

# AGRIETAMIENTO POR HUNDIMIENTO EN MUROS DE MAMPOSTERÍA

Leonel Campos, Instituto Politécnico Nacional -ESIA, (SEPI-Estructuras) lcamposr0902@ipn.mx  
Ramsés Rodríguez, Instituto Politécnico Nacional -ESIA, (SEPI-Estructuras) rrodriguezr@ipn.mx  
Esteban Flores, Instituto Politécnico Nacional -ESIA, (SEPI-Estructuras) efloresm@ipn.mx

## RESUMEN

Uno de los problemas más comunes en casas de interés social de la ciudad de México es el agrietamiento en los muros de mampostería provocados por los hundimientos diferenciales del suelo. El hundimiento puede ocasionar la disminución de la capacidad de los elementos estructurales, aparición de grietas y que se rebasen los estados límites de servicio poniendo en riesgo su funcionalidad. Lo anterior puede ocasionar, además, pérdidas económicas valuadas hasta en cientos de millones de pesos [<http://www.nextfor.com>]. Por lo tanto, existe la necesidad determinar la relación entre el hundimiento y el agrietamiento en los muros de mampostería para prevenir daños y pérdidas de vidas humanas y económicas.

El objetivo de este trabajo es determinar la relación entre los asentamientos diferenciales y los patrones de grietas en muros de mampostería, utilizados en casas habitacionales.

Se obtuvo un modelo numérico utilizando un programa de elemento finito comercial y se calibraron con datos numéricos (de la literatura) y experimentales.

Se consideraron dos tipos de geometría y cuatro de condiciones de carga.

Con el modelo calibrado se establecerán nuevas geometrías con diferentes relaciones altura-longitud y diferentes propuestas para geometrías típicas en las casas habitacionales de la ciudad de México.

Se obtendrán las relaciones de grietas con parámetros geométricos. La aportación principal serán curvas de hundimiento con respecto a variables geométricas que podrán ser utilizadas en campo por el ingeniero al hacer una evaluación visual del daño.

Palabras claves: Mampostería, hundimiento, agrietamiento, función constitutiva de la mampostería.

## INTRODUCCION

El hundimiento es un movimiento descendente irreversible del suelo. Éste es continuo en la ciudad de México y se puede originar por el tipo de suelo, cimentación, peso estructural, geometría de la estructura y a la extracción de agua. El hundimiento puede ocasionar la disminución de la capacidad de los elementos estructurales, aparición de grietas y que se rebasen los estados límites de servicio poniendo en riesgo su funcionalidad. Lo anterior puede ocasionar, además, pérdidas económicas. Por lo tanto, existe la necesidad de conocer este fenómeno y determinar la relación entre el hundimiento y el agrietamiento en muros de mampostería para prevenir o disminuir estas problemáticas.

La Cd. De México es uno de los lugares con mucha complejidad en su terreno, tanto en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas; por tal motivo es muy vulnerable, y un pequeño cambio en sus propiedades, transforma su entorno y todo lo que dependa de él; por ejemplo; el exceso de humedad, la extracción de agua en el subsuelo, la compactación de estratos, la licuefacción, grandes oquedades en el subsuelo (minas); originan cambios, los cuales van desde asentamientos diferenciales imperceptibles, hasta el volcamiento parcial o total de una estructura, en el caso de la obra civil, no es la excepción, Carreteras, puentes, drenaje, agua potable, edificios y pequeñas viviendas, todas dependen del cambio en el suelo y originan afectaciones que pueden llevar al colapso de una estructura.

Una señal que no puede pasar desapercibida es la aparición de grietas; en el concreto, estructuras de acero o mampostería. La aparición de las mismas puede tener diferentes orígenes o combinación de problemáticas diferentes.

## MÉTODO

La mampostería es un material que presenta direccionalidad en sus propiedades debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad en el material. En general, la aproximación hacia una modelización numérica puede ser enfocada con micromodelos, los cuales discretizan de forma detallada y separada ladrillos y junta. Por otra parte, existe la posibilidad de hacer un tratamiento como Macromodelo donde se trata a la mampostería como un material compuesto. Dependiendo del nivel de detalle deseado es posible utilizar las siguientes formas de modelación (Lourenco, 1996; López et al., 1998).

