Ing. Adair Parraguirre Gancedo

Modelación del comportamiento mecánico de la mampostería a tensión diagonal reforzada con malla electrosoldada

2024

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

"MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MAMPOSTERÍA A TENSIÓN DIAGONAL REFORZADA CON MALLA ELECTROSOLDADA"

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Adair Parraguirre Gancedo

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Querétaro, Qro., mayo de 2024

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Modelación del comportamiento mecánico de la mampostería a tensión diagonal reforzada con malla electrosoldada

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:
Ing. Adair Parraguirre Gancedo

Dirigido por:
Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Enrique Rico García
Suplente

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Mayo de 2024
México

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a el CONAHCYT por la beca otorgada y el apoyo brindado durante mis estudios de maestría, asimismo, agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro y a los profesores que me guiaron para llevar a cabo esta investigación.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS IV
ÍNDICE V
ÍNDICE DE FIGURAS VII
ÍNDICE DE TABLAS X
RESUMEN XI
ABSTRACT XII
1. INTRODUCCIÓN 13
1.1. Descripción del problema 16
1.2. Justificación 17
2. ANTECEDENTES 18
2.1. Pruebas experimentales 18
2.1.1. Estudios previos 18
2.1.2. Normativas mexicanas 21
2.1.1.1. NMX-C-036-ONNCCE-2013 21
2.1.1.2. NMX-C-404-ONNCCE-2012 22
2.1.1.3. NMX-C-061-ONNCCE-2001 23
2.1.1.4. NMX-C-464-ONNCCE-2010 24
2.2. Modelos computacionales 28
2.2.1. Metodología de elemento finito 28
2.2.2. Modelación de mampostería 31
2.2.3. Modelo constitutivo de microplano con daño y plasticidad acoplado 33
2.2.4. Modelo de zona cohesiva 38
2.2.5. Estudios previos 39
2.3. Refuerzo con mallas metálicas 48
2.4. Bondad de ajuste en modelos 52
2.4.1. Distribución chi cuadrada para bondad de ajuste en experimentos binomiales 52
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 55
3.1. Hipótesis 55
3.2. Objetivos 55
3.2.1. Objetivo general 55
3.2.2. Objetivos específicos 55
4. METODOLOGÍA 56
4.1. Determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería 56
4.1.1. Análisis de los materiales 56
4.1.1.1. Bloques de concreto 57
4.1.1.2. Cubos de mortero 58
4.1.2. Ensaye de pilas 60
4.1.3. Ensaye de muretes 62
4.1.3.1. Muretes sin refuerzo 62
4.1.3.2. Muretes con refuerzo 64
4.2. Planteamiento del modelo computacional 66
4.2.1. Planteamiento de micromodelo 66
4.2.1.1. Materiales 66

4.2.1.2. Pilas....72
4.2.1.3. Murete sin refuerzo....75
4.2.1.4. Murete con refuerzo....78
4.3 Determinación de bondad de ajuste del modelo....81
4.3.1 Clasificación y obtención de datos de la distribución observada....81
4.3.2 Regresión polinómica y bondad de ajuste....84
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN....86
5.1 Determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería....86
5.1.1 Análisis de los materiales....86
5.1.1.1 Bloques de concreto....86
5.1.1.2 Cubos de Mortero....87
5.1.2 Ensaye de pilas....88
5.1.3 Ensaye de muretes....91
5.1.3.1 Muretes sin refuerzo....91
5.1.3.2 Muretes con refuerzo....96
5.2 Planteamiento del modelo computacional....99
5.2.1 Materiales....99
5.2.2 Pilas....104
5.2.3 Murete sin refuerzo....107
5.2.4 Murete con refuerzo....111
5.3 Determinación de bondad de ajuste del modelo....115
5.3.1 Regresión polinómica y bondad de ajuste....115
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....119
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS....121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE, 2015). 14
Figura 2. Localización geográfica del sismo de 1920 (SSN, 2010). 15
Figura 3. Extracción y preparación de muretes (Dizhur et al, 2013). 18
Figura 4. Ilustración de las características de la prueba a compresión diagonal en sitio (Brignola A. et al, 2009). 19
Figura 5. Construcción y evaluación de los muretes (Milosevic J. et al, 2012). 20
Figura 6. (a) Ladrillos y cilindros de adobe (b) Muretes de adobe (Rodríguez J.D. et al, 2020). 20
Figura 7. Golpes en moldeado de muestras (NMX-C-061-ONNCCE-2001). 23
Figura 8. Vista frontal de murete con elementos de medición (NMX-C-464-ONNCCE-2010). 24
Figura 9. Gráfica esfuerzo – deformación (NMX-C-464-ONNCCE-2010). 25
Figura 10. Pila de tabiques solidos o huecos (NMX-C-464-ONNCCE-2010). 26
Figura 11. Gráfica esfuerzo – deformación (NMX-C-464-ONNCCE-2010). 27
Figura 12. Piezas de mampostería y mortero sometidos a esfuerzos (Zeevaert, 2001). 28
Figura 13. Geometría sólida estructural homogénea de SOLID216 (Ansys, 2023). 31
Figura 14. Mecanismo de fallo de la mampostería: a) Fisuración por tracción; b) Deslizamiento por junta; c) Fisuración del ladrillo por tracción directa; d) Fisuración diagonal del ladrillo por tracción; e) Fisuración por "Masonry crushing" (J. López et all, 1998). 32
Figura 15. Superficie de fluencia del modelo de microplano (Imadeddin et all, 2017). 34
Figura 16. Representación de los diferentes estados de esfuerzos como puntos en la superficie de fluencia (Imadeddin et all, 2017). 35
Figura 17. Interpretación unidimensional de la curva esfuerzo – deformación de la compresión cíclica. (Imadeddin et all, 2017). 37
Figura 18. Modelo del mallado por elemento finito (Milosevic J. et al, 2012) 40
Figura 19. Bloques poligonales de tamaños aleatorios (Milosevic J. et al, 2012). 41
Figura 20. Modelo del mallado por elemento finito (Milosevic J. et al, 2012). 42
Figura 21. Modelo de elemento finito a través de elementos triangulares con elementos de esfuerzo plano (Brignola A. et al, 2009). 43
Figura 22. Solución elástica: esfuerzos normalizados σx y σxy (Brignola A. et al, 2009). 43
Figura 23. Deformación horizontal no – lineal, relacionada con la apertura de juntas de mortero verticales (Brignola A. et al, 2009). 45
Figura 24. Distribución de esfuerzos normales en ejes globales (Fernández B. L. et al, 2008). 47
Figura 25. Distribución de esfuerzos cortantes en ejes locales (x',y') (Fernández B. L. et al, 2008). 47
Figura 26. Envolventes de respuesta de una estructura de mamaposteria original (Modelo 3D) y reparada con mallas recubiertas de mortero (Modelo 3D-R) (Ruiz et al., 1994). 49
Figura 27. Tipo de grapa U recomendada. (SMIE, 2019). 52
Figura 28. Relaciones entre el estadístico de prueba "X^2", el valor "P" y la bondad de ajuste. (Triola, 2009). 54
Figura 29. Diagrama de flujo de la metodología. 56
Figura 30. Medidas aproximadas de las piezas de bloque. 58

Figura 31. Medidas aproximadas de las muestras de mortero. 58
Figura 32. Mortero seco premezclado de la marca CEMEX. 60
Figura 33. Pilas terminadas de ambos tipos de bloque 61
Figura 34. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal). 61
Figura 35. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal). 62
Figura 36. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal). 63
Figura 37. Medidas de los prototipos de murete (vista frontal). 64
Figura 38. Geometría del murete con malla electrosoldada. 64
Figura 39. Malla electrosoldada 6-6 / 10-10 colocada en murete. 65
Figura 40. Armella 20x70 para sujeción de malla. 65
Figura 41. Anclaje químico CF 890 de la marca "Fester". 65
Figura 42. Medidas de los prototipos reforzados (vista frontal). 66
Figura 43. Geometrías en los modelos de bloque de 12 cm (lado izquierdo) y 15 cm (lado derecho). 67
Figura 44. Tipo de mallado en modelos de bloque. 68
Figura 45. Desplazamiento en cabezal superior. 68
Figura 46. Restricciones de cabezal inferior. 69
Figura 47. Geometría del modelo de mortero. 70
Figura 48. Tipo de malla en cubo de mortero. 70
Figura 49. Desplazamiento en cabezal superior. 71
Figura 50. Restricciones de cabezal inferior. 71
Figura 51. Geometría del modelo de mortero. 73
Figura 52. Configuración de contactos en pila. 73
Figura 53. Tipo de mallado en elemento pila. 74
Figura 54. Desplazamiento en parte superior de la pila. 75
Figura 55. Restricción en la parte inferior de la pila. 75
Figura 56. Geometría del modelo del murete sin refuerzo. 76
Figura 57. Configuración de los contactos en murete sin refuerzo. 76
Figura 58. Tipo de mallado en murete sin refuerzo. 77
Figura 59. Desplazamiento en parte superior del murete. 77
Figura 60. Restricción en la parte inferior del murete. 78
Figura 61. Geometría del modelo del murete con refuerzo, mostrado con: a) recubrimiento y b) sin el recubrimiento. 78
Figura 62. Configuración de los contactos en murete sin refuerzo. 79
Figura 63. Tipo de mallado en murete con refuerzo, mostrado con el a) recubrimiento y b) sin el recubrimiento. 79
Figura 64. Desplazamiento en parte superior del murete con refuerzo. 80
Figura 65. Restricción en la parte inferior del murete con refuerzo. 80
Figura 66. Graficas fuerza – desplazamiento de las frecuencias observadas y esperadas con su respectiva regresión polinómica de segundo grado a) M-QR b) M-VR 85
Figura 67. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos P-Q. 88
Figura 68. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos P-V. 89
Figura 69. Prototipos P-Q sometidos a compresión. 90
Figura 70. Prototipos P-V sometidos a compresión. 91
Figura 71. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-Q 92

Figura 72. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-Q 93
Figura 73. Prototipos M-Q sometidos a compresión diagonal. 95
Figura 74. Prototipos M-V sometidos a compresión diagonal. 96
Figura 75. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-QR......96
Figura 76. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-VR. 97
Figura 77. Prototipos M-QR sometidos a compresión diagonal. 98
Figura 78. Prototipos M-VR sometidos a compresión diagonal......99
Figura 79. Gráfica fuerza – desplazamiento de las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm. 100
Figura 80. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm......101
Figura 81. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm......101
Figura 82. Gráfica fuerza – desplazamiento de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento. 102
Figura 83. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento. 103
Figura 84. Gráfica de deformación en el eje "Y" de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento......103
Figura 85. Gráfica fuerza – desplazamiento de las piezas de bloque de a) 12 cm y b) 15 cm. 105
Figura 86. Gráfica fuerza – desplazamiento de pilas experimentales y del modelo numérico para las piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm. 106
Figura 87. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm......107
Figura 88. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm......107
Figura 89. Gráfica fuerza – desplazamiento de los muretes en el modelo numérico con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm. 109
Figura 90. Gráfica fuerza – desplazamiento de muretes experimentales y del modelo numérico para las piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm. 110
Figura 91. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para muretes con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm......111
Figura 92. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm......111
Figura 93. Gráfica fuerza – desplazamiento de los muretes reforzados en el modelo numérico con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm. 112
Figura 94. Gráfica fuerza – desplazamiento de muretes reforzados experimentales y del modelo numérico para las piezas de a) 12 y b) 15 cm......114
Figura 95. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para muretes reforzados, mostrando el recubrimiento y la malla para piezas de: a.1) a.2) 12 cm y b.1) b.2) 15 cm. 115
Figura 96. Gráfica de deformación en el eje "Y" para muretes reforzados con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm......115
Figura 97. Distribución de chi-cuadrada para el grupo "M-QR" mediante el software Matt Bognar 2021 118
Figura 98. Distribución de chi-cuadrada para el grupo "M-VR" mediante el software Matt Bognar 2021 118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias de diseño a la compresión en piezas de mampostería (NMX-C-404-ONNCCE-2012). 22
Tabla 2. Factores correctivos por esbeltez de las pilas (NMX-C-464-ONNCCE-2010). 26
Tabla 3. Parámetros necesarios para la calibración del modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado (Imadeddin et all, 2017). 35
Tabla 4. Propiedades mecánicas para el análisis numérico por metodología de elemento finito (Milosevic J. et al, 2012). 40
Tabla 5. Propiedades mecánicas para el análisis numérico por modelo de elementos distintos (Milosevic J. et al, 2012). 41
Tabla 6. Parámetros del modelo constitutivo no – lienal para mampostería (Brignola A. et al, 2009). 44
Tabla 7. Medidas de piezas de bloque. 57
Tabla 8. Medidas de las muestras de mortero. 59
Tabla 9. Parámetros de mortero seco CEMEX (tabla extraída de ficha técnica de CEMEX). 60
Tabla 10. Resultados de relación de esbeltez y factor correctivo para pilas. 62
Tabla 11. Dimensiones de muretes sin refuerzo. 63
Tabla 12. Dimensiones de muretes con refuerzo. 66
Tabla 13. Propiedades de los materiales del bloque para modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado. 69
Tabla 14. Propiedades del material del mortero para modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado. 72
Tabla 15. Parámetros del modelo de zona cohesiva (CZM). 73
Tabla 16. Datos promedio para cada caso de carga en muretes reforzados a) M-QR (15 cm) .82
Tabla 18. Resultados de la resistencia a la compresión de las piezas. 86
Tabla 19. Resultados de la resistencia a la compresión del mortero en pilas y muretes. 87
Tabla 20. Resumen de resultados de la resistencia a la compresión de las pilas en los grupos P-Q y P-V. 89
Tabla 21. Resumen de resultados de la resistencia a la tensión diagonal de los muretes en los grupos M-Q y M-V. 93
Tabla 22. Resumen de resultados de la resistencia a la tensión diagonal de los muretes en los grupos M-QR y M-VR. 97
Tabla 23. Determinación del valor chi – cuadrada mediante la distribución de frecuencias observadas y obtenidas a) M-QR b) M-VR 116

RESUMEN

La integridad de una vivienda, entendida como su capacidad para cumplir de manera segura con la función para la cual fue construida, no depende únicamente de un buen diseño estructural, sino también del control de calidad de los materiales a utilizar. En esta investigación se presentan los resultados de pruebas experimentales realizadas a 2 tipos de blocks de concreto provenientes de las zonas de Veracruz y Querétaro. En estas pruebas se determinó la resistencia a compresión de las piezas por unidad y en conjunto como pilas, así como a tensión diagonal en muretes con y sin refuerzo de acero. Esto sirvió como base para la generación de un modelo computacional basado en la Metodología de Elemento Finito (MEF) en conjunto con la teoría de microplano con daño y plasticidad acoplado, que pudiera representar el comportamiento de la mampostería construida con los materiales considerados. Para la calibración del modelo se tomaron en cuenta variables como el módulo de elasticidad, la resistencia a la comprensión uniaxial, biaxial y triaxial de los materiales, módulo de Poisson, entre otros, obteniendo resultados similares a las pruebas experimentales. La información derivada de este trabajo puede ser utilizada para complementar las normativas locales y como referencia en futuros proyectos de edificación y/o rehabilitación de construcciones, permitiendo realizar un análisis más preciso del comportamiento de los materiales al considerar la contribución del refuerzo de acero a la resistencia estructural.

(**Palabras clave:** mampostería reforzada, teoría de microplano, elemento finito)

ABSTRACT

The integrity of a home, understood as its ability to safely fulfill the function for which it was built, does not depend only on a good structural design, but also on the quality control of the materials to be used. In this research, the results of experimental tests carried out on 2 types of concrete blocks from the areas of Veracruz and Querétaro are presented. In these tests, the compressive strength of the pieces was determined individually and together as piles, as well as diagonal tension in walls with and without steel reinforcement. This served as the basis for the generation of a computational model based on the Finite Element Methodology (FEM) in conjunction with the plasticity – damage microplane model, which could represent the behavior of the masonry built with the materials considered. For the calibration of the model, variables such as the elastic modulus, the uniaxial, biaxial and triaxial compression resistance of the materials, Poisson's modulus, among others, were considered, obtaining results similar to the experimental tests. The information derived from this work can be used to complement local regulations and as a reference in future building and/or rehabilitation projects, allowing a more precise analysis of the behavior of the materials to be carried out when considering the contribution of steel reinforcement to the structural resistance.

(**Keywords:** reinforced masonry, microplane theory, finite element)

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería, la modelación se refiere al proceso mediante el cual se representa analíticamente el comportamiento de un sistema mediante metodologías como el análisis de elementos finitos, mejor conocido como "FEA" por sus siglas en inglés (Finite Element Analysis). Esto, con el fin de poder describir un problema físico mediante una aproximación numérica, ya que muchas de las veces los problemas suelen venir acompañados de geometrías complejas, diversidad de materiales, cargas aplicadas y/o ciertas restricciones que resultan ser difíciles de resolver sin el uso de un modelo de este tipo (Magomedov & Sebaeva, 2020).

En el mercado actualmente existe un gran número de softwares de ingeniería que, con ayuda de un equipo computacional, pueden resolver problemas por medio de "FEA", como lo son ABAQUS, ANSYS, SOLIDWORKS, entre otros. Los campos de aplicación son muy variados, desde un problema con piezas mecánicas para un proceso industrial hasta uno que implique fenómenos acústicos y/o térmicos.

Para el caso de estudio de esta investigación, se abordó el sistema físico de la mampostería, que ha permanecido en la arquitectura a través de los años y el cual se define como una estructura basada en piezas, ya sean rocas o elementos prefabricados como ladrillos o bloques de distintos materiales, unidos mediante un aglutinante que en este caso es el mortero. Su comportamiento es muy complejo debido a las propiedades de los materiales que la constituyen y sus propiedades mecánicas, tanto individualmente como en conjunto (D'Altri et al., 2020).

Se estima que el 92% de las edificaciones para vivienda en México se encuentran construidas con mampostería constituida por tabique, ladrillo, bloque, piedra, cantera y/o concreto (INEGI, 2020). En este contexto, la normativa más completa y actualizada que se tiene en México para las edificaciones a base de mampostería son las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (NTC- 2020), en las cuales se describen criterios y cualidades con las que deben cumplir este tipo de estructuras, tanto en diseño como en las características de los materiales que las conforman.

No obstante, debe considerarse que las propiedades de las materias primas utilizadas para la construcción de mampostería no son las mismas en todo el país y varían de una región a otra. Por lo anterior, es importante tener en consideración las características físicas y mecánicas de los materiales que se utilizarán en las construcciones según la región, pues se estima que 7.4 millones de las viviendas en México se encuentras edificadas con materiales precarios (Ordaz A., 2019).

Particularmente el estado de Veracruz ocupa el tercer lugar a nivel nacional en cantidad de viviendas habitadas, con un total de 2 390 726 (INEGI, 2021). En este punto, es importante considerar que, de acuerdo con la regionalización sísmica incluida en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (Figura 1) (CFE, 2015), esta entidad federativa está dentro de 3 zonas sísmicas: el norte se encuentra en la zona "A", avanzando hacia el centro del estado se llega a la zona "B" y parte del centro, hacia el sur, se ubica en la zona "C".

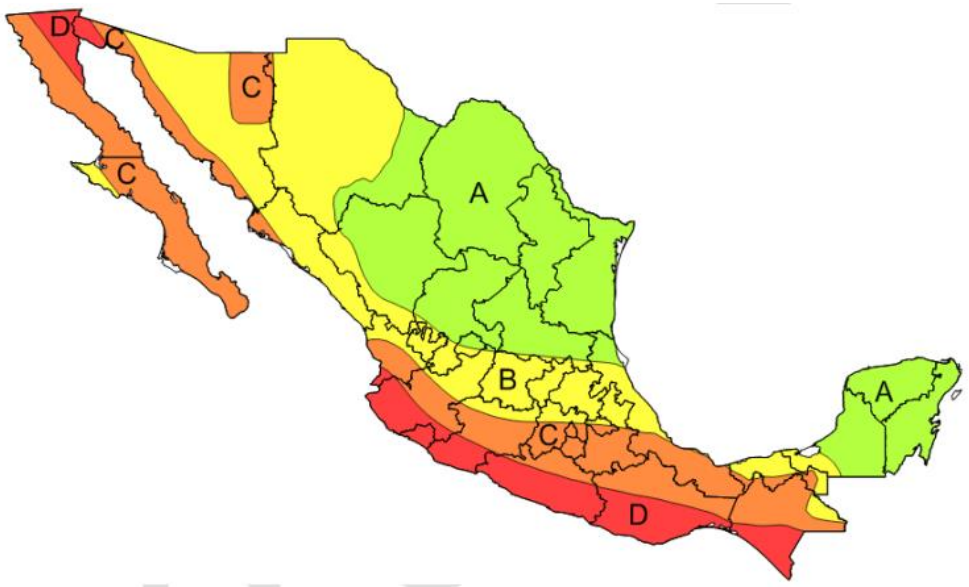


Figura 1. Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE, 2015).

La región central del estado, ubicada en la zona sísmica "B", ha sido afectada por sismos significativos que no son comúnmente recordados en la memoria colectiva. Existe información de un evento en el año de 1546 que derrumbó la iglesia católica de "San Francisco", que fue la primera construida en el continente americano (G. Suarez, 1992). Por otra parte, el sismo más representativo de esta región es el del 3 de enero de 1920 con magnitud y profundidad aproximadas de 6.7 (Mw) y 10 km, respectivamente, cuyo epicentro

fue adyacente a la ciudad capital de Xalapa, entre los estados de Veracruz y Puebla (Figura 2) (SSN, 2010). Se estima que cerca de 650 personas perdieron la vida durante este evento, debido a diversos factores como deslizamiento de tierras y daños en las edificaciones ubicadas en la zona centro de la capital (G. Suarez, 1992). Esto expone que a pesar de que la zona centro del estado de Veracruz se encuentra en la región "B", no se encuentra exenta de sismos que pudiesen provocar daños en la infraestructura.

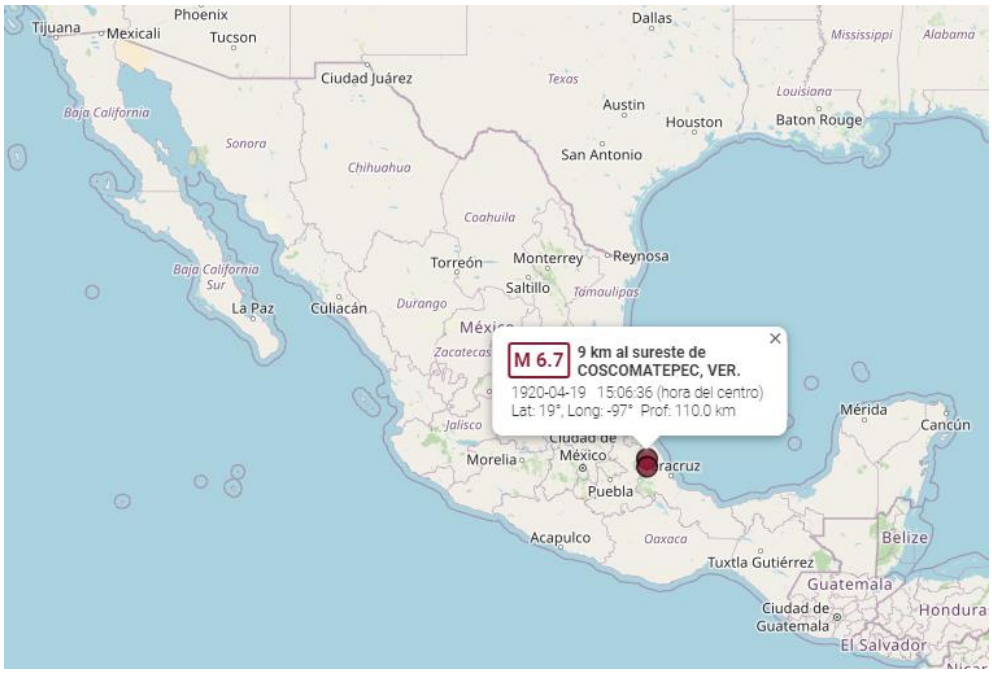


Figura 2. Localización geográfica del sismo de 1920 (SSN, 2010).

En este sentido, cabe mencionar que existen diversos procedimientos para reforzar y rehabilitar las estructuras de mampostería, entre los que destaca el uso de malla electrosoldada. Este método consiste en encamisar al menos una de las caras del muro que ha sido dañado o que simplemente se desea reforzar por medio de la sujeción de la malla mediante clavos o pernos, para posteriormente, cubrir el área con una capa de mortero. Con esta técnica se pueden tener incrementos en resistencia, rigidez y capacidad de deformación superiores al 50, 20 y 100% respectivamente (SMIE, 2019).

Por lo anterior, esta investigación está sustentada en la necesidad de estudiar y caracterizar los materiales con los que se construye en cada región, así como en las ventajas de contar con modelos analíticos que representen en forma confiable y precisa el comportamiento de

los sistemas estructurales, considerando las condiciones de refuerzo que se pueden implementar.

A continuación, se presentan la descripción del problema y la justificación de este trabajo, haciendo énfasis en las cuestiones aquí planteadas. Después, en el capítulo 2 se discuten aspectos referentes a pruebas experimentales y modelos analíticos, que sirvieron como antecedentes y fundamentación científica para el planteamiento de la hipótesis y los objetivos de la investigación, los cuales se presentan en el capítulo 3.

Después, en el capítulo 4 se hace una descripción detallada de la metodología, consistente en una serie de etapas y actividades ligadas a los objetivos específicos. Posteriormente, en el capítulo 5 se hace un análisis exhaustivo de los resultados de las pruebas experimentales y se comparan con los obtenidos en los modelos numéricos.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo y recomendaciones para considerar en futuras investigaciones.

1.1. Descripción del problema

Los métodos de cálculo para las estructuras de mampostería no han tenido una evolución significativa en comparación con los utilizados para otros tipos de sistemas estructurales, ya sea de acero o de concreto reforzado. Si bien es cierto que este tipo de estructuras se rigen por normativas y/o reglamentos que a su vez deberían pertenecer a cada una de las regiones en donde se construye, esto conlleva a un desconocimiento del comportamiento real del sistema por parte del ingeniero estructurista, por lo que se puede incurrir en sobredimensionamientos que a su vez tienen implicaciones económicas.

Actualmente, las NTC-2020 son el documento más completo y actualizado que se tiene en México para el análisis y el diseño de estructuras de mampostería. No obstante, estas normas son de observancia obligatoria sólo para la Ciudad de México y, como se comentó previamente, los criterios de calidad que se establecen para los materiales no siempre se cumplen satisfacerse en todo el país, debido a las propiedades de las materias primas en cada región. Adicionalmente, debe considerarse que no todos los proveedores de materiales utilizados para la construcción de mampostería cuentan con procesos de fabricación respaldados por pruebas de laboratorio.

Por lo anterior, en este trabajo se plantearon modelos de elemento finito calibrados con resultados obtenidos en pruebas experimentales, con el fin de representar en forma confiable y precisa el comportamiento mecánico de la mampostería bajo diferentes condiciones de refuerzo.

1.2. Justificación

De acuerdo con el censo de población y vivienda del año 2020 realizado por el INEGI, hay cerca de 35 219 141 viviendas casa-habitación en México, de las cuales el 92% están construidas a base de materiales de mampostería. Del porcentaje restante, el 4% se relaciona a construcciones de adobe, el 3% con madera y el 1% se refiere a materiales como lámina, carrizo, bambú, entre otros (INEGI, 2020).

Sin embargo, se estima que un porcentaje alto de estas viviendas presenta un déficit de calidad en los materiales, dejando un sesgo importante en el diseño y la construcción de los inmuebles. Esto puede tener implicaciones importantes para la seguridad de las edificaciones construidas con mampostería considerando que, como se mencionó previamente, no es posible asumir una probabilidad nula de daños significativos como los provocados por un sismo.

Todo esto conduce a la necesidad de desarrollar modelos numéricos, sustentados en fundamentos teóricos y calibrados con resultados de pruebas experimentales, con los que se puedan dar soluciones y recomendaciones particulares. Asimismo, con la utilización de dichos modelos se podría economizar durante la construcción de estructuras de mampostería sin incrementar los factores de seguridad por desconocimiento de su comportamiento.

2. ANTECEDENTES

2.1. Pruebas experimentales

2.1.1. Estudios previos

Existen diversos estudios en todo el mundo en donde se llevan a cabo pruebas para determinar las características específicas de algunos materiales. En este caso, la prueba para conocer la resistencia a la compresión diagonal en mampostería se refiere a un proceso en el cual se construyen muretes de dimensiones y características prestablecidas con los materiales de los cuales se desea conocer sus propiedades mecánicas. Regularmente, esto se compone de una serie de piezas como lo son el bloque, tabique o rocas, las cuales se encuentran unidas mediante un aglutinante que en la mayoría de los casos es algún tipo de mortero.

Sin embargo, esta prueba también puede llevarse a cabo de manera in-situ, la cual es un procedimiento donde se cortan muestras de muros existentes y se llevan al laboratorio. Como ejemplo se puede mencionar el caso de Dizhur et al. (2013), que analizaron 2 edificaciones antiguas ubicadas en Nueva Zelanda construidas con ladrillos de arcilla, con el fin de poder conocer su resistencia a compresión diagonal. En la

Figura *3* se puede observar parte del procedimiento para la extracción de las piezas.



a) Corte a través de la mampostería | b) Sujetadores verticales | c) Alzado de muretes mediante máquina | d) Transporte de muretes envueltos

Figura 3. Extracción y preparación de muretes (Dizhur et al, 2013).

De la misma manera, Anna Brignola (2009) llevó a cabo un estudio para interpretar el comportamiento mecánico de la mampostería a compresión diagonal a través de un análisis de 24 muretes extraídos de diferentes construcciones ubicadas en la región de La Toscana en Italia. Los especímenes (Figura 4), que fueron ensayados en el lugar, tenían medidas aproximadas de 120x120x60 cm.

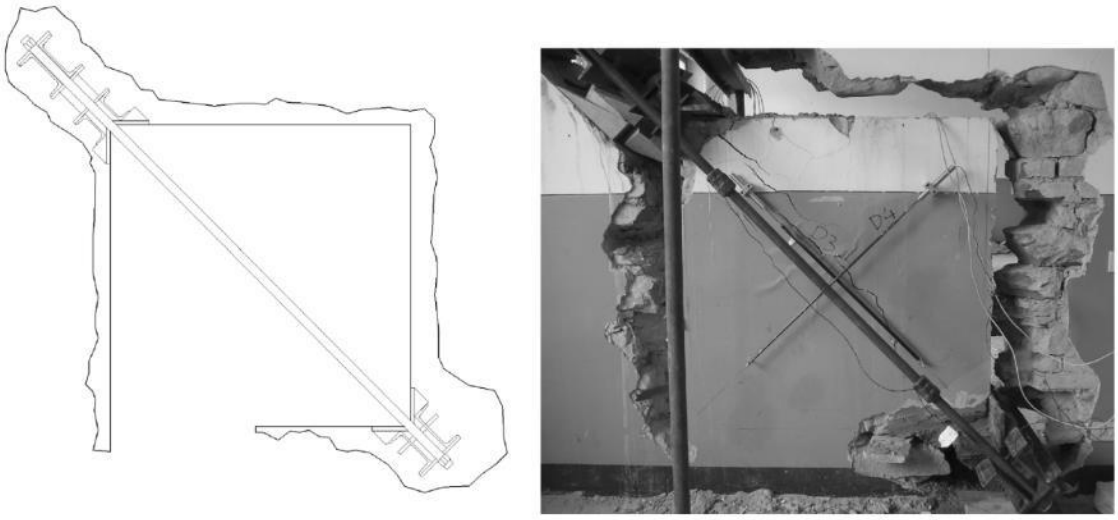


Figura 4. Ilustración de las características de la prueba a compresión diagonal en sitio (Brignola A. et al, 2009).

Estudios como los aquí mencionados resultan ser demasiado invasivos en las edificaciones, ya que se tiene que retirar una parte de algún muro que esté trabajando bajo un esfuerzo constante, lo cual implica tener que apuntalar la estructura y llevar a cabo una serie de maniobras para así retirar el elemento sin que exista alguna probabilidad de que pudiese colapsar la estructura, asimismo, todos estos procedimientos se encarecen por el procedimiento.

Por otra parte, existen estudios que se llevan a cabo únicamente en laboratorio, en donde se construyen muretes con los materiales de los cuales se quiere conocer su comportamiento. Estos prototipos se hacen tomando ciertas cualidades con las que se construye comúnmente en la zona que se está representado, con el fin de obtener resultados apegados a la realidad.

De esta forma, Jelena Milosevic (2012) llevó a cabo un estudio para caracterizar el comportamiento de muretes construidos con piedra y mortero (Figura 5), proceso utilizado en las edificaciones antiguas de la región de Portugal. El total de ejemplares fue de 4 con medidas aproximadas de 120x120x70 cm y fueron hechos en laboratorio tratando de seguir las técnicas tradicionales de la época y del lugar.



Figura 5. Construcción y evaluación de los muretes (Milosevic J. et al, 2012).

Asimismo, J. D. Rodríguez (2020) estudió el comportamiento de la mampostería conformada por piezas de adobe pegadas con un tipo de mortero fabricado con barro (Figura 6), construyendo 8 especímenes de 90x90x160 cm, los cuales fueron probados para conocer las características de los materiales, como la resistencia a la compresión diagonal.



(a) (b)

Figura 6. (a) Ladrillos y cilindros de adobe (b) Muretes de adobe (Rodríguez J.D. et al, 2020).

Con base en los resultados obtenidos en ambos procedimientos de experimentación, in-situ o en construcción propia de los muretes, se ha visto que mientras se tenga un buen control y una buena práctica del tipo de sistema que se analizará, éste presentará un comportamiento similar a que, si se hubiese retirado directamente del inmueble, disminuyendo costos y/o maniobras para su buena práctica.

2.1.2. Normativas mexicanas

A continuación, se describen brevemente algunas normativas que fueron utilizadas como parte del desarrollo experimental de este trabajo.

2.1.1.1. NMX-C-036-ONNCCE-2013

Esta normativa rige las pruebas para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques, tabiques, ladrillos y tabicones elaborados con cualquier material. Asimismo, se complementa con las siguientes normas:

- NMX-C-038-ONNCCE
- NMX-C-314-ONNCCE
- NMX-C-404-ONNCCE

Para la preparación de los especímenes y muestras, se requiere que consideren 5 de cada lote de 10 000 piezas o una fracción si es directamente en planta. Una vez obtenidos los ejemplares deberán cabecearse con azufre con una resistencia a la compresión de 34.4 MPa (350 kg_f/cm^2). Se deberá aplicar un medio de la carga máxima esperada para posteriormente incrementarla carga gradualmente y a una velocidad constante, de tal manera que la carga faltante no se aplique en un periodo menor a un minuto ni mayor a 2 (NMX-C-036-ONNCCE-2013).

