

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

MACROMODELACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYOS DE
PILAS Y MURETES DE
ALBAÑILERÍA DE ARCILLA

Tesis para optar el título de Ingeniera Civil, que presenta el bachiller:

María Claudia Ruiz Salinas

Asesor: PhD. Sabino Nicola Tarque Ruíz

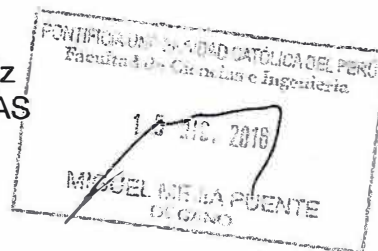
Lima, abril de 2017

RESUMEN

En la presente investigación se presenta el desarrollo de macromodelos numéricos de pilas y de muretes de albañilería de arcilla con la aplicación del Método de Elementos Finitos en el programa de computadora Abaqus. El objetivo de este trabajo es calibrar las propiedades plásticas de la albañilería ensayada en laboratorio para así, caracterizar su comportamiento estructural a compresión y tracción. Con este objetivo, cuatro pilas y cuatro muretes se ensayaron a compresión uniaxial y compresión diagonal, respectivamente. De dichos ensayos se obtuvieron la resistencia máxima a compresión y tracción, módulo de elasticidad, módulo de corte, y las curvas carga-deformación del material, principalmente, en la etapa elástica de su comportamiento. La metodología comprendió revisión bibliográfica, participación en ensayos de laboratorio, evaluación de resultados de ensayos y, a partir de este análisis de resultados, la calibración de las propiedades mecánicas inelásticas. A futuro, se espera que las propiedades que se calibren del material se puedan emplear para el diseño y modelamiento de estructuras más complejas hechas de albañilería de arcilla; lo cual se considera de importancia debido a la significativa presencia de este material en el país y la necesidad de estimar su respuesta estructural más allá del rango elástico por encontrarse el Perú en una zona sísmica.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Macromodelación numérica de ensayos en pilas y muretes de albañilería de arcilla
Área : Estructuras #
Asesor : PhD. Sabino Nicola Tarque Ruíz
Alumno : MARÍA CLAUDIA RUIZ SALINAS
Código : 2011.4410.412
Tema N° : # 419
Fecha : Lima, 12 de diciembre de 2016



1. RESUMEN

En la presente investigación se desarrollan macro-modelos numéricos de pilas y de muretes de albañilería de arcilla con la aplicación del Método de Elementos Finitos en el programa Abaqus. El objetivo es calibrar las propiedades plásticas de la albañilería ensayada en laboratorio para caracterizar su comportamiento estructural a compresión y tracción. La metodología comprendió revisión bibliográfica, participación en ensayos, evaluación de resultados de ensayo y la calibración de las propiedades mecánicas inelásticas. A futuro, se espera que las propiedades que se calibren del material se puedan emplear para el diseño y modelamiento de estructuras más complejas a base de albañilería de arcilla. Esto se considera de importancia debido a la presencia de este material en el país y la necesidad de estimar su respuesta estructural durante un sismo.

2. JUSTIFICACIÓN

Al presente, la albañilería es un material predominante en el país; según las estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (2014), el 51.7% de las viviendas en el país están construidas con ladrillos o bloques de cemento. A pesar de su importancia, la información que se tiene del material y su comportamiento ante solicitaciones, en particular en el rango inelástico, es aún escasa. El registro inelástico se ha visto limitado por la capacidad de desplazamiento que poseen los instrumentos de medición de deformaciones. Los programas de computadoras y los modelos numéricos surgieron debido a esta necesidad de información, pero a nivel nacional no existe un número representativo de estudios que puedan promediar el comportamiento estructural de la albañilería mediante el Método de Elementos Finitos. Por lo tanto, para contribuir con el conocimiento existente sobre la albañilería es necesario realizar estudios paramétricos que permitan reproducir el comportamiento de pilas y muretes, de manera que se calibren propiedades inelásticas y, a futuro, puedan servir como base para el desarrollo de modelos numéricos de muros o casas de albañilería confinada, modelos que se emplearían para el diseño de estructuras completas.

3. OBJETIVOS Y ALCANCES

Objetivo general:

El objetivo general de esta investigación es contribuir al conocimiento sobre la macro-modelación numérica de la albañilería arcilla a partir del análisis de ensayos de laboratorio en pilas y muretes.

Objetivos específicos:

- Construir cuatro pilas y cuatro muretes de albañilería
- Ensayar las pilas a compresión axial
- Ensayar a los muretes a compresión diagonal
- Estudiar las propiedades mecánicas de la albañilería de arcilla
- Evaluar la respuesta experimental de las pilas y los muretes
- Modelar numéricamente las pilas y los muretes en el programa Abaqus
- Calibrar los resultados de los modelos numéricos con los del ensayo

Alcance:

Se realizó la construcción de pilas y muretes de albañilería que fueron ensayados en el laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP. A partir de los ensayos, se obtuvo data de deformación-cargas

que permitieron obtener propiedades mecánicas elásticas del material y curvas de su respuesta estructural frente a cargas de compresión axial y compresión diagonal, respectivamente, en el rango elástico. Empleando los resultados de ensayos como base, se buscará calibrar las propiedades plásticas de la albañilería, mediante el uso de leyes constitutivas teóricas, el programa de computadora Abaqus y el Método de Elementos Finitos.

4. MARCO TEÓRICO e HIPÓTESIS

Los estudios en albañilería se iniciaron con ensayos de compresión axial para determinar las propiedades mecánicas de este, tales como el módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión medio. En 1997, Bennett realizó ensayos en unidades de ladrillos huecos de arcilla y elementos de albañilería, con lo cual determinaron una relación lineal entre la resistencia a compresión de los ladrillos y la albañilería (Kaushik, Rain y Jain, 2007).

En 2007, en la India, Kaushik, obtuvo una ecuación sencilla para relacionar la resistencia de la albañilería y la de sus componentes (ladrillos y mortero). De la data experimental, se obtuvo relaciones entre esfuerzos de compresión y módulo de elasticidad. Sin embargo, aún el conocimiento de este material en el rango plástico era escaso. Es así, que surgieron investigaciones que desarrollaron un modelo numérico en computadoras. En 2005, Blondet realizó un ensayo cíclico con control de desplazamiento de un muro típico de albañilería para analizar la respuesta cíclica del elemento y el patrón de daño final. En 2014, Tarque, Camata, Spacone, Varum y Blondet, representaron con modelos numéricos el ensayo descrito. Para ello, emplearon un macromodelo y como resultado se observó que las fallas del material se iniciaron en las esquinas de la ventana central y se propagaron diagonalmente. Bolhassani, Hamid, Lau y Moona en 2015, modelaron numéricamente en Abaqus un micromodelo de distintas configuraciones de albañilería de concreto hueca e inyectada con mortero ante la aplicación de cargas de compresión axial, cizalla y compresión diagonal. En síntesis, los métodos numéricos permiten estimar la respuesta estructural de la albañilería en el rango plástico.

Las numerosas investigaciones con ensayos experimentales que obtienen las propiedades mecánicas elásticas se seguirán como base para los ensayos a realizar. Los aportes de la literatura respecto a modelos numéricos servirán de guía para realizar los modelos numéricos de las pilas y muretes.

Hipótesis: Es posible representar el comportamiento estructural de pilas y muretes de albañilería de arcilla en el rango inelástico a través de modelos de elementos finitos.

5. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO (Máximo 300 palabras)

En líneas generales, el plan de trabajo que se seguirá para cumplir con los objetivos propuestos será el siguiente:

- Construcción de pilas y muretes
- Ensayos en pilas y muretes
- Desarrollo del estado del arte
- Evaluación de resultados de ensayo
- Estudio del método de elementos finitos
- Modelación de los ensayos en pilas y muretes
- Análisis de resultados

Para ello, se seguirá la siguiente metodología:

El desarrollo de este proyecto comprenderá la participación en ensayos de laboratorio, la realización de investigación teórica, y el uso de programas de computadora. La participación en ensayos de laboratorio se realizará en el inicio del proyecto. Dichos ensayos serán desarrollados por alumnos de maestría de la PUCP con apoyo de la tesista de la presente tesis. La investigación teórica implica la revisión de la literatura relacionada con el tema de tesis, desarrollo de modelos numéricos en el programa SAP2000 y Abaqus y el procesamiento necesario de la data de laboratorio. Estas tareas se encuentran planificadas de acuerdo a la metodología que se describe a continuación:

a) Apoyo en la construcción de pilas y muretes

Se apoyará a la construcción de cuatro pilas y cuatro muretes de albañilería, proyecto a cargo de alumnos de maestría de la PUCP.

b) Investigación bibliográfica

Se estudiará en primer lugar, la teoría sobre los modelos numéricos y el Método de Elementos Finitos. Además, se recopilará información sobre investigaciones realizadas en albañilería. Se revisará de este modo, artículos científicos y tesis de ensayos de laboratorio realizados en albañilería de adobe y arcilla, modelos numéricos teóricos y modelos numéricos desarrollados en programas de computadora.

c) Realización de ensayos de laboratorio

A la par con la revisión bibliográfica, se construirán cuatro pilas y cuatro muretes. Luego, estos serán ensayados a compresión axial y compresión diagonal, respectivamente. Los ensayos se realizarán en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP. Se presenciará el comportamiento del material en las pruebas, los tipos de falla producidos, y se apoyará en las actividades necesarias para concluir con éxito los ensayos. Asimismo, se participará en los ensayos en muros de albañilería confinada solicitados con carga lateral, el cual estuvo a cargo de una tesista de pregrado de la PUCP. Ello con el fin de observar el comportamiento de muros que se construyeron con los ladrillos y mezcla de mortero que se empleó en las pilas y muretes.

d) Análisis de resultados de ensayos

De los ensayos descritos previamente, se obtendrán la data de cargas y deformaciones aplicadas en las pilas y muretes. Se analizará dicha data, lo cual significa el cálculo de las propiedades mecánicas del material y obtención de las curvas de esfuerzo-deformación de cada experiencia. Además, se examinará que los resultados se encuentren en los rangos típicos de valores de propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, módulo de corte, resistencia a compresión axial, resistencia a compresión diagonal) y de esfuerzos límites (esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura).

e) Elección del programa de modelación numérica

Se estudiarán las características y propiedades de distintos programas con capacidad de modelación de elementos finitos. Con este fin, se revisará previamente los comentarios realizados por autores de artículos de modelación numérica respecto a los programas que emplearon en sus investigaciones sobre la albañilería. Finalmente, se seleccionará el programa pertinente para esta investigación.

f) Modelación numérica de pilas

Se elaborarán diversos modelos de las pilas de albañilería para determinar las características más apropiadas que estos deben tener finalmente. De este modo, por comparación de resultados obtenidos en cada modelo, se determinará las condiciones de frontera adecuadas, el mallado a emplearse, y la forma de aplicación de la carga en el modelo.

g) Modelación numérica de muretes

Del mismo modo que en el caso de las pilas, se elaborarán modelos hasta determinar las características más apropiadas para representar el ensayo en los muretes de albañilería. Con las diversas pruebas, se determinará las condiciones de frontera adecuadas, el mallado a emplearse, y la forma de aplicación de la carga en el modelo.

h) Interpretación de resultados

Se realizarán los cálculos necesarios para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería. Luego, se interpretarán las gráficas de esfuerzo-deformación realizadas a partir del programa Abaqus y las deformadas. Asimismo, se comparará los resultados que otorgue el programa para cada modelo final con y el patrón de daños observado en los ensayos de laboratorio.

i) Conclusiones

Se redactarán las conclusiones resultantes de la calibración de las propiedades mecánicas y la comparación del modelo numérico con el ensayo real. En este punto, se incluyó solo la información relevante de la investigación y aquella que respondía las hipótesis planteadas y objetivos propuestos.

6. CRONOGRAMA Y PRESUPUESTO

El único costo asociado al proyecto es el de una Laptop Toshiba Core i7, con las capacidades necesarias para operar el programa Abaqus y SAP2000. El costo del equipo fue de 5000 nuevos soles que fueron cubiertos por la alumna.



| Entregable | Recurso | Fecha de entrega |
|--|------------------|---|
| Entrega del Capítulo 1 | 25 de marzo | Libros, papers, revistas científicas, etc. |
| Asistencia al ensayo de pilas de albañilería | 7 de abril | Cámara fotográfica |
| Asistencia al ensayo de muretes de albañilería | 9 de abril | Cámara fotográfica |
| Primer modelo numérico de pila de albañilería | 2 de mayo | Laptop |
| Primer modelo numérico de murete de albañilería | 23 de mayo | Laptop |
| Asistencia a los ensayos de muros de albañilería | 20 de mayo | Cámara fotográfica, cinta métrica, plumones |
| Entrega del Capítulo 2 | 30 de abril | Libros, papers, revistas científicas, etc. |
| Entrega del Capítulo 3 | 30 de mayo | Laptop |
| Entrega del reporte de modelo final de pilas en rango elástico en Abaqus | 1 de agosto | Laptop |
| Entrega del reporte de modelo final de muretes en rango elástico en Abaqus | 2 de septiembre | Laptop |
| Entrega de primera versión del Capítulo 4 (parte 1: solo pilas) | 12 de septiembre | Laptop |
| Entrega de primera versión del Capítulo 4 (parte 2: muretes) | 22 de septiembre | Laptop |
| Primer producto entregable, CAPÍTULOS 1,2 Y 3 * | 22 de septiembre | Laptop |
| Reporte del análisis de resultados del modelo numérico de pilas (Capítulo 4 parte 1) | 17 de octubre | Laptop |
| Reporte del análisis de resultados del modelo numérico de muretes (Capítulo 4 parte 2) | 24 de octubre | Laptop |
| Versión uno de conclusiones (Capítulo 5) | 30 de noviembre | Laptop |
| Producto final | 3 de noviembre | Laptop |
| Mejora de la tesis | 15 de noviembre | Laptop |
| Trabajo final, CAPÍTULOS 1,2,3,4 y 5 * | 24 de noviembre | Laptop |

- Se anexa el índice de la tesis

7. REFERENCIAS

- Kaushik, H., Rai, D., & Jain, S. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(9), 728-739.
- Blondet, M. et al., 2005. Using industrial materials for the construction of safe adobe houses in seismic areas. In *Proceedings of Earth Build 2005 Conference*. Sydney, Australia.
- Bolhassani, M., Hamid, A., Lau, A., & Moon, F. (2015). Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*, 83, 159-173.
- Tarque, N., Camata, G., Spacone, E., Varum, H., & Blondet, M. (2014). Nonlinear Dynamic Analysis of a Full-Scale Unreinforced Adobe Model. *Earthquake Spectra*, 30(4), 1643-1661.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor de tesis por el conocimiento transmitido y su dedicación en el desarrollo de esta tesis, al personal del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú por el apoyo que brindaron durante los ensayos realizados para esta investigación, a mi madre por su ejemplo que inspira a cada día ser mejor y su constante apoyo emocional, y a Civilízate, grupo de estudiantes, amigos, de Ingeniería Civil de la PUCP, pues promovieron en mí el pensamiento crítico y aprecio por la investigación.



ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | i |
| AGRADECIMIENTOS | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | vii |
| NOMENCLATURA | xvi |
| 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 1 |
| 1.2 Justificación del problema | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.4 Hipótesis | 3 |
| 1.5 Estructura de la tesis | 3 |
| 1.6 Plan de trabajo y metodología..... | 4 |
| 2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE | 7 |
| 2.1 La albañilería de arcilla..... | 7 |
| 2.1.1 Ladrillo..... | 7 |
| 2.1.2 Mortero | 8 |
| 2.1.3 Propiedades de la albañilería de arcilla como material compuesto..... | 8 |
| 2.2 Modelación numérica | 12 |
| 2.3 Modelos numéricos para albañilería | 13 |
| 2.3.1 Macromodelo | 14 |
| 2.3.2 Micromodelo..... | 14 |
| 2.3.3 <i>Softening behavior</i> | 15 |
| 2.4 Estudios experimentales | 16 |
| 2.5 Estudios experimentales con modelo numérico..... | 21 |
| 2.6 Características básicas del programa Abaqus | 27 |
| 3. CAPÍTULO III: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL..... | 28 |
| 3.1 Pilas de albañilería | 28 |
| 3.1.1 Construcción de las pilas | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.2 | Descripción del ensayo | 29 |
| 3.1.3 | Resultados de ensayo | 31 |
| 3.2 | Muretes de albañilería..... | 36 |
| 3.2.1 | Construcción de los muretes | 36 |
| 3.2.2 | Descripción del ensayo | 37 |
| 3.2.3 | Resultados de ensayo | 39 |
| 4. | CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO NUMÉRICO..... | 43 |
| 4.1 | Leyes constitutivas..... | 43 |
| 4.1.1 | Modelo para compresión..... | 43 |
| 4.1.2 | Modelo para tensión..... | 44 |
| 4.2 | Modelo de Pila..... | 45 |
| 4.2.1 | Características del modelo | 45 |
| 4.2.2 | Análisis preliminar: lineal elástico..... | 46 |
| 4.2.3 | Calibración de modelos con comportamiento no lineal..... | 49 |
| a) | Modelo 1: PILA.20.R.100 | 49 |
| b) | Modelo 2: PILA.20.R.102 | 52 |
| c) | Modelo 3: PILA.20.R.103 | 53 |
| 4.3 | Modelo de murete | 58 |
| 4.3.1 | Características del modelo | 58 |
| 4.3.2 | Análisis preliminar: lineal elástico..... | 58 |
| 4.3.3 | Calibración de modelos con comportamiento no lineal..... | 64 |
| b) | Modelo B: MURETE.10.E.102 | 67 |
| c) | Modelo C: MURETE.10.E.103 | 68 |
| d) | Modelo D: MURETE.10.E.104 | 70 |
| e) | Modelo E: MURETE.10.E.106..... | 71 |
| 5. | CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 73 |
| 5.1 | Análisis con la Norma E.070 y ASTM E519-02 (2003)..... | 73 |
| 5.2 | Resultados de ensayo y literatura..... | 74 |
| 5.2.1 | Pilas..... | 74 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.2 | Muretes | 75 |
| 5.3 | Modelos numéricos..... | 75 |
| 5.3.1 | Pilas..... | 75 |
| 5.3.2 | Muretes | 78 |
| 6. | CAPÍTULO VI: RESUMEN Y CONCLUSIONES | 80 |
| | REFERENCIAS..... | 84 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Albañilería de arcilla | 7 |
| Figura 2.2. Unidad de ladrillo alveolar | 8 |
| Figura 2.3. Mortero a base de cal (Godwa, 2014)..... | 8 |
| Figura 2.4. Modos de falla de unidades de albañilería sólida en estado de carga biaxial (Dhanasekar et al., 1985, citado en Lourenço, 1996) | 9 |
| Figura 2.5. Compresión uniaxial de un prisma de albañilería | 9 |
| Figura 2.6. Curva típica de esfuerzo-desplazamiento para prismas de 500x250x600 mm ³ de ladrillo suave de barro (Binda et al., 1998, citado en Lourenço, 1996)..... | 10 |
| Figura 2.7. Compresión diagonal de un murete de albañilería | 11 |
| Figura 2.8. Fallas típicas en un estado de compresión diagonal en muretes de albañilería .. | 11 |
| Figura 2.9. Curva típica de esfuerzo-deformación para tracción en la dirección paralela a la junta de asiento (Backes, 1985, citado en Lourenço, 1996) | 12 |
| Figura 2.10. Discretización de una viga analizada como un elemento bidimensional | 13 |
| Figura 2.11. (a) Espécimen de albañilería, (b) micro-modelo, (c) macro-modelo (Lourenço, 2004)..... | 14 |
| Figura 2.12. a) Micro-modelo detallado b) Micro-modelo simplificado (Lourenço, 1996) . | 15 |
| Figura 2.13. Respuesta de materiales quasi-frágiles ante cargas axiales y definición de energía de fractura: a) Tracción b) Compresión (Lourenço, 1996) | 16 |
| Figura 2.14. Respuesta de la albañilería bajo corte y definición de energía de fractura modo II (Lourenço, 1996)..... | 16 |
| Figura 2.15. (a) Pila, (b) estado triaxial de esfuerzos en la interface ladrillo/mortero de una pila, (c) unidad de ladrillo, y (d) cubo de mortero (Kaushik et al., 2007) | 17 |
| Figura 2.16. Patrón de falla de un prisma con esbeltez igual a 3 (Ganapathi et al., 2011) ... | 20 |
| Figura 2.17. Ensayos cíclicos realizados por Blondet en 2005 (Tarque et al., 2014)..... | 21 |
| Figura 2.18. Configuración de la unidad de albañilería (Bolhassani et al., 2015)..... | 22 |
| Figura 2.19. Malla y condiciones de borde de los modelos (Bolhassani et al., 2015)..... | 23 |
| Figura 2.20. Esquemas de los ensayos a compresión axial y diagonal (Miccoli et al., 2015)..... | 25 |
| Figura 2.21. Patrones de falla obtenidos en el modelo numérico y en el ensayo de muros (Miccoli et al., 2015)..... | 26 |
| Figura 2.22. Mallas y materiales asignados para los modelos de compresión axial y diagonal (Miccoli et al., 2015)..... | 26 |
| Figura 2.23. Patrón de falla en el modelo (izquierda) y en el ensayo (derecha) de muretes (Miccoli et al., 2015)..... | 27 |
| Figura 2.24. Sistemas de referencia | 27 |
| Figura 2.25. Elemento shell | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.26. Representación de los elementos finitos del modelo y sus nodos | 27 |
| Figura 3.1. Unidad de albañilería de 18 huecos, vista en planta..... | 28 |
| Figura 3.2. (a) Mezcla de mortero, (b) nivelado de ladrillos con plomada..... | 28 |
| Figura 3.3. (a) Control de espesor de junta, (b) ladrillos asentados..... | 29 |
| Figura 3.4. (a) Refrentado sobre superficie de pilas, (b) pilas terminadas..... | 29 |
| Figura 3.5. Dimensiones nominales de las pilas ensayadas..... | 29 |
| Figura 3.6. a) Instrumentación de la pila PL-01, b) pila PL-01 antes del ensayo de compresión uniaxial..... | 30 |
| Figura 3.7. Falla en pila PL-01 vista desde las cuatro caras de la misma..... | 30 |
| Figura 3.8. Falla en pila PL-02 vista desde las cuatro caras de la misma..... | 31 |
| Figura 3.9. Falla en pila PL-03 vista desde las cuatro caras de la misma..... | 31 |
| Figura 3.10. Falla en pila PL-04 vista desde las cuatro caras de la misma..... | 31 |
| Figura 3.11. Gráfica global de esfuerzo-deformación unitaria de todas las pilas | 35 |
| Figura 3.12. Gráficas locales esfuerzo de compresión-deformación unitaria a partir de LVDT 1 Y LVDT 2..... | 35 |
| Figura 3.13. Gráfica local carga de compresión-desplazamiento, LVDT 1..... | 36 |
| Figura 3.14. (a) Mezcla de mortero preparada, (b) hileras de ladrillos asentadas, (c) murete terminado e instrumentado..... | 36 |
| Figura 3.15. Esquema de los muretes ensayados..... | 37 |
| Figura 3.16 Instrumentación del murete MT4 | 37 |
| Figura 3. 17. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 1 | 38 |
| Figura 3.18. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 2..... | 38 |
| Figura 3.19. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 3..... | 38 |
| Figura 3.20. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 4..... | 38 |
| Figura 3.21. Esquema para el cálculo de módulo de corte y resistencia al corte en muretes 39 | |
| Figura 3.22. Gráficas a) esfuerzo de tracción-deformación unitaria b) carga-deformación, HORIZONTAL..... | 42 |
| Figura 3.23. Gráficas a) esfuerzo de compresión-deformación unitaria b) carga-deformación, VERTICAL..... | 42 |
| Figura 4.1. Modelos de la pila y murete empleado para el análisis numérico | 43 |
| Figura 4.2. <i>Hardening/softening law for compression</i> (Lourenço, 1996) | 44 |
| Figura 4.3. Comportamiento de materiales frágiles bajo cargas de tensión y definición de energía de fractura (Lourenço, 1996)..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4. a) Modelo de pila en Abaqus b) estados de esfuerzo de acuerdo con los ejes de Abaqus | 46 |
| Figura 4.5. Deformaciones axiales para los distintos modelos elásticos de la pila..... | 47 |
| Figura 4.6. Esfuerzos verticales en el eje axial para los distintos modelos elásticos de la pila | 48 |
| Figura 4.7. a) Comportamiento a compresión b) Comportamiento a tracción, ambos para el modelo 1 | 50 |
| Figura 4.8. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 1 b) nodos elegidos para el análisis | 50 |
| Figura 4.9. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 1 | 51 |
| Figura 4.10. Comportamiento a tracción elasto-plástico lineal | 52 |
| Figura 4.11. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 2 b) nodos elegidos para el análisis | 52 |
| Figura 4.12. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 2 | 53 |
| Figura 4.13. Comportamiento a tracción, zona plástica..... | 54 |
| Figura 4.15. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 3 | 54 |
| Figura 4.14. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 2 b) nodos elegidos para el análisis | 54 |
| Figura 4.16. Curvas teóricas empleadas para modelar la pila..... | 55 |
| Figura 4.17. Modelo de murete con base empotrada y malla de 10x10 mm | 58 |
| Figura 4.18. Esfuerzos S22 en el modelo elástico del murete | 60 |
| Figura 4.19. Esfuerzos S11 en el modelo elástico del murete | 61 |
| Figura 4.20. Deformaciones U22 en el modelo elástico del murete | 62 |
| Figura 4.21. Deformaciones U11 en el modelo elástico del murete | 63 |
| Figura 4.22. a) Comportamiento a compresión b) Comportamiento a tracción..... | 65 |
| Figura 4.23. Resultados para el modelo A..... | 65 |
| Figura 4.24. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo A..... | 66 |
| Figura 4.25. Nodos seleccionados para el análisis de muretes | 66 |
| Figura 4.26. Esquema del modelo B..... | 67 |
| Figura 4.27. Resultados para el modelo B | 67 |
| Figura 4.28. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo B..... | 68 |
| Figura 4.29. Comportamiento a tracción, zona plástica..... | 68 |
| Figura 4.30. Esquema del modelo C..... | 69 |
| Figura 4.31. Resultados para el modelo C | 69 |
| Figura 4.32. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo C..... | 70 |
| Figura 4.33. Resultados para el modelo D..... | 70 |
| Figura 4.34. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo D..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 35. Resultados modelo E..... | 72 |
| Figura 4.36. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo E..... | 72 |
| Figura 5.1 Comparación de resultados finales de los modelos para pilas..... | 76 |
| Figura 5. 2. Esfuerzo en el eje vertical, esfuerzo máximo principal y deformación plástica en el eje horizontal para el modelo PILA20.R.103 | 77 |
| Figura 5. 3. Deformación unitaria plástica en el eje vertical para el modelo PILA20.R.103 | |
| Figura 5.4. Comparación de resultados finales de los modelos para muretes..... | 79 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Resistencias características a compresión de la albañilería de arcilla MPa (kg/cm ²) (adaptado de NTP 339.605) | 10 |
| Tabla 2.2. Resistencias características a compresión diagonal de la albañilería de arcilla MPa (adaptado de NTP 339.605) | 11 |
| Tabla 2.3. Resultados de los estudios a compresión axial en prismas de albañilería de arcilla, (cemento:cal:arena) (adaptado de Kaushik, et al., 2007) | 18 |
| Tabla 2.4. Resultados del ensayo a compresión axial en prismas (adaptado de Ganapathi et al., 2011) | 19 |
| Tabla 2.5. Resultados del ensayo de tres prismas de albañilería (adaptado de Ewing et al., 2004) | 20 |
| Tabla 2.6. Propiedades mecánicas para el macro-modelo (adaptado de Tarque et al., 2014)21 | |
| Tabla 2.7. Resultados de ensayos a compresión axial en prismas (adaptado de Bolhasani et al., 2015) | 22 |
| Tabla 2.8. Resultados del ensayo de compresión diagonal (Bolhasani et al., 2015) | 23 |
| Tabla 2.9. Propiedades mecánicas para el modelo (adaptado de Bolhassani et al., 2015).... | 24 |
| Tabla 2.10. Resultados del modelo numérico (Bolhassani et al., 2015) | 24 |
| Tabla 2.11. Resultados del ensayo de compresión axial en muros de adobe, (adaptado de Miccoli et al., 2015) | 25 |
| Tabla 2.12. Propiedades mecánicas asignadas al macro-modelo (adaptado de Miccoli et al., 2015) | 26 |
| | |
| Tabla 3.1. Dimensiones reales de las pilas | 30 |
| Tabla 3.2. Esfuerzos máximos de compresión axial | 31 |
| Tabla 3.3. Factores de corrección de Fm por esbeltez de acuerdo a la Norma E.070..... | 32 |
| Tabla 3.4. Resistencia a compresión de cada pila y característica promedio | 32 |
| Tabla 3.5. Esfuerzos de compresión y módulo de elasticidad calculados | 33 |
| Tabla 3.6. Dimensiones de los muretes | 37 |
| Tabla 3.7. Resistencia a la compresión diagonal en los muretes | 40 |
| Tabla 3.8. Cargas y desplazamientos verticales al 20 y 50 % de la carga máxima (LVDT vertical) | 40 |
| Tabla 3.9. Cargas y desplazamientos al 20 y 50 % de la carga máxima (LVDT horizontal)40 | |
| Tabla 3.10. Módulos de corte calculados para los muretes | 41 |
| Tabla 3.11. Resumen de propiedades mecánicas para los modelos numéricos | 42 |

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1. Modelos numéricos de la pila con propiedades elásticas..... | 47 |
| Tabla 4.2. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a compresión... | 49 |
| Tabla 4.3. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a tracción..... | 53 |
| Tabla 4.4. Esfuerzos S22 y S11 para distintas curvas de compresión definidas..... | 56 |
| Tabla 4.5. Desplazamientos para distintas curvas de compresión definidas..... | 56 |
| Tabla 4.6. Deformaciones plásticas para distintas curvas de compresión definidas..... | 56 |
| Tabla 4.7. Propiedades mecánicas asignadas a los muretes en Abaqus..... | 58 |
| Tabla 4.8. Modelos numéricos del murete con propiedades elásticas | 59 |
| Tabla 4.9. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a compresión... | 64 |



NOMENCLATURA

| | |
|--------------------|--|
| V_m | Resistencia al corte o fuerza cortante de agrietamiento diagonal, MPa |
| \overline{V}_m | Promedio de las resistencias al corte de los cuatro muretes, MPa |
| G_m | Módulo de corte de la albañilería, MPa |
| ν | Coefficiente de Poisson de la albañilería |
| E_m | Módulo de elasticidad de la albañilería, MPa |
| F_m | Resistencia a compresión, MPa |
| F_m^* | Resistencia a compresión corregida por efectos de esbeltez, MPa |
| $\overline{F_m^*}$ | Resistencia a compresión corregida promedio de los valores de las pilas, MPa |
| F'_m | Resistencia característica a compresión (corregida por efectos de esbeltez y desviación estándar), Mpa |
| $D.E.$ | Desviación estándar de los resultados de laboratorio |
| \overline{V}'_m | Resistencia característica al corte de la albañilería, MPa |
| ε | Deformación unitaria del espécimen ensayado, mm/mm |
| δ | Deformación del espécimen ensayado, mm |
| δ_η | Deformación horizontal del espécimen ensayado, mm |
| δ_σ | Deformación vertical del espécimen ensayado, mm |
| γ | peso específico de la albañilería, N/mm ³ |
| $\tau_{20\%}$ | Esfuerzo de corte al 20 % de la carga máxima de ensayo a compresión diagonal, Mpa |
| $\tau_{50\%}$ | Esfuerzo de corte al 50 % de la carga máxima de ensayo a compresión diagonal, Mpa |
| δ | Deformación del espécimen ensayado, mm |
| δ_η | Deformación horizontal del espécimen ensayado, mm |
| δ_σ | Deformación vertical del espécimen ensayado, mm |
| $P1$ | Carga al 20% de la carga máxima del ensayo de compresión uniaxial en pilas, kN |
| $P2$ | Carga al 50% de la carga máxima del ensayo de compresión uniaxial en pilas, kN |

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se contextualiza el tema de la presente tesis, el problema que abarca, la justificación de su estudio y se detallan los objetivos y plan de trabajo.

1.1 Planteamiento del problema

La albañilería ha sido estudiada a través de ensayos de laboratorio, tales como compresión uniaxial, compresión diagonal, tracción y carga lateral. Con estos ensayos se pueden determinar las propiedades mecánicas elásticas del material, por ejemplo, el módulo de elasticidad, módulo de corte, resistencia a compresión y resistencia a tracción. Posteriormente, se han evaluado cada componente de la albañilería y se han comparado las propiedades mecánicas de cada uno –cubos de mortero y unidades de ladrillo– respecto a las del conjunto. Así es como en 1997, Bennett, Boyd y Flanagan determinaron una relación lineal entre la resistencia a compresión de los ladrillos y la albañilería (Kaushik, Rain & Jain, 2007). En 2005, Sarangapani ensayó pilas de albañilería con unidades de ladrillos “blandos” y determinó que la resistencia a compresión de la pila incrementaba con el aumento de la resistencia ofrecida por la unión entre el ladrillo y el mortero. De este modo, y junto a otras investigaciones, se obtuvo valores referenciales de las propiedades mecánicas mencionadas de la albañilería, se reconoció la influencia que ejercen cada uno de los elementos que lo componen y se verificó el comportamiento anisotrópico de este material.

