

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 la comparación de resultados obtenidos de la simulación numérica de muretes de mampostería sometidos a compresión y corte en su plano, mediante la utilización de superficies de interacción del software comercial ABAQUS de la empresa Simulia, versus los datos obtenidos de los ensayos físicos ejecutados en el laboratorio del CEREDETEC.

Los resultados de los ensayos físicos se han tomado del análisis del conjunto de muretes de mampostería maciza confeccionada con mortero de cemento y cal de 30 y 50 cm de espesor respectivamente. Estos se comparan con los obtenidos mediante el análisis en el software, considerando las juntas de mortero como superficies de interacción, tratando de obtener la modelación del comportamiento de la unión de los elementos mortero y mampuesto.

En las conclusiones del trabajo, se detallan las fortalezas y debilidades de este tipo de modelación de la mampostería, y la conveniencia del desarrollo de modelos que permitan identificar y analizar el comportamiento del elemento más débil 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; así como también se han estudiado y obtenido nuevos modelos de falla propuesto que tienen a identificar de manera más ajustada las debilidades estructurales de este material. (Berto et al. 2004; El-Dakhkhni et al 2006; Luccioni y Rougier, 2011; Torrisi 2012; CIRSOC 501)

Uno de los conceptos fundamentales respecto a 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”; está claramente demostrado que las uniones débiles del elemento se generan justamente en esta relación/interacción.

El contacto de manera genérica está dado por dos superficies que interactúan entre ellas a través de esfuerzo tangencial y normal en la interfaz. Esto permite que se desarrollen mecanismos resistentes que se presentan en general como fuerzas de fricción que resisten los deslizamientos de los cuerpos y fuerzas normales que permiten que la superficie se vincule con su elemento adyacente.

La utilización del programa ABAQUS (Simulia, 2011) permite modelar estas interacciones a través de un manejo diferenciado 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, al separarse las mismas 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 podrán 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) y Page (Page, 1979, 1986) han trabajado sobre el tema en particular, Lourenço (Lourenço et al, 2002) ya estudió la situación de las interacciones a nivel general sin modelar particularmente éstas, otorgando una buena explicación del fenómeno local con una atenta visión del fenómeno físico.

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) y Page (Page; 1979) en referencia de la técnica basada en un modelo de interfaz aplicable a mampostería no armada, donde se aplica un modelo conocido como de “interfaces dilatantes” que simulan, dada la debilidad implícita de las juntas horizontales y verticales, la falla. Alberto y otros (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. Torrisi (Torrisi, 2012) considera modelos de daño e interacción similares, para su propuesta de falla en macromodelo.

Estas interfaces simulan el comportamiento de las juntas de mortero con la salvedad de aplicación bajo condiciones de tensión plana, deformación plana y axilsimetría; aunque la consideración de comportamiento normal y tangencial en la junta permite una buena

definición de la direccionalidad del comportamiento, que es importante para el fenómeno.

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 conformado por una argamasa de arena con un aglutinante como cal, cemento denominado mortero, que forman las juntas de la mampostería.

La descripción del modelo de falla se basa fácticamente en la existencia de planos de debilidades verticales y horizontales que suelen producirse en correspondencia con las 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 disposición de los mampuestos en la mampostería o "aparejo" 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 el reglamento 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 las características de materiales locales de la zona de El Algarrobal en Mendoza.

En la Tabla 1 se presentan los datos de la calidad de los mampuestos locales ensayados, en tanto en la Tabla 2 se presentan los datos de la obtención de la curva de comportamiento de los mampuestos ensayados. Se ha obtenido el Modulo de Young la curva obtenida de comportamiento, considerando el modulo tangencial.

Control de Calidad de Mampuestos				
Material: Ladrillón				
[Michelini, R - Maldonado, G - Olivencia, L; 1995]				
Requerimiento evaluado	Año 1985	Año 1990	Norma IRAM 1549 (1)	Año 2013 (3)
Largo (cm)	18.18 ± 0.5	17.03 ± 0.4	13.00 ± 0.1	16.39 ± 0.2
Espesor (cm)	8.61 ± 0.3	7.18 ± 0.2	5.5 ± 0.5	6.60 ± 0.2
Ancho (cm)	29.87 ± 0.4	26.93 ± 0.4	27.00 ± 1.0	25.99 ± 0.3
Resistencia Flexión (MPa)	2.23 ± 0.5	3.46 ± 0.4	2.00 ± 0.0	3.65 ± 0.2
Resistencia Compresión (MPa)	8.25 ± 0.4	9.85 ± 1.1	7.50 ± 0.0	4.01 ± 0.3
(1) IRAM 1549: "Ladrillos para construcción. Métodos de ensayo generales."				
(2) CCSR 87: "Código de Construcciones Sismorresistentes de 1987 - Mendoza"				
(3) Valores estadísticos obtenidos en 2013. [Gonzalez, 2013]				

Tabla 1: Características de Mampuestos Ensayados

Curvas Tensión-Deformación en mampostería a compresión										
		h (mm) 66								
Carga [kN]	Tensión [Mpa]	Deformación [mm]			ε %	Δε %	E Tang.	ε corr %	ε e %	ε p %
		Lectura	Def Parcial	Def Acum						
0	0,00	5,18	0,00	0,00	0,000%			0,000%		
20	0,94	7,58	2,40	2,40	3,636%	3,636%	3.200,00	0,029%	0,029%	0,000%
40	1,88	7,78	0,20	2,60	3,939%	0,303%		0,059%	0,059%	0,000%
60	2,82	8,03	0,25	2,85	4,318%	0,379%		0,088%	0,088%	0,000%
80	3,76	8,36	0,33	3,18	4,818%	0,500%		0,117%	0,117%	0,000%
100	4,70	8,65	0,29	3,47	5,258%	0,439%		0,147%	0,147%	0,000%
110	5,17	8,78	0,13	3,60	5,455%	0,197%		0,161%	0,161%	0,000%
120	5,64	9,00	0,22	3,82	5,788%	0,333%		0,495%	0,176%	0,319%
130	6,11	9,27	0,27	4,09	6,197%	0,409%		0,904%	0,191%	0,713%
140	6,58	9,56	0,29	4,38	6,636%	0,439%		1,343%	0,206%	1,138%
150	7,05	10,00	0,44	4,82	7,303%	0,667%		2,010%	0,220%	1,790%
152	7,14	10,54	0,54	5,36	8,121%	0,818%		2,828%	0,223%	2,605%
E adopt							3200			

Tabla 2 Curva comportamiento no lineal de materiales.