Para los resultados se tendrá que emplear la siguiente fórmula:

$$R = \frac{F}{A} \qquad (1)$$

Donde:

$R =$ Resistencia a la compresión en MPa (kg_f/cm^2)

$F =$ Carga máxima aplicada N (kg_f)

$A =$ Área transversal del espécimen (cm^2)

2.1.1.2. NMX-C-404-ONNCCE-2012

En esta normativa están plasmadas las características y los métodos de prueba con los cuales deben cumplir las piezas de mampostería. Al igual que la NMX-C-036-ONNCCE-2013, esta norma se complementa de las siguientes normativas:

- NMX-C-024-ONNCCE
- NMX-C-036-ONNCCE
- NMX-C-037-ONNCCE
- NMX-C-038-ONNCCE
- NMX-C-307-ONNCCE

En la Tabla 1 se muestra la resistencia mínima a la compresión sobre el área bruta requerida para que las piezas puedan ser utilizadas estructuralmente.

Tabla 1. Resistencias de diseño a la compresión en piezas de mampostería (NMX-C-404-ONNCCE-2012).

Tipo de Pieza	***Resistencia de mínima individual f_{pMin} (kg/cm^2)***
Bloque	
Macizo	120
Hueco	70
Multiperforado	120
Tabique (largo >300 mm)	
Hueco	70
Multiperforado	70
Tabique (largo <300 mm)	
Macizo	70
Hueco	70
Multiperforado	120

Esta resistencia de diseño se encuentra dada por la siguiente formula:

$$f^*p = \frac{\overline{fp}}{1 + 2.5Cp} \qquad (2)$$

Donde:

$f^*p =$ Resistencia a la compresión de diseño, referida al área bruta.

$\overline{fp}$ = Resistencia a la compresión media, referida al área bruta.

Cp = Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

2.1.1.3. NMX-C-061-ONNCCE-2001

En esta normativa se establecen los criterios para determinar la resistencia a la compresión de los cementantes hidráulicos, por medio de especímenes cúbicos con una dimensión de 50 mm.

Las muestras se deberán elaborar en un tiempo no mayor a 2 min 30 s después de que se ha concluido la mezcla del mortero. Una vez que se encuentra en el molde, se debe colocar el mortero en 2 capas de 25 mm de espesor, en cada una de las capas se realizará un procedimiento de golpeteo 16 veces en 5 s. en 4 vueltas (Figura 7) (NMX-C-061-ONNCCE-2001).

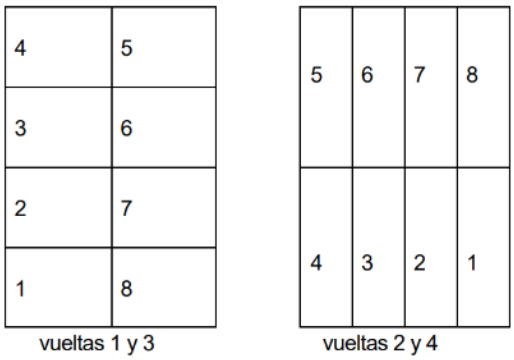


Figura 7. Golpes en moldeado de muestras (NMX-C-061-ONNCCE-2001).

Para la resistencia a la compresión de los especímenes se aplica la siguiente formula:

$$R = \frac{P\ máx}{S} \qquad (3)$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión.

$P\ máx$ = Es la carga máxima.

S = Es el área de la sección transversal del espécimen.

2.1.1.4. NMX-C-464-ONNCCE-2010

En esta normativa se establece el cálculo de la resistencia a la compresión diagonal para muretes construidos con mampostería. Para medir las deformaciones que se produzcan en la prueba se emplean aparatos de medición como el micrómetro o el extensómetro, y son puestos en la diagonal del murete (Figura 8). Para el caso de los muretes, las distancias obtenidas horizontalmente no deben variar en un ± 5% de la conseguidas verticalmente (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

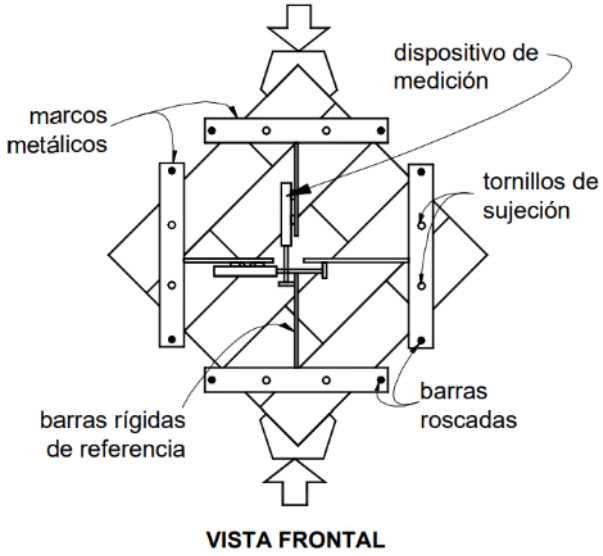


Figura 8. Vista frontal de murete con elementos de medición (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

La resistencia a la compresión de los muretes se obtiene de mediante la división de la carga máxima entre el área bruta del espécimen, la cual debe ser medida antes de la prueba sobre la longitud de la diagonal a compresión. La siguiente formula detalla el cálculo:

$$V_m = \frac{P}{t * L_c} \qquad (4)$$

Donde:

V_m = Resistencia a la compresión diagonal en MPa (kg_f/cm^2).

P = Carga máxima aplicada en N (kg).

t = Espesor del murete en mm (cm).

L_C = Longitud de la diagonal a compresión en mm (cm).

Posteriormente, una vez que se llevó a cabo la prueba experimental se puede conocer el módulo de cortante a partir de las curvas ν-γ, el cual corresponde a la pendiente inicial de la gráfica (Figura 9), la recta secante respecto a los esfuerzos cortantes.

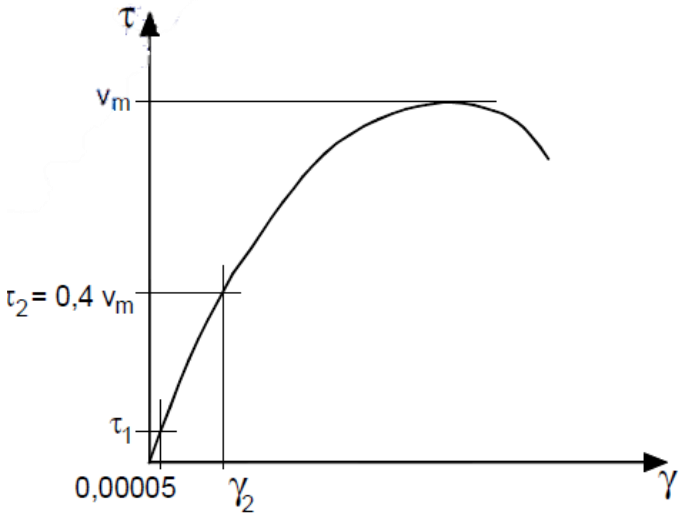


Figura 9. Gráfica esfuerzo – deformación (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

El módulo de cortante hace referencia a la medida de la rigidez cortante en la mampostería y está definida por la siguiente expresión:

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \qquad (5)$$

Donde:

G_m = Modulo de cortante

τ_2 = Esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular en Mpa (kg_f/cm^2)

τ_2 = Esfuerzo cortante correspondiente al 40% de la carga máxima en Mpa (kg_f/cm^2)

γ_2 = Deformación angular producida por el esfuerzo τ_2

Asimismo, otra parte importante de esta normativa es la prueba para determinar la resistencia a la compresión axial, la cual consiste en una pila formada por piezas apiladas, que debe tener una relación de altura – espesor que debe encontrarse entre 2 y 6 (Figura 10). Al igual que en la prueba de compresión diagonal, se necesita el uso de aparatos de medición para visualizar las deformaciones.



Figura 10. Pila de tabiques solidos o huecos (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

En el caso en el que no se cumpla esta relación de esbeltez, se deberá multiplicar por un factor correctivo, el cual se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores correctivos por esbeltez de las pilas (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

Relacion de esbeltez de la pila	***Factor correctivo***
2	0.78
3	0.9
4	1
5	1.05
6	1.06

La resistencia a la compresión de las pilas se obtiene después de que es sometida a una carga de compresión axial y esta resistencia está en función de cuanta carga pueda resistir antes de que llegue al punto de falla. La ecuación para determinar la resistencia a la compresión de la pila está dada por la siguiente formula:

$$f_m = \frac{P}{t * b} * factor\ correctivo\ por\ esbeltez \qquad (6)$$

Donde:

f_m = Resistencia a compresión de la pila en Mpa (kg_f/cm^2)

P = Carga máxima aplicada en N (kg)

t = Espesor de la pila en mm (cm)

b = Ancho de la pila en mm (cm)

Una vez que se realizó la prueba para determinar la capacidad a la compresión de la pila, de manera análoga a la prueba del murete sometido a compresión diagonal, se puede obtener el módulo de elasticidad, el cual corresponde a la recta secante representada en la Figura 11 y se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \qquad (7)$$

Donde:

E_m = Modulo de elasticidad de la mampostería en Mpa (kg_f/cm^2)

σ_1 = Esfuerzo axial correspondiente a 0.00005 de deformación en Mpa (kg_f/cm^2)

σ_2 = Esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima en Mpa (kg_f/cm^2)

ε_2 = Deformación unitaria producida por el esfuerzo σ_2

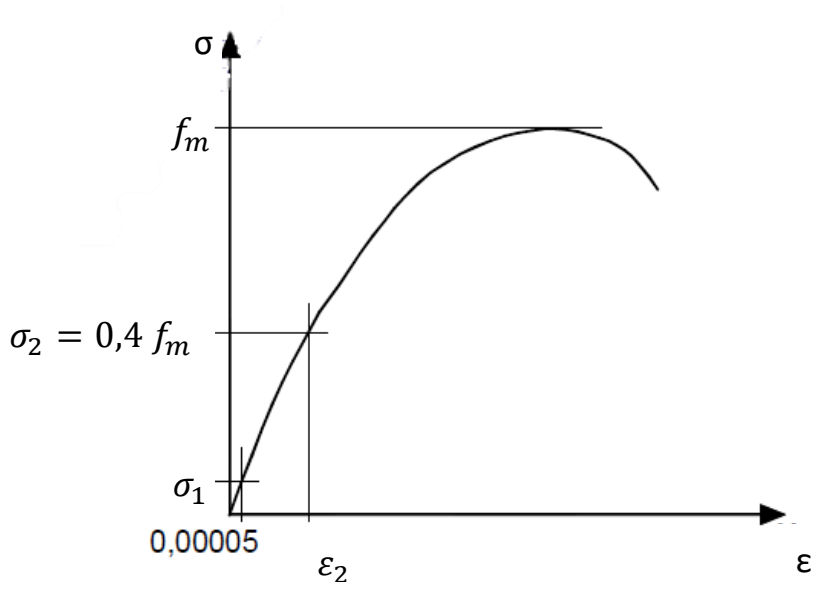


Figura 11. Gráfica esfuerzo – deformación (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

2.2. Modelos computacionales

2.2.1. Metodología de elemento finito

En los muros de mampostería existen 2 elementos importantes que actúan frente a las cargas axiales que se pudiesen presentar: las piezas de mampostería y el mortero que las une. Estos 2 materiales actúan de manera análoga cuando se les aplica una fuerza, sin embargo, al ser las piezas de mampostería el material con las cualidades esfuerzo-deformación menos desfavorables, evitan que los esfuerzos de cortante transversal se transmitan al mortero, que es el material con características más desfavorables (Zeevaert, 2001). En la Figura 12 se pueden observar los diferentes esfuerzos a los que se encuentran sometidos los 2 materiales ya mencionados en una prueba de una pila a compresión simple.

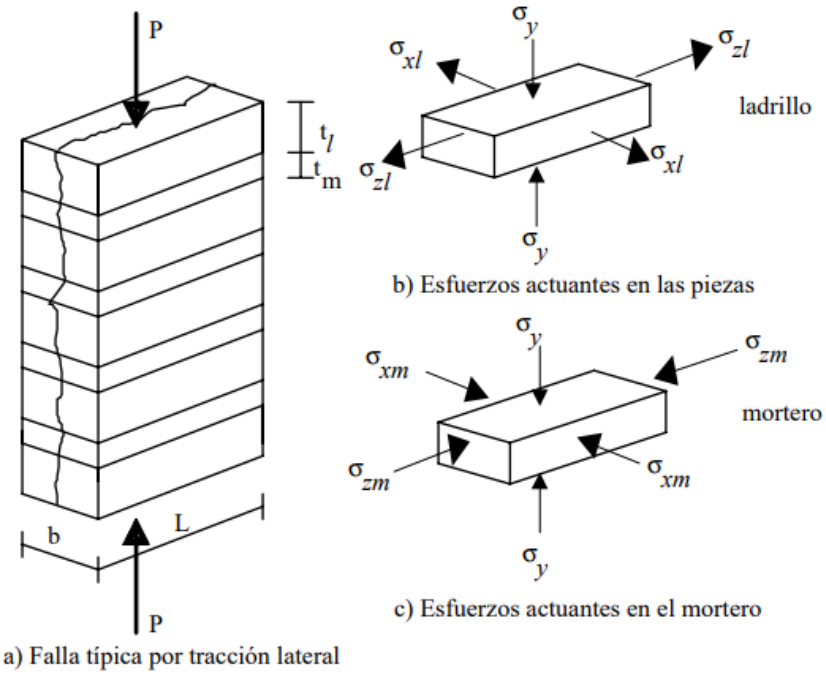


Figura 12. Piezas de mampostería y mortero sometidos a esfuerzos (Zeevaert, 2001).

Cabe mencionar que los resultados de la resistencia a la compresión de las piezas, probando en conjunto las piezas de mampostería con el mortero, suelen ser menores que cuando se le realizan las pruebas únicamente a las piezas de mampostería (Zeevaert, 2001). Es por esto la gran importancia en los controles de calidad de las piezas para poder cumplir con los requerimientos de las normativas en las características de resistencia a la compresión simple.

La implementación de la metodología de elemento finito tiene como fin el poder realizar aproximaciones numéricas a soluciones de ecuaciones diferenciales parciales que regularmente son muy complejas para el análisis de diversos problemas físicos. Este tipo de aproximaciones se lleva a cabo mediante la división de un número cuantioso de subdominios, los cuales son designados como "elementos finitos" y que, a su vez, el conjunto de estos elementos crea una partición del dominio designada como "discretización". Asimismo, cada uno de los elementos que componen el subdominio, se encuentra conformado por diferentes "nodos", los cuales pueden ser adyacentes a otros elementos, por lo que pueden compartirse. Finalmente, el grupo de elementos, compartiendo nodos, entrelazados entre sí, se conoce como "malla" (UNAM, 2018).

Las ecuaciones constitutivas que establecen una correlación entre esfuerzos y deformaciones dentro del campo elástico lineal del análisis se encuentran gobernadas por la ley de Hooke:

$$\sigma = D\varepsilon \tag{8}$$

En donde D representa una matriz de grado 3x3 que está en función del tipo de problema en 2 dimensiones, ya sea una deformación o un esfuerzo planos, como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$D = \frac{E}{1-v^2}\begin{bmatrix} 1 & v & 0 \\ v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-v}{2} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$D = \frac{E}{(1-v)(1-2v)}\begin{bmatrix} 1-v & v & 0 \\ v & 1-v & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-v}{2} \end{bmatrix} \tag{10}$$

La ecuación (9) representa el esfuerzo plano y la ecuación (10) corresponde a la deformación plana, así como E es el módulo de elasticidad y v representa el coeficiente de Poisson.

Para el caso del análisis en 3 dimensiones, las ecuaciones de equilibrio y de tracción superficial se encuentran representadas por:

$$\sigma_{x,x} + \tau_{xy,y} + \tau_{zx,z} + F_x = 0$$
$$\tau_{xy,x} + \sigma_{y,y} + \tau_{yz,z} + F_y = 0 \quad (11)$$
$$\tau_{zx,x} + \tau_{yz,y} + \sigma_{z,z} + F_z = 0$$

y por:

$$\Phi_x = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{zx}$$
$$\Phi_y = l\tau_{xy} + m\sigma_y + n\tau_{yz} \quad (12)$$
$$\Phi_z = l\tau_{zx} + m\tau_{yz} + n\sigma_z$$

Donde l, m y n son los cosenos directores de una normal a la superficie. Existen 6 ecuaciones de compatibilidad que refieren a los 6 esfuerzos empleados en los sólidos. Consiguientemente, la ecuación de equilibrio que representa las 3 dimensiones es:

$$[\partial]^T\{\sigma\} + \{F\} = \{0\} \quad (13)$$

Donde $\{F\}$ esta dado por $\left[F_x\ F_y\ F_z\right]^T$.

Para la aplicación de la metodología MEF en el caso de estudio de los muretes de mampostería, se usó el software ANSYS en su versión estudiantil a través de su interfaz Workbench 2022 R2. En este programa se utilizaron en primera instancia elementos denominados CPT 216, los cuales hacen referencia a elementos usados para modelaciones de estructuras solidas en 3D. Asimismo, el uso de estos elementos es debido a que el modelo constitutivo de microplano con daño y plasticidad acoplado en el software permite la utilización de estos a diferencia de los tradicionales SOLID65.

Los CPT216 son elementos compuestos por 20 nodos y de orden cuadrático, con un comportamiento conveniente para el modelado de mallas que presentan irregularidades. Presentan cuatro grados de libertad en los nodos que se encuentran en las esquinas, las cuales corresponden a traslaciones en las direcciones de los ejes *x*, *y* y *z*, así como un grado de libertad de presión de poro. Entre otras de sus principales características, estos elementos presentan rigidez de tensión, elasticidad, alta deflexión y una gran capacidad para deformarse. Las configuraciones para los elementos pueden ser de tipo prismático, tetraédrico y piramidal (Figura 13).

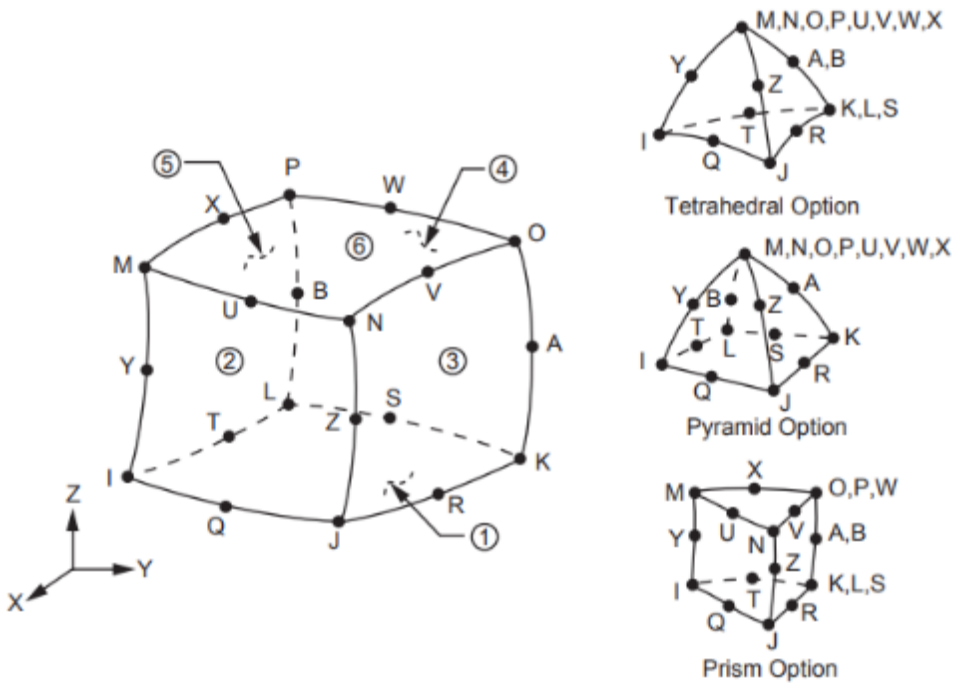


Figura 13. Geometría sólida estructural homogénea de SOLID216 (Ansys, 2023).

2.2.2. Modelación de mampostería

La mampostería se ha tratado de estudiar por medio de modelos numéricos, los cuales a su vez son representaciones de modelos constitutivos elaborados a través de la mecánica de sólidos. Cabe mencionar que, independientemente del análisis que se vaya a utilizar, las propiedades de los materiales se deben tener presentes. Es por eso por lo que, para poder desarrollar una buena precisión en este tipo de modelos, la experimentación es crucial. Por otra parte, es importante que se tomen las consideraciones necesarias en la experimentación, que representen la realidad, ya que la mano de obra, calidad del mortero, la edad y el tiempo de curado son factores que pueden repercutir en los resultados (López J. et all, 1998).

Particularmente, la modelación numérica en las técnicas de mampostería se ha podido desarrollar por medio de 2 tipos de modelación:

1) Micromodelación detallada: Se refiere a aquella conceptualización de las piezas y el mortero idealizados como elementos continuos y separados, que presentan una interfase mortero-pieza representada por elementos discontinuos.

2) Macromodelación: En este caso, el punto es considerar como un material compuesto a todo el sistema, el cual será representado por un solo elemento.

En este trabajo se optó por la micromodelación, ya que de esta manera se pretende representar cada uno de los componentes que constituyen al conjunto, así como las piezas de mampostería unidas con el mortero, como el mortero y la malla de acero que se utilizara para poder generar el refuerzo.

Dentro de este tipo de modelado, se ha podido representar el mejor comportamiento de la mampostería y esto se debe a que a diferencia de los macromodelos, en estos es factible el considerar mecanismos de fallo que pudiesen resultar en fisuras o deslizamientos por pérdida de fricción. Para que un micromodelo sea lo más apegado a la realidad tendrá que representar este tipo de fallos en todo el conjunto, esto quiere decir que se tendrán que representar tanto la fisuración en las juntas y en las piezas debidas a esfuerzos de tensión como perdida de fricción (deslizamiento) a consecuencia de los esfuerzos normales. En la Figura 14 se establecen algunos de los mecanismos de falla más comunes en la mampostería (J. López et all, 1998).

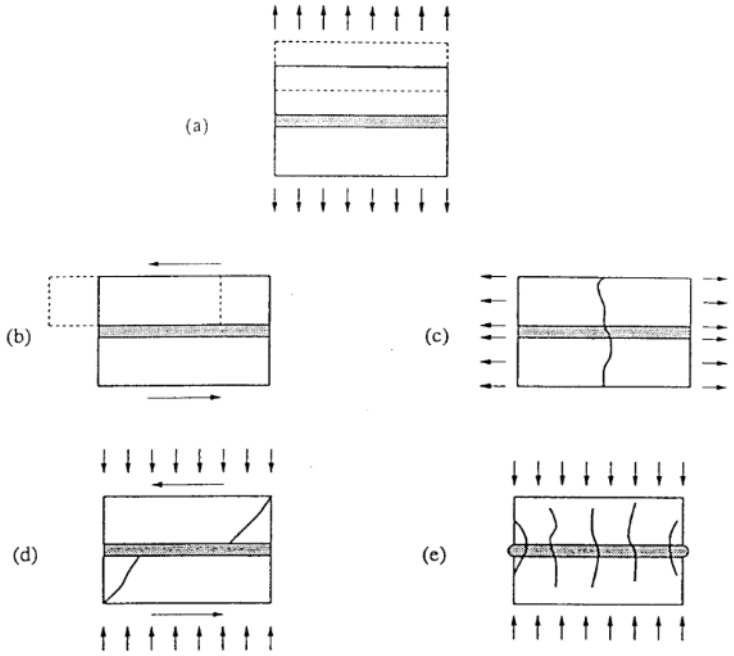


Figura 14. Mecanismo de fallo de la mampostería: a) Fisuración por tracción; b) Deslizamiento por junta; c) Fisuración del ladrillo por tracción directa; d) Fisuración diagonal del ladrillo por tracción; e) Fisuración por "Masonry crushing" (J. López et all, 1998).

Para que un modelo sea lo más apegado a la realidad, todos los daños mostrados en la Figura 14 se deben considerar en las juntas en función de su espesor, asimismo para el caso de la fisuración, se concentra en una zona vertical en una longitud media del bloque de su lado más largo.

Sin embargo, en este trabajo se implementó un modelo constitutivo de microplano con daño y plasticidad acoplado para representar el comportamiento no lineal de los materiales asociados al sistema de mampostería, sin necesidad de crear mecanismos de falla en los elementos que se traducen en tiempo y capacidad del equipo para resolver el modelo numérico. Asimismo, para representar la interacción que existe entre el bloque y el mortero se utilizó un modelo de zona cohesiva, el cual contenía las características de la resistencia a la fuerza normal y tangencial, así como energías de fractura.

2.2.3. Modelo constitutivo de microplano con daño y plasticidad acoplado

Los diferentes modelos de microplano han demostrado que son lo suficientemente capaces para representar el comportamiento no lineal de materiales cuasi-frágiles en los cuales se puede encontrar el concreto, rocas y arcillas. En esta investigación se aplicó a elementos que conforman una estructura de mampostería; expuestos a múltiples condiciones de carga. En este caso, se utilizó un modelo de microplano donde el daño y la plasticidad habían sido añadidos.

En este tipo de modelo, la plasticidad presenta un modelo suave de 3 capas de superficie capaz de captar un rango completo de los posibles estados de esfuerzos y, por otra parte, se encuentra el daño, el cual a través de una división de compresión y tensión la cual representa la transición del estado de esfuerzos que existe entre los esfuerzos de tensión y de compresión.

Para poder establecer el comportamiento del material es necesario trazar una superficie de fluencia del modelo de microplano basado en las 3 capas de superficie como se muestra en la Figura 15, esto con el fin de poder representar lo más realista posible el daño en el elemento que estará sometido a cargas cíclicas. El primer campo, de izquierda a derecha, se refiere al gorro de compresión, la zona central hace referencia a la ley de fluencia del modelo de Drucker-Prager y la zona lateral derecha que muestra la zona del gorro de tensión.

En la primera área marcada con azul, se encuentran los estados de esfuerzos admisibles del material previo a la fluencia de este, ya sea en esfuerzos de compresión y/o tensión. Una vez que se logra sobrepasar algún límite de esfuerzos considerado en el área azul, esta superficie se desplazará a la segunda etapa marcada con línea punteada, creando un nuevo criterio de fluencia.

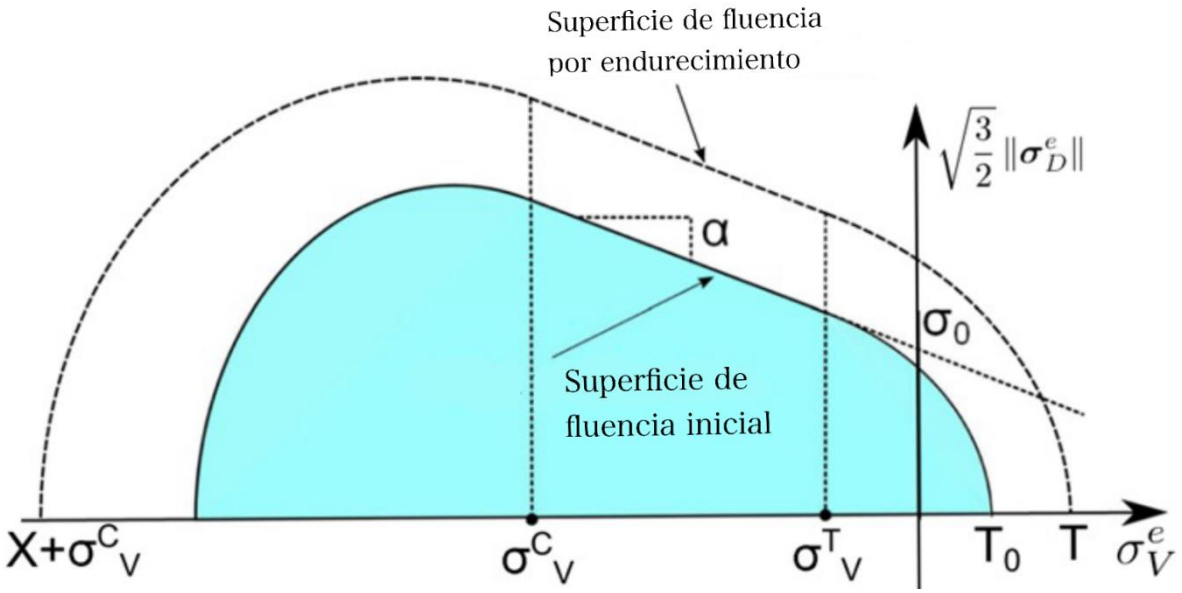


Figura 15. Superficie de fluencia del modelo de microplano (Imadeddin et all, 2017).

Para definir los parámetros necesarios dentro de la superficie de fluencia inicial se deben agregar al modelo 3 esfuerzos importantes que ayudaran a definir la curva. Estos esfuerzos son uniaxial a compresión, biaxial a compresión y uniaxial a tensión (Figura 16). Cabe mencionar que estas características del material son resultado de distintas pruebas de laboratorio, pero en el caso en el que no se cuente con estas propiedades, existen diferentes fórmulas para poder generar una aproximación de estos.

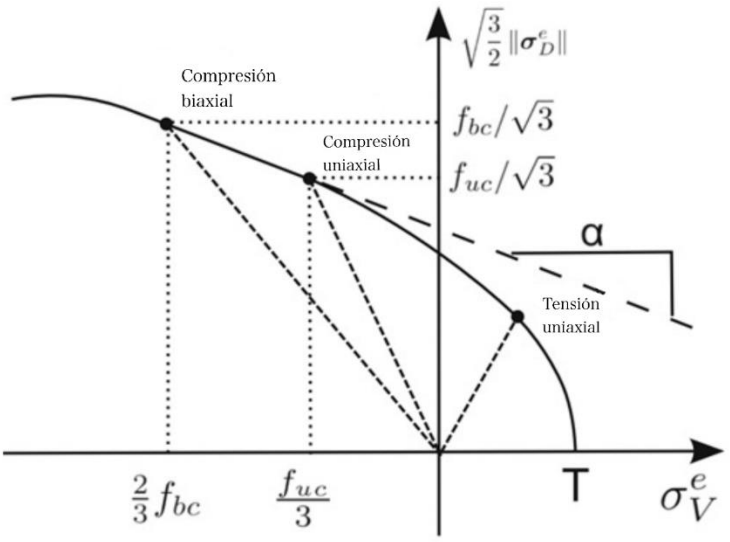


Figura 16. Representación de los diferentes estados de esfuerzos como puntos en la superficie de fluencia (Imadeddin et all, 2017).

Los parámetros necesarios para implementar en el modelo se muestran en la Tabla 3, los cuales corresponden a diferentes etapas. Al igual que los valores de los esfuerzos a compresión y tensión, son valores que se obtienen mediante pruebas de laboratorio, sin embargo, se pueden hacer aproximaciones mediante fórmulas.

Tabla 3. Parámetros necesarios para la calibración del modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado (Imadeddin et all, 2017).

Parametro	*Etapa*	*Simbolo*	*Unidad*
Esfuerzo uniaxial a compresión	Campo de supericie	f_c	Mpa
Esfuerzo biaxial a compresión	Campo de supericie	f_b	Mpa
Esfuerzo uniaxial a tensión	Campo de supericie	f_t	Mpa
Intersección del campo de compresió	Gorro de compresión	σ_V^c	Mpa
Relación del gorro de compresión	Gorro de compresión	R_c	-
Modulo de Elasticidad	Comportamiento Elastico	E	Mpa
Relación de Poisson	Comportamiento Elastico	ν	-
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	Mpa^2
Endurecimiento en el gorro de tensió	Endurecimiento	R_T	Mpa
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{t0}	-
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{c0}	-
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	-
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	-
Rango de parametro no local	No local	c	mm^2
Rango de parametro no local	No local	m	-

La obtención de los valores de la primera etapa "campo de superficie", correspondientes a los esfuerzos de compresión y tensión, pueden estar relacionadas con las coordenadas de la superficie de fluencia como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\tau_h = 1/3\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3)} \quad (14)$$

$$\sigma_h = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \sigma_V \quad (15)$$

En donde τ_h y σ_h representan los esfuerzos cortantes y normales octaédricos, asimismo lo esfuerzos principales se encuentran dados por σ_1, σ_2 y σ_3. Por lo que el esfuerzo biaxial de compresión se muestra como:

$$\sigma 1 = \sigma 2 = f_{bc}\ ;\ \sigma 3 = 0$$

Las coordenadas en el campo de fluencia presentado en la Figura 16 se describen con las siguientes ecuaciones:

$$\sqrt{3/2}\,\|\boldsymbol{\sigma}_D\| = f_{bc}/\sqrt{3} \quad (16)$$

$$\sigma_V = \tfrac{2}{3} f_{bc} \quad (17)$$

Sin embargo, para este trabajo se utilizaron fórmulas empíricas, las cuales se desarrollan en función del esfuerzo uniaxial, valor que se obtiene a través del sometimiento de los materiales a pruebas de resistencia a la compresión uniaxial. Estas fórmulas están dadas por:

$$f_{bc} = 1.15\, f_{uc} \quad (18)$$

$$f_{ut} = \frac{f_{ut}}{10} \quad (19)$$

Para el caso de la etapa del "campo de compresión" los valores de la intersección del campo de compresión σ_v^c y de la relación del campo de compresión R, son parámetros que se obtienen de las pruebas triaxiales de los materiales. El valor de σ_v^c está dado por la intersección que se produce entre el gorro de presión y la función de Druker-Prager, pues es el punto de transición que va de la expansión volumétrica plástica a la compactación volumétrica plástica. Por otra parte, el valor de R se refiere a la relación que existe entre el mayor y menor eje del campo y está dado por la siguiente ecuación:

$$R = Xo/f_1(\sigma_v^c) \quad (20)$$

No obstante, este tipo de pruebas pueden llegar a ser muy complejas y se necesita de equipos especializados, por lo que se opta por utilizar valores aproximados. El valor aproximado para σ_v^c es:

$$\sigma_v^c = \frac{2}{3} f_{bc} \quad (21)$$

Y el valor para *R* puede variar como se muestra en la ecuación:

$$R = (1 - 3) \quad (22)$$

Para la etapa de "comportamiento elástico" se tienen dos variables, el módulo de elasticidad *E* y la relación de Poisson ν. Para la obtención de estos datos se hará uso de la literatura y de pruebas experimentales realizadas en otros trabajos de investigación.