- Micromodelación detallada: ladrillos y morteros son representados por elementos continuos, mientras que el comportamiento de la interfase mortero-ladrillo es representada por elementos discontinuos.
- Micromodelación simplificada. En este caso, los materiales están representados por un elemento continuo donde el comportamiento de las juntas de mortero y la interfase ladrillo-mortero está separada por discontinuidades.
- Macromodelación: los ladrillos, mortero e interfase ladrillo-mortero están englobados por un mismo elemento

Para incorporar la función constitutiva de la mampostería homogeneizada al modelo propuesto se tomaron los datos experimentales (Meli y Reyes, 1971). Para tabique rojo recocido con mortero 1:0:3 (cemento-cal-arena), sometida a carga axial.

Y como Existen dos diferentes mecanismos de rotura para paneles ensayados a tensión paralelos a la junta. El primero falla por fisuración en las juntas verticales y horizontales en forma de zigzag. (López y Oñate, 1998); el segundo se presenta por fisuración perpendicular a la fuerza de tensión y que aparece siguiendo las juntas verticales de mortero y atravesando los ladrillo; este es el criterio a tomar, por lo tanto la energía de fractura  $G_f$  de cada material conjuntamente es la que gobierna la fisuración total de la estructura.

Para Van der Pluijijn (López y Oñate, 1998) en 1992, estableció que la energía de fractura  $G_f$  para probetas de mampostería ensayadas a tensión rondaban entre 0.005 a 0.02 N-mm/mm<sup>2</sup>. Por lo tanto para encontrar el esfuerzo donde se presenta el inicio de la grieta de la mampostería es necesario igualar el área bajo la curva de la grafica que se muestra en la Fig. 1 con la energía  $G_f = 0.005$  N-mm/mm<sup>2</sup>, se toma el valor mas pequeño para efectos de seguridad. (La variación de este rango esta dominado por el tipo de mampostería).

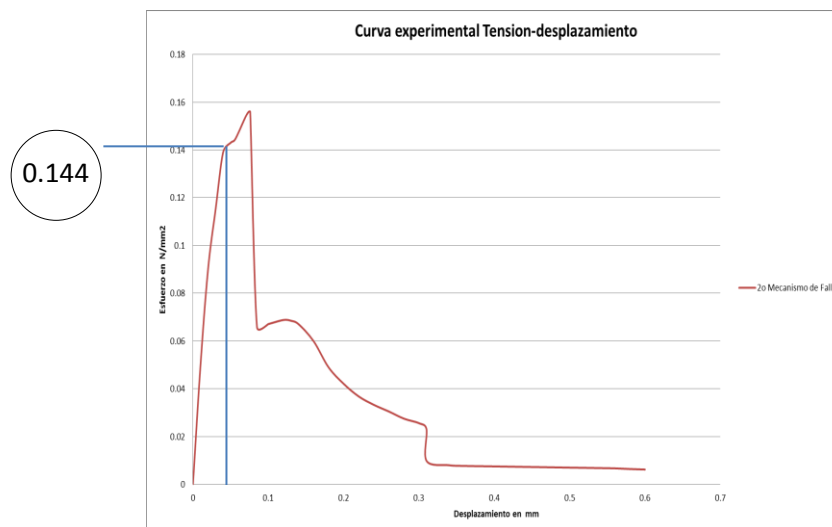


Fig. 1 Curva experimental Tensión-Desplazamiento de la mampostería

La igualación del área bajo la curva y la energía de fractura  $G_f$  se obtuvo en el punto  $0.1440 \text{ N/mm}^2$  al hacer la conversión a  $\text{Kgf/mm}^2$  tenemos que  $\sigma_f = 0.0147 \text{ kgf/mm}^2$ . La curva que se utiliza para alimentar el modelo numérico esta formado por estas dos curvas de compresión y tensión, que se muestra en la figura 2