Sin embargo, la etapa plástica del comportamiento del material no podía ser caracterizada mediante ensayos de laboratorio convencionales debido al límite de desplazamiento que poseen los instrumentos que registran la deformación. Por ello, se desarrollaron modelos numéricos para describir la respuesta estructural del material pasado el límite elástico. Estos modelos se basaron sobre la mecánica de materiales, las formulaciones del análisis estructural y la aplicación de métodos numéricos hasta alcanzar la convergencia de resultados. En un inicio, se desarrollaron de manera teórica, para luego ser analizados con programas de computadora. Por ejemplo, en 1991, Mengi, McNiven y Tanrikulu obtuvieron un modelo para el análisis sísmico no lineal de edificios de albañilería de arcilla sin refuerzo con el empleo del programa FORTRAN 77.

Los avances tecnológicos han perfeccionado los modelos numéricos desarrollados en computadoras. Actualmente, existen programas que permiten visualizar al material en tres dimensiones, la deformada del material después del análisis, las fuerzas y esfuerzos, emplear el Método de Elementos Finitos e incluir criterios de falla en el análisis inelástico. Para el caso

de la albañilería, el análisis se desarrolla con distintos enfoques, tales como el micromodelo, macromodelo o micromodelo simplificado, cada uno con distinto nivel de detalle (Lourenço, 1996).

1.2 Justificación del problema

La albañilería en sus formas tradicionales –de piedra, barro, adobe y arcilla– ha sido creada desde épocas remotas para la construcción de viviendas. De acuerdo con San Bartolomé (1994), la primera unidad de albañilería artificial, hecha de barro secado al Sol, fue localizada en las ruinas de Jericó en el Medio Oriente, 7350 años a.C. En Perú, estos restos poseen una antigüedad de 5000 años y se hallaron en Huaca Pietra. Al presente, la albañilería, debido a su costo comparativamente menor en el mercado frente al concreto y el acero, es un material predominante en el país en viviendas; según las estadísticas del Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (2014), el 51,7% de las viviendas en el Perú están construidas con ladrillos o bloques de cemento.

A pesar de la importancia de la albañilería, la información que se tiene del material y su comportamiento ante sollicitaciones, en particular en el rango inelástico, es aún escasa en comparación con el concreto y el acero. El registro inelástico se ha visto limitado por la capacidad de desplazamiento que poseen los instrumentos convencionales de medición de deformaciones usados en los ensayos en laboratorios, los cuales solo se pueden emplear en el rango elástico. Como se mencionó previamente, los programas de computadoras y los modelos numéricos surgieron debido a esta necesidad de información, pero a nivel nacional no existe un número representativo de estudios que puedan promediar el comportamiento estructural de la albañilería mediante el Método de Elementos Finitos.

El Método de Elementos Finitos requiere de la asignación de las propiedades mecánicas elásticas e inelásticas al modelo. Las propiedades elásticas suelen obtenerse a partir de procedimientos tradicionales en laboratorio en prismas y muretes; y las propiedades inelásticas se obtienen mediante la comparación del comportamiento de dichos elementos con un modelo numérico. Por lo tanto, para contribuir con el conocimiento existente sobre la albañilería es necesario realizar estudios paramétricos que permitan reproducir el comportamiento de pilas y muretes, de manera que se calibren propiedades inelásticas y puedan ser empleadas de manera satisfactoria.

Por otra parte, Kaushik et al. (2007) mencionan que las construcciones de albañilería simple de arcilla (edificios de poca altura y/o casas) presentan deficiencias en su respuesta estructural ante la acción de cargas laterales, incluso en el rango de pequeñas deformaciones. Lo cual es de relevancia ya que el Perú se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde

"(...) tienen lugar el 90% de todos los sismos del mundo y el 80% de los terremotos más grandes" (Tavera, 2014), cuyos efectos, precisamente, incluyen la acción de fuerzas laterales sobre dichas construcciones.

Por lo mencionado, en el presente estudio se pretende calibrar las propiedades inelásticas de la albañilería de arcilla para representar el comportamiento de pilas y muretes y, a futuro, servir como base para el desarrollo de modelos numéricos de muros o casas de albañilería confinada, modelos que se emplearían para el diseño de estructuras complejas.

1.3 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es contribuir al conocimiento sobre la macromodelación numérica de la albañilería de arcilla a partir del análisis de ensayos de laboratorio en pilas y muretes y sus respectivos modelos numéricos.

Los objetivos específicos de la presente investigación son los siguientes:

- Construir cuatro pilas y cuatro muretes de albañilería
- Ensayar las pilas a compresión axial
- Ensayar los muretes a compresión diagonal
- Estudiar las propiedades mecánicas de la albañilería de arcilla
- Evaluar la respuesta experimental de las pilas y muretes
- Modelar numéricamente las pilas y muretes en el programa Abaqus
- Calibrar los resultados de los modelos numéricos con los del ensayo

1.4 Hipótesis

La primera hipótesis de esta investigación afirma que es posible representar el comportamiento estructural a compresión de pilas de albañilería de arcilla en el rango inelástico a través de modelos de elementos finitos.

De igual manera, la segunda hipótesis afirma que es posible representar el comportamiento estructural a compresión diagonal de muretes de albañilería de arcilla en el rango inelástico a través de modelos de elementos finitos.

1.5 Estructura de la tesis

El primer capítulo se compone por la introducción al tema de tesis. Para ello, se presenta el planteamiento y la justificación del problema abarcado. También, se mencionan los objetivos del proyecto y las hipótesis planteadas al inicio de esta investigación. Luego, se indica la

estructuración de la tesis; es decir, cómo se ha distribuido la información y resultados en capítulos. Se finaliza con el plan de trabajo y metodología desarrollados.

El segundo capítulo se dedica a la revisión del estado del arte. Se describe brevemente a la albañilería de arcilla, el comportamiento estructural de la albañilería en distintos estado de carga, los modelos numéricos, el Método de Elementos Finitos como caso particular de la modelación numérica y, por último, se proporciona un recuento de estudios realizados acerca de la albañilería y la modelación numérica.

En el tercer capítulo se describen brevemente los ensayos realizados en pilas y muretes de albañilería de arcilla a compresión axial y compresión diagonal, respectivamente. Además, se evalúan las datas de ensayo y se obtienen resultados de propiedades mecánicas del material como módulo de corte, módulo de elasticidad, resistencia a compresión y a tracción.

El cuarto capítulo presenta los detalles de la modelación numérica de los ensayos antes mencionados en el programa Abaqus. Describe las propiedades mecánicas empleadas para la modelación, el proceso de discretización de los elementos, así como los resultados que se obtuvieron después de ser ejecutados los modelos en el programa.

El quinto capítulo comenta y analiza los resultados que se obtuvieron a partir de las datas de ensayos en pilas y muretes. Además, compara los resultados analíticos de los modelos numéricos realizados frente a los experimentales.

Por último, el sexto capítulo comenta las conclusiones obtenidas a partir de la comparación entre los resultados experimentales de los ensayos en pilas y muretes y la modelación numérica de los mismos. Asimismo, presenta los cuadros resúmenes de las propiedades mecánicas calibradas y gráficas correspondientes a los esfuerzos y deformaciones unitarias experimentales y analíticas evidenciadas.

1.6 Plan de trabajo y metodología

En líneas generales, el plan de trabajo se desarrolló de acuerdo a la siguiente metodología para cumplir con los objetivos propuestos:

El desarrollo de este proyecto comprendió la participación en ensayos de laboratorio, la realización de investigación teórica, y el uso de programas de computadora. La participación en ensayos de laboratorio se realizó al inicio del proyecto. Dichos ensayos fueron desarrollados por alumnos de maestría de la PUCP con apoyo de la tesista de la presente tesis. La investigación teórica implica la revisión de la literatura relacionada con el tema de tesis, desarrollo de modelos numéricos en el programa SAP2000 y Abaqus y el procesamiento

necesario de la data de laboratorio. Estas tareas se planificaron de acuerdo a la secuencia que se describe a continuación:

a) Apoyo en la construcción de pilas y muretes

Se apoyó en la construcción de cuatro pilas y cuatro muretes de albañilería, proyecto a cargo de alumnos de maestría de la PUCP.

b) Investigación bibliográfica

Se estudió en primer lugar, la teoría sobre los modelos numéricos y el Método de Elementos Finitos. Además, se recopiló información sobre investigaciones realizadas en albañilería. Se revisó artículos científicos y tesis de ensayos de laboratorio realizados en albañilería de adobe y arcilla, modelos numéricos teóricos y modelos numéricos desarrollados en programas de computadora.

c) Realización de ensayos de laboratorio

A la par con la revisión bibliográfica, se construyó cuatro pilas y cuatro muretes. Luego, estos se ensayaron a compresión axial y compresión diagonal, respectivamente. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP. Se presencié el comportamiento del material en las pruebas, los tipos de falla producidos, y se apoyó en las actividades necesarias para concluir con éxito los ensayos.

d) Análisis de resultados de ensayos

De los ensayos descritos previamente, se obtuvo la data de cargas y deformaciones para cada pila y murete. Se analizó dicha data, lo cual significó el cálculo de las propiedades mecánicas del material y obtención de las curvas de carga-deformación de cada experiencia. Además, se examinó que los resultados se encuentren en los rangos típicos de valores de propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, módulo de corte, resistencia a compresión axial, resistencia a compresión diagonal) y de esfuerzos límites (esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura).

e) Elección del programa de modelación numérica

Se estudió las características y propiedades de dos programas con capacidad de modelación de elementos finitos, SAP2000 y Abaqus. Con este fin, se revisó previamente los comentarios realizados por autores de artículos de modelación numérica respecto a los programas que emplearon en sus investigaciones sobre la albañilería. Finalmente, se seleccionó el programa pertinente para esta investigación.

f) Modelación numérica de pilas

Se elaboraron diversos modelos de las pilas de albañilería para determinar las características más apropiadas que estos debían tener finalmente. De este modo, por comparación de resultados obtenidos en cada modelo, se determinaron las condiciones de frontera adecuadas, el mallado a emplearse, y la forma de aplicación de la carga en el modelo.

g) Modelación numérica de muretes

Del mismo modo que en el caso de las pilas, se elaboraron modelos hasta determinar las características más apropiadas para representar el ensayo de compresión diagonal en muretes. Con las diversas pruebas, se determinaron las condiciones de frontera adecuadas, el mallado a emplearse, y la forma de aplicación de la carga en el modelo.

h) Interpretación de resultados

Se realizaron los cálculos necesarios para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería. Luego, se interpretaron las gráficas de carga-deformación realizadas a partir del programa Abaqus y las deformadas. Asimismo, se compararon los resultados que otorgó el programa para cada modelo final con el patrón de daños observado en los ensayos de laboratorio.

i) Conclusiones

Se redactaron las conclusiones resultantes de la calibración de las propiedades mecánicas y la comparación del modelo numérico con el ensayo real. En este punto, se incluyó solo la información relevante de la investigación y aquella que respondía las hipótesis planteadas y objetivos propuestos.

2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

Este capítulo repasa brevemente lo que consiste la albañilería de arcilla y sus componentes. Asimismo, describe el comportamiento de la albañilería en estados de carga de compresión uniaxial, compresión diagonal y corte. Una segunda parte se dedica a los métodos numéricos y algunas características del programa empleado.

2.1 La albañilería de arcilla

La albañilería de arcilla es un material heterogéneo (compuesto) y de propiedades anisotrópicas, esto es, que varían de acuerdo a la dirección de análisis. Está compuesta por mortero –mezcla de cemento, arena y agua– u otra mezcla ligante y unidades de ladrillo a base de arcilla. La arcilla es el suelo con tamaño de grano inferior a dos milímetros, según la Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO), y desarrolla plasticidad al ser mezclada con una determinada cantidad de agua (citado en Das, 2011). Una de sus clasificaciones la divide en albañilería simple y albañilería con refuerzo. Los muros de albañilería simple carecen de refuerzo estructural o si lo tienen no categorizan como muros reforzados por no cumplir con las especificaciones mínimas reglamentarias (San Bartolomé, 1994). En la Figura 2.1 se muestra un segmento de un muro de albañilería de arcilla. La albañilería se emplea también como albañilería confinada, la cual se caracteriza por la presencia de elementos de concreto en los marcos, que otorgan rigidez y cohesión a la estructura.

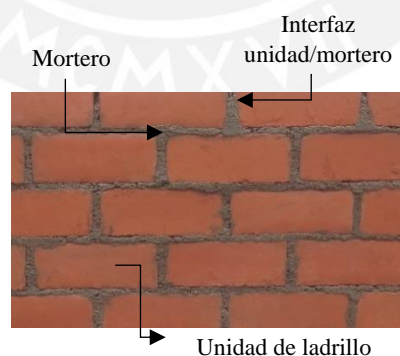


Figura 2.1. Albañilería de arcilla

2.1.1 Ladrillo

El ladrillo es una unidad hecha de arcilla cocida, concreto u otro material cerámico, como se aprecia en la Figura 2.2. En el mercado se producen con dimensiones estándar y con distintas configuraciones; por ejemplo, unidades huecas o sólidas, las cuales se distinguen por el porcentaje del área bruta que presenta el área neta (sin considerar los agujeros) en la sección

paralela a la superficie de asiento. También se dividen de acuerdo a su proceso de fabricación, ya sea artesanal o industrial, o son denominados alveolares cuando son unidades huecas o sólidas pero poseen celdas para contener el refuerzo vertical. Características como las mencionadas definen la resistencia de la unidad de ladrillo.

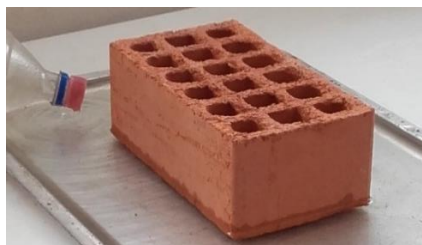


Figura 2.2. Unidad de ladrillo alveolar

2.1.2 Mortero

De acuerdo con la Norma Técnica E.070 (2006), el mortero es el material que se emplea para adherir horizontal y verticalmente a las unidades de albañilería. Este material puede ser hecho a base de distintos componentes, tales como arena, cemento, cal, etc. Las juntas de mortero en la albañilería representan planos de “debilidad” debido a que la resistencia que otorga el mortero es comparativamente menor a la de las unidades de ladrillo, por ello, es común que las fallas se desarrollen por dichos planos. En la Figura 2.3 se aprecia juntas de mortero a base de cal.



Figura 2.3. Mortero a base de cal (Godwa, 2014)

2.1.3 Propiedades de la albañilería de arcilla como material compuesto

Como se ha presentado, existen distintos tipos de unidades de ladrillo y de mezclas de mortero que pueden componer la albañilería de arcilla. Las características de los componentes definen el comportamiento estructural de la albañilería; por ello, en función de la configuración de la albañilería, propiedades y características de las unidades de ladrillo y mortero, se presentarán distintos patrones de falla y resistencia del material compuesto.

En la Figura 2.4, por ejemplo, podemos ver cómo el tipo de carga que se aplica en la albañilería y la configuración que presente influyen en el patrón de daño que desarrolla.

| Angle θ | Uniaxial tension | Tension/compression | Uniaxial compression | Biaxial compression |
|----------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 0° | | | | |
| 22.5° | | | | |
| 45° | | | | |
| 67.5° | | | | |
| 90° | | | | |

Figura 2.4. Modos de falla de unidades de albañilería sólida en estado de carga biaxial (Dhanasekar et al., 1985, citado en Lourenço, 1996)

2.1.3.1 Albañilería en estado de compresión uniaxial

El estado de compresión uniaxial en albañilería consiste en la aplicación de carga paralela al eje longitudinal del prisma. El caso más estudiado para este material es cuando las juntas de mortero se encuentran perpendicular al eje de aplicación de la carga, como se muestra en la Figura 2.5. Sin embargo, podría presentarse algún otro caso en el que las juntas de mortero y las unidades se encuentren asentadas con cierto ángulo de inclinación respecto al eje horizontal.



Figura 2.5. Compresión uniaxial de un prisma de albañilería

La Norma ASTM C 1314-03b *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms* (2003) indica que los prismas deben ser hechos con un mínimo de dos unidades de ladrillo en altura y con una relación de esbeltez (altura/espesor) comprendida entre 1.3 y 5. La Norma Peruana NTP 339.605 (2013) recomienda que los prismas posean un mínimo de tres hiladas. Además, para el caso en que no se realicen ensayos en prismas, propone los valores de resistencia para la albañilería que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Resistencias características a compresión de la albañilería de arcilla MPa (kg/cm²) (adaptado de NTP 339.605)

| Materia prima | Denominación | Pilas F'm |
|---------------|----------------------|-----------|
| Arcilla | King Kong Artesanal | 3,4 (35) |
| | King Kong Industrial | 6,4 (65) |
| | Rejilla Industrial | 8,3 (85) |

Para el caso de los prismas de albañilería con junta de asiento perpendicular al eje de aplicación de la carga, el patrón de falla ideal se presenta con grietas verticales. Las grietas verticales se producen por la tracción que se genera en la dirección horizontal al aplicar la carga en el eje vertical. Fallas en las esquinas superiores e inferiores del prisma son indeseadas pues su causa se relaciona con una concentración de esfuerzos inducida en dichas zonas por un mal refrentado o malas condiciones de ensayo.

Por otro lado, como se comenta en Lourenço (1996), la compresión uniaxial en albañilería provoca un estado de compresión triaxial en el mortero y de compresión/tensión biaxial en las unidades de ladrillo. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de gráfico típico de esfuerzo-desplazamiento en prismas; las muestras fueron de dimensiones 500x250x600 mm³ con unidades sólidas de ladrillos de barro (Mann & Betzler, 1994, citado en Lourenço, 1996). El comportamiento en prismas de albañilería es similar pero alcanza valores de resistencia más altos.

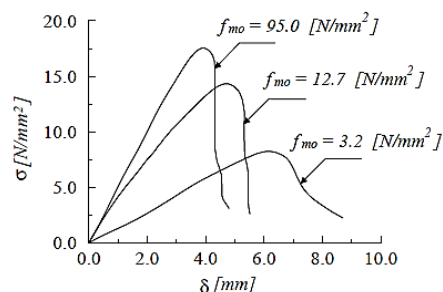


Figura 2.6. Curva típica de esfuerzo-desplazamiento para prismas de 500x250x600 mm³ de ladrillo blando de barro (Binda et al., 1998, citado en Lourenço, 1996)

2.1.3.2 Albañilería en estado de compresión diagonal

Otro estado de carga que se realiza para caracterizar a la albañilería es la compresión diagonal en muretes. El ensayo se realiza para conocer la resistencia a corte del material y el módulo de corte. La carga se aplica en sus esquinas de manera que la diagonal vertical se encuentra en un estado de compresión máximo y en el sentido perpendicular a esta, se genera tracción, como se muestra en la Figura 2.7. De acuerdo con la NTP 399.621 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Método de ensayo de compresión diagonal en muretes de albañilería (2004), los especímenes que se usen deben ser de 600x600 mm como mínimo, y contener dos unidades enteras de albañilería por hilada. Además, al igual que para el caso de las pilas, propone los valores de resistencia para la albañilería que se muestran en Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Resistencias características a compresión diagonal de la albañilería de arcilla MPa (adaptado de NTP 339.605)

| Materia prima | Denominación | Pilas V'm |
|---------------|----------------------|-----------|
| Arcilla | King Kong Artesanal | 0,5 |
| | King Kong Industrial | 0,8 |
| | Rejilla Industrial | 0,9 |

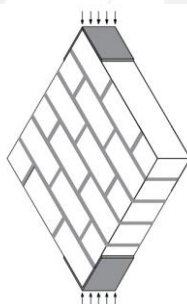


Figura 2.7. Compresión diagonal de un murete de albañilería

La falla puede presentarse de diversos modos. Uno de ellos es cuando se aproxima a la dirección de la diagonal vertical, en tal caso, se identifica una buena calidad de adherencia unidad/mortero. También, puede que la falla atraviese las juntas de mortero de forma escalonada. Un caso menos deseado es cuando la falla se concentra en las zonas próximas a las esquinas superior e inferior que son sometidas a cargas; en tal caso, no se desarrollan las máximas resistencias de corte en el material. En la Figura 2.8 se pueden ver las fallas descritas.

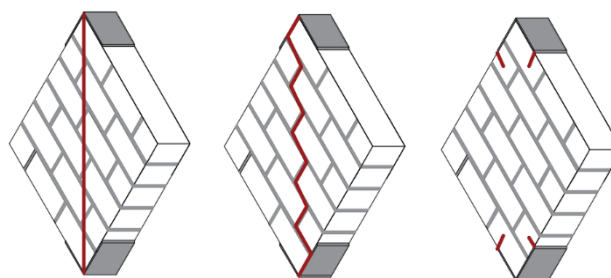


Figura 2.8. Fallas típicas en un estado de compresión diagonal en muretes de albañilería

2.1.3.3 Estado de tensión uniaxial

Debido a que el posicionamiento de las unidades de albañilería puede tener distintos ángulos de inclinación respecto al eje horizontal, como se ha mencionado antes, la tensión y su falla pueden variar en función a dichas condiciones. Sin embargo, dos de los casos más comunes son la tracción perpendicular a la junta de asiento y la tracción paralela a la junta de asiento. En el primer caso, la falla puede coincidir con una junta de mortero que provoque un plano de debilidad en el material. En el segundo caso, dos son las fallas típicas y se muestran en la Figura 2.9. La falla escalonada se puede ocasionar por una mala adherencia entre el mortero y la unidad de ladrillo.

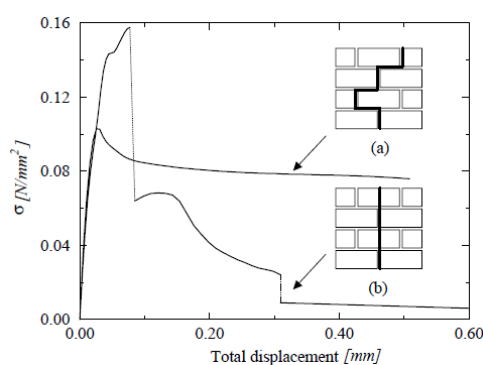


Figura 2.9. Curva típica de esfuerzo-deformación para tracción en la dirección paralela a la junta de asiento (Backes, 1985, citado en Lourenço, 1996)

2.2 Modelación numérica

La ingeniería brinda soluciones a problemas, cuya solución numérica involucraría el análisis de dominios complejos en tres dimensiones y dependencias de diversos materiales. Ante ello, los métodos numéricos surgieron como técnicas para simplificar el esfuerzo de cálculo requerido. De acuerdo con Chapra (2014), existen muchos métodos numéricos, pero se caracterizan porque la mayoría involucra un número importante de tediosos cálculos aritméticos.

Chapra (2014) también resalta la diferencia en el papel de los métodos numéricos antes y después del desarrollo de computadoras eficientes. Antes de la creación de las computadoras digitales, la solución de problemas se iniciaba con la definición del problema; luego, se describía brevemente las leyes fundamentales en las que se basaba este. Definido ello, se empleaban métodos exactos y analíticos que solo eran útiles para determinados problemas. En cambio, en la era de las computadoras, la solución, propiamente dicha, es realizada por la máquina. Ello permitió que se invirtiera mayor tiempo en la definición del problema y la interpretación de resultados.

Desde hace cuarenta años, se ha experimentado un elevado desarrollo de herramientas numéricas para el análisis estructural (Lourenço, 1998). Actualmente, en particular, se emplean modelos numéricos para la representación de elementos o sistemas de distintos materiales; para ello, el modelo numérico requiere de la asignación de las condiciones del problema (geometría, características, propiedades del material, etc.). Sin embargo, no siempre es indispensable definir en su totalidad al elemento puesto que los programas computacionales emplean ecuaciones analíticas y leyes constitutivas teóricas –dependencias entre el esfuerzo y la deformación unitaria en un determinado punto del elemento– en un proceso de cálculo interno.

El empleo de modelos, por lo tanto, implica la realización de ensayos que permitan conocer las características mecánicas del material. De acuerdo con Lourenço (1998), el desarrollo de un confiable y preciso modelo numérico se logra con una detallada descripción del material y su correcta validación mediante la comparación de resultados experimentales y resultados numéricos.

2.3 Modelos numéricos para albañilería

Un método muy recurrente en el desarrollo de modelos para la albañilería es el denominado Método de Elementos Finitos (MEF). Este divide el dominio del problema en formas geométricas simples, a las cuales denomina “elementos finitos” (Chandrupatla, Belegundu, & Cera Alonso, 1999). Así, el continuo se analiza por componentes en programas de computadora, como el ANSYS, ASKA, NASTRAN o SAP2000, que contienen procesadores de datos de entrada y evaluación de resultados (Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 2002). En la Figura 2.10 se muestra un ejemplo de discretización de un elemento bidimensional en polígonos regulares de menor área. Asimismo, se aprecia la delimitación del dominio y las condiciones de frontera (empotrada y voladiza).

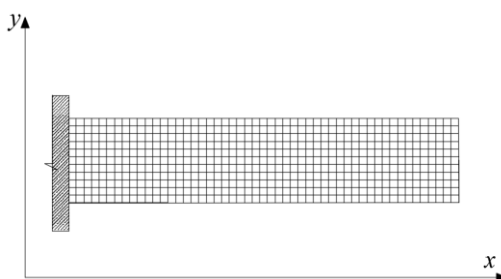


Figura 2.10. Discretización de una viga analizada como un elemento bidimensional

La modelación numérica de la albañilería simple, a partir del Método de Elementos Finitos, se centra en los dos enfoques siguientes: el modelo discreto o micromodelo (detallado y simplificado), y el modelo continuo o macromodelo, (Lagomarsino et al., 2013; Calderini &

Lagomarsino, 2008; Magenes & Della Fontana, 1998; citados en Tarque, Camata, Spacone, Varum, & Blondet, 2014).

El micromodelo caracteriza de manera más detallada al material, para ello, distingue los componentes de la albañilería, tales como la unidad de ladrillo, el mortero y la interfaz unidad/mortero. Este enfoque implica una mayor inversión de tiempo; sin embargo, ofrece resultados más certeros. Por otro lado, el macromodelo es más práctico ya que simplifica las características heterogéneas de la albañilería. En la Figura 2.11, se muestra un ejemplo de las estrategias de modelación mencionadas.

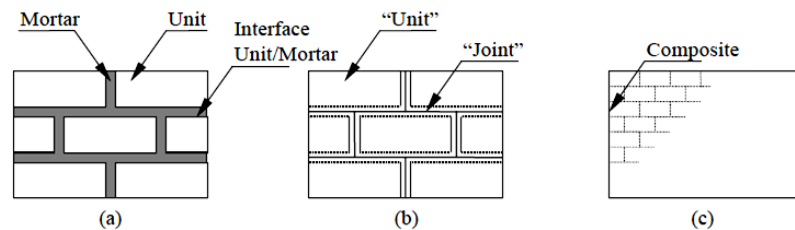


Figura 2.11. (a) Especimen de albañilería, (b) micro-modelo, (c) macro-modelo (Lourenço, 2004)

2.3.1 Macromodelo

El enfoque asume al material como homogéneo, en el cual no se diferencia a los elementos que lo componen y las propiedades que lo caracterizan poseen valores promedio que engloban, con cierto margen de error, las propiedades de los componentes. Adicionalmente, es usual que el material se considere de propiedades elásticas e isotrópicas (Rosenhaupt, 1965; Saw, 1974; citados en Tzamtzis & Asteris, 2003). Tal idealización hace que el esfuerzo de cálculo y modelación computacional se reduzca considerablemente y así, el tiempo de desarrollo sea menor en comparación con un micromodelo. Por estas razones, este enfoque es el más empleado. Sin embargo, este modelo no es el más adecuado para describir la conducta de la albañilería de acuerdo con Bolhassani, Hamid, Lau, & Moona, 2015.

Los macromodelos se emplean con frecuencia cuando la estructura está compuesta por muros sólidos con dimensiones lo suficientemente extensas para que los esfuerzos a través de, o a lo largo de una longitud macro sean esencialmente uniformes (Lourenço, 1996). La información necesaria para estos modelos son, básicamente, la ley constitutiva de compresión y de tracción (Tarque, 2011).

2.3.2 Micromodelo

La micromodelación o enfoque heterogéneo considera la independencia de propiedades mecánicas que poseen los elementos componentes de una estructura en estudio. En el caso de la albañilería, las unidades y el mortero son asignados con el valor de Poisson, módulo de elasticidad y características inelásticas (Bolhassani et al., 2015). Es por ello que los resultados

que obtiene en el análisis numérico son más precisos; sin embargo, el trabajo se complejiza en términos de tiempo y requerimiento de detalles.

Este tipo de enfoque se divide de la siguiente manera:

- Micromodelo detallado: las unidades de albañilería y el mortero son representados por elementos continuos, mientras que la interfaz unidad/mortero, también denominada junta, es representada por elementos discontinuos. La junta posee un espesor nulo e interactúa con las superficies adyacentes con las que tiene contacto (Furukawa, Spence, & Ohta, 2009).
- Micromodelo simplificado: las unidades de ladrillo, el mortero y la interfaz unidad/mortero son homogenizadas y la albañilería es tratada como un material isotrópico.

Ambos tipos de micromodelo son complejos en términos de capacidad de herramienta computacional si se desea analizar una estructura de dimensiones considerables. En la Figura 2.12 se muestran los esquemas de ambos tipos de modelos. No obstante, son técnicas importantes de investigación que pueden justificar el costo y tiempo que necesitan (Giordano, Mele, & De Luca, 2005).

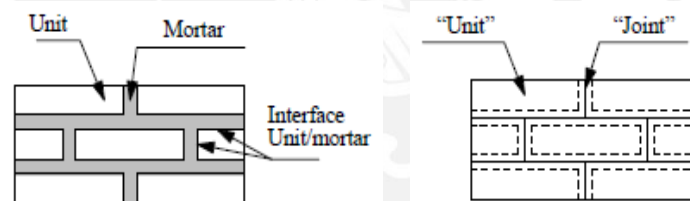


Figura 2.12. a) Micromodelo detallado b) Micromodelo simplificado (Lourenço, 1996)

2.3.3 Softening behavior

En materiales quasi-frágiles como la albañilería de arcilla, el comportamiento mecánico se caracteriza por un descenso progresivo en la curva esfuerzo-deformación tras alcanzar el valor pico de resistencia. Esto es atribuido a la heterogeneidad del material y la presencia de irregularidades como aberturas en las unidades de ladrillo, lo cual implica que las grietas se desarrollen de manera progresiva desde las zonas con menor resistencia hacia las más resistentes. Por ello, la resistencia y rigidez se degrada de manera paralela al incremento de grietas pasado el rango elástico.

En la Figura 2.13 se aprecia el caso de compresión uniaxial y en la Figura 2.14, tracción uniaxial. Además, se define el término Energía de fractura, Energía de fractura en compresión y Energía de fractura modo II; estos parámetros son la integral de las gráficas esfuerzo-desplazamiento presentadas y permiten definir el comportamiento post pico de la albañilería.

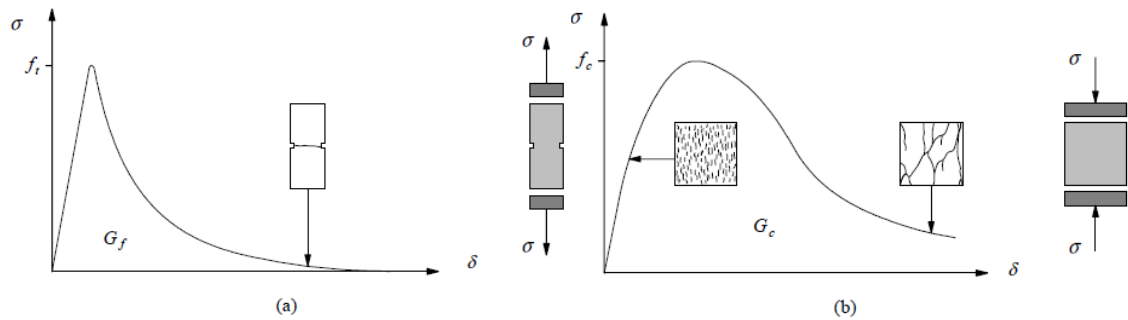


Figura 2.13. Respuesta de materiales quasi-frágiles ante cargas axiales y definición de energía de fractura: a) Tracción b) Compresión (Lourenço, 1996)

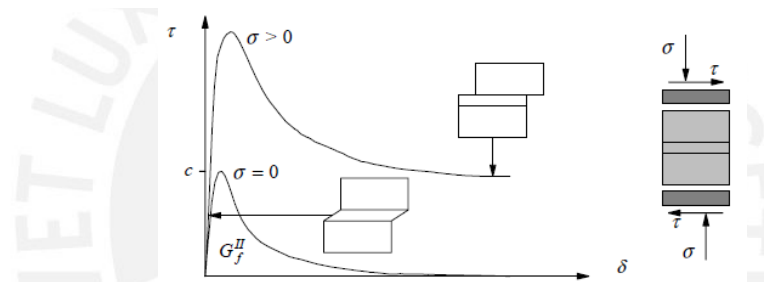


Figura 2.14. Respuesta de la albañilería bajo corte y definición de energía de fractura modo II (Lourenço, 1996)

2.4 Estudios experimentales

Los estudios en albañilería se iniciaron con ensayos de compresión axial para determinar sus propiedades mecánicas, tales como el módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión axial. En 1997, Benett et al. realizaron ensayos en unidades de ladrillos huecos de arcilla y elementos de albañilería, con lo cual se determinó una relación lineal entre la resistencia a compresión de las unidades de ladrillos y la albañilería (Kaushik et al., 2007). En 2005, Sarangapani ensayó pilas de albañilería con unidades de ladrillos “blandos”. Esta experiencia concluyó que la resistencia a compresión de la pila incrementaba con el aumento de la resistencia ofrecida por la unión entre el ladrillo y el mortero. De este modo, y junto a más ensayos que se han ido desarrollando, se verificó el comportamiento heterogéneo de la albañilería y se reconoció la implicancia de las propiedades individuales de cada elemento que compone este material en su comportamiento estructural.

