

ANÁLISIS NO LINEAL DE MUROS DE GRAN ESPESOR MEDIANTE APLICACIÓN DE SUPERFICIE DE INTERACCIÓN EN ABAQUS

Ariel A. Sanchez, Gerardo A. González del Solar, Pablo E. Martín, Noemí G. Maldonado

Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina, ceredetec@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar/ceredetec>

Palabras Clave: Mampostería, gran espesor, simulación, superficie interacción, refuerzo.

Resumen: El presente trabajo expone los resultados de la simulación numérica, de muretes de mampostería sometidos a compresión y corte en su plano, mediante la utilización de superficies de interacción de ABAQUS.

Los resultados obtenidos se compararán con ensayos a realizarse próximamente en las instalaciones del CEREDETEC, sobre un conjunto de muretes de mampostería maciza tomada con mortero de cemento y cal y en otro conjunto de similar característica pero reforzado con mallas de acero, se comparan con los obtenidos mediante el análisis en el software, considerando las juntas de mortero y el adhesivo del refuerzo, como superficies de interacción.

En las conclusiones del trabajo, se detallan las fortalezas y debilidades de este tipo de modelación de la mampostería.

1 INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos años la investigación relacionada con el comportamiento estructural de la mampostería ha tenido avances muy significativos. Se han desarrollado estudios importantes acerca del comportamiento de la misma ante eventos sísmicos, se han modelado numéricamente estos comportamientos desarrollándose metodología de resolución para verificar el comportamiento de este material. (Berto et al. 2004; El-Dakhakhni et al, 2006; Luccioni y Rougier, 2011; CIRSOC 501)

Uno de los conceptos fundamentales al respecto de la solución de estos problemas está relacionado con el contacto entre dos o más componentes. De esta manera la relación existente entre mortero y ladrillo en las juntas, se transforma en “el problema a resolver en el modelo”.

El contacto de manera genérica está dado por dos superficies que interactúan entre ellas a través de esfuerzo tangencial y normal en la interfaz.

Entonces se generan fuerzas de fricción que resisten los deslizamientos de los cuerpos y fuerzas normales que permiten que la superficie interactúe con su elemento adyacente.

La utilización del programa ABAQUS (Simulia, 2011) para modelar estas interacciones permitirá tener un manejo diferencial de estos vínculos discontinuos que permiten que se transmitan fuerzas de una parte a otra del modelo. Estos vínculos son discontinuos por cuanto las fuerzas se generan cuando las superficies están en contacto, cuando las mismas se separan no se aplican. Es importante explicar que la modelización y análisis de estos contactos como tales permitirán tener un conocimiento más acabado de los comportamientos locales de las estructuras, y definir luego características globales.

En este trabajo se analizarán en particular las interacciones entre elementos de muros de gran espesor sometidos a distintos tipos de carga (precarga superior – cargas laterales) que simulen el comportamiento del muro con carga sísmica. De este análisis se podrá evidenciar los comportamientos y problemáticas que surgen de la consideración de las superficies de interacción.

Se han realizado numerosos estudios al respecto del comportamiento de la mampostería, ya sea a nivel de macro-elementos (con homogenización del modelo) como a nivel de micro-modelo. Zucchini y Lourenço (Zucchini y Lourenço, 2009) han trabajado sobre el tema en particular, Lourenço (Lourenço et al, 2002) ya estudió la situación particular de las interacciones a nivel general sin modelar particularmente éstas.

En cuanto al modelado de las interfaces en particular Luccioni y Martín (Luccioni y Martín, 1997) analizan los modelos de Lofti y Shing (Lofti y Shing, 1994) en referencia de la técnica basada en un modelo de interfaz aplicable a mampostería no armada, donde proponen un modelo conocido como de “interfaces dilatantes” que simulan, dada la debilidad implícita de las juntas horizontales y verticales, la falla. Alberto et al (Alberto et al, 2011) también han trabajado sobre un modelo reducido al respecto de la formulación de un modelo de análisis de daño para las juntas de mortero.

Estas interfaces simulan el comportamiento de las juntas de mortero con la salvedad de aplicación bajo condiciones de tensión plana, deformación plana y axilsimetría.

2 MATERIALES Y MODELOS A ENSAYAR.

2.1 Caracterización de los materiales empleados en el murete

Mampostería de ladrillos cerámicos macizos:

La mampostería de ladrillos cerámicos macizos deviene de la construcción de paramentos verticales compuestos por unidades de ladrillo cerámico macizo unidos mediante un puente de adherencia denominado mortero.

La descripción del modelo de falla se basa fácticamente en la existencia de planos de debilidad verticales y horizontales denominados juntas. En función del espesor de la mampostería, las juntas pueden ser verticales y/o horizontales, habiendo intermitentemente más de una en un plano horizontal.

Existen distintos tipos de aparejos de mampostería que en función del espesor de ésta definen su geometría, los espesores varían en función de la geometría de los mampuestos locales.

En los trabajos de Page (Page,1981) y Martín (Martín, 1997) se demuestra que la generación de estos planos de debilidad (juntas) dan lugar a tres ejes principales de anisotropía; dos en el plano del panel (generado por las juntas horizontales y verticales) y uno perpendicular a dicho plano que es debido a la interacción del modelo general. Evidentemente esto implica que la localización y geometría de las juntas genera estados complejos de tensiones, que merecen un estudio particular.