**Gráfica esfuerzo-deformación**

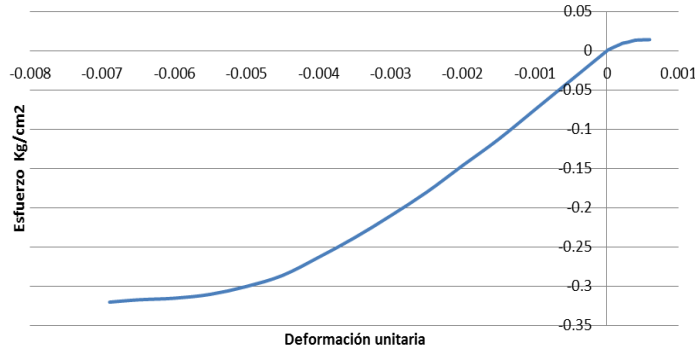


Fig. 2 Curva Esfuerzo- deformación de la mampostería

**CALIBRACIÓN DEL MODELO HOMOGENEIZADO**

Para la calibración del modelo se utilizaron dos muros de mampostería con geometrías diferentes Fig. 3 y cuatro casos de desplazamiento impuesto a cada geometría. Fig. 4 (Fathy y Planas, 2007)

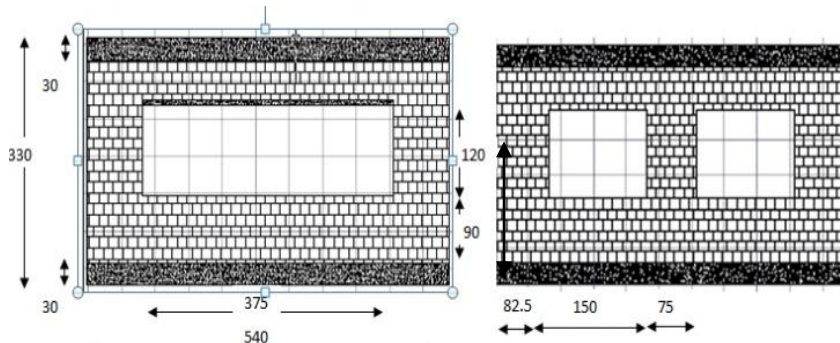


Fig. 3 Geometrías usadas (Fig.7 Fathy y Planas,2007)

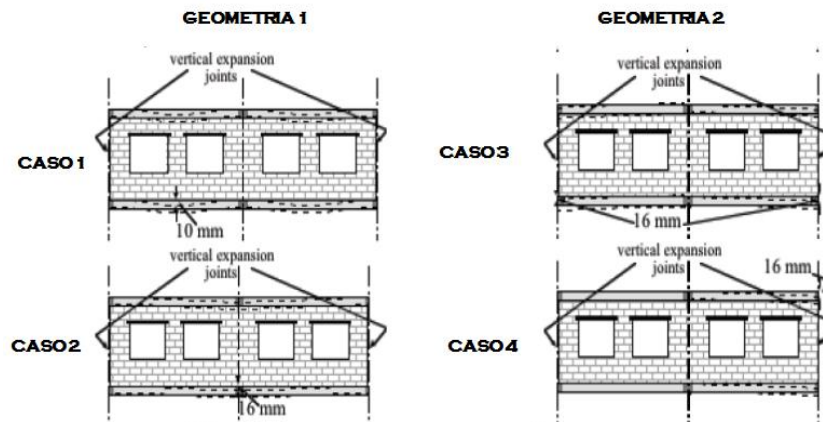


Fig. 4 Casos de carga (Fig.8 Fathy y Planas, 2007)

## PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El muro de mampostería se considera un material isotrópico con un módulo de elasticidad de  $E = 75 \text{ kg/mm}^2$ . Una energía de fractura de  $G_f = 0.005 \text{ N-mm/mm}^2$ , se usa una trabe rígida con un módulo de elasticidad de  $E = 210 \text{ Kg/mm}^2$ , se usa la técnica de homogeneización

## CASOS DE CARGA

El primer caso de carga es la imposición de un desplazamiento al centro de 10 mm y distribución parabólica, el segundo caso de estudio es la imposición de desplazamiento en la columna, de 16 mm, el tercer caso de carga es la imposición de 16 mm en los extremos y el último caso es el desplazamiento de 16 mm en un extremo.