Figura 1: Ensayo a compresión de probetas de mampostería

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 se pueden observar en la Tabla 3.

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 materiales locales con propiedades mecánicas que se analizaron para este caso en particular, y se enunciarán a continuación.

Curvas Tensión-Deformación en mortero a compresión								
Carga [kN]	Tensión [MPa]	ϵ medido %	Tensión [MPa]	$\Delta\epsilon$ %	$\Delta\epsilon_{\text{correg}}$	ϵ acum %	$\epsilon\epsilon$	$\epsilon\rho$
0	0,00	0,000%	0,00	0,0000%	0,0000%	0,0000%		
5	1,00	1,457%	1,00	1,4569%	0,0578%	0,0578%	0,06%	0,00%
10	2,00	1,570%	2,00	0,1132%	0,0578%	0,1156%	0,12%	0,00%
15	3,00	1,678%	3,00	0,1084%	0,0578%	0,1735%	0,17%	0,00%
20	4,00	1,796%	4,00	0,1179%	0,0578%	0,2313%	0,23%	0,00%
25	5,00	1,957%	5,00	0,1603%	0,1603%	0,3916%	0,29%	0,10%
30	6,00	2,263%	6,00	0,3065%	0,3065%	0,6980%	0,35%	0,35%
31	6,20	2,525%	6,60	0,2617%	0,2617%	0,9597%	0,38%	0,58%
		2,970%	7,50	0,4455%	0,4455%	1,4053%	0,43%	0,97%
			E adopt	1730		E=		

Tabla 3 Obtención curva de comportamiento de mortero



Figura 2: Ensayo a compresión en probetas 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 proyect  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 mojaron 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.



Figura 3: Probetas M45 (aparejo de cabeza y soga).



Figura 4: Probetas M30 (aparejo de cabeza).

3 ENSAYOS FISICOS DE MODELOS

Luego de la determinación de las características físicas de los materiales componentes se ensayaron, 3 muretes de 26 cm de espesor y 3 muretes de 45 cm de espesor.

Los ensayos se realizaron sobre especímenes identificados en la Tabla 4.

Tipo de elemento	Espesor [cm]	Designación
M45	45	MMB-05
M45	45	MMB-06
M45	45	MMB-07
M30	26	MMB-08
M30	26	MMB-09
M30	26	MMB-10

Tabla 4: Identificación de modelos ensayados

Para la realización de los ensayos se utilizó el Laboratorio de Estructuras del Ceredetec, reforzándose el pórtico de carga existente. Las cargas laterales y de compresión se dieron con el uso de dos gatos hidráulicos con mediciones de las presiones consignadas.

Debido a las dimensiones y al peso de las probetas en estudio se debió realizar una adaptación al ensayo. Se ubica el elemento en posición horizontal sobre el suelo, aplicando la carga vertical a través de un gato hidráulico sobre una viga de acero cuya función es la de distribuir la fuerza concentrada sobre la superficie del encabezado superior de la probeta. Esta presión se aplica a una distancia de 10 cm del borde longitudinal y centrado en el ancho del elemento.

Esta fuerza se ve equilibrada a su vez, por la reacción de la superficie de apoyo. Respecto a la carga horizontal, la misma se aplica a la altura del encabezado superior y es equilibrada por medio de un elemento ubicado en el encabezado inferior en la zona del talón del muro. De esta manera ni la carga de corte ni la de confinamiento son aplicadas de manera directa sobre la probeta sino a través del encabezado de hormigón.

Se puede ver un esquema del elemento a ensayar en el Figura 5.

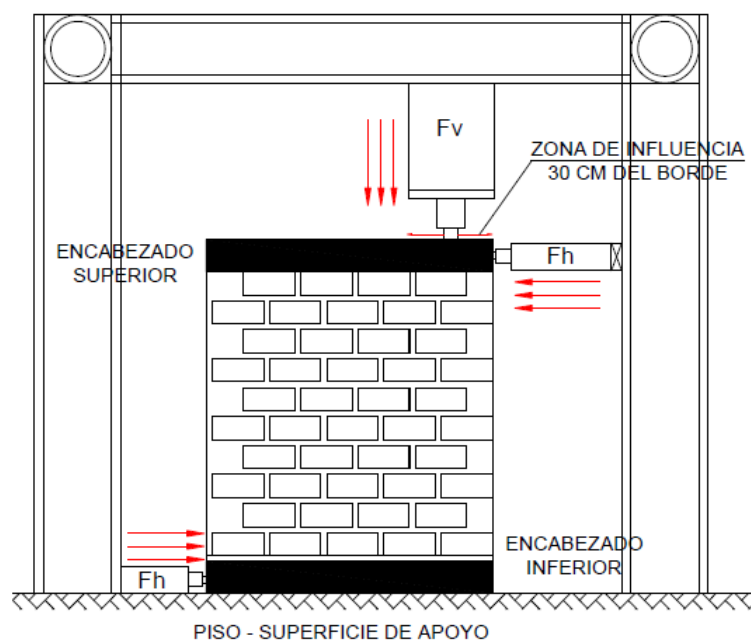


Figura 5: Esquema de ensayo de muretes

Los muros son sometidos a solicitaciones con carga controlada. Se aplica a tal efecto, una carga horizontal de corte (F_h) y, simultáneamente, una vertical de confinamiento (F_v). Ambas van en aumento, la segunda en función de la primera, con una relación de 1,5. Con objeto de determinar los desplazamientos generados por el estado solicitante se colocaron ocho puntos de medición.



Figura 6: Muretes de 45 cm pre y post ensayo

Se puede ver en la Figura 7 los puntos donde se miden los desplazamientos.