En la etapa de "endurecimiento" se encuentran presentes los parámetros de la constante de endurecimiento *D* y el endurecimiento en el campo de tensión R_T, que a su vez, se encuentran relacionados con la etapa de "daño" en donde se encuentran los parámetros de umbral de daño por tensión γ_{t0}, umbral de daño por compresión γ_{c0}, evolución de daño por tensión β_t y la evolución de daño por compresión β_c. La mayoría de estos parámetros se consiguen a través de una prueba cíclica a compresión de la cual se logra obtener una gráfica de esfuerzo – deformación como se muestra en la Figura 17.

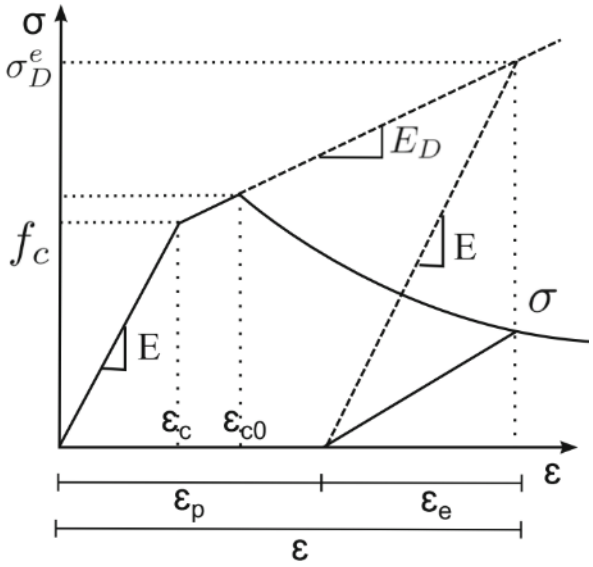


Figura 17. Interpretación unidimensional de la curva esfuerzo – deformación de la compresión cíclica. (Imadeddin et all, 2017).

No obstante, si no se cuenta con dicha prueba experimental, se sugieren algunos valores para las variables mediante aproximaciones estimadas a través de pruebas experimentales. Para la variable D se estiman valores de entre 1,000 – 60,000 MPa y para la variable R_T se sugiere un valor de 1 MPa. Respecto a las variables del daño, se propone un valor de 0 para γ_{t0} ya que se supone que el umbral del daño por tensión es prácticamente nulo, por otra parte, el valor que se sugiere para γ_{c0} ronda entre 0 y 3E-05. Para las evoluciones de daño por compresión y por tensión, se proponen valores de β_c que pueden variar entre los 1,000 – 10,000 y para β_t se sugiere un valor igual a $1.5 * \beta_c$ (Imadeddin et all, 2017).

Finalmente, para los valores de los parámetros no locales, los cuales no presentan una relación directa con algún tipo de ensayo experimental, se propone el valor de m como un valor mayor que 1 y el parámetro C se sugiere con un valor de l^2. Estos parámetros ayudan a poder regularizar la solución y mantener una tasa de convergencia en el problema. (Imadeddin et all, 2017).

2.2.4. Modelo de zona cohesiva

Este tipo de modelo es adecuado para representar el contacto que se genera entre la pieza de bloque y el mortero, de esta manera, el CZM (modelo de zona cohesiva) presenta un comportamiento elástico hasta que los esfuerzos de tensión o tangenciales son alcanzados, resultando en una falla frágil, la cual a su vez puede resultar en una apertura o un deslizamiento provocando una deficiencia que estará en función de la energía de fractura.

Para el uso de este modelo se necesita conocer las variables de los esfuerzos de tensión y tangenciales, así como sus correspondientes energías de fractura. En el primer modo de fractura G_f^I es necesario conocer el esfuerzo de tensión f_{xt} y su energía de fractura critica G_f^I, esto con el fin de poder desarrollar el fenómeno de apertura y/o despegado de la pieza. En el segundo modo de fractura G_f^{II} se necesita conocer el esfuerzo tangencial o cortante τ_{max} y su energía de fractura G_f^{II}, en este modo se modela el caso de la falla que se produce por el deslizamiento. Asimismo, pueden suceder algunas fallas donde interfieren una combinación de los 2 tipos de fractura, estas son fallas mixtas (Ernest B. et al, 2015).

En la práctica, la obtención de estos valores se deriva de pruebas de laboratorio en las cuales los elementos son sometidos a cargas de compresión uniaxial y a cortante, sin embargo, se

necesita de equipo de alta eficiencia para generar datos adecuados. Así que una de las maneras para poder obtener datos es mediante fórmulas que aproximen estos valores, aunque es necesario partir de al menos de f_{xt}, una vez que se obtiene este valor se puede suponer que la energía de fractura será igual a:

$$G_f^I\left(\frac{N}{m}\right) = 36.65 * f_{xt} \quad (23)$$

Por otra parte, para poder obtener el valor de τ_{max} , al igual que f_{xt} se debe obtener de datos experimentales y mediante la siguiente fórmula:

$$\tau_{max} = \frac{T}{b * m} \quad (24)$$

Donde T es la componente tangencial que se divide entre el área $b*m$ del prototipo experimental, eso nos permite generar el esfuerzo máximo a cortante τ_{max}. Finalmente, al igual que para el f_{xt}, la energía de fractura del modo II se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$G_f^{II}\left(\frac{N}{m}\right) = 36.65 * \tau_{max} \quad (25)$$

2.2.5. Estudios previos

La necesidad de crear modelos de cálculo que sean más eficientes y rápidos ha orillado al desarrollo de nuevas aplicaciones en métodos numéricos. La utilización de elementos finitos ha tenido bastante fuerza en los últimos años, gracias al desarrollo de ordenadores cada vez más potentes que puedan llevar a cabo tareas que presentan una mayor complejidad en cuestión de procesamiento. Cabe decir que la metodología de elementos finitos no es el único método que se puede aplicar, sin embargo, se ha demostrado que en sus resultados logra reflejar un comportamiento más apegado a la realidad.

Jelena Milosevic (2012) con ayuda de un modelado por elemento finito y a través de los datos obtenidos mediante experimentación, realizó 2 tipos de modelos numéricos para simular los ensayos de compresión diagonal en mampostería construida con piedra, los cuales están basados en un modelo no lineal de elemento finito y modelos de elementos distintos. Para el modelo no lineal, el cual se encuentra basado en el principio de tensión – deformación, el punto del agrietamiento es muy importante, ya que, para este caso en particular, resulta ser

muy difícil predecir la ubicación de las posibles grietas, así que optó por utilizar un "smeared crack model". Asimismo, se utilizaron elementos planos isoparamétricos de ocho nodos en la propuesta de la malla (Figura 18).

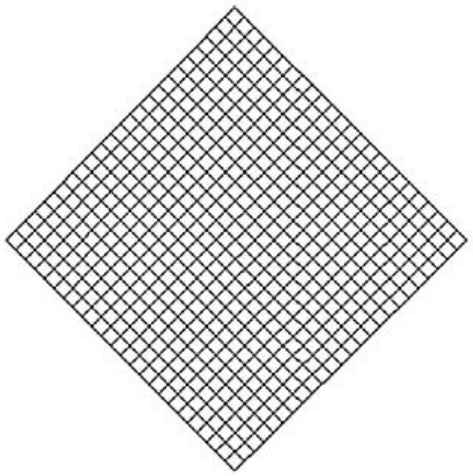


Figura 18. Modelo del mallado por elemento finito (Milosevic J. et al, 2012)

En la Tabla 4 se muestran los valores de las propiedades del material como son la densidad, relación de Poisson y energía de fractura, los cuales fueron tomados de estudios previos. En cuanto al valor de retención por cortante β fue propuesto como β=1, esto ya que al tratarse de rocas el comportamiento es similar al del concreto en la aparición de las grietas.

Tabla 4. Propiedades mecánicas para el análisis numérico por metodología de elemento finito (Milosevic J. et al, 2012).

Propiedades mecánicas para el análisis numérico por metodología de elemento finito						
Panel	Densidad (kg/m3)	Módulo de Young (Gpa)	Relación de Poisson	Resistencia a la tensión (Mpa)	Energía de Fractura (Nmm/mm2)	Factor de retención del cortante
W4	1835.00	3.27	0.20	0.15	0.10	0.10
W2	1835.00	3.27	0.20	0.01	0.10	0.10

Por otra parte, el método de elementos distintos permitió el modelado explícito de las juntas entre el mortero y la piedra para simular los mecanismos de fallas en los paneles de

mampostería, como también los desplazamientos y las rotaciones de las piezas dando como resultado la simulación de las fallas en los paneles. Se empleó un mallado de elementos en diferencias finitas con un comportamiento elástico (Figura 19), además se asignó un modelo de deslizamiento de Coulomb para representar el contacto entre los bloques. Los valores utilizados para este modelo se muestran en la Tabla 5, cabe mencionar que algunos valores fueron extraídos de trabajos previos. Se utilizó el algoritmo de Voronoi para la creación de los elementos, lo cual permitió realizar la disposición de las piedras arbitrariamente dentro de los elementos y así poder utilizar el método de elementos distintos para este caso.

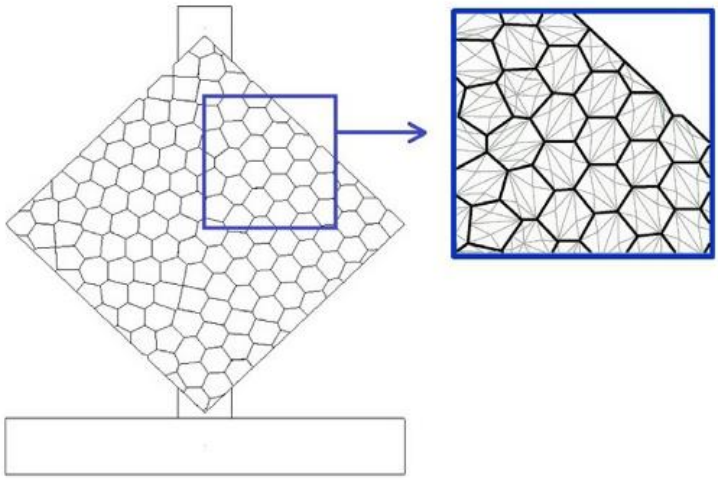


Figura 19. Bloques poligonales de tamaños aleatorios (Milosevic J. et al, 2012).

Tabla 5. Propiedades mecánicas para el análisis numérico por modelo de elementos distintos (Milosevic J. et al, 2012).

Propiedades mecánicas para el análisis numérico por modelado de elementos distintos							
Panel	Módulo de Bulk (Gpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Rigidez normal (Gpa)	Rigidez Cortante (Mpa)	Angulo de Fricción (°)	Cohesión (Mpa)	Resistencia a la tensión (Mpa)
W4	0.41	0.45	17.00	17.00	45.00	0.23	0.23
W2	0.41	0.45	8.00	8.00	45.00	0.03	0.03

La Figura 20 muestra la gráfica de los resultados obtenidos en cada uno de los modelos, así como los resultados experimentales. La respuesta de los análisis numéricos respecto del experimental resulta tener una gran similitud tanto en la etapa de carga inicial como en la última etapa de carga ultima. Además, los deterioros mostrados en el modelo presentan semejanza a los vistos en los ensayos experimentales.

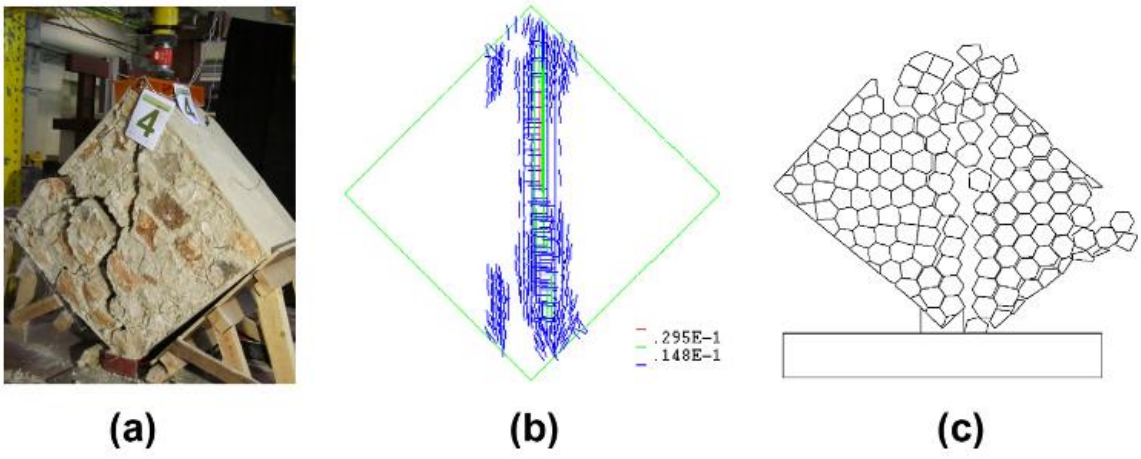


Figura 20. Modelo del mallado por elemento finito (Milosevic J. et al, 2012).

Esto demuestra que los modelos utilizados para este tipo de sistema de mampostería resultan ser eficientes en la simulación de elementos sometidos a compresión diagonal con el fin de representar el comportamiento mecánico ante la cortante. Sin embargo, quizás más pruebas de laboratorio para poder caracterizar mejor los materiales, ayudaría a poder generar una mayor relación entre los modelos y la experimentación, ya que algunos valores fueron tomados por la similitud de materiales.

Igualmente, Anna Brignola (2009) propuso una metodología para la evaluación de la resistencia a la tensión y el módulo de cortante a través de un modelo numérico lineal y un no – lineal, que a su vez compara con dos códigos, el ASTM (Sociedad americana de pruebas y materiales) y RILEM. Este estudio se basó en la experimentación que se llevó a cabo mediante ensayos a compresión diagonal in – situ, como se ha planteado en el punto anterior, los cuales no fueron aplicados únicamente a un sistema de mampostería, si no que los materiales de las piezas que lo conformaban las estructuras variaban significativamente.

Los modelos de la simulación numérica los llevaron a cabo mediante el software ANSYS. Para el caso del análisis lineal lo resolvieron por medio de elementos triangulares isoparamétricos a través de la hipótesis de tensión plana (Figura 21). En la Figura 22 se muestran los resultados del análisis para los estados de tensión en valores adimensionales en relación con la carga P que se aplicó y la sección transversal del panel A. Por lo que en el centro del panel está representado por la siguiente formula, la cual está relacionada al código

RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras) que considera la tensión máxima principal en el centro del panel:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.56\frac{P}{A} \qquad (26)$$

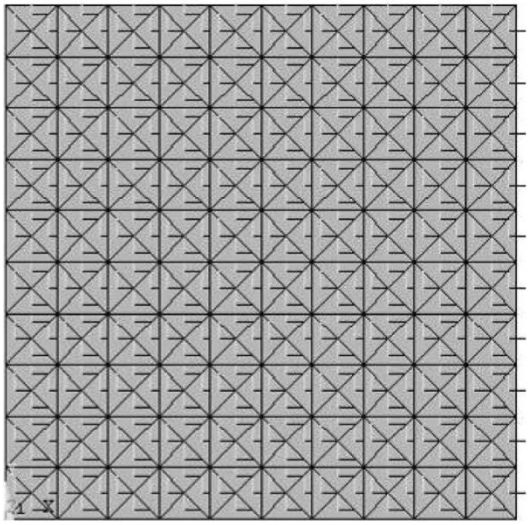


Figura 21. Modelo de elemento finito a través de elementos triangulares con elementos de esfuerzo plano (Brignola A. et al, 2009).

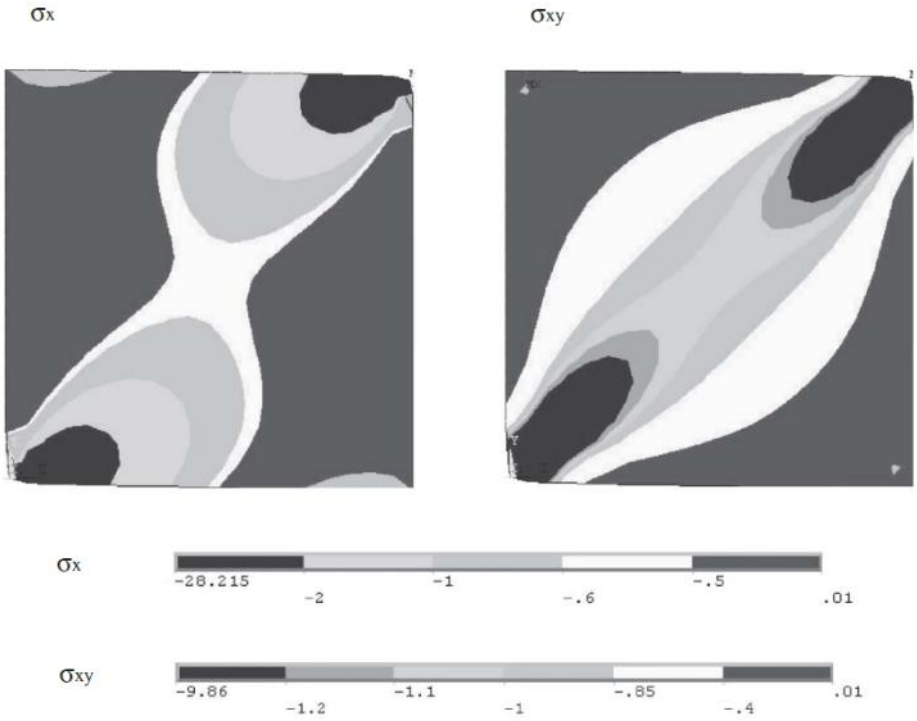


Figura 22. Solución elástica: esfuerzos normalizados σx y σxy (Brignola A. et al, 2009).

A través de los resultados se demostró que el código RILEM, de acuerdo con el modelo elástico lineal, es el que mejor se apega al comportamiento real a diferencia del código ASTM (Sociedad americana de pruebas y materiales), sin embargo, resultó que no ser la mejor en casos donde el sistema de mampostería presente irregularidades.

Por otra parte, el análisis no – lineal lo realizaron suponiendo un modelo con enfoque micromecánico, donde se considera al sistema de mampostería como un material compuesto, elaborado a base de bloques ordenados y juntas de mortero, y homogeneizando las características elásticas e inelásticas.

En este modelo, las juntas del mortero horizontales tienen una propiedad de resistencia a la tensión y una cohesión con fricción, en cuanto a las juntas verticales, estás se proponen como una discontinuidad con nula característica de resistencia. Los parámetros que se utilizaron para llevar a cabo el análisis no – lineal se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del modelo constitutivo no – lienal para mampostería (Brignola A. et al, 2009).

σ_{mr}	Resistencia a la tensión del mortero (Mpa)
τ_{mr}	Cohesión en la junta de mortero (Mpa)
μ	Coeficiente de fricción en la junta de mortero
Gc_{mt}	Deformabilidad inelastica de la junta de mortero a cortante
β_m	Coeficiente de ablandamiento de la junta de mortero
σ_{brc}	Resistencia a la compresión de la mampostería (Mpa)
τ_{brc}	Resistencia a la cortante en blocks (Mpa)
Ec_{bn}	Deformabilidad inelastica de la mampostería a compresión
β_b	Coeficiente de ablandamiento de la mampostería a compresión
λ	Entrelazado de mampostería

Para el modelo se tomaron ciertas consideraciones para asemejarlo lo más posible a la realidad, por lo que se tienen que restringir los desplazamientos tanto horizontales como verticales en la esquina inferior del murete y asignar los desplazamientos en la parte superior del mismo. Los resultados de este modelo arrojan que una vez que llega a producirse el daño

en el centro del panel, su capacidad de carga ya no aumenta considerablemente, es por esto que, en el análisis lineal se puede asumir que una vez que ocurre el fallo en el centro coincide con el colapso del murete. En cuanto al daño, se puede observar en la Figura 23 que este es muy parecido al comportamiento real en las pruebas, ya que sigue la diagonal como en el prototipo, comenzando desde la partes inferior y superior hasta que se propaga hacia el centro.

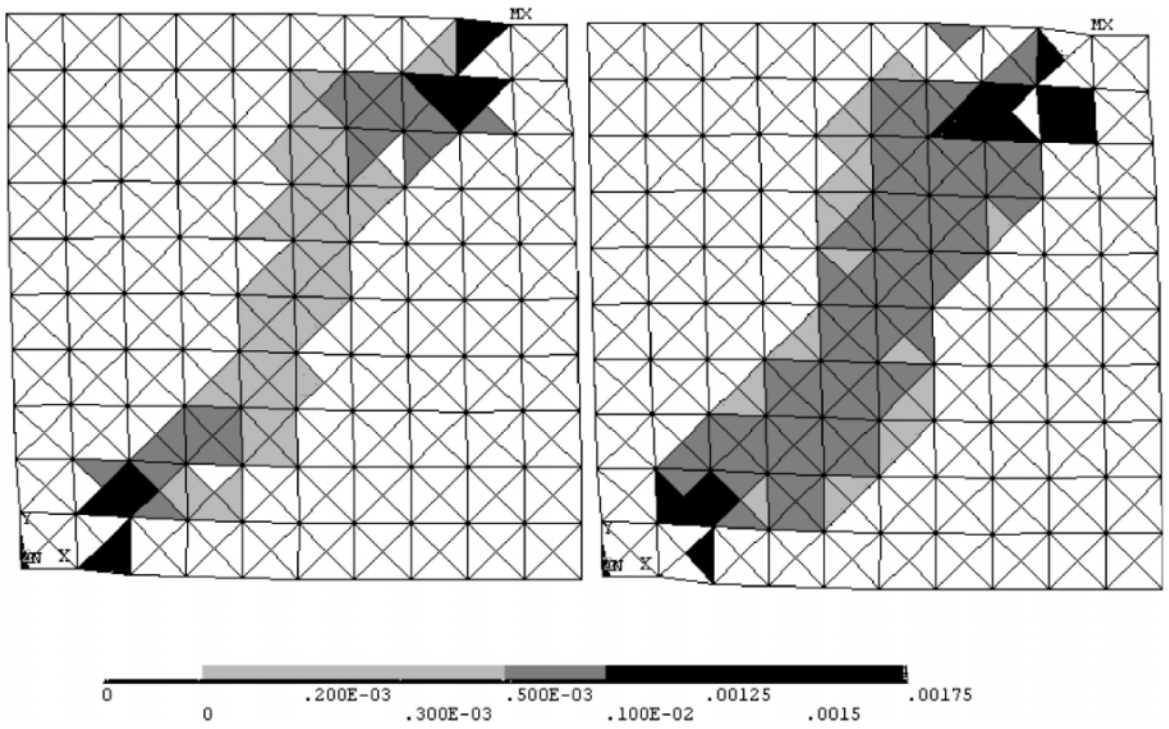


Figura 23. Deformación horizontal no – lineal, relacionada con la apertura de juntas de mortero verticales (Brignola A. et al, 2009).

Se asume que la representación del comportamiento de la mampostería a través de esta metodología simboliza de manera eficaz el desempeño de sistemas de mampostería que sean regulares, ya que cuando se quiere analizar mampostería con ciertas irregularidades en su sistema, estos no suelen ser tan confiables. Asimismo, el análisis lineal y el no – lineal sigue presentando ligeras diferencias en los resultados, aunque de una manera más conservadora, el análisis no – lineal asemeja mejor el comportamiento real.

En México también se han llevado a cabo este tipo de análisis para poder conocer el comportamiento de materiales en alguna región es especifico. L. Fernández Baqueiro (2008) realizó un análisis para determinar la resistencia a la compresión diagonal y el módulo de

cortante de la mampostería en bloques huecos de concreto para la región de la Ciudad de Mérida. El estudio se basó en una experimentación que se llevó a cabo por medio de 18 muretes sometidos a compresión diagonal dentro de su plano y que posteriormente se aplicó un modelo numérico empleando la Metodología de Elementos Finitos para observar la distribución de esfuerzos en el ensaye.

Para la aplicación del Método de Elementos finitos se empleó el software DIANA versión 9.3. Se propusieron elementos isoparamétricos cuadriláteros de 4 nodos, así como un mallado con dimensiones de 5x5 cm de superficie con un ancho de 15 cm, se consideró un comportamiento constitutivo elástico lineal con un valor de 40,000 kg/cm^2 y un valor de la relación de Poisson de 0.25 ya que consideran que el módulo de cortante es 40% del módulo de elasticidad. En cuanto al modelo y al igual que los trabajos presentados en párrafos anteriores, las condiciones en la parte inferior del modelo estarán restringidos en todas direcciones y en la parte superior se restringió únicamente el desplazamiento horizontal para dejar libre el desplazamiento vertical.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo, concluyeron que los esfuerzos σ_{xx} en los ejes globales del modelo, se encuentran en tensión en la parte centro del panel y cerca de los cabezales se observaron esfuerzos de compresión. Asimismo, los esfuerzos de tensión σ_{xx} resultaron ser menores que los esfuerzos de compresión σ_{yy}. En la Figura 24 se representa la distribución de esfuerzos cortantes τ_{xy} respecto a los ejes locales. Se asume que la concentración de esfuerzos en la parte de las bases del ensaye es la consecuencia de que en las pruebas donde se produce por la falla por deslizamiento se origine en la primer o última junta horizontal, la cual hacen referencia mediante una línea punteada en la Figura 25.

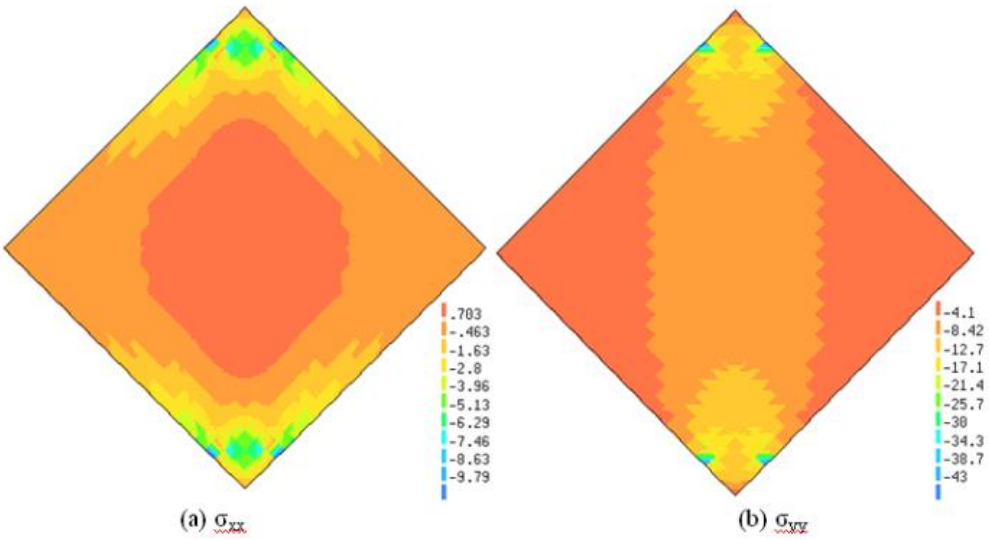


Figura 24. Distribución de esfuerzos normales en ejes globales (Fernández B. L. et al, 2008).

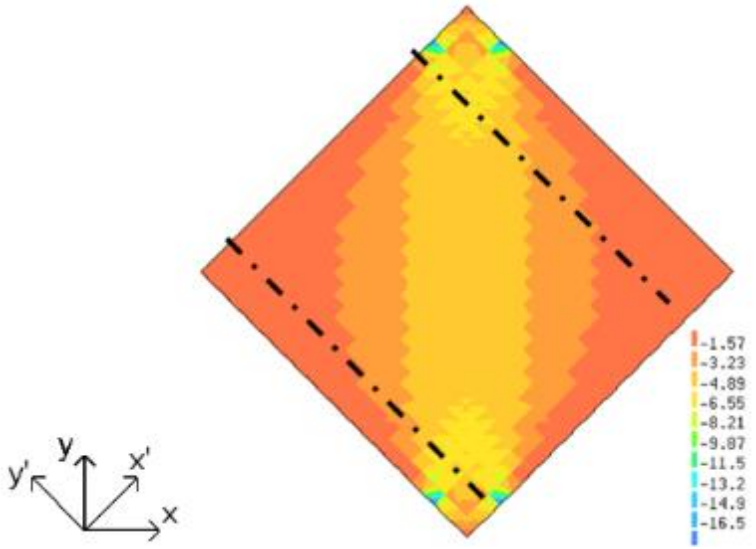


Figura 25. Distribución de esfuerzos cortantes en ejes locales (x',y') (Fernández B. L. et al, 2008).

Finalmente, después de los ensayes y modelos llevados a cabo concluyeron que los valores que obtuvieron para resistencia a la compresión diagonal tuvieron una variación de entre 1.83 y 3.43 kg/cm^2, así como un módulo de cortante de 16, 713 kg/cm^2. Estos valores obtenidos a través de los ensayes fueron validados mediante los modelos, los cuales se comportaron de igual forma que la experimentación, Cabe mencionar que probablemente un análisis no – lineal se pudiese haber apegado más a la realidad, sin embargo, el análisis lineal propuesto cumplió con los requerimientos. Otro punto a favor del modelo es que en este tipo de

mampostería las piezas que conforman el método de construcción son uniformes tanto en su geometría como en su colocación.

Con lo expuesto previamente se entiende que la aplicación de modelos numéricos basados en metodologías como la de Elemento Finito, son capaces de reproducir el comportamiento de muretes sometidos a compresión diagonal y así conocer el funcionamiento más a detalle del sistema estructural. Estas ventajas numéricas en conjunto con el desarrollo de softwares más potentes acortan el tiempo de análisis, lo que disminuye a su vez la experimentación para generar datos que le puedan servir al ingeniero estructurista.

2.3. Refuerzo con mallas metálicas

En diferentes partes del mundo se ha tratado de reforzar y/o rehabilitar estructuras de mampostería, las cuales principalmente se encuentran constituidas por materiales como roca fracturada de forma uniforme o por piezas de bloque o tabique elaboradas artesanalmente a base de materiales pétreos.

Ruiz García et al. (1994) llevó a cabo a través de un experimento la construcción de un prototipo con escala 1:1 que consistía en una estructura conformada por piezas de barro recocido y que se encontraría con daños severos. Los muros presentaban grietas de forma inclinada de aproximadamente 20 mm y consecuentemente fueron reparados mediante malla electrosoldada 6x6/10-10 anclada mediante clavos de 5cm y corcholatas, y con un recubrimiento de mortero para finalmente ser llevado a su punto de falla.

Los resultados de este ensayo reflejaron que existió un incremento en la resistencia a las cargas laterales cíclicas alternadas debido al reforzamiento con la malla electrosoldada (Figura 26), teniendo una mejor capacidad a deformaciones debido al refuerzo horizontal de la malla y una recuperación de la rigidez hasta en un 75% de la estructura original. Asimismo, se propuso que la capacidad ultima ante las cargas laterales es resultado de la siguiente ecuación:

$$V_u = V_m + V_{cc} + V_{sm} + V_{cm} \qquad (27)$$

Donde:

V_u = Capacidad ultima a cargas laterales.

V_m = Participación de la mampostería.

V_{cc} = Elementos confinantes.

V_{sm} = Aporte de la malla electrosoldada.

V_{cm} = Resistencia del recubrimiento de mortero.

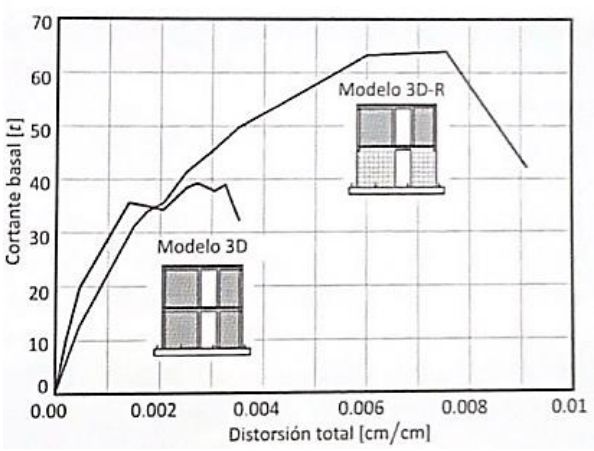


Figura 26. Envolventes de respuesta de una estructura de mamaposteria original (Modelo 3D) y reparada con mallas recubiertas de mortero (Modelo 3D-R) (Ruiz et al., 1994).

Cabe mencionar que, para este experimento, se consideró que la capacidad del mortero sometido a fuerzas de tensión era difícil de suponer, ya que este material prácticamente no resiste ese tipo de deformaciones por lo que se supuso igual a 0. Además, la participación de la mampostería al tener un daño severo, también se vería afectada, por lo que al igual que el mortero su resistencia seria casi 0. En el caso del esfuerzo que resistiría la malla, se realizó por medio del producto de 2 variables, la cuantía de acero del refuerzo horizontal y su esfuerzo de fluencia nominal, el cual se vio afectado por un factor de eficiencia con un valor de 0.5. Haciendo referencia a las irregularidades en la distribución de esfuerzos y deformaciones del elemento malla (Ruiz et al, 1994)

De acuerdo con el libro de "Edificaciones de Mampostería" publicado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. (SMIE, 2019), el procedimiento de rehabilitación o refuerzo por medio de malla electrosoldada recubierta de mortero es una de las

metodologías más eficientes y económicas, pues se pueden tener incrementos en resistencia, rigidez y la capacidad de deformación superiores al 50, 20 y 100% respectivamente.

Consiguientemente, en otro apartado llamado "Ejemplos de diseño", presentan una serie de ejercicios que consisten en la evaluación y la explicación de los procedimientos para llevar a cabo algún tipo de restauración, haciendo referencia que estos procesos se encuentran basados en las NTC-2020.

El primer problema consta de una estructura construida mediante tabique artesanal pegado con mortero, que es de un nivel y se encuentra dañada, presenta grietas que se encuentran en forma de diagonal (x) en los muros y que además no consta de castillos ni de refuerzo interior. El espesor en muros es de 14 cm y cuenta con una dala superior de 15 cm de peralte, adicionalmente, hace mención de que se encuentra en una zona sísmica importante.

El primer paso del procedimiento menciona como deben repararse las grietas, el cual consiste en retirar el aplanado del muro y cualquier material que se encuentre en este. Después, se limpian las grietas y con rajuelas se rellenan los huecos previamente limpiados de las grietas. Posteriormente, hace mención a la rehabilitación del muro, proponiendo valores emitidos por las NTC-2020 y modelando la estructura mediante un programa de análisis estructural para obtener valores y poder proponer castillos de 4 barras de ¼ de pulgada y 12 cm de lado para cada uno de los lados de los muros dañados.