## RESULTADOS DE LA CALIBRACION

Los resultado se comparan con la literatura (Fathy y Planas, 2007)

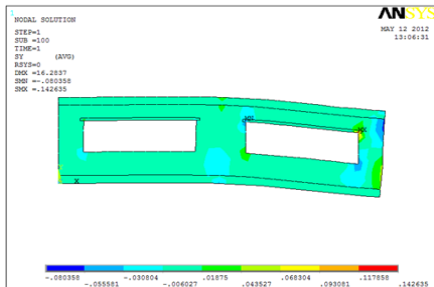


Fig.5 Geometría 1 caso de carga 4 deflexión de 16.0mm

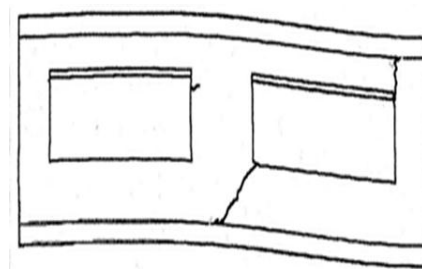


Fig. 6 (Fig14 Fathy y Planas, 2007)

Se observa que la calibración del modelo es satisfactoria, ya que identifica las zonas de compresión y tensión del muro de mampostería sujetas a diferentes desplazamientos impuestos. Las variaciones que se observan se originan por desconocer la función constitutiva utilizada, las condiciones de frontera, y las variaciones en los desplazamientos. Se da a conocer que solo se toman en cuenta las zonas a tensión, ya que es el punto donde la mampostería es mas frágil e inicia la grieta a tensión.

## CASOS DE ESTUDIO

### PATOLOGIAS TÍPICAS

Existen patologías en los muros de mampostería donde se conocen las grietas típicas con desplazamientos conocidos. Es necesario probar el modelo propuesto con estas grietas para conocer la confiabilidad del modelo.

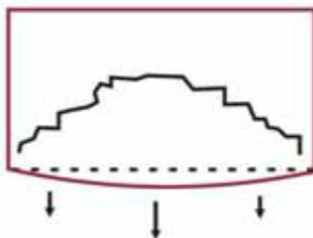


Fig.7 (Fig. 7 CICER).

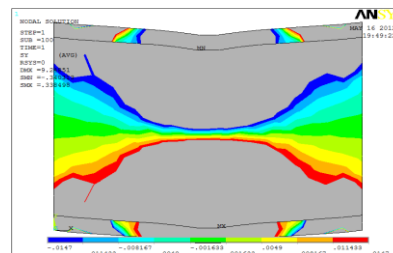


Fig. 8 Desplazamiento parabólico

Los resultados muestran que el agrietamiento del muro Fig. 8. es la configuración que se busca. Se uso un muro con  $L= 3500$  mm.  $H= 2400$  mm  $H/L = 0.69$  y un desplazamiento máximo al centro de 10 mm, para poder mostrar la grieta se cambio la escala para mostrar los esfuerzos  $\sigma = 0.0147$  kgf/mm<sup>2</sup>. La forma de los esfuerzos a tensión varía dependiendo de la relación H/L.

El modelo propuesto reproduce las patologías típicas, considerando condiciones de frontera, desplazamientos impuestos; de forma satisfactoria.

### MUROS CON VENTANAS

El objetivo de proponer los casos de estudio es conocer el desplazamiento mínimo para alcanzar la fractura en la mampostería así como la ubicación del inicio de la misma. Se da a conocer la diferencia que existe entre proponer muros confinados y muros no confinados. Para esto se utilizan las dos geometrías que se usaron en la calibración del modelo y los cuatro casos de carga (desplazamientos impuestos), aquí tomaremos en cuenta el uso de traves superior e inferior