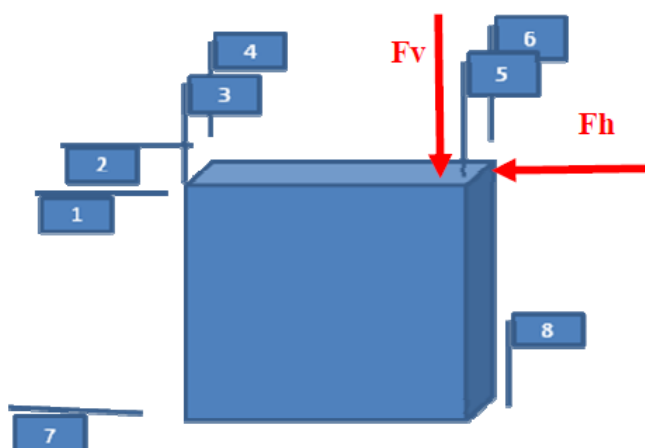
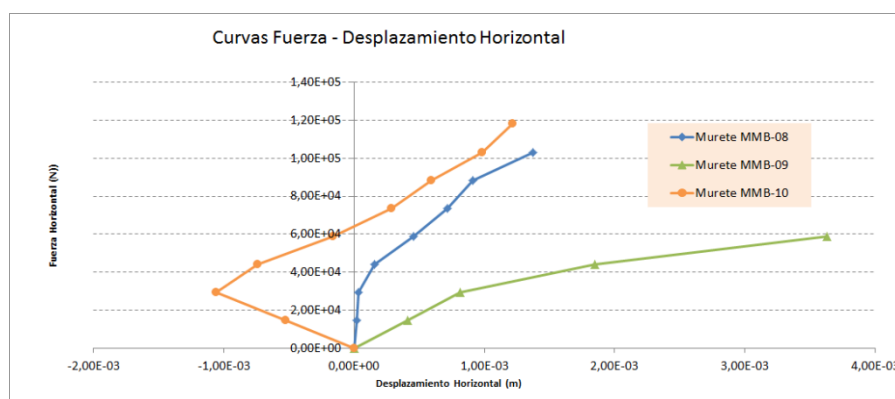


Figura 7: Puntos de medición

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



Se puede ver en la

Figura 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 de muretes más anchos. Esto se da en los tres elementos ensayados.

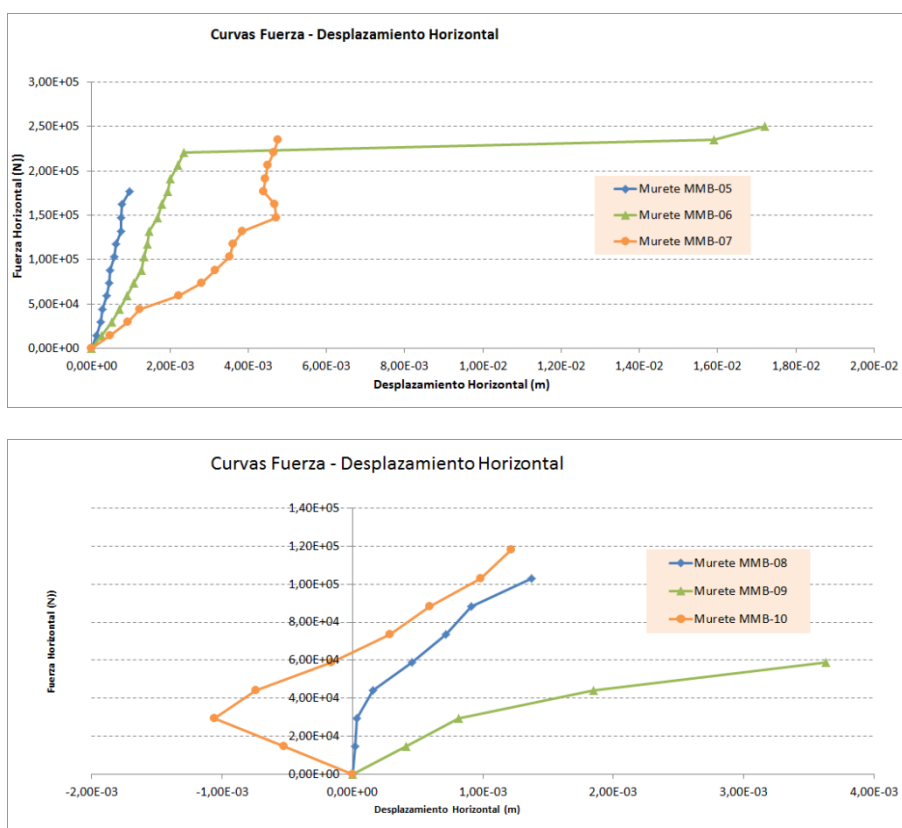


Figura 8: Fuerza vs Desplazamiento a) Murete 45cm de espesor b) Murete de 30cm de espesor