Finalmente, propone el diseño del encamisado, el cual tiene que resistir una fuerza cortante de 4.8 ton. Por lo tanto, se plantea el uso de malla electrosoldada 6x6-10/10 con una separación tanto vertical como horizontal de 150 mm y un diámetro de 3.43 mm de diámetro. También proponen que el valor de la resistencia a la carga lateral por parte de la mampostería V_{mR} será igual a 0, por lo que con base en las NTC-2020 proponen la siguiente ecuación:

$$V_u = V_{sR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A_T \qquad (28)$$

Donde:

$V_u =$ Resistencia ultima

$V_{sR} =$ Resistencia a cortante del acero de refuerzo horizontal

$F_R =$ Factor de resistencia

$\eta =$ Factor de eficiencia del refuerzo horizontal

$\rho_h =$ Cuantía de acero de refuerzo horizontal

$f_{yh} =$ Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo horizontal o malla

$A_T =$ Área bruta de la sección transversal o segmento del muro que incluye a los castillos

Consiguientemente, tomando en cuenta la ecuación propuesta y sabiendo que:

$$\eta = k_1 \eta_s \quad (29)$$

$$k_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \quad (30)$$

Donde:

$k_1 =$ Factor de reducción de resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende de la cuantía de refuerzo.

$\eta_s =$ Factor parcial de eficiencia del refuerzo horizontal que depende de la resistencia a compresión de la mampostería.

procede a realizar la sustitución de los valores obteniendo lo siguiente:

$$k_1 = 1 - 0.045 \left(\frac{kg}{cm2}\right)^{-1} * \frac{0.092 cm^2}{15 * 14\, cm} * 5000 \frac{kg}{cm^2} = 0.901$$

$$\eta = 0.901 * 0.5 = 0.45$$

$$V_{sR} = 0.7 * 0.45 * 0.000438 * 5000 \frac{kg}{cm^2} * 400 cm * (14 + 2.5) cm = 5473.5\ kg = 5.5 t > 4.8\ t$$

Sin embargo, se realiza una revisión para la cuantía mínima del acero, considerando que esta es de 3 kg/cm^2 de acuerdo con las NTC-2020. De esta forma se obtiene que:

$$\rho_h * f_{yh} = 0.000438 * 5000 \frac{kg}{cm^2} = 2.2\ \frac{kg}{cm^2}$$

Debido a esto, es preciso el aumento en la cuantía de acero, así que se toma la determinación de ocupar una malla 6x6-8/8 cubriendo así con el requerimiento.

Una vez que se tiene la propuesta del refuerzo de acero para el muro se procede a proponer el anclaje con el cual se sujetara la malla electrosoldada. En este caso, se mencionan

diferentes opciones como clavos, clavos de percusión o de impacto y grapas en forma de U (Figura 27). Finalmente se opta por utilizar las grapas en forma de U, debido a que se ha visto una mayor eficiencia en el anclaje que con las demás opciones.



Figura 27. Tipo de grapa U recomendada. (SMIE, 2019).

Con base en la información recolectada de estudios previos y análisis propuestos con fundamentos en normativas como las NTC-2020 se puede inferir que el uso de refuerzo de acero con malla electrosoldada en estructuras de mampostería es una opción que puede resultar económica y eficaz para estructuras que necesiten aumentar la resistencia a cortante ya sea por diseño o porque han sufrido algún tipo de daño previamente.

2.4. Bondad de ajuste en modelos

En estadística, al referirse a la bondad de ajuste de algún modelo, se habla de un método que se utiliza para la prueba de hipótesis con la suposición de que una distribución de frecuencias (frecuencias esperadas) coincide o no, con otra distribución observada. (Triola, 2009).

2.4.1. Distribución chi cuadrada para bondad de ajuste en experimentos binomiales

Se define como un experimento binomial aquel que tiene más de 2 categorías (a comparación de un experimento binomial) y que debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. El número de corridas debe ser una constante.
2. Cada una de las corridas es independiente.

3. Los resultados para cada corrida deben clasificarse puntualmente en una de las categorías.
4. Las probabilidades para las diversas categorías deben persistir constantes en cada corrida.

Por otra parte, para la comparación de las hipótesis de prueba es necesario implementar algún estadístico de prueba que avale o niegue si existe una similitud entre las distintas distribuciones, el estadístico "chi cuadrada", el cual puede aplicarse mediante el conteo de frecuencias observadas y las frecuencias esperadas, dando como resultado una medida de discrepancia.

El estadístico de prueba chi cuadrada "X^2" se encuentra representado mediante la siguiente formula:

$$X^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \qquad (31)$$

Donde:

O = Es el resultado de una frecuencia observada

E = Es el resultado de una frecuencia esperada

El estadístico de prueba consiste en elevar la diferencia encontrada entre la distribución observada y la esperada al cuadrado, permitiendo evidenciar las diferencias entre estas. Después, la sumatoria de los cuadrados permite medir la dimensión de las diferencias, así que para obtener esa dimensión de diferencias en función de las frecuencias observadas, se debe dividir entre los valores observados.

En este caso, las frecuencias observadas "O" serán los resultados obtenidos mediante las corridas experimentales a los muretes reforzados y las frecuencias esperadas "E", serán aquellos resultados obtenidos a través del modelo numérico propuesto.

Una vez, obtenido el valor de "X^2" se puede identificar si existe una diferencia entre los 2 grupos de frecuencias, de acuerdo con el diagrama de la Figura 28, en la parte izquierda se encuentra el supuesto de que "X^2" cae fuera de la región critica para un valor de "P" grande (por ejemplo, un intervalo de confianza del 0.95), por lo que la hipótesis nula "H_0" no se

rechazaría, es decir, existirá un buen ajuste entre las distribuciones. Por otra parte, en el supuesto de la parte derecha, para un valor grande de "X^2" y un valor de "P" pequeño, se estaría cayendo dentro de la región critica, por lo que se rechazaría la "H_0", es decir, no existiría un buen ajuste entre las distribuciones. (Triola, 2009).

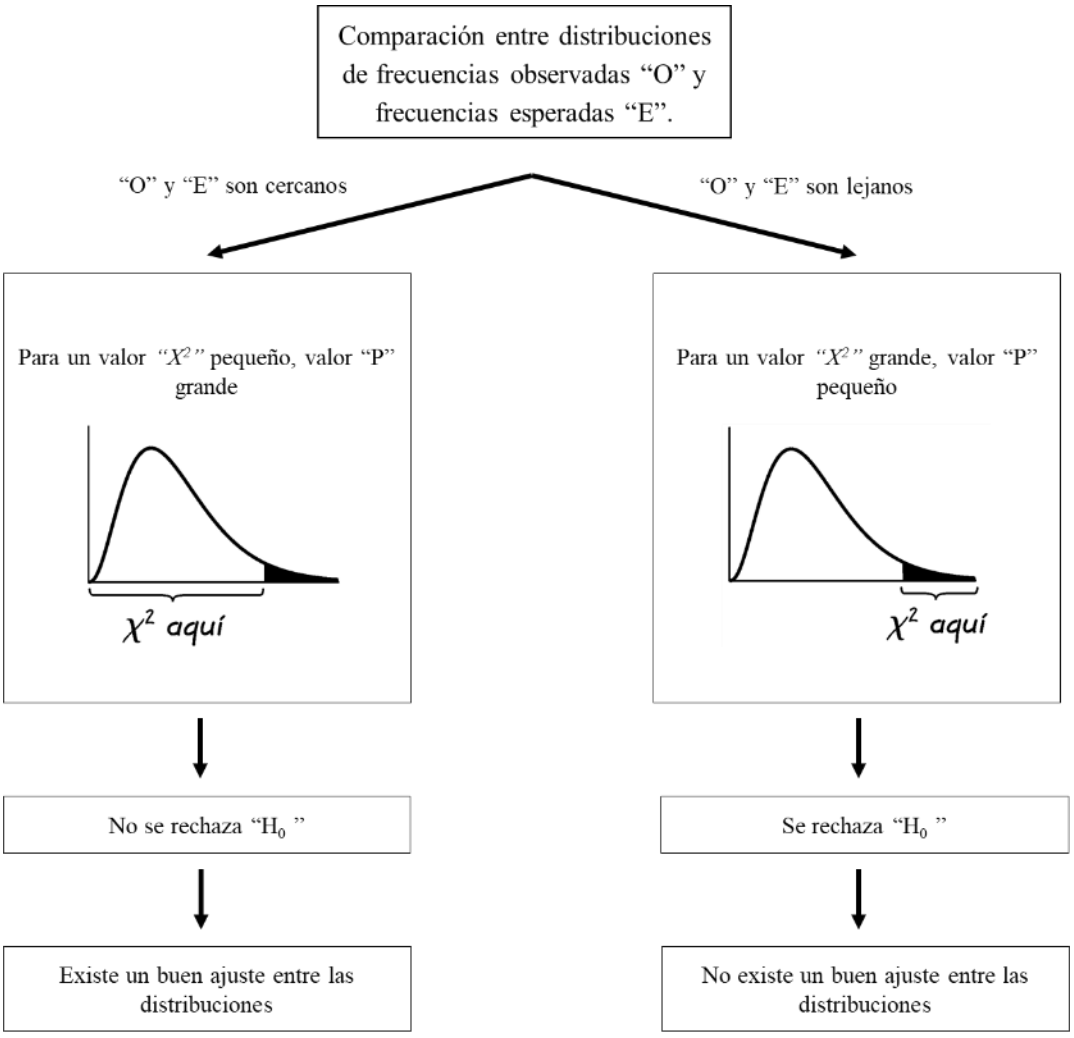


Figura 28. Relaciones entre el estadístico de prueba "X^2", el valor "P" y la bondad de ajuste. (Triola, 2009).

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

Con base en la caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería construida con block y reforzada con acero, se puede obtener un modelo computacional que represente el comportamiento de la mampostería reforzada sujeta a tensión diagonal.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo general

Modelar el comportamiento a tensión diagonal de la mampostería construida con block de cemento, considerando las propiedades mecánicas del material, la geometría del elemento y la contribución de acero de refuerzo.

3.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades mecánicas de la mampostería mediante pruebas de laboratorio.
2. Plantear un modelo computacional que represente el comportamiento a tensión diagonal de los muretes.
3. Determinar la bondad de ajuste del modelo propuesto.

4. METODOLOGÍA

En la Figura 29 se muestra esquemáticamente las etapas de este trabajo de investigación, las cuales se abordarán en detalle en las siguientes secciones.

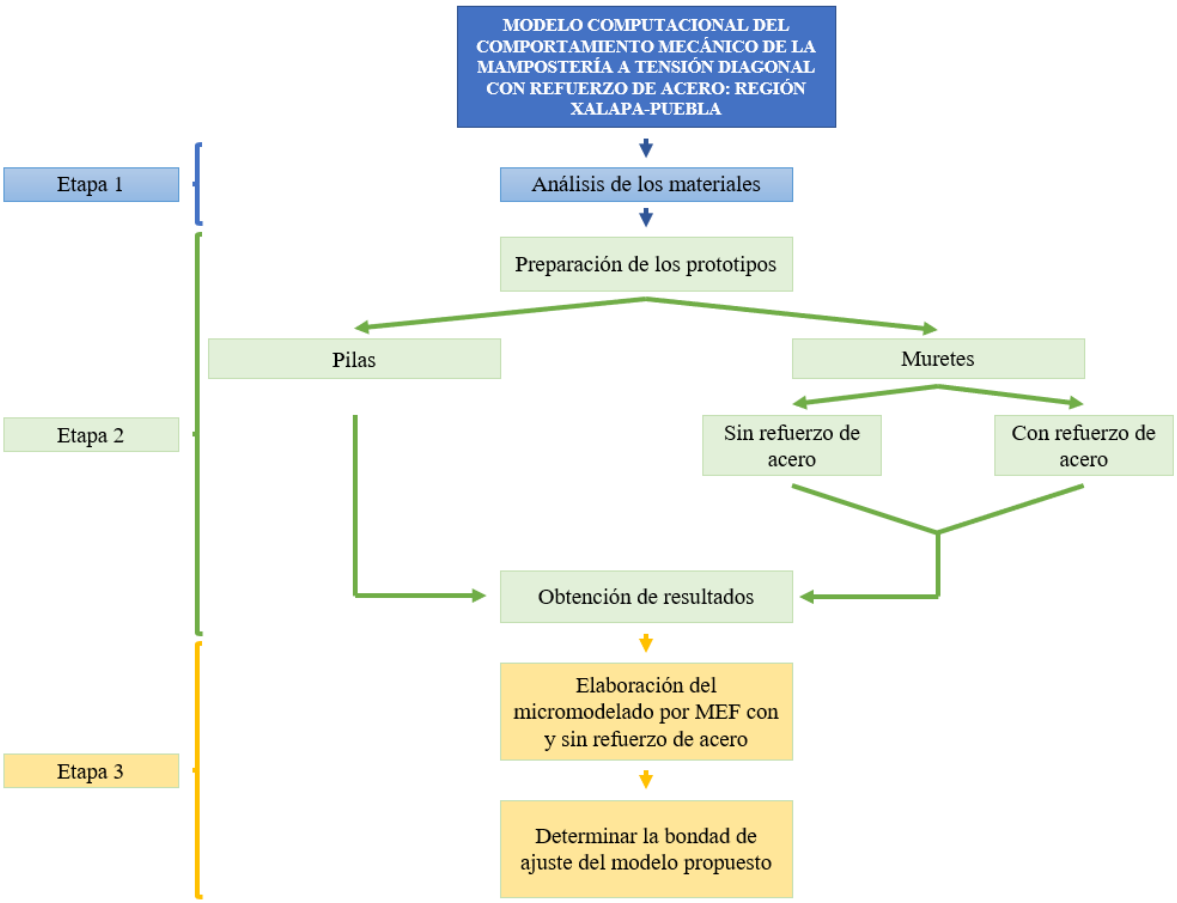


Figura 29. Diagrama de flujo de la metodología.

4.1. Determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería

4.1.1. Análisis de los materiales

El objetivo del ensaye de materiales por unidad fue para obtener los parámetros necesarios que se emplean en la construcción de pilas y muretes. Esta primera etapa consta de pruebas a compresión uniaxial mediante la maquina universal a una muestra representativa de los materiales.

4.1.1.1. Bloques de concreto

Se utilizaron 2 tipos de bloque macizo, las medidas de los especímenes probados se encuentran en la Tabla 7 así como en la Figura 30.

Cabe mencionar que los 2 tipos de bloques son de diferentes zonas del país: el bloque de 12 cm es proveniente de la bloquera "Industrial Bloqueera" ubicada en la localidad de Guadalupe Victoria, Puebla, en tanto que el bloque de 15 cm es originario de la casa de materiales "Steel Constructions" localizada en la ciudad de Querétaro, Querétaro.

Tabla 7. Medidas de piezas de bloque.

Materiales "Steel Constructions"			
Espécimen	Dimensiones (cm)		
	Largo	Ancho	Altura
1	39.6	14.5	20.2
2	39.9	14.7	19.7
3	39.8	15	20.2
4	39.9	14.8	19.9
5	39.9	15	19.6
Fábrica "Industrial Blockera"			
Espécimen	Dimensiones (cm)		
	Largo	Ancho	Altura
1	39.7	11.8	19.7
2	39.5	11.8	19
3	38.4	11.9	19.5
4	39.4	11.9	19
5	39.7	11.9	19.1

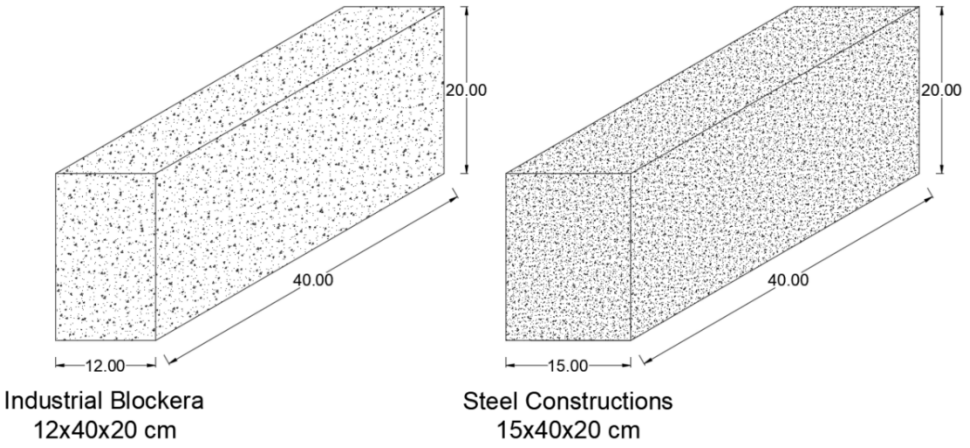


Figura 30. Medidas aproximadas de las piezas de bloque.

4.1.1.2. Cubos de mortero

Para el caso de los especímenes a prueba, se elaboraron cubos de mortero (Figura 31) con base en la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 de cada una de las mezclas que se utilizaron en la construcción de las pilas y muretes. La cantidad de especímenes fueron de un total de 3 especímenes por mezcla como se muestra en la Tabla 8.

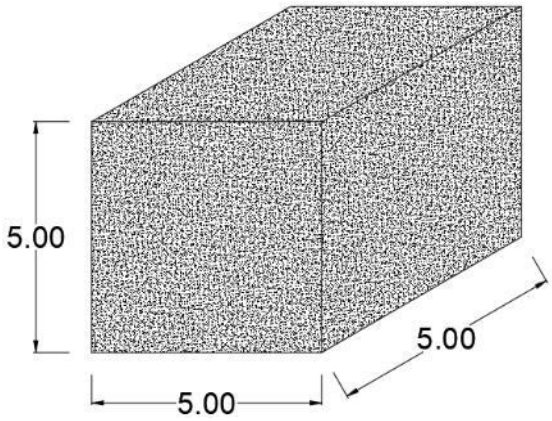


Figura 31. Medidas aproximadas de las muestras de mortero.

Tabla 8. Medidas de las muestras de mortero.

Mortero en pilas			
Cubo	Dimensiones (cm)		Área Bruta (cm2)
	Lado 1	Lado 2	
PM-1	5.14	5.07	26.0598
PM-2	5.09	5.05	25.7045
PM-3	5.05	5.09	25.7045
Mortero en muretes sin refuerzo			
MM-1	5.1	5.08	25.908
MM-2	5.04	5.09	25.6536
MM-3	5.09	5.05	25.7045
Mortero en muretes con refuerzo			
MMR-1	5.01	5.06	25.3506
MMR-2	5.08	5.02	25.5016
MMR-3	5.05	5.1	25.755
Mortero de recubrimiento en muretes reforzados			
MMRC-1	5.11	5.01	25.6011
MMRC-2	5.03	5.07	25.5021
MMRC-3	5.05	5.04	25.452

Para la elaboración de la mezcla se utilizó un mortero premezclado de la marca CEMEX (Figura 32). En la ficha técnica del material (Tabla 9) se especifica una resistencia a la compresión a los 28 días de 20 N/mm^2 lo que equivale a 203.94 kg/cm^2. Asimismo, menciona la cantidad necesaria de agua que debe utilizarse para la mezcla, la cual es un aproximado de 3.4 ± 0.25 L.

Cabe mencionar que en la elaboración de la mezcla para las pilas se añadió un 13.23% más de agua (450 ml) del sugerido, ya que la mezcla presentaba poca trabajabilidad para que la mano de obra pudiese colocar de la forma más adecuadas las piezas. Para el caso de los muretes sin refuerzo se agregó un 23.52% más del especificado en ficha técnica, debido a la misma condición de poca trabajabilidad. En el caso de los muretes con refuerzo, tanto para

la junta como para el recubrimiento, se agregó un 13.23% más del recomendado por el fabricante.



Figura 32. Mortero seco premezclado de la marca CEMEX.

Tabla 9. Parámetros de mortero seco CEMEX (tabla extraída de ficha técnica de CEMEX).

Parámetros	
Tipo	Mezcla base cemento
Presentación	Saco 25 kilos
Consumo de agua	3.4 ± 0.25 L
R. Compresión 28 d	20 N/mm^2

4.1.2. Ensaye de pilas

La construcción de las pilas comprende lo establecido en la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010, en la cual se encuentran las características necesarias con las cuales deben de cumplir las muestras. Para la construcción de las pilas se utilizaron los 2 tipos de bloque macizo expuestos anteriormente de 12 y 15 cm (Figura 33).

En cuanto a la geometría de las pilas y considerando la normativa antes mencionada, estas se conformaron de 3 piezas de bloque colocadas una sobre la otra por medio de una junta de mortero de aproximadamente 1.5 cm de espesor (Figura 34).



Figura 33. Pilas terminadas de ambos tipos de bloque

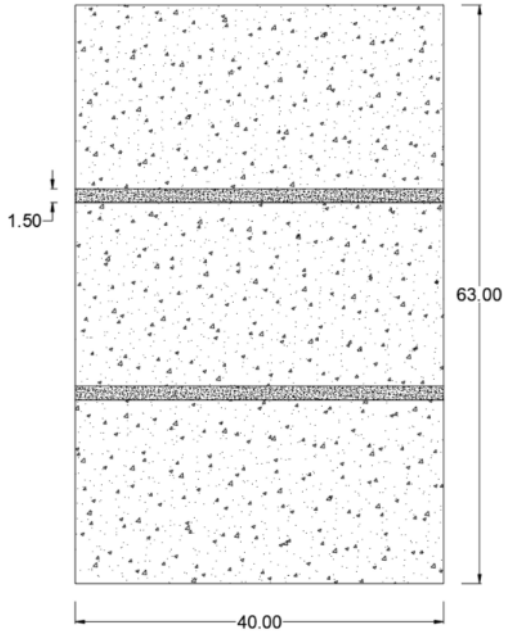


Figura 34. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal).

La normativa también habla de una relación de esbeltez para las pilas, que se encuentra en función de la altura entre la menor dimensión de la sección transversal y el resultado de esta división debe estar entre los valores de 2 y 6. El resultado de la relación de esbeltez (Tabla 10) corresponde a un factor de corrección mostrado en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010, que posteriormente fue utilizado para el cálculo de la resistencia a la compresión de la pila.

Tabla 10. Resultados de relación de esbeltez y factor correctivo para pilas.

Relación de esbeltez y factor correctivo		
Pilas	R.E. (promedio)	F.C.E. (promedio)
Block 15x20x40	4.38	1.01
Block 12x20x40	5.14	1.05

Una vez que las pilas cumplieron los 28 días de que fueron construidas se procedió a su ensaye. Al igual que las piezas de bloque y los cubos de mortero, las pilas fueron sometidas a compresión vertical en una máquina universal FORNEY LT-1150 con capacidad de 150 toneladas, propiedad de la Universidad Autónoma de Querétaro ubicada en el laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática. Las mediciones para poder calcular la deformación unitaria a lo largo de su eje transversal se hicieron por medio de un micrómetro con precisión de 0.001 mm como se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal).

4.1.3. Ensaye de muretes

4.1.3.1. Muretes sin refuerzo

Para la construcción de los muretes, al igual que el caso de las pilas, se siguieron los lineamientos de la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010. Los materiales utilizados para la construcción de los prototipos fueron los mismos que se utilizaron para las pilas, de igual manera se utilizaron los 2 diferentes tipos de bloque.

Los muretes se encontraban conformados por 3 piezas completas y 3 medias piezas de bloque, unidas por medio de la mezcla de mortero (Figura 36). En la normativa se menciona

que la diferencia que debe de existir entre la altura y la longitud será hasta un $\pm$ 5%. Las medidas finales de los muretes se presentan en la Tabla 11 y se encuentran dentro del margen establecido.

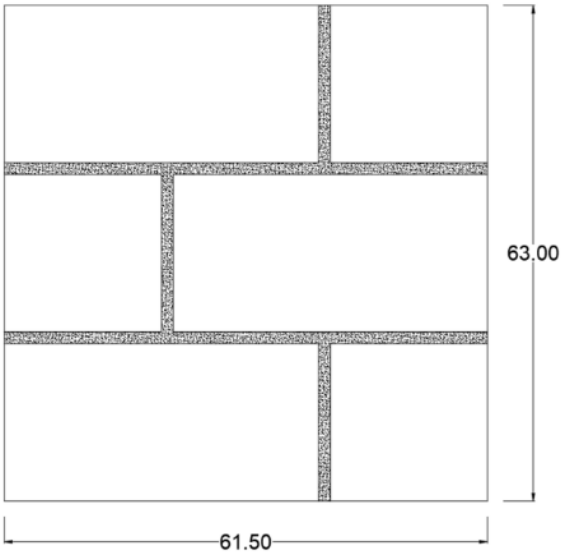


Figura 36. Medidas de los prototipos de pila (vista frontal).

Tabla 11. Dimensiones de muretes sin refuerzo.

Dimensiones de los muretes sin refuerzo						
Tipo de block	Clave	Altura (cm)	Base (cm)	Espesor (cm)	Diagonal a compresión (cm)	Diagonal a tensión (cm)
Block de 15 cm de espesor	1-Q	63.8	61.6	14.7	88	87.2
	2-Q	63.7	61.5	14.5	87.4	89.2
	3-Q	61.9	64.9	15	88	89.5
	4-Q	64.4	61.7	14.5	87.3	88.3
Block de 12 cm de espesor	1-V	61.8	61.2	12	86.3	56
	2-V	62.4	61	12	87	56.2
	3-V	61.5	62	12	86	54.4
	4-V	61	62.8	11.9	86.7	55.5

Los muretes fueron sometidos a compresión en la máquina universal, colocándolos en un ángulo de 45° y con cabezales en la parte inferior y superior. De igual manera que en las pilas, se utilizó un micrómetro para medir las deformaciones, tanto en la diagonal a compresión como en la diagonal a tensión (Figura 37).

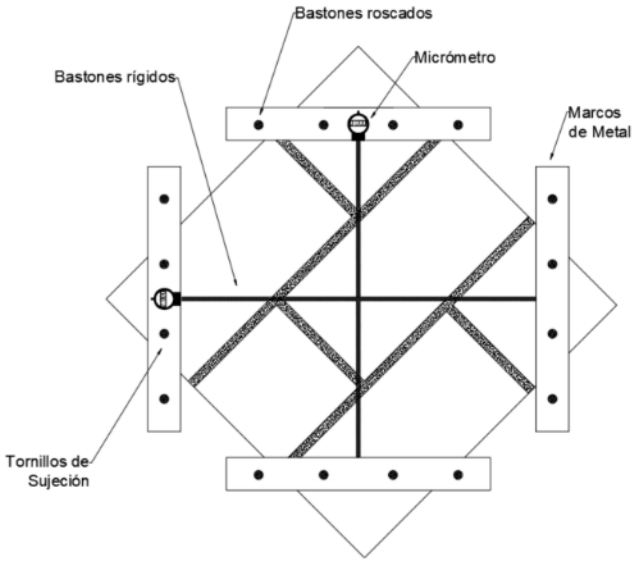


Figura 37. Medidas de los prototipos de murete (vista frontal).

4.1.3.2. Muretes con refuerzo

Los muretes con refuerzo constan de la misma geometría que los muretes sin este (Figura 38), solo que en estos prototipos se colocó una malla electrosoldada 6-6 / 10-10 (Figura 39) sujetada con armellas 20x70 (Figura 40), las cuales fueron fijadas a través de un anclaje químico CF-890 de la marca "Fester" (Figura 41), para finalmente poner un recubrimiento de mortero con un espesor aproximado de 1.5 cm.

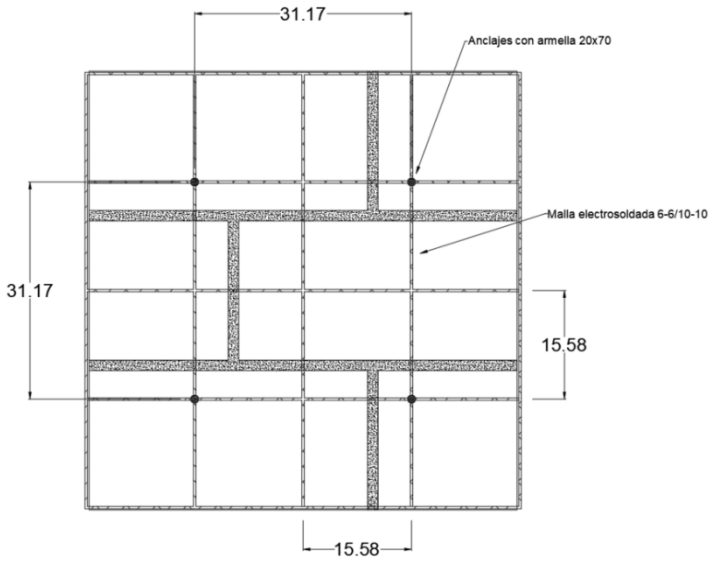


Figura 38. Geometría del murete con malla electrosoldada.



Figura 39. Malla electrosoldada 6-6 / 10-10 colocada en murete.

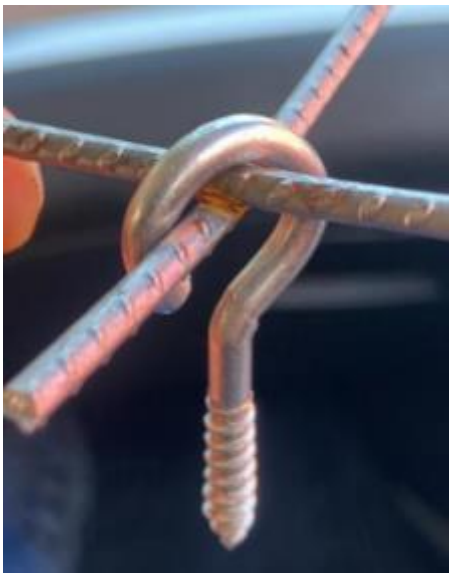


Figura 40. Armella 20x70 para sujeción de malla.



Figura 41. Anclaje químico CF 890 de la marca "Fester".

Los muretes reforzados al tener elementos extras y un recubrimiento en una cara muestran una diferencia en las dimensiones del ancho respecto de los no reforzados (Tabla 12).

Tabla 12. Dimensiones de muretes con refuerzo.

Dimensiones de los muretes con refuerzo						
Tipo de block	Clave	Altura (cm)	Base (cm)	Espesor (cm)	Diagonal a compresión (cm)	Diagonal a tensión (cm)
Block de 15 cm de espesor	1-QR	64.5	61.5	16.8	87	88
	2-QR	64	61.5	17	87	88
	1-QR	61.5	63.5	16.5	87	88
Block de 12 cm de espesor	1-VR	61	61.5	13.7	86.5	86
	2-VR	61	62	14	86	85.5
	3-VR	61.5	62	13.5	86.5	86.5

Para el ensaye de los muretes se emplearon los mismos dispositivos que para los muretes sin refuerzo (Figura 42).

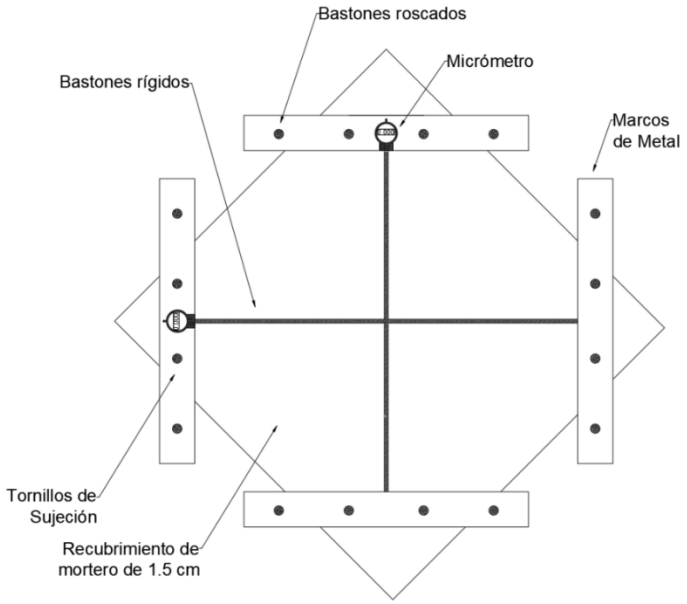


Figura 42. Medidas de los prototipos reforzados (vista frontal).

4.2. Planteamiento del modelo computacional

4.2.1. Planteamiento de micromodelo

4.2.1.1. Materiales

Para el planteamiento del modelo numérico se utilizó el software ANSYS Workbench 2022 en su versión estudiantil, la cual, por la naturaleza del problema, al no requerir de tantos elementos ni mayores complicaciones como geometrías irregulares, cumplía con las especificaciones necesarias.

El primer paso en los modelos fue la calibración de los materiales, de esta forma se aseguró que como unidad cumplieran con las propiedades que se obtuvieron en las pruebas experimentales, para posteriormente ensamblar el conjunto de elementos en un sistema que representara al murete de mampostería.

La primera etapa fue realizar un modelo que representara la prueba a compresión tanto de las piezas de bloque como en los cubos de mortero. En el caso de los modelos del bloque de 12 y 15 cm de espesor, se dimensionaron con las medidas aproximadas de las piezas reales, 40x20x12 cm y 40x20x15 cm, respectivamente. Asimismo, se modelaron 2 cabezales, superior e inferior, para representar las placas de acero utilizadas en la prueba de compresión uniaxial con un espesor de 3 cm. En la Figura 43 se muestran las geometrías de los modelos.

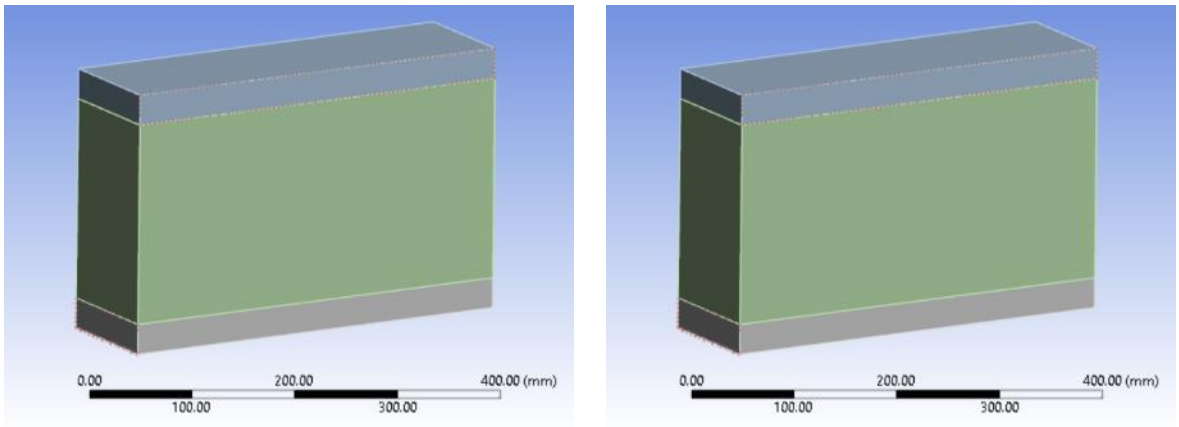


Figura 43. Geometrías en los modelos de bloque de 12 cm (lado izquierdo) y 15 cm (lado derecho).