En el 2007, Kaushik et al. evaluaron la respuesta a compresión uniaxial de unidades de ladrillo, cubos de mortero y prismas de albañilería. El mortero que se empleó fue de diferentes relaciones cemento:caliza:arena; el mortero denominado débil tuvo un valor de 1:0:6; el fuerte, un valor de 1:0:3; y el intermedio, de 1:0.5:4.5. Los ladrillos, 10 especímenes en total, se adquirieron de cuatro manufactureras distintas (designadas como M, B, S y O en el estudio); las dimensiones fueron 230 mm de largo, 110 mm de ancho y 75 mm de alto. Los cubos de mortero fueron de 50 mm de lado y se ensayaron a los 28 días de ser moldeados. En la Figura 2.15 se muestran los especímenes ensayados por Kaushik et al.

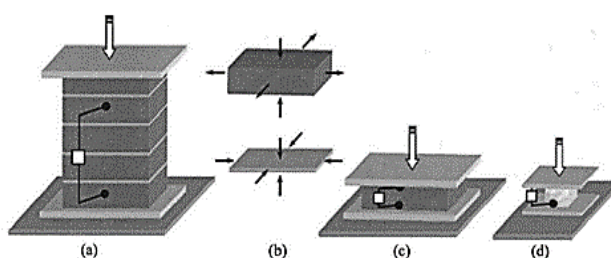


Figura 2.15. (a) Pila, (b) estado triaxial de esfuerzos en la interface ladrillo/mortero de una pila, (c) unidad de ladrillo, y (d) cubo de mortero (Kaushik et al., 2007)

Cada espécimen fue instrumentado con un extensómetro “Épsilon”. Para mediciones en los prismas se empleó extensómetros de 200 mm de longitud y ± 12 mm de capacidad de deformación. Para los ensayos de ladrillos y cubos de mortero, tuvieron 25 mm de longitud y ± 5 mm de capacidad de deformación. El ensayo se realizó con incremento monótonico de desplazamiento (control de desplazamientos) mediante la aplicación de una carga vertical sobre la cima de los elementos. Para ello, se utilizó una máquina universal MTS de ± 125 mm de capacidad de desplazamiento. Sin embargo, las unidades de albañilería se ensayaron mediante control de carga con una máquina universal de 2000 kN de capacidad.

Se obtuvo datos de carga-deformación para cada espécimen, con lo cual se graficó curvas esfuerzo-deformación unitaria. Del análisis de resultados de los ensayos en ladrillos, se calculó un esfuerzo de compresión axial promedio de 20,8 MPa, deformaciones unitarias de falla entre 0.0057 y 0.0072 (0.0065 en promedio), y módulos de elasticidad entre 5000 y 7500 MPa (6095 en promedio). En el caso de los cubos de mortero, se alcanzó un esfuerzo de compresión promedio de 3,1 MPa y deformación de falla de 0,0087 para el mortero débil; 20,6 MPa para el mortero fuerte y deformación de falla de 0,0185; y 15,2 MPa y 0,0270 de deformación de falla para el mortero intermedio. Asimismo, 545 MPa, 3750 MPa y 3300 MPa de módulo de elasticidad, respectivamente.

Los resultados para los ensayos en prismas se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resultados de los estudios a compresión axial en prismas de albañilería de arcilla, (cemento:cal:arena) (adaptado de Kaushik, et al., 2007)

| Tipo de ladrillo | F'_m MPa | ϵ mm/mm | E_m Mpa |
|--|---------------|---------------------|--------------|
| Prismas con mortero “débil” – 1:0:6 (4x7 especímenes) | | | |
| M | 4 | 0,0052 | 2239 |
| B | 2,9 | 0,0034 | 1795 |
| O | 5,1 | 0,0086 | 2630 |
| S | 4,3 | 0,0065 | 2355 |
| Promedio | 4,1 | 0,0059 | 2300 |
| Prismas con mortero “fuerte” – 1:0:3 (4x7 especímenes) | | | |
| M | 7,4 | 0,0067 | 3585 |
| B | 6,5 | 0,0041 | 3592 |
| O | 8,5 | 0,0057 | 5219 |
| S | 7,6 | 0,0050 | 4250 |
| Promedio | 7,5 | 0,0053 | 4200 |
| Prismas con mortero “intermedio” – 1:0.5:4.5 (4x7 especímenes) | | | |
| M | 6,5 | 0,0102 | 3542 |
| B | 5,9 | 0,0062 | 3509 |
| O | 7,2 | 0,0092 | 4712 |
| S | 6,8 | 0,0066 | 3325 |
| Promedio | 6,6 | 0,0080 | 3800 |

De la data experimental, se obtuvieron relaciones analíticas entre los esfuerzos de compresión y los módulos de elasticidad de los componentes. El módulo de elasticidad del ladrillo tuvo un valor promedio de 300 veces su esfuerzo a compresión; el módulo de elasticidad promedio del mortero fue 200 veces el esfuerzo a compresión; y en las pilas de albañilería, este valor representó 550 veces el esfuerzo de compresión (Kaushik et al., 2007).

Ganapathi, Murthy, Iyer, Lakshmanan y Bhagavan (2011) realizaron un estudio experimental y numérico de unidades de albañilería, prismas y paneles sometidos a acciones “en el plano”. El estudio evaluó la resistencia a compresión de los ladrillos, resistencia a compresión de los prismas de ladrillos, resistencia a flexión y ensayo de muros de ladrillo reforzados; adicionalmente, se realizó un análisis no lineal de elementos finitos. Es de interés para esta sección comentar los resultados que se obtuvieron del ensayo en unidades y prismas de albañilería sometidos a cargas axiales.

El ensayo en las unidades fue realizado mediante control de carga, lo cual significó incrementos de esfuerzo en diferenciales de 14 MPa por minuto hasta alcanzar el valor de carga que produjera la rotura. Con este fin, una muestra de ladrillos fue sumergida en agua a temperatura ambiente durante 24 horas; luego, se retiró el exceso de agua en ellos y se prosiguió a rellenar los orificios perpendiculares a la superficie de asiento con mortero de

relación cemento:arena igual a 1:3. Los resultados obtenidos fueron una resistencia a compresión promedio de 10,62 MPa y una desviación estándar de 1,51 MPa.

En el caso del ensayo en prismas, los especímenes se elaboraron en el laboratorio con alturas no menores a 40 cm y con valores de esbeltez (relación entre altura y espesor) entre 2 y 5. Además, se empleó mortero de cuatro relaciones cemento:arena que fueron 1:3, 1:4, 1:5 y 1:6. De este modo, se obtuvo diferentes combinaciones de condiciones de ensayo, y para cada una se ensayó tres especímenes hasta la carga de rotura después de 28 días de su fabricación. La instrumentación empleó dos pares de *strain gauges* (medidores de deformación unitaria) a 200 mm de longitud calibrada, cada uno en cada cara del espécimen.

Los resultados evaluados fueron la resistencia a compresión de los prismas, desviación estándar, resistencia característica y el módulo de elasticidad de la albañilería. Dicho módulo presentó un valor de 743,56 MPa para mortero 1:3 y 520 MPa para mortero 1:4; los demás resultados se resumen en la Tabla 2.4. Es importante mencionar que se apreció una influencia mayor debida a la esbeltez en los resultados que el efecto de los cambios en los morteros utilizados.

Tabla 2.4. Resultados del ensayo a compresión axial en prismas (adaptado de Ganapathi et al., 2011)

| Número de espécimen | Relación cemento:arena del mortero | Esbeltez = 2 | Esbeltez = 3 |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | Resistencia última de compresión MPa | Resistencia última de compresión MPa |
| 1 | 1:3 | 2,21 | 1,26 |
| 2 | | 2,40 | 1,86 |
| 3 | | 2,39 | 1,48 |
| 4 | 1:4 | 2,56 | 1,55 |
| 5 | | 2,62 | 1,61 |
| 6 | | 2,88 | 1,58 |
| 7 | 1:5 | 1,90 | 1,04 |
| 8 | | 1,86 | 1,30 |
| 9 | | 2,34 | 1,20 |
| 10 | 1:6 | 2,09 | 0,95 |
| 11 | | 2,02 | 0,89 |
| 12 | | 2,02 | 1,20 |

En la Figura 2.16 se puede apreciar el patrón de falla de uno de los prismas ensayados por Ganapathi et al. La falla se produjo vertical en la altura del prisma, aproximadamente, en la mitad de la longitud del espesor del prisma. Además, hubo desprendimiento de material en un lado superior del espécimen que estuvo en contacto con la placa sobre la cual se aplicó la carga.



Figura 2.16. Patrón de falla de un prisma con esbeltez igual a 3 (Ganapathi et al., 2011)

En 2004, Ewing y Kowalsky presentaron los resultados de su investigación en prismas de albañilería de arcilla sin confinamiento y con confinamiento. El estudio incluyó pruebas de compresión axial en 15 prismas; de las cuales, tres consistieron pilas de ladrillos asentados uno sobre otro y sin confinamiento; y los 12 restantes se formaron con un “ensamblaje doble” de dos pilas unidas mediante una junta de mortero en el medio de ambas; sin embargo, tres de estas no tuvieron confinamiento y nueve sí. Por ello, solo nos centraremos en los resultados que se obtuvieron para el primer grupo de tres pilas sin confinamiento y de “ensamblaje simple” por presentar estructura similar a la de los prismas analizados en esta investigación.

Los prismas se formaron con ocho ladrillos, lo cual significó una altura promedio de 523 mm, el espesor fue de 192 mm y el ancho de 254 mm. Para la instrumentación se empleó una máquina universal MTS con capacidad de 4 448 N. Se controló la prueba por desplazamientos y se registró las deformaciones axiales con LVDTs. En todos los casos se alcanzó la carga de rotura y se observó una falla frágil. En la Tabla 2.5 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2.5. Resultados del ensayo de tres prismas de albañilería (adaptado de Ewing et al., 2004)

| Número de espécimen | Resistencia a la compresión MPa |
|---------------------|---------------------------------|
| 1 | 13,89 |
| 2 | 17,28 |
| 3 | 15,50 |
| Promedio | 15,56 |

2.5 Estudios experimentales con modelo numérico

En 2005, Blondet realizó un ensayo cíclico con control de desplazamiento de un muro típico de albañilería de adobe en la Pontificia Universidad Católica del Perú. El ensayo tuvo como objetivo analizar la respuesta cíclica del elemento y el patrón de daño final. El muro tuvo forma de I con una longitud de 3,06 m en el muro central, 1,93 m de alto y 0,30 m de espesor. El muro, además, se conectaba con dos muros laterales de 2,48 m de longitud, los cuales pretendieron simular la influencia de la conexión entre muros en edificios y evitar el desplome del muro central durante el ensayo.

En 2014, Tarque et al. representaron con modelos numéricos el ensayo descrito en el párrafo anterior. Para ello, emplearon los tres enfoques de modelos numéricos; sin embargo, nos centraremos en el macro-modelo propuesto. La carga fue aplicada monotónicamente y el programa empleado fue el Midas FEA v2.9.6 (2009) y el Abaqus 6.9 (2009). El modelo tuvo un mallado con elementos del tipo “shell” de 100x100 mm con 4 nodos; además, se asumió a la albañilería como un material isotrópico.

Algunas de las propiedades mecánicas empleadas para el modelo se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Propiedades mecánicas para el macromodelo (adaptado de Tarque et al., 2014)

| Peso específico N/mm ³ | Módulo de elasticidad MPa | Coefficiente de Poisson | Esfuerzo de compresión MPa | Esfuerzo de tracción MPa |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0,00002 | 200 | 0,20 | 0,45 | 0,04 |

Como resultado del modelo, se observó que las fallas del material se iniciaron en las esquinas de la ventana central y se propagaron diagonalmente. En Figura 2.17 se muestra el sistema de muros descritos y el patrón de fallas que se presentó.

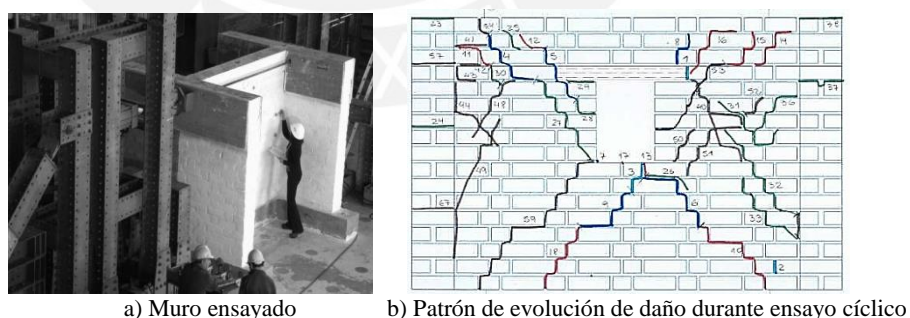


Figura 2.17. Ensayos cíclicos realizados por Blondet en 2005 (Tarque et al., 2014)

Bolhassani et al., en 2015, realizaron ensayos de compresión axial, corte y tracción diagonal en distintas configuraciones de sistemas de albañilería de concreto hueca e inyectada con grout, además de ensayos en cubos de mortero a compresión simple. Adicionalmente, modelaron numéricamente las configuraciones de albañilería en el programa Abaqus con micromodelos simplificados.

Respecto a los ensayos de compresión axial, las muestras empleadas se construyeron con tres bloques de ancho por tres de alto, si se trató de albañilería hueca; y dos bloques y medio de ancho por tres de alto para la albañilería inyectada. Las dimensiones de los bloques fueron de 194 mm de espesor, 397 mm de largo y 195 mm de alto, las cuales se aprecian en la Figura 2.18.

La deformación fue registrada mediante LVDTs y la carga se aplicó con una máquina MTS con control de carga. La información recabada fue una resistencia promedio del mortero de 12,6 MPa, resistencia promedio del grout de 23,4 MPa, resistencia promedio de los prismas huecos de 19,8 MPa, y para los prismas inyectados, 25,4 MPa. Los resultados en los prismas se resumen en la Tabla 2.7 los cuales se calcularon empleando el área bruta transversal de los prismas. Por otro lado, el modo de falla que se observó fue fisuras verticales iniciadas en el centro de los elementos y que se expandieron hacia los extremos del mismo, para el caso de los prismas huecos; y fisuras diagonales, para el caso de los prismas inyectados.

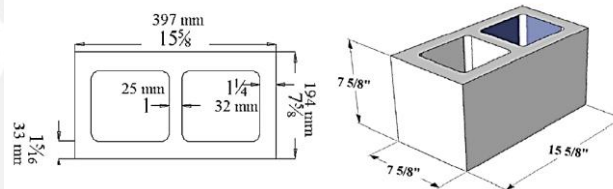


Figura 2.18. Configuración de la unidad de albañilería (Bolhassani et al., 2015)

Tabla 2.7. Resultados de ensayos a compresión axial en prismas (adaptado de Bolhassani et al., 2015)

| Tipo de espécimen | Rótulo | Esfuerzo MPa | Promedio MPa |
|-------------------|--------|--------------|--------------|
| Sin grout | PU1 | 17,9 | 19,8 |
| | PU2 | 20,7 | |
| | PU3 | 20,7 | |
| Con grout | PG1 | 21,6 | 25,4 |
| | PG2 | 29,1 | |

El ensayo de compresión diagonal se desarrolló con el ensamblaje de muretes de seis unidades de alto por 3 unidades de largo. Las dimensiones de las unidades de concreto fueron similares a las del caso previo. Además, la instrumentación realizada fue la misma. En la albañilería sin grout se presentaron fallas que siguieron la dirección de la interfaz unidad/grout en la diagonal principal de la muestra; en cambio, en la albañilería inyectada, la falla atravesó tanto unidades de concreto como la interfaz unidad/grout.

Los resultados se calcularon con el área neta por donde se presentó la falla (diagonal vertical, asumida como un porcentaje del área bruta) y se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Resultados del ensayo de compresión diagonal (Bolhasani et al., 2015)

| Tipo de espécimen | Rótulo | Esfuerzo MPa | Promedio MPa |
|-------------------|--------|--------------|--------------|
| Sin grout | DTU1 | 0,63 | 0,52 |
| | DTU2 | 0,45 | |
| | DTU3 | 0,43 | |
| | DTU4 | 0,55 | |
| Con grout | DTG1 | 1,50 | 1,12 |
| | DTG2 | 1,00 | |
| | DTG3 | 0,85 | |

Por último, en la investigación de Bolhassani et al. (2015), se empleó las propiedades mecánicas promedio de las pilas PU1, PG1 y de los muros DTU1 y DTG1 para realizar los modelos numéricos respectivos. Sin embargo, parámetros como el coeficiente de Poisson, o la viscosidad fueron referenciados en la literatura existente. Los modelos contaron con mallas cúbicas de 50x50x50 mm; y, a diferencia de los ensayos en laboratorio, en Abaqus se simuló un control de desplazamiento y no de carga.

El micromodelo representó a la interfaz mortero/bloque y a los bloques como un todo homogéneo, mientras que al mortero inyectado en los alveolos de los bloques como una unidad independiente, estos elementos de contacto se emplearon como discontinuidades usando comportamiento basado en “superficie cohesiva” (Bolhassani et al., 2015). En la Figura 2.19, se muestra la malla realizada para los modelos numéricos de cada tipo de ensayo y las condiciones de borde asignadas.

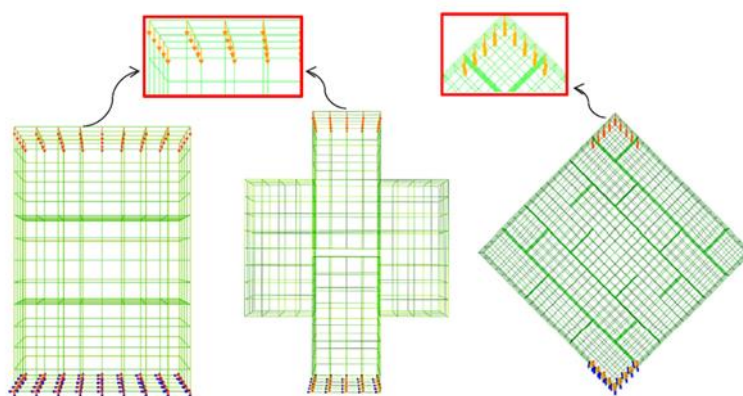


Figura 2.19. Malla y condiciones de borde de los modelos (Bolhassani et al., 2015)

A continuación, en la Tabla 2.9 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas que emplearon los autores para la realización de su modelo numérico y en la Tabla 2.10, los resultados que se obtuvieron.

Tabla 2.9. Propiedades mecánicas para el modelo (adaptado de Bolhassani et al., 2015)

| Espécimen | Módulo de elasticidad MPa | Coefficiente de Poisson ν | Densidad N/mm ³ |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Hueco | 26 200 | | |
| | | 0,2 | 0.26 |
| Inyectado | 33 700 | | |

Tabla 2.10. Resultados del modelo numérico (Bolhassani et al., 2015)

| Albañilería hueca | | | | Albañilería inyectada con grout | | | |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Compresión | | Tensión | | Compresión | | Tensión | |
| Esfuerzo de fluencia MPa | Deformación inelástica | Esfuerzo de fluencia MPa | Deformación de rotura | Esfuerzo de fluencia MPa | Deformación inelástica | Esfuerzo de fluencia MPa | Deformación de rotura |
| 13,8 | 0 | 0,64 | 0 | 17,4 | 0 | 1,5 | 0 |
| 17,2 | 0,00012 | 0,62 | 0,00006 | 20,7 | 0,0003 | 1,15 | 0,00029 |
| 17,9 | 0,00032 | 0,34 | 0,00028 | 21,6 | 0,0005 | 0,83 | 0,00044 |
| 13,8 | 0,00057 | 0,21 | 0,00045 | 20,9 | 0,001 | 0,3 | 0,00092 |
| 7,6 | 0,00131 | 0,12 | 0,00079 | 19,6 | 0,0015 | 0,1 | 0,003 |
| 4,4 | 0,00191 | 0,05 | 0,00139 | 15,1 | 0,0029 | 0,06 | 0,0045 |
| 2,2 | 0,00245 | 0,03 | 0,00299 | 10,3 | 0,0045 | 0,05 | 0,0053 |
| 1 | 0,00295 | 0,02 | 0,00349 | 2 | 0,0099 | --- | --- |

En las investigaciones existentes, se encuentran numerosos estudios de la albañilería de adobe, las cuales presentan un comportamiento estructural similar a la de arcilla pero con valores de esfuerzos inferiores. A continuación se resume algunas investigaciones en adobe.

En 2015, Miccoli, Garofano, Fontana, & Müller desarrollaron el ensayo de un muro de albañilería de adobe. Se sostuvo el elemento a esfuerzos de compresión axial, esfuerzos de corte y esfuerzos de compresión diagonal. Del ensayo, se obtuvieron las propiedades mecánicas y se realizaron modelos numéricos con un enfoque macro, para luego realizar un micromodelo. Con ello, se pudo incluir todos los posibles mecanismos de falla y se encontró conformidad del modelo con el ensayo de corte. Las dimensiones de los bloques de adobe fueron de 240 mm de ancho, 71,5 mm de alto y 115 mm de espesor. Por otro lado, las dimensiones del muro fueron de 500 mm de ancho, 500 mm de alto y 115 mm de espesor; y el espesor de junta fue de 20 mm.

El ensayo de compresión axial se realizó en cinco muros con una máquina universal MTS y mediante control de desplazamiento. Para el registro de deformaciones se emplearon LVDTs. Estos se colocaron en las dos caras de la pared en dirección paralela y perpendicular a la dirección de aplicación de la carga. Los resultados de este ensayo se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Resultados del ensayo de compresión axial en muros de adobe, (adaptado de Miccoli et al., 2015)

| Rótulo | Resistencia a compresión | |
|----------|--------------------------|---------------------------|
| | MPa | Módulo de elasticidad MPa |
| EBMC_1 | 2,71 | 1071 |
| EBMC_2 | 3,54 | 684 |
| EBMC_3 | 3,19 | 963 |
| EBMC_4 | 3,77 | 710 |
| EBMC_5 | 3,20 | 587 |
| Promedio | 3,28 | 803 |

El ensayo de compresión diagonal se realizó en condiciones similares a las de la presente investigación. Los muros fueron girados 45 grados respecto a su eje medio, de manera que una de las diagonales del muro terminó perpendicular a la dirección de la aplicación de la carga. En este caso, se ensayó 12 muros y de igual manera mediante un control de desplazamiento. Las deformaciones fueron registradas con LVDTs colocados en una de las caras de la muestra y, adicionalmente, con un registro estereográfico del movimiento de dos puntos marcados sobre el panel. Las dimensiones de estos muros fueron las mismas que se emplearon para el ensayo previo. De los resultados se obtuvo un esfuerzo de corte promedio de 0,21 MPa y un módulo de corte de 397 MPa. En la Figura 2.20 se aprecian los esquemas de los ensayos a compresión axial y diagonal.

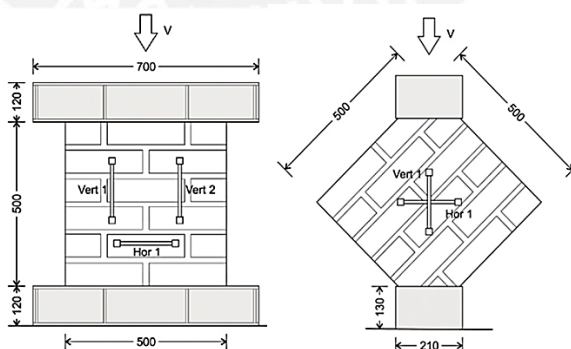


Figura 2.20. Esquemas de los ensayos a compresión axial y diagonal (Miccoli et al., 2015)

Luego de los ensayos en laboratorio, Miccoli et al. iniciaron su modelo numérico con un macromodelo en el programa DIANA y se trabajó con modelos bidimensionales, es decir, elementos *shell*. Por un lado, para el modelo bajo compresión axial se representó superficies de 500x500 mm²; el espesor asignado fue de 115 mm; las condiciones borde inferior y superior

se modelaron con dos vigas rígidas de acero; y la malla se compuso por 484 elementos de $22,73 \times 22,73 \text{ mm}^2$, los cuales tuvieron 8 nodos; la malla se aprecia en la Figura 2.22. Lo que se puede mencionar de la comparación de resultados experimentales y numéricos realizada por los autores es la gran aproximación que refleja el modelo con el ensayo en lo que refiere al esfuerzo de compresión axial; sin embargo, el patrón de falla no fue válido puesto que se obtuvo un patrón de falla simétrico en forma de “V” que se formó desde el centro del modelo, mientras que en la realidad las fallas fueron asimétricas, ver la Figura 2.21. En la Tabla 2.12 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas que emplearon los autores en su macro-modelo.

Tabla 2.12. Propiedades mecánicas asignadas al macromodelo (adaptado de Miccoli et al., 2015)

| Esfuerzo a compresión promedio MPa | Esfuerzo de Tracción MPa | Módulo de elasticidad MPa | Coficiente de Poisson ν |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 3,28 | 0,3 | 803 | 0,37 |

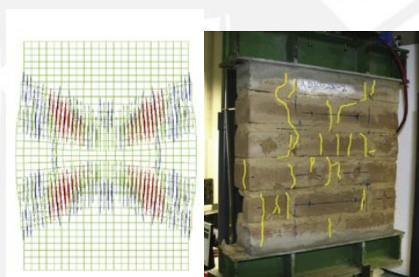


Figura 2.21. Patrones de falla obtenidos en el modelo numérico y en el ensayo de muros (Miccoli et al., 2015)

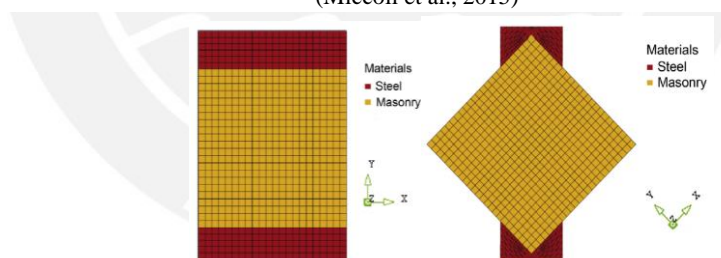


Figura 2.22. Mallas y materiales asignados para los modelos de compresión axial y diagonal (Miccoli et al., 2015)

Por otro lado, en el caso de compresión diagonal se generó una malla con 576 elementos de $21,29 \times 21,29 \text{ mm}^2$, los cuales fueron también de 8 nodos en la albañilería pero de 6 nodos en los elementos que simularon las placas de acero donde se aplicó la carga y con forma triangular. Las propiedades mecánicas empleadas fueron las mismas que para el ensayo previo y los valores de esfuerzo de corte alcanzados fueron representativos de la envolvente de valores que se obtuvo en el laboratorio; sin embargo; el patrón de falla tampoco logró representar lo ocurrido en la experiencia.

La malla realizada y el patrón de falla en el modelo se muestran en la Figura 2.23.

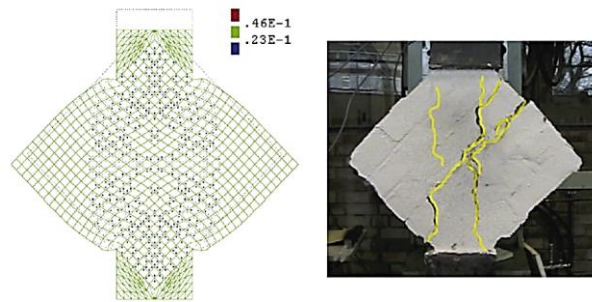


Figura 2.23. Patrón de falla en el modelo (izquierda) y en el ensayo (derecha) de muretes (Miccoli et al., 2015)

2.6 Características básicas del programa Abaqus

En la Figura 2.24, se muestra cuáles son los sistemas de referencia empleados por el software Abaqus para el sistema global y su correspondencia con el sistema local.

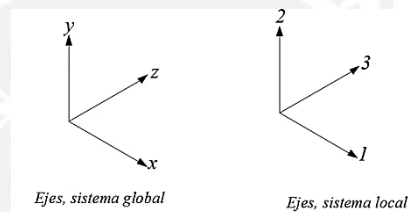


Figura 2.24. Sistemas de referencia

En la Figura 2.25, se aprecia un esquema de lo que consiste un elemento *shell* para el programa. Las dimensiones de importancia son sus longitudes en el eje x e y , o ejes 1 y 2 en el sistema de referencias local. La dimensión en el eje 3 es un espesor mínimo, respecto a las otras dimensiones, y se indica al momento de definir las propiedades de la sección, por lo tanto, se consideran como superficies (áreas).

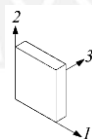


Figura 2.25. Elemento shell

En la Figura 2.26 se muestra un esquema referencial de lo que son los elementos finitos en un modelo numérico, así como los nodos presentes en cada uno de ellos. En los nodos de cada elemento finito, el programa aplica las cargas o desplazamientos definidos por el usuario, así como calcula las respuestas del material.



Figura 2.26. Representación de los elementos finitos del modelo y sus nodos

3. CAPÍTULO III: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Este capítulo refiere a los procedimientos que se siguieron para la construcción de las pilas y muretes de albañilería; la descripción de los ensayos a compresión uniaxial en pilas y compresión diagonal en muretes que se realizaron en marzo y abril de 2016, así como, los resultados de resistencia a compresión, resistencia a corte, módulo de elasticidad y módulo de corte calculados a partir de la data de laboratorio. Los resultados de este capítulo se emplearon para el modelamiento numérico que se presenta en el siguiente capítulo.

3.1 Pilas de albañilería

3.1.1 Construcción de las pilas

Se construyeron cuatro pilas que se compusieron por unidades de ladrillo King Kong de 18 huecos, capas de mortero y una capa superior e inferior de refrentado. Las dimensiones nominales de las pilas fueron las siguientes: 600 mm de alto, 230 mm de ancho y 130 mm de espesor. En la Figura 3.1 se muestra una de las unidades de ladrillo que se emplearon.



Figura 3.1. Unidad de albañilería de 18 huecos, vista en planta

En primer lugar, se humedecieron las unidades de albañilería durante 15 horas; luego, se preparó la mezcla de mortero con dosificación arena:cemento de 1:4; después, se colocó el primer ladrillo sobre una superficie horizontal y se rellenó totalmente sus agujeros con el mortero; se colocó sobre la superficie una capa de mortero de 10 mm de espesor; luego, se colocó el segundo ladrillo encima y se repitió el procedimiento. Cada 2 hiladas se verificó la horizontalidad y verticalidad de la pila con el uso de una plomada. En la *Figura 3.2 a)* se muestra una foto de la mezcla de mortero que se preparó y en *b)* el uso de la plomada en el proceso constructivo de las pilas.



Figura 3.2. (a) Mezcla de mortero, (b) nivelado de ladrillos con plomada

En la Figura 3.3 a) se presenta una foto del proceso de verificación de espesor de juntas de mortero y en b), una pila con todas las unidades asentadas.

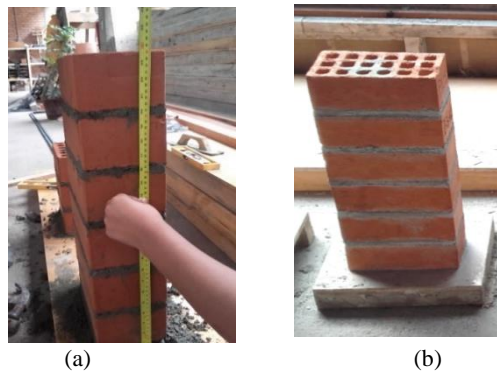


Figura 3.3. (a) Control de espesor de junta, (b) ladrillos asentados

Cuando las juntas de mortero secaron, se colocó una capa en la cima y base de la pila hecha de yeso y azufre, la cual se preparó en el laboratorio. Este refrentado se aplicó hasta alcanzar el espesor necesario para nivelar horizontalmente ambas superficies y evitar fallas inducidas durante el ensayo de compresión. En la Figura 3.4 se aprecia el refrentado en la cima de las pilas.



Figura 3.4. (a) Refrentado sobre superficie de pilas, (b) pilas terminadas

3.1.2 Descripción del ensayo

Se ensayó cada pila a compresión uniaxial. Para la aplicación de la fuerza sobre la pila se empleó una Máquina Universal con una gata hidráulica de 200 toneladas de capacidad. Las deformaciones se registraron con tres LVDTs; dos para lectura local de deformaciones (colocados en caras opuestas como se aprecia en la Figura 3.6 a) y uno para lectura global, con 20 mm y 50 mm de deformación máxima, respectivamente. En la Figura 3.5 se indican las dimensiones nominales y se aprecian las juntas de mortero y las superficies de refrentado.

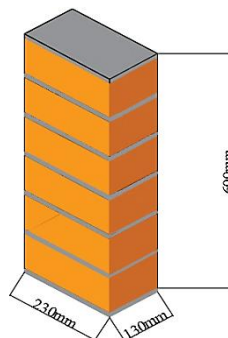


Figura 3.5. Dimensiones nominales de las pilas ensayadas

La pila PL-01 se ensayó mediante control de desplazamiento a una velocidad de 0,5 mm/min. Sin embargo, las pilas, PL-02, PL-03 Y PL-04, se precargaron primero con 25 kN, mediante control de carga, para proseguir el ensayo con control de desplazamiento a 0,5mm/min. Ello con el fin de reducir el tiempo de los ensayos. Los ensayos se detuvieron cuando se alcanzó la carga de rotura. En la Figura 3.6 a) se muestra la instrumentación de la pila PL-01 con los LVDTs, y en b) a la pila ubicada en la Máquina Universal antes del ensayo de compresión uniaxial.