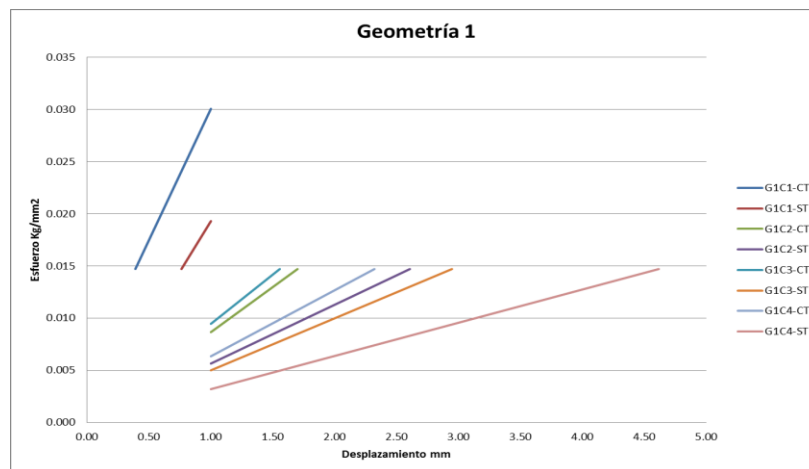


Fig.9 Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la Geometría 1 confinada y no confinada

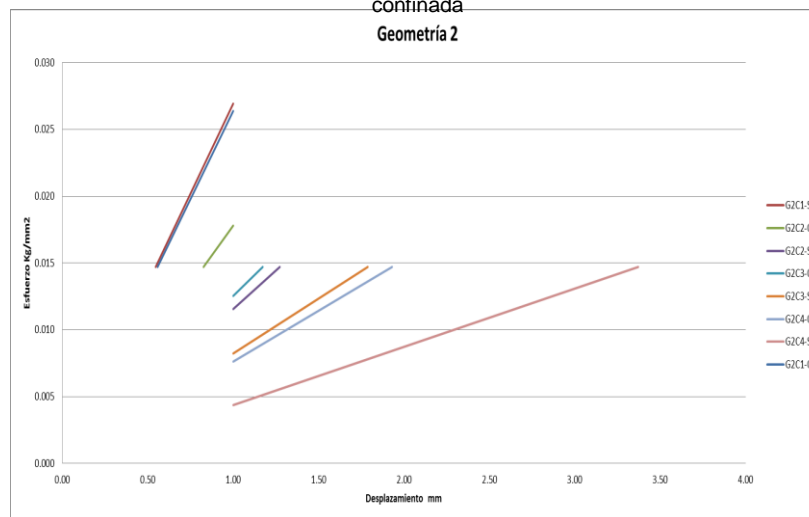


Fig. 10 Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la Geometría 2 confinada y no confinada

## CONCLUSIONES:

Observamos que para la geometría tipo 1 existe mayor esfuerzo para un desplazamiento unitario de 1 mm cuando existe confinamiento. Sin embargo para alcanzar el esfuerzo de fractura  $\sigma = 0.147 \text{ Kg/mm}^2$  se observa que donde no existe confinamiento se necesita mayor desplazamiento. Esto se debe a la rigidez impuesta por la trabe.

Para la geometría tipo 2 existe mayor esfuerzo para un desplazamiento unitario de 1 mm cuando existe confinamiento; excepto para los casos G2-C1 donde es mayor el caso sin trabe. Sin embargo para alcanzar el esfuerzo de fractura  $\sigma = 0.147 \text{ Kg/mm}^2$  se observa que donde no existe confinamiento se necesita mayor desplazamiento. Esto se debe a la rigidez impuesta por la trabe

## MUROS SIN VADOS

Para los casos de estudio propuestos con muros sin vado, se utilizaron configuraciones donde se vario la relación H/L, con la finalidad de encontrar los desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería. Usando relaciones H/L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, donde solo se hizo la variación de longitud, permaneciendo constante la altura H= 2400 mm. (Altura promedio para las casas de interés social) con las cuatro condiciones de carga utilizadas.

