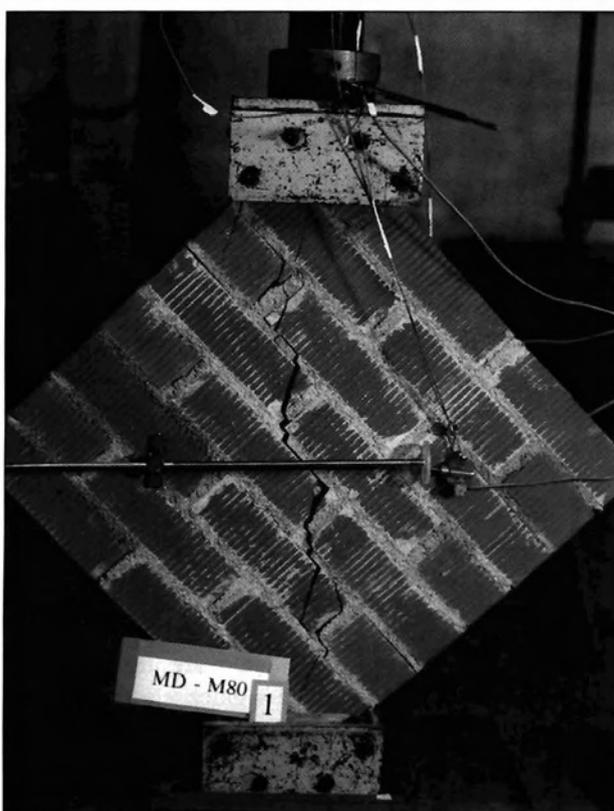


Figura 6.- Falla con fisuración diagonal central.

## 5.2 Análisis numérico

La calibración del programa de Elementos Finitos DIANA versión 7.2 con los resultados experimentales descritos anteriormente, se ha llevado a cabo por dos técnicas numéricas micro y macromodelización.

Para el análisis numérico por la técnica de *micromodelización*, los ladrillos son representados por elementos continuos de tensión plana (8 nodos) mientras que para las juntas horizontales y verticales se adoptaron elementos de interfase (6 nodos), y asimismo para las fisuras potenciales en la mitad de cada ladrillo, tal como se ha mencionado en el apartado 4. Cada ladrillo es modelado con elementos de 4x2, lo cual conllevó a una discretización del murete 294 elementos, 160 elementos

continuos, 102 elementos de interfase para las juntas y 32 elementos para las fisuras potenciales. Por el contrario, para el *macromodelo* se utilizaron únicamente elementos continuos de 8 nodos, y el mallado se generó con elementos de 40x40 mm<sup>2</sup>. Esto conlleva a 225 elementos, a pesar, que se ha mallado bastante fino, existe una diferencia entre la cantidad de elementos requeridos por el micromodelo.

## 5.3 Propiedades de los materiales para el micromodelo

Previo a los ensayos de muretes de ladrillo a compresión diagonal, Lijdens y Villegas [17] han realizado ensayos para determinar la resistencia a la compresión del ladrillo y mortero.

### Ladrillo cerámico perforado

- . Resistencia de rotura media a compresión: 17,16 N/mm<sup>2</sup>
- . Resistencia característica a compresión: 13,11 N/mm<sup>2</sup>

### Mortero M80

- . Resistencia de rotura media a compresión: 20,71 N/mm<sup>2</sup>
- . Resistencia característica a compresión: 20,14 N/mm<sup>2</sup>.

Las propiedades de los materiales que se utilizaron para la validación del Programa de Elementos Finitos DIANA versión 7.2, se presenta para cada componente del murete a compresión diagonal.

### A. Propiedades de los ladrillos

Los ladrillos utilizados por Lijdens y Villegas [17] son ladrillos cerámicos perforados, de dimensiones 230x125x65 mm<sup>3</sup>.

Propiedades elásticas de los ladrillos: el módulo de Young ha sido adoptado de Lourenço y Rots [9], que ellos han utilizado para validar su modelo de interfase; el coeficiente de Poisson  $\nu$  y el módulo de elasticidad transversal G se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2.- Propiedades elásticas de los ladrillos

Propiedades	Valores
E	16700 N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	0,15
G	7261 N/mm <sup>2</sup>

Debido a que se han empleado elementos de interfase verticales en la mitad de cada ladrillo para modelar las fisuras potenciales por tracción, se utilizó un modelo simple de falla del Modo I con ablandamiento exponencial por tracción y una inmediata actualización a cero de las

tensiones de cortante. Para este modelo se presentan en la Tabla 3 la resistencia a tracción de los ladrillos paralela a las juntas horizontales  $f_t$  y la energía de fractura por tracción  $G_f^I$ . Las rigideces  $k_n$  y  $k_s$  de los elementos de interfase para las fisuras potenciales se han asumido bastante elevadas para simular la alta rigidez de los ladrillos.