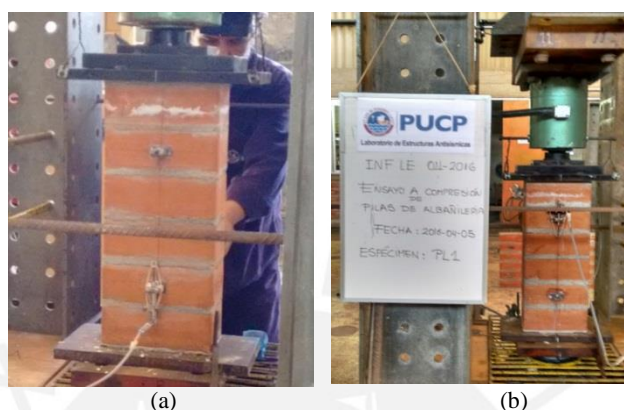


Figura 3.6. a) Instrumentación de la pila PL-01, b) pila PL-01 antes del ensayo de compresión uniaxial

En la Tabla 3.1, se detallan las dimensiones reales de las pilas, las cuales fueron medidas el día del ensayo. Además, en la última columna se ha indicado los valores del área de la sección transversal horizontal de cada pila.

Tabla 3.1. Dimensiones reales de las pilas

| Rótulo | Altura mm | Ancho mm | Espesor mm | Área mm ² |
|--------|-----------|----------|------------|----------------------|
| PL-01 | 592 | 235 | 125 | 29 375 |
| PL-02 | 590 | 234 | 127 | 29 718 |
| PL-03 | 593 | 235 | 126 | 29 610 |
| PL-04 | 590 | 236 | 125 | 29 500 |

En las siguientes figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se aprecian los estados finales de las pilas después de los ensayos. Se puede notar que las pilas PL-01, PL-02 y PL-03 fallaron en zonas próximas a la superficie donde se aplicó la carga y se formaron grietas verticales a lo largo de cada pila. Por el contrario, la pila PL-04 falló en una esquina inferior pero también presentó grietas verticales en el cuerpo del espécimen.

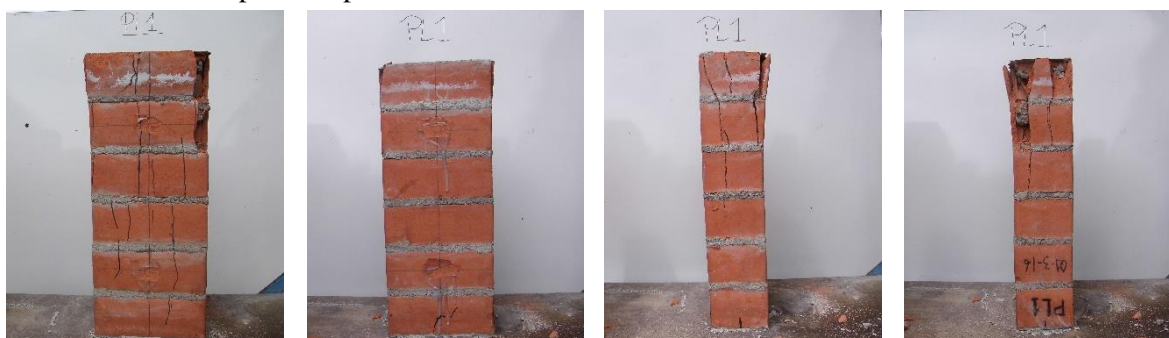


Figura 3.7. Falla en pila PL-01 vista desde las cuatro caras de la misma



Figura 3.9. Falla en pila PL-02 vista desde las cuatro caras de la misma



Figura 3.8. Falla en pila PL-03 vista desde las cuatro caras de la misma



Figura 3.10. Falla en pila PL-04 vista desde las cuatro caras de la misma

3.1.3 Resultados de ensayo

3.1.3.1 Cálculo de resistencia máxima (F_m)

De los ensayos, se obtuvo una data de carga y deformación respectiva para cada pila. Con los valores máximos de carga, registrados por los LVDTs globales, se calculó los esfuerzos máximos a compresión de cada pila, F_m , al dividirlos entre el área transversal respectiva como se indica en la fórmula mostrada líneas abajo, los resultados se presentan en la Tabla 3.2.

$$\text{Área bruta transversal} = \text{Espesor} * \text{Largo} \quad (1)$$

$$F_m = \frac{\text{Fuerza}_{\text{máx}}}{\text{Área bruta trasnversal}} \quad (2)$$

Tabla 3.2. Esfuerzos máximos de compresión axial

| Rótulo | Área transversal mm ² | Carga kN | F _m MPa |
|--------|-------------------------------------|-------------|-----------------------|
| PL-01 | 29 375 | 317,96 | 10,82 |
| PL-02 | 29 718 | 292,23 | 9,83 |
| PL-03 | 29 610 | 282,10 | 9,53 |
| PL-04 | 29 500 | 323,52 | 10,97 |

3.1.3.2 Cálculo de resistencia característica promedio (F'_m)

Conocidos los valores de resistencia, se calcularon, de acuerdo al procedimiento indicado por la Norma de Albañilería E.070, las resistencias características de cada pila ensayada. Para ello, primero se corrigieron los valores de resistencia con factores de corrección por esbeltez que se obtuvieron a partir de una tabla propuesta por la Norma de Albañilería y que se muestra en la Tabla 3.3. Luego, a partir de las resistencias a compresión corregidas (F_m^*) se calculó el valor promedio de dichas resistencias ($\overline{F_m^*}$) y la desviación estándar respectiva. La desviación estándar se restó a la resistencia promedio y se obtuvo la resistencia a compresión característica promedio de todas las pilas. En la Tabla 3.4 se resumen los resultados descritos.

$$\text{esbeltez} = \text{altura/espesor} \quad (3)$$

$$F_m^* = F_m * (\text{Factor}), \text{ donde Factor es el factor de corrección por esbeltez} \quad (4)$$

$$\overline{F_m^*} = \frac{\sum F_m^*}{4} \quad (5)$$

$$D.E. = \text{desviación estándar de las resistencias } \overline{F_m^*}$$

$$F'_m = \overline{F_m^*} - D.E. \quad (6)$$

Tabla 3.3. Factores de corrección de F_m por esbeltez de acuerdo a la Norma E.070

| | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| Esbeltez | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Factor | 0,73 | 0,80 | 0,91 | 0,95 | 0,98 | 1,00 |

Tabla 3.4. Resistencia a compresión de cada pila y característica promedio

| Rótulo | F_m MPa | Esbeltez | Factor (*) | F_m^* MPa | $\overline{F_m^*}$ Mpa | D.E. MPa | F'_m MPa |
|--------|--------------|----------|------------|----------------|---------------------------|-------------|---------------|
| PL-01 | 10,82 | 4,74 | 0,990 | 10,71 | | | |
| PL-02 | 9,83 | 4,65 | 0,986 | 9,70 | | | |
| PL-03 | 9,53 | 4,71 | 0,988 | 9,42 | 10,17 | 0,71 | 9,45 |
| PL-04 | 10,97 | 4,72 | 0,989 | 10,84 | | | |

3.1.3.3 Cálculo del módulo de elasticidad de la albañilería (E_m)

Adicionalmente, se identificaron las cargas equivalentes al 20% y 50% de la carga máxima de ensayo. Con dichas cargas, se definió una variación de fuerzas y de deformaciones. A partir de ello, se halló el módulo de elasticidad por sensor (cara anterior y posterior) en cada pila, y finalmente, se obtuvieron los valores promedio por pila. El cálculo del módulo de elasticidad se basó en la Ley de Hooke: Los porcentajes de 20 y 50 % se eligieron para realizar los cálculos que se mencionan en un rango que se considera elástico según la literatura y la visualización de las gráficas fuerza-deformación.

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (7)$$

Donde σ representa el esfuerzo axial en el material (fuerza por unidad de área) y ε la deformación unitaria presentada (deformación por unidad de longitud). Con lo cual se tiene la siguiente expresión:

$$E_{m1} = \frac{(\Delta F \times L)}{(A \times \Delta \delta_1)} \quad (8)$$

$$E_{m2} = \frac{(\Delta F \times L)}{(A \times \Delta \delta_2)} \quad (9)$$

Donde E_{m1} hace referencia al módulo de elasticidad calculado a partir de los resultados del LVDT colocado en la cara anterior del espécimen y E_{m2} en la cara posterior del espécimen.

$$\bar{E}_m = \frac{\sum E_m}{2} \quad (10)$$

Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Tabla 3.5. En ella se indican los esfuerzos calculados para cada sensor y pila según el procedimiento indicado en líneas anteriores. Como se observa en la tabla, los valores de módulo de elasticidad para los LVDT colocados en la cara posterior de la pila presentan mucha variabilidad respecto a los valores que se obtuvieron con el LVDT en la cara anterior; por tal motivo, se decidió emplear como promedio de cada pila el valor del módulo de elasticidad obtenido con los LVDT en la cara anterior de manera directa, con lo cual \bar{E}_m es igual a E_{m1} . Asimismo, se calculó el módulo de elasticidad promedio de las cuatro pilas. En la Tabla 3.5, P_1 representa la carga que es el 20% de la carga máxima de ensayo y P_2 la carga que es el 50% de la carga máxima.

Tabla 3.5. Esfuerzos de compresión y módulo de elasticidad calculados

| Rótulo | Sensor | Def. 20% | Def. 50% | P1 20% kN | P2 50% kN | E_m MPa | \bar{E}_m MPa | Prom. MPa | D.E MPa | E'_m MPa |
|--------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------|---------|------------|
| PL-01 | Anterior | 0,1048 | 0,2920 | 63,6 | 159,0 | 5 205,02 | 5 205,02 | 5 716 | 705 | 5 011 |
| | Posterior | 0,0940 | 0,2740 | | | 5 413,22 | | | | |
| PL-02 | Anterior | 0,1061 | 0,2400 | 58,4 | 146,1 | 6 609,48 | 6 609,48 | | | |
| | Posterior | 0,0558 | 0,2060 | | | 5 892,20 | | | | |
| PL-03 | Anterior | 0,0869 | 0,2310 | 56,4 | 141,1 | 5 950,36 | 5 950,36 | | | |
| | Posterior | 0,0579 | 0,1750 | | | 7 322,35 | | | | |
| PL-04 | Anterior | 0,1083 | 0,3020 | 64,7 | 161,8 | 5 100,83 | 5 100,83 | | | |
| | Posterior | 0,0586 | 0,1780 | | | 8 290,02 | | | | |

Con la data del laboratorio se obtuvieron las gráficas esfuerzo de compresión-deformación unitaria de cada pila, como se muestra en la Figura 3.11. En la gráfica de la pila PL-01 se debe comentar el cambio del sentido de la curva para una deformación unitaria aproximada de 0,02, esto se debió a un desajuste del LVDT. La primera grieta perceptible se produjo a una carga de 210 kN (7 MPa) y la carga máxima fue de 318 kN (10,7 MPa). En la gráfica de la pila PL-02 se observa una primera zona de valores mínimos de deformación, hasta alcanzar una deformación unitaria de 0,01, valor a partir del cual la curva empieza a subir. La primera grieta se registró para una carga de 200 kN (6,5 MPa) y la carga máxima fue 292 kN (10 MPa). La carga de fisuración para la pila PL-03 fue 255 kN (8,5 MPa), y de 282 kN el valor máximo (9,3 MPa). En la pila PL-04 la carga de fisuración fue de 210 kN (7 MPa) y la carga máxima 323 kN (10,8 MPa). Sin embargo, los datos registrados para la pila PL-04 presentaron algún error en el ensayo debido a que la gráfica que se obtuvo no representa el comportamiento típico de la albañilería en compresión, por ello, este último resultado se empleará solo para promediar la resistencia a compresión máxima del material, más no como guía en la etapa de modelación numérica.

Sin embargo, la data que se obtiene a partir de los LVDTs globales no es válida para obtener las curvas completas de esfuerzo-deformación unitaria, debido a que los LVDTs globales no registran únicamente la deformación desarrollada en la pila puesto que fueron colocados fuera del espécimen. La información útil que nos otorgan son los valores de carga máxima que alcanzan las pilas y un esbozo del comportamiento que tienen en compresión las pilas. Dichas gráficas referenciales luego fueron ajustadas de acuerdo con las ecuaciones planteadas por P.B. Lourenco (1996) para caracterizar las leyes constitutivas a compresión y tracción de la albañilería.

Se puede notar en la Figura 3.11 que existe una tendencia similar en las pendientes que presentan los tramos iniciales de las curvas de cada pila obtenidas con la data de los LVDTs globales; sin embargo, los valores numéricos de esfuerzo y deformación obtenidos sí difieren de manera más notoria debido a la imprecisión que existe en el registro de los LVDTs globales. A pesar de ello, para todas las pilas, las curvas inician con una tendencia lineal.

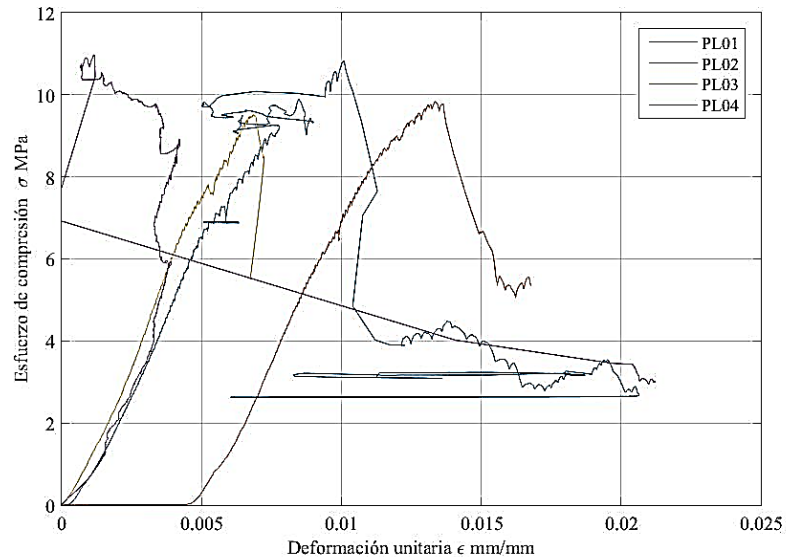


Figura 3.11. Gráfica global de esfuerzo-deformación unitaria de todas las pilas

La Figura 3.12 muestra las gráficas de esfuerzo de compresión-deformación unitaria local de las pilas tanto para la data del LVDT en la cara anterior (LVDT local 1) y el LVDT en la cara posterior (LVDT local 2). Como se mencionó anteriormente, para el cálculo del módulo de elasticidad del material se decidió emplear solo la data del LVDT 1; por ello, la gráfica que se muestra en la Figura 3.13 es de utilidad en el capítulo de modelado numérico para comparar los resultados de laboratorio con los numéricos.

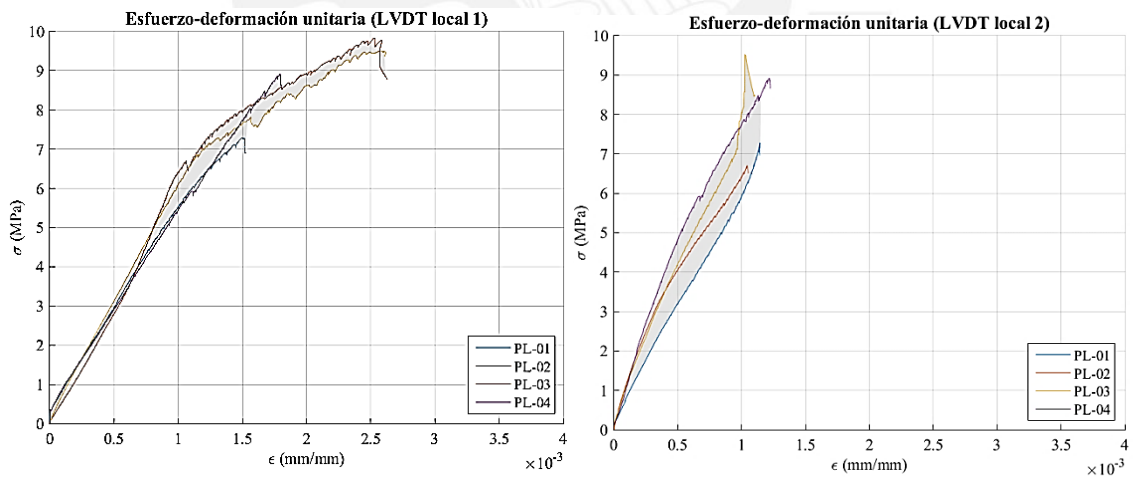


Figura 3.12. Gráficas locales esfuerzo de compresión-deformación unitaria a partir de LVDT 1 Y LVDT 2

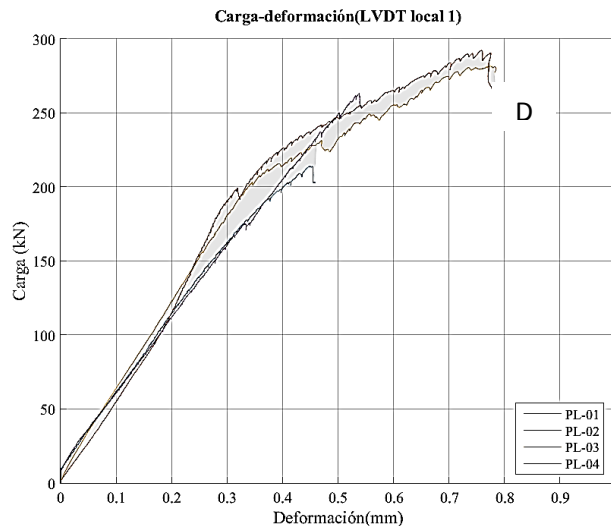


Figura 3.13. Gráfica local carga de compresión-desplazamiento, LVDT 1

3.2 Muretes de albañilería

3.2.1 Construcción de los muretes

Las unidades de ladrillo que se emplearon fueron del mismo tipo que en el caso de las pilas, King Kong de 18 huecos de $230 \times 130 \times 90 \text{ mm}^3$. Las juntas fueron hechas con mortero con dosificación cemento:arena de 1:4 y espesor de 10 mm, con el cual se rellenó los agujeros de las unidades y se colocó las capas de junta entre cada hilera de ladrillos. El refrentado se realizó en dos esquinas opuestas de los muretes que estuvieron en contacto con los actuadores de carga y fue hecho de yeso y azufre con un espesor tal que la superficie no presentara irregularidades. Las dimensiones nominales del murete son: 600mm de alto, 600 mm de largo y 130 mm de espesor. En cada hilada se colocaron 2,5 ladrillos aproximadamente.

En la Figura 3.14 (a) se muestra la mezcla de mortero que se elaboró en el laboratorio, en (b) dos muretes con los ladrillos ya asentados y en (c) un murete terminado y con las esquinas niveladas con el refrentado.

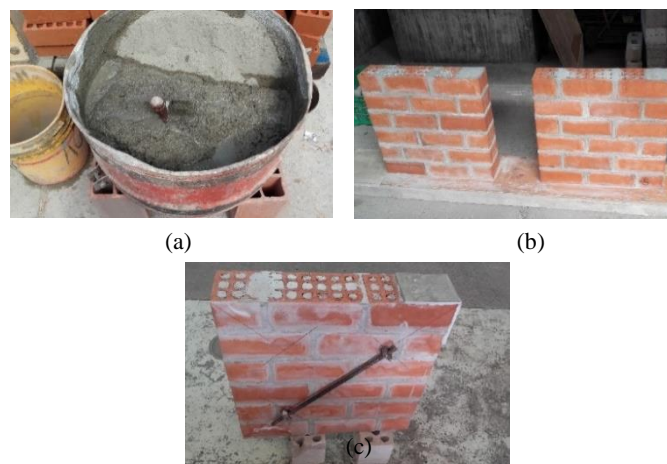


Figura 3.14. (a) Mezcla de mortero preparada, (b) hileras de ladrillos asentadas, (c) murete terminado e instrumentado

3.2.2 Descripción del ensayo

Se ensayaron a compresión diagonal los cuatro muretes de albañilería de arcilla. Los esquemas con las dimensiones nominales se presentan en la Figura 3.15. Para la aplicación de la fuerza sobre el murete se empleó una gata hidráulica con capacidad de 63 toneladas. Las deformaciones se registraron con dos pares de LVDTs; uno colocado en la diagonal horizontal y otro en la diagonal vertical como se muestra en la Figura 3.16, en solo una cara del elemento.

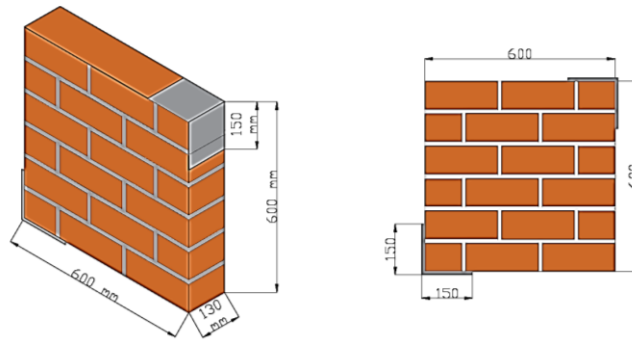


Figura 3.15. Esquema de los muretes ensayados



Figura 3.16 Instrumentación del murete MT4

En la Tabla 3.6, se detallan las dimensiones reales de los muretes que se midieron en el laboratorio antes de iniciar los ensayos.

Tabla 3.6. Dimensiones de los muretes

| Rótulo | Largo mm | Ancho mm | Espesor mm | Distancia entre LVDTs mm | |
|--------|-------------|-------------|---------------|-----------------------------|----------|
| | | | | Horizontal | Vertical |
| MT1 | 610,0 | 605,5 | 125,5 | 400 | 400 |
| MT2 | 605,5 | 601,5 | 127,0 | 400 | 400 |
| MT3 | 604,0 | 601,0 | 125,5 | 404 | 400 |
| MT4 | 606,5 | 604,5 | 126,5 | 400 | 400 |

En los ensayos de los muretes se observó que tres de ellos, MT2, MT3 Y MT4, fallaron siguiendo la dirección de la diagonal vertical y aproximándose a la interfaz mortero-ladrillo,

con rajaduras en ladrillos y mortero. En cambio, la falla en el MT1 se concentró en el punto de aplicación de la carga, es decir, en el ladrillo superior.

En las siguientes figuras 3.17, 3.18, 3.19, y 3.20, se aprecian a los muretes instrumentados para los ensayos y las fallas que presentaron después de que se alcanzó la carga máxima de compresión diagonal en cada caso.



Figura 3.19. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 1



Figura 3.20. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 2



Figura 3.18. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 3



Figura 3.17. Estado previo y posterior al ensayo del murete MT 4

3.2.3 Resultados de ensayo

En la Figura 3.21 se indican las variables que se emplearán para realizar el cálculo del esfuerzo de corte y módulo de corte en los muretes.

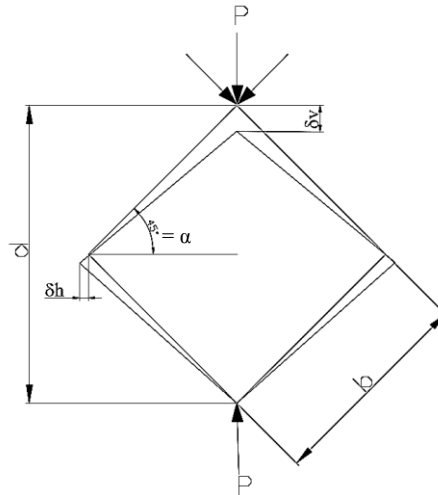


Figura 3.21. Esquema para el cálculo de módulo de corte y resistencia al corte en muretes

3.2.3.1 Cálculo de la resistencia de corte (V_m)

De los ensayos se obtuvo una data de carga aplicada, deformación correspondiente, y carga de rotura para cada murete. Con dichos valores y empleando la ecuación que se detalla a continuación, se pudieron conocer las resistencias a compresión diagonal V_m de cada murete.

$$V_m = \frac{P}{\sqrt{2}bt} \quad (11)$$

Donde P es la carga máxima aplicada, b es el ancho del espécimen y t es el espesor o profundidad de la sección.

3.2.3.2 Cálculo de la resistencia característica de corte (\bar{V}'_m)

Se calculó el promedio de las resistencias de corte máximas de los muretes y la desviación estándar asociada a dicho valor promedio.

$$\bar{V}_m = \frac{\sum V_m}{4} \quad (12)$$

$D.E.$ = desviación estándar

Por último, se restó la resistencia promedio calculada con la desviación estándar para obtener la resistencia al corte característica, como se indica en la Norma E.070.

$$\bar{V}'_m = \bar{V}_m - D.E. \quad (13)$$

En la Tabla 3.7 se resumen las resistencias promedios por murete y la resistencia característica promedio del material ensayado.

Tabla 3.7. Resistencia a la compresión diagonal en los muretes

| Rótulo | Carga máxima kN | V _m MPa | \bar{V}_m MPa | D.E. MPa | \bar{V}'_m MPa |
|--------|--------------------|-----------------------|--------------------|-------------|---------------------|
| MT1 | 137,77 | 1,28 | | | |
| MT2 | 139,34 | 1,29 | | | |
| MT3 | 151,51 | 1,42 | 1,39 | 0,14 | 1,25 |
| MT4 | 170,94 | 1,57 | | | |

3.2.3.3 Cálculo del módulo de corte de la albañilería (*Gm*)

Gracias a las deformaciones registradas con los LVDTs instrumentados en la diagonal vertical y horizontal de los muretes, se pudo calcular el módulo de corte de la albañilería. Para ello, en primer lugar, se calculó las cargas que representaban el 20% y el 50% de la carga máxima alcanzada durante el ensayo. Obtenidas estas cargas, se leyó los desplazamientos que les correspondían a dichas cargas en la data obtenida en el laboratorio, tanto los desplazamientos verticales como horizontales. Lo que se buscó al ubicar un rango entre los porcentajes de carga máxima indicados fue considerar que el módulo de corte se calcule dentro del rango elástico del material. Los resultados parciales se muestran en la Tabla 3.8 y Tabla 3.9.

Tabla 3.8. Cargas y desplazamientos verticales al 20 y 50 % de la carga máxima (LVDT vertical)

| Rótulo | Carga máxima kN | 20% de P _{máx} | | 50% de P _{máx} | |
|--------|--------------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | | P1 Kn | D1 mm | P2 kN | D2 mm |
| MT1 | 137,77 | 27,6 | 0,0325 | 68,9 | 0,0953 |
| MT2 | 139,34 | 27,9 | 0,0219 | 69,7 | 0,0830 |
| MT3 | 151,51 | 30,3 | 0,0220 | 75,8 | 0,0750 |
| MT4 | 170,94 | 34,2 | 0,0397 | 85,5 | 0,0960 |

Tabla 3.9. Cargas y desplazamientos al 20 y 50 % de la carga máxima (LVDT horizontal)

| Rótulo | Carga máxima kN | 20% de P _{máx} | | 50% de P _{máx} | |
|--------|--------------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | | P1 kN | D1 mm | P2 kN | D2 mm |
| MT1 | 137,77 | 27,6 | -0,00010 | 68,9 | -0,0123 |
| MT2 | 139,34 | 27,9 | -0,01016 | 69,7 | -0,030 |
| MT3 | 151,51 | 30,3 | -0,00370 | 75,8 | -0,017 |
| MT4 | 170,00 | 34,2 | -0,00670 | 85,5 | -0,023 |

Con la fórmula mostrada previamente para el cálculo de esfuerzos máximos, se calculó los esfuerzos de corte para cada carga (20% y 50%). Luego, se calculó un delta de esfuerzo para cada murete como se indica a continuación.

$$\tau = \frac{\Delta P}{\sqrt{2}bt} \quad , \text{ donde } t \text{ es el espesor del murete y } b \text{ el lado del murete.} \quad (14)$$

$$\Delta\tau = \tau_{50\%} - \tau_{20\%} \quad , \quad (15)$$

Se halló también, las deformaciones unitarias horizontal y vertical correspondientes a las cargas de 20% y 50% de la carga máxima para cada murete; luego, se halló un delta de deformación unitaria con las fórmulas que se presentan.

$$\gamma = \left(\tan \alpha + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(\frac{|\delta_v| + |\delta_h|}{2d} \right) \quad (16)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_{50\%} - \gamma_{15\%} \quad (17)$$

Donde d es la distancia entre LVDTs, δ_v es el acortamiento en la diagonal vertical, δ_h es el alargamiento en la diagonal horizontal y α es el ángulo que se forma entre un plano horizontal y cualquiera de las aristas del murete si se asume que este es regular.

Por último, con los deltas de esfuerzo y deformación unitaria se halló el módulo de corte del material.

$$G_m = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (18)$$

Donde τ es el esfuerzo de corte (calculado de ensayo), γ es la deformación unitaria de corte y G_m el módulo de corte. En la Tabla 3.10 se presentan los módulos de corte calculados.

Tabla 3.10. Módulos de corte calculados para los muretes

| Rótulo | LVDT | $\Delta\tau$ MPa | $\Delta\gamma$ | G_m MPa | $\overline{G_m}$ MPa |
|--------|------------|---------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| MT1 | Vertical | 0,38 | 0,00019 | 2041,87 | 2271,77 |
| | Horizontal | | | | |
| MT2 | Vertical | 0,39 | 0,00020 | 1904,25 | |
| | Horizontal | | | | |
| MT3 | Vertical | 0,43 | 0,00017 | 2554,24 | |
| | Horizontal | | | | |
| MT4 | Vertical | 0,47 | 0,00018 | 2586,72 | |
| | Horizontal | | | | |

3.2.3.4 Cálculo del coeficiente de Poisson (ν)

De manera adicional, se calculó el coeficiente de Poisson con la fórmula que se presenta a continuación. Se obtuvo un valor de 0,26 con los valores promedio de E y G . Cabe resaltar que esta ecuación es válida para un material isotrópico, sin embargo, para esta investigación se asumirá este valor de Poisson de manera referencial, para un trabajo más certero, debe incluirse medidores de deformación en caras perpendiculares del elemento para poder calcular el valor real de este coeficiente.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (19)$$

$$\nu = 0,26$$

En la Tabla 3.11 se resumen las propiedades mecánicas, obtenidas de los ensayos a compresión axial y compresión diagonal.

Tabla 3.11. Resumen de propiedades mecánicas para los modelos numéricos

| Ensayo | | | | | Literatura |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| E_m MPa | F_m promedio MPa | G_m promedio MPa | τ_m promedio MPa | Coefficiente de Poisson ν | Densidad N/mm^3 |
| 5720 | 10 | 2270 | 1,4 | 0,26 | 1,376E-09 |

A continuación, se presentan las gráficas esfuerzo-deformación unitaria obtenidas a partir de los resultados de laboratorio.

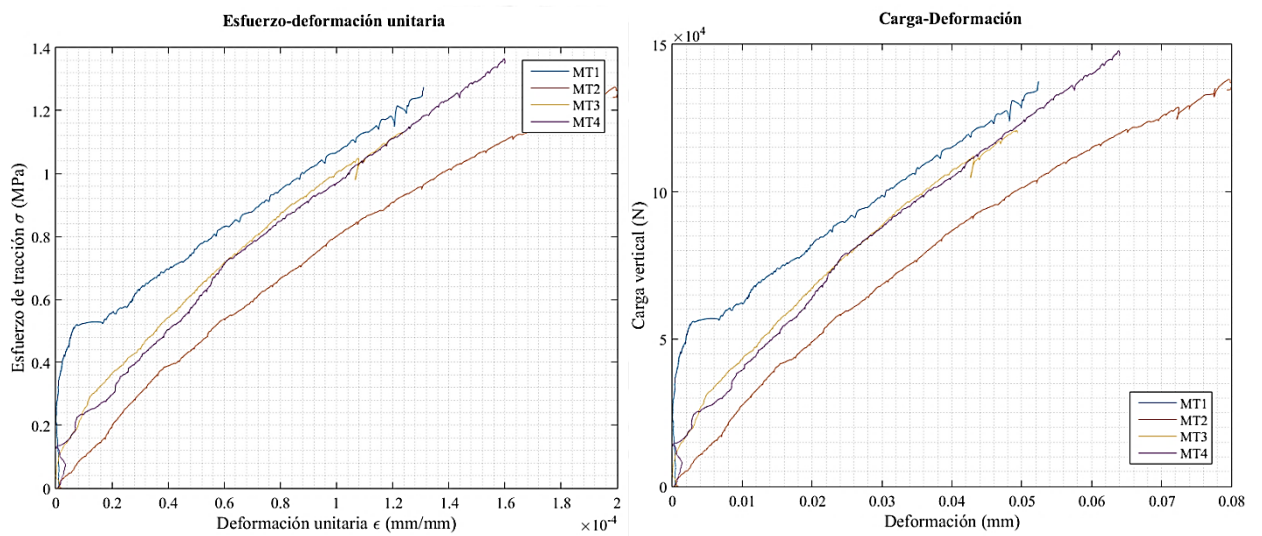


Figura 3.22. Gráficas a) esfuerzo de tracción-deformación unitaria b) carga-deformación, HORIZONTAL

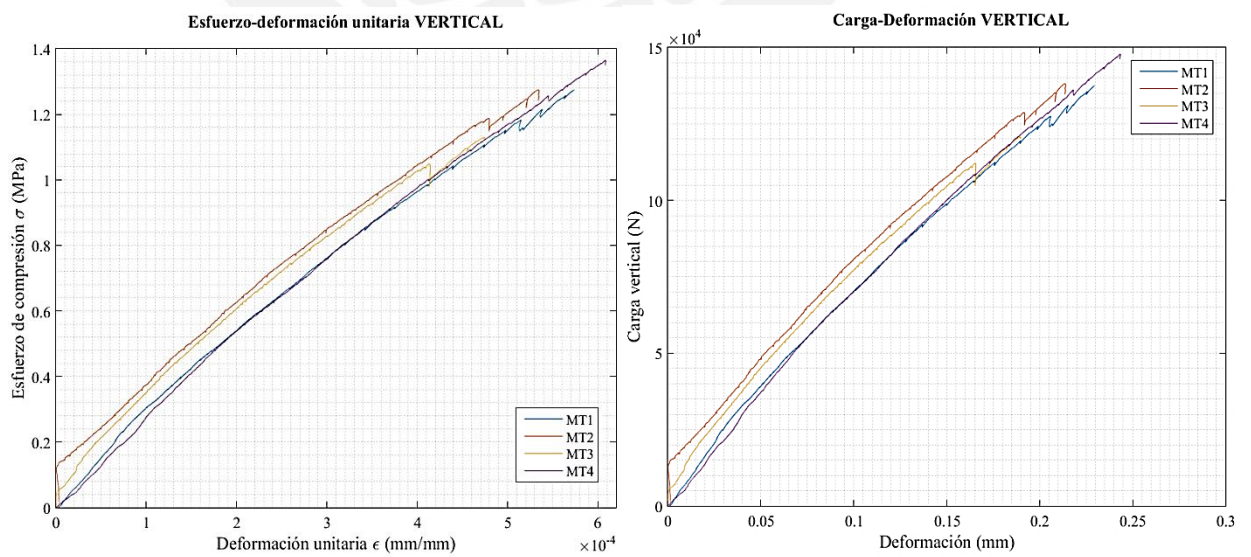


Figura 3.23. Gráficas a) esfuerzo de compresión-deformación unitaria b) carga-deformación, VERTICAL

4. CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO NUMÉRICO

En este capítulo se describen el procedimiento y los resultados obtenidos de los modelos numéricos de pilas y muretes realizados, para ello, se empleó el Método de Elementos Finitos y los resultados de ensayo del Capítulo 3. Además, se trabajó con el programa Abaqus y se calibró el comportamiento plástico de la albañilería.

