



ANÁLISIS DE PANELES DE MAMPOSTERÍA

Pablo Martín, Bibiana Luccioni, Rodolfo Danesi

Laboratorio de Estructuras - U.N.T.
Av. Independencia 1800 - S. M. de Tucumán
CP 4000 - Tucumán - Tel-Fax 081-364087

Resumen.

En este trabajo se propone un método para el análisis de paneles de mampostería que consiste en el proceso previo, mediante una discretización fina, de una celda básica. De allí se obtienen los parámetros materiales representativos del conjunto. El comportamiento del panel se simula entonces como si se tratara de un único material, mediante un modelo para materiales elasto-plásticos, homogéneos, anisótropos. De esta manera se puede reproducir el comportamiento de paneles de mampostería a partir de las propiedades mecánicas de sus materiales constituyentes, sin necesidad de recurrir a una discretización fina.

Abstract.

A method for analysis of masonry panels are proposed. This method consists in a previous process of a high density mesh of a basic cell, to obtain a set of representative mechanical parameters of masonry material. The behavior of the masonry panel are simulated like a simple material, with a model for elastoplastic, homogenous and anisotropic materials. With this methodology, the behavior of a masonry panels, can be simulated, from the mechanical properties of basics constituents, mortar and bricks.

Introducción.

El análisis y predicción de la respuesta mecánica de los elementos estructurales de mampostería, es aún un problema abierto. En los últimos tiempos se ha puesto énfasis en el estudio de la misma, no sólo debido a la importancia y número de las construcciones existentes, sino también a la necesidad de evaluar el grado de seguridad de construcciones y monumentos históricos ante acciones sísmicas y gravitacionales.

Existen básicamente dos formas de simular el comportamiento de la mampostería: mediante una discretización fina, distinguiendo cada uno de los materiales intervinientes [4], ya sea con elementos comunes o de interface para las capas de mortero [1,2] o considerando a la mampostería como un material homogéneo anisótropo con propiedades promedio. La primera forma es más precisa pero tiene el inconveniente de requerir un elevado número de grados de libertad para simular un elemento estructural. La segunda forma tiene la ventaja de que no requiere una discretización tan fina, pero es necesario disponer de un modelo constitutivo para materiales anisótropos potente, y a la vez conocer las propiedades mecánicas del conjunto. Estas últimas pueden obtenerse mediante ensayos experimentales sobre elementos de mampostería [3,4], pero estos resultados serían

utilizables solamente para los materiales intervinientes y el tipo de disposición utilizada. Lo ideal es disponer de un método que permita obtener dichas propiedades a partir de las propiedades mecánicas de los materiales intervinientes y de su disposición.

En el presente trabajo se propone un método para el análisis de paneles de mampostería que consiste en obtener los parámetros materiales del conjunto mediante un preproceso numérico y luego introducirlos en un modelo anisótropo elastoplástico con daño para simular el comportamiento de la mampostería como un único material homogéneo anisótropo.

En primer lugar se describe brevemente las características más salientes del comportamiento de la mampostería, se explica luego el método de análisis propuesto, describiendo el preproceso y el modelo utilizados. Finalmente se presenta la aplicación del método propuesto a la simulación del comportamiento de un panel de mampostería de ladrillos y la comparación de los resultados con los obtenidos experimentalmente y con los correspondientes a una discretización fina, distinguiendo cada uno de los materiales, del mismo problema.

Comportamiento de la Mampostería.

Se puede definir a la mampostería, como un material compuesto, heterogéneo y anisótropo, cuyos componentes están ordenados en forma periódica. Las propiedades mecánicas del conjunto son distintas a la de los elementos que la conforman y dependen de la forma en que están orientados dichos elementos. La flexibilidad, resistencia y ductilidad de los materiales constitutivos intervienen activamente en la definición del comportamiento y el modo de falla del conjunto. Pero la disposición geométrica de los mismos o "traba" juega también un rol muy importante.

El comportamiento de la mampostería sometida a estados complejos de tensión está muy influenciado por la orientación de las juntas de mortero respecto de las cargas. La mampostería, presenta un comportamiento marcadamente direccional, justamente por la influencia de las juntas de mortero, que actúan como planos de debilidad. Su falla no puede ser definida entonces a través de un criterio en términos de tensiones principales en un punto. Se debe tener en cuenta también la orientación de las tensiones principales respecto de las juntas de mortero. Dependiendo de dicha orientación, la falla puede ocurrir sólo en la junta o en un mecanismo combinado de rotura de juntas y ladrillos [5].