TABLA 3.- Propiedades para las fisuras potenciales en los ladrillos

Propiedades	Valores
$f_t$	2,0 N/mm <sup>2</sup>
$G_f^I$	0,08 Nmm/mm <sup>2</sup>
$k_n$	1,0 x 10 <sup>6</sup> N/mm <sup>3</sup>
$k_s$	1,0 x 10 <sup>6</sup> N/mm <sup>3</sup>

Dentro los ensayos realizados por Lijdens y Villegas [17] no se posee la resistencia a tracción de los ladrillos cerámicos. Para el presente estudio se ha adoptado un valor aproximado al 10% de su resistencia a compresión, éste valor es sugerido por Hughes *et al.* [18]. Además, la resistencia a tracción de los ladrillos se encuentra entre los valores 1,79 y 2,74 N/mm<sup>2</sup> que han sido encontrados mediante ensayos a tracción directa por Atkinson *et al.* [19].

#### B. Propiedades de la interfase ladrillo-mortero

Para las juntas de la fábrica Lijdens y Villegas [17] utilizaron un mortero de cemento 1:4 (M80). En los ensayos realizados por Lijdens y Villegas, no se disponen de propiedades inelásticas, a través de estos ensayos sólo se ha encontrado la carga de rotura máxima y con ella la tensión de corte máxima y luego la distorsión angular, por esta razón los parámetros necesarios se han extraído de los datos obtenidos experimentalmente por Raijmakers y Vermeltoort [20] en micro-ensayos para caracterizar el comportamiento de la interfase ladrillo-mortero y en muros de cortante para analizar su comportamiento, Tabla 5. En particular, este estudio atribuyó la gran importancia de propiedades antes ignoradas como el ablandamiento, la energía de fractura y el ángulo de dilatación, Van der Pluijm [22]. Las propiedades elásticas del mortero se resumen en la Tabla 4.

Para el módulo de elasticidad del mortero se ha adoptado un valor aproximado a los valores encontrados mediante ensayos realizados por Riddington y Ghazali [7].

Para representar el comportamiento de la unión ladrillo-mortero mediante los elementos de interfase se requieren las siguientes propiedades para la superficie compuesta de

TABLA 4.- Propiedades elásticas de las juntas de mortero

Propiedades	Valores
E	7000 N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	0,15
G	3043 N/mm <sup>2</sup>

TABLA 5.- Propiedades para los elementos de la interfase ladrillo-mortero

Propiedades	Valores
$f_t$	0,50 N/mm <sup>2</sup>
$G_f^I$	0,018 Nmm/mm <sup>2</sup>
$G_f^{II}$	0,00 Nmm/mm <sup>2</sup>
c	0,70 N/mm <sup>2</sup>
$\tan \phi_0$	0,75
$\tan \phi_r$	0,75
$\tan \psi$	0,56
$k_n$	1200,00 N/mm <sup>3</sup>
$k_s$	524,00 N/mm <sup>3</sup>

Mohr-Coulomb y Rankine: la resistencia a tracción de la interfase  $f_t$ , las energías de fractura del Modo I  $G_f^I$  y del Modo II  $G_f^{II}$ , la cohesión c, el ángulo de fricción interna inicial  $\phi_0$ , el ángulo de fricción interna residual  $\phi_r$ , y los componentes de la matriz de rigidez elástica de los elementos de interfase  $k_n$  y  $k_s$ , Tabla 5.

De los datos de Raijmakers y Vermeltoort no se posee un valor para la cohesión, por tanto se ha tomado el valor sugerido por Lourenço [23] de  $c = 1,4 \cdot f_t$ . De igual manera, Lourenço indica que para análisis rigurosos con micromodelos el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatación no deberían tomarse constantes conforme a observaciones realizadas en ensayos. Sin embargo, para propósitos como los del presente trabajo Lourenço indica que es suficiente con considerar  $\tan \phi = 0,75$  y  $\tan \psi = 0$ , independientemente del tipo de mortero y unidad utilizada; sin embargo, en el presente análisis se ha considerado el ángulo de dilatación  $\tan \psi = 0,56$  debido a que el murete no está sometido a una precompresión. Los componentes de la matriz de rigidez elástica han sido calculados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$k_n = \frac{E_b \cdot E_m}{t_m \cdot (E_b - E_m)} ; k_s = \frac{G_b \cdot G_m}{t_m \cdot (G_b - G_m)} \quad (3)$$

donde  $E_b$  y  $E_m$  son los módulos de Young,  $G_b$  y  $G_m$  son los módulos de cortante respectivamente para la unidad y

mortero, y  $t_m$  es el espesor de la junta. La Tabla 5 presenta de manera resumida las propiedades necesarias para los elementos de la interfase ladrillo-mortero.