Se describirá ahora la particularidad de las geometrías de los materiales en cada caso, detallando los valores para mampuestos y juntas utilizados en los modelos utilizados.

Ladrillos Cerámicos Macizos:

El ladrillo es el elemento básico de la mampostería, la normativa argentina INPRES-CIRSOC 103 - Tomo III en su capítulo 5, establece como ladrillo macizo a *aquellos mampuestos cuya sección en cualquier plano paralelo a la superficie de asiento tenga un área neta no menor que el 80% del área bruta correspondiente*. Estos elementos no presentan huecos.

Es importante mencionar que la resistencia de estos elementos está dominada principalmente por los estándares de calidad bajo los cuales se ejecutan. De esta manera la norma CIRSOC 501 calcula la resistencia característica como un porcentaje de la resistencia obtenida mediante n ensayos ($n \geq 30$). La normativa establece que la resistencia característica debe alcanzarse por el 90% de las piezas ensayadas, y se determina en función de una expresión que depende del promedio de los valores de resistencia determinadas mediante los ensayos correspondientes y del coeficiente de variación que depende de la dispersión que hayan alcanzado los ensayos (siendo el límite una dispersión de 0.12).

De manera que la variabilidad de las resistencias es importante en función de la mano de obra utilizada, y las metodologías de los controles realizados.

Para el desarrollo del modelo se han utilizado dos tipos de materiales con distintas propiedades mecánicas, la primera de ellas con el uso de las características de materiales locales de la zona de El Algarrobal en Mendoza, y la segunda con los valores obtenidos por Berto y otros (Berto et al, 2004), siendo estos últimos los valores que más estabilidad le han dado al modelo.

Las propiedades mecánicas que han sido cuantificadas e incorporadas al modelo son (Tabla 1):

- a. Densidad

- b. Módulo de Young
- c. Coeficiente de Poisson.
- d. Angulo de Dilatación y resistencia característica (para el modelo de Daño Plástico considerado).
- e. Curva de endurecimiento.
- f. Comportamiento bajo tracción.

| LADRILLOS CERAMICOS MACIZOS | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----------|---------|---------------|----------|--------------|-----------------|----------|--|
| | Densidad | Modulo | Coef. | Tipo | Energía | Tensión ult. | Geometría | Friccion | |
| | | de young | Poisson | Material | Fractura | Tracción | | | |
| | Kg/cm ³ | MPa | | | MPa x m | MPa | cm ³ | | |
| Material Local : | 0.001431 | 2400 | 0.155 | Elast.Isotro. | 0.00301 | 0,94 | 6,5 - 16,5 - 26 | 0,5 | |
| Material Berto et al.: | 0.001431 | 1403 | 0.155 | Elast.Isotro. | 0.00300 | 0,60 | 12 - 12,5 - 25 | 0,7 | |
| <i>Curva de comportamiento no lineal</i> | | | | | | | | | |
| Material Local : | Tensión | MPa | 7,524 | 8,151 | 8,778 | 9,405 | 1,881 | | |
| | Deformac. | (mm/mm) | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,020 | | |
| Material Berto et al.: | Tensión | MPa | 3,00 | 3,80 | 4,80 | 5,80 | 0,60 | | |
| | Deformac. | (mm/mm) | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,020 | | |

Tabla 1 Parámetros mecánicos de ladrillos cerámicos

Los valores mencionados en Tabla 1 han sido considerados dentro del modelo de Abaqus.

Mortero para juntas:

Los mampuestos se vinculan entre sí a través de superficies de contacto denominadas juntas de mortero. Las juntas de mortero tienen un comportamiento similar a un hormigón de las mismas dimensiones, conceptualmente el mortero es una mezcla de cemento, cal, arena y agua, componentes éstos que definen las propiedades mecánicas del material.

De esta manera la arena proporciona volumen a la mezcla, el cemento y cal le dan resistencia y mantienen unidas a las partículas componentes y el agua permite que el cemento inicie su proceso de fraguado y endurecimiento.

La relación más importante de la mezcla es la que se genera entre el agua y el cemento, esta dependencia domina la resistencia del material, su trabajabilidad y su comportamiento general.

Es muy importante mencionar que durante la construcción del panel el mortero pierde parte del agua que toma el ladrillo que apoya sobre éste, lo que modifica de manera importante las características resistentes que se pueden obtener en laboratorio, que no reflejan de manera significativa el verdadero comportamiento de este material.

Las propiedades características que han sido cuantificadas e incorporadas al modelo son: (Tabla 2).

- a. Densidad.
- b. Módulo de Young.
- c. Coeficiente de Poisson.
- d. Ángulo de Dilatación y resistencia característica (para el modelo de Daño Plástico considerado).
- e. Curva de endurecimiento.
- f. Comportamiento bajo tracción.

Asimismo las constantes anteriores definen en gran medida otras características intrínsecas del material (Martín, 1997) como son: la resistencia a compresión y comportamiento en

régimen multiaxial, adherencia, módulo de elasticidad, expansión multiaxial, ductilidad, cohesión, plasticidad y resistencia.