La mampostería transmite fuerzas de compresión en forma muy efectiva. Su capacidad de resistir fuerzas de compresión está gobernada, entre otras cosas, por la resistencia a tracción de los ladrillos [6]. El fallo de estos ocurre por tracción debido a la tensión transversal, provocada por la diferente expansión lateral de los ladrillos (más rígidos), respecto del mortero (más flexible). La resistencia a tracción de la mampostería es extremadamente baja debido a la baja adherencia entre el mortero y los ladrillos bajo tensiones de tracción. Para tracción normal a la junta se obtiene la mínima resistencia [5].

En un panel de mampostería sometido a cargas en el plano, se pueden distinguir dos modos de falla dependiendo de la orientación de las tensiones principales. Para compresión uniaxial, la falla ocurre en planos normales al del panel. Dependiendo de la orientación de las juntas de mortero respecto de la carga aplicada, la falla ocurre por fisuración y deslizamiento en la cabeza o pie de los paneles o una forma combinada de fisuración de juntas y ladrillos. Para compresión uniaxial paralela al plano del mortero, la falla ocurre inicialmente por expansión lateral de las juntas de mortero. En el caso de compresión biaxial, esos modos de falla son impedidos por la presencia de una segunda tensión principal de compresión σ_2 . Para la mayoría de las relaciones σ_1/σ_2 , la falla ocurre en planos paralelos al del panel, independientemente de la orientación de la junta de mortero [5].

A diferencia de los metales anisótropos, la mampostería presenta la particularidad de que la relación entre las resistencias en distintas direcciones depende del tipo de carga. Esto es, la relación entre las resistencias a compresión en las direcciones principales de anisotropía es distinta de la relación entre las resistencias a tracción en dichas direcciones :

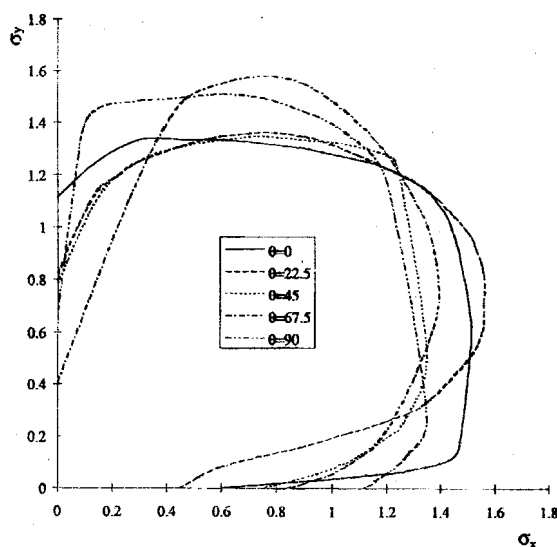
$$\frac{\sigma_{x\text{comp}}^u}{\sigma_{y\text{comp}}^u} \neq \frac{\sigma_{x\text{tracc}}^u}{\sigma_{y\text{tracc}}^u} \quad \text{Donde:} \quad \begin{array}{l} x \text{ indica la dirección paralela a la junta horizontal.} \\ y \text{ indica la dirección perpendicular a la junta horizontal.} \end{array}$$

$\sigma_{x\text{comp}}^u$: Resistencia a compresión uniaxial con carga paralela a la junta horizontal.

$\sigma_{x\text{tracc}}^u$: Resistencia a tracción uniaxial con carga paralela a la junta horizontal.

$\sigma_{y\text{comp}}^u$: Resistencia a compresión uniaxial con carga perpendicular a la junta horizontal.

$\sigma_{y\text{tracc}}^u$: Resistencia a tracción uniaxial con carga perpendicular a la junta horizontal.