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

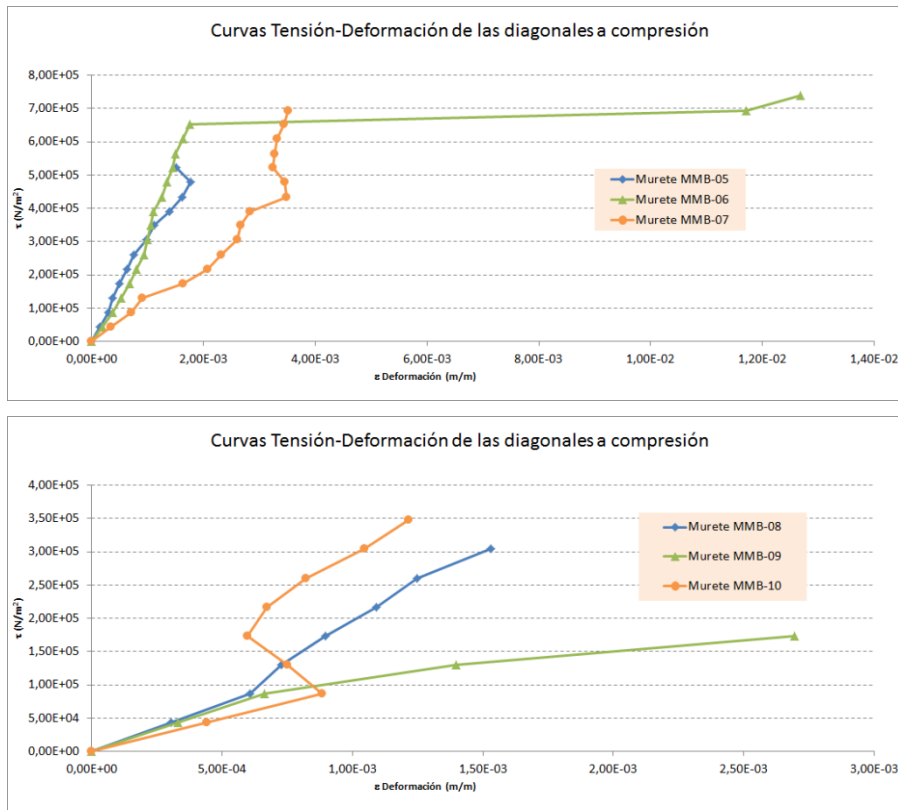


Figura 9: Tensión vs. Deformación a) Murete de 45 cm de espesor b) Murete de 30cm de espesor

Se puede apreciar, la no linealidad y fragilidad de los materiales bajo análisis.

4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MURETE

4.1 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 10) 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.

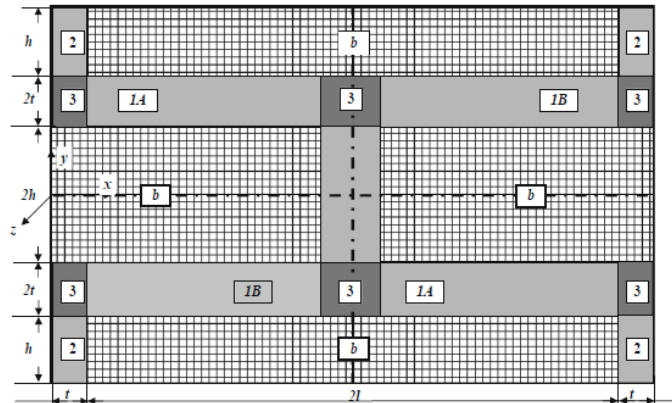


Figura 10: Esquema de celda analizada

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

manera: Ante un desplazamiento horizontal superior: (Figura 11)

- 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.

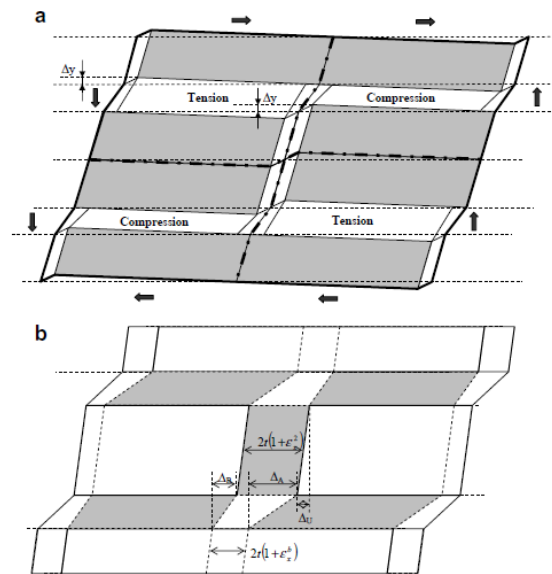


Figura 11: Deformación antisimétrica a) en y-y b) en x-x (Lourenco, 1994)

4.2 Simulación Numérica de la 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 esclavas no pueden penetrar en las superficies de tipo maestro.

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 fenómeno 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 (2x2x2), integración reducida y control de hourglass, como se presenta en la Figura 12.

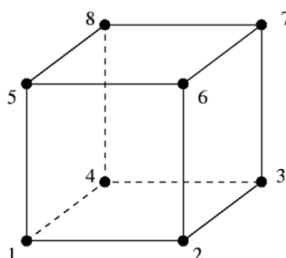


Figura 12: Formulación del elemento utilizado

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 interactuar 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.

El modelo friccional de Coulomb permite considerar que los desplazamientos relativos longitudinales comienzan cuando la fuerza de desplazamiento supera un valor crítico $\tau_{crit} = \mu \cdot p$; siendo 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 (Simulia, 2011), 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 generados.

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 el que se funda el muro

Todos estos elementos fueron ensamblados en el murete que se presenta en la Figura 13.

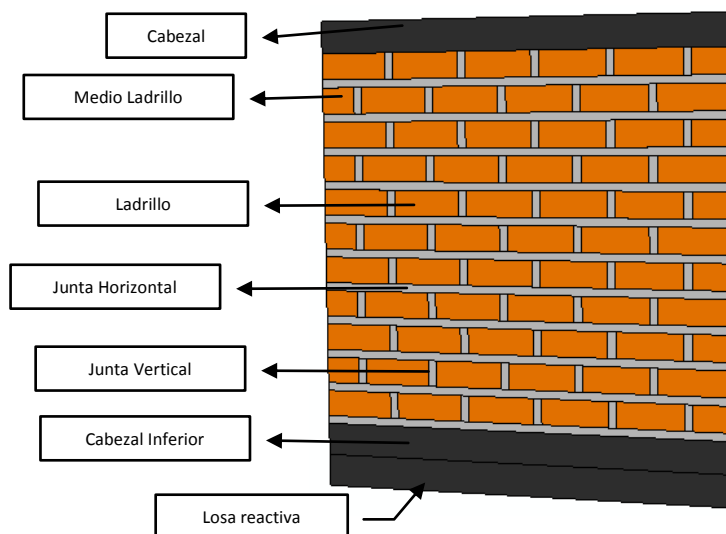


Figura 13: Modelo de murete de 30cm - Descripción de elementos

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 y 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.