Para el desarrollo del modelo se han utilizado dos tipos de materiales con distintas propiedades mecánicas, la primera de ellas con el uso de las características de materiales locales, y la segunda con los valores obtenidos por Berto y otros (Berto et al., 2004), siendo estos últimos los valores que más estabilidad le han dado al modelo.

| MORTERO LIGANTE | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----------|---------|---------------|----------|--------------|-----------------|----------|--|
| | Densidad | Modulo | Coef. | Tipo | Energía | Tensión ult. | Geometría | Friccion | |
| | | de young | Poisson | Material | Fractura | Tracción | | | |
| | Kg/cm ³ | MPa | | | MPa x m | MPa | cm ³ | | |
| Material Local : | 0,0024 | 3136 | 0,21 | Elast.Isotro. | 0.00301 | 0,63 | 2 | 0,5 | |
| Material Berto et al.: | 0,0024 | 2500 | 0,21 | Elast.Isotro. | 0.00301 | 0,27 | 2 | 0,5 | |
| Curva de comportamiento no lineal | | | | | | | | | |
| Material Local : | Tensión | MPa | 4,752 | 5,148 | 5,544 | 5,94 | 1,188 | | |
| | Deformac. | (mm/mm) | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,020 | | |
| Material Berto et al.: | Tensión | MPa | 2,70 | 2,80 | 3,00 | 3,10 | 0,50 | | |
| | Deformac. | (mm/mm) | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,020 | | |

Tabla 2 Parámetros mecánicos de mortero

2.2 Descripción de los materiales utilizados en la construcción de muretes.

Para la construcción de los muretes, se han utilizado materiales locales de la provincia de Mendoza con las siguientes características:

Ladrillos cerámicos macizos fabricados artesanalmente por un proveedor local, siguiendo las técnicas y metodologías manuales de fabricación, con cocción en horno a cielo abierto. Estos ladrillos tienen un tamaño promedio de: 6,5 ($\pm 0,13$) cm de espesor, 16,5 ($\pm 0,17$) cm de ancho y 26,0 ($\pm 0,27$) cm de largo.

El mortero de las juntas fue elaborado con cemento pórtland puzolánico CPP40, cal hidratada en polvo y agua potable de la ciudad de Mendoza. La arena utilizada, de origen local, es una arena de río rodada lavada con una densidad de 2570 kg/m³, absorción de agua de 2,67 % y un módulo de finura de 3,1.

Se proyectó un mortero tipo N según INPRES-CIRSOC 103 Tomo III, para la relación (cemento:cal:arena) 1:1:6 (Tabla 6 CIRSOC 103)

2.3 Descripción de la técnica de construcción de muretes.

Los muretes fueron construidos por oficiales albañiles de la región, y se realizó de acuerdo a la siguiente metodología de trabajo.

- Se moja los ladrillos en la zona de obra.
- Se elaboraron los morteros y hormigones con mezcladoras eléctricas.
- Se construyen bases de hormigón tipo H15, como apoyo de los muretes.
- Se colocan los mampuestos con mortero conformando los muretes en el laboratorio de Estructura en escala 1:1.
- Se terminan los muretes en su parte superior con un cabezal que permite la aplicación uniforme de la carga.

2.4 Descripción de las tipologías de modelos a ensayar.

Se han desarrollado varios modelos a ensayar, dado que se quiere observar el

comportamiento de muros de gran espesor mediante ensayos. De esta manera se han desarrollado dos tipos de aparejos para los que se construyeron 10 especímenes de cada uno.

Se confeccionan muros de 30 cm de espesor y de 45 cm de espesor, 1 m de ancho y 1 m de altura para facilitar el transporte y movilización, además respetar las relaciones entre dimensiones que permiten un comportamiento de características similares a muros de dimensiones reales.

2.5 Descripción de ecuaciones de equilibrio para interfaces

Zucchini y Lourenço (Zuchini y Lourenço, 2009), describen el comportamiento de las juntas y los mampuestos en su interacción. El modelo descrito se puede dividir en una celda componente (Figura N° 1) donde se presenta la unión vertical entre dos ladrillos (junta vertical en modelo), la unión horizontal entre dos mampuestos (junta horizontal en modelo), y el mampuesto propiamente dicho.

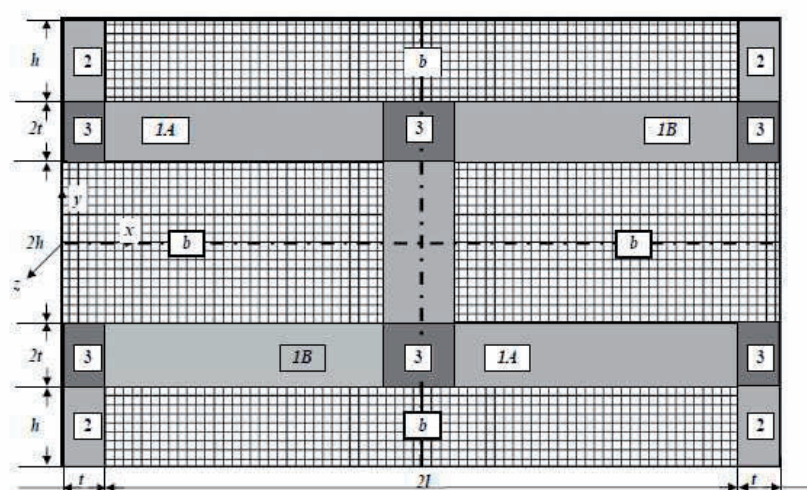


Figura N° 1 Esquema de celda analizada

El mecanismo de deformación general del sistema se puede explicar de la siguiente manera:

Ante un desplazamiento horizontal superior: (Figura N° 2)

- Comienza a deformarse lateralmente el modelo, y las juntas comienzan a interactuar con los mampuestos, mediante mecanismos de fricción del material.
- Las juntas verticales 2 tienen desplazamientos laterales, producto de que los mampuestos inferiores tratan de mantenerse en su posición inicial y los mampuestos superiores se desplazan en función de la carga y/o desplazamiento aplicado.
- La junta 1A se tracciona debido a que los mampuestos superiores se desplazan lateralmente en dirección de la carga aplicada, provocando que los mampuestos adyacentes se desplacen entre sí con una deformación diferencial en el eje horizontal debido a la dilatación de la junta traccionada.
- La junta 1B se comprime y permite que los mampuestos se desplacen.

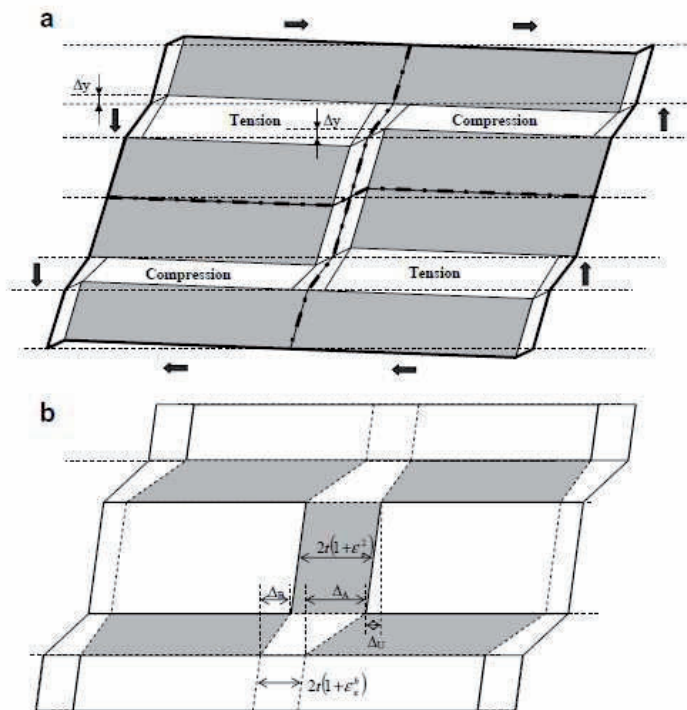


Figura N° 2 Deformación antisimétrica a) en y ; b) en x

2.6 Simulación Numérica del esquema de interacción.

Desarrollo teórico de los modelos de interacción (fricción y "hard contact").

Para la realización del modelo de murete se utilizaron elementos de interacción que simulaban las juntas de mortero entre mampuestos. La metodología de relación entre superficies fue la denominada "surface to surface", que permite relacionar las superficies en contacto.

Esta relación se estableció a través de la metodología de superficies tipo maestro y esclavo ("master" y "slaves"), que regula la relación de la interacción en general, conservando la regla básica de que las superficies slaves no pueden penetrar en las superficies de tipo master,

Los modelos utilizados para reflejar el comportamiento de la interacción fueron 2 (dos) de manera de articular la respuesta transversal y longitudinal de la junta. Así el comportamiento longitudinal fue representado bajo el modelo de fricción, donde la transmisión de fuerzas se da mediante la fricción de las dos superficies en contacto. La regulación del concepto de fricción en el modelo se da a través de un coeficiente de fricción denominado μ que responde a la relación descrita en la ley de Coulomb, siendo éste proporcional a la fuerza vertical aplicada.

Al respecto de definición de la condición de interacción normal, la misma se ha definido bajo el principio de que no existe una limitación en la magnitud de la presión de contacto que puede ser transmitida entre las superficies. Este concepto implícito en el modelo, ha permitido definir un comportamiento normal denominado "hard contact".

Tipología y explicación de elementos finitos utilizados

Para el modelo utilizado, se han considerado los elementos finitos del tipo 3dstress, con codificación interna C3D8R, en el orden estándar y geometría lineal.

Este elemento es el elemento estándar de Abaqus para estos problemas, con 8 nodos de integración ($2 \times 2 \times 2$), integración reducida y control de hourglass, como se presenta en la **Figura N° 3**.