A continuación se muestran los resultados en la Fig. 11

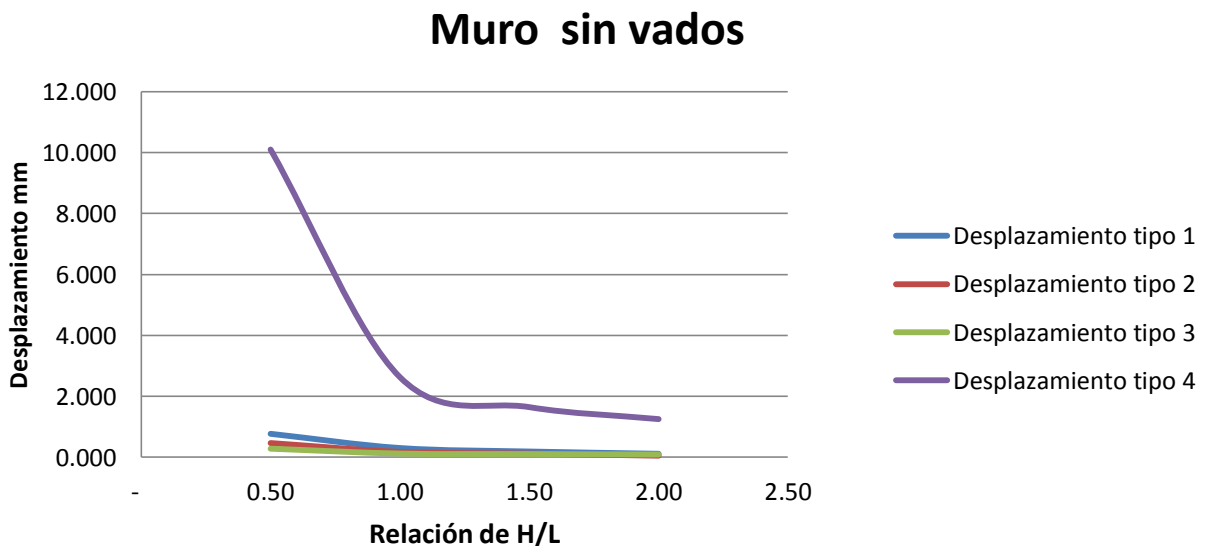


Fig. 11 Gráfica de desplazamiento necesario para alcanzar el inicio de grieta en muros sin vados de mampostería según relación H/L y tipo de desplazamiento

## CONCLUSIONES:

En todos los casos observamos que para una relación H/L=0.5 se obtiene la mayor resistencia, debido a que se necesita mayor desplazamiento para alcanzar el esfuerzo de fractura y entre mas grande es la relación H/L el muro se hace menos confiable, debido a que con menos desplazamientos se alcanza la fractura de la mampostería. La condición más desfavorable es el tipo de desplazamiento tipo 3 (Gráfica 11), debido a que en menor desplazamiento se alcanza el esfuerzo de fractura. Y el más favorable es el desplazamiento tipo 4 (Gráfica 11), que requiere de mayores desplazamientos. Se observa en todos los caso que de una relación H/L = 0.5 a

1.0 la pendiente de gráfica es mayor que de 1.0 a 2.0 concluyendo que es mas favorable siempre la relación H/L=0.5.

### MUROS CON VADOS (PUERTA)

Para los casos de estudio propuestos con muros con vados se considero una puerta de 900 mm x 2100 mm al centro del muro, se utilizaron configuraciones donde se vario la relación H/L, con la finalidad de encontrar los desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería. Usando relaciones H/L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, donde solo se hizo la variación de longitud, permaneciendo constante la altura H= 2400 mm. (Altura promedio para las casas de interés social) con las cuatro condiciones de carga utilizadas.