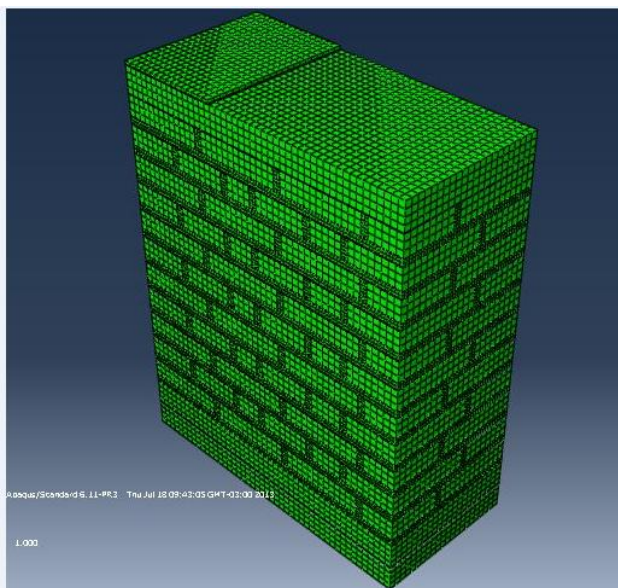


Figura 14: Modelo discretizado de muro de 45cm

Al respecto de las condiciones de apoyo (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) 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 modelaron las condiciones de apoyo del muro convencional.

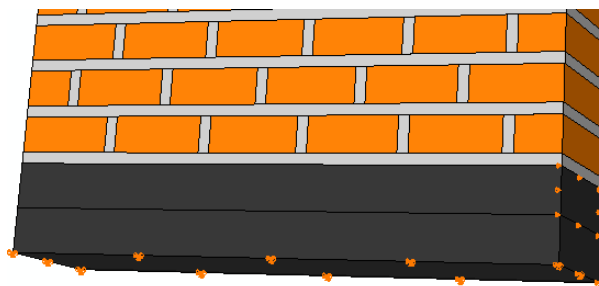


Figura 15: Restricciones utilizadas en el murete

Las cargas a las que se somete al modelo son una presión de 2MPa y una carga lateral creciente de hasta 5.5MPa

5 RESULTADOS DEL MODELO.

Con objeto de lograr una correcta distribución de tensiones, y minimizar errores en el cálculo, se discretizaron los elementos para la mampostería en una malla de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$, y para las juntas en $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$.

Como se observa en Figura 16 a y b, las tensiones mínimas, se distribuyen de acuerdo patrones diferentes para los modelos de 45 cm y 30 cm respectivamente. Esto implica que para los muros más gruesos la biela central de compresión tiene un arranque en la zona de la cabeza del muro y termina en el tercio final del muro, no llegando al extremo o pie de este. Para el murete de 30cm la biela es de la forma esperada y tiene un ángulo de prácticamente 45° , arrancando en el encuentro vertical superior y terminando en el pie del elemento.

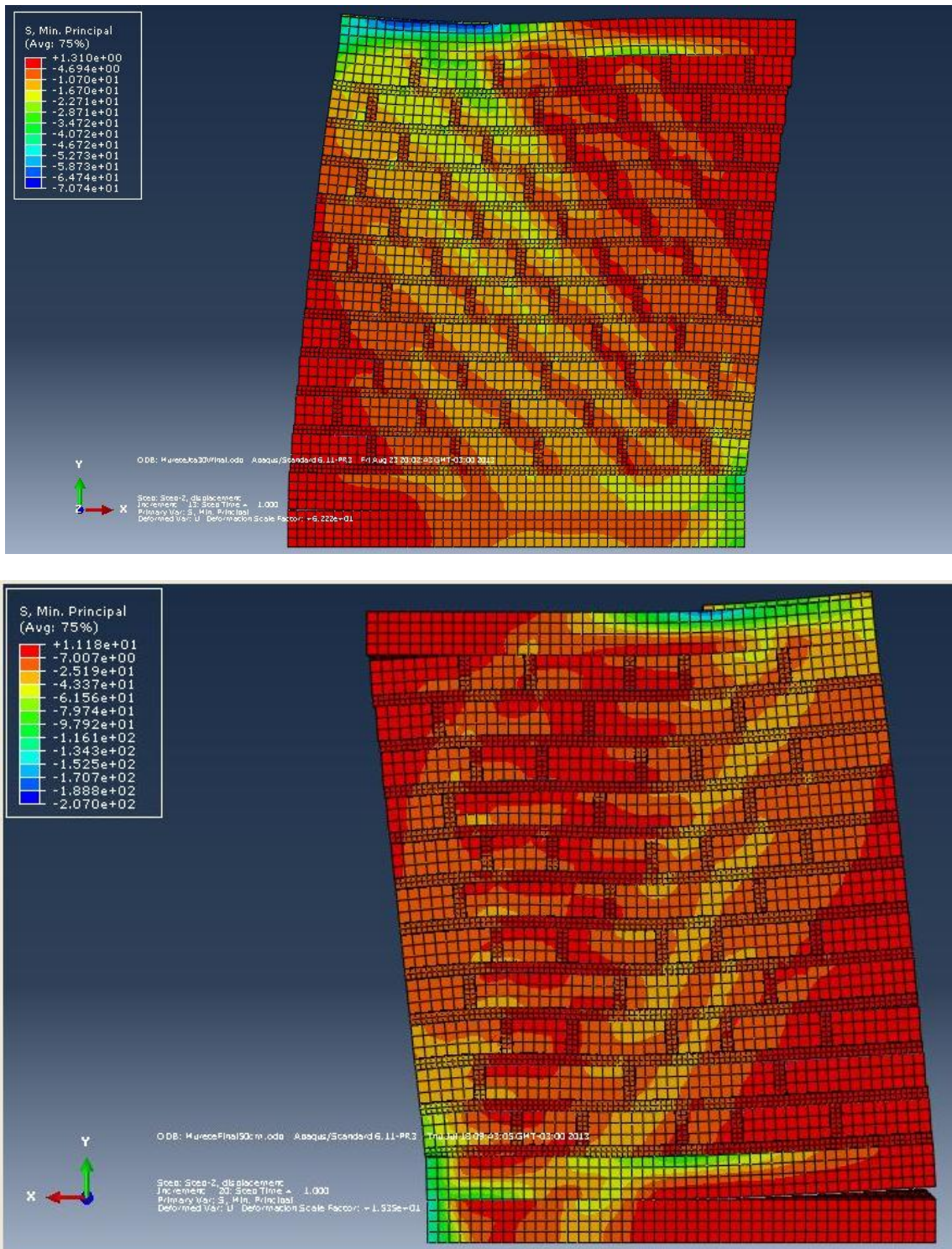


Figura 16: a) Superior: Tensiones Murete de 45cm b) Inferior: Tensiones Murete de 30 cm