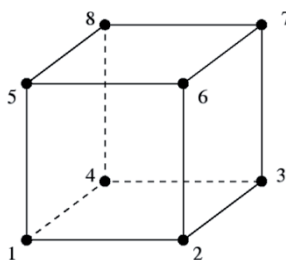


Figura N° 3 Formulación del elemento utilizado

Descripción del funcionamiento del modelo de interacción

El esquema de funcionamiento del modelo de interacción surge de la selección de las superficies que están en contacto, estas superficies deben ser definidas en función del contacto que tienen entre sí, de esta manera se han definido superficies rígidas para elementos deformables; como se ha explicado en el punto anterior, la definición de las superficies permite interaccionar las mismas desde el concepto de superficie principal (master) y superficie esclava (slave).

Las superficies de interacción deben analizarse desde la definición de una propiedad de acuerdo a su comportamiento, en este caso se han utilizado interacciones de fricción para el comportamiento longitudinal e interacciones del tipo hard contact en los comportamientos normales. Cada una de estas propiedades es definida para cada tipo de interacción, ya sea a nivel de interacciones horizontales o verticales.

A nivel de las interacciones de fricción Abaqus permite la utilización de varios algoritmos de respuesta, en este caso se ha utilizado la formulación por fricción de Coulomb, que permite definir un coeficiente de fricción entre los materiales.

La ley de Coulomb permite considerar que los desplazamientos relativos longitudinales comienzan cuando la fuerza de desplazamiento supera un valor crítico denominado $\tau_{crit} = \mu * p$, donde p = presión de contacto entre las dos superficies, de esta manera dos superficies en contacto comienzan a deslizarse cuando la fuerza de corte en la interacción ha superado esta relación. En este punto de “ruptura” comienza el proceso de trabajo tensional de las zonas adyacentes, plastificando o no las mismas en función de la carga a la que sean sometidas. Desde luego que una mayoración de la presión de contacto implica un aumento en la tensión crítica de desplazamiento, provocando en este caso que el material quede en contacto por más tiempo e incluso no lleguen a deslizarse.

El primer paso de la iteración es ajustar las relaciones entre superficies, de esta manera es importante mencionar que el modelo friccional funciona bien una vez que se hayan ajustado en la primera iteración la resolución de interferencias entre mallas (se puede observar esta recomendación en el manual de Abaqus, General Contact Initialization in Abaqus); luego de esto el modelo estabiliza y comienza a iterar para los incrementos de carga que se vayan dando. A partir de allí la interacción comienza a funcionar.

El comportamiento normal del elemento permite definir una interacción del tipo hard contact, obligando al modelo a no tener limitaciones en las presiones de contacto a transmitir.

Formulación del modelo.

El modelo general planteado da inicio a un problema no lineal que exige la utilización de un programa capaz de resolver la gran cantidad de sistemas de ecuaciones.

En el modelo utilizado, se han generado elementos particulares para cada tipo de elemento estructural componente del murete, de esta manera se han utilizado partes que se han denominado:

1. Cabezal: Este elemento simula un cabezal superior que permite la correcta distribución de carga inferior a todo el muro.

2. Junta Horizontal: Este elemento se utiliza para la interacción horizontal en cada plano de juntas.
3. Junta Vertical: Se utiliza este elemento con objeto de vincular verticalmente cada mampuesto entre sí.
4. Ladrillo: Se utiliza para modelar el mampuesto.
5. Medio Ladrillo: En las zonas de bordes se establece la necesidad de generar un elemento que geoméricamente responda al cierre del murete.
6. Fundación inferior: Simula viga de fundación sobre la que se asienta el muro.
7. Losa inferior: Simula el cimiento sobre que se funda el muro

Todos estos elementos fueron ensamblados en el murete que se presenta en la **Figura N° 4**.

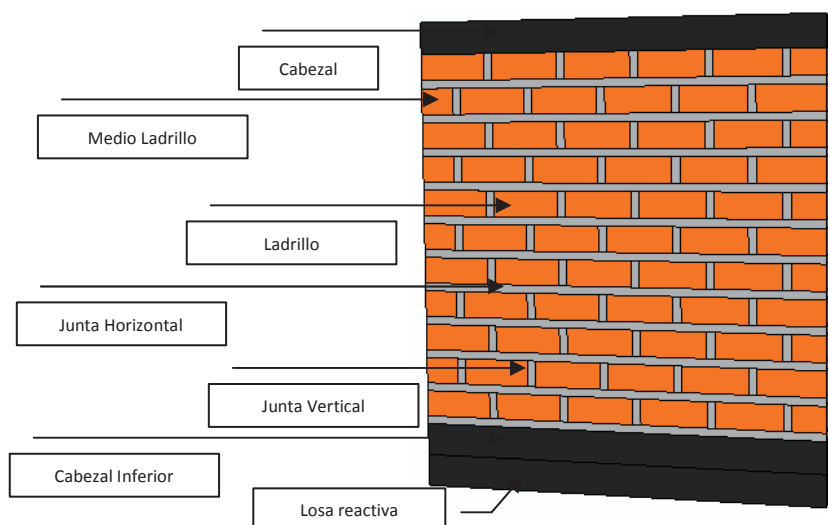


Figura N° 4 Modelo de murete utilizado con mallado para FEM

Para cada una de las partes establecidas anteriormente se definieron distintos tipos de materiales que fueron asignados a ellas (ver punto 2.3, Tabla 1-Tabla 2).