En este caso se verifica :

$$\frac{\sigma_{x\text{comp}}^u}{\sigma_{y\text{comp}}^u} = 0.54$$

$$\frac{\sigma_{x\text{tracc}}^u}{\sigma_{y\text{tracc}}^u} = 2$$

Fig 1. Compresión biaxial de un espécimen de mampostería [5]

Método de análisis

La idea del método que se propone es poder simular el comportamiento de la mampostería de ladrillos a partir de las propiedades mecánicas de los materiales intervinientes y su disposición sin necesidad de discretizar cada uno de los elementos por separado. Para ello se procede en dos etapas. En una primera etapa se analiza el comportamiento de una celda básica que se discretiza en forma fina. De los resultados de dicho análisis se obtienen las propiedades mecánicas del conjunto. En una segunda etapa se analiza ya el comportamiento de la estructura de interés considerando a la mampostería como un material homogéneo anisótropo cuyas propiedades mecánicas son las obtenidas en el preproceso.

Preproceso de una celda básica.

El número de parámetros mecánicos necesarios para simular un material anisótropo como la mampostería, es grande, y los ensayos que deben realizarse son complejos y delicados lo que los hace muy onerosos. Por ello, resulta atractivo poder obtener los parámetros básicos del conjunto a partir del análisis numérico de una celda básica representativa de la mampostería utilizada, donde sólo es necesario conocer los parámetros mecánicos de los materiales componentes y su disposición.

La aplicabilidad de esta metodología depende en gran medida del gradiente de tensiones y deformaciones y del tamaño relativo de la celda con la estructura. El método es aplicable si el espécimen analizado está sometido a un estado de tensiones macroscópicamente homogéneo, si el tamaño de la celda es pequeño respecto de la estructura, y las propiedades geométricas y mecánicas del panel se repiten periódicamente. En esos casos es posible analizar una celda para obtener propiedades representativas del conjunto

Un medio periódico puede representarse considerando un sistema de referencia $(v_1; v_2)$, donde v_1 y v_2 son vectores independientes que cumplen la condición de que las características mecánicas del medio son invariantes en cualquier traslación (Fig. 2) [7]:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (1)$$

con m_1 y m_2 enteros.

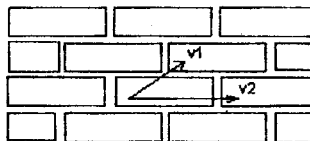


Fig. 2 - Dirección de los vectores indicadores, en un medio periódico

Por lo tanto, es suficiente analizar un pequeño dominio (S), dado que el mismo se repite en forma periódica, realizando la traslación ya explicada. A este dominio se lo designa celda básica.

En la Fig. 3 se han indicado distintas formas posibles para la celda básica en el caso de un panel de mampostería [6 ; 7]. Para contar con resultados confiables es conveniente contrastar los resultados obtenidos con distintos tipos de celdas básicas.

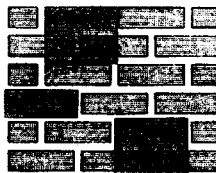


Fig. 3 - Ejemplos de celdas posibles en un muro de mampostería común.

La celda, así definida, se la analiza en un programa de elementos finitos. Se la discretiza en forma muy fina y se simula cada uno de los materiales mediante el modelo de daño plástico modificado [8, 9]. Se trata de un modelo que acopla la plasticidad y el daño y se obtiene como una generalización de las teorías de plasticidad y daño clásicas para poder simular el comportamiento de geomateriales como los mampuestos (cerámicos u hormigón) y el mortero.

Se estudia el comportamiento de la celda bajo cuatro estados de carga :

- Tracción en la dirección paralela a la junta horizontal.
- Compresión en la dirección paralela a la junta horizontal.
- Tracción en la dirección perpendicular a la junta horizontal.
- Compresión en la dirección perpendicular a la junta horizontal.

Para estos cuatro ensayos numéricos se obtienen las curvas tensión - deformación en cada una de las direcciones principales de anisotropía y a partir de allí se calculan, los siguientes parámetros mecánicos de la celda:

- Módulos de Elasticidad y Módulos de Poisson en las direcciones principales de anisotropía.
- Energía disipada, en el proceso plástico y de daño, para tracción y compresión en cada una de las direcciones principales de anisotropía.
- Límites elásticos del conjunto para tracción y compresión uniaxial en cada una de las direcciones principales de anisotropía.
- Funciones de endurecimiento de la celda para cada dirección en tracción y compresión.