#### 5.4 Propiedades para el macromodelo

Dentro del programa de ensayos de fábrica de ladrillos Lijdens y Villegas [17] han determinado la resistencia a la compresión de prismas de ladrillo (de cinco ladrillos apilados y unidos con mortero). La resistencia de rotura media y característica a compresión del prisma con mortero M80 es igual a 12,80 N/mm<sup>2</sup> y 10,31 N/mm<sup>2</sup> respectivamente.

Para las propiedades mecánicas necesarias en la macromodelización, los datos de Raijmakers y Vermeltfoort son escasos, ya que sólo se dispone de la resistencia a la compresión de la fábrica  $f_m$ . Para obtener los demás parámetros requeridos se recurrió a fórmulas propuestas por diversos autores.

Los parámetros necesarios para el macromodelo son: las propiedades elásticas de la fábrica caracterizadas por el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, la resistencia a la compresión de la fábrica  $f_m$ , la resistencia a la tracción de la fábrica  $f_t$ , la energía de fractura por compresión  $G_{fc}$ , la energía de fractura por tracción  $G_f^I$  y los parámetros corregidos para un estado biaxial requeridos por el criterio de Drucker-Prager,  $\text{sen } \phi$ ,  $\text{sen } \psi$  y la cohesión  $\bar{c}$ . En la Tabla (6) se tienen los valores para estos parámetros.

TABLA 6.- Propiedades de la fábrica de ladrillo para el macromodelo

Propiedades	Valores
E	11850,00 N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	0,15
$f_m$	10,00 N/mm <sup>2</sup>
$f_t$	0,70 N/mm <sup>2</sup>
$G_{fc}$	18,94 Nmm/mm <sup>2</sup>
$G_f^I$	0,07 Nmm/mm <sup>2</sup>
$\bar{c}$	3,68 N/mm <sup>2</sup>
$\text{sen } \phi_0$	0,296
$\text{sen } \psi$	0,00

Para el módulo de Young para la fábrica se ha adoptado el promedio de los módulos de ladrillo y mortero. Sin embargo, Lijdens y Villegas [17] han obtenido el módulo de elasticidad para el mortero M80 en función de la resistencia característica de la fábrica  $E = 1152 f_k$ , la resistencia característica a compresión fue de

10,31 N/mm<sup>2</sup>, entonces el módulo de elasticidad es igual a 11877 N/mm<sup>2</sup>, que es aproximadamente igual al valor adoptado. La resistencia a compresión de la fábrica se ha adoptado igual a 10 N/mm<sup>2</sup> que es un valor cercano al valor encontrado por Lijdens y Villegas. La resistencia y la energía de fractura para las fallas por tracción se han obtenido a partir de las relaciones de las expresiones:

$$f_t = 0,1 \cdot f_m \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

$$G_f^I = 0,1 \cdot f_t \text{ Nmm/mm}^2 \quad (5)$$

propuestas por Lourenço, pero estos valores calculados han sido disminuidos en un 30% para calibrar el modelo. La energía de fractura por compresión, puede estimarse con la fórmula que propone el Código Modelo 90 (CEB-FIP, 1991) para hormigón (Lourenço [24]), se ha calculado con la siguiente expresión:

$$G_{fc} = 15 + 0,43 \cdot f_m - 0,0036 \cdot f_m^2 \quad (6)$$

El ángulo de fricción interna y la cohesión se han ajustado con las siguientes fórmulas:

$$\text{sen } \phi_0 = \frac{3\alpha_f}{2 + \alpha_f} = \frac{3a - 3}{5a - 3} \quad (7)$$

$$\bar{c} = f_c \frac{1 - \text{sen } \phi_0}{2 \cos \phi_0} \quad (8)$$

tomando el parámetro  $a$  como 1,39, a partir de las envolventes de falla en estado de tensión biaxial de la fábrica obtenidas por Page [25] y [26].

## 6. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS

La comparación entre las curvas tensión de corte-distorsión angular numérico y experimental de los muretes a compresión diagonal se muestran en la Figura 7. Los resultados son casi similares, la carga de rotura para el micromodelo un 4% menor que la carga de rotura experimental media, mientras la carga de rotura para el macromodelo es 1% menor que la experimental como puede observarse en la Tabla 7.

### 6.1 Análisis con micromodelo

Globalmente, el análisis por micromodelo captura bien el comportamiento experimental de los muretes como se ilustra en la Figura 7. Si embargo, las cargas de rotura para los muretes 4 y 5 de la Tabla 1 son algo mayores que la carga de rotura encontrada por micromodelo. La construcción y el curado influyen en la resistencia de la fábrica, ya que las tareas de fabricación fueron realizadas por un oficial albañil con vasta experiencia en la ejecución de fábricas.