La relación entre cada una de las juntas y los mampuestos se genera a través del uso de una interacción, con comportamientos normales y longitudinales. De esta manera los ladrillos están unidos a las juntas a las cuales se contactan.

Al respecto de las condiciones de apoyo (ver Figura N° 5) se definieron restricciones en el eje horizontal en toda la parte frontal-inferior que se corresponde con la simulación de una losa de base; en el eje vertical en toda la base del modelo; en el eje perpendicular al plano del muro en la arista frontal-inferior. De esta manera se han modelado las condiciones de apoyo del muro convencional.

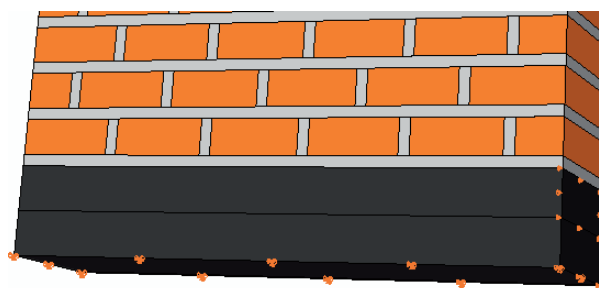


Figura N° 5 Restricciones utilizadas en el murete

Las cargas a las que se somete al modelo son una presión de 10 kg/cm^2 y un

desplazamiento lateral de 6 mm.

3 RESULTADOS DEL MODELO.

Como se observa en la Figura N° 6, las tensiones Von Mises, se distribuyen de acuerdo a esperado en ambos modelos (observando en los mismos la “biela de compresión” usual) la misma figura muestra la distribución de parámetros con evidente concentración de tensiones en la zona del cabezal y losa de fundación. (Valores cercanos a los 5.2 MPa, con un promedio de medición en la zona de la biela central de 2.7 MPa.), esto es para una precompresión de 1 MPa y un desplazamiento lateral de 6 mm.

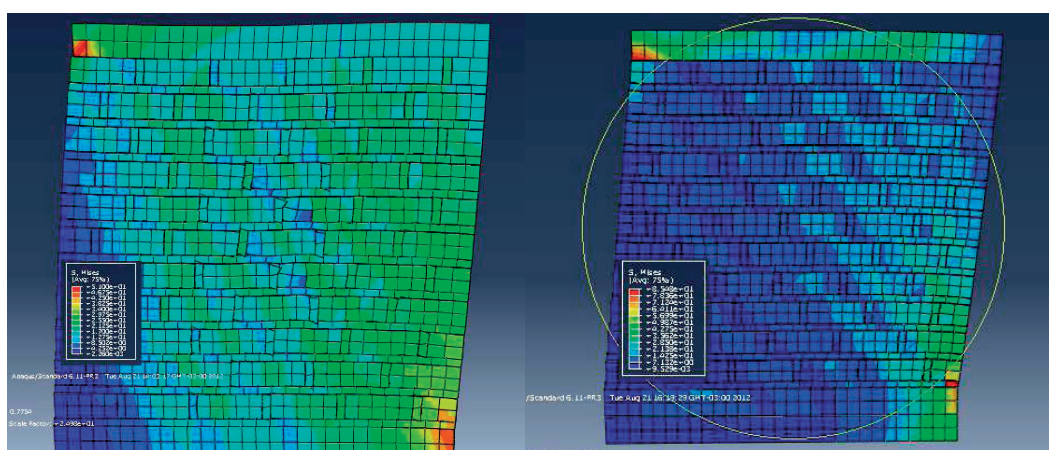


Figura N° 6 a) Tensiones Mat. Berto b) Tensiones Materiales locales

La Figura N° 6 b muestra los resultados considerando las características mecánicas de materiales ensayados de manera local y, obteniéndose valores cercanos a los 8.5 MPa, con un promedio de medición en la zona de la biela central de 4.2 MPa, esto es para una precompresión de 1 MPa y un desplazamiento lateral de 6 mm.

Al respecto de las tensiones plásticas P para sus valores máximos principales, se obtiene lo que se ve en Figura N° 7 a, con parámetros según Berto y otros (se observan valores de plastificación máximos cercanos a los $9.025e^{-4}$ MPa de tensión máxima y valores promedios de $6.017e^{-4}$ MPa. Para los parámetros locales se obtienen los valores mostrados en la Figura N° 7 b Para valores de ensayos locales se obtienen valores de plastificación máximos cercanos a los $2.890e^{-4}$ MPa de tensión máxima y valores promedios de $1.662e^{-4}$ MPa.