Modelo Constitutivo

El modelo constitutivo utilizado para simular el comportamiento de conjunto de la mampostería [10] es una generalización del modelo de daño plástico modificado [8, 9] para el tratamiento de materiales anisótropos. Supone la existencia de dos espacios: el espacio anisótropo real y un espacio isotropo ficticio. Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados mediante un tensor de transformación que tiene en cuenta la anisotropía y depende del estado tensional.

Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados mediante una transformación del tipo:

$$\tau_{ij} = A_{ijkl}(\sigma, \kappa^p) \cdot \sigma_{kl} \quad (2)$$

donde τ_{ij} y σ_{kl} son los tensores de tensión en los espacios (a) y (b) respectivamente y $A_{ijkl}(\sigma, \kappa^p)$ es un tensor de transformación de cuarto orden que contiene la información sobre la anisotropía de resistencia. En el caso más general, este tensor es función del tipo de estado tensional y de la evolución del proceso elastoplástico.

$$A_{ijkl} = s(\sigma_{kl}) \cdot A_{ijkl}^t(\kappa^p) + [1 - s(\sigma_{kl})] \cdot A_{ijkl}^c(\kappa^p) \quad (3)$$

Donde no hay suma sobre los índices k y l . Los tensores $A_{ijkl}^t(\kappa^p)$ y $A_{ijkl}^c(\kappa^p)$ son los tensores de transformación correspondientes a procesos de tracción y compresión simple y son funciones de la variable de daño plástico κ^p [10] que hace las veces de variable de endurecimiento plástico isotropo. Para un dado estado termodinámico identificado a través de la variable de daño plástico κ^p , los tensores $A_{ijkl}^t(\kappa^p)$ y $A_{ijkl}^c(\kappa^p)$ se calculan a partir de los valores de las funciones tensoriales de endurecimiento en procesos de tracción y compresión simple.

El factor $s(\sigma_{kl})$ tiene en cuenta el tipo de estado tensional y se calcula como:

$$s(\sigma_{kl}) = \frac{|\sigma_{kl}| + \sigma_{kl}}{2\sigma_{kl}} \quad (4)$$

Donde no hay suma sobre los índices k y l .

El umbral de comportamiento elástico se define mediante una función de fluencia [11,12,8,9]:

$$F(\sigma_{ij}; \alpha_k) = \bar{F}(\tau_{ij}; \bar{\alpha}_k) = 0 \quad (5)$$

donde F y \bar{F} designan las funciones de fluencia en los espacios anisótropo real e isótropo ficticio y α_k y $\bar{\alpha}_k$ son variables internas correspondientes a dichos espacios.

El problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio. La transformación de espacios definida por la permite utilizar funciones de fluencia \bar{F} definidas para materiales isótropos en el espacio isótropo ficticio por lo que no resulta necesario definir funciones de fluencia especiales para materiales anisótropos.

Algoritmo de cálculo

En este punto se esquematiza la utilización del modelo propuesto en un programa de elementos finitos para problemas con no linealidad física.

- Determinación de los parámetros mecánicos de los materiales constituyentes.
- Definición de una celda representativa del material.
- Análisis de la celda en un programa de elementos finitos con cuatro estados de carga, de acuerdo a como ya se indicó.
- Obtención de las constantes elásticas a partir de las curvas de respuesta uniaxiales en cada una de las direcciones principales de anisotropía. Construcción del tensor de rigidez elástica en espacio anisótropo real : C_{ijkl} .
- Transformación de las curvas tensión deformación para tracción y compresión simple en cada una de las direcciones principales en curvas tensión - deformación plástica descontando las deformaciones elásticas y luego en curvas tensión - variable de daño plástico [10].
- Inicialización.
- Evaluación del tensor de transformación de espacios inicial (ecuaciones (2), (3) y (4)).
- $C_{ijkl}^* = C_{ijkl}$

(A) Lazo sobre cada uno de los incrementos de carga.

- Lectura del incremento de carga ΔS_m .
- Cálculo del residuo $\mathfrak{R}_{m,0} = -\Delta S_m$.

(B) Lazo sobre el número de iteraciones.