La Figura 16 a y b muestran los resultados considerando las características mecánicas de materiales ensayados de manera local y, obteniéndose valores, para el murete de 45cm de espesor, cercanos a los 6.16 MPa, con un promedio de medición en la zona de la biela central de 4.5 MPa, esto es para una precompresión de 2 MPa y una carga lateral de 5.5 MPa. Para el murete de 30cm de espesor se obtuvieron valores de tensiones cercanos a los 2.92 MPa, con un promedio en la biela central de 2.31 MPa, para una precompresión de 2 MPa y una carga

lateral de 5.8 MPa.

Al respecto de las tensiones P para sus valores máximos principales, se obtiene para el murete de 45 cm máximos cercanos a los $3.70e^{-4}$ MPa de tensión máxima y valores promedios de $2.18e^{-4}$ MPa; mientras que para el murete de 30 cm se obtienen valores cercanos a los $2.20e^{-4}$ MPa de tensión máxima y valores promedios de $1.08e^{-4}$ MPa

Al calcular el desplazamiento máximo determinado, se obtienen valores cercanos a los 6.87mm en el tope del muro (sin considerar el desplazamiento a nivel máximo del cabezal, que ronda los 7.72mm) para el murete de 45 cm, mientras que se obtienen 1.74mm de desplazamiento superior (al tope del muro) y 1.90mm al tope del cabezal. (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

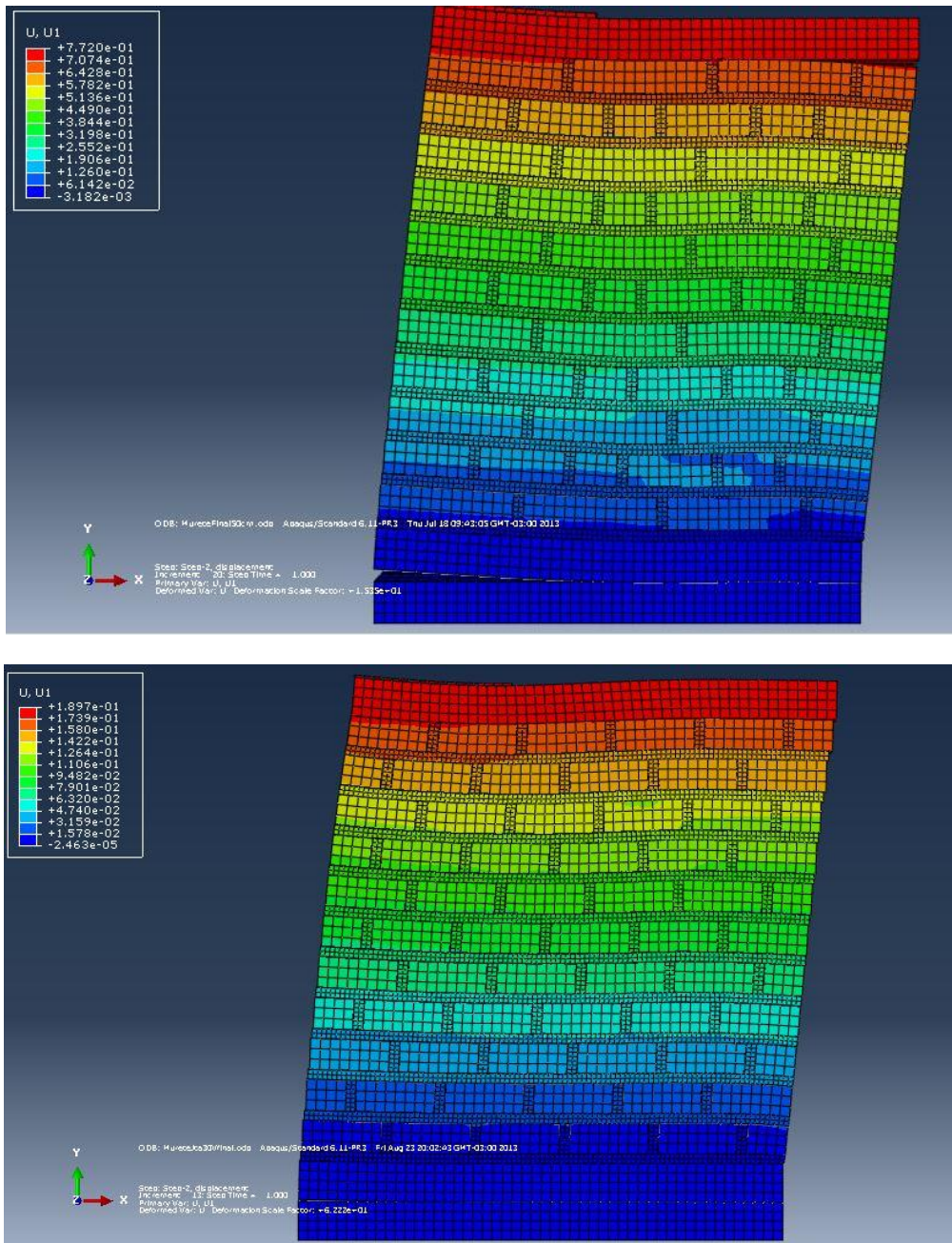


Figura 17: a) Sup: Desplazamientos murete de 45cm de espesor b) Inf: murete de 30cm de espesor

La tabla posterior muestra los valores comparables en cuanto a desplazamientos obtenidos en el modelo numérico y análisis experimental.