En la Figura 4.1 se muestran los esquemas de los ensayos que se realizaron en el laboratorio, así como las dimensiones nominales de los especímenes.

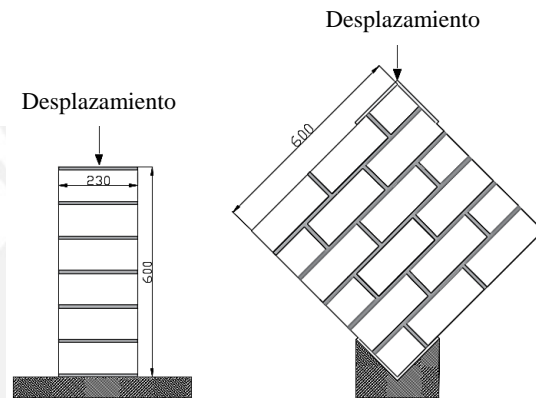


Figura 4.1. Modelos de la pila y murete empleado para el análisis numérico

4.1 Leyes constitutivas

Para describir el comportamiento plástico de la albañilería de arcilla, se emplearon las leyes constitutivas de compresión y tracción propuestas por Lourenço (1996).

4.1.1 Modelo para compresión

Las ecuaciones que definen los parámetros propuestos por Lourenço se presentan a continuación.

$$\bar{\sigma}_a(k_3) = \bar{\sigma}_i + (\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}_i) \sqrt{\frac{2k_3}{k_p} - \frac{k_3^2}{k_p^2}} \quad (20)$$

$$\bar{\sigma}_b(k_3) = \bar{\sigma}_p + (\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_p) \left(\frac{k_3}{k_m} - \frac{k_p}{k_m} \right)^2 \quad (21)$$

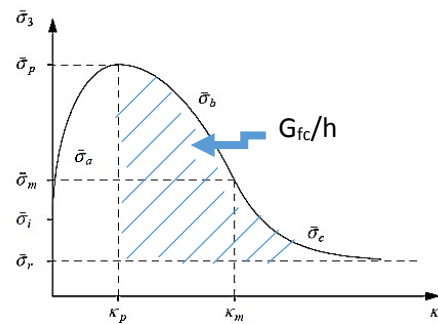
$$\bar{\sigma}_c(k_3) = \bar{\sigma}_r + (\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_r) \exp \left(m \frac{k_3}{\sigma_m} - \frac{k_p}{k_p} \right)^2 \quad (22)$$

$$m = 2 \frac{\bar{\sigma}_m - \bar{\sigma}_p}{k_m - k_p} \quad (23)$$

Donde, k_p y k_m son las deformaciones unitarias correspondientes al inicio del descenso en la curva esfuerzo-deformación unitaria y al cambio de pendiente de la misma durante el “softening”; σ_m y σ_p son los esfuerzos correspondientes a k_m y k_p respectivamente; k_3 es una

variable del eje de abscisas de la gráfica esfuerzo-deformación unitaria que define la ley constitutiva del material y que puede tomar distintos valores; σ_i es el esfuerzo de inicio de la zona de comportamiento plástico del material; por último, σ_r es el esfuerzo a partir del cual la ley constitutiva del material se asemeja a una recta constante. σ_a , σ_b , y σ_c son esfuerzos variables y cada uno corresponde a las zonas que se indican en la Figura 4.2.

Figura 4.2. *Hardening/softening law for compression* (Lourenço, 1996)



Se puede observar que la magnitud de k_m es aproximadamente el doble de k_p . Teniendo en cuenta esto y las gráficas locales que se obtuvieron de los ensayos en pilas se estimarán los valores de las variables k_p , k_m , σ_m , σ_p y k_3 que definen la curva del material en estudio. Además, G_{fc} es la energía de fractura a compresión, ver Figura 4.2, y d es la relación entre dicha energía y la resistencia máxima a compresión del modelo, son parámetros inelásticos que con experiencia permiten comprender cómo se desarrolla la ley constitutiva del material y definir su forma.

$$d = G_{fc}/f_c \quad (24)$$

4.1.2 Modelo para tensión

El modelo que Lourenço propone para la tracción sí contempla la parte elástica e inelástica y presenta un comportamiento lineal en la zona elástica hasta alcanzar el valor pico de esfuerzo para luego descender de manera exponencial, como se aprecia en la Figura 4.3.

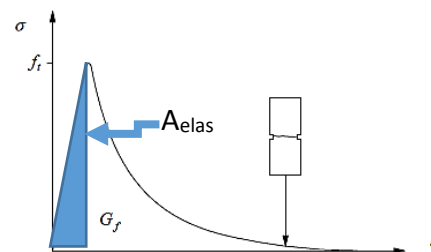


Figura 4.3. Comportamiento de materiales frágiles bajo cargas de tensión y definición de energía de fractura (Lourenço, 1996)

Las ecuaciones que definen el comportamiento a tracción de manera general son las siguientes:

$$\sigma_1 = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} k_1\right), \text{ es el esfuerzo variable de la gráfica de la Figura 4.3} \quad (25)$$

Donde G_f es la energía de fractura, k_1 es la deformación variable del eje x de la gráfica de la Figura 4.3 en mm que se asume gobierna el comportamiento *softening* de dicha ley constitutiva y que en esta tesis ha sido creada con valores que van desde 0 mm y aumentan en 0.025 mm hasta 1.55 mm, y f_t es la resistencia a tracción del material.

Además, G_f^I (modo I de la energía de fractura) se calcula según la ecuación 26, sin embargo, para la presente tesis dicho valor se ha calibrado partiendo de un valor asumido.

$$G_f^I = h \int_0^\infty \sigma_{nn}^{cr}(\varepsilon_{nn}^{cr}) d\varepsilon_{nn}^{cr}, \quad (26)$$

Donde h es la longitud característica de los elementos finitos que componen la malla definida para el modelo, ε_{nn}^{cr} es la deformación de agrietamiento y σ_{nn}^{cr} su esfuerzo asociado.

$h =$ diagonal principal del elemento finito, i. e. : $\sqrt{\text{lado}}$

Además, D_{cr} es el desplazamiento de agrietamiento y se define por la multiplicación de ε_{nn}^{cr} con h , ε_{ult} es la deformación unitaria última del elemento finito que se define por la división entre h y el máximo desplazamiento (δ_{max}) que alcance el elemento o que se asigne para la creación de la curva teórica de tracción que define Lourenco, d es la relación entre la energía de fractura G_f o G_{ft} y la resistencia máxima a tracción. Por último, A_{elas} hace referencia al área elástica de la gráfica esfuerzo a tracción-deformación del material, ver Figura 4.3.

$$d = \frac{G_{ft}}{f_t} \quad (27)$$

$$D_{cr} = \varepsilon_{nn}^{cr} * h \quad (28)$$

$$\varepsilon_{ult} = \frac{h}{\delta_{max}} \quad (29)$$

$$A_{elas} = D_{cr} * f_t * 0.5 \quad (30)$$

4.2 Modelo de Pila

4.2.1 Características del modelo

El modelo se realizó con un elemento *Shell* cuadrangular. Se definió el material “*Masonry*” en el programa con las propiedades mecánicas calculadas. Este material se asumió como homogéneo, isotrópico y elástico en una primera prueba para decidir la malla a emplear y la condición de borde en la base, posterior a ello, se realizaron modelos con parámetros de

propiedades plásticas. Las dimensiones asignadas para los modelos numéricos fueron los valores nominales de las pilas ensayadas; es decir, 600 mm de alto, 230 mm de ancho y 130 mm de espesor y las mallas probadas para discretizar los modelos en elementos finitos fueron de 10x10 mm, 20x20 mm y 40x40 mm. La malla de 10x10 mm definía 1380 elementos finitos y 1464 nodos; la malla 20x20mm, 360 elementos finitos y 403 nodos; y la malla 40x40 mm, 90 elementos finitos y 112 nodos. Las condiciones de borde que fueron probadas para las pilas consistieron de apoyos deslizantes sobre la base, base empotrada y una base con un apoyo central y apoyos deslizantes a la vez. Las pilas se modelaron en un estado de carga de compresión uniaxial.

El modelo con base empotrada se muestra en la Figura 4.4 a) y en b), el estado de esfuerzos que se genera ante la aplicación de carga o desplazamiento en el eje vertical para todos los modelos. S_{22} representa el esfuerzo de compresión uniaxial del modelo en el eje vertical, S_{11} es el esfuerzo en el eje perpendicular al axial y que se origina a causa del estado de carga axial, así como se produce el esfuerzo de corte τ_{12} .

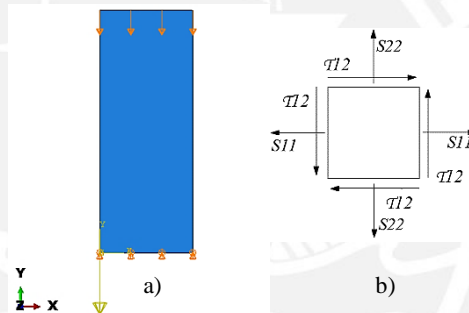


Figura 4.4. a) Modelo de pila en Abaqus b) estados de esfuerzo de acuerdo con los ejes de Abaqus

4.2.2 Análisis preliminar: lineal elástico

Como primer paso, se realizó un modelo numérico que definió el material “*Masonry*” únicamente con propiedades mecánicas elásticas, dichas propiedades fueron el módulo de elasticidad, densidad y coeficiente de Poisson con los valores mostrados en la Tabla 3.11. El objetivo de este análisis fue obtener una visión general del problema; es decir, del comportamiento de la pila ante la acción de cargas uniaxiales debido a su propio peso y una deformación vertical hacia abajo aplicada en su cima de -3.5 mm; además, seleccionar el tamaño de malla y las condiciones de borde más apropiadas para el modelo final.

Como se mencionó previamente, se realizaron modelos con diferentes condiciones de borde en la base y tamaños de malla. Las combinaciones de dichas características se presentan en la Tabla 4.1. Las acciones aplicadas (carga debido al peso propio y desplazamiento vertical en la cima) se definieron mediante la densidad del material junto al valor de -9810 mm/s^2 correspondiente a la aceleración de la gravedad y una condición de borde en la cima con un valor de -3.5 mm , respectivamente. A causa de estas condiciones, se produjeron esfuerzos y

desplazamientos en el modelo, los resultados para cada modelo realizado se presentan en la Figura 4.5 y Figura 4.6.

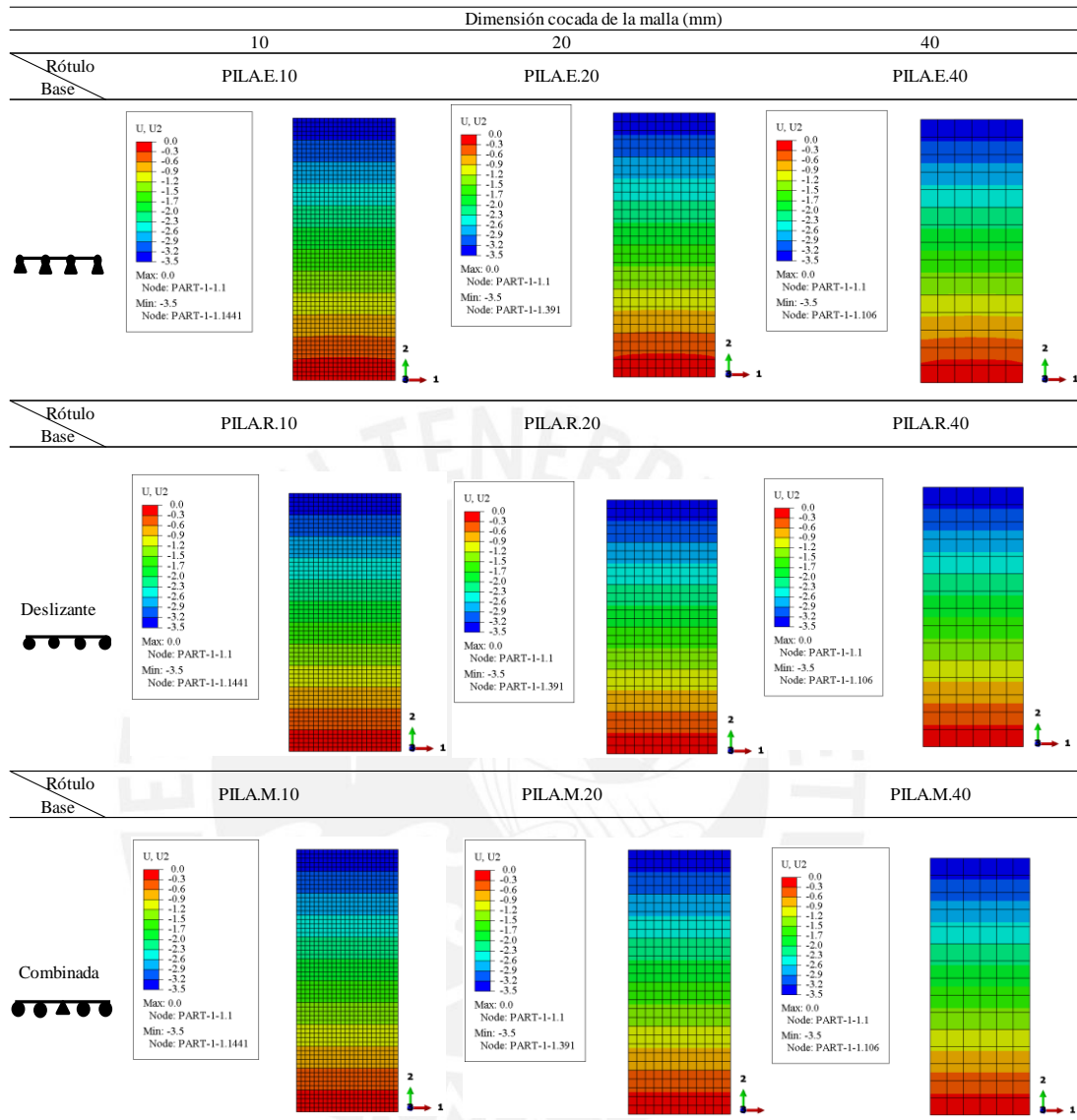


Figura 4.5. Deformaciones axiales para los distintos modelos elásticos de la pila en mm

Tabla 4.1. Modelos numéricos de la pila con propiedades elásticas

| | Rótulo | Base | Desplazamiento vertical mm | Malla mm | Restricción | | | | | | Representación base |
|--|-----------|------------|----------------------------|----------|-------------|----|----|-----|-----|-----|---------------------|
| | | | | | U1 | U2 | U3 | UR1 | UR2 | UR3 | |
| | PILA.E.10 | Empotrada | -3,5 | 10 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | |
| | PILA.E.20 | Empotrada | -3,5 | 20 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | |
| | PILA.E.40 | Empotrada | -3,5 | 40 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | |
| | PILA.R.10 | Deslizante | -3,5 | 10 | No | Sí | Sí | No | No | No | |
| | PILA.R.20 | Deslizante | -3,5 | 20 | No | Sí | Sí | No | No | No | |
| | PILA.R.40 | Deslizante | -3,5 | 40 | No | Sí | Sí | No | No | No | |
| | PILA.M.10 | Combinada | -3,5 | 10 | Sí | Sí | Sí | No | No | No | |
| | PILA.M.20 | Combinada | -3,5 | 20 | Sí | Sí | Sí | No | No | No | |
| | PILA.M.40 | Combinada | -3,5 | 40 | Sí | Sí | Sí | No | No | No | |

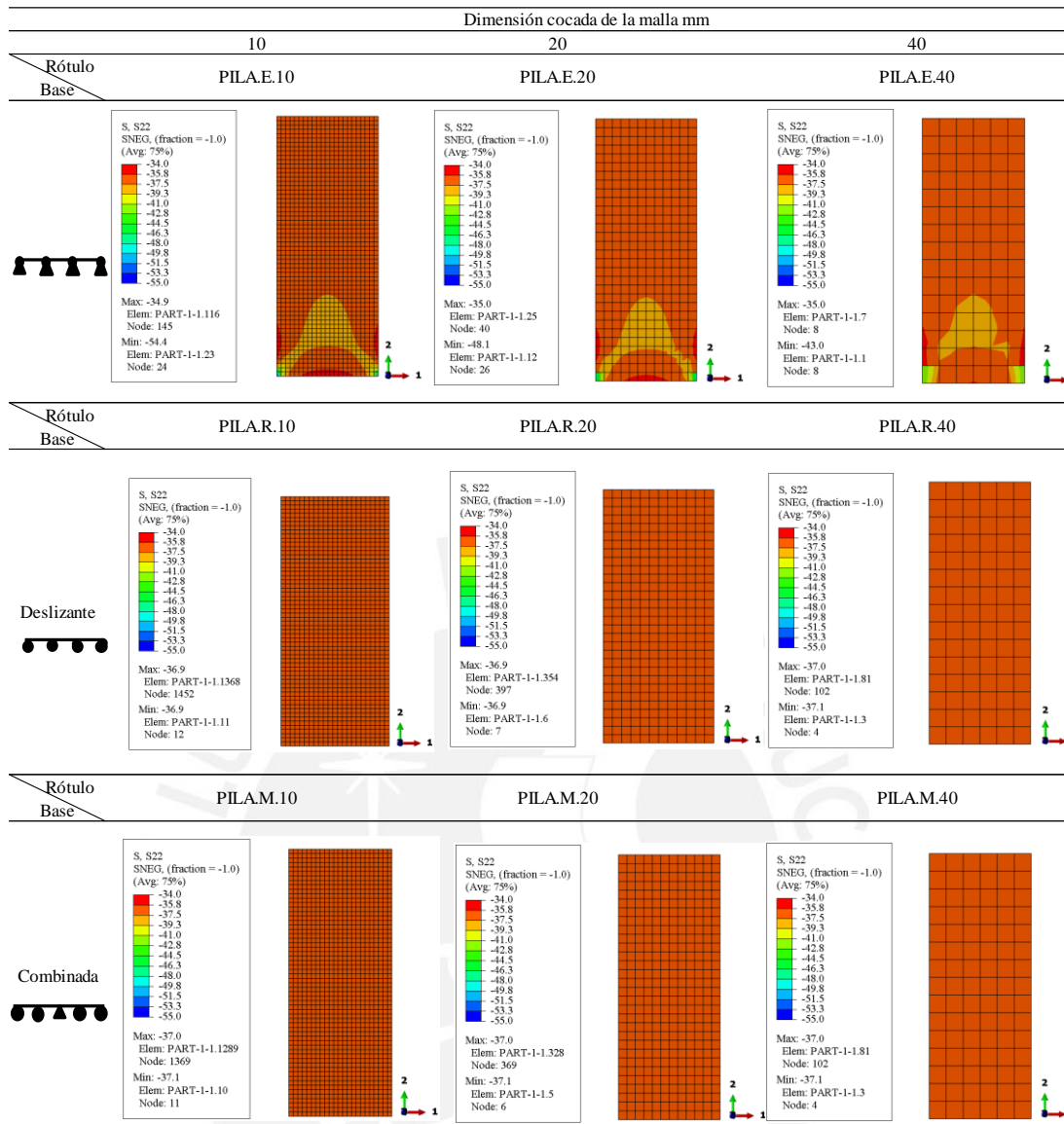


Figura 4.6. Esfuerzos verticales en el eje axial para los distintos modelos elásticos de la pila en MPa

Por un lado, se observó una concentración de esfuerzos en las esquinas inferiores de los modelos con la base empotrada, además de una zona con valores de esfuerzos menores localizada en la parte baja de la pila; por tal motivo, se descartó esta condición de borde en la base pues los patrones de falla de las pilas ensayadas no reflejaron concentración de esfuerzos en las esquinas inferiores. Por otro lado, no se observaron diferencias significativas entre los resultados de los modelos con base con apoyos deslizantes y el caso mixto; por tal razón, se decidió emplear la base con apoyos deslizantes y con una malla de 20x20 mm. Los análisis no lineales siguientes pretendieron obtener respuestas más confiables y reales del comportamiento de las pilas, para ello, se asignó la malla que se eligió en este primer análisis a los modelos que se mencionan a continuación.

4.2.3 Calibración de modelos con comportamiento no lineal

Luego de que se realizaron los modelos con comportamiento estructural únicamente elástico y lineal, se desarrolló modelos que incluyen un comportamiento a compresión plástico y distintos casos para el comportamiento a tracción del material. A continuación, se detallan los modelos más relevantes, así como se muestran los resultados de carga-deformación que se han obtenido de dichos modelos numéricos elaborados en Abaqus para los siguientes cuatro nodos: Nodo 150, 189, 202 y 215. Dichos nodos pertenecen a la zona central de los modelos de pilas elaborados y se seleccionaron por ofrecer resultados más semejantes a la envolvente carga-deformación obtenida de los resultados de ensayo.

a) Modelo 1: PILA.20.R.100

Análisis plástico con comportamiento a compresión no lineal y comportamiento a tracción lineal

El análisis no lineal plástico asignó propiedades mecánicas elásticas y plásticas al material. Para ello, se empleó las propiedades mecánicas elásticas del análisis elástico previo y la malla seleccionada.

Los valores de esfuerzo de compresión y deformación unitaria adaptados para el comportamiento a compresión se calcularon mediante las ecuaciones planteadas por P.B. Lourenco que se mostraron al inicio de este capítulo, las variables empleadas se muestran en el Anexo 1 y la gráfica resultante en la Figura 4.7 a). Para el comportamiento a compresión axial se observa un ascenso hasta el valor máximo de esfuerzo indicado y luego un descenso “suave” en la curva hasta alcanzar una zona que se asemeja a una recta horizontal. Los resultados de esfuerzo y deformación unitaria se presentan en la Tabla 4.2 y fueron hallados para las tres primeras pilas cuyos resultados de ensayo se consideró como apropiados; a partir de estos valores hallados se obtuvo los promedios que fueron los ingresados al programa Abaqus.

Tabla 4.2. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a compresión

| Rótulo | e_p | e_m | h (mm) | σ_i MPa | e (c/3) | k_p | k_m | σ_m MPa | σ_r MPa | m | G_{fc} N/mm | d mm |
|------------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------|
| PL-01 | 0,0028 | 0,0056 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0028 | 0,0056 | 5,36 | 1,53 | -3825 | 0,56 | 0,052 |
| PL-02 | 0,0022 | 0,0044 | 28,28 | 6,8 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0044 | 4,85 | 1,38 | -4404,55 | 0,56 | 0,057 |
| PL-03 | 0,0022 | 0,0044 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0044 | 4,71 | 1,34 | -4277,27 | 0,56 | 0,059 |
| Pro-medio | 0,0024 | 0,0048 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0024 | 0,0048 | 5,00 | 1,43 | -4166,67 | 0,56 | 0,056 |

Por otro lado, para este primer modelo plástico se empleó una ley constitutiva del comportamiento a tracción de la albañilería lineal-elástico, Figura 4.7 b), que empleó el módulo de elasticidad de la albañilería calculado.

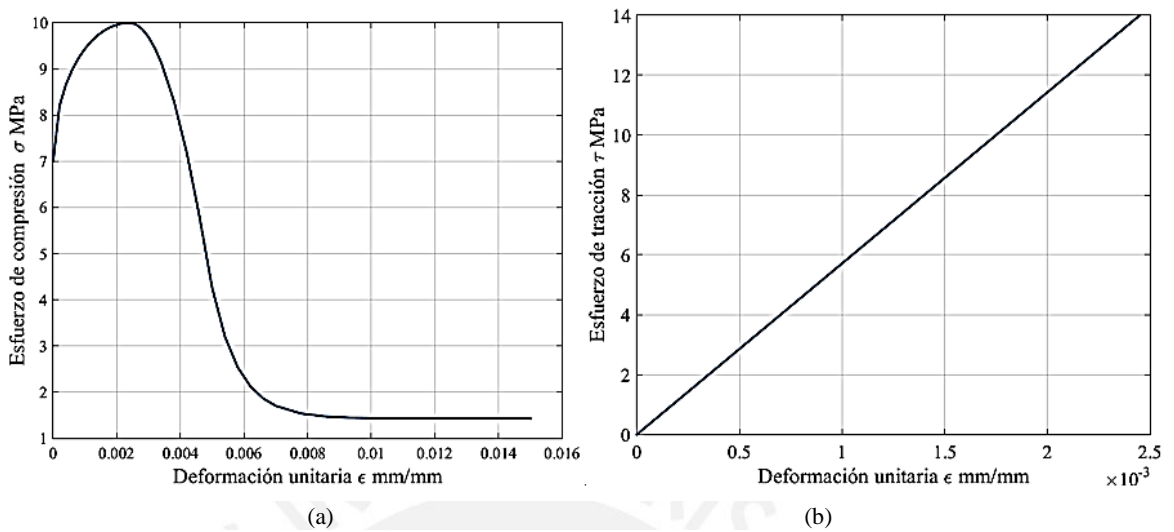


Figura 4.7. a) Comportamiento a compresión b) Comportamiento a tracción, ambos para el modelo 1

El desplazamiento aplicado en la cima hacia abajo fue de -10 mm para este y los siguientes modelos. En la Figura 4.8 se ha graficado la curva carga-desplazamiento de cada pila ensayada y de los cuatro nodos 150, 189, 202 y 215 seleccionados del modelo numérico. A partir de esta imagen se observa que la gráfica del Nodo 202 se localiza mejor dentro de la envolvente de laboratorio y, por tal motivo, es de dicho nodo que en la Figura 4.9 se muestran los estados de deformación plástica para distintos valores de deformación. Esto se repite de similar manera en las gráficas de los posteriores modelos.

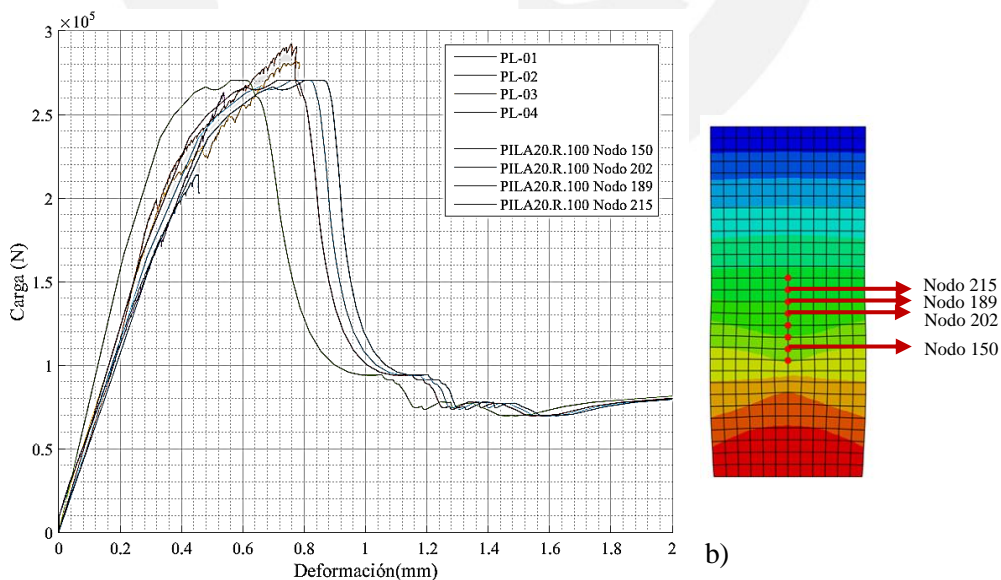


Figura 4.8. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 1 b) nodos elegidos para el análisis

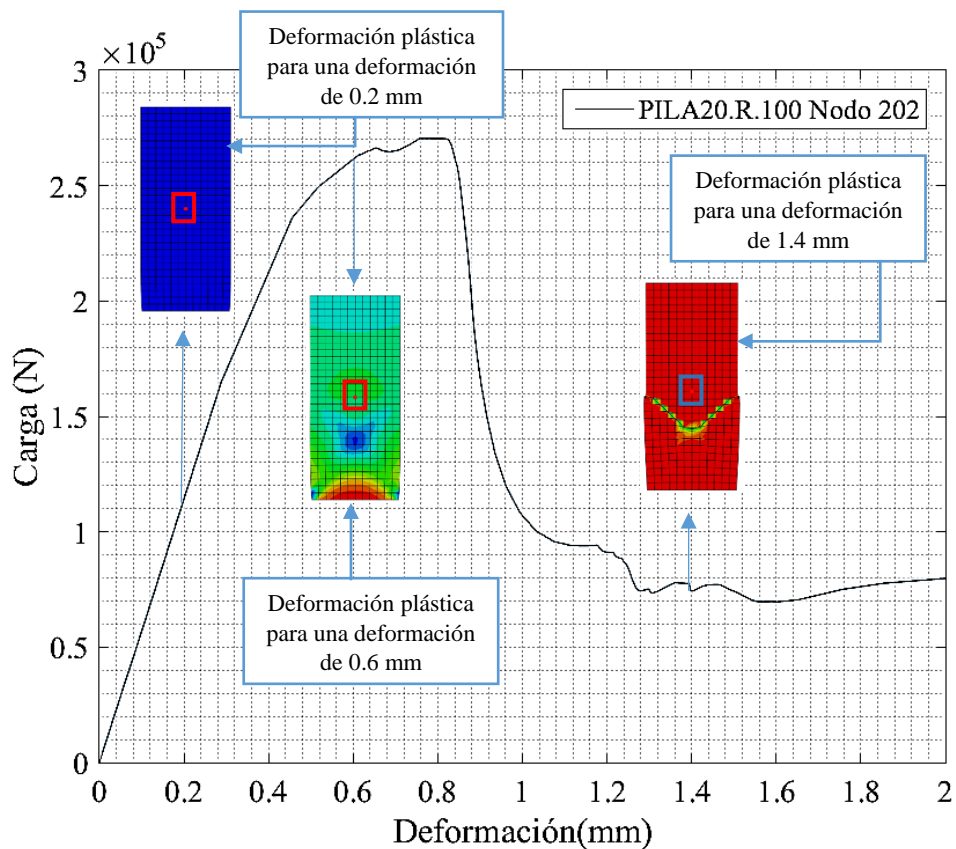


Figura 4.9. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 1

Cabe mencionar que las deformaciones plásticas que se presentan en la Figura 4.9 son para tres puntos de la curva que ofrece el programa, de este modo, la deformación plástica que se muestra para un desplazamiento de 1.4 mm no es la deformación de rotura a pesar de que se observe más deformado el elemento. La deformación que debe ser de interés es la que se desarrolla hasta el valor del esfuerzo máximo de resistencia calculado de los resultados de ensayo. Ello se analizará luego en el capítulo 5 para el modelo que se elija en este capítulo.

b) Modelo 2: PILA.20.R.102

Análisis plástico con comportamiento a compresión no lineal y comportamiento a tracción elasto-plástico lineal

Se asignó propiedades mecánicas elásticas y plásticas para el comportamiento a compresión y tracción. Para ello, se empleó las mismas propiedades mecánicas del comportamiento a compresión del modelo 1, pero se empleó una ley constitutiva de tracción elasto-plástica lineal, como se muestra en la Figura 4.10. Para ello, se empleó como base el valor de la resistencia al corte y el módulo de elasticidad del material que se obtuvieron de los ensayos en pilas y muretes.

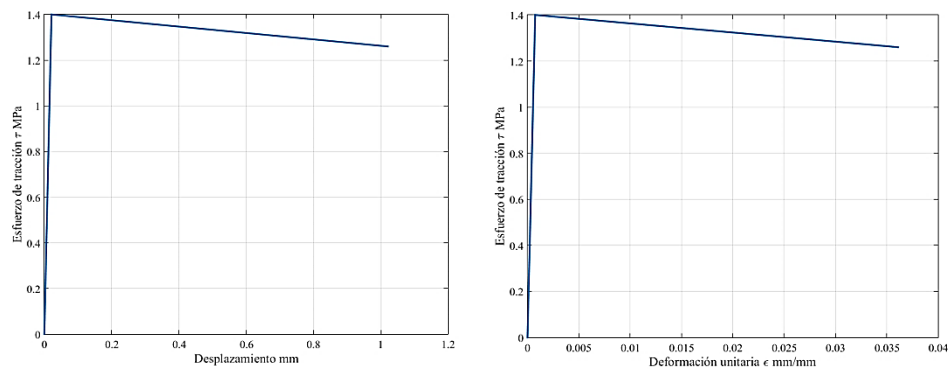


Figura 4.10. Comportamiento a tracción elasto-plástico lineal

En la Figura 4.11 se ha graficado la curva carga-desplazamiento de cada pila ensayada y de los cuatro nodos 150, 189, 202 y 215 seleccionados del modelo numérico. En Figura 4.12 se muestran los estados de deformación plástica para distintos valores de deformación. Las variables empleadas en Abaqus se muestran en el Anexo 2.