- Cálculo de la matriz de rigidez global : $\mathbf{K}^t = \mathbf{A} \left[\int_{\mathbf{v}} \mathbf{B}^{eT} : \mathbf{C}_{m,n-1}^t : \mathbf{B}^e d\mathbf{v} \right]$.
- Determinación de incremento de desplazamientos: $\delta \mathbf{U}_{m,n} = -(\mathbf{K}_{m,n-1}^t)^{-1} \cdot \mathfrak{R}_{m,n-1}$.
- Actualización de los desplazamientos: $\mathbf{U}_{m,n} = \mathbf{U}_{m,n-1} + \delta \mathbf{U}_{m,n}$.
- Actualización de la deformación: $(\boldsymbol{\varepsilon})_{m,n} = \nabla^s \mathbf{U}_{m,n}$.
- Integración de la ecuación constitutiva [10].
- Cálculo del vector de fuerzas residuales : $\mathfrak{R}_{m,n} = \mathbf{A} \left[\int_{\mathbf{v}} \boldsymbol{\sigma}_{m,n} : \mathbf{B}^e d\mathbf{v} \right] - \mathfrak{S}_n$.

Si $\mathfrak{R}_{m,n} \leq$ Tolerancia vaya a (A), de lo contrario vaya a (B).

Ejemplo de aplicación

A modo de ejemplo se muestran los resultados para un panel de mampostería estudiado por Page et al [4], bajo tensiones planas de compresión.

Las propiedades mecánicas de los materiales componentes se detallan en el siguiente cuadro :

Ladrillos cerámicos

Criterio de Fluencia Mohr-Coulomb Modificado.		
Criterio de Potencial Mohr-Coulomb Modificado.		
Ex: 59200. Kg/cm ²	Ey: 75500. Kg/cm ²	Ez: 59200. Kg/cm ²
Módulo de Poisson: ν : 0.167		Espesor: 5.4 cm
Ángulo de Fricción $\phi=15^\circ$.		Ángulo de Dilatación: $\psi=15^\circ$.
Límite de Elasticidad: 362.5 Kg/cm ²		
Curva de endurecimiento plástico:	Tracción:	Exponencial G: 1600 Kg/cm
	Compresión:	Exponencial G: 1600 Kg/cm.

Mortero :

Criterio de Fluencia: Mohr-Coulomb Modificado.		
Criterio de Potencial: Mohr-Coulomb Modificado.		
Criterio de Daño: Mohr-Coulomb Modificado.		
Ex: 11587. Kg/cm ²		Ey;Ez: 11587. Kg/cm ²
Módulo de Poisson: 0.21		Espesor: 5.4 cm
Ángulo de Fricción $\phi=30^\circ$.		Ángulo de Dilatación: $\psi=15^\circ$.
Límite de Elasticidad: 32 Kg/cm ²		
Curva de endurecimiento plástico:	Tracción:	Exponencial G: 0.1Kg/cm
	Compresión:	Lineal G: 6 Kg/cm.
Curva de endurecimiento de daño:	Tracción:	Exponencial G: 0.16 Kg/cm
	Compresión	Lineal : 6 Kg/cm

Para este ejemplo se definió una celda básica como la indicada con la letra (C) en la Fig 3. Para el preproceso se discretizó la misma como se ilustra en la Fig.4



Fig. 4- Malla de la celda propuesta.

A continuación se muestran las curvas tensión - deformación plástica, obtenidas del análisis numérico de la celda básica. En ellas se observa el fuerte comportamiento anisótropo de la mampostería.