El tipo de elemento finito que se utilizó para el mallado fue mediante elementos hexaédricos dominantes de orden cuadrático con restricción de degradación a tetraedros, denominados CPT216 en el software, los cuales son compatibles con el modelo de microplano. Las dimensiones de los elementos en el bloque son de 8 cm por lado y de 2 cm de lado para los cabezales de acero como se muestra en la Figura 44.

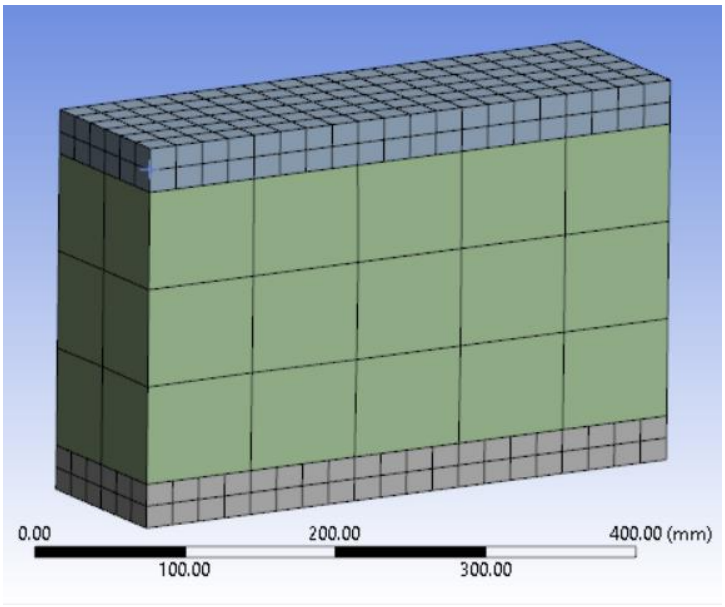


Figura 44. Tipo de mallado en modelos de bloque.

En el caso de las restricciones y condiciones de borde, se colocó un desplazamiento (Figura 45) en la superficie del cabezal superior igual a -2 mm en el eje "Y" y restringiendo el movimiento en los ejes "X" y "Z". Para el cabezal inferior, se colocó una restricción (Figura 46) en la base inferior, restringiendo el movimiento en todos los ejes.

Las propiedades de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 13. Este tipo de variables se encuentran relacionadas con el modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado, y los resultados de cada una fueron calibrados para obtener el comportamiento más aproximado de la gráfica del modelo numérico con el experimental.

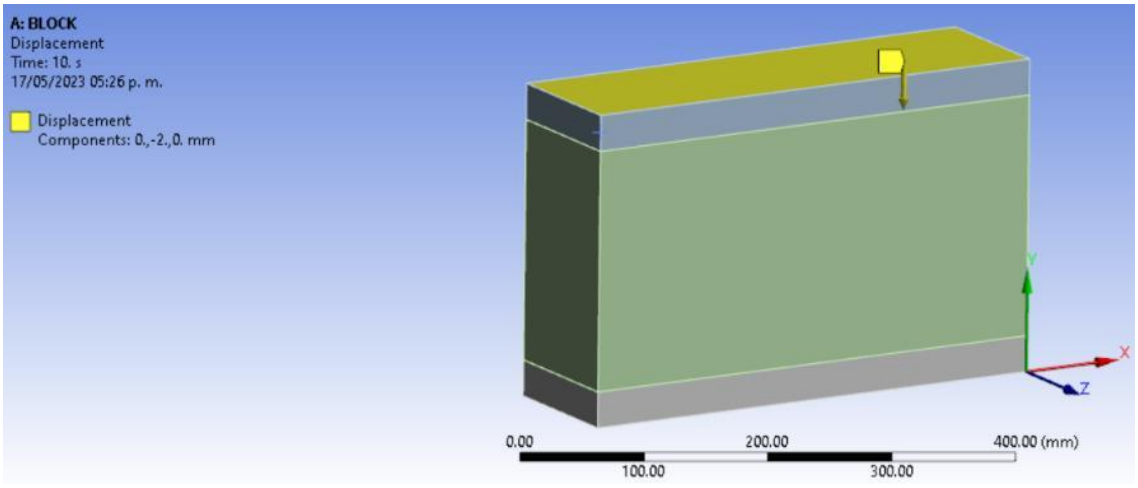


Figura 45. Desplazamiento en cabezal superior.

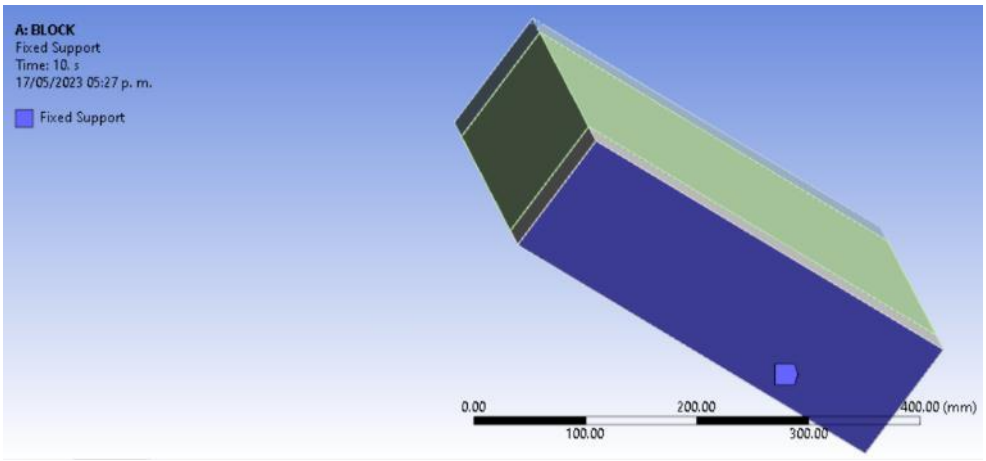


Figura 46. Restricciones de cabezal inferior.

Tabla 13. Propiedades de los materiales del bloque para modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado.

Propiedades del material "Block 12"				
Parametro	***Etapa***	***Simbolo***	***Valor Tipico***	***Unidades***
Esfuerzo uniaxial a compresión	Campo de supericie	f_c	3.39	Mpa
Esfuerzo biaxial a compresión	Campo de supericie	f_b	3.90	Mpa
Esfuerzo uniaxial a tensión	Campo de supericie	f_t	0.34	Mpa
Intersección del campo de compresió	Gorro de compresión	σ_V^c	-2.60	Mpa
Relación del gorro de compresión	Gorro de compresión	R_c	2.00	-
Modulo de Elasticidad	Comportamiento Elastico	E	1500.00	Mpa
Relación de Poisson	Comportamiento Elastico	ν	0.12	-
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	200.00	Mpa^2
Endurecimiento en el gorro de tensió	Endurecimiento	R_T	1.00	Mpa
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{t0}	0.00	-
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{c0}	0.00	-
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	1500.00	-
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	1000.00	-
Rango de parametro no local	No local	c	400.00	mm^2
Rango de parametro no local	No local	m	1.00	-
Propiedades del material "Block 15"				
Parametro	***Etapa***	***Simbolo***	***Valor Tipico***	***Unidades***
Esfuerzo uniaxial a compresión	Campo de supericie	f_c	7.35	Mpa
Esfuerzo biaxial a compresión	Campo de supericie	f_b	8.45	Mpa
Esfuerzo uniaxial a tensión	Campo de supericie	f_t	0.74	Mpa
Intersección del campo de compresió	Gorro de compresión	σ_V^c	-5.64	Mpa
Relación del gorro de compresión	Gorro de compresión	R_c	2.00	-
Modulo de Elasticidad	Comportamiento Elastico	E	1250.00	Mpa
Relación de Poisson	Comportamiento Elastico	ν	0.12	-
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	950.00	Mpa^2
Endurecimiento en el gorro de tensió	Endurecimiento	R_T	1.00	Mpa
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{t0}	0.00	-
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{c0}	0.00	-
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	2250.00	-
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	1500.00	-
Rango de parametro no local	No local	c	400.00	mm^2
Rango de parametro no local	No local	m	3.00	-

En el caso del mortero, la geometría del modelo se realizó lo más parecido a las medidas de los especímenes ensayados. Al igual que en los bloques, se agregaron 2 cabezales, inferior y superior, con espesor de 3 cm. En la Figura 47 se muestra la geometría del modelo.

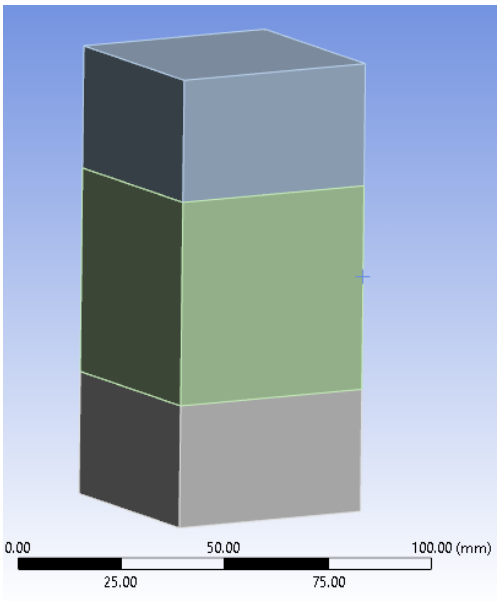


Figura 47. Geometría del modelo de mortero.

Para el tipo de elemento finito, al igual que en los bloques, se utilizaron elementos CPT216. Las dimensiones de los elementos en el cubo de mortero son de 1 cm por lado y de 1.5 cm de lado para los cabezales de acero como se muestra en la Figura 48.

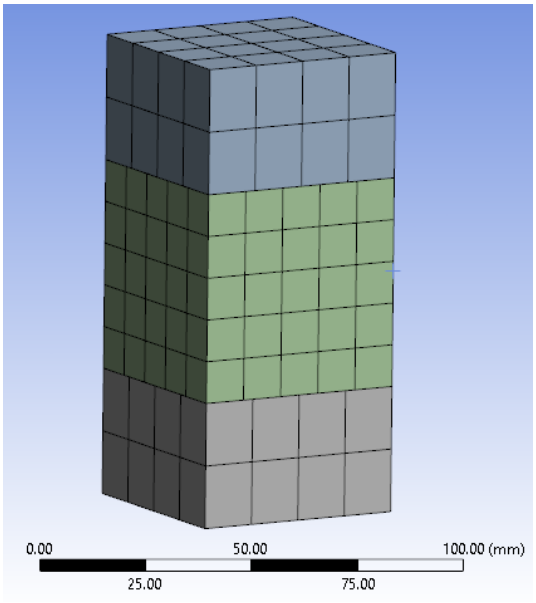


Figura 48. Tipo de malla en cubo de mortero.

En el caso de las restricciones y condiciones de borde, se colocó un desplazamiento (Figura 49) en la superficie del cabezal superior igual a -2 mm en el eje "Y" y restringiendo el movimiento en los ejes "X" y "Z". Para el cabezal inferior, se colocó una restricción (**Figura 50**) en la base inferior, restringiendo el movimiento en todos los ejes.

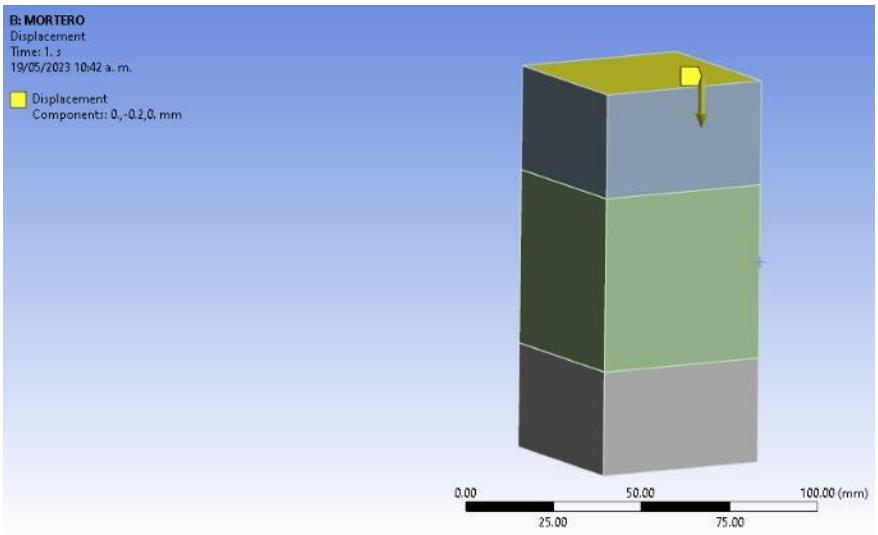


Figura 49. Desplazamiento en cabezal superior.

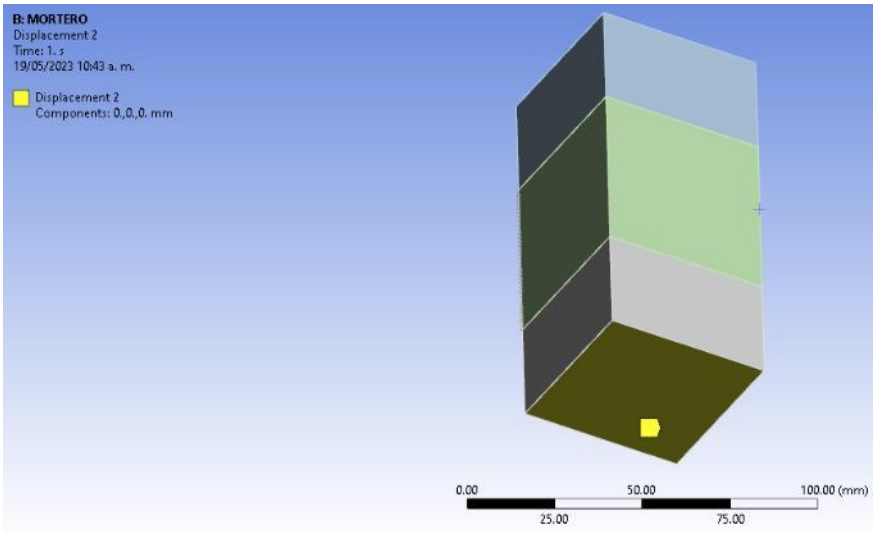


Figura 50. Restricciones de cabezal inferior.

Las propiedades del material utilizadas tanto en las juntas como en el recubrimiento se muestran en la Tabla 14. Cabe mencionar que, para la calibración del material en las juntas se tomó un valor promedio de los resultados experimentales de los especímenes muestra del mortero en pilas y muretes. Asimismo, este tipo de propiedades se encuentran relacionadas

con el modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado, y los resultados fueron calibrados para obtener el comportamiento más aproximado de la gráfica del modelo numérico con el experimental.

Tabla 14. Propiedades del material del mortero para modelo de microplano con daño y plasticidad acoplado.

Propiedades del mortero - juntas				
Parametro	***Etapa***	***Simbolo***	***Valor Tipico***	***Unidades***
Esfuerzo uniaxial a compresión	Campo de supericie	f_c	20.61	Mpa
Esfuerzo biaxial a compresión	Campo de supericie	f_b	23.70	Mpa
Esfuerzo uniaxial a tensión	Campo de supericie	f_t	2.06	Mpa
Intersección del campo de compresió	Gorro de compresión	σ_V^c	-15.80	Mpa
Relación del gorro de compresión	Gorro de compresión	R_c	1.00	-
Modulo de Elasticidad	Comportamiento Elastico	E	5500.00	Mpa
Relación de Poisson	Comportamiento Elastico	v	0.15	-
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	25000.00	Mpa^2
Endurecimiento en el gorro de tensió	Endurecimiento	R_T	1.00	Mpa
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{t0}	0.00	-
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{c0}	0.00	-
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	1500.00	-
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	1000.00	-
Rango de parametro no local	No local	c	400.00	mm^2
Rango de parametro no local	No local	m	3.00	-
Propiedades del mortero - recubrimiento				
Parametro	***Etapa***	***Simbolo***	***Valor Tipico***	***Unidades***
Esfuerzo uniaxial a compresión	Campo de supericie	f_c	27.36	Mpa
Esfuerzo biaxial a compresión	Campo de supericie	f_b	31.46	Mpa
Esfuerzo uniaxial a tensión	Campo de supericie	f_t	2.74	Mpa
Intersección del campo de compresió	Gorro de compresión	σ_V^c	-20.98	Mpa
Relación del gorro de compresión	Gorro de compresión	R_c	2.00	-
Modulo de Elasticidad	Comportamiento Elastico	E	6500.00	Mpa
Relación de Poisson	Comportamiento Elastico	v	0.15	-
Constante de endurecimiento	Endurecimiento	D	58000.00	Mpa^2
Endurecimiento en el gorro de tensió	Endurecimiento	R_T	1.00	Mpa
Umbral de daño por tensión	Daño	γ_{t0}	0.00	-
Umbral de daño por compresión	Daño	γ_{c0}	0.00	-
Evolución del daño por tensión	Daño	β_t	3750.00	-
Evolución del daño por compresión	Daño	β_c	1000.00	-
Rango de parametro no local	No local	c	400.00	mm^2
Rango de parametro no local	No local	m	3.00	-

4.2.1.2. Pilas

Para el caso de los modelos de las pilas, una vez que los materiales se encontraban calibrados, se procedió al ensamble de ambos. El primer paso fue realizar las geometrías que

conformarían las pilas a través de 3 piezas de bloque unidas por medio de mortero, el cual tiene un espesor de 1.5 cm. Además, en este caso no se consideraron los cabezales de acero que se utilizaron en los materiales, con el fin de que el postproceso del modelo numérico fuese más rápido. La geometría de la pila se muestra en la Figura 51.

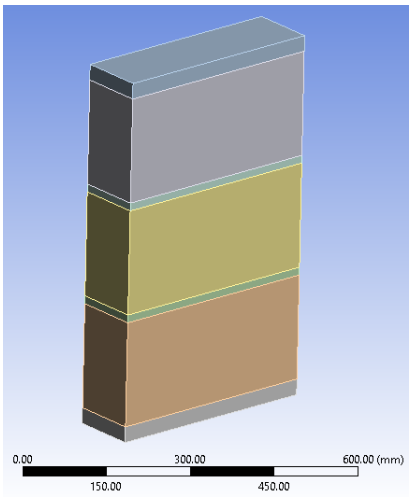


Figura 51. Geometría del modelo de mortero.

Por otra parte, se consideraron contactos tipo "Bonded" con un comportamiento simétrico (Figura 52). Al mismo tiempo, se estableció un modelo de zona cohesiva CZM, el cual representa la unión de las piezas de bloque con el mortero. Las características de esta CZM se encuentran en la Tabla 15.

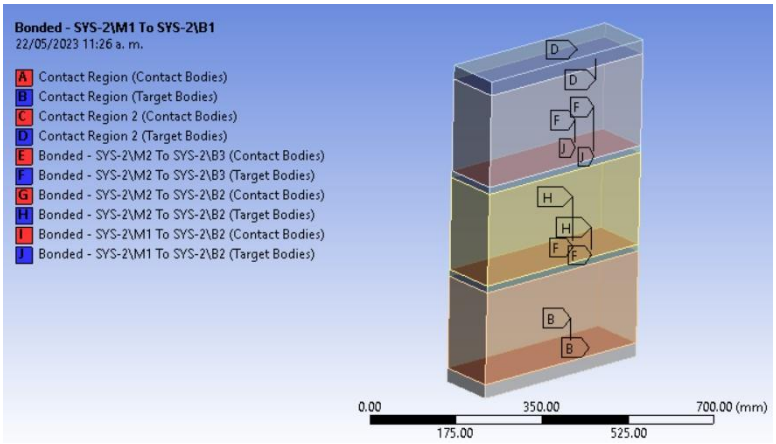


Figura 52. Configuración de contactos en pila.

Tabla 15. Parámetros del modelo de zona cohesiva (CZM).

Parametros modelo de zona cohesiva (CZM)			
$F_{xt}\ (Mpa)$	$G_f^I (N/m)$	$\tau_{max}\ (Mpa)$	$G_f^{II} (N/m)$
0.294	12.25	0.46	16.63

Al igual que en los materiales, se utilizaron elementos CPT216. Las dimensiones de los elementos en el bloque son de 4 cm por lado y para el mortero se consideraron elementos de 1.5 cm por lado (Figura 53).

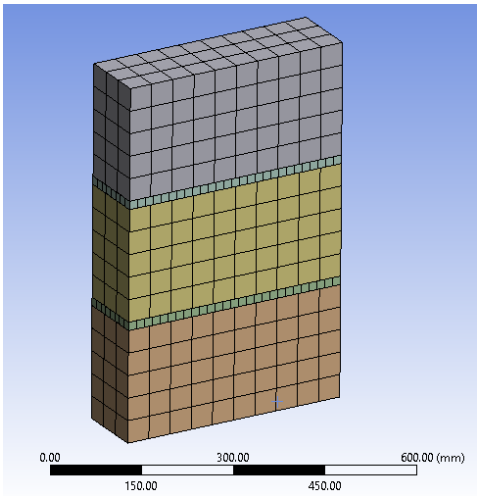


Figura 53. Tipo de mallado en elemento pila.

Para el caso de las restricciones y condiciones de borde, se colocó un desplazamiento (Figura 54) en la superficie superior de la pila igual a -0.66 mm en el eje "Y" y restringiendo el movimiento en los ejes "X" y "Z". Para la parte inferior, se colocó una restricción (Figura 55) evitando el movimiento en todos los ejes.

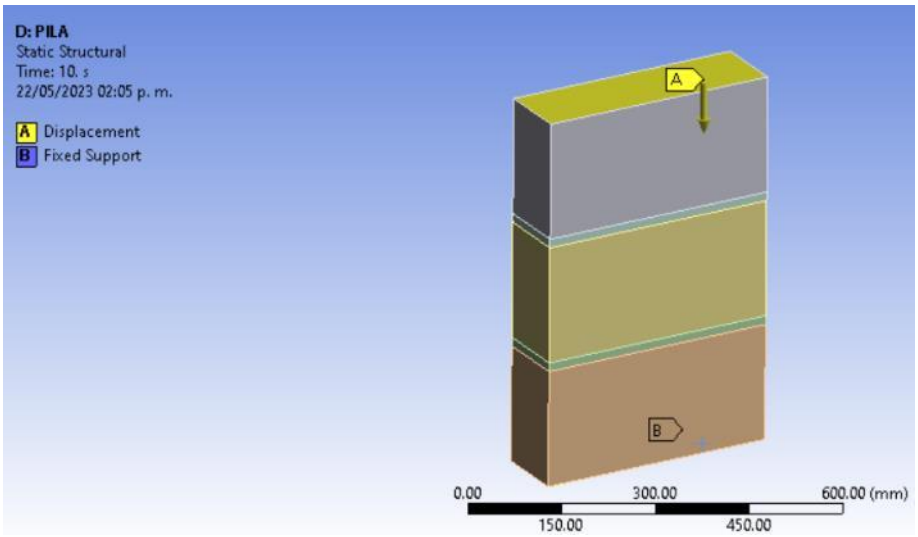


Figura 54. Desplazamiento en parte superior de la pila.

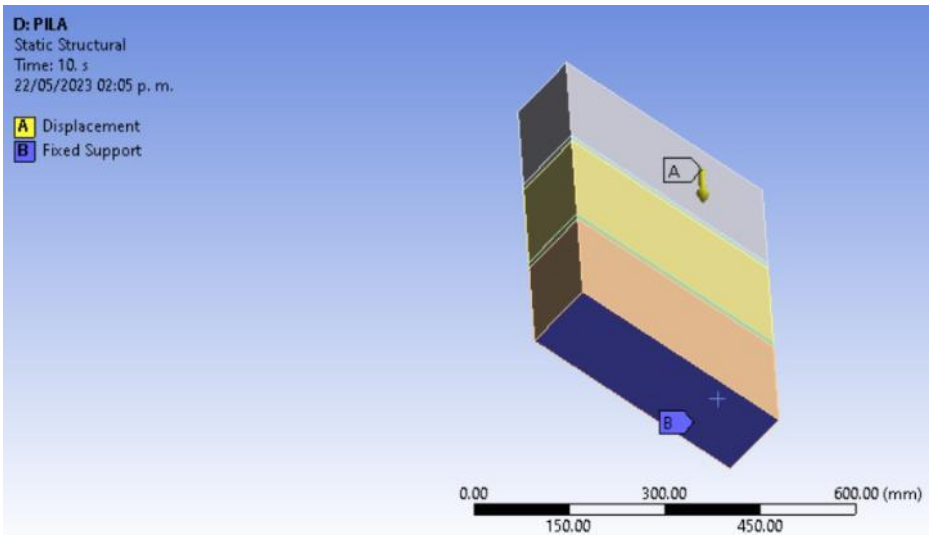


Figura 55. Restricción en la parte inferior de la pila.

4.2.1.3. Murete sin refuerzo

Al igual que las pilas, los modelos de los muretes se plantearon una vez se encontraban calibrados los materiales. El modelo numérico del murete está representado mediante la unión de 3 piezas completas y 3 medias piezas de bloque, unidas por una junta de mortero con un espesor de 1.5 cm. Igualmente que, en las pilas, en este modelo no se consideraron los cabezales de acero del experimento para ahorrar recurso computacional en la fase del postproceso. La geometría del murete se muestra en la Figura 56 .

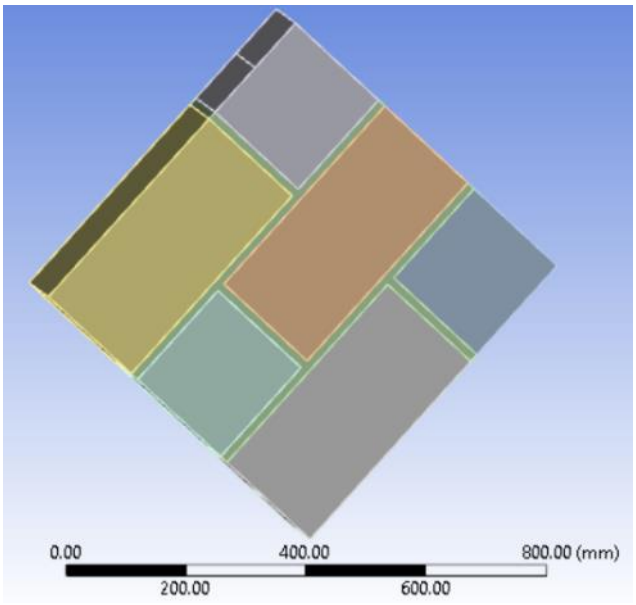


Figura 56. Geometría del modelo del murete sin refuerzo.

De la misma forma que en el modelo de pila, se consideraron contactos tipo "Bonded" con un comportamiento simétrico (Figura 57). De igual manera, se estableció un modelo de zona cohesiva CZM, el cual representa la unión de las piezas de bloque con el mortero. Las características de esta CZM son las mimas que se utilizaron en el modelo de la pila.

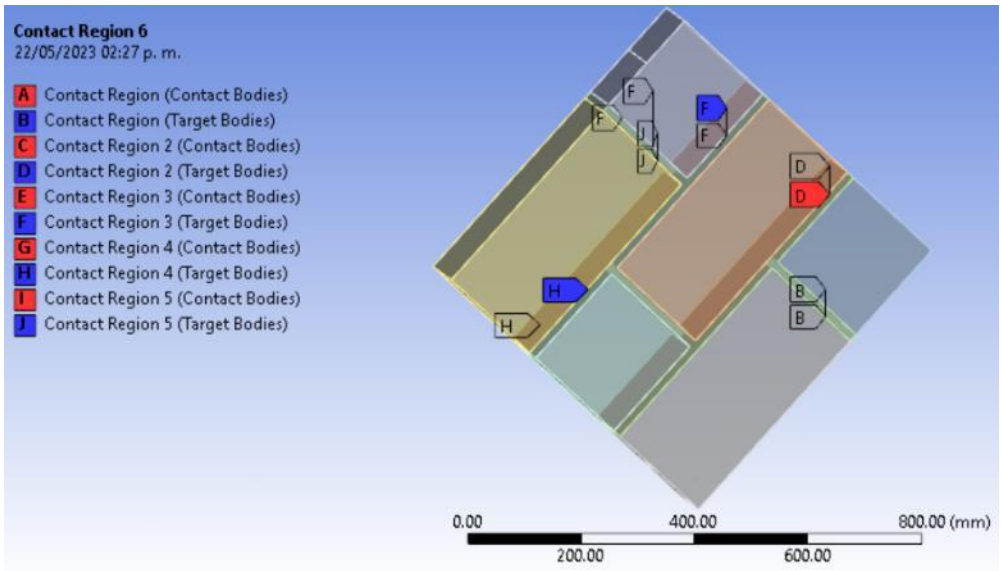


Figura 57. Configuración de los contactos en murete sin refuerzo.

Las dimensiones de los elementos en el bloque son de 14 cm por lado y para el mortero se consideraron elementos de 1.5 cm por lado (Figura 58).

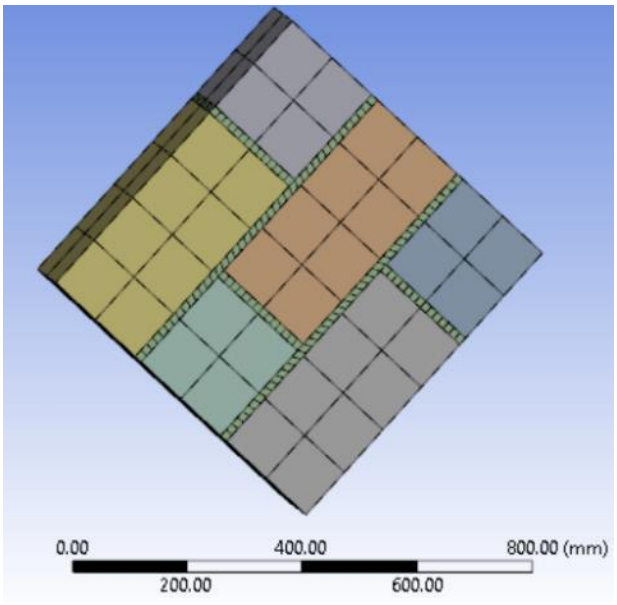


Figura 58. Tipo de mallado en murete sin refuerzo.

Para el caso de las restricciones y condiciones de borde, se colocó un desplazamiento (Figura 59) en la superficie superior del murete igual a -0.2204 mm en el eje "Y" y restringiendo el movimiento en los ejes "X" y "Z". Para la parte inferior, se colocó una restricción (Figura 60) evitando el movimiento en todos los ejes.

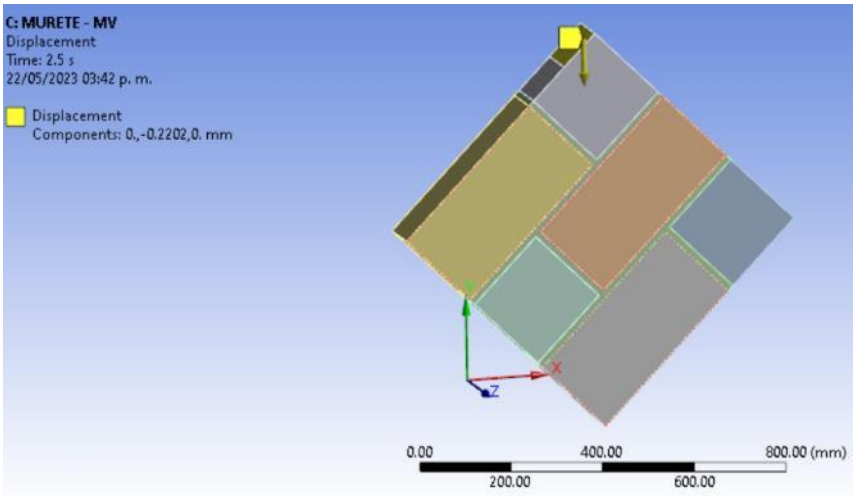


Figura 59. Desplazamiento en parte superior del murete.

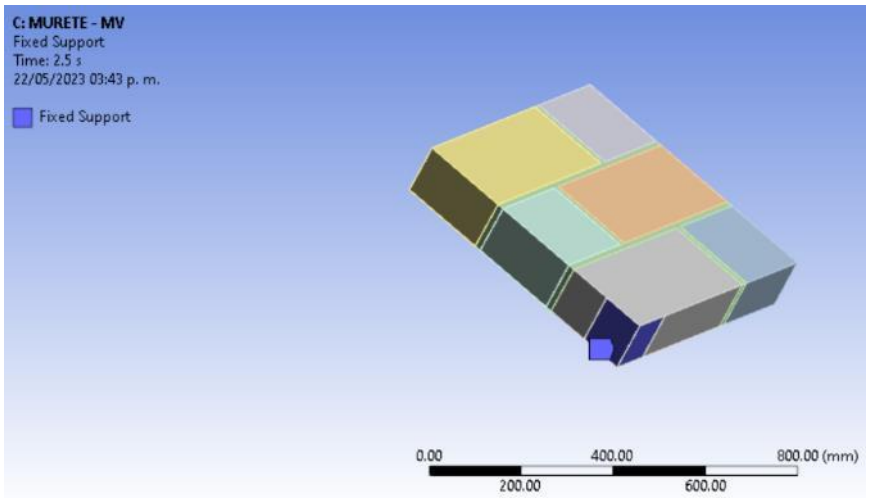
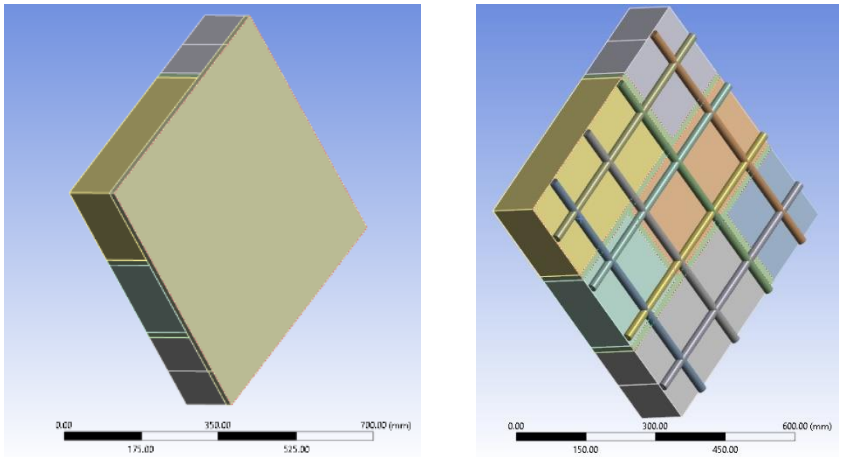


Figura 60. Restricción en la parte inferior del murete.