TABLA 7.- Comparación entre resultados experimentales y numéricos

Carga de Rotura Experimental [kN]	Carga de Rotura Micromodelo [kN]	Carga de Rotura Macromodelo [kN]	Exper/Micro	Exper/Macro
158,83 <sup>1</sup>	152,30	157,40	1,04	1,01

<sup>1</sup> Valor medio de 5 muretes.

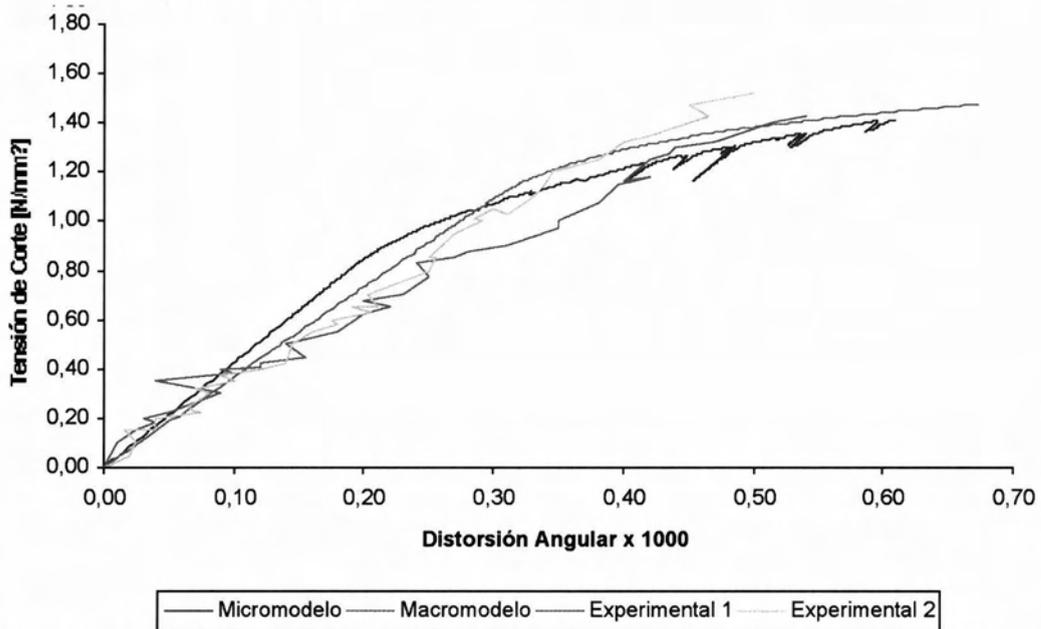


Figura 7.- Comparación de curvas de tensión de corte nominal-distorsión angular. Numérico-experimental (las curvas experimentales sólo se han representado de las probetas 2 y 4).

En el análisis numérico puede llegarse a cargas de rotura mayores, aumentando la resistencia a tracción de las juntas (lo cual no es conveniente ya que muchos investigadores recomiendan tomar el valor igual a cero) y del ángulo de dilatación. También puede decirse que existe una gran diferencia, especialmente en cuanto al curado, entre construir un murete en laboratorio y construir un muro en un edificio.

Nótese también que los saltos encontrados en el análisis numérico son estados convergentes debido al surgimiento de nuevas fisuras diagonales ya que otras fisuras se cierran.

En la Figura 8.c, puede apreciarse que la zona más crítica es la parte diagonal del murete, se han producido fisuras escalonadas en la diagonal y en algunas juntas adyacentes, en el ensayo estas fisuras también se han podido observar, ver Figura 6. En general, la falla ocurrió en las juntas de mortero y no se ha presentado la falla por tracción en los ladrillos. La falla es gobernada por tracción normal en las juntas y seguida por deslizamientos tangenciales. Es interesante observar la similitud que existe entre los

desplazamientos totales, en la situación de rotura (Figura 8.a) que suministra el micromodelo, con la realidad observada en el laboratorio (fotografía de la Figura 6).

En la Figura 8 se muestran las gráficas de fisuras de desplazamientos totales, desplazamientos incrementales, fisuras en las juntas de mortero y deslizamientos de las juntas, dichas gráficas son para el último paso de carga. Los *desplazamientos totales* corresponden a la suma global hasta el último paso convergido. Los *desplazamientos incrementales* se refieren al desplazamiento ocurrido en la última iteración. Las *gráficas de fisuras* representan los desplazamientos ocurridos en la dirección normal al plano de los elementos de interfase. Las *gráficas de deslizamientos* representan desplazamientos ocurridos en la dirección tangente al plano de los elementos de interfase.