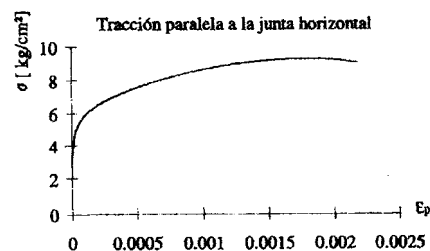


Fig 5-a

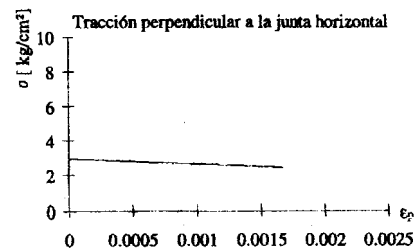


Fig 5-b

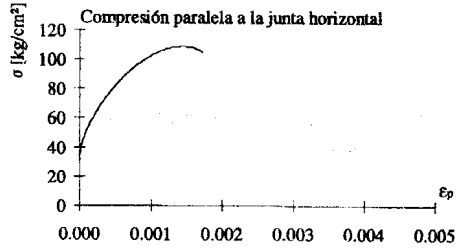


Fig. 5-c

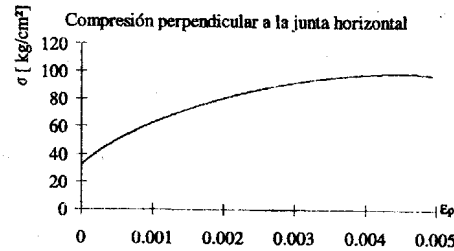


Fig. 5-d

Del análisis previo se obtuvieron las siguientes propiedades mecánicas de conjunto:

Mampostería :

Criterio de Fluencia Mohr-Coulomb Modificado.

Criterio de Potencial Mohr-Coulomb Modificado.

Ex: 49858. Kg/cm²

Ey: 45729. Kg/cm²

Ez: 49858. Kg/cm²

Módulo de Poisson: ν : 0.14

Espesor: 5.4 cm

Límite de Elasticidad: 29.92 Kg/cm²

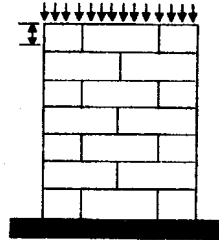


Fig 6 Panel de mampostería

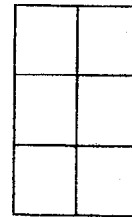
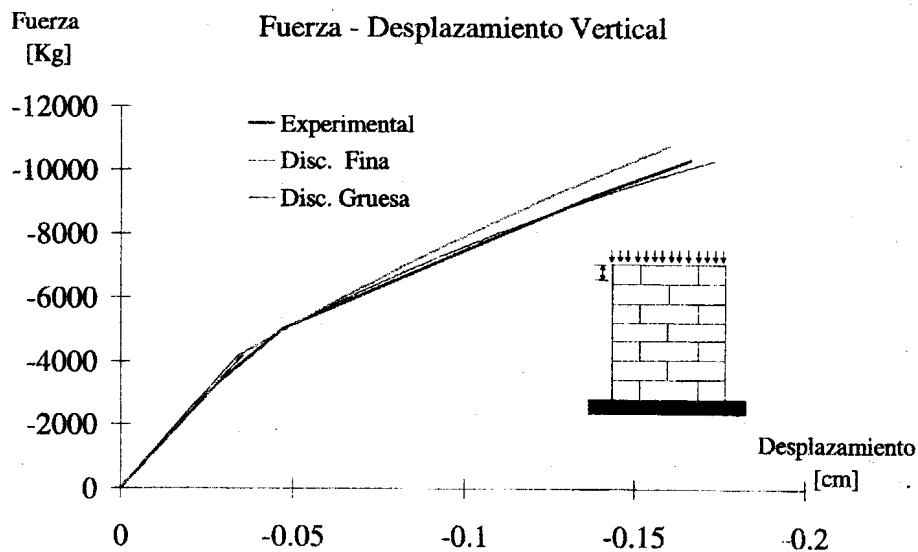
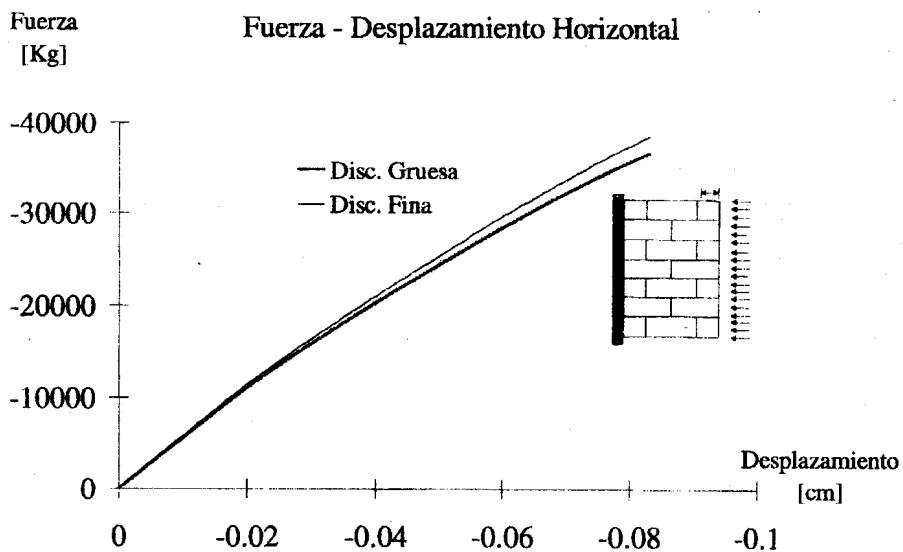