4.2.1.4. Murete con refuerzo

Los modelos de los muretes con refuerzo se plantearon una vez que se encontraban calibrados los modelos anteriormente mencionados. El modelo numérico del murete con refuerzo comparte la misma geometría que el murete sin refuerzo, solo que, en este caso se colocaron elementos que representarían el acero de refuerzo (malla electrosoldada 6-6/10-10) y el recubrimiento de mortero de 3 cm. Igualmente que en los modelos de pila y murete sin refuerzo, en este modelo no se consideraron los cabezales de acero del experimento para ahorrar un poco de recurso computacional en la fase del postproceso. La geometría del murete se muestra en la Figura 61.



a) b)

Figura 61. Geometría del modelo del murete con refuerzo, mostrado con: a) recubrimiento y b) sin el recubrimiento.

Las características de los contactos entre las piezas y la junta de mortero (Figura 62) son las mismas que se emplearon en el murete sin refuerzo. Por otra parte, el contacto que se utilizó entre el recubrimiento de mortero y la cara del murete se planteó tipo "Bonded", sin embargo, en este contacto no se propuso un CZM. En el caso de la malla metálica se utilizaron elementos línea con la geometría del material, así como la propiedad llamada "Reinforced".

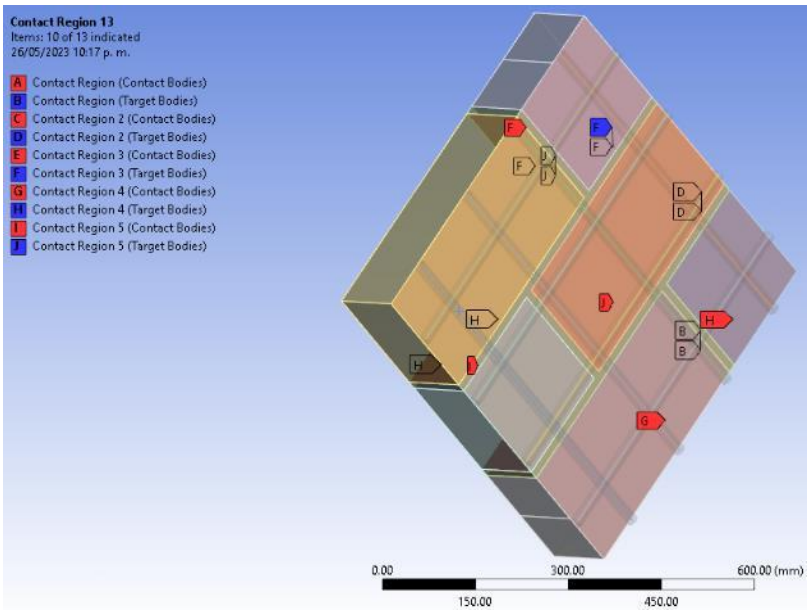
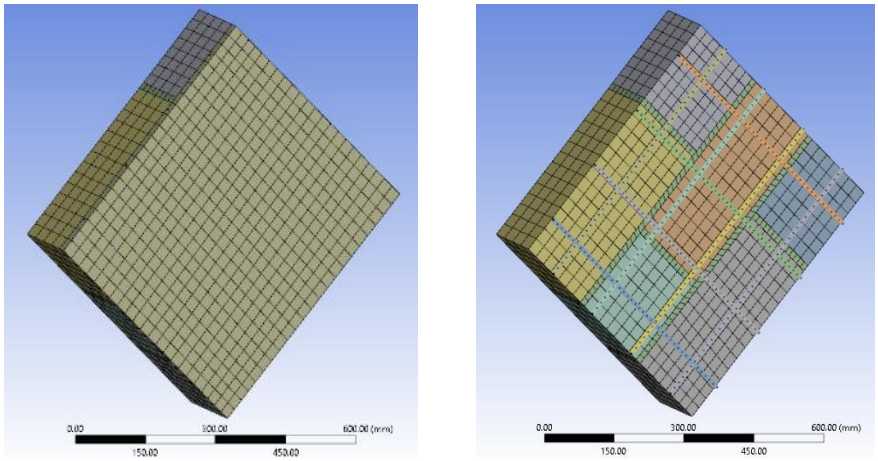


Figura 62. Configuración de los contactos en murete sin refuerzo.

Las dimensiones de los elementos son las mismas que en el modelo no reforzado, adicionando a este los elementos que corresponden al recubrimiento y a la malla (Figura 63).



a) b)

Figura 63. Tipo de mallado en murete con refuerzo, mostrado con el a) recubrimiento y b) sin el recubrimiento.

Para el caso de las restricciones y condiciones de borde, se colocó un desplazamiento (Figura 64) en la superficie superior del murete igual a -0.3 mm en el eje "Y" y restringiendo el movimiento en los ejes "X" y "Z". Para la parte inferior, se colocó una restricción (Figura 65) evitando el movimiento en todos los ejes.

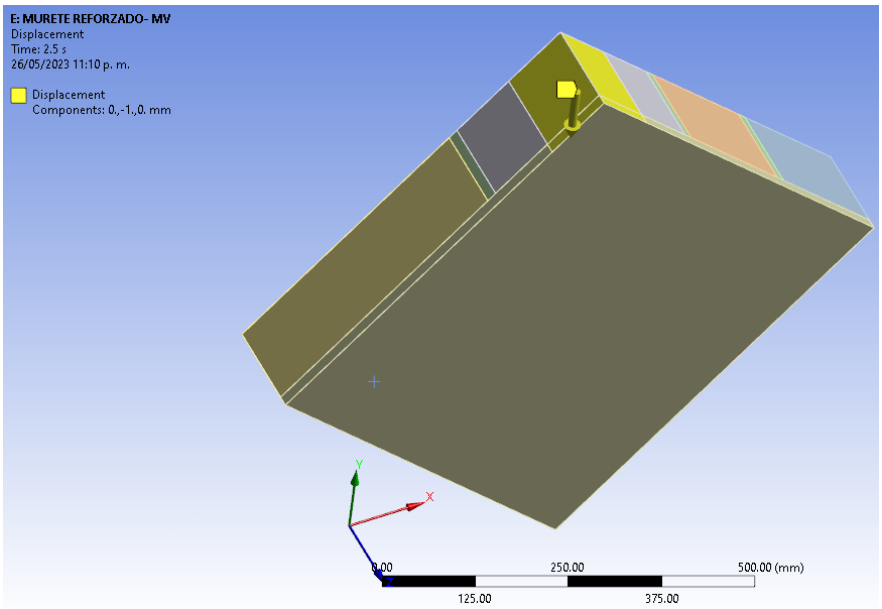


Figura 64. Desplazamiento en parte superior del murete con refuerzo.

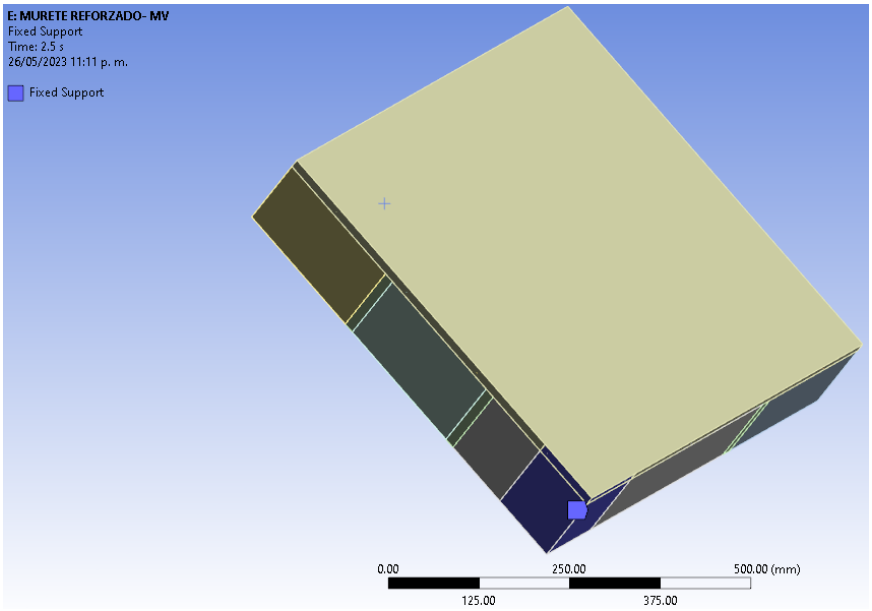


Figura 65. Restricción en la parte inferior del murete con refuerzo.

4.3 Determinación de bondad de ajuste del modelo

4.3.1 Clasificación y obtención de datos de la distribución observada

El primer paso, una vez que se obtuvieron los datos de las corridas experimentales, fue ordenar los datos para poder realizar una interpolación de estos, con el fin de obtener un promedio general que posteriormente fue sometido a una regresión lineal, generando así, la ecuación que representara el comportamiento de las frecuencias observadas.

En la Tabla 16 se muestran los valores obtenidos mediante una interpolación de los datos experimentales para cada corrida de muretes reforzados y para cada suposición de carga aplicada, para el caso de los muretes reforzados con piezas de Veracruz (12 cm) "M-VR" se consideró un caso de carga en múltiplos de 3 hasta el valor máximo promedio alcanzado en las corridas y para el caso de los muretes reforzados con piezas de Querétaro (15 cm) "M-QR" se consideró un caso de carga en múltiplos de 5 hasta el valor máximo promedio alcanzado en cada corrida. Asimismo, se agregó una columna con el promedio de las interpolaciones para cada caso de carga aplicada.

Tabla 16. Datos promedio para cada caso de carga en muretes reforzados a) M-QR (15 cm)

b) M-VR (12 cm)

Muretes reforzados con block de Querétaro (M-VR)				M-VR (PROMEDIO)
Carga Aplicada	**M1-QR**	**M2-QR**	**M3-QR**	
(KN)	**Desplazamiento eje "Y"(mm)**			**Desplazamiento eje "Y" (mm)**
5	0.0305	0.0301	0.0039	0.0215
10	0.0320	0.0328	0.0040	0.0229
15	0.0516	0.1184	0.0294	0.0665
20	0.0540	0.0460	0.0330	0.0443
25	0.0540	0.0460	0.0330	0.0443
30	0.0662	0.0460	0.0330	0.0484
35	0.0734	0.0460	0.0330	0.0508
40	0.0890	0.0460	0.0330	0.0560
45	0.0910	0.0610	0.0330	0.0617
50	0.0930	0.0620	0.0330	0.0627
55	0.0970	0.0620	0.0330	0.0640
60	0.1014	0.0620	0.0330	0.0655
65	0.1050	0.0620	0.0330	0.0667
70	0.1090	0.0620	0.0330	0.0680
75	0.1130	0.0620	0.0330	0.0693
80	0.1159	0.0620	0.0330	0.0703
85	0.1230	0.0620	0.0330	0.0727
90	0.1231	0.0620	0.0330	0.0727
95	0.1250	0.0650	0.0330	0.0743
100	0.1270	0.0707	0.0330	0.0769
105	0.1270	0.0777	0.0330	0.0792
110	0.1270	0.0830	0.0330	0.0810
115	0.1270	0.0850	0.1168	0.1096
120	0.1270	0.0860	0.1349	0.1160
125	0.1270	0.1053	0.1505	0.1276
130	0.1310	0.1826	0.1679	0.1605
135	0.1310	0.3179	0.1820	0.2103
140	0.5158	0.4532	0.2055	0.3915

a)

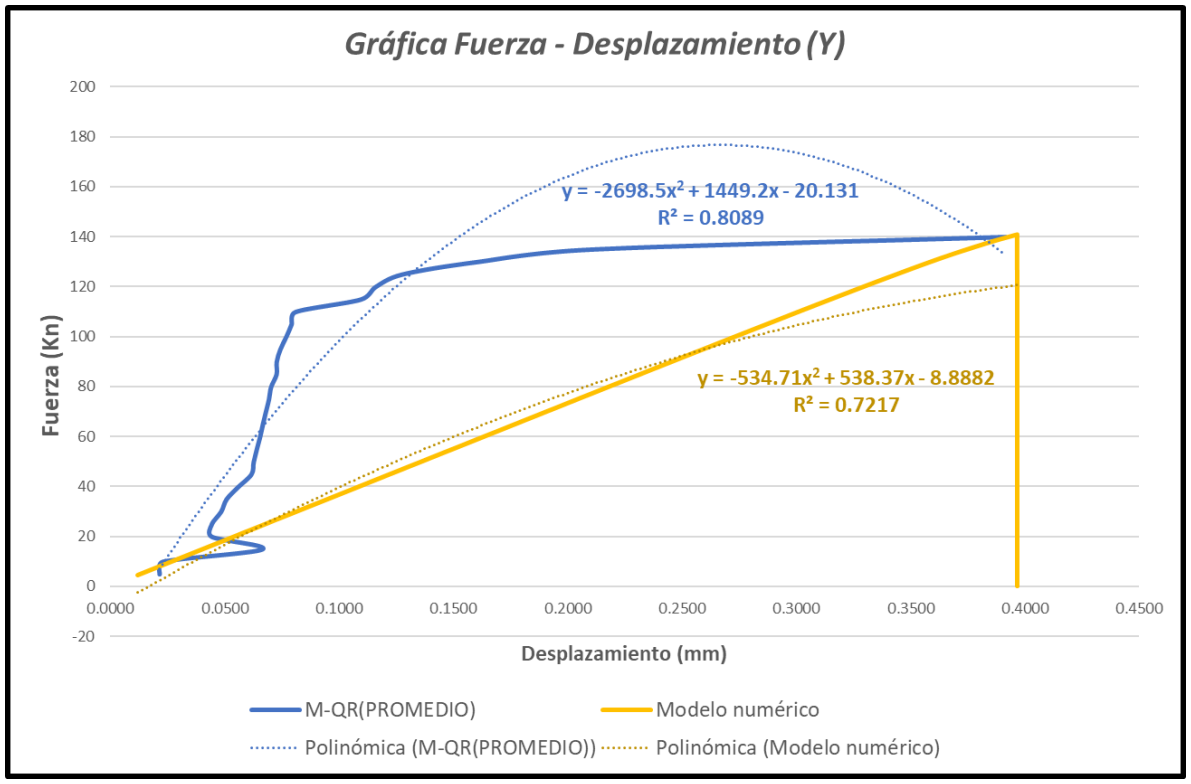
Muretes reforzados con block de Veracruz (M-VR)				M-VR (PROMEDIO)
Carga Aplicada	**M1-VR**	**M2-VR**	**M3-VR**	
(KN)	**Desplazamiento eje "Y"(mm)**			**Desplazamiento eje "Y" (mm)**
3	0.0158	0.0420	0.0149	0.0242
6	0.0174	0.0490	0.0146	0.0270
9	0.0320	0.0674	0.0283	0.0426
12	0.0340	0.0881	0.0534	0.0585
15	0.0440	0.1102	0.0580	0.0707
18	0.0642	0.1190	0.0762	0.0864
21	0.0650	0.1200	0.0770	0.0873
24	0.0650	0.1200	0.0816	0.0889
27	0.0721	0.1222	0.0904	0.0949
30	0.0762	0.1292	0.1086	0.1047
33	0.0809	0.1340	0.1169	0.1106
36	0.0920	0.1353	0.1210	0.1161
39	0.0990	0.1394	0.1244	0.1209
42	0.0993	0.1461	0.1280	0.1245
45	0.1058	0.1514	0.1338	0.1303
48	0.1078	0.1548	0.1421	0.1349
51	0.1110	0.1591	0.1464	0.1388
54	0.1125	0.1659	0.2418	0.1734
57	0.1204	0.1724	0.2547	0.1825
60	0.1250	0.1798	0.2626	0.1891
63	0.1250	0.1896	0.2646	0.1930
66	0.1247	0.2033	0.2650	0.1977
69	0.1039	0.2248	0.2650	0.1979
72	0.0892	0.2577	0.2650	0.2040
75	0.0703	0.2680	0.2800	0.2061
78	0.0481	0.2782	0.3462	0.2242
81	0.0312	0.3012	0.5550	0.2958

b)

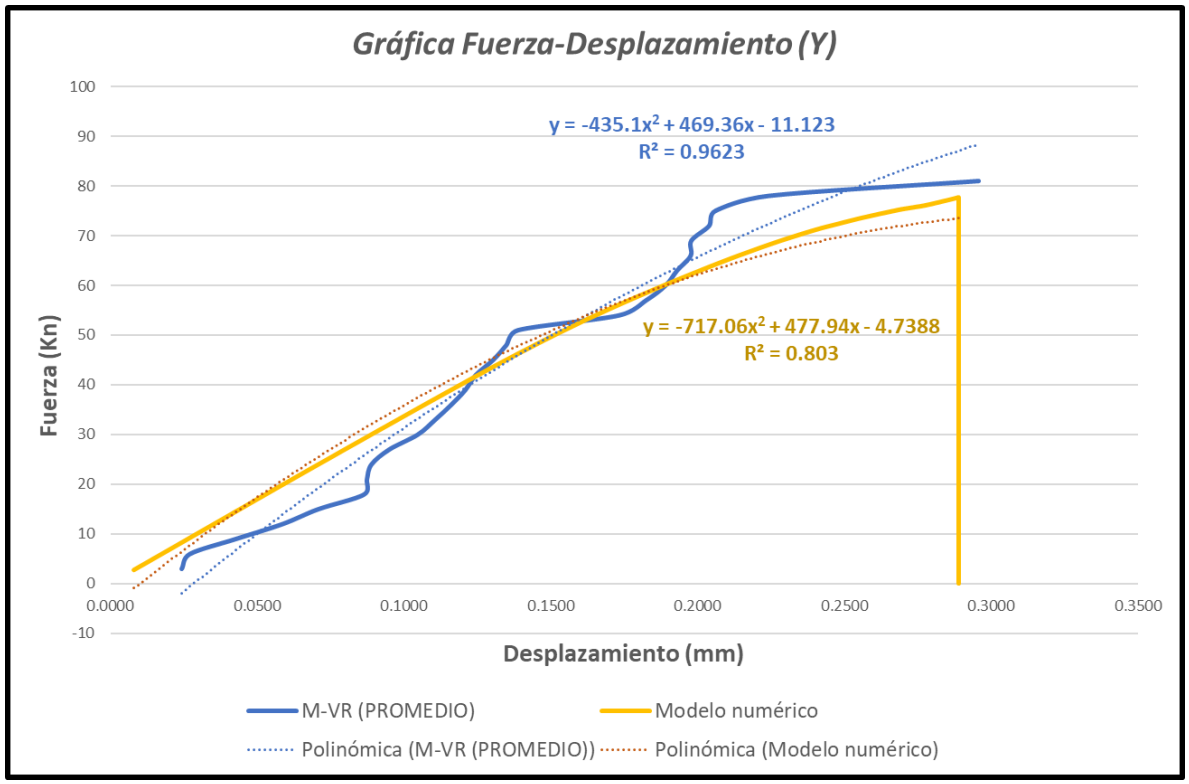
4.3.2 Regresión polinómica y bondad de ajuste

Para poder determinar la bondad de ajuste del modelo y saber que tan apegado se encuentra el modelo numérico del modelo experimental, fue necesario realizar un estadístico de prueba. En este caso se optó por la realización de una prueba chi-cuadrada, sin embargo, para poder realizar el estadístico de prueba, el primer paso fue generar una regresión polinómica de segundo grado mediante los datos promedios obtenidos para cada uno de los blocks y el modelo numérico propuesto.

En la **Figura 66** se muestran las gráficas generadas mediante los datos de las partidas experimentales como del modelo numérico, además se muestran las ecuaciones generadas para cada una de las regresiones polinómicas de segundo grado.



a)



b)

Figura 66. Graficas fuerza – desplazamiento de las frecuencias observadas y esperadas con su respectiva regresión polinómica de segundo grado a) M-QR b) M-VR

Una vez que se obtuvieron las ecuaciones polinómicas para cada una de las distribuciones, se pudieron generar los datos de las frecuencias observadas y de las frecuencias esperadas, para así, finalmente aplicar el procedimiento del estadístico de prueba Chi-cuadrada.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería

5.1.1 Análisis de los materiales

5.1.1.1 Bloques de concreto

Los resultados de los ensayes llevados a cabo para obtener las resistencias a la compresión de las piezas se muestran en la Tabla 17. El promedio de resistencia a la compresión para las piezas de 15 cm fue de 68.56 kg/cm^2, por otra parte, el promedio de resistencia de las piezas de 12 cm fue de 34.64 kg/cm^2.

Tabla 17. Resultados de la resistencia a la compresión de las piezas.

Materiales "Steel Constructions"						
Espécimen (15 cm)	Dimensiones (cm)			Área Bruta (cm2)	Carga Máx. Aplicada (kg)	Resistenicia (kg/cm^2)
	Largo	Ancho	Altura			
1	39.6	14.5	20.2	574.2	44618.8	77.71
2	39.9	14.7	19.7	586.53	42538.79	72.53
3	39.8	15	20.2	597	34199.34	57.29
4	39.9	14.8	19.9	590.52	38018.39	64.38
5	39.9	15	19.6	598.5	42451.64	70.93
Fábrica "Industrial Blockera"						
Espécimen (12 cm)	Dimensiones (cm)			Área Bruta (cm2)	Carga Máx. Aplicada (kg)	Resistenicia (kg/cm^2)
	Largo	Ancho	Altura			
1	39.7	11.8	19.7	468.46	17340	37.01
2	39.5	11.8	19	466.1	16100	34.54
3	38.4	11.9	19.5	456.96	16390	35.87
4	39.4	11.9	19	468.86	14620	31.18
5	39.7	11.9	19.1	472.43	16360	34.63

Esto muestra que las piezas obtenidas en Querétaro son entre un 50 – 60% más resistentes que las piezas del estado de Veracruz. Asimismo, las variaciones entre los resultados de los

2 tipos de bloques muestran que el del estado de Veracruz, a pesar de ser menos resistente mantiene un menor coeficiente de variación.

5.1.1.2 Cubos de Mortero

Los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión en los cubos de mortero se muestran en la Tabla 18. La resistencia promedio para el mortero que se usó como junta en las pilas es de 237.52 kg/cm^2, para el mortero que sirvió como junta en los muretes sin refuerzo fue de 191.25 kg/cm^2, para el mortero de los muretes reforzados fue de 202.03 kg/cm^2 y para el mortero de recubrimiento para los muretes fue de 279.99 kg/cm^2.

Tabla 18. Resultados de la resistencia a la compresión del mortero en pilas y muretes.

Mortero en pilas					
Cubo	Dimensiones (cm)		Área Bruta (cm2)	Carga Máx. Aplicada (kg)	Resistenicia (kg/cm^2)
	Lado 1	Lado 2			
PM-1	5.14	5.07	26.0598	5928.5358	227.497
PM-2	5.09	5.05	25.7045	6099.8454	237.307
PM-3	5.05	5.09	25.7045	6369.0462	247.779
Mortero en muretes sin refuerzo					
MM-1	5.1	5.08	25.908	5098.5	196.792
MM-2	5.04	5.09	25.6536	4551.9408	177.439
MM-3	5.09	5.05	25.7045	5129.091	199.541
Mortero en muretes con refuerzo					
MMR-1	5.01	5.06	25.3506	5510	217.352
MMR-2	5.08	5.02	25.5016	4220	165.480
MMR-3	5.05	5.1	25.755	5750	223.258
Mortero de recubrimiento en muretes reforzados					
MMRC-1	5.11	5.01	25.6011	7110	277.722
MMRC-2	5.03	5.07	25.5021	7320	287.035
MMRC-3	5.05	5.04	25.452	7005	275.224

Comparando los promedios de las 4 mezclas, se puede observar que la que menor resistencia obtuvo fue la correspondiente a las juntas del murete. Asimismo, la que obtuvo un mayor promedio en las pruebas fue la que pertenece a la mezcla del recubrimiento. Comparando estos 2 valores se observa que el promedio más alto es un 68.30% mayor que el promedio más bajo.

5.1.2 Ensaye de pilas

Los patrones de fallas en las pilas mayormente fueron de tipo por agrietamiento vertical, sin embargo, también se muestran algunas fallas por aplastamiento local de piezas en el caso de las pilas conformadas por piezas de 12 cm.

En las Figuras 65 y 66 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de las pilas ensayadas. Asimismo, se muestra un breve resumen de los 2 grupos ensayados (P-Q para las pilas referentes al bloque de Querétaro y "P-V" para las pilas referentes al bloque de Veracruz).

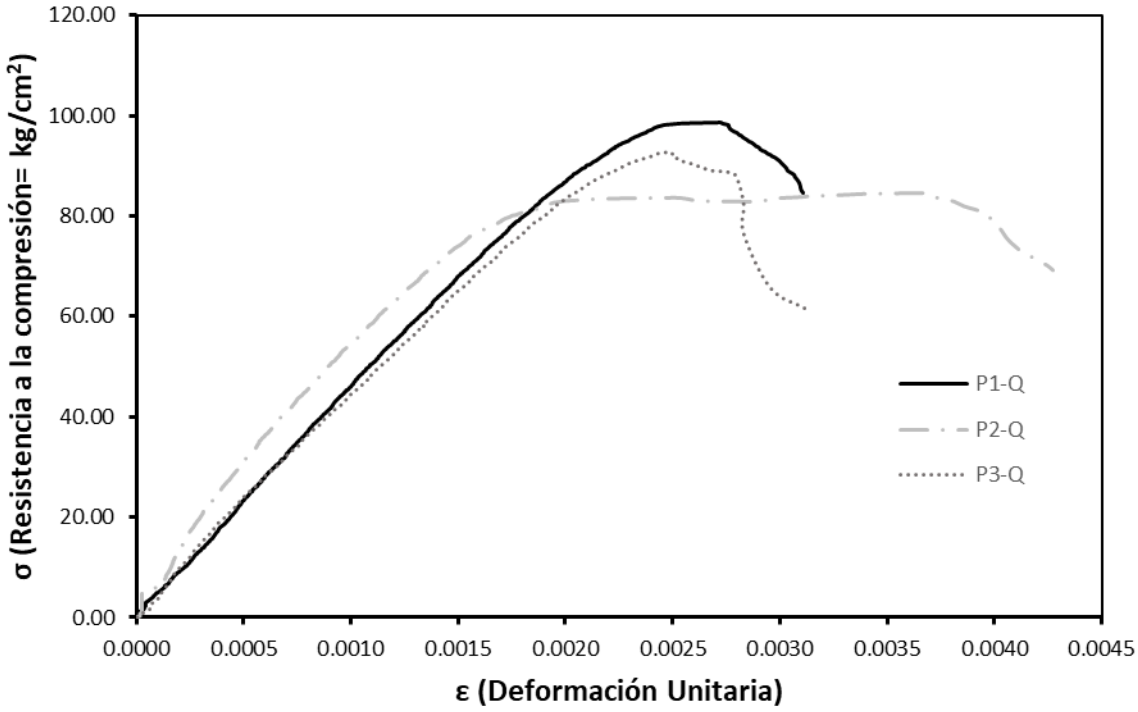


Figura 67. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos P-Q.

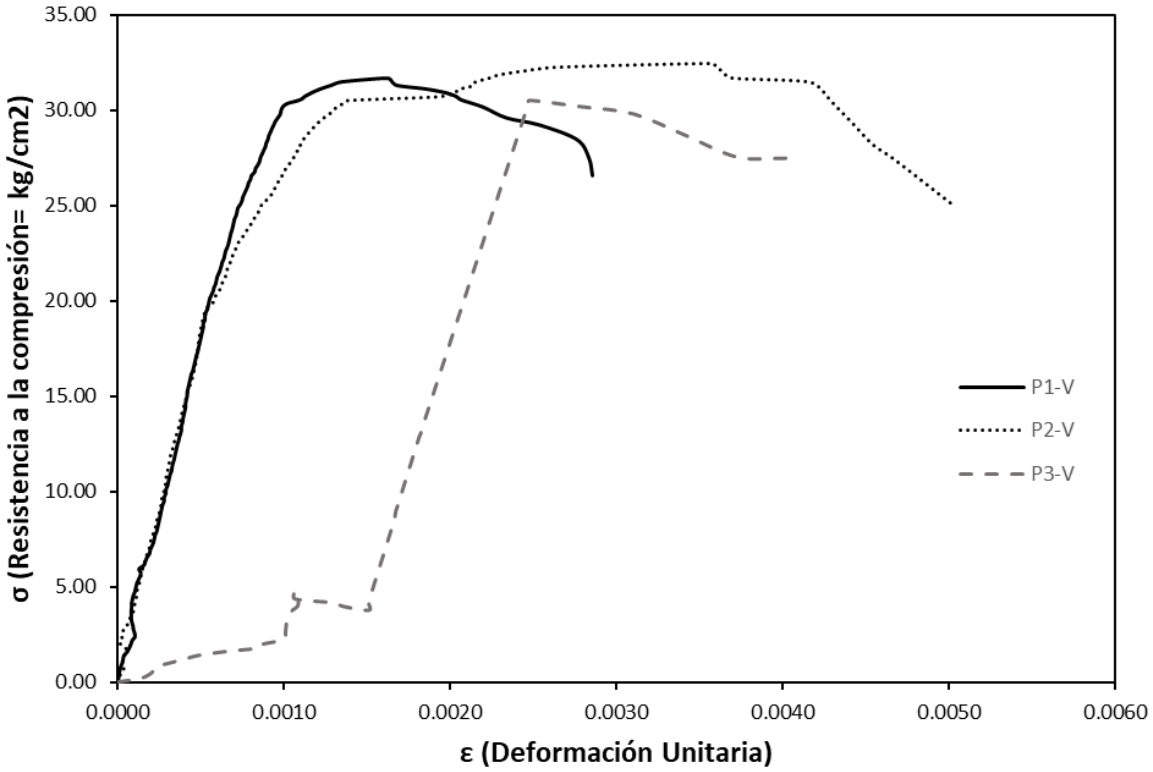


Figura 68. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos P-V.

Tabla 19. Resumen de resultados de la resistencia a la compresión de las pilas en los grupos P-Q y P-V.

RESUMEN (P-Q)		
Pmáx Prom.	51862.62	kg
fm Prom.	91.98	kg/cm^2
δc (mm)	1.23	mm
Em Prom.	44874.71	kg/cm^2
RESUMEN (P-V)		
Pmáx Prom.	14391.03	kg
fm Prom.	31.58	kg/cm^2
δc (mm)	1.03	mm
Em Prom.	39085.23	kg/cm^2

En las gráficas esfuerzo – deformación (Figuras 65 y 66) se puede ver que las pilas construidas con el material de la región de Querétaro, presenta una resistencia a la

compresión promedio de 91.98 kg/cm^2. Asimismo, en la gráfica esfuerzo – deformación se puede obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, dando como resultado un promedio de 44874.71 kg/cm^2. Por otra parte, el prototipo P-V (Veracruz), mostró resultados más bajos, obteniendo un promedio de resistencia a la compresión de 31.58 kg/cm^2 y con un módulo de elasticidad promedio de 39 085.23 kg/cm^2. Por lo que se puede observar que los módulos de elasticidad obtenidos a través de los ensayes de pilas muestran como las piezas de 12 cm presentan un menor módulo de elasticidad que las piezas de 15 cm, resultando en una mayor deformación con relación al esfuerzo.

En las Figuras 67 y 68 se observan las grietas de falla en cada una de las pilas. La mayoría de las grietas presentadas durante la prueba fueron de tipo vertical, sin embargo, en la pila 2-V se mostró una grieta que se propone por aplastamiento de la pieza.



Figura 69. Prototipos P-Q sometidos a compresión.



Figura 70. Prototipos P-V sometidos a compresión.

5.1.3 Ensaye de muretes

5.1.3.1 Muretes sin refuerzo

En las Figuras 69 y 70 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión diagonal en muretes sin refuerzo de acero ensayados. Asimismo, se muestra un breve resumen de los 2 grupos ensayados (Tabla 20). Se observa un breve resumen en las características de cada

grupo, para el grupo M-Q el cortante promedio fue de 7.98 kg/cm^2 y con la gráfica esfuerzo – deformación se genera un módulo de cortante promedio de 8 179.00 kg/cm^2. Para el caso del grupo M-V el promedio en resistencia a la cortante fue de 4.06 kg/cm^2 y un módulo de cortante promedio de 4 727.71 kg/cm^2.

Los resultados de las gráficas esfuerzo – deformación muestran un desplazamiento mayor en los ensayes con piezas de 12 cm debido a un menor módulo de elasticidad que las piezas de 15 cm. Por otra parte, se muestra una abrupta perdida del esfuerzo una vez que se alcanza su resistencia máxima, esto para ambos casos.