## 6.2 Análisis con macromodelo

El murete analizado por micromodelo, también ha sido analizado por la técnica de macromodelización para validar el Programa DIANA versión 7.2, la mayoría de los

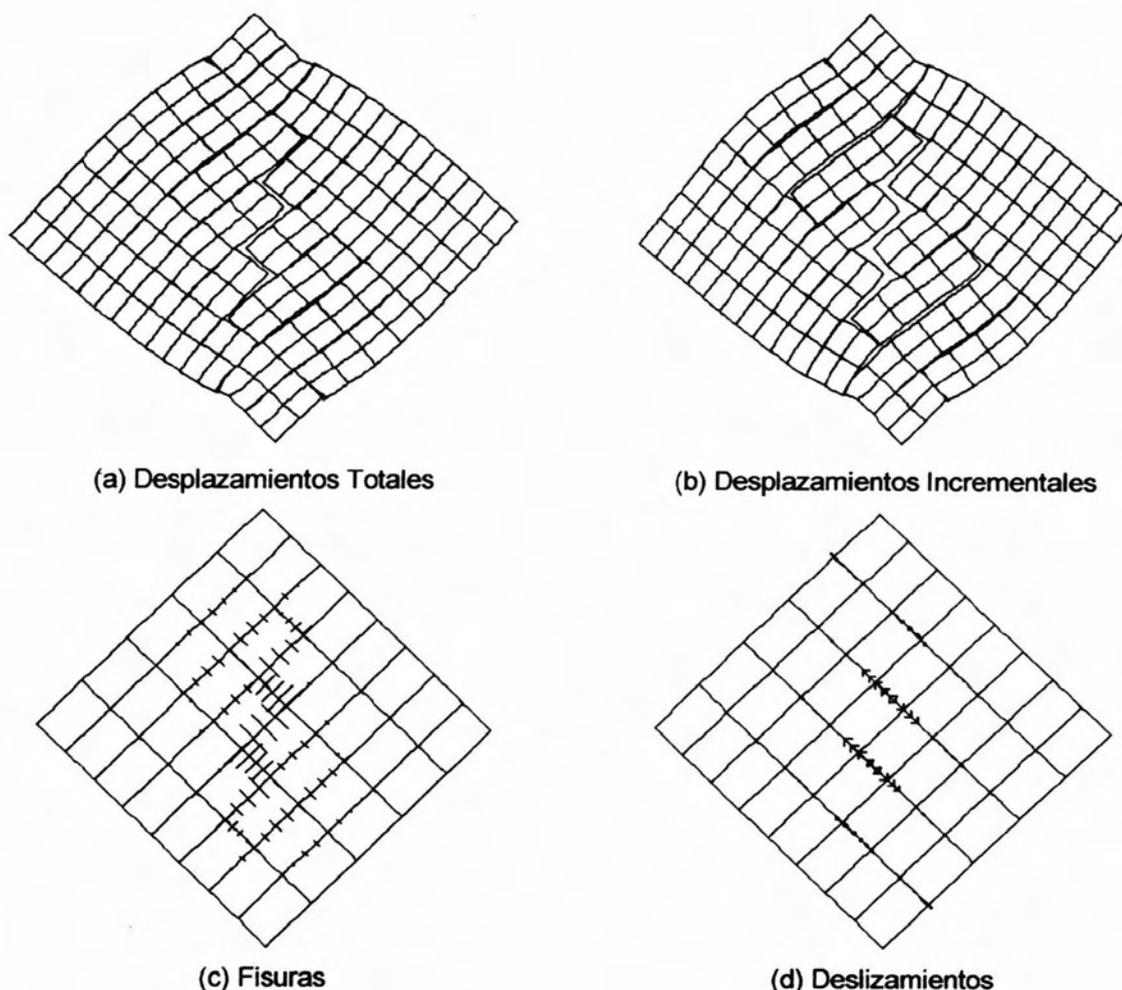


Figura 8.- resultados del micromodelo para la carga de rotura,  $P = 152,30$  [kN].

parámetros necesarios que caracterizan el modelo son disponibles de ensayos biaxiales, aunque el tamaño de los muretes es bastante pequeño para analizar por macromodelo. En la Figura 7, la curva tensión de corte-distorsión angular obtenida por ésta técnica parece tener un acuerdo con el comportamiento experimental, pero en este caso no presenta las irregularidades de la curva del micromodelo. Debido a que en el macromodelo las fisuras están dispersas en el continuo; o sea, no se pueden obtener las fallas localizadas de las juntas de mortero por desplazamientos normales y tangenciales al plano de la interfase.

El análisis por macromodelo es una aproximación a la realidad debido a que los diferentes mecanismos de falla de la fábrica (como fisuración de las juntas, deslizamiento de juntas y fisuración de las unidades) no pueden ser reproducido completamente y debe ser distribuido en el continuo. Esto quiere decir que la comparación entre resultados experimentales y numéricos es más difícil que en el caso de micromodelos porque las unidades y juntas no son modelados.