Fig 7 Malla de elementos finitos del panel

En primer lugar se analizó un panel sometido a una carga cuasiestática de compresión perpendicular a la junta horizontal. Posteriormente el mismo panel se discretizó de una forma fina, considerando juntas de mortero y mampuestos como elementos independientes. Los resultados obtenidos por ambos análisis se compararon con los resultados experimentales [4].



El mismo análisis se hizo para una carga paralela a la junta horizontal, pero para este estado de carga no se disponen de los resultados experimentales.



Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado una metodología sencilla y eficiente, para determinar los parámetros mecánicos a ser introducidos en un modelo con no linealidad material y anisotropía para simular el comportamiento de paneles de mampostería.

El mismo permite simular el comportamiento de la mampostería a partir de las propiedades mecánicas de los materiales intervinientes y su disposición, sin necesidad de recurrir a ensayos experimentales.

El tamaño de la celda juega un papel importante en este método. Depende en gran medida de la disposición geométrica de los mampuestos y del estado tensional del panel en estudio. Si dicho estado tensional es complejo, aunque macroscópicamente uniforme, convendrá analizar una celda que involucre varias hiladas de mampuestos, por ejemplo muros sometidos a esfuerzo cortante.

El modelo de material anisótropo utilizado para simular el comportamiento de la mampostería como un único material reproduce ajustadamente el comportamiento de la misma para solicitaciones coincidentes con las direcciones principales de anisotropía. Para solicitaciones combinadas habría que mejorar un poco los criterios de fluencia utilizados.

Referencias.

- ¹ Rots, J.; Laurenco, P.B., *Fracture simulations of masonry using non-linear interface elements*, *The Sixth North American Masonry Conference*, Philadelphia, USA, June 7-9, 1993
- ² Laurenco, P.B.; Rots, J.; *On the use of micro-models for the analysis of masonry shear walls*, *The second international Symposium on Computer Methods in Structural Masonry*, Swansea, UK April 5-7, 1993.
- ³ Martín, P., Luccioni, B., Danesi, R., *Comportamiento De Unidades De Mampostería De Ladrillos Cerámicos Huecos*, *Proc. XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Vol III pags. 147-158, Setiembre, (1995).
- ⁴ Page, Adrian W.; *Finite Element Model for Masonry*, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. ST8, August, (1978).
- ⁵ Page, Adrian W.; *The biaxial compressive strength of brick masonry*, *Proc. Instn. Civ. Engrs*, Part 2, pp 893-906, Sept. (1981).
- ⁶ Benedetti et al (1982), *Comportamiento Statico e Sismico delle Structure Murarie*, *CLUP*, cap.1.
- ⁷ Anthoine, A *Derivation of the in plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory*, *Int J Solids Structures* Vol 12 No 2., pp 137-163, 1995
- ⁸ Luccioni B.M., *Formulación de un Modelo Constitutivo para Materiales Ortótropos*, Tesis de Doctor en Ingeniería, *Universidad Nacional de Tucumán*, 1993.
- ⁹ Luccioni B., Oller S., Danesi R., *Coupled Plastic-Damaged Model*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 129 pp. 81-89.1995.
- ¹⁰ Luccioni, B.; Martín, P., Danesi, R. *Modelo Elastoplástico general para materiales Ortótropos*, *V Congreso de Mecánica Computacional*, Setiembre, Tucumán, 1996.
- ¹¹ Luccioni, B.; Oller, S.; Danesi, R. *Plastic Damaged Model For Anisotropic Materials*, *Applied Mechanics in the Americas*, Vol.1 PP124-129.
- ¹² Oller, S., Oriate, E. and Miquel, J., *Simulation of anisotropic elastic-plastic behaviour of materials by means of an isotropic formulation*, *U.S. National Congress on Computational Mechanics - Washington - USA*, 1993.