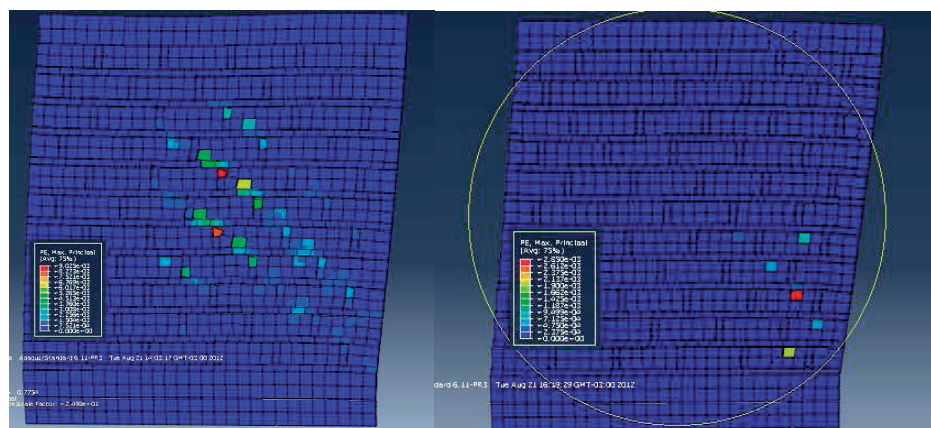


Figura N° 7 a) Tensiones Plásticas s/Berto. b) Tensiones Plásticas s/local.

Es muy importante ver que la diferencia de las propiedades mecánicas de los materiales impacta directamente en los resultados generales del modelo. De esta manera es de vital importancia la definición concreta y específica de los materiales con los que se desarrolla el modelo logrando de esta manera que el comportamiento global del elemento sea representado adecuadamente. Al respecto podemos ver que el modelo con las características mecánicas definidas por Berto permiten un comportamiento más dúctil del murete, con una convergencia de resultados mucho más rápida que la correspondiente a los materiales locales.

3.1 Gráficas de evolución de la interacción (tensiones – deformaciones – fuerza de fricción).

Se puede ver en la Figura N° 8 , para el elemento central del murete, que la relación entre fuerzas aplicadas y desplazamientos horizontales muestra para una misma fuerza aplicada mayor desplazamiento en el caso de las consideraciones resistentes de Berto y otros. Esto por cuanto los ensayos de materiales locales han arrojado mayores tensiones de rotura, así como también mayores módulos elásticos.

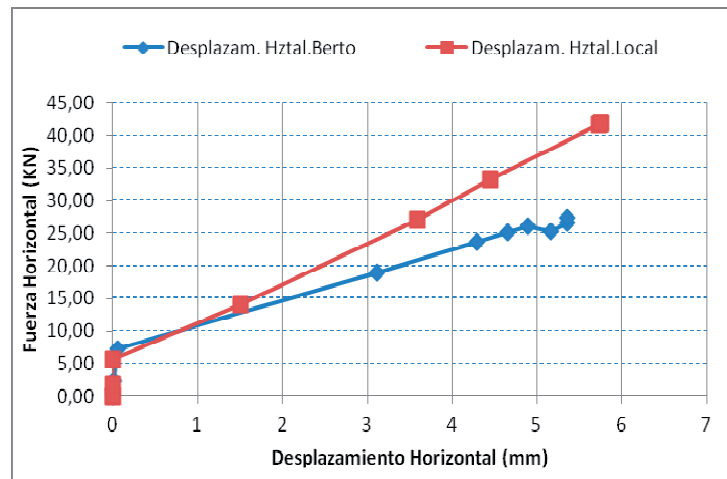


Figura N° 8 Fuerza vs Desplazamiento

En la Figura N° 9 se presentan para el mismo elemento central, la relación tensión deformación para los dos análisis efectuados.

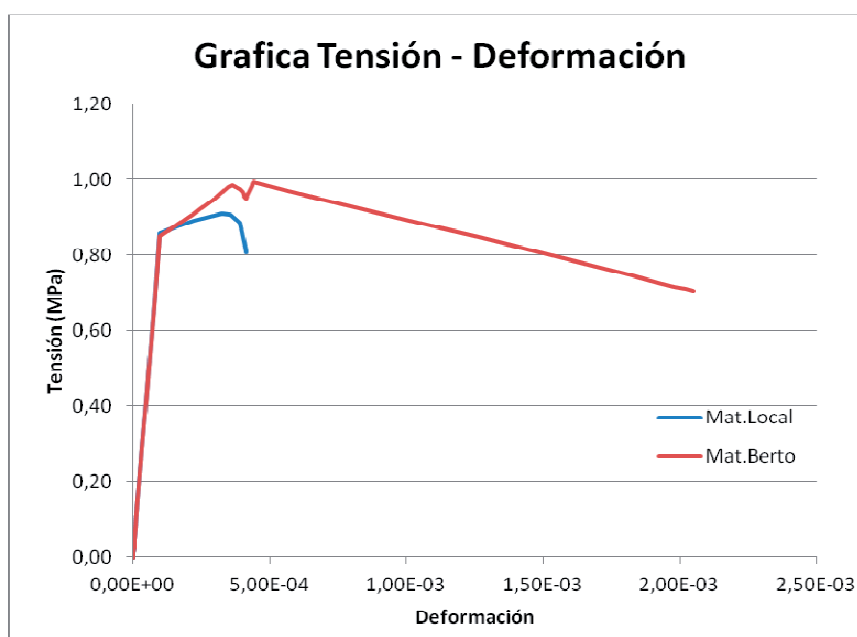


Figura N° 9 Tensión vs. Deformación

Se ve en la Figura N° 9 la diferencia importante en el comportamiento de los materiales, situación ésta que genera parámetros no lineales bien distintos.