A continuación se muestran los resultados en la Fig. 12

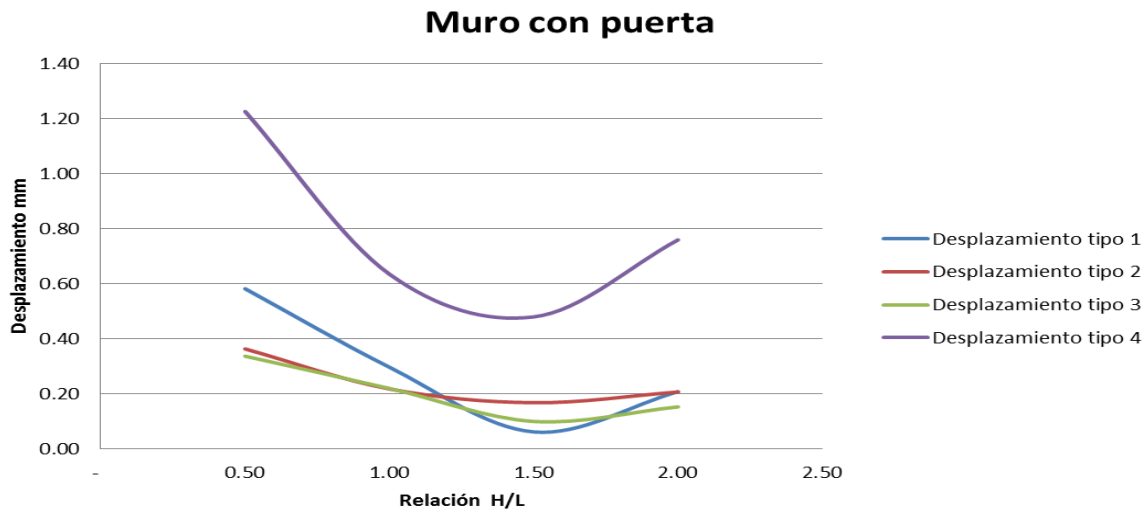


Fig. 12 Gráfica de desplazamiento necesario para alcanzar el inicio de grieta en muros sin vados de mampostería según relación H/L y tipo de desplazamiento

Conclusiones: En todos los casos observamos que para una relación H/L=0.5 se obtiene la mayor resistencia, debido a que se necesita mayor desplazamiento para alcanzar el esfuerzo de fractura y entre mas grande es la relación H/L el muro se hace menos confiable, debido a que con menos desplazamientos se alcanza la fractura de la mampostería; se aprecia en todos los casos que para un relación H/L = 2 se incrementa su resistencia a la deformación. La condición más desfavorable es el tipo de desplazamiento tipo 3 (Gráfica 12), debido a que en menor desplazamiento se alcanza el esfuerzo de fractura. Y el más favorable es el desplazamiento tipo 4 (Gráfica 12), que requiere de mayores desplazamientos. Se observa en todos los caso que de una relación H/L = 0.5 a 1.0 la pendiente de gráfica es mayor que de 1.0 a 1.5 concluyendo que es mas favorable siempre la relación H/L=0.5, comparando los resultados con el muro si vados, se observa una disminución considerable hasta de un 78% en la disminución de su capacidad de deformación para los caso de carga 1,2,3, debido a la disminución de rigidez al quitar área de muro, sin embargo en el ultimo caso su capacidad de no se vio afectado considerablemente (22%).

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta un modelo numérico basado en un programa comercial de elementos finitos, con un análisis estático no lineal, con carga monotónica (representada con desplazamientos impuestos a la estructura), Este modelo integra una función constitutiva de la mampostería para que el análisis sea no lineal; esta función se calibró con resultados experimentales realizados en

laboratorio ya establecidos en la literatura, Se establece el esfuerzo de fractura de la mampostería a través de la energía de fractura, Posteriormente con los datos establecidos el modelo se calibra con información de la literatura, a través de 2 geometría diferentes y cuatro casos de carga. Los resultados obtenidos son satisfactorios, en ellos encontramos las zonas de esfuerzos máximos a tensión y a compresión, los esfuerzo que se toman en cuenta son los esfuerzos a tensión, esto se debe a que la energía de fractura es con respecto al modo de falla a tensión; y es por lo tanto la zona donde se inicia la grieta. Se establece para estos casos la zona de agrietamiento, el desplazamiento mínimo que da inicio a la grieta sobre el muro, comparando la diferencia entre muro confinado y no confinado, para ello se introdujo una trabe en el rodapié y en el cabezal del muro. Observamos que para la geometría tipo 1 existe mayor esfuerzo para un desplazamiento unitario de 1 mm cuando existe confinamiento. Sin embargo para alcanzar el esfuerzo de fractura  $\sigma = 0.147 \text{ Kg/mm}^2$  se observa que donde no existe confinamiento se necesita mayor desplazamiento. Esto se debe a la rigidez impuesta por la trabe.

Para la geometría tipo 2 existe mayor esfuerzo para un desplazamiento unitario de 1 mm cuando existe confinamiento; excepto para los casos G2-C1 donde es mayor el caso sin trabe. Sin embargo para alcanzar el esfuerzo de fractura  $\sigma = 0.147 \text{ Kg/mm}^2$  se observa que donde no existe confinamiento se necesita mayor desplazamiento. Esto se debe a la rigidez impuesta por la trabe.