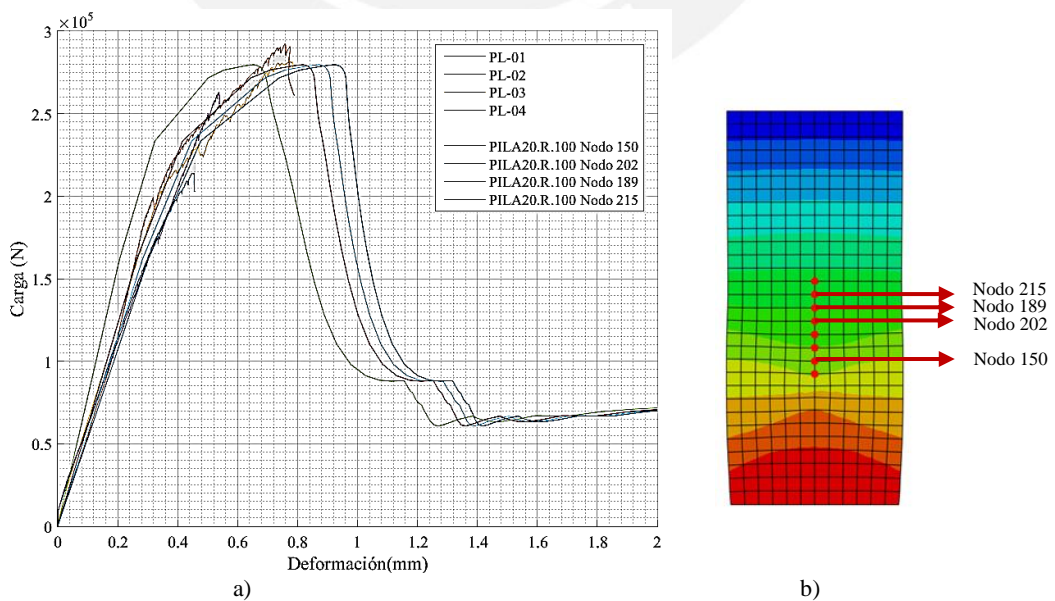


Figura 4.11. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 2 b) nodos elegidos para el análisis

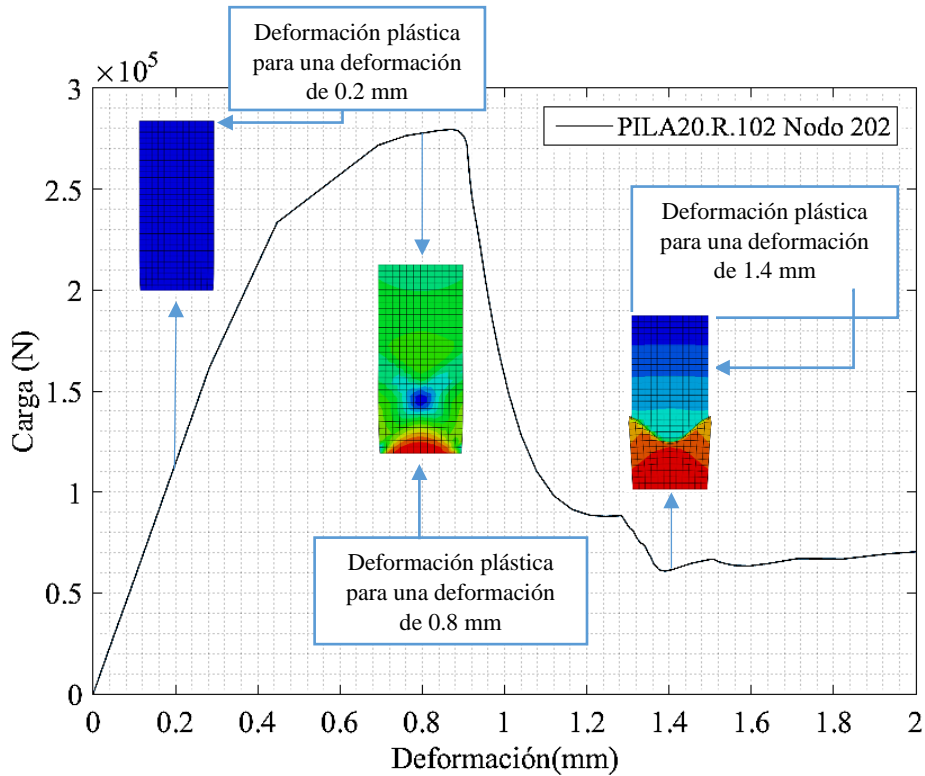


Figura 4.12. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 2

Cabe mencionar que las deformaciones plásticas que se presentan en la Figura 4.12 son para tres puntos de la curva que ofrece el programa, de este modo, la deformación plástica que se muestra para un desplazamiento de 1.4 mm no es la deformación de rotura a pesar de que se observe más deformado el elemento. La deformación que debe ser de interés es la que se desarrolla hasta el valor del esfuerzo máximo de resistencia calculado de los resultados de ensayo. Ello se analizará luego en el capítulo 5 para el modelo que se elija en este capítulo.

c) Modelo 3: PILA.20.R.103

Análisis plástico con comportamiento a compresión no lineal y comportamiento a tracción no lineal

Este análisis contiene los parámetros empleados en el análisis previo para las propiedades del material y el comportamiento a compresión. Sin embargo, se empleó para el comportamiento a tracción las ecuaciones de Lourenco que nos ofrecen una curva no lineal plástica, los parámetros que se emplearon se resumen en la Tabla 4.3 y definen la curva de la Figura 4.13.

Tabla 4.3. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a tracción

| Rótulo | G_{ft} Nmm/mm ² | h mm | ε_{nn}^{cr} | D_{cr} mm | A_{elast} N/mm | ε_{ult} | d mm |
|----------|---------------------------------|-------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------|
| PL-01 | 0.25 | 28.28 | 0.00017 | 0.00479 | 0.00256 | 0.0548 | 0.2334 |
| PL-02 | 0.25 | 28.28 | 0.00015 | 0.00433 | 0.00209 | 0.0548 | 0.2579 |
| PL-03 | 0.25 | 28.28 | 0.00015 | 0.00420 | 0.00198 | 0.0548 | 0.2657 |
| Promedio | 0.25 | 28.28 | 0.00022 | 0.00621 | 0.00432 | 0.0548 | 0.1786 |

Los parámetros empleados para la compresión y tracción se presentan en el Anexo 3. En la Figura 4.11 se muestra la curva carga-desplazamiento de las pilas ensayadas y de los cuatro nodos 150, 189, 202 y 215. En la Figura 4.14 se muestran los estados de deformación plástica para distintos valores de deformación.

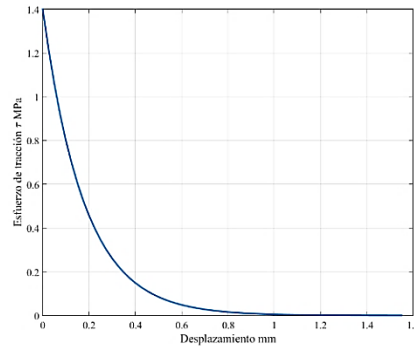


Figura 4.13. Comportamiento a tracción, zona plástica

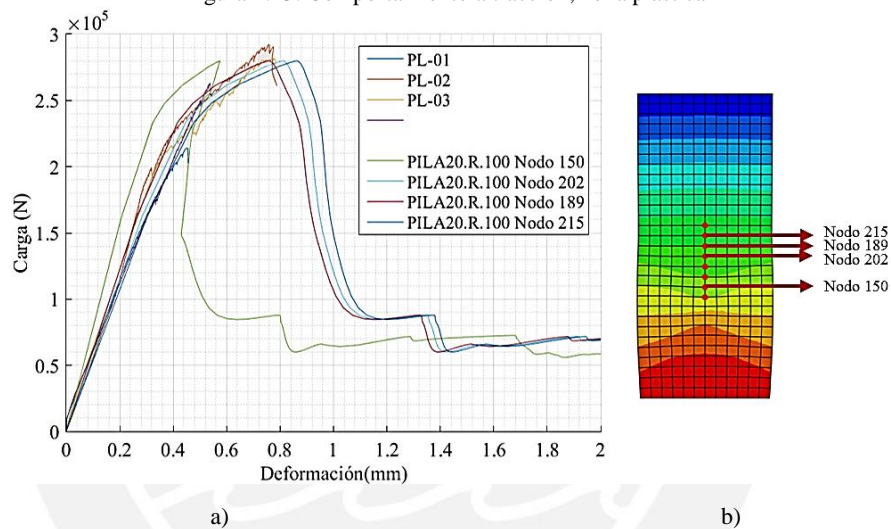


Figura 4.14. a) Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo 2 b) nodos elegidos para el análisis

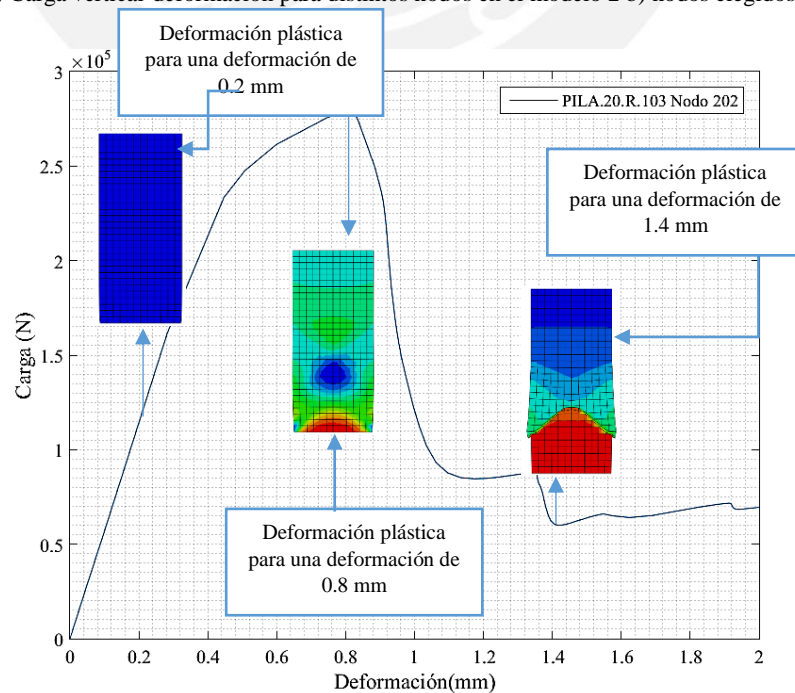


Figura 4.15. Gráfica Carga-deformación del nodo 202 del modelo 3

Cabe mencionar que las deformaciones plásticas que se presentan en la Figura 4.12 son para tres puntos de la curva que ofrece el programa, de este modo, la deformación plástica que se muestra para un desplazamiento de 1.4 mm no es la deformación de rotura a pesar de que se observe más deformado el elemento. La deformación que debe ser de interés es la que se desarrolla hasta el valor del esfuerzo máximo de resistencia calculado de los resultados de ensayo. Ello se analizará luego en el capítulo 5 para el modelo que se elija en este capítulo.

De manera adicional, se variaron las curvas del comportamiento a compresión del modelo 3, para buscar mejores resultados. Para ello, se multiplicó los parámetros que forman la ley constitutiva de compresión usada en los modelos previos por distintos factores. De dicho modo, los esfuerzos σ tuvieron valores más altos.

d) PILA20.R.104, PILA20.R.105, PILA20.R.106, PILA20.R.107 y PILA20.R.108

Con la finalidad de calibrar el comportamiento plástico, se realizaron cinco curvas adicionales cuyos valores de km y kp son múltiplos de los valores de km y kp empleados para la curva de compresión del modelo 1. Los factores por los que se multiplicó la curva original fueron 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 y además se probó una ley constitutiva cuya zona plástica sea lineal y constante. Las curvas resultantes se presentan en la Figura 4.16 y se puede apreciar cómo las curvas nuevas poseen distintas pendientes en la zona post pico (resistencia máxima) en función del factor empleado. Para el comportamiento a tracción se empleó la ley constitutiva que se mostró en la Tabla 4.3 y Figura 4.22, para todas las siguientes curvas.

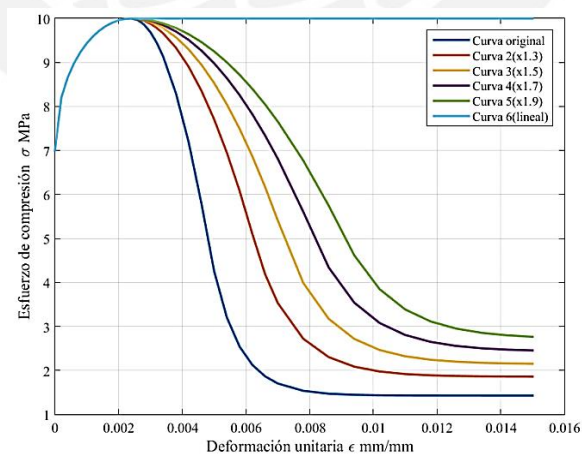


Figura 4.16. Curvas teóricas empleadas para modelar la pila

En la Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se presentan los resultados para cada caso, se observan las distribuciones de esfuerzo S22, S11, desplazamientos U2, U1, y deformaciones plásticas en los ejes 1 (horizontal) y 2 (vertical).

Tabla 4.4. Esfuerzos S22 y S11 para distintas curvas de compresión definidas

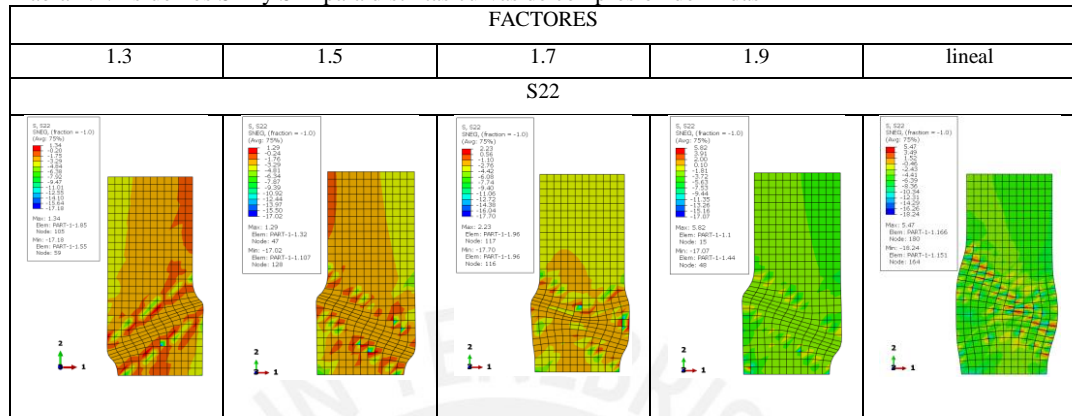


Tabla 4.5. Desplazamientos para distintas curvas de compresión definidas

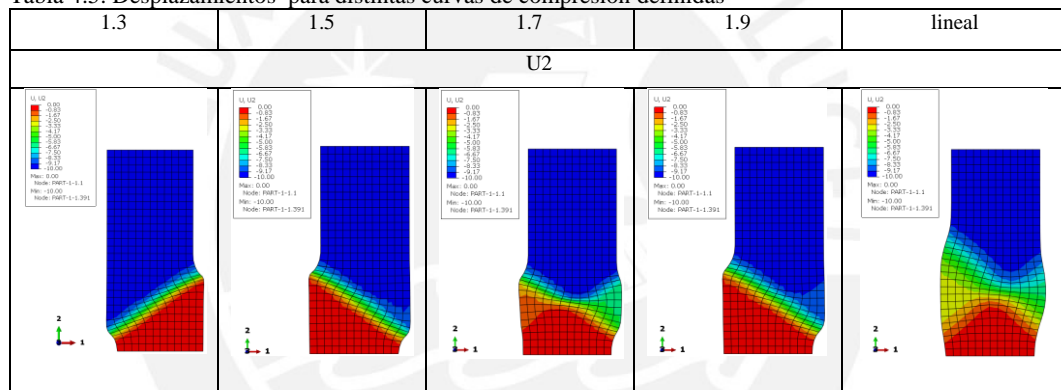
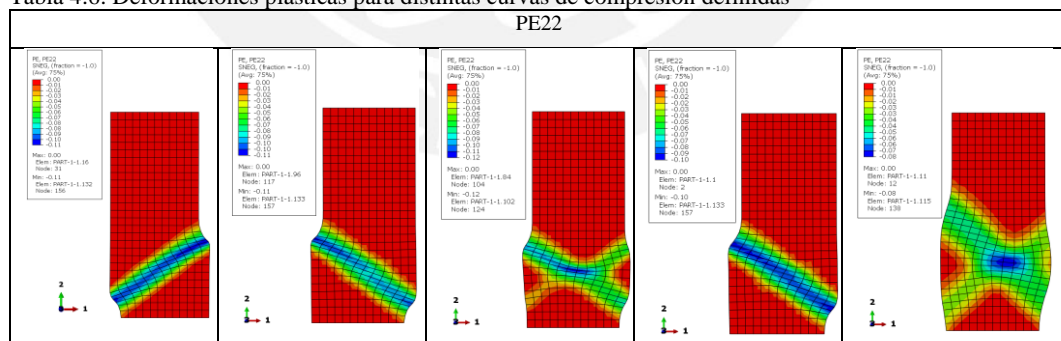


Tabla 4.6. Deformaciones plásticas para distintas curvas de compresión definidas



Los cinco últimos modelos realizados se descartaron por presentar deformaciones influenciadas por efectos de corte para valores de esfuerzo cercanos al máximo en secciones diagonales, lo cual se aleja de los resultados obtenidos en laboratorio. De los tres primeros modelos que se han presentado, se ha observado que existe una buena aproximación entre los resultados de ensayo y las curvas carga-deformación que se han obtenido a partir de los resultados de los modelos numéricos desarrollados. Por otro lado, en todos los casos se ha

observado que la curva carga-deformación que se localiza mejor dentro de la envolvente de ensayo es aquella obtenida para el nodo 202, el cual se encuentra en la zona central del modelo de la pila. Si bien la curva del nodo 150 del modelo 3 es distinta de las curvas de los otros nodos, se considera que este comportamiento es debido a que dicho nodo se encuentra próximo a la zona donde el material presenta el patrón de falla y que las curvas restantes se aproximan de buena manera a la envolvente de ensayo; además, es el modelo 3 el que incluye leyes constitutivas con comportamiento plástico no lineal (lo cual se considera representa de manera más real el comportamiento estructural del material) para compresión y tracción y por lo tanto, este modelo será elegido entre los desarrollados.



4.3 Modelo de murete

4.3.1 Características del modelo

El modelo se realizó con un elemento *Shell*, al igual que la pila. Se definieron los materiales “*Masonry*” y “*Steel*”. El material “*Masonry*” se asumió como homogéneo, isotrópico y elástico en una primera prueba para decidir la malla a emplear y la condición de borde en la base. Posterior a ello, se realizaron modelos que incluyen leyes constitutivas del comportamiento del material con respuesta plástica, para obtener un resultado más real. Las dimensiones asignadas para los modelos numéricos fueron los valores nominales de los muretes ensayados; es decir, 600 mm de alto, 600 mm de ancho y 130 mm de espesor; y las mallas probadas fueron de 10x10 mm, 20x20 mm y 40x40 mm. El número de elementos finitos para la malla 10x10 mm fue de 3660 y 3721 nodos; para la malla 20x20 mm, 993 elementos finitos y 1024 nodos; y para la malla 40x40 mm, 241 elementos finitos y 256 nodos. Las condiciones de borde que fueron probadas para las pilas consistieron de apoyos deslizantes sobre la base y base empotrada.

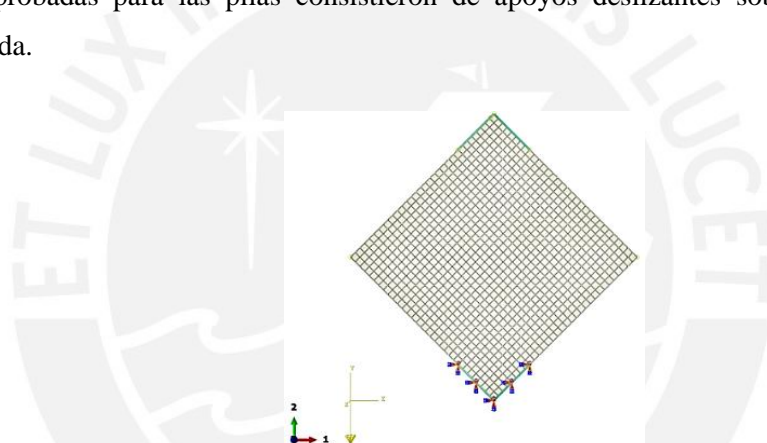


Figura 4.17. Modelo de murete con base empotrada y malla de 10x10 mm

4.3.2 Análisis preliminar: lineal elástico

El material “*Masonry*” se definió únicamente con propiedades mecánicas elásticas y el material “*Steel*” se empleó para representar los soportes de la máquina universal y el refrentado, dichas propiedades se resumen en la Tabla 4.7.

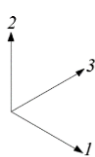


El objetivo de este análisis fue obtener una visión general del problema, es decir, del comportamiento del murete ante la acción de cargas de compresión diagonal debido a su propio peso y a una deformación vertical hacia abajo aplicada en su esquina superior; además de seleccionar el tamaño de malla y las condiciones de borde más apropiadas para el modelo final.

Tabla 4.7. Propiedades mecánicas asignadas a los muretes en Abaqus

| | Laboratorio | | |
|-------------|-------------|-------|----------------------------|
| | E_m MPa | ν | γ N/mm ³ |
| Albañilería | 5720 | 0,26 | 1.376E-9 |
| Acero | 25000 | 0,25 | 1E-10 |

Como se mencionó previamente, se realizó modelos con diferentes condiciones de borde en la base y diferente tamaño de malla. Las combinaciones de dichas características se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Modelos numéricos del murete con propiedades elásticas

| | Rótulo | Base | Desplaz. mm | Malla mm | Restricción | | | | | | Representación condición de borde en la base |
|---|-------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|----|----|-----|-----|-----|---|
| | | | | | U1 | U2 | U3 | UR1 | UR2 | UR3 | |
|  | MURETE.E.10 | Empotrada | -5 | 10 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | |
| | MURETE.E.20 | Empotrada | -5 | 20 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |  |
| | MURETE.E.40 | Empotrada | -5 | 40 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | |
| | MURETE.R.10 | Apoyo deslizante | -5 | 10 | No | Sí | Sí | No | No | No | |
| | MURETE.R.20 | Apoyo deslizante | -5 | 20 | No | Sí | Sí | No | No | No |  |
| | MURETE.R.40 | Apoyo deslizante | -5 | 40 | No | Sí | Sí | No | No | No | |

Las acciones aplicadas (carga debido al peso propio y desplazamiento vertical en la cima) se definieron mediante la densidad del material junto al valor de -9810 mm/s^2 correspondiente a la aceleración de la gravedad y un desplazamiento vertical en la cima con un valor de -5 mm , respectivamente. Como resultado, se produjeron esfuerzos y desplazamientos en el modelo. Los resultados para cada modelo realizado se presentan en las Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21.