Cuando se realice el ensayo experimental se utilizarán las características mecánicas de los materiales locales, determinándose de esta manera el posterior ajuste del modelo en caso de ser necesario (discretización y tipo de elementos, etc.)

4 CONCLUSIONES.

Al comenzar con la modelación de los muretes se plantea la necesidad de analizar las distintas tipologías de modelos de interacción disponibles. En este caso se decide el uso de las interacciones del tipo friccionales en las uniones ladrillo mortero con un coeficiente de fricción de 0.50 (ver Tabla 1) que representan de manera adecuada los comportamientos teóricos de los materiales en contacto para la tipología de contacto tangencial.

Para las interacciones en el plano normal, se utilizó la tipología de Hard Contact, donde no hay limitaciones en la tensión de contacto que puede ser transmitida por las superficies. La parametrización de esta interacción fue la estándar de Abaqus.

La utilización de los resultados de los ensayos sobre materiales locales, ha generado en el modelo distintos problemas de convergencia, esto genera la necesidad de comparar el modelo con otros datos de materiales ya utilizados, para lo cual se utilizaron los datos de Berto y otros que provoca una convergencia más rápida del modelo asociada sobre todo a curvas de comportamiento no lineal con mayor ductilidad.

La utilización de los modelos de interacción requiere un especial cuidado en la determinación de las superficies que se encuentran en contacto, dado que la falla en la determinación de éstos provoca que haya secciones que queden desconectadas del ensamblaje principal con la consecuente discontinuidad estructural en el mismo y/o que se acepte la penetración de elementos que no se correspondan con la respuesta estructural del elemento.

Tal como menciona Torrisi (Torrisi, 2012) la configuración de las juntas verticales y horizontales modifica el estado tensional del panel, dado que se corre la forma de la falla, donde los puntos de transición entre la falla por deslizamiento y tensión diagonal se desplazan en función de las características resistentes de cada uno.

Globalmente el panel muestra la clásica biela central donde luego se origina la falla, que va

escalonándose en función de la distribución de juntas. Debido a esto es de fundamental importancia cuantificar las características técnicas de cada una de las juntas para materializar de manera realista el comportamiento global.

En conjunto con los ensayos de muretes se definirán ensayos tipos para determinar la parametrización de las interacciones con valores acordes a los materiales locales utilizados.

5 REFERENCIAS

- Alberto,A.; Antonaci,P.; Valente,S. Damage analysis of brick-to-mortar interfaces. *Procedia Engineering* 10 (2011) 1151–1156. (2011)
- Berto, L.; Saetta, A.; Scotta, R.; Vitaliani, R. Shear behaviour of masonry panel: parametric FE analyses, *International Journal of Solids and Structures* 41 (2004) 4383–4405
- CIRSOC 501. Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Julio (2007).
- El-Dakhkhni, W.W.; Hamid, A.A.; Hakam, Z.H.R.; Elgaaly, M. Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. *Composite Structures* 73 (2006) 458–477
- INPRES-CIRSOC 103, (1992). Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes. INPRES, Argentina.
- Lotfi, H. R. and Shing, P. B.. "Interface model applied to fracture of masonry structures." *Journal of Structural Engineering, ASCE* Vol.120(1): pp.63-80. (1994)
- Lourenço, P.B., Computations of historical masonry constructions. *Progress in Structural Engineering and Materials* 4, 301–319. 2002.
- Luccioni B, Martín PE. Modelo elastoplástico para materiales ortótropos. *Rev Int Mét Num Dis Cálculo* 1997;13(4):603–14.
- Luccioni, B. Rougier.V. In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials. *Construction and Building Materials*. 25 1772–1788. (2011)
- Maldonado, G., Martín, P., Maldonado, I. "Seismic Mitigation of a Historic Masonry Building", *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2011, 5, (Suppl 1-M3) 61-70. (2011a)
- Maldonado, I.; Maldonado, N.; Martín, P. "Importancia del suelo en la puesta en valor de edificios patrimoniales en zona sísmica" 2do. Congreso Iberoamericano y X Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio" COIBRECOPA ISBN 978-987-26159-1-8. (2011b).
- Maldonado, N.G., Martín, P.E., Maldonado, I. An approach of service life in repair of structures with concrete due natural hazards".A. 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa: 2012
- Martín, P.; Estudio Teórico del Comportamiento de la Mampostería, tesis de Magister en Ingeniería Estructural Universidad Nacional de Tucumán. (1997)
- Orduña, A. y Ayala, G., (2001), "Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales", *Revista Engenharia Civil* N°11, 21-34.
- Page, A. W.. "The biaxial compressive strength of brick masonry." *Proc. Intsn. Civ. Engrs.* Vol.Part 2(71): pp.893-906. (1981)
- Simulia. *Abaqus Analysis User's Manual*, 6.11. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011
- Torrise, G., Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Cuyo (2012).
- Torrise, G.; Crisafulli, F.J. (2010), "Modelación refinada de muros de mampostería encadenada.", XXXIV Jornadas de Ingeniería Estructural, San Juan, Argentina.
- Zucchini, A.; Lourenço, P.B. A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls. *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) 871–886