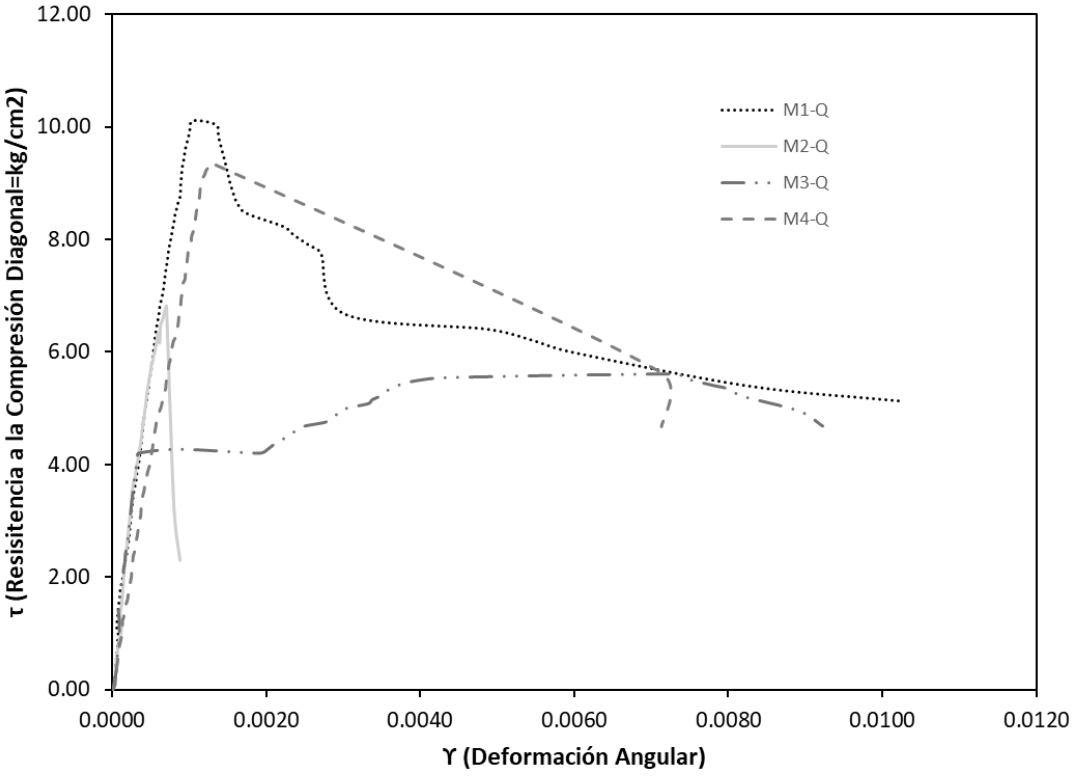


Figura 71. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-Q

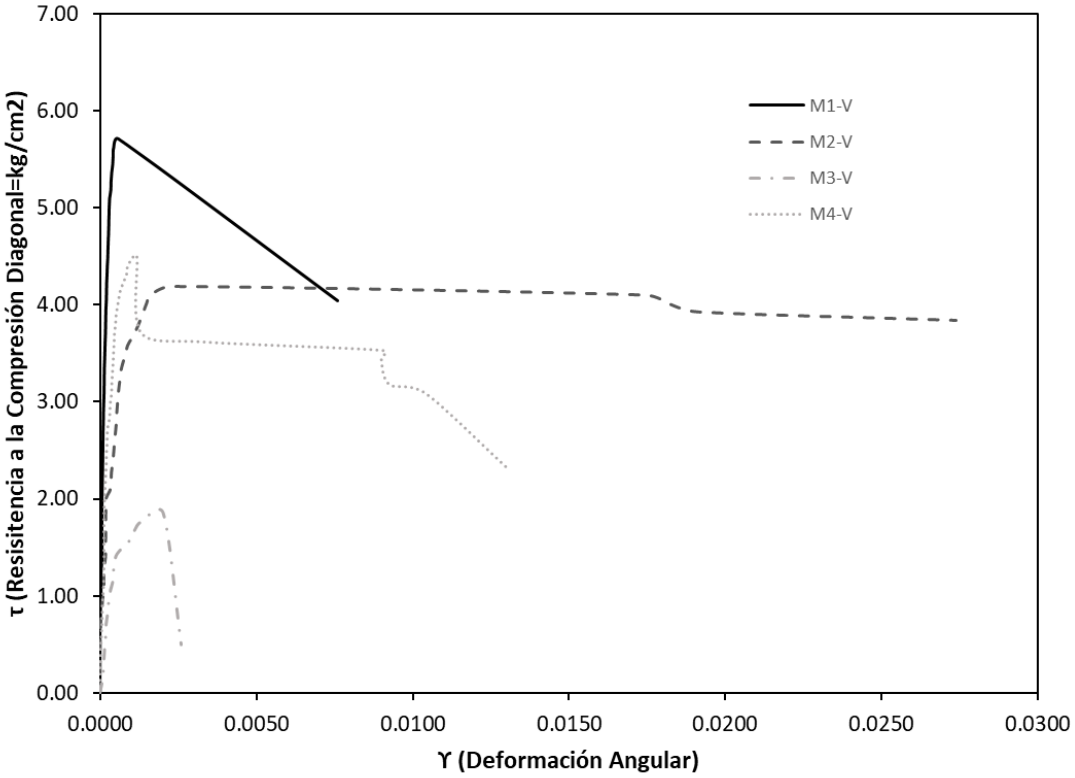


Figura 72. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-V

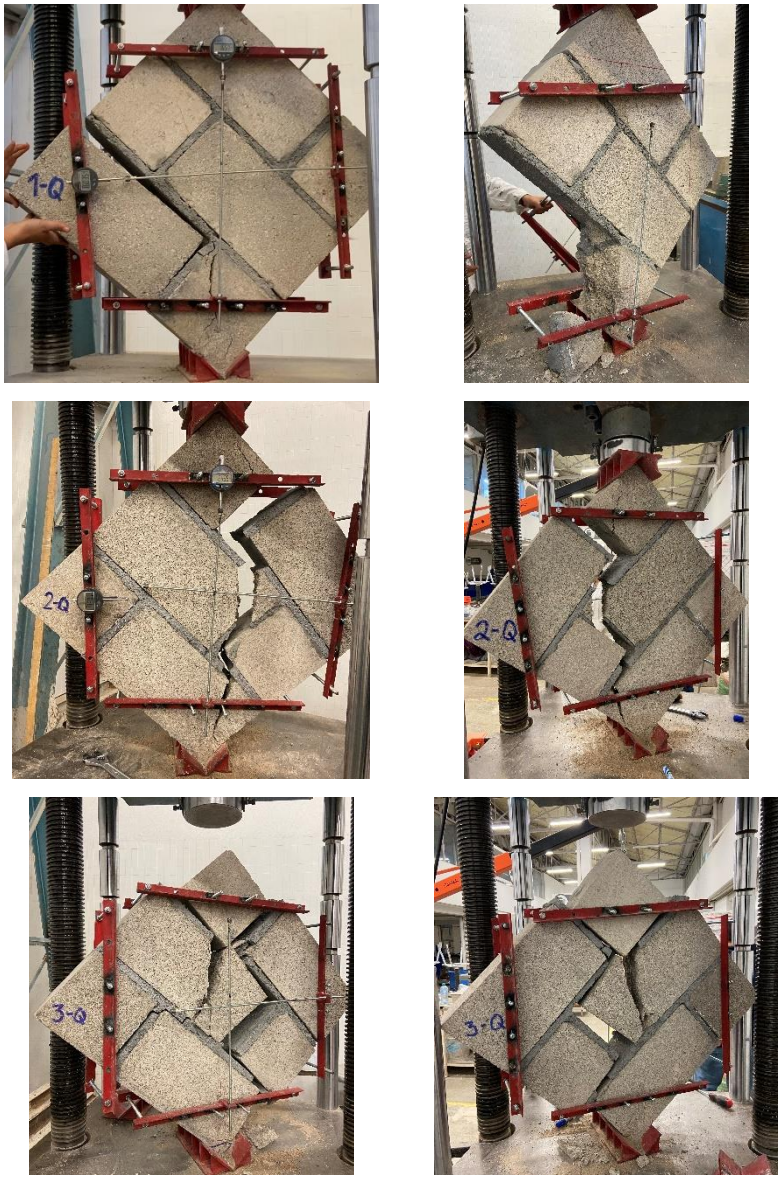
Tabla 20. Resumen de resultados de la resistencia a la tensión diagonal de los muretes en los grupos M-Q y M-V.

RESUMEN (M-Q)		
Pmáx Prom.	10246.71	kg
Vm Prom.	7.98	kg/cm^2
δc (mm)	0.69	mm
δt (mm)	0.82	mm
Gm Prom.	8179.00	kg/cm^2
RESUMEN (M-V)		
Pmáx Prom.	4211.11	kg
Vm Prom.	4.06	kg/cm^2
δc (mm)	0.32	mm
δt (mm)	0.52	mm
Gm Prom.	4727.71	kg/cm^2

En el caso de los 2 grupos al realizar las pruebas de los muretes, se obtuvieron 2 resultados anormales, en los cuales las resistencias de los prototipos estaban muy por debajo de la media

de los otros 2, por lo que se decidió ensayar un murete más, siendo el resultado final de 4 muretes por grupo.

En las Figuras 71 y 72 se pueden observar los prototipos después de la prueba a compresión diagonal, tanto en el grupo M-Q como en el M-V los tipos de fallas son prácticamente los mismos, haciendo referencia a un tipo de falla “combinada” ya que en la mayoría de los muretes la grieta principal se presentó en la primera pieza para después llegar al mortero y seguir la dirección de este escalonadamente.



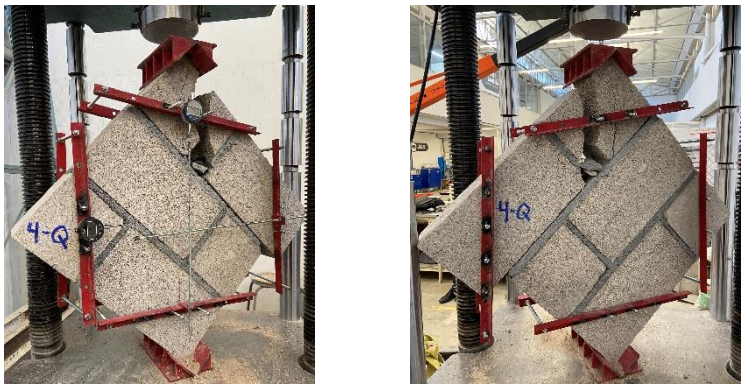


Figura 73. Prototipos M-Q sometidos a compresión diagonal.

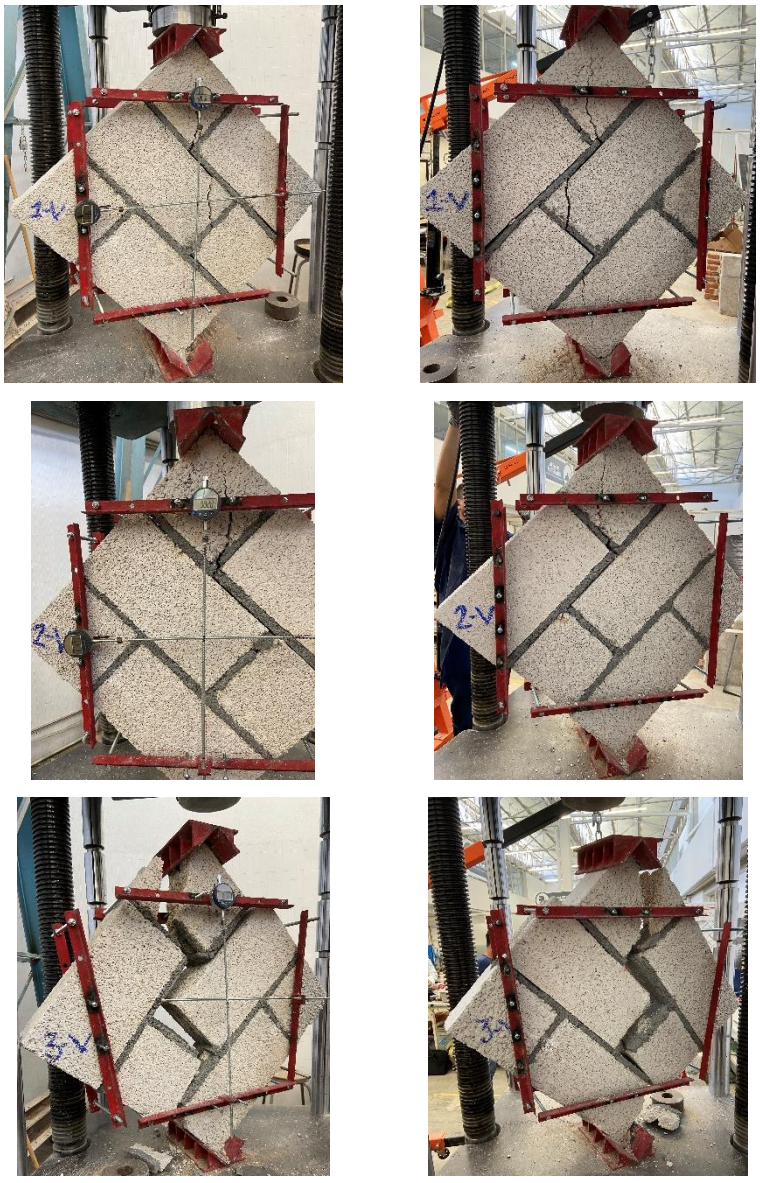




Figura 74. Prototipos M-V sometidos a compresión diagonal.

5.1.3.2 Muretes con refuerzo

En las Figuras 73 y 74 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión diagonal en muretes con refuerzo de acero. Asimismo, se muestra un breve resumen de los 2 grupos ensayados (Tabla 21).

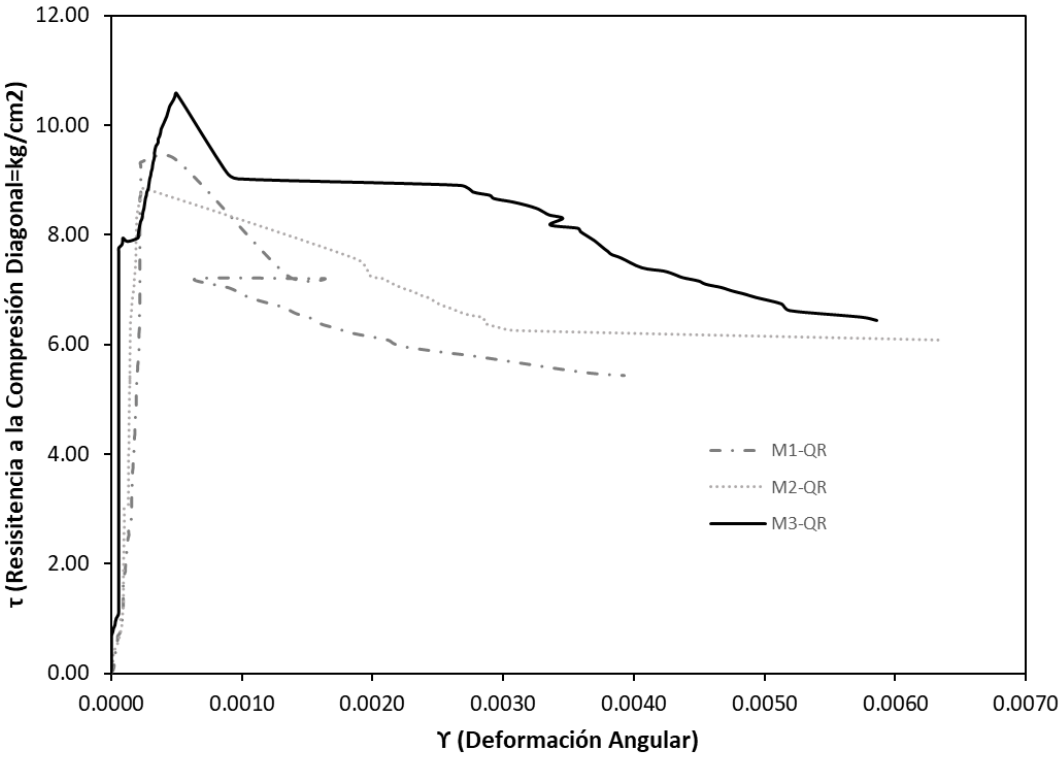


Figura 75. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-QR.

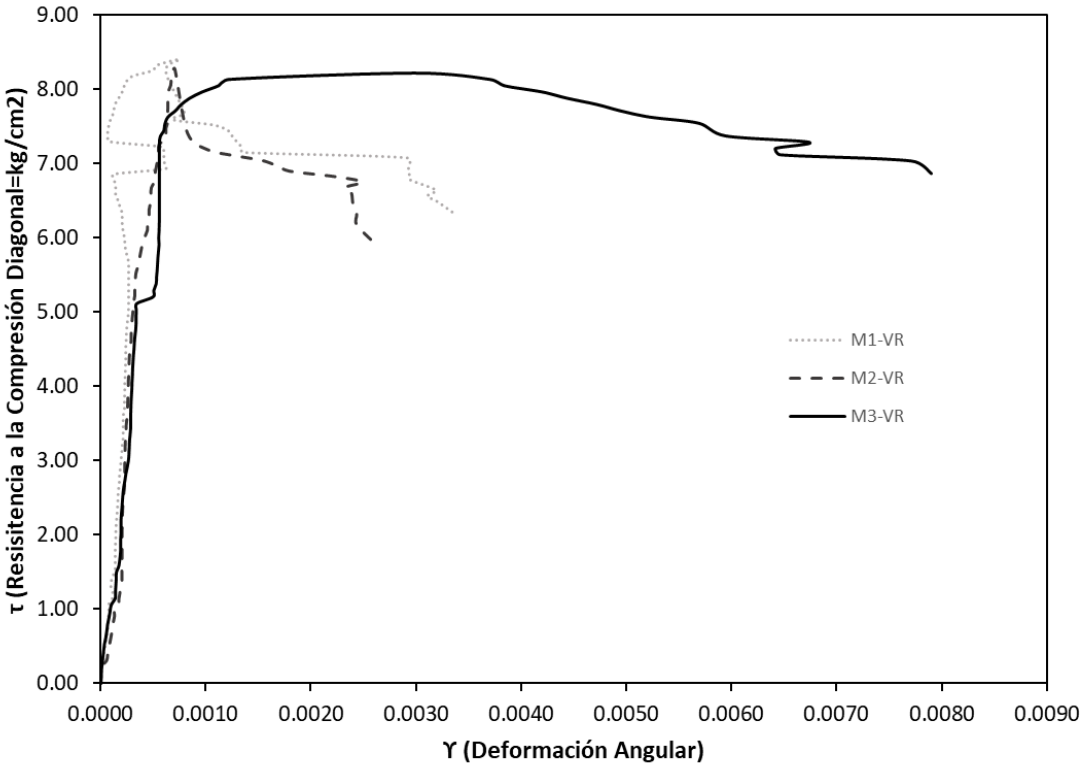


Figura 76. Gráfica esfuerzo – deformación correspondiente a los prototipos M-VR.

Tabla 21. Resumen de resultados de la resistencia a la tensión diagonal de los muretes en los grupos M-QR y M-VR.

RESUMEN (M-QR)		
Pmáx Prom.	14104.49	kg
Vm Prom.	9.60	kg/cm^2
δc (mm)	0.20	mm
δt (mm)	0.03	mm
Gm Prom.	14714.19	kg/cm^2
RESUMEN (M-VR)		
Pmáx Prom.	9467.23	kg
Vm Prom.	8.30	kg/cm^2
δc (mm)	0.68	mm
δt (mm)	0.14	mm
Gm Prom.	11100.48	kg/cm^2

En la Tabla 21 se observa que para el grupo M-QR el cortante promedio fue de 9.60 kg/cm^2 y de la gráfica esfuerzo – deformación se genera un módulo de cortante promedio de 14

714.19 kg/cm^2. Para el caso del grupo M-VR el promedio en resistencia a la cortante fue de 8.30 kg/cm^2 y un módulo de cortante promedio de 11100.48 kg/cm^2.

En las Figuras 75 y 76 se pueden observar los prototipos después de la prueba a compresión diagonal, tanto en el grupo M-QR como en el M-VR los tipos de fallas que presentan los muretes son similares, en la cara frontal donde se encuentra el refuerzo con el recubrimiento, se muestra una grieta que recorre al espécimen de punta a punta verticalmente. En cuanto al lado posterior se observan grietas similares a la de los muretes sin refuerzo, empezando mayormente en la falla de la pieza para que después la grieta continue su trayectoria por la junta hasta alcanzar la última pieza del sistema, así como una distorsión en el eje Z debida a la rigidez del recubrimiento.

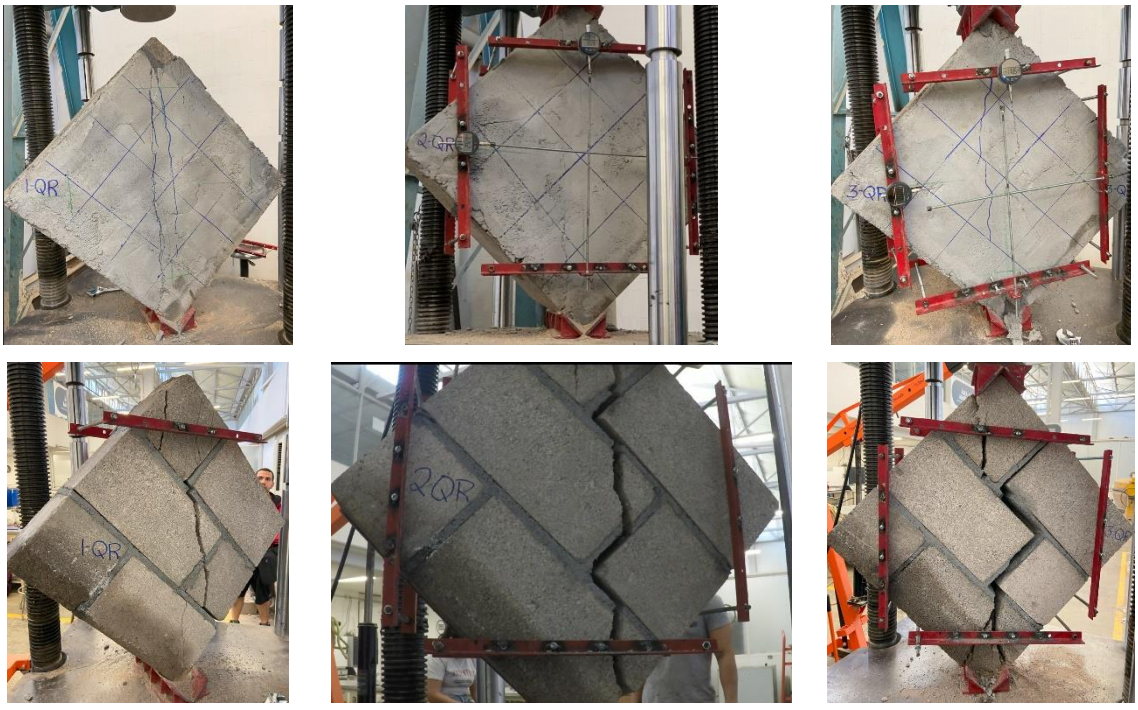


Figura 77. Prototipos M-QR sometidos a compresión diagonal.

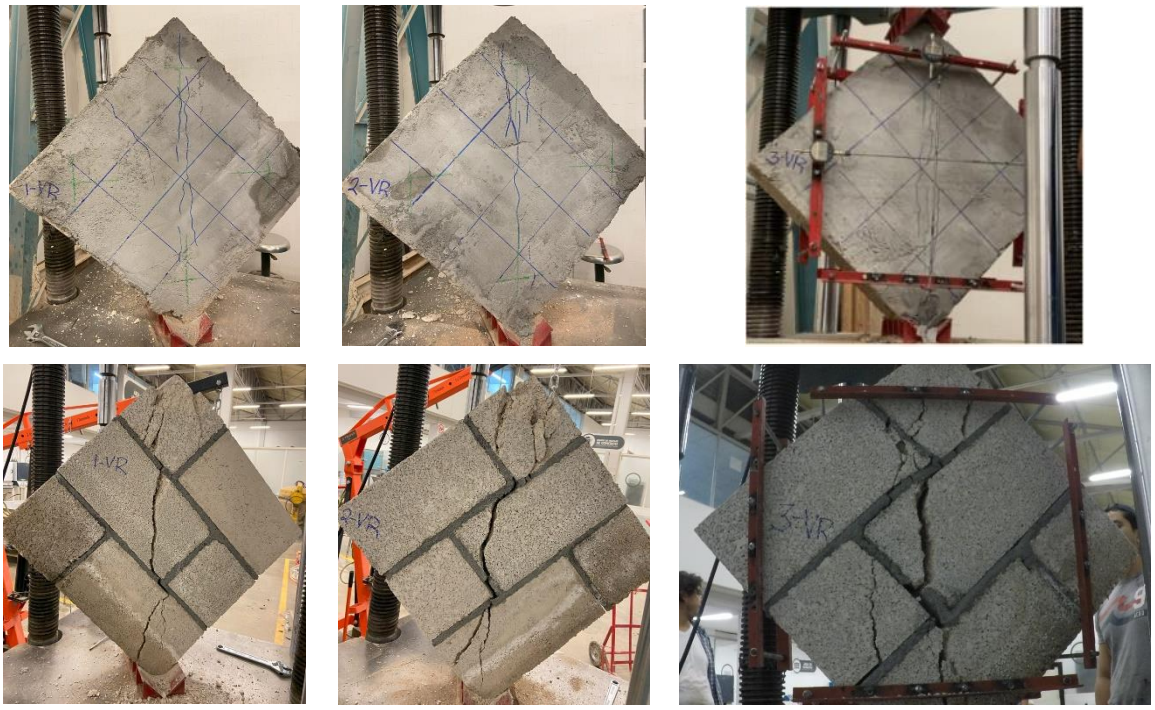


Figura 78. Prototipos M-VR sometidos a compresión diagonal.

5.2 Planteamiento del modelo computacional

5.2.1 Materiales

La calibración de los materiales en el modelo, tanto de las piezas como de los cubos de mortero, fueron calibrados mediante la variable conocida que era la resistencia a la compresión de las muestras.

En la Figura 79 se pueden ver los resultados obtenidos del modelo de las piezas de 12 y 15 cm de bloque donde se sometieron a un desplazamiento de -2 mm en la parte superior con el

fin de representar la prueba experimental. El resultado del modelo para la pieza de 12 cm fue de una fuerza máxima aplicada de 158.46 kN, lo cual hace referencia a una resistencia del bloque de 33.66 kg/cm^2. En cuanto al bloque de 15 cm, la fuerza máxima aplicada fue de 395.05 kN, por lo tanto, la resistencia de la pieza es de 67.13 kg/cm^2.

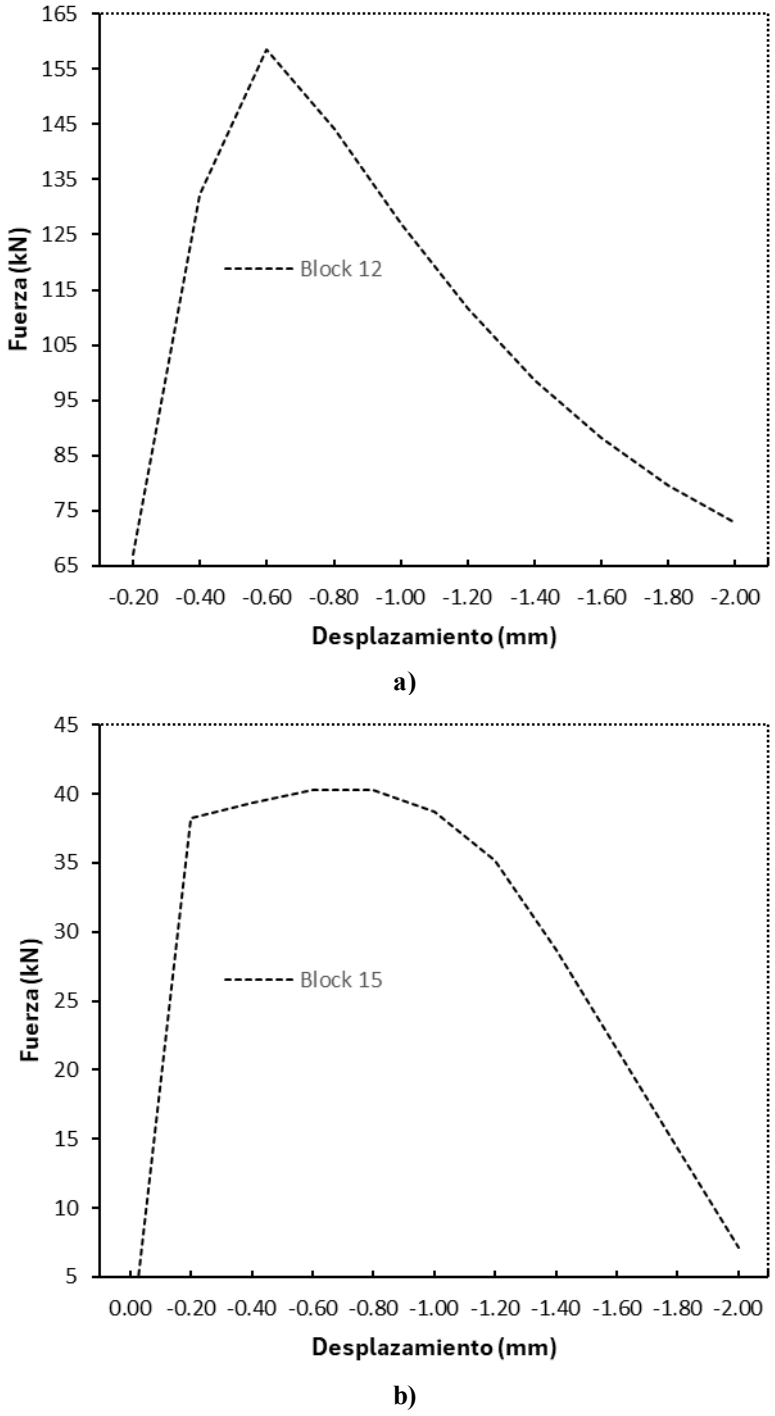
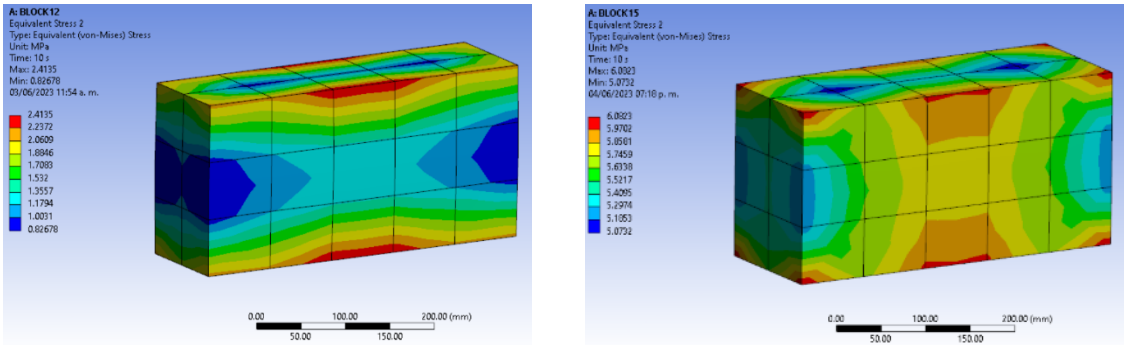


Figura 79. Gráfica fuerza – desplazamiento de las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm.

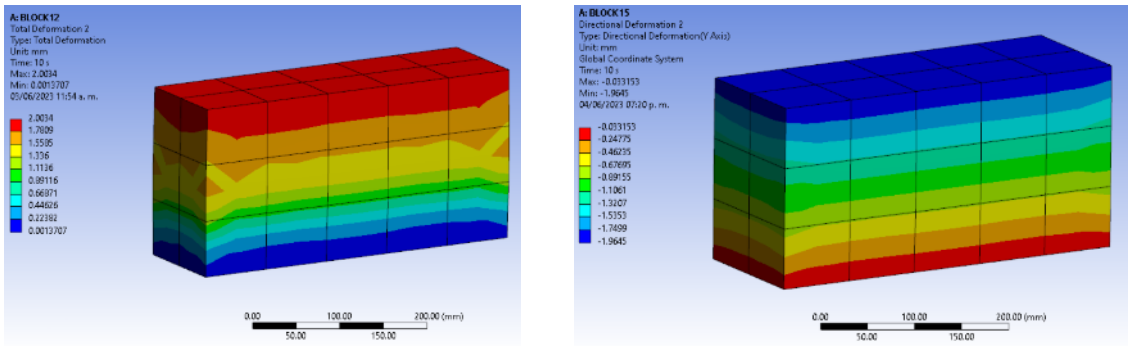
Los resultados de las piezas de 12 cm muestran una diferencia porcentual de -2.82% comparado con el promedio obtenido por las pruebas experimentales (34.64 kg/cm^2). En el caso del modelo de las piezas de 15 cm, se tiene una diferencia porcentual de -2.08% comparado con el promedio obtenido en pruebas experimentales (68.56 kg/cm^2).

En la Figura 80 se muestran los resultados arrojados por el software Ansys, correspondientes a los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y en la Figura 81 se observa la deformación de las piezas en el eje "Y". El esfuerzo máximo fue de 2.41 MPa y 6.08 MPa para las piezas de 12 y 15 cm, respectivamente.



a) b)

Figura 80. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm.

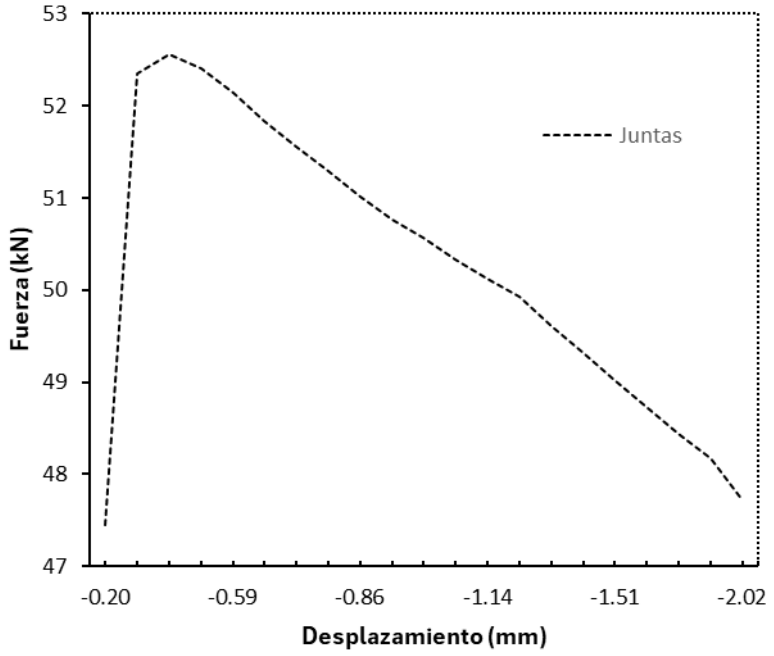


a) b)

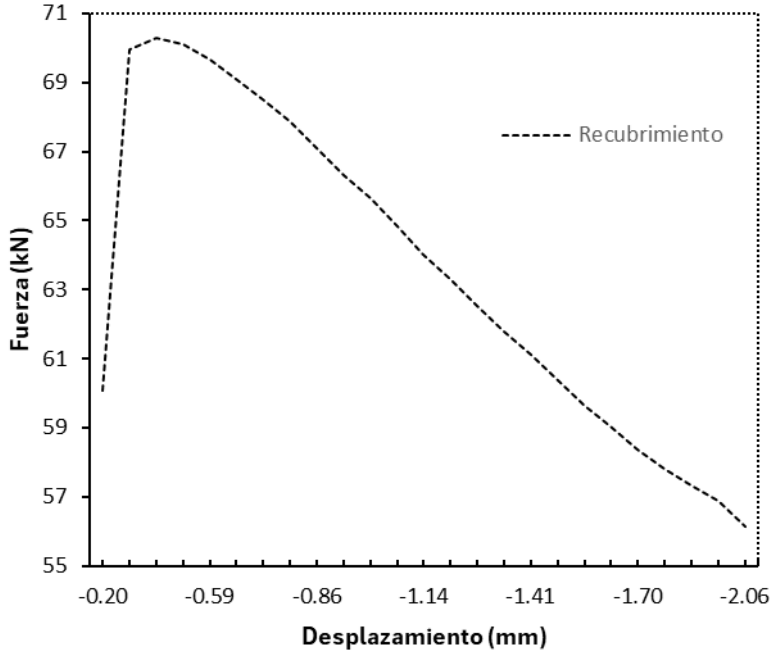
Figura 81. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las piezas de bloque de: a) 12 cm y b) 15 cm.