Para muros sin vados los casos de estudio propuestos con muros sin vado, se utilizaron configuraciones donde se vario la relación H/L, con la finalidad de encontrar los desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería. Usando relaciones H/L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, donde solo se hizo la variación de longitud, permaneciendo constante la altura H= 2400 mm. (Altura promedio para las casas de interés social) con las cuatro condiciones de carga utilizadas. En todos los casos observamos que para una relación H/L=0.5 se obtiene la mayor resistencia, debido a que se necesita mayor desplazamiento para alcanzar el esfuerzo de fractura y entre mas grande es la relación H/L el muro se hace menos confiable, debido a que con menos desplazamientos se alcanza la fractura de la mampostería. Con relación a la patología de grietas existen tipos ya establecidos productos de la observación, Este modelo reprodujo dos de estas patologías con resultados satisfactorios.

#### REFERENCIAS

Astroza, I. y Schmidt, A (2004), "Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño", Revista de Ingeniería Sísmica 70, 59-75

Bazán, E y Meli, R (2002), "Diseño sísmico de edificios", Limusa, México DF.

Gallegos, H (1989), "Albañilería Estructural", Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial, Lima, Perú.

Hernández, O (1977), "Diseño y construcción de estructuras de mampostería. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, con comentarios y ejemplos", UNAM, Instituto de Ingeniería, Series del Instituto de Ingeniería 403, México.

Hernández, O, y Meli, R (1976), "Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería", UNAM, Instituto de Ingeniería, Series del Instituto de Ingeniería 382, México.

López, J, Oller, S y Oñate, E (1998), "Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos", Monografía CIMNE, M46, España.



Lourenco, P B (1996), "Computational strategies for masonry structures", Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Delf, Delf University Press.

Meli, R y Reyes, A (1971), "Propiedades mecánicas de la mampostería", UNAM, Instituto de Ingeniería, Series del Instituto de Ingeniería 288, México.

NTCM-04 (2004), Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

NTCS-04 (2004), Normas técnicas complementarias para diseño por sismo, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

Orduña, A y Ayala, G (2001), "Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales", *Engenharia Civil UM* 11, 21-34.

Padilla, A y Saldaña, S (1995), "Comportamiento de muros de mampostería bajo la acción de fuerza cortante", Tesis de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Páez, A, Escobar J A, y Gómez, R (1999), "Diseño de edificios por torsión, una tendencia alternativa", XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia Mich, Vol II, 1081-1090.

RCDF (2004), Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

Tena, M y Miranda, E (2003), "Capítulo 4. Comportamiento mecánico de la mampostería", Edificaciones de mampostería, Fundación ICA, A C, 101-130.

Tomažević, M (1999), "Earthquake-Resistant design of Masonry Buildings", Imperial College Press, República de Singapur.

Page, A. W. (1978). "Finite element model for masonry", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 104, No. ST8, Proc. Paper 13957, 1267-1285.

Ortiz, M, Popov, E.P. (1982) Plain Concrete as Composite Material, *Mechanics of Materials*. North Holland Publishing Company No.1. 139-150

Pietruszczak, S, Niu, X (1992). "A mathematical description of macroscopic behavior of brick masonry", *Journal of Solids Structures*, No 29, 531-546.

Truesdell, C, Tourpin, R. (1960). *The classical Field Theories*. E.d.S Flugge-Handbuch der Physics III/I; Springer Verlag, Berlin

Anthoine, A (1995), "Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory", *Journal of Solids Structures*, No 32, 137-163

Yokel, F. Y., Fattal, S.G. (1976). "Failure Hypothesis for masonry shear wall", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 102, No. ST3, Proc. Paper 11992, 515-532

Lenczner, D. (1973). "Creep in brickwork with and without damp proof courses" *Proceedings of the British Ceramic Society*, No. 21, 39-49.

Fathy, A.M, Planas J. (2007) "A numerical study of masonry cracks", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, issue 2, march 2009, pag. 675-689.