En la Figura 9 se han graficado los puntos de plastificación, que representan puntos de Gauss donde ya ha ocurrido la deformación plástica  $\epsilon_p$ . El programa grafica los puntos proporcionales a la magnitud de la deformación. También se han graficado las fisuras ocurridas hasta el último paso que se presenta en los resultados. Estas fisuras son tanto las activas como las inactivas, ya que se pudo observar que los gráficos no mostraban mucha diferencia. Las fisuras se grafican normales a la dirección de la deformación plástica principal por tracción. Las gráficas de desplazamientos totales e incrementales tienen el mismo significado que en el micromodelo.

## 7. CONCLUSIONES

A) De los análisis efectuados se puede concluir que la técnica de micromodelización ofrece resultados muy fiables, ya que incluso se puede predecir el patrón de fisuras que ocurrirá en el muro a través de las juntas de mortero, e incluso en los ladrillos, si éstos son modelados con fisuras potenciales. Por tanto, la aplicación del

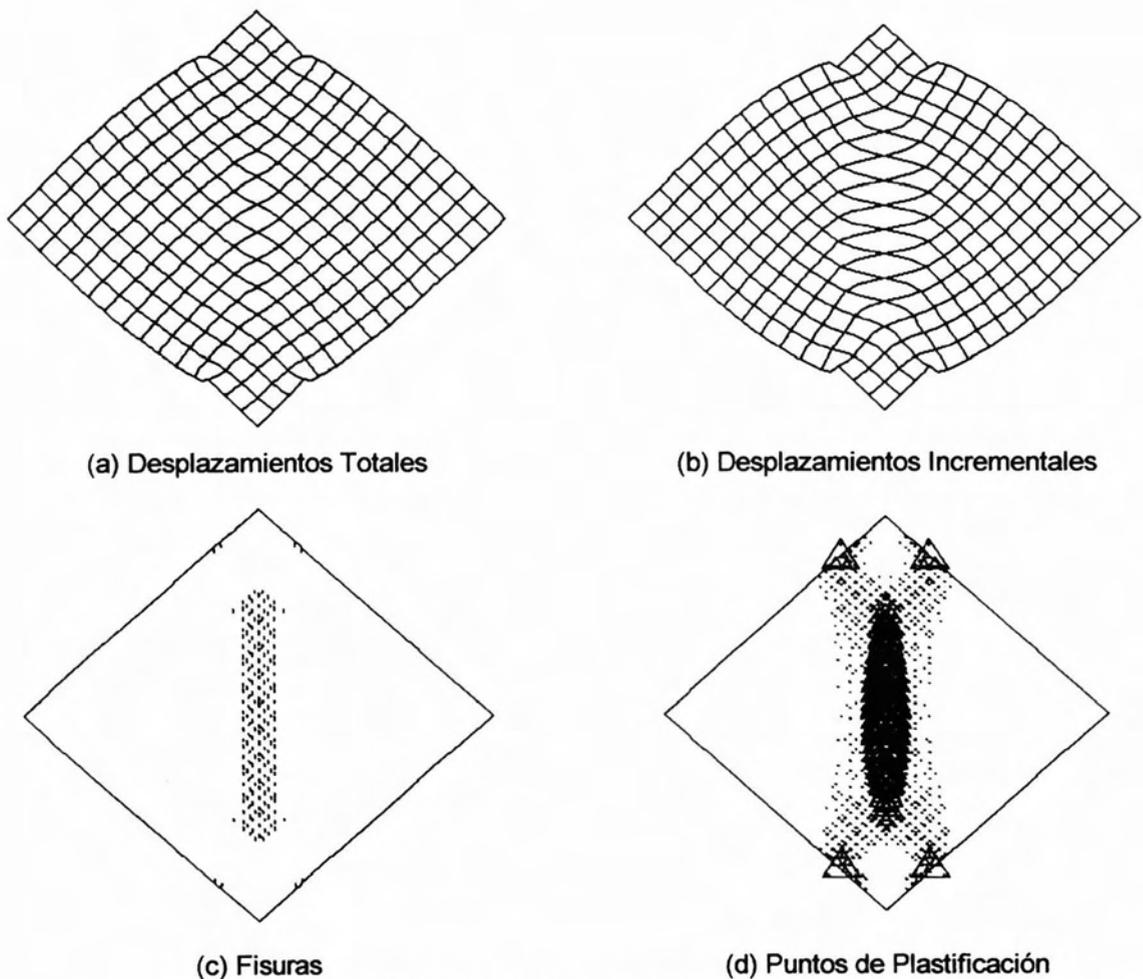


Figura 9.- Resultados del macromodelo para la carga de rotura,  $P = 157,40$  [kN].

micromodelo a ensayos en muretes a compresión diagonal muestra coherencia y proporciona un conocimiento acerca del comportamiento de estas estructuras de fábrica.

B) La técnica de macromodelización requiere de mayor cuidado en su utilización e interpretación de sus resultados, puesto que se basa en propiedades y distribución de tensiones promedios. Su uso indebido puede llevar a resultados no reales si es que en el muro existen fallas muy localizadas. No obstante, se ha visto que el modelo es capaz de predecir efectivamente el comportamiento de estructuras de fábrica con valores de carga de colapso suficientemente precisos.