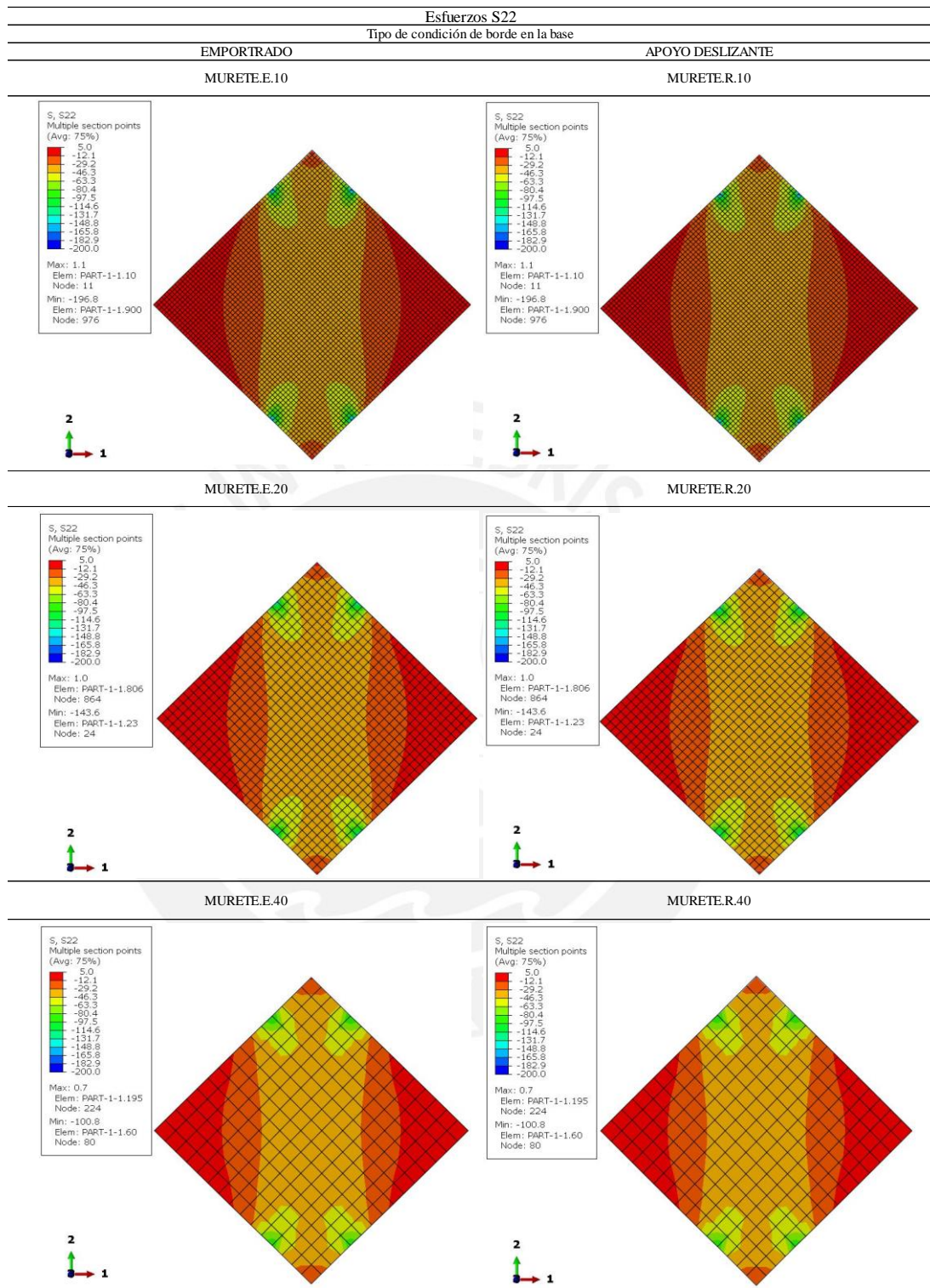


Figura 4.18. Esfuerzos S22 en el modelo elástico del murete en MPa

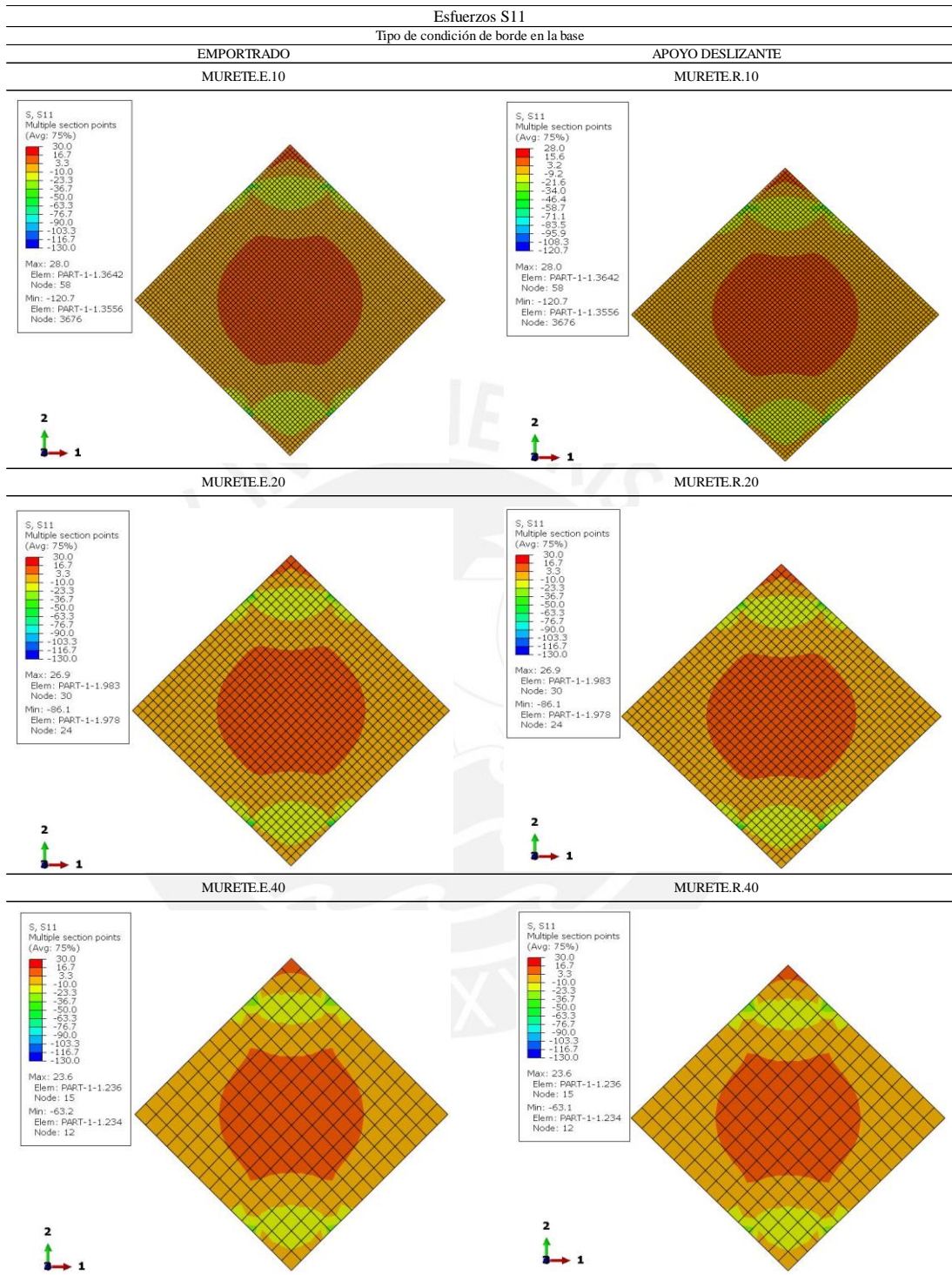


Figura 4.19. Esfuerzos S11 en el modelo elástico del murete en MPa

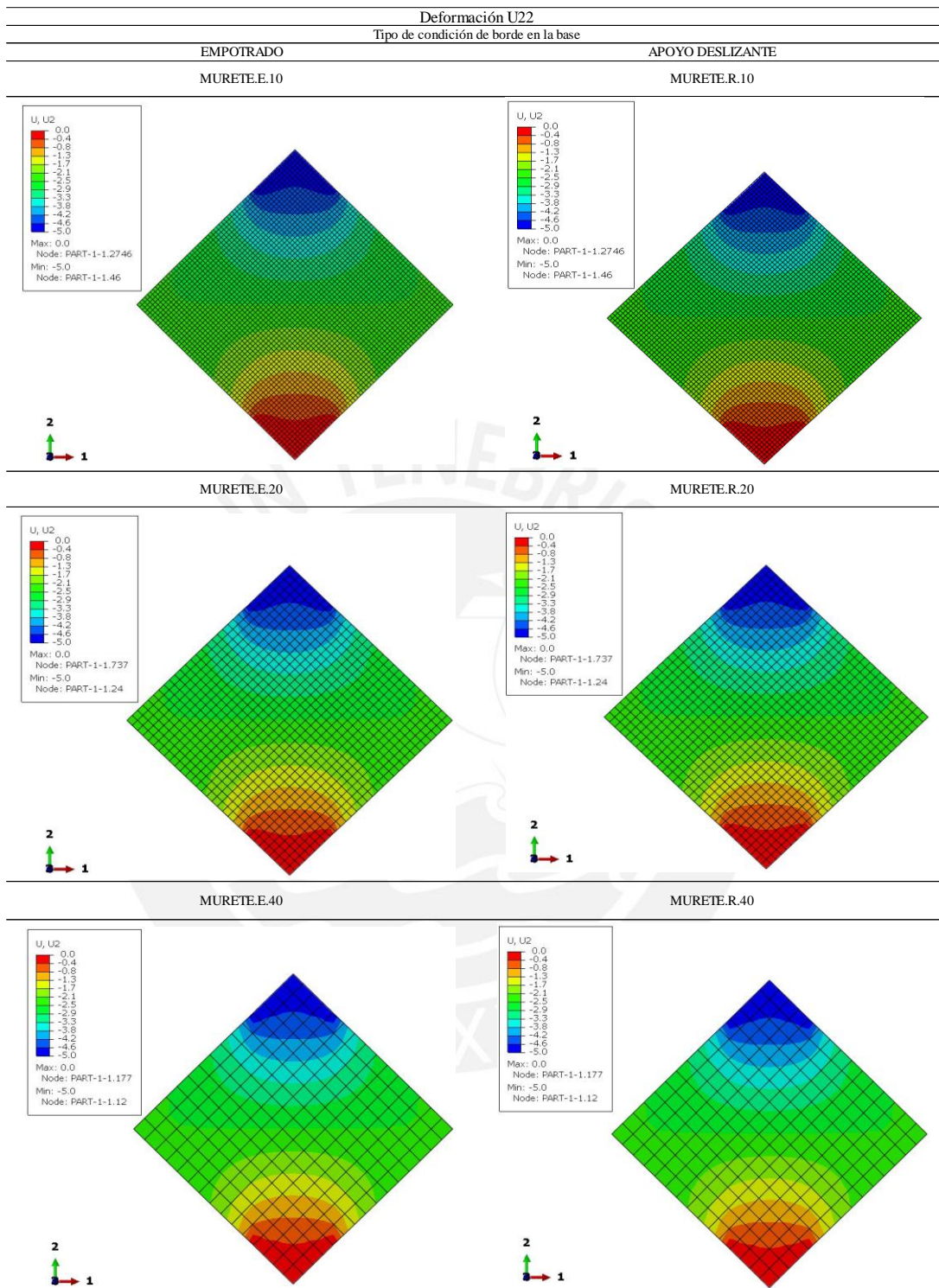


Figura 4.20. Deformaciones U22 en el modelo elástico del murete en mm

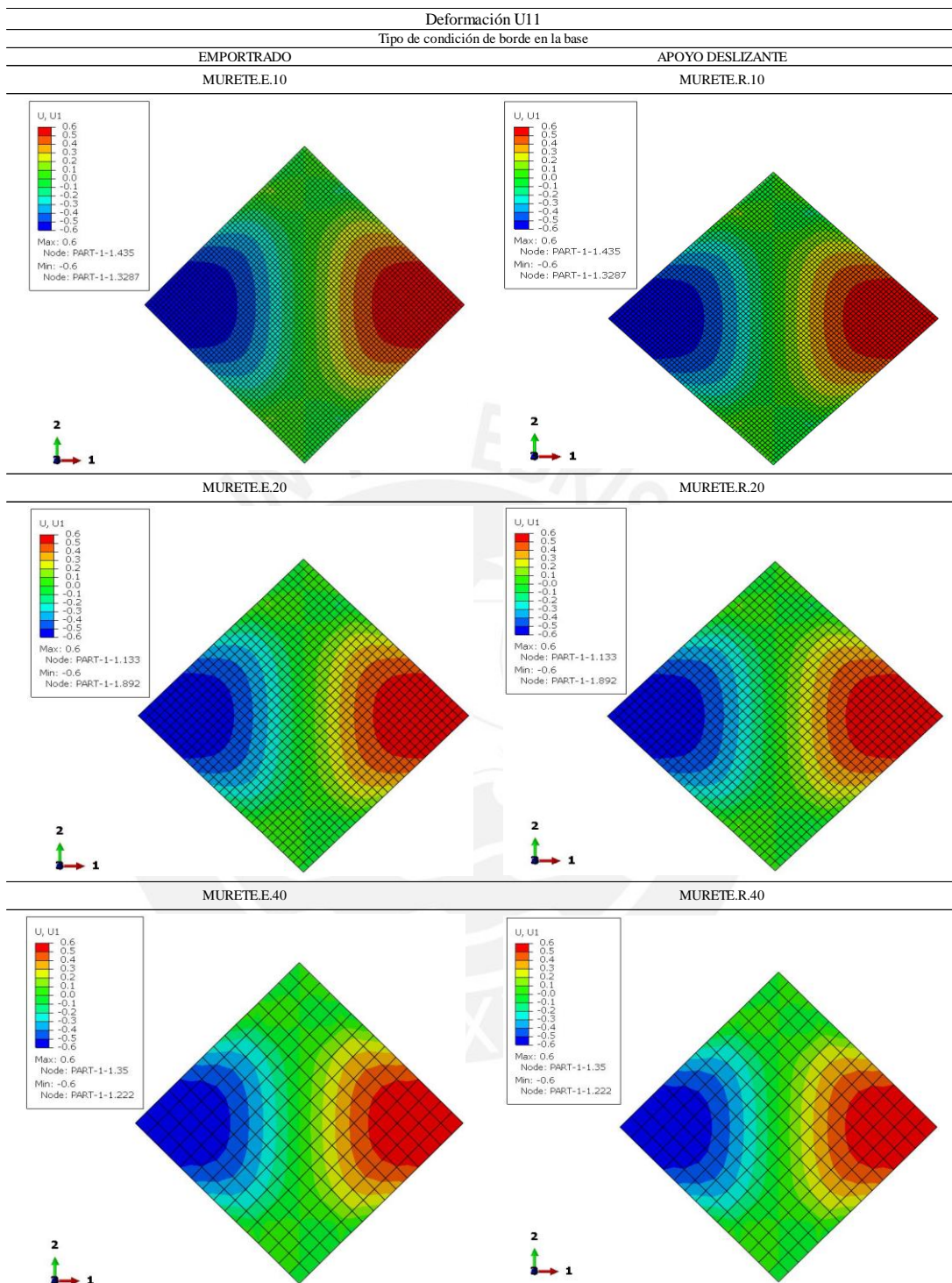


Figura 4.21. Deformaciones U11 en el modelo elástico del murete en mm

Por un lado, para la distribución de esfuerzos S22 se observó una concentración de esfuerzos en los extremos de los elementos que modelaron el refrentado en las esquinas superior e inferior del murete producto de un cambio de rigidez. Con respecto a los valores numéricos obtenidos se percibe un incremento considerable en los esfuerzos mínimos conforme se aplica una malla más fina pero no se produce un cambio en los valores ante el cambio de la condición de borde en la base. El caso de los esfuerzos S11 es similar al previo, los esfuerzos mínimos incrementan considerablemente conforme se reduce el tamaño de la malla, más no cuando se cambia la condición de borde en la base. Los valores de deformaciones U11 y U22 no presentan mayores variaciones sino distribuciones idénticas. Ante esto, se decidió trabajar con la malla de 10x10 mm que presentó los máximos resultados comparativamente y con una condición de borde empotrada puesto que, debido a la forma en que se instaló el murete en la máquina universal, el desplazamiento y rotación se restringían.

4.3.3 Calibración de modelos con comportamiento no lineal

a) Modelo A: MURETE.10.E.100

Análisis plástico con comportamiento a compresión no lineal y comportamiento a tracción lineal

En la Tabla 4.9 y Figura 4.22 a) se define el comportamiento a compresión empleado y en Figura 4.22 b) el comportamiento lineal a tracción del material; es decir, se ha empleado un comportamiento a compresión no lineal a partir de las ecuaciones de Lourenço y un comportamiento a tracción lineal elástico a partir del módulo de elasticidad que se obtuvo de los ensayos de pilas y la longitud característica del mallado del murete (10x10mm). Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Figura 4.23. El desplazamiento aplicado en la esquina superior fue de -10 mm para este y los siguientes modelos.

Tabla 4.9. Parámetros para el análisis computacional del comportamiento a compresión

| Rótulo | e_p | e_m | h mm | σ_i MPa | e (c/3) | k_p | k_m | σ_m MPa | σ_r MPa | m | G_{fc} N/mm | d mm |
|------------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------|
| PL-01 | 0,0028 | 0,0056 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0028 | 0,0056 | 5,36 | 1,53 | -3825 | 0,56 | 0,052 |
| PL-02 | 0,0022 | 0,0044 | 28,28 | 6,8 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0044 | 4,85 | 1,38 | -4404,55 | 0,56 | 0,057 |
| PL-03 | 0,0022 | 0,0044 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0044 | 4,71 | 1,34 | -4277,27 | 0,56 | 0,059 |
| Pro-medio | 0,0024 | 0,0048 | 28,28 | 7 | 0,0011 | 0,0024 | 0,0048 | 5,00 | 1,43 | -4166,67 | 0,56 | 0,056 |

Por otro lado, para este primer modelo plástico se empleó una ley constitutiva del comportamiento a tracción de la albañilería lineal-elástico, Figura 4.7 b), que empleó el módulo de elasticidad de la albañilería calculado.

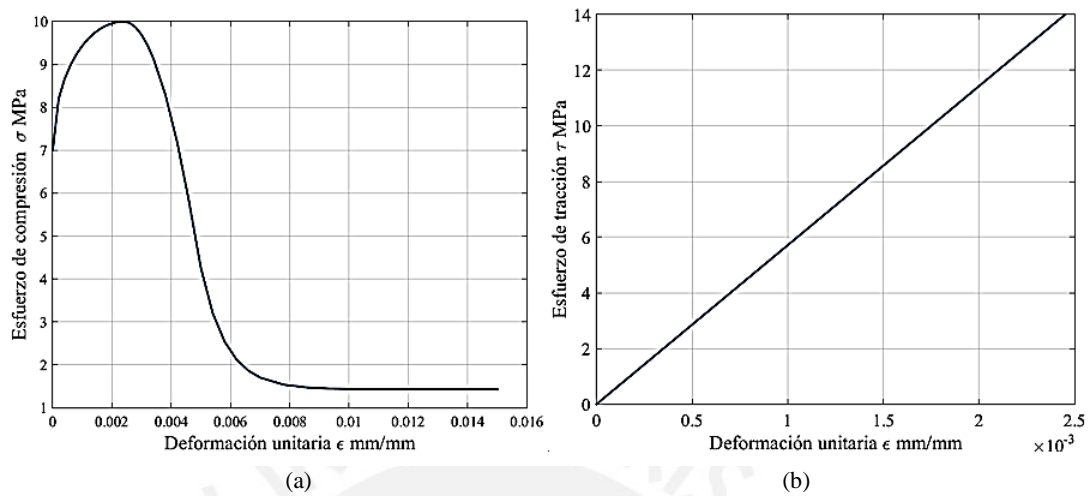


Figura 4.22. a) Comportamiento a compresión b) Comportamiento a tracción

Como se aprecia en la Figura 4.23, en este primer modelo se ha generado una concentración de esfuerzos en el contacto entre la zona superior donde se aplica la fuerza y el murete. De izquierda a derecha, en el primer murete se presenta la distribución final de esfuerzos en el eje 2 (vertical) en MPa, en el segundo murete se muestra los desplazamientos en el mismo eje en mm y en el tercer murete las deformaciones unitarias plásticas.

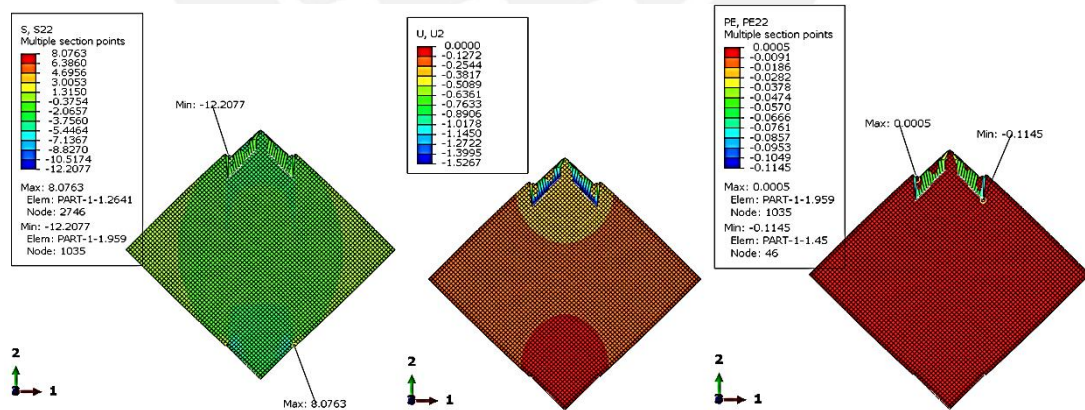


Figura 4.23. Resultados para el modelo A

En la Figura 4.24 se presentan las gráficas carga vertical-deformación de los cuatro muretes que se ensayaron en el laboratorio y de tres distintos nodos de este modelo, Nodo 36, Nodo 1021 y Nodo 1381.

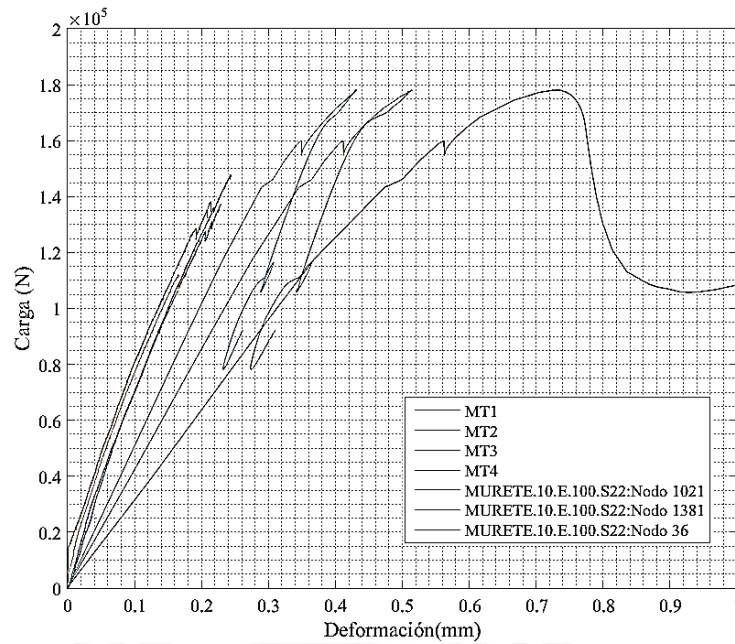


Figura 4.24. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo A

Los nodos, en los cuales se obtuvo las respuestas carga-deformación presentadas en la Figura 4.23, se muestran en la Figura 4.25 y son los empleados para este y los modelos siguientes. Se escogió el Nudo 36 por ser el que se encuentra con mayor concentración de esfuerzo (punto donde se aplica el desplazamiento), el Nudo 1381 por encontrarse en la zona en donde en teoría se desarrolla la mayor deformación horizontal y el Nudo 1021 por ser un punto intermedio, de este modo entre los tres nodos luego se elegirá aquel que represente mejor la curva carga-deformación del material.

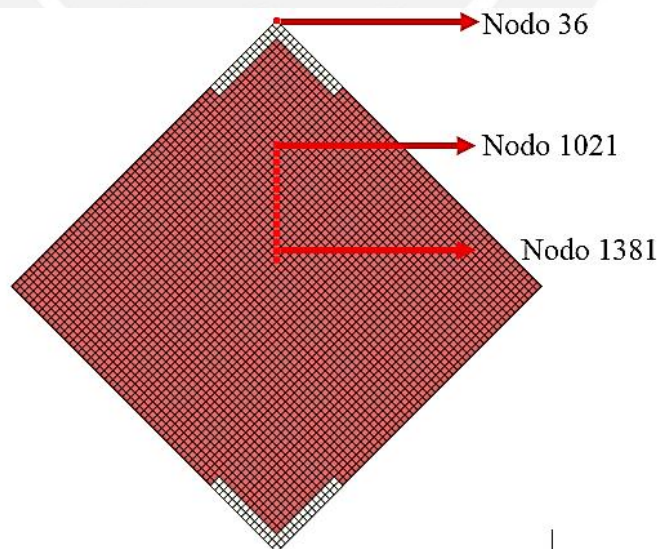


Figura 4.25. Nodos seleccionados para el análisis de muretes

b) Modelo B: MURETE.10.E.102

Análisis con comportamiento a compresión plástico no lineal y comportamiento a tracción lineal

En la Tabla 4.9 y Figura 4.22 a) se define el comportamiento a compresión empleado y en Figura 4.22 b) el comportamiento lineal a tracción del material; similar al caso del modelo A. El desplazamiento aplicado en la cima hacia abajo fue de -10 mm al igual que en el caso previo. Lo característico de este modelo es la adición de una zona con propiedades únicamente elásticas debajo del refrentado, tal como se muestra en la Figura 4.26. Ello con la intención de evitar una fuerte concentración de esfuerzos debajo del refrentado y que se transmitan de mejor manera a todo el murete.

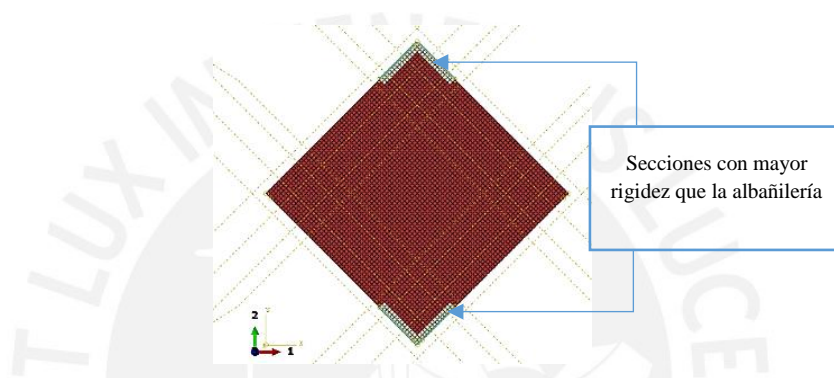


Figura 4.26. Esquema del modelo B

En la Figura 4.27 se presentan los estados finales del modelo tanto para esfuerzo en el eje vertical en MPa, deformación en el eje vertical en mm y deformación plástica en el mismo eje, de izquierda a derecha. Se observa que la concentración de esfuerzo ha disminuido de nivel pero que la falla se produce de manera local en la esquina superior.

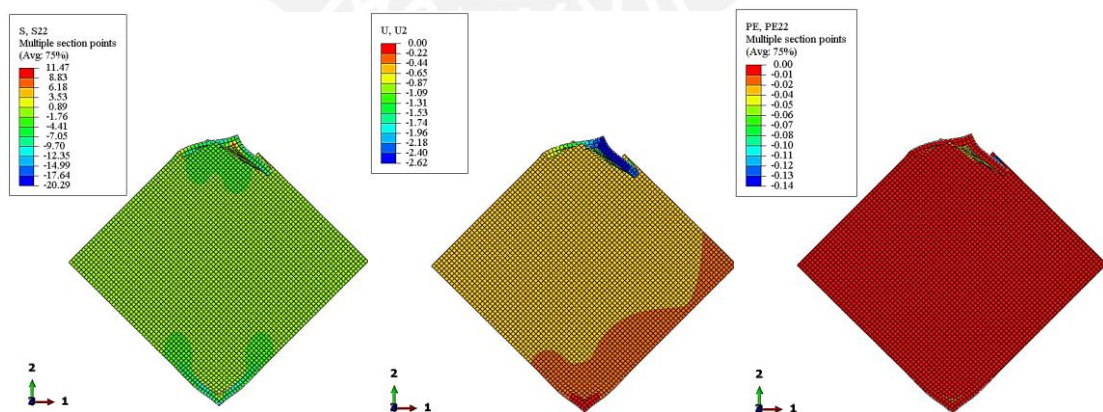


Figura 4.27. Resultados para el modelo B

En la Figura 4.28 se compara la gráfica carga-deformación de los resultados de laboratorio con las que se obtuvieron a partir de este modelo para los nodos 1021, 1381 y 36 en particular,

que son los mismos nodos que se han seleccionado en los modelos previos, ver Figura 4.25. Se aprecia que la gráfica del Nodo 36 se aleja de los resultados mientras que las de los otros nodos se aproximan más.

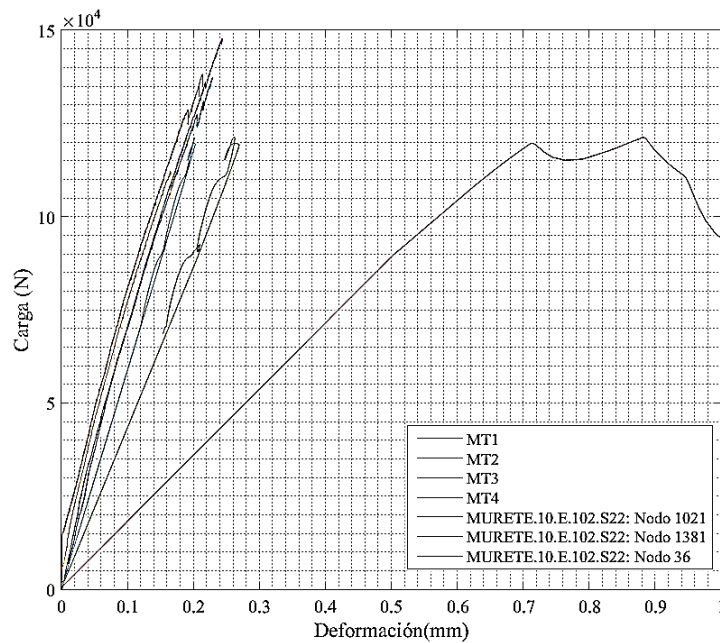


Figura 4.28. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo B

c) Modelo C: MURETE.10.E.103

Análisis plástico con comportamiento a compresión y a tracción no lineal

En la Tabla 4.9 y Figura 4.22 a) se define el comportamiento a compresión empleado y en Tabla 4.3 y Figura 4.29, el comportamiento no lineal a tracción que se obtuvo a partir de las ecuaciones de Lourenço. En este modelo también se empleó el esquema mostrado en la Figura 4.30 con una sección con rigidez mayor al resto del murete.

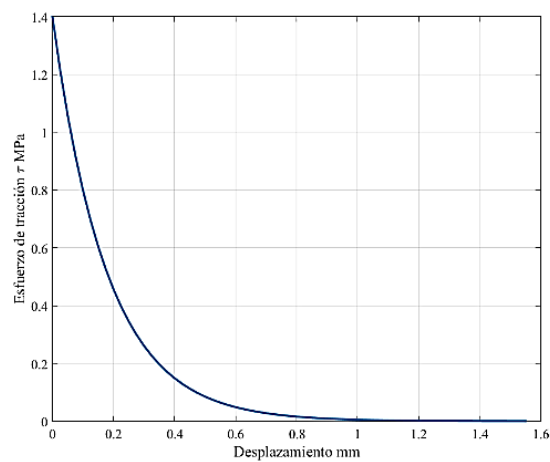


Figura 4.29. Comportamiento a tracción, zona plástica

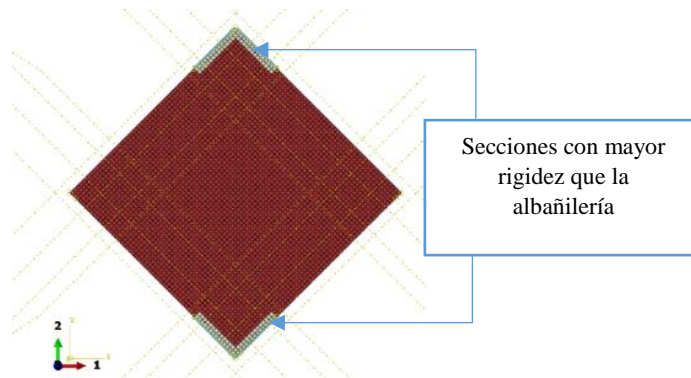


Figura 4.30. Esquema del modelo C

En la Figura 4.31 se aprecia concentración de esfuerzos tanto en la zona superior del murete como en la inferior. Sin embargo, en ese modelo tampoco se alcanza una falla que se aproxime a la diagonal vertical del elemento. De izquierda a derecha, en el primer murete se presenta la distribución final de esfuerzos en el eje 2 (vertical) en MPa, en el segundo murete se muestra los desplazamientos en el mismo eje en mm y en el tercer murete las deformaciones unitarias plásticas.

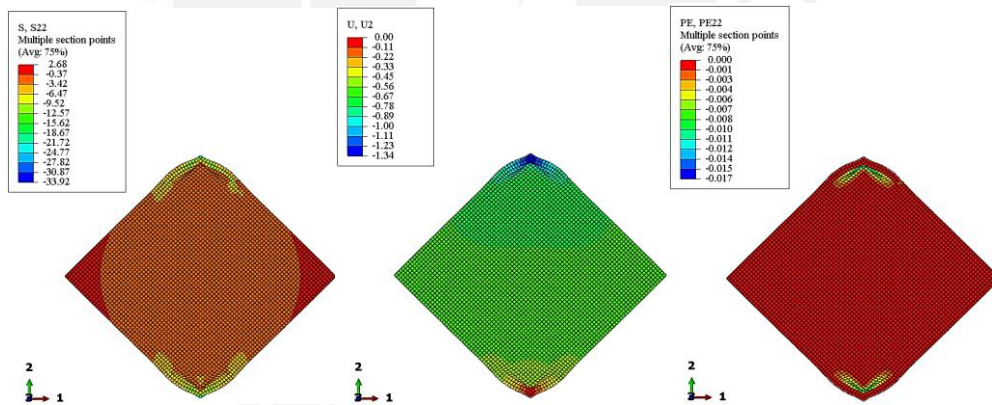


Figura 4.31. Resultados para el modelo C

En las gráficas carga-deformación de la Figura 4.32 se aprecia un caso similar al modelo previo, en el cual, las curvas de los nodos 1021 y 1381 presentan una pendiente similar a las curvas realizadas con los resultados de ensayo. Sin embargo, en este caso los valores máximos que se alcanzan en las gráficas de los nodos del modelo numérico son inferiores a las gráficas de los muretes ensayados.

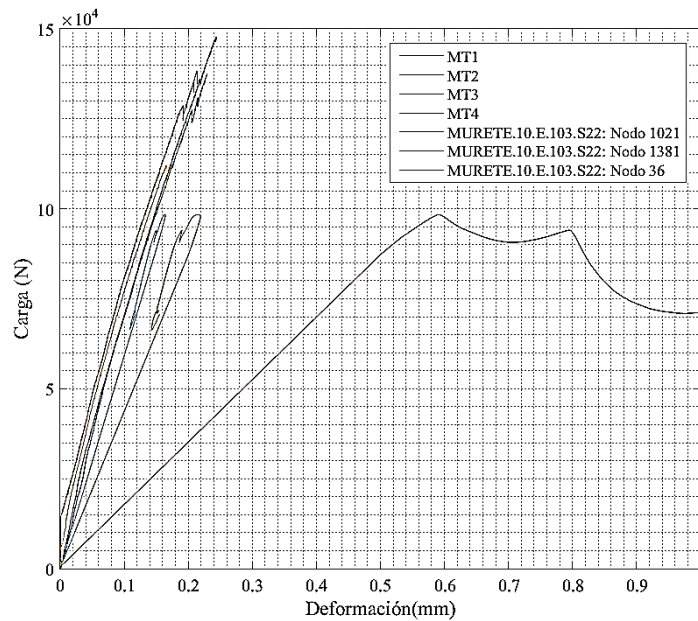


Figura 4.32. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo C

d) Modelo D: MURETE.10.E.104

Análisis con comportamiento a compresión y a tracción plástico no lineal

En la Tabla 4.9 y Figura 4.22 a) se define el comportamiento a compresión empleado y en Tabla 4.3 y Figura 4.29, el comportamiento no lineal a tracción que se obtuvo a partir de las ecuaciones de Lourenço. Este modelo presenta las mismas propiedades que el modelo previo, la diferencia se encuentra en la ausencia de una zona elástica en la zona de contacto del murete con el refrentado. Los resultados se muestran a continuación, de izquierda a derecha, en el primer murete se presenta la distribución final de esfuerzos en el eje 2 (vertical) en MPa, en el segundo murete se muestra los desplazamientos en el mismo eje en mm y en el tercer murete las deformaciones unitarias plásticas.

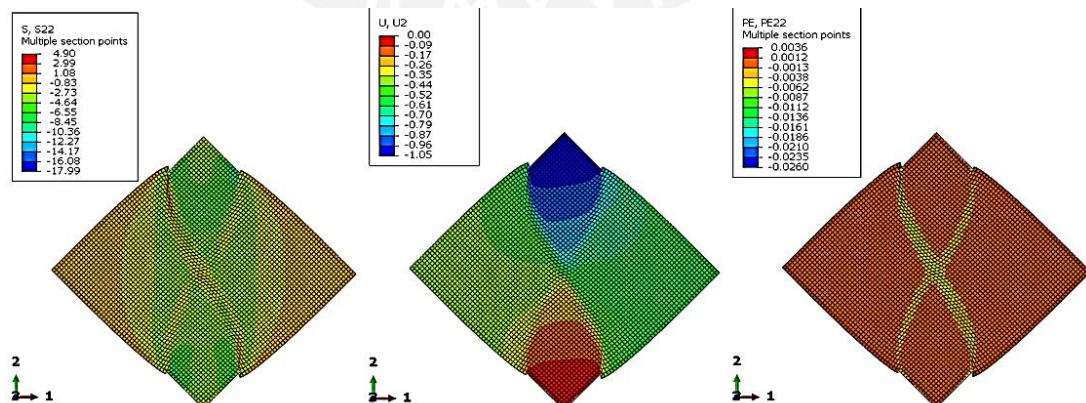


Figura 4.33. Resultados para el modelo D

Como se aprecia en la Figura 4.33, se producen dos fallas que inician en los extremos del refrentado y se extienden a lo largo del murete, próximas a la diagonal vertical del elemento. Este resultado es más cercano a lo observado en el laboratorio. Adicionalmente, las curvas de los Nodos 1021, 1381 y 36 se asemejan más a los resultados de ensayo como se aprecia en la Figura 4.34. Sin embargo, en el ensayo solo se formó una grieta vertical y no dos.

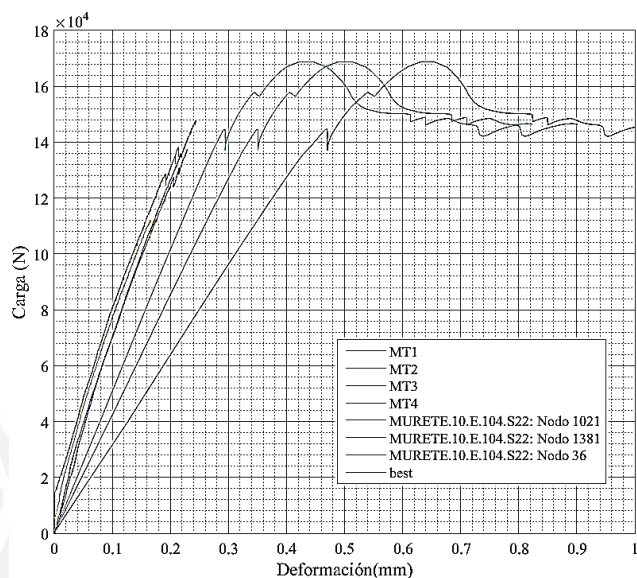


Figura 4.34. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo D

e) Modelo E: MURETE.10.E.106

El siguiente modelo emplea las mismas propiedades que los dos modelos previos, es decir, ha sido asignado con propiedades elásticas y plásticas que definen leyes constitutivas a compresión y tracción no lineales y que se aprecian en las Figura 4.23 a) y Figura 4.30. Las propiedades empleadas y los valores que definen las leyes constitutivas del material se resumen en el Anexo 4. Las diferencias entre este modelo y el Modelo D que tampoco incluye una zona elástica debajo del refrentado son las opciones que se seleccionaron en el software Abaqus. De manera específica, el programa Abaqus contiene una sección denominada Step donde se introducen valores, para cada carga que se define, que cambian el cálculo interno del programa realiza. Dentro de esta sección, se solicita una fracción de disipación de energía para que el programa realice una estabilización automática. En los modelos anteriores se asignó un valor de 0,002 y para este modelo un valor de 0,0002.

En la Figura 4.35 se aprecia los estados últimos del murete tanto para el caso de esfuerzo en el eje vertical en MPa en el primer murete, desplazamiento en mm en el segundo murete y deformación plástica en el mismo eje en el tercer murete. Se observa que se produce una falla que se aproxima a la diagonal vertical del murete y a lo que se obtuvo en los ensayos de compresión diagonal en muretes en el laboratorio.

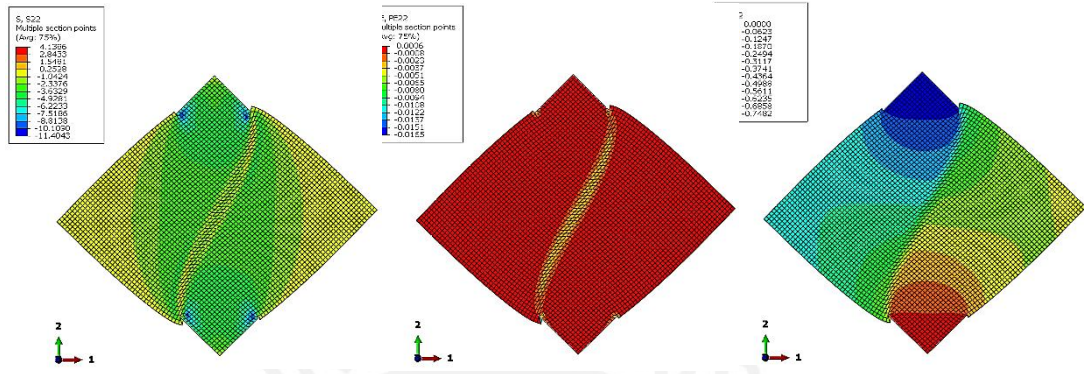


Figura 4. 35. Resultados modelo E

En la Figura 4.36 se presenta las gráficas carga-deformación de los muretes reales y las que se obtuvieron a partir de este último modelo en tres distintos nodos, al igual que en los modelos previos. Se obtuvieron gráficas del modelo cercanas a las gráficas de ensayo.