VALORES DE ENSAYOS Y MODELO NUMERICO								
Escalón de carga	Carga vertical [tn]	Carga Horizontal		Carga V (%)	C.Vert. Kg/cm2	C.Horiz. Kg/cm2	Despl. Real (X-X)	Despl. Abaq (X-X)
		[tn]	[bar]					
0	0,0	0,0	0		0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,3	1,5	20	8%	1,61	4,21	0,00	0,00
2	4,5	3,0	40	15%	3,21	8,43	0,29	0,32
3	6,8	4,5	55	23%	4,82	12,64	0,46	0,51
4	9,0	6,0	72	31%	6,42	16,85	0,78	0,69
5	11,3	7,5	90	38%	8,03	21,07	1,16	1,03
6	13,5	9,0	107	46%	9,63	25,28	1,46	1,93
7	15,8	10,5	125	54%	11,24	29,49	1,97	2,60
8	18,0	12,0	140	62%	12,84	33,71	2,24	3,36
9	20,3	13,5	160	69%	14,45	37,92	2,98	3,92
10	22,5	15,0	175	77%	16,05	42,13	3,41	4,49
11	24,8	16,5	190	85%	17,66	46,35	3,69	4,26
12	27,0	18,0	210	92%	19,26	50,56	5,52	6,37
13	29,3	19,5	225	100%	20,87	54,78	6,14	6,85

Escalón de carga	Carga vertical [tn]	Carga Horizontal		Carga V (%)	C.Vert. Kg/cm2	C.Horiz. Kg/cm2	Despl. Real (X-X)	Despl. Abaq (X-X)
		[tn]	[bar]					
0	0,0	0,0	0		0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,2	1,4	19	14%	1,55	4,05	0,02	0,02
2	4,3	2,9	38	28%	3,08	8,09	0,04	0,03
3	6,5	4,3	53	43%	4,63	12,14	0,16	0,20
4	8,7	5,8	69	57%	6,17	16,21	0,46	0,47
5	10,8	7,2	87	71%	7,69	20,26	0,72	0,88
6	12,9	8,7	103	85%	9,23	24,31	0,91	1,42
7	15,2	10,1	120	100%	10,84	28,35	1,37	1,74

Tabla 5: Comparación desplazamientos a) Sup. Muro de 46cm b) Inf. Muro de 26 cm.

Para el elemento central del murete se pueden obtener la curva tensión deformación, con objeto de poder comparar esta luego con los ensayos realizados.

Se puede ver en la Figura 18 , para el elemento central del murete de 45cm, que la relación entre fuerzas aplicadas y desplazamientos horizontales es prácticamente lineal.

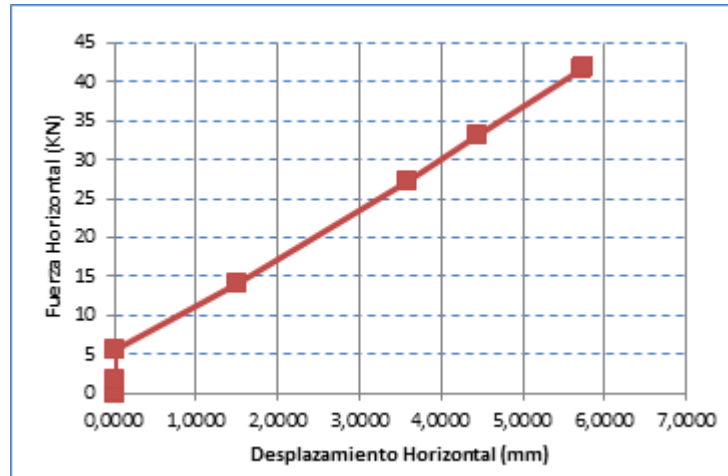


Figura 18: Fuerza vs Desplazamiento

En la Figura 19 se presentan para el mismo elemento central, la relación tensión deformación.

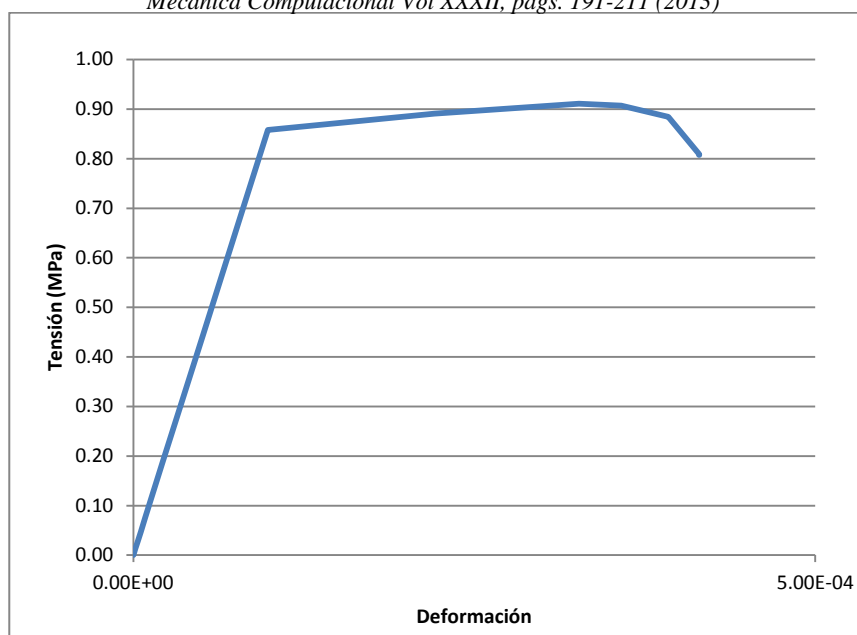


Figura 19: Tensión vs. Deformación

Se ve en la Figura 19 la diferencia importante en el comportamiento de los materiales, situación ésta que genera variaciones en la rigidez y capacidad de los elementos cuando se desarrollan comportamientos no lineales.

Se puede observar en la Figura 20 que las estimaciones de los desplazamientos del modelo han sido bastante aproximadas, dando errores muy bajos para las cargas establecidas. El desplazamiento último medido es un poco mayor, siendo lógica esta situación por cuanto en el ensayo se tuvieron que sacar los instrumentos de medición previo a la rotura del modelo por la existencia de la posibilidad de que éstos pudieran resultar rotos.