C) Respecto a los tiempos de cálculo numérico que son necesarios para realizar los análisis descritos se resumen a continuación (Tabla 8).

Estos tiempos se refieren, exclusivamente, a la realización de los cálculos de estos casos concretos. Debe entenderse que previamente se requiere un dominio del manejo de estos programas y un conocimiento adecuado de las teorías y parámetros que gobiernan estos análisis numéricos. Sin embargo, son cuestionables los tiempos presentados, porque están en función de la convergencia y de la velocidad del ordenador.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica de la Universidad de Cantabria donde se ha llevado a cabo este trabajo de investigación, y al Vicerrectorado de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Cantabria, quien ha financiado parcialmente la realización del presente estudio.

TABLA 8.- Valoración del espacio de la memoria del ordenador y del tiempo de análisis

Modelos	Memoria de ordenador [MB]	Incrementos de carga	Tiempo Neto [h]			Tiempo total [h]
			Preparación	Análisis	Graficación	
Micromodelo	425	650	3,0	40,0	10,0	53,0
Macromodelo	125	240	1,5	2,0	0,5	4,0

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rots, J. (1991), "Numerical simulation of cracking in structural masonry", *Heron*, Vol. 36 No. 2, 49-63.
- [2] Lourenço, P. B. (1994), "Analysis of masonry structures with interface elements : theory and applications ", *Report No. 03.21.22.0.01*, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [3] Lourenço, P. B., Rots J. G., and van der Pluijm, R. (1999), "Understanding the tensile behaviour of masonry parallel to the bed joints: a numerical approach", *Journal Masonry International*, Vol. 12, No. 3, 96-103
- [4] Page A.W. (1978), "Finite element model for masonry", *Journal of Structural Engineering - ASCE*, Vol. 104, No. ST8, 1267-1285
- [5] Chiostri, S., and Vignoli, A. (1989), "Application of a numerical method to the study of masonry panels with various geometry under seismic loads", *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Computational Mechanics Publications, 309-317.
- [6] Ali, S., and Page, A. W. (1988), "Finite element model for masonry subjected to concentrated loads", *Journal of Structural Engineering - ASCE*, Vol. 114, No. 8, 1761-1784.
- [7] Riddington, J.R., and Ghazali, M.Z. (1990), "Hypothesis for shear failure in masonry joints", *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, Paper 9489, 89-102
- [8] Lotfi, H.R., and Shing, P.B. (1994), "Interface model applied to fracture of masonry structures", *Journal of Structural Engineering - ASCE*, Vol. 120, No. 1, 63-80
- [9] Lourenço P.B. and Rots J. G. (1997), "Multisurface interface model for analysis of masonry structures", *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*, Vol. 123, No. 7, 661-668
- [10] Carol, I., and López, C. (1999), "Analysis of quasi-brittle materials using interface elements", *Mechanics of quasi-brittle materials and structures*. Hermes Science Publications, Paris.
- [11] Samarasinghe, W., Page, A. W., and Hendry, A. W. (1982), "A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork", *Proc. Instn Civil Engrs*, 71, (2), 171-178
- [12] Dhanasekar, M. and Page, A. W. (1986), "The influence of brick masonry infill properties on the behaviour of infilled frames", *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, 593-605
- [13] Andraus, U. (1988), "A 3-D finite element model for the analysis of masonry structures", *Proceedings of the Eighth International Brick and Block Masonry Conference*, Republic of Ireland, 1405-1416
- [14] Lourenço, P. B., Rots J. G., and Blaauwendraad, J. (1998), "Continuum model for masonry: parameter estimation and validation", *Journal of Structural Engineering - ASCE*, Vol. 124, No. 6, 642-652
- [15] Molins, C. y Roca, P. (1998), "Análisis resistente de construcciones de obras de fábrica. Aplicaciones a puentes arco", *Hormigón y Acero*, 3º Trimestre, 9-32
- [16] Rots, J. G. (1988), "Computational modelling of concrete fracture", Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [17] Lijdens, A.N. y Villegas, L. (1994), "Ensayos de fábricas de ladrillos perforados sometidas a esfuerzos cortantes y de compresión", Universidad de Cantabria, Departamento de Diseño y Construcción de Estructuras de Edificación y Obras Públicas.
- [18] Hughes, T.G., Baker, M.G., and Harvey R.J. (2000), "Tensile strengths of masonry components", *Bulletin Masonry International*, Vol. 13, No. 2, 39-43
- [19] Atkinson, R.H., Noland, J.L., Abrams, D.P., and McNary, S. (1985), "A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prisms in compression", *Proceedings of the 3rd North American Masonry Conference*, Paper No. 18, 1-18
- [20] Raijmakers, T.M.J., and Vermeltfoort, A.T. (1992), "Deformation controlled meso shear tests on masonry prisms", *Report B-92-1156*, TNO-BOUW/TU Eindhoven, *Build. And Constr. Res.*, Eindhoven, The Netherlands (in Dutch).
- [21] Vermeltfoort, A.T., Raijmakers, T.M.J., and Janssen, H.J.M. (1993), "Shear tests on masonry walls", *Proceedings, 6th North American Masonry conference*, Philadelphia, 1183-1193.
- [22] Van der Pluijm, R. (1993), "Shear behaviour of bed joints", *Proc. 6NAMC*, Eds. A.A. Hamid and H.G. Harris. TMS, Boulder, CO, 125.
- [23] Lourenço, P. B. (1996a), "Computational strategies for masonry structures", *Ph.D. Thesis*, Delft University of Technology, Delft University Press.
- [24] Lourenço, P. B. (1996b), "A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures", *Report N°03.21.1.21.35*, Delft University of Technology, Delft, Holland
- [25] Page, A. W. (1981), "The biaxial compressive strength of brick masonry", *Proc. Instn. Civil Engrs.*, Part 2, 71, 893-906
- [26] Page, A. W. (1983), "the strength of brick masonry under biaxial tension compression", *International Journal of Masonry Construction*, Vol. 3 No2, 26-31
- [27] Rosas, J. G. (2001), "Aplicación de los modelos numéricos al estudio del comportamiento de muros de cortante en estructuras de fábrica, simples y armadas, con o sin aberturas" Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.
- [28] Molins, C. (1996), "Characterization of the mechanical behaviour of masonry", *Structural Analysis of Historical Constructions*, CIMNE, Barcelona, España.

# MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

## Monográfico dedicado al VIDRIO EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (N<sup>os</sup> 242/243) a un solo material: *El vidrio*.

Haciéndose eco del creciente interés que suscitan las investigaciones e innovaciones sobre los productos derivados del vidrio, este material se trata, por primera vez en la Revista, de forma monográfica, con la amplitud que permite un número especial.

Los distintos artículos que componen este número son muestra de la gran variedad de características, propiedades y aplicaciones bajo las que se presentan los derivados del vidrio. Entre sus usos más comunes se encuentran: elementos transparentes de cerramientos, materiales estructurales en las fachadas, aislamientos de muros y cubiertas, recubrimientos de pisos y paredes, componentes de refuerzo de placas,

paneles, morteros y hormigones, como material decorativo y estético. Hoy en día, el vidrio es un material indispensable en la construcción y su tecnología está en continua evolución para dar respuesta a la constante demanda de nuevos productos con carácter multifuncional.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos que cubren una temática muy diversa dentro de los materiales vítreos destinados o aplicados en construcción. Aparecen artículos relacionados con las vidrieras artísticas, los acristalamientos, los vidrios funcionales, las fibras de refuerzo, los vitrocerámicos y los porcelanatos. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en sus respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- Procesos de alteración de las vidrieras medievales. Estudio y tratamientos de protección.  
(*Alteration processes of medieval stained glass windows. Study and protection treatments*).  
J. M<sup>a</sup> Fernández Navarro.
- El efecto de la corrosión en vidrieras coloreadas.  
(*The effect of corrosion of stained glass windows*).  
J. Leissner.
- Formulación de vidrios absorbentes del calor.  
(*Formulation of heat absorbing glasses*).  
P. Álvarez-Casariago y P. Mazón.
- Dimensionamiento de placas de acristalamiento para edificios mediante un modelo probabilístico de rotura.  
(*A probabilistic model for failure design of glass plates in building*).  
A. Fernández Canteli, I. Viña y A. Bernardo Sánchez.
- Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento obtenidas a partir de basaltos canarios.  
(*Characterization of fibers as rockwool for insulation obtained from canary islands basalts*).  
J. M. Cáceres, J. E. García Hernández y J. M<sup>a</sup> Rincón.
- El GRC: Material compuesto de matriz inorgánica reforzado con fibras de vidrio AR.  
(*GRC: Composite material from an inorganic matrix reinforced with ar glass fibres*).  
P. I. Comino.
- Los materiales vitrocerámicos en la construcción.  
(*Glass-ceramic as building materials*).  
J. M<sup>a</sup> Rincón y M. Romero.
- Gres porcelánico: Aplicaciones arquitectónicas, procesado y propiedades físico-mecánicas.  
(*Porcelainized stoneware: Architectural, processing and physico-mechanical properties*).  
T. Manfredini, M. Romagnoli y J. M<sup>a</sup> Rincón.

**Venta de ejemplares:** Distribución de Publicaciones  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja  
Serrano Galvache, s/n - 28033 Madrid.  
Tfno.: (91) 302.04.40 - Fax: (91) 302.07.00