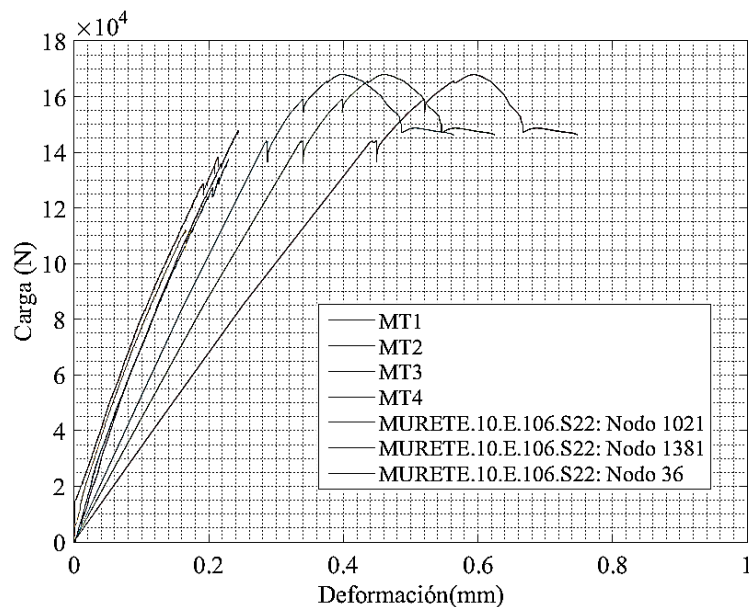


Figura 4.36. Carga vertical-deformación para distintos nodos en el modelo E

Debido a una mejor aproximación de las curvas carga-deformación y de obtener una falla más similar a la que se observó en los muretes después de alcanzar su carga máxima en el laboratorio, se deduce que el Modelo E es el mejor calibrado.

5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se comentará los resultados que se han obtenido tanto de los ensayos de laboratorio como los obtenidos de los modelos numéricos realizados para pilas y muretes.

5.1 Análisis con la Norma E.070 y ASTM E519-02 (2003)

Según lo que indica la Norma E.070, el módulo de corte se puede estimar según como se indica a continuación.

$$G_m = 0,4E_m \quad (31)$$

Si se considera el valor de Módulo de Elasticidad que se ha obtenido, 5720 MPa, el valor del Módulo de Corte tendría un valor aproximado de 2288 MPa.

$$E_m = 5720 \text{ MPa}$$

$$G_m = 2288 \text{ MPa}$$

A partir de los ensayos de compresión diagonal en muretes, se calculó el Módulo de Corte de material, el cual tuvo un valor de 2270 MPa. Se puede apreciar que los resultados de ensayo han concordado con lo propuesto por la norma para un cálculo estimado del Módulo de Corte.

La ASTM E519-02 (2003), por otro lado, presenta una ecuación para el cálculo del esfuerzo de corte en muretes de albañilería. La ecuación es la siguiente:

$$S_s = \frac{0,707P}{A_n} \quad (32)$$

Donde S_s , es el esfuerzo de corte, en MPa, en el área neta que recibe la aplicación de la carga en el murete, P es la carga aplicada en N, y A_n es el área neta del espécimen en mm². El área neta se calcula con la siguiente expresión.

$$A_n = \left(\frac{W+h}{2}\right)tn \quad (33)$$

Donde W es el ancho del espécimen en mm, H la altura del espécimen en mm, t es el espesor del espécimen en mm y n es el porcentaje del área bruta de la unidad que es sólida, expresado como decimal

Con dichas fórmulas, para una carga aplicada máxima de 150000 N y un valor de “n” de 0,85 se obtuvo el siguiente resultado:

$$S_s = 2,26 \text{ MPa}$$

Se puede observar que el valor de módulo de corte que se ha obtenido es similar al que se obtiene con el procedimiento de la Norma E.070. Y con la fórmula del ASTM se estima un valor de resistencia al corte de 2,26 MPa.

5.2 Resultados de ensayo y literatura

5.2.1 Pilas

La resistencia a compresión promedio que se obtuvo de los ensayos en las cuatro pilas fue de 10 MPa. Dicho valor es mucho mayor a 6,4 MPa que es el valor de resistencia a compresión que la NTP 339.605 detalla para albañilería con unidades de ladrillo King Kong industrial, ver Tabla 2.1. Sin embargo, el valor obtenido se aproxima a las resistencias de compresión que Ewing (2004) registró durante su investigación, revisar la Tabla 2.5. El valor de 10 MPa indica que el material compuesto ha trabajado bien y es posible que los ensayos no se hallan detenido en la aparición de las primeras fallas (internas) sino cuando estas fueron visibles (externas).

Si se compara la resistencia a compresión calculada con las mostradas por Ganapathi et al.(2011) en la Tabla 2.4, para una relación cemento:arena 1,4, los valores que se han alcanzado tanto en los ensayos de laboratorio como de los modelos numéricos, en la presente investigación, son mayores a los que presenta Ganapathi. A pesar de que en ambos casos se ha trabajado con pilas de albañilería de arcilla, se debe comentar que la esbeltez promedio de las pilas de esta investigación es 4,7 mientras que en los resultados de Ganapathi la esbeltez máxima es 3. Se observa una relación entre el esfuerzo a compresión máximo de ensayo y la esbeltez del espécimen.

Por otro lado, el valor del módulo del material, 5720 MPa, se encuentra en un orden de magnitud correcto pero mayor a los resultados de Kaushik et al. (2007), ver Tabla 2.3, asimismo, los valores de resistencia a compresión son mayores pero cercanos para el caso de prismas con mortero fuerte y relación cemento:cal:arena de 1:0:3.

Se observó concentración de esfuerzos en las esquinas, adicional a las grietas verticales en los elementos. En el caso de las pilas PL-01, PL-02 y PL-03 la concentración que se produjo en la cima puede haber sido producto de imperfecciones en el refrentado o del hecho de que es en la cima donde se aplica la carga, o una combinación de ambos efectos. En el caso de la Pila PL-04 es más probable que imperfecciones en el refrentado inferior incitaran fallas en las esquinas de la base.

5.2.2 Muretes

La resistencia promedio a tracción calculada a partir del ensayo de compresión diagonal fue de 1,4 MPa. Dicho valor es mayor a la resistencia promedio que indica la NTP 339.605 para albañilería con unidades de ladrillo King Kong Industrial que es 0,8 MPa, ver Tabla 2.2. Ello puede deberse a una buena adherencia entre unidad de ladrillo y mortero, lo cual permite que el murete pueda alcanzar valores de resistencia mayores.

Para los primeros modelos numéricos realizados se decidió aplicar el desplazamiento en todo el refrentado superior y empotrar la base tal como los modelos de Bolhassani (2015) que se muestran en la Figura 2.19. Sin embargo, se observó una alta concentración de esfuerzos en las esquinas donde el refrentado terminaba. Por ello, se decidió aplicar, en otro modelo, la carga de manera puntual en la esquina superior y retirar el refrentado, ello tras haber hecho otras pruebas para tratar de disminuir la concentración de esfuerzos. Si bien no se alcanzó grietas completas en la diagonal vertical, los resultados no son en su totalidad erróneos pues en ensayos de laboratorio se presentaron fallas por concentración de esfuerzo en la esquina superior del espécimen como en los modelos que presentaron dicho efecto.

Sin embargo, el murete se puede seguir calibrando para obtener una falla en la diagonal vertical. Esto debido a que una falla de este tipo refleja una buena adherencia entre las unidades de ladrillo y el mortero, y es la falla típica para ensayos de compresión diagonal, tal como también se aprecia en los resultados de ensayo de Miccoli (2015), ver Figura 2.23.

5.3 Modelos numéricos

5.3.1 Pilas

Después de realizados los modelos, y obtener las curvas de carga-deformación, se decidió comparar los mejores resultados de cada modelo de pila elegido, en este caso fueron los siguientes: PILA20.R.100, PILA20.R.101 Y PILA20.R.103 para el caso particular de los nodos 202, que se han mostrado en el capítulo 4. La comparación en simultáneo de las curvas carga-deformación de estos tres modelos con las curvas de ensayo se muestra en la Figura 5.1. En dicha figura se aprecia que el modelo que se asemeja más a la envolvente de los resultados de ensayo es el de PILA20.R.103 (modelo 3), el cual alcanza el valor pico de resistencia a compresión y luego desarrolla el “*softening*” en su comportamiento plástico.

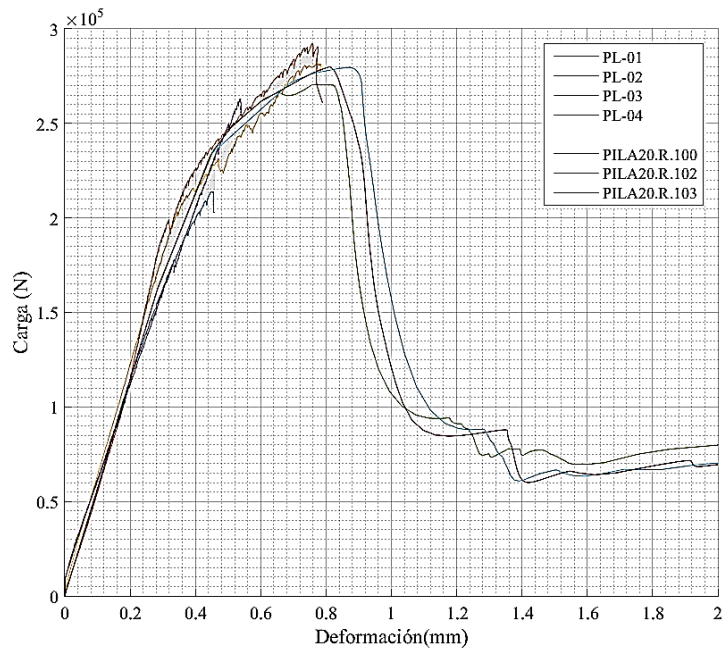
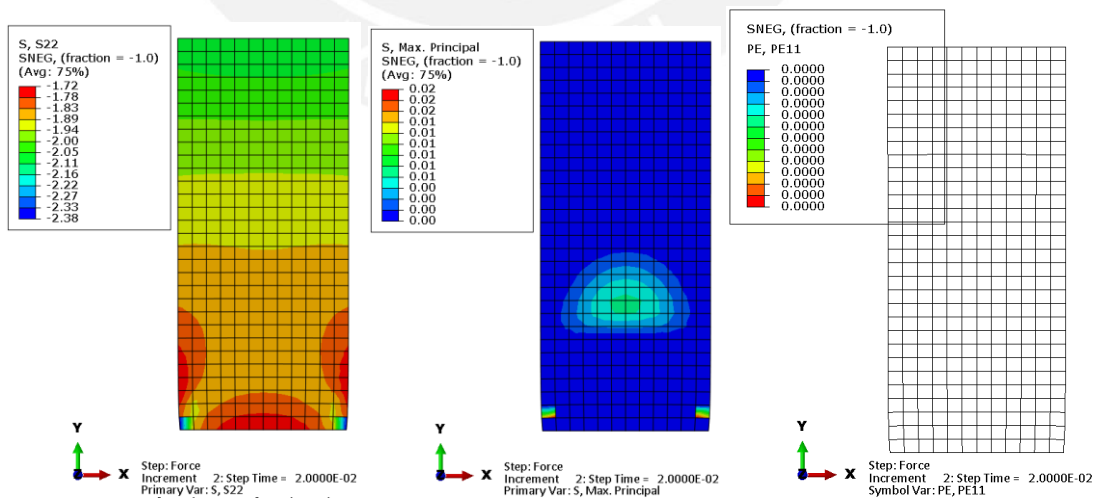


Figura 5.1 Comparación de resultados finales de los modelos para pilas

Una vez que hemos identificado cuál modelo representa mejor la curva carga-deformación, observaremos a mayor detalle las deformaciones y esfuerzos principales que en este se desarrollan. En la Figura 5.2 se ha representado de izquierda a derecha los siguientes diagramas: esfuerzo en el eje vertical, esfuerzo máximo principal en el elemento y deformación plástica unitaria en el eje horizontal para distintos “step” o paso de fuerza, desde el paso 2 que es cercano a un esfuerzo y desplazamiento 0 hasta un paso 19 que es muy próximo al esfuerzo máximo de laboratorio (10 MPa).



a)

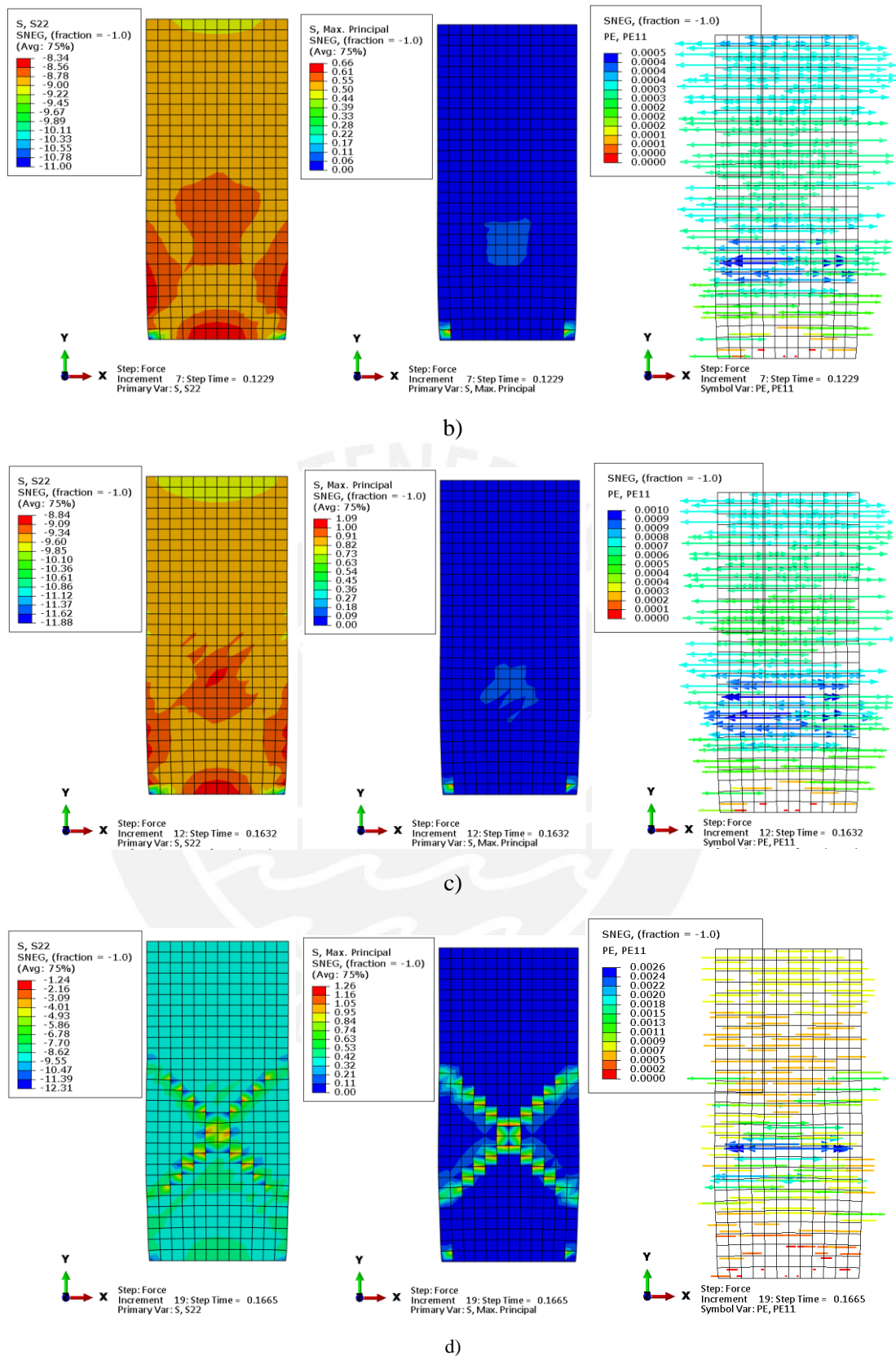


Figura 5. 2. Esfuerzo en el eje vertical, esfuerzo máximo principal y deformación plástica en el eje horizontal para el modelo PILA20.R.103

Se puede observar cómo evolucionan los esfuerzos paso a paso, incrementándose en zonas centrales y a la vez, las deformaciones plásticas en el eje X se desarrollan con mayor magnitud

en dichas zonas centrales. Las deformaciones en X inducirían aperturas del material debido a tracción horizontal. Este comportamiento es posible que represente el inicio de las grietas verticales que se apreciaron en el laboratorio. Si observamos la distribución de deformación en el eje vertical para el *step* 19 (que representa el momento en el cual el material alcanza su mayor esfuerzo) se obtiene lo que se muestra en la Figura 5.3. En ella, se puede observar que las mayores deformaciones en el eje 2 se dan en el centro del elemento y se distribuyen en diagonales, asimismo, que la mayor deformada vertical es en la zona central como se aprecia en la pila de la derecha con flechas de magnitud.

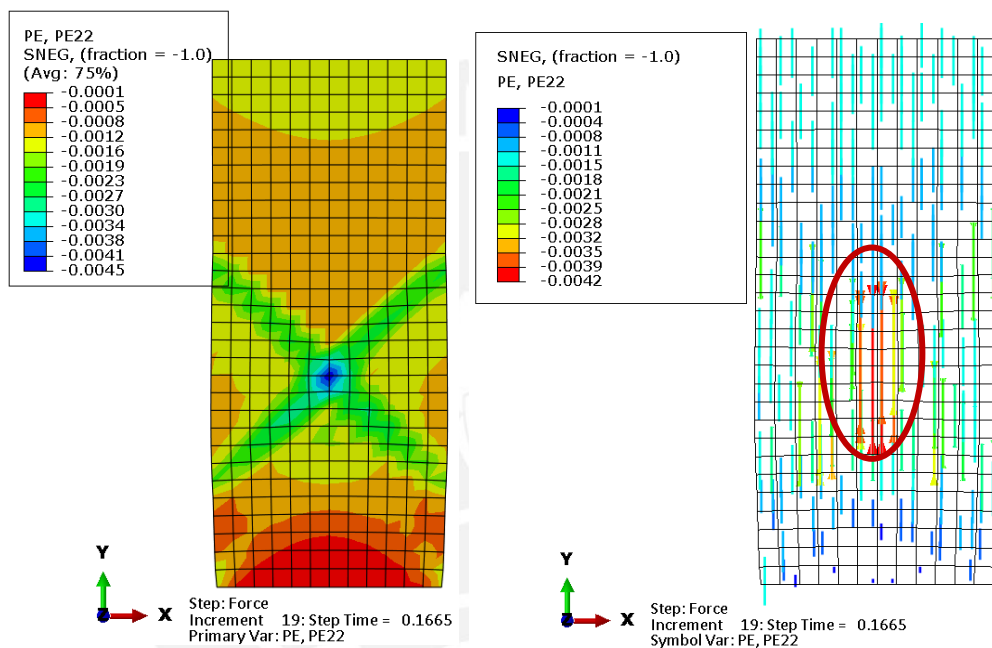


Figura 5. 3. Deformación unitaria plástica en el eje vertical para el modelo PILA20.R.103

Este análisis nos permite decir que el modelo se aproxima al resultado de laboratorio. Puesto que los mayores esfuerzos en sus elementos finitos inducen tracciones horizontales que determinan el inicio de deformaciones verticales en la zona central del cuerpo del elemento aunque no se haya logrado que se desarrollen por completo y de manera continua a lo largo de toda la pila dichas grietas verticales

5.3.2 Muretes

La mayoría de los modelos numéricos desarrollados han presentado fallas concentradas en las esquinas superiores. Sin embargo, el MURETE.10.E.104, que ha sido definido con comportamiento a tracción y compresión no lineal y con el refrentado en su esquina superior e inferior, ha logrado dos fallas que se aproximan a la diagonal vertical; el Modelo MURETE.10.E.106 alcanzó desarrollar una sola falla próxima a la diagonal vertical con se

observó en los ensayos de laboratorio. Aunque, la falla se inicia en los bordes del refrentado, ello se explica por la concentración de esfuerzos que se desarrolla en el contacto de los dos materiales modelados que poseen valores de rigidez distintas. Este modelo es el que mejor resultado presenta, como se aprecia en la Figura 5.4, ya que además, las curvas carga-deformación que se obtienen alcanzan los valores picos de resistencia a tracción del ensayo sin presentar irregularidades como en el caso de los otros modelos. Cabe mencionar que el comportamiento post pico no se asemeja a las leyes constitutivas teóricas que fueron ingresadas del programa Abaqus.

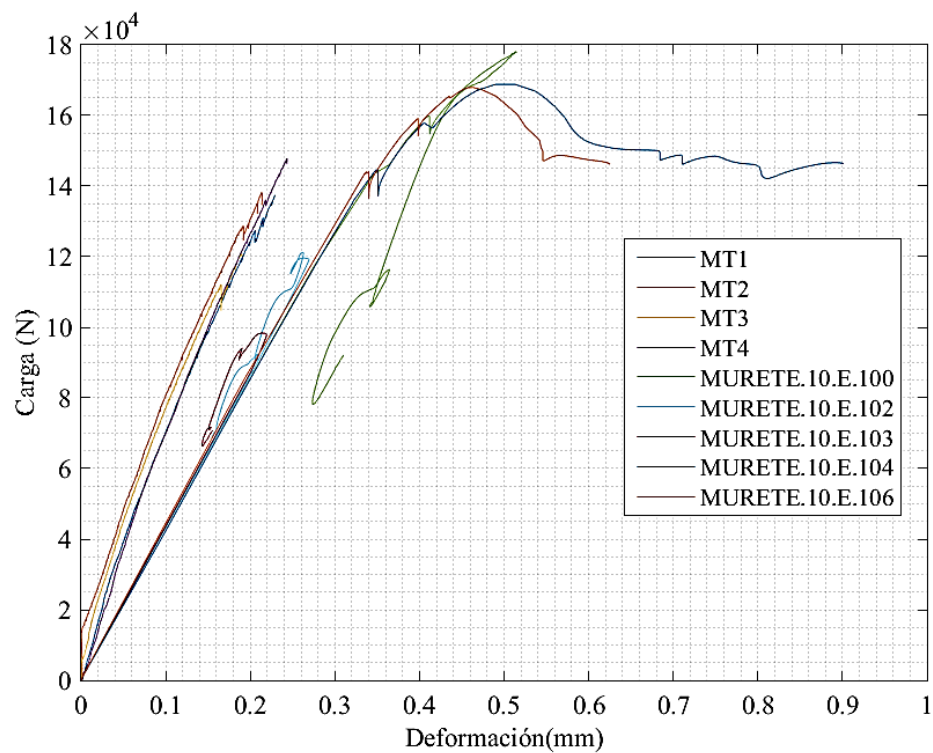


Figura 5.4. Comparación de resultados finales de los modelos para muretes

6. CAPÍTULO VI: RESUMEN Y CONCLUSIONES

La presente tesis incursiona en el tema del modelamiento numérico para obtener leyes constitutivas que representen al material elegido, en este caso albañilería de arcilla. Dichas leyes constitutivas requieren de parámetros plásticos que se calibraron mediante la iteración de modelos numéricos hasta alcanzar una respuesta similar a la obtenida en los ensayos de laboratorio. Además de calibrar parámetros plásticos, ha empleado un valor referencial del coeficiente de Poisson y de la densidad del material, todo ello permitió definir el material con la salvedad de que el material fue asumido como homogéneo.

Las pilas que se ensayaron fueron 4 de 600x230x130 mm³ y los muretes fueron 4 especímenes de 600x600x130 mm³. Los modelos de las pilas se aproximaron de manera confiable a la envolvente de resultados de ensayo hasta alcanzar la resistencia máxima. Por otro lado, los modelos de los muretes han alcanzado resistencias máximas a tracción mayores a la de los ensayos y patrones de falla distintos a los observados en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas a excepción por el último modelo presentado.

El módulo de elasticidad de la albañilería ensayada es de 5720 MPa, el módulo de corte tiene un valor de 2270 MPa, la resistencia a compresión obtuvo un valor promedio de 10 MPa, la resistencia al corte un valor de 1,4 MPa, y el coeficiente de Poisson estimado (asumiendo un material isotrópico) fue de 0,26. Este último valor, se concluye, se debe calcular con *strain gauges* u otros instrumentos durante el ensayo para obtener mejores modelos.

Se concluye que los modelos únicamente elásticos son de utilidad pues permiten que el investigador o profesional comprenda de mejor manera la distribución de esfuerzos que se produce en las estructuras a analizar. Asimismo, un modelo elástico permite familiarizarse con el material y sus propiedades básicas y comprender las características del programa que se emplee para el modelamiento.

Con los macromodelos no es posible representar con exactitud las fallas que son inducidas por los planos de debilidad que representan las capas de mortero y los agujeros en el eje longitudinal de manera adecuada. Las fallas que se alcanzaron se centran en la zona central de

las pilas y no logran desarrollarse a lo largo de toda la pila modelada. Sin embargo, si reflejan que a causa de tracción inducida se inician deformaciones en el eje vertical.

Sin embargo, para un análisis del material con menor tiempo de desarrollo, el macromodelo de las pilas se ha acercado considerablemente a los resultados de carga-deformación de los ensayos de laboratorio, ello quiere decir que con el modelo realizado se puede obtener una resistencia máxima confiable y un inicio de zona plástica estimada (valor de la deformación que inicia la zona plástica).

Al analizar las gráficas de carga de tracción-deformación en determinados nudos de los modelos numéricos de las pilas, se percibió valores de esfuerzo máximo mayores a los calculados a partir de la data de ensayo. Por lo tanto, se puede concluir que al desarrollar el Método de Elementos Finitos, se evalúan elementos independientes que, si se encuentran en la zona interior del modelo, se encuentran confinados con los elementos finitos que lo rodean.

El modelo de pila calibrado es PILA20.R.103 cuyo comportamiento a compresión se asemeja a los resultados de ensayo. Este comportamiento presenta un descenso gradual post pico, que está gobernado por las ecuaciones de Lourenco que se emplearon para calibrar el modelo. Por otro lado, el modelo de murete calibrado es el MURETE.10.E.106; el cual alcanza un valor de esfuerzo de tracción cercano al calculado; sin embargo, se considera que la calibración de este modelo aún se debe perfeccionar para obtener curvas más semejantes a las de ensayo y patrones de falla más cercanos a la diagonal vertical del elemento. Por otro lado, la etapa elástica del MURETE.10.E.106 presenta una pendiente menor que la obtenida en los resultados de ensayo, lo cual representa una diferencia entre el módulo de elasticidad ingresado al programa y el reflejado en los resultados; por ello, también se concluye que requiere de una mejor calibración.

Tras observar los patrones de falla de los modelos, se puede concluir que es recomendable modelar la superficie de contacto entre el refrentado y el murete de una manera más especializada para evitar que los modelos numéricos fallen por concentración de esfuerzo en estas superficies. Sin embargo, ello no se contempla en el alcance de esta investigación. Para el modelo MURETE.10.E.106 se logró obtener grietas diagonales que se acercaban a la diagonal vertical del murete tal como se vio en el ensayo de laboratorio.

Se puede concluir que la esbeltez tiene una influencia directa en la resistencia a compresión axial de pilas de albañilería. Para una esbeltez menor los esfuerzos son menores, tal como se comentó en el capítulo 5.

Los resultados carga-deformación de los modelos numéricos de las pilas reflejan que efectivamente se desarrolla un comportamiento tipo “*softening*” después de que el material alcanza el valor de sus resistencia a compresión máxima. Para el caso de los muretes no se pudo obtener el comportamiento post pico deseado.

Se ha concluido que, efectivamente, como se presentó en el capítulo 2, existen distintos tipos de falla en la albañilería. Estas fallas se ven influenciadas por la configuración del elemento, la cohesión entre los componentes de la albañilería, las propiedades mecánicas y físicas de los componentes y el tipo de estado de carga que se desarrolle. En tal sentido, en los ensayos de pilas se ha obtenido fallas por concentración de esfuerzos en las esquinas, y grietas verticales; en los muretes falla por corte y falla por aplastamiento en la zona de aplicación de la carga. Entre los modelos de los muretes también se observó fallas localizadas en las zonas de contacto entre el refrentado y el murete, similar a la experiencia en el laboratorio.

Se puede concluir que las leyes constitutivas obtenidas para compresión y tracción del material se pueden emplear para otros estudios o diseños debido a que los resultados alcanzan los valores de resistencia máxima a compresión y tracción del material; además, los parámetros elásticos como módulo de elasticidad y módulo de corte que fueron ingresados al programa Abaqus se encuentran dentro de los valores propuestos por la norma peruana. Por otro lado, las resistencias máximas calculadas se encuentran por encima de los valores esperados de acuerdo con el mismo reglamento.

Las características del modelo de pila calibrado son las siguientes: la malla de elementos finitos es de 20x20mm que contiene 360 elementos finitos y 403 nodos. Además, la condición de borde en la base es con apoyos deslizantes. Por otro lado, para el murete se eligió una malla de 10x10 mm con 3660 y 3721 nodos y con la condición de borde en la base empotrada, ya que esto simulaba lo observado en el laboratorio, es decir, que el murete no tenía posibilidad de movimiento horizontal, vertical ni de rotación en la base.

Los parámetros finales para el análisis computacional del comportamiento a compresión de la albañilería ensayada son los que se resumen en la Tabla 4.2 y que se emplearon el modelo 3 de pilas. Los parámetros para el análisis computacional del comportamiento a tracción se resumen en la Tabla 4.9. Los demás parámetros mecánicos de la albañilería para el modelo no lineal plástico de la pila del modelo 3 que se introdujeron en Abaqus se resumen en el Anexo 3, y los parámetros mecánicos de la albañilería para el modelo no lineal plástico de muretes del modelo E se resumen en el Anexo 4.



REFERENCIAS

- Blondet, M., Torrealva, D., García, G. V., Ginocchio, F. & Madueño, I. (2005). Using industrial materials for the construction of safe adobe houses in seismic areas. In Proceedings of Earth Build 2005 Conference. Sydney, Australia.
- Bolhassani, M., Hamid, A., Lau, A., & Moon, F. (2015). Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*, 83, 159-173.
- Calderini, C., Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2010). The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry. *Construction and Building Materials*, 24(5), 677-685.
- Cook R., Malkus D., Plesha M., & Witt R. (2002) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4ta. ed., John Wiley and Sons, Inc., Madison.
- Chandrupatla, T., Belegundu, A., & Cera Alonso, J. (1999). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*. México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Chapra, S. & Canales R. *Métodos Numéricos para Ingenieros*. Quinta Edición. Ed. Mc. Graw Hill. México D.F. 2007. Consultado en: <http://es.slideshare.net/mikebsd/mtodos-numricos-para-ingenieros-5ta-ed-chapra>
- Das, B., & Cera, J. (2011). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Learnig.
- Ewing, B., & Kowalsky, M. (2004). Compressive Behavior of Unconfined and Confined Clay Brick Masonry. *Journal Of Structural Engineering*, 130(4), 650-661. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(650)
- Furukawa, A., Spence, R., Ohta, Y., & So, E. (2010). Analytical study on vulnerability functions for casualty estimation in the collapse of adobe buildings induced by earthquake. *Bulletin of earthquake engineering*, 8(2), 451-479.
- Ganapathi, S., Murthy, A., Iyer, N., Lakshmanan, N., & Bhagavan, N. (2011). Experimental and numerical study on in-plane behavior of brick masonry wall panels. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(03), 431-450.
- Giordano, A., Mele, E., & De Luca, A. (2005). Numerical Modelling of Masonry Structures Through Different Approaches. *Universita degli Studi di Napoli, Italy*.
- Gowda, C. (2014). Numerical Modelling of Experimental Tests on Cylindrical Masonry Specimens.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2014). Viviendas, según material predominante en las paredes exteriores y área de residencia. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>
- Kaushik, H., Rai, D., & Jain, S. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(9), 728-739.
- Lourenco, P., Rots, J., & Blaauwendraad, J. (1995). Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling. *HERON*, 40 (4), 1995.
- Lourenço, P. (1996). A user/programmer guide for the micro-modelling of masonry structures. Report, 3(1.31), 35.
- Lourenço, P. (1996). Computational strategies for masonry structures.
- Lourenço, P. (2004). Current experimental and numerical issues in masonry research.
- Mengi, Y., Mcniven, H., & Tanrikulu, A. (1991). A model for nonlinear earthquake analysis of unreinforced brick masonry buildings. *Computers & Structures*, 41(4), 801-812
- Miccoli, L., Garofano, A., Fontana, P., & Müller, U. (2015). Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry. *Engineering Structures*, 104, 80-94.
- Öchsner, A., & Merkel, M. (2013). *One-dimensional finite elements*. Berlin: Springer.
- Page, A. (1981). The biaxial compressive strength of brick masonry.
- Roca, P., González, J., Oñate, E., & Lourenço, P. (1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. *Structural Analysis of Historical Constructions II*. CIMNE, Barcelona.
- San Bartolomé, A. (1994). *Construcciones de albañilería y comportamiento sísmico y estructural*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Tarque, N., Camata, G., Spacone, E., Varum, H., & Blondet, M. (2014). Nonlinear Dynamic Analysis of a Full-Scale Unreinforced Adobe Model. *Earthquake Spectra*, 30(4), 1643-1661.
- Tarque N, Camata G, Spacone E, Varum H and Blondet M. (2012). Elastic and inelastic parameters for representing the seismic in-plane behaviour of adobe walls. *Terra 2012: XI Conferencia Internacional sobre el Estudio y Conservación del Patrimonio Arquitectónico de Tierra*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Peru.

Ventas, L (2014, Agosto 26). *¿Por qué el 90% de los terremotos suceden en el Cinturón del Pacífico?* Recuperado de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/08/140826_ciencia_cinturon_fuego_pacifico_zona_mas_sismica_mundo_lv

Tzamtzis, A., & Asteris, P). (2003). Finite Element Analysis of Masonry Structures Part I—Review of Previous Work. In 9th North American masonry conference (pp. 101-11).