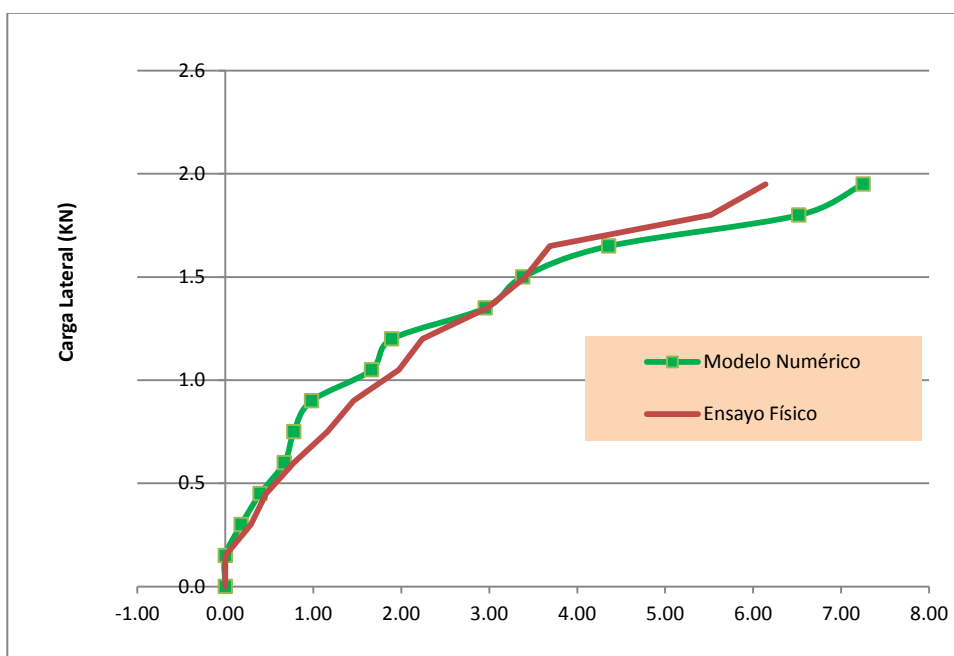


Figura 20: Fuerza-Desplazamiento Horizontal Cabezal (Murete MMB-05)

Se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que las estimaciones de los desplazamientos del modelo han sido bastante aproximadas, dando

errores muy bajos para las cargas establecidas. El desplazamiento último medido es un poco mayor, siendo lógica esta situación por cuanto en el ensayo se tuvieron que sacar los instrumentos de medición previo a la rotura del modelo por la existencia de la posibilidad de que éstos pudieran resultar rotos.

6 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 velocidades de convergencia bastante lentas, tardando incluso en alguno de los casos más de 7 días de iteración continua para llegar a un resultado, esto debido básicamente al nivel de discretización de los elementos componentes, asociado a la asociación adicional de la inclusión de los elementos de interacción que al considerar los deslizamientos entre superficies vinculadas, genera nuevas indeterminaciones que deben ser resueltas por el programa.

Una convergencia más rápida del modelo puede estar asociada sobre todo a curvas de comportamiento no lineal con mayor ductilidad y la no utilización de modelos de interacción, aun cuando estos dan resultados muy representativos del comportamiento global de la estructura.

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, estando más o menos inclinada en función del espesor del muro ensayado. De esta manera los muretes de ancho mayor a 46cm, presentaron en algún caso una doble biela que se puede representar con inclinaciones mayores a los 45° (cercanos a los 70°) y que representan el modelo de falla global del muro más ancho. En el murete de 26cm el modo de falla global es estándar con una biela en compresión con una inclinación de 45°. 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.

La junta vertical en ambos casos genera un comportamiento global más rígido con su consideración, en comparación con el caso de no tenerlas en cuenta. La forma del modelo de deformaciones varía fuertemente con la consideración de esta, estableciendo desde luego patrones de rotura diferentes (dado que se genera una zona de falla implícita en la falta de esta) que modifica fuertemente el comportamiento global del elemento. Es importante la consideración de la junta vertical para establecer claramente el mecanismo de falla del murete, que permite considerar a nivel local tipologías diferentes de fallas.

Si bien la exigencia computacional para el análisis de estos fenómenos locales es muy importante, es de considerable importancia representar de forma fehaciente el fenómeno local implícito en los modos de falla. Esta representación permite a futuro diagramar estrategias de reparación de muros anchos (de espesores mayores a 30cm) más precisas y localizadas de forma adecuada.

7 REFERENCIAS

- CIRSOC 501. Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Julio. (2007).
- Luccioni B, Martín PE. Modelo elastoplástico para materiales ortótropos. *Rev Int Mét Num Dis Cálculo Ing*;13(4): 603–14.(1997)
- Luccioni, B. Rougier.V. In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials. *Construction and Building Materials*. 25 pp.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)
- El-Dakhakhni, W.W.; Hamid, A.A.; Hakam, Z.H.R.; Elgaaly, M. Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. *Composite Structures* 73 pp.458–477. (2006).
- Zucchini, A.; Lourenço, P.B. A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls. *International Journal of Solids and Structures* 46 pp.871–886. (2009).
- Lourenço, P.B., Computations of historical masonry constructions. *Progress in Structural Engineering and Materials* 4, pp.301–319. (2002).
- 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).
- Page, A. W. "The biaxial compressive strength of brick masonry." *Proc. Intsn. Civ. Engrs*. Vol.Part 2(71): pp.893-906. (1981).
- 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., "Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales", *Revista Engenharia Civil* N°11, 21-34. (2001).
- INPRES-CIRSOC 103, Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes. INPRES, Argentina. (1992).
- Simulia. *Abaqus Analysis User's Manual*, 6.11. Dassault Systèmes Simulia Corp, (2011).
- Torrisi G, *Análisis y Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Mampostería*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Cuyo. (2012).

8 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Proyecto PICTO RS 255 de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, Agencia Nacional para la Promoción Científica y Tecnológica FONCYT y Gobierno de Mendoza. Los autores desean agradecer al personal técnico de la UTN: Alfredo Cueto, Claudio Dagne, Sergio Acosta, que han colaborado en el desarrollo del trabajo.