Por otra parte, los resultados de los modelos de los cubos de mortero se muestran en la Figura 82, donde se puede observar que para el caso del mortero para las juntas se obtuvo una carga máxima de 52.57 kN, por lo cual, la resistencia del mortero fue de 214.43 kg/cm^2. Asimismo,

para el mortero que se utilizó para representar los recubrimientos obtuvo una carga máxima de 70.28 kN, lo cual corresponde a una resistencia de 286.66 kg/cm^2.



a)

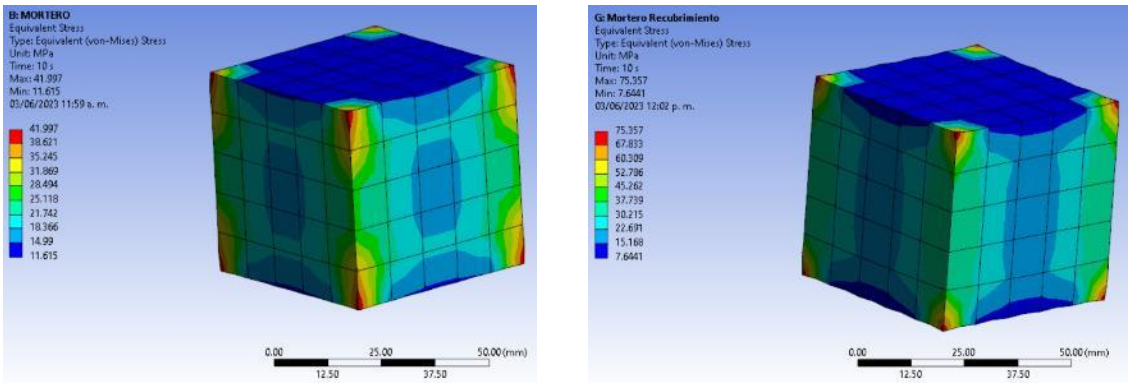


b)

Figura 82. Gráfica fuerza – desplazamiento de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento.

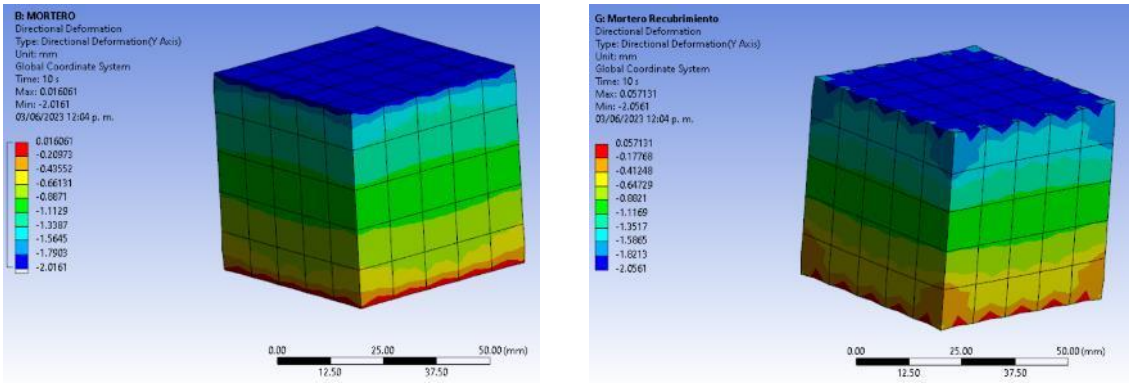
Estos resultados muestran algunas diferencias respecto a los datos experimentales: para el mortero utilizado en las juntas, existe una diferencia porcentual de +4.16% en comparación con el promedio de los resultados experimentales (210.27 kg/cm^2). En cuanto al resultado del mortero utilizado como recubrimiento, se tiene una diferencia porcentual de +6.67% con el promedio de las pruebas (279.99 kg/cm^2).

En la Figura 83 se muestran los resultados obtenidos con el software Ansys de los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y en la Figura ***84*** se observa la deformación de las piezas en el eje "Y". Para el mortero de la junta el esfuerzo máximo fue de 41.99 MPa y para los recubrimientos de los muretes de piezas de 12 y 15 cm fueron de 75.35 MPa y 41.99 MPa, respectivamente.



a) **b)**

Figura 83. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento.

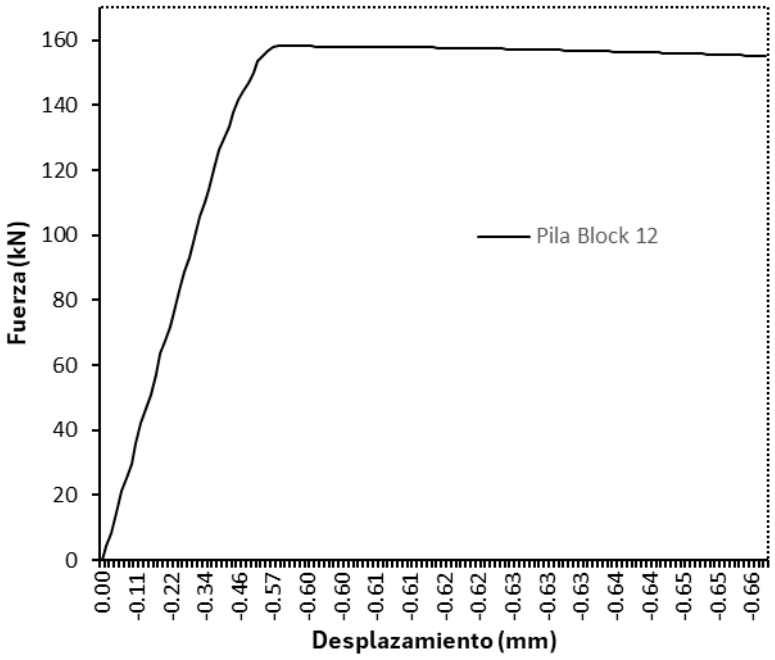


a) **b)**

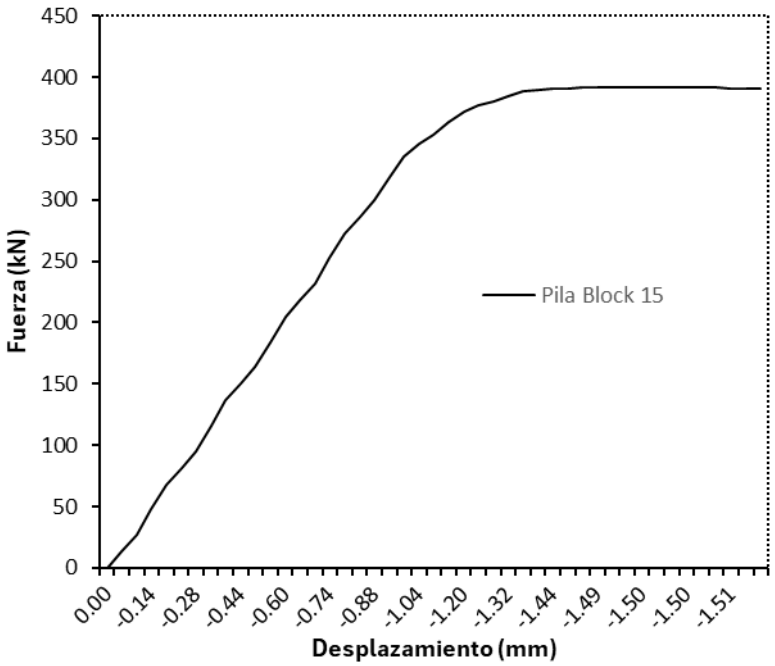
Figura 84. Gráfica de deformación en el eje "Y" de los morteros en: a) juntas y b) recubrimiento.

5.2.2 Pilas

Los resultados de los modelos de las pilas para las piezas de 12 y 15 cm se pueden observar en la Figura 85. Para el modelo de pila de piezas de 12 cm, la fuerza máxima corresponde a un valor de 158.17 kN con un desplazamiento de 0.598 mm. Por otro lado, en el modelo de pila para piezas de 15 cm se obtuvo una fuerza máxima de 391.25 kN con un desplazamiento de 1.49 mm.



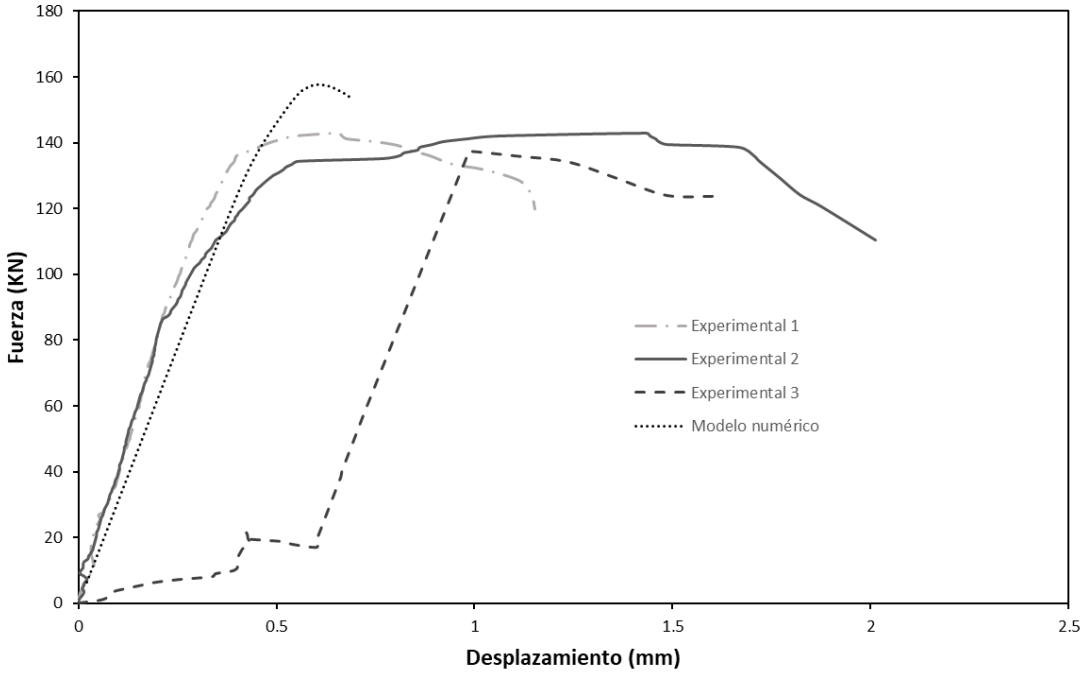
a)



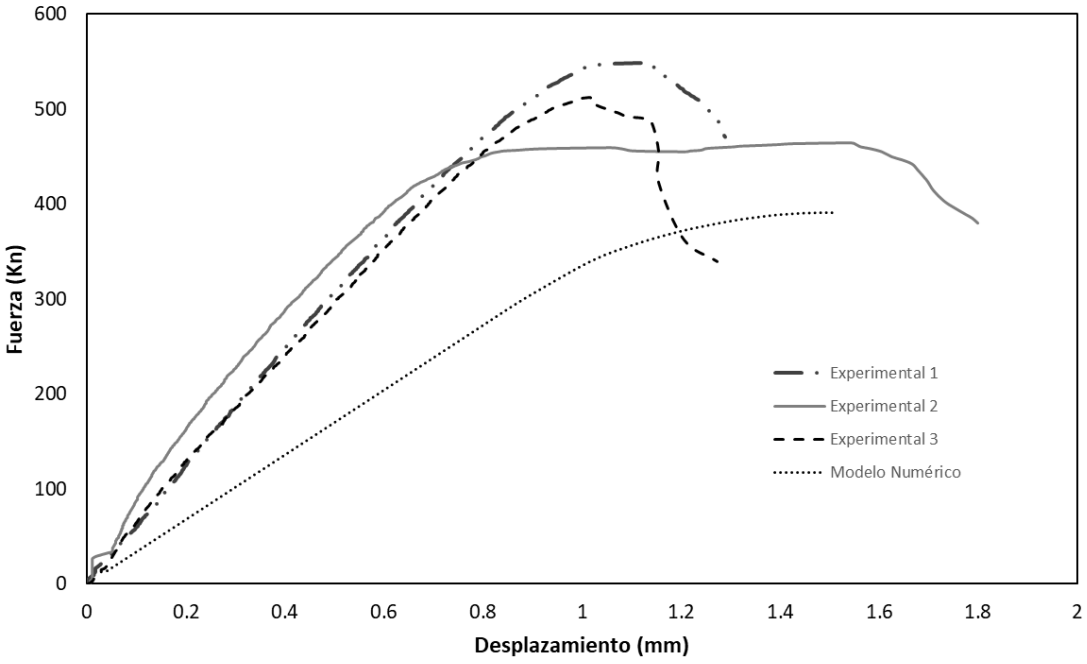
b)

Figura 85. Gráfica fuerza – desplazamiento de las piezas de bloque de a) 12 cm y b) 15 cm.

Los resultados de los modelos comparados con el promedio de los datos experimentales presentan algunas diferencias. Para el modelo constituido por piezas de 12 cm, el promedio de la carga máxima en los experimentos fue de 141.13 kN, por lo que la fuerza aplicada en el modelo difiere un +12.07%. De igual manera, el desplazamiento promedio en la experimentación fue de 1.03 mm, lo cual representa una diferencia de -41.94. Por otro lado, en el modelo de pila para piezas de 15 cm, el promedio de la carga máxima aplicada en los ensayes corresponde a 508.6 kN, es por esto que la fuerza aplicada en el modelo varía en -23.07%. Asimismo, el desplazamiento promedio de las pilas para estas piezas fue de 1.23 mm, dando como resultado una diferencia entre el modelo y el experimental de +21.13%. Las diferencias entre los ensayes y los modelos numéricos se muestran en la Figura 86.



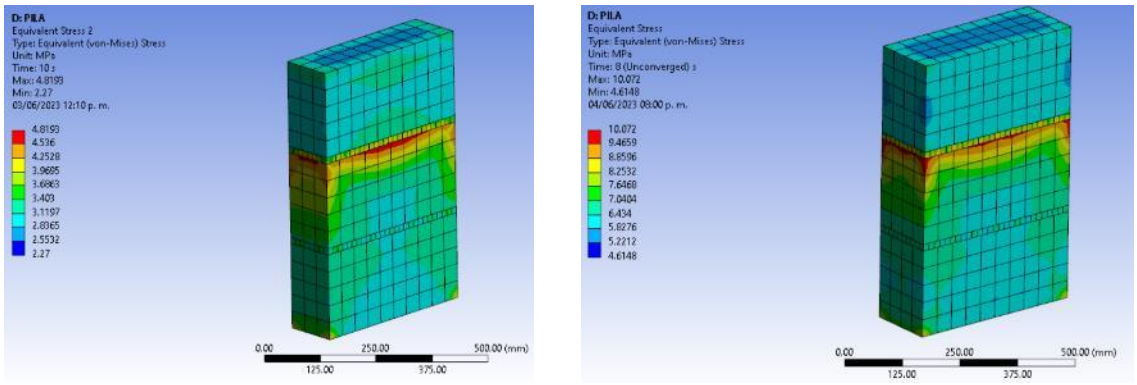
a)



b)

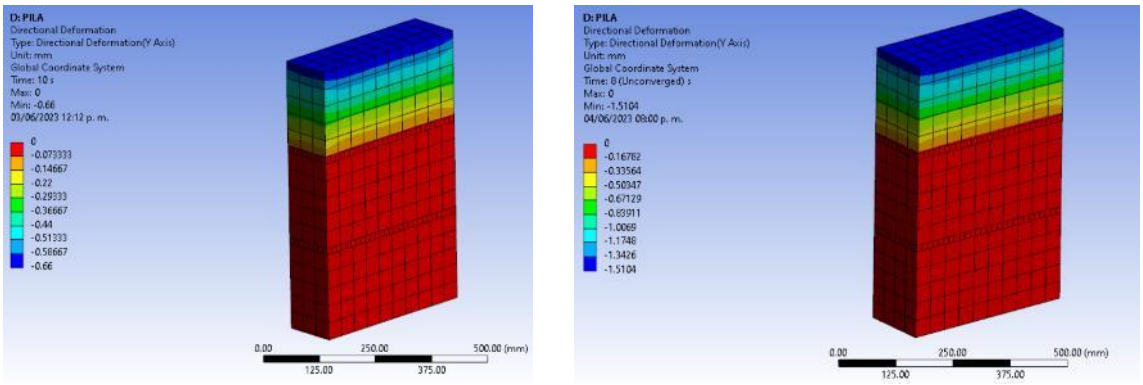
Figura 86. Gráfica fuerza – desplazamiento de pilas experimentales y del modelo numérico para las piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

En la Figura 87 se muestran los resultados obtenidos del software Ansys donde se representan los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y en la Figura 88 se observa la deformación de las piezas en el eje "Y". Para las pilas de piezas de 12 cm el esfuerzo máximo fue de 4.81 MPa y para las pilas de piezas de 15 cm fue de 10.072 MPa.



a) b)

Figura 87. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.



a) b)

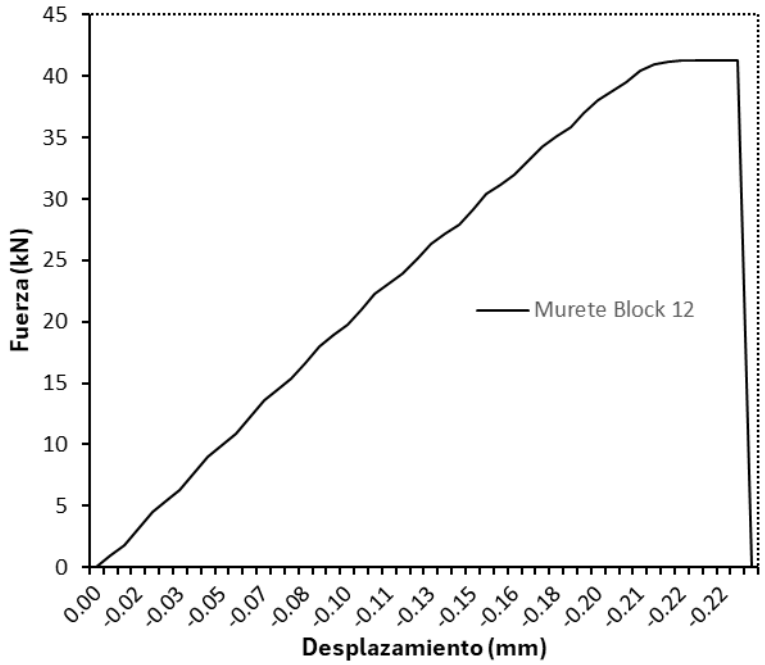
Figura 88. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

5.2.3 Murete sin refuerzo

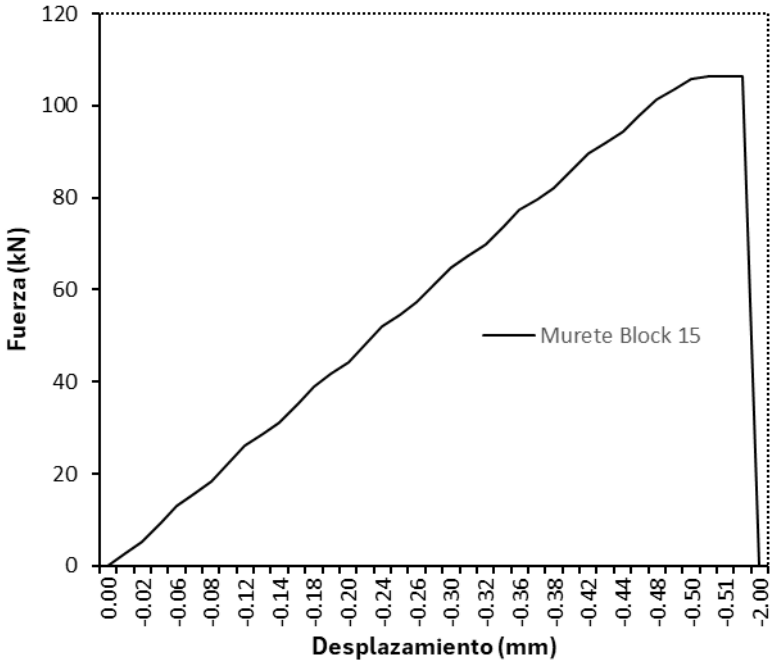
Los resultados de los modelos numéricos con los experimentales en muretes sin refuerzo indican que a diferencia de las pilas, la comparación de los resultados del modelo con el promedio de la carga máxima aplicada en pruebas experimentales es más precisa, teniendo una diferencia porcentual menor para ambos casos de piezas, sin embargo, para el caso del desplazamiento la diferencia porcentual que existe es del orden del 20% al 30%.

Los resultados de los modelos de muretes sin refuerzo para las piezas de 12 y 15 cm se pueden observar en la Figura 89. Para el modelo del murete con piezas de 12 cm, la fuerza máxima

corresponde a un valor de 41.28 kN con un desplazamiento de 0.22 mm. Por otro lado, en el modelo del murete para piezas de 15 cm se obtuvo una fuerza máxima de 106.32 kN con un desplazamiento de 0.50 mm.



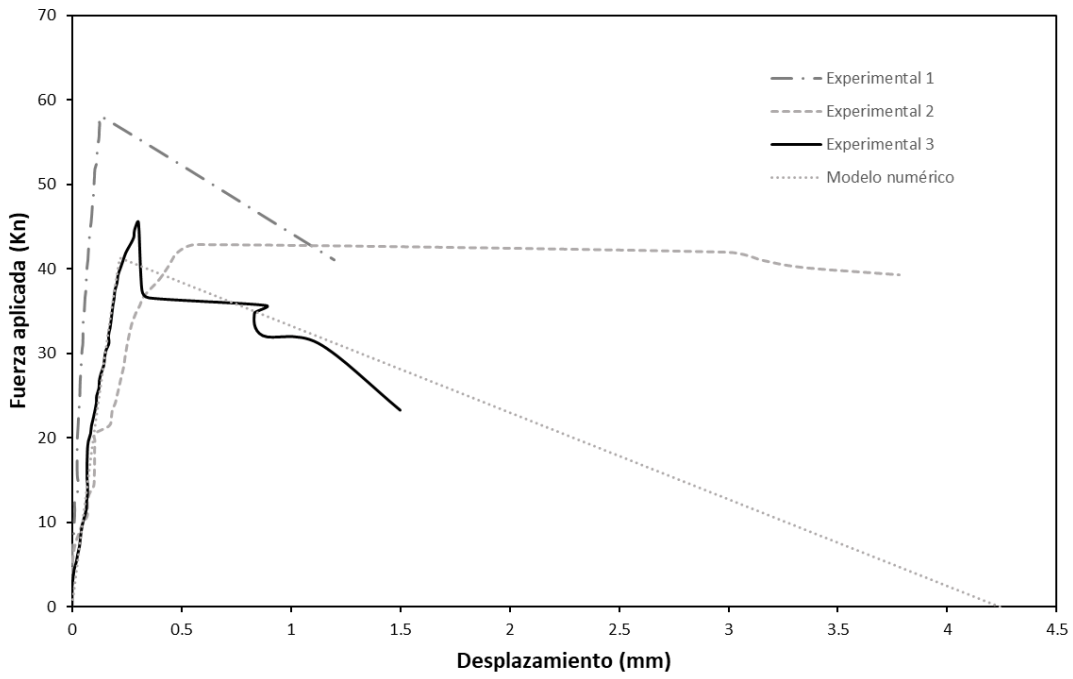
a)



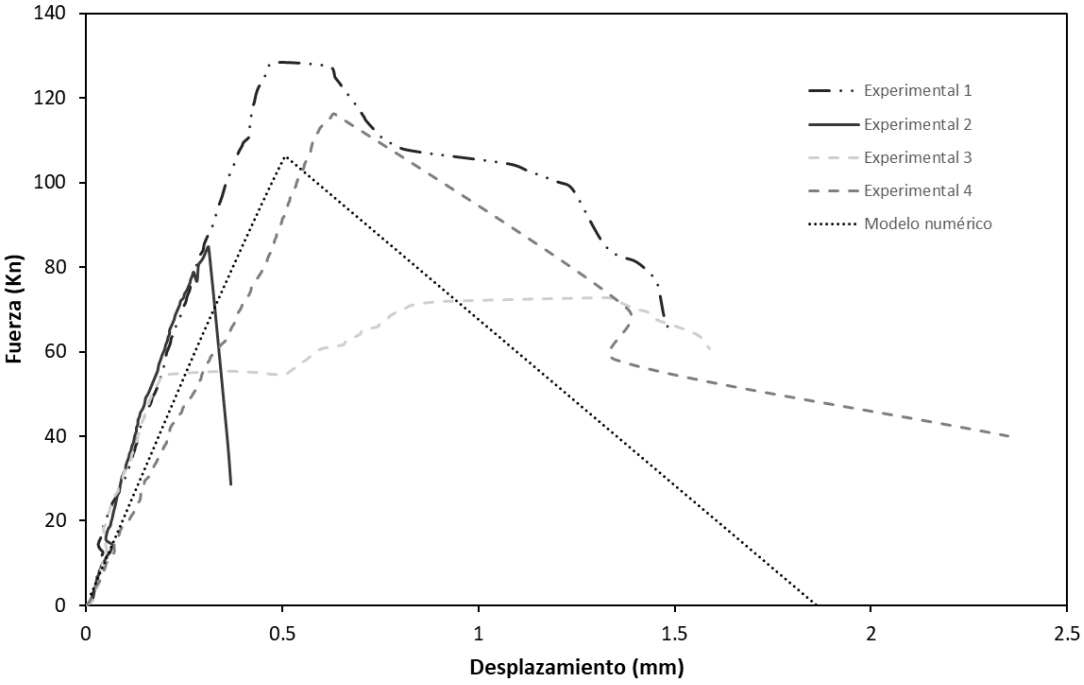
b)

Figura 89. Gráfica fuerza – desplazamiento de los muretes en el modelo numérico con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

Los resultados de los modelos comparados con el promedio de los resultados experimentales presentan algunas diferencias. Para el modelo constituido por piezas de 12 cm, el promedio de la carga máxima en los experimentos fue de 41.29 kN, por lo que la fuerza aplicada en el modelo difiere en -0.02%. De igual manera, el desplazamiento promedio en la experimentación fue de 0.32 mm, lo cual implica una diferencia de -31.25%. Por otro lado, en el modelo de pila para piezas de 15 cm, el promedio de la carga máxima aplicada en los ensayes corresponde a 100.48 kN, por lo que la fuerza aplicada en el modelo varía en +5.81%. Asimismo, el desplazamiento promedio de los muretes para estas piezas fue de 0.69 mm, dando como resultado una diferencia entre el modelo y el experimental de -27.53%. Las diferencias entre los ensayes y los modelos numéricos se muestran en la Figura 90.



a)

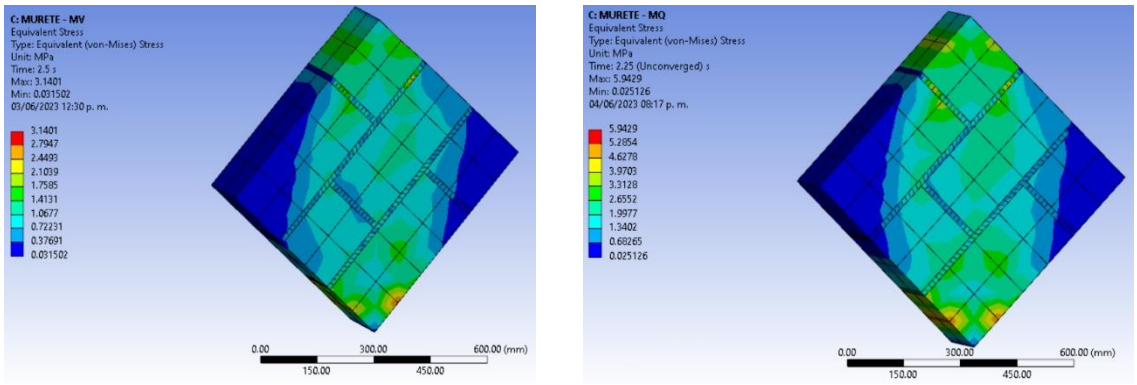


b)

Figura 90. Gráfica fuerza – desplazamiento de muretes experimentales y del modelo numérico para las piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

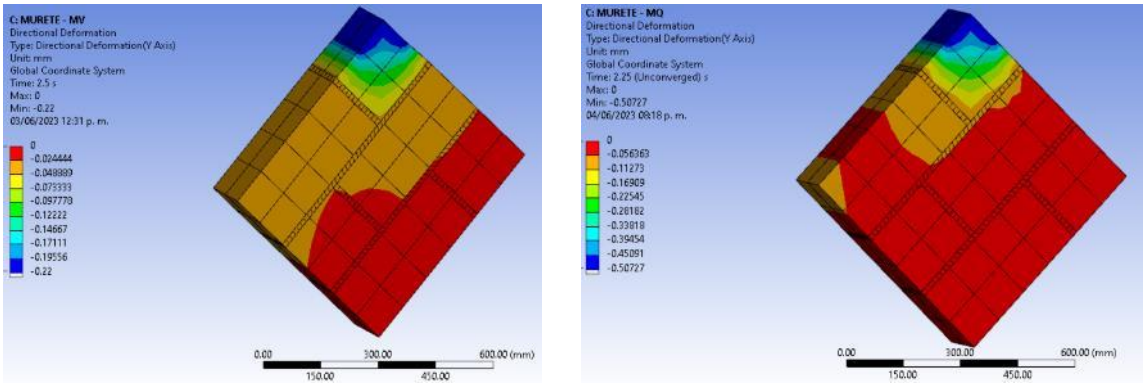
En la Figura 91 se muestran los resultados obtenidos mediante el software Ansys, correspondientes a los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y en la Figura 92 se observa la deformación de las piezas en el eje "Y". Para los muretes de piezas de 12 cm el esfuerzo máximo fue de 3.14 MPa y para los muretes de piezas de 15 cm fue de 5.94 MPa.

Asimismo, las gráficas demuestran como algunos de los esfuerzos máximos que ocurren en el modelo se presentan en las juntas que se encuentran uniendo a las piezas superior e inferior del murete, prediciendo la posible falla del prototipo de forma similar que en las pruebas experimentales.



a) **b)**

Figura 91. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para muretes con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.



a) **b)**

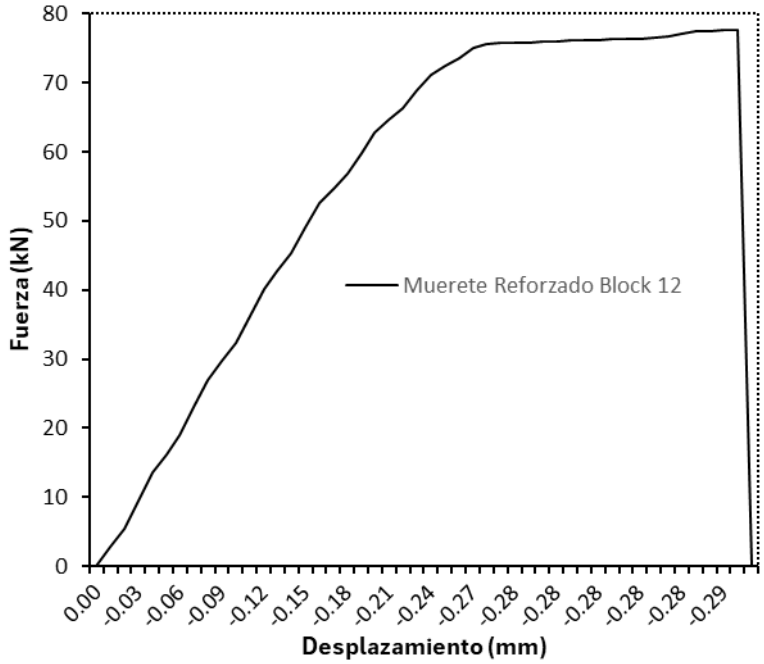
Figura 92. Gráfica de deformación en el eje "Y" para las pilas con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

5.2.4 Murete con refuerzo

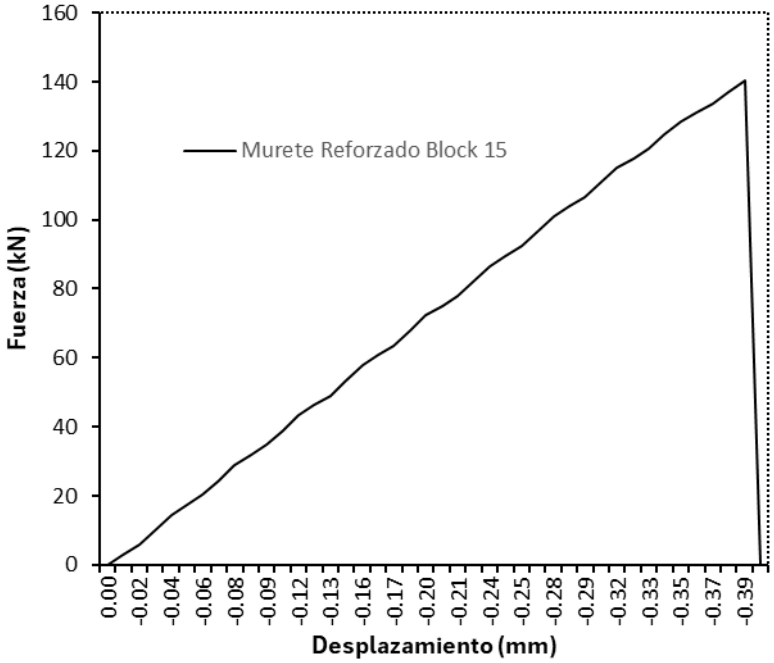
En el caso de los muretes con refuerzo, se observa que para los prototipos con piezas de 15 cm existe una mayor similitud en la carga máxima aplicada con el promedio de los resultados experimentales en comparación con los prototipos de piezas de 12 cm. Sin embargo, en el caso de los desplazamientos resulta a la inversa, la mayor aproximación corresponde al modelo de las piezas de 12 cm en relación con el promedio de los desplazamientos experimentales a comparación del modelo de las piezas de 15 cm. Así mismo, el prototipo de las piezas de 12 cm en la curva fuerza – desplazamiento, presenta una tendencia más apegada a las curvas experimentales que el prototipo de piezas de 15 cm

Para los modelos de los muretes reforzados, los resultados para las piezas de 12 y 15 cm se pueden observar en la Figura 93. Para el modelo del murete reforzado con piezas de 12 cm, la fuerza máxima corresponde a un valor de 77.70 kN con un desplazamiento de 0.28 mm.

Por otro lado, en el modelo del murete para piezas de 15 cm se obtuvo una fuerza máxima de 141.01 kN con un desplazamiento de 0.39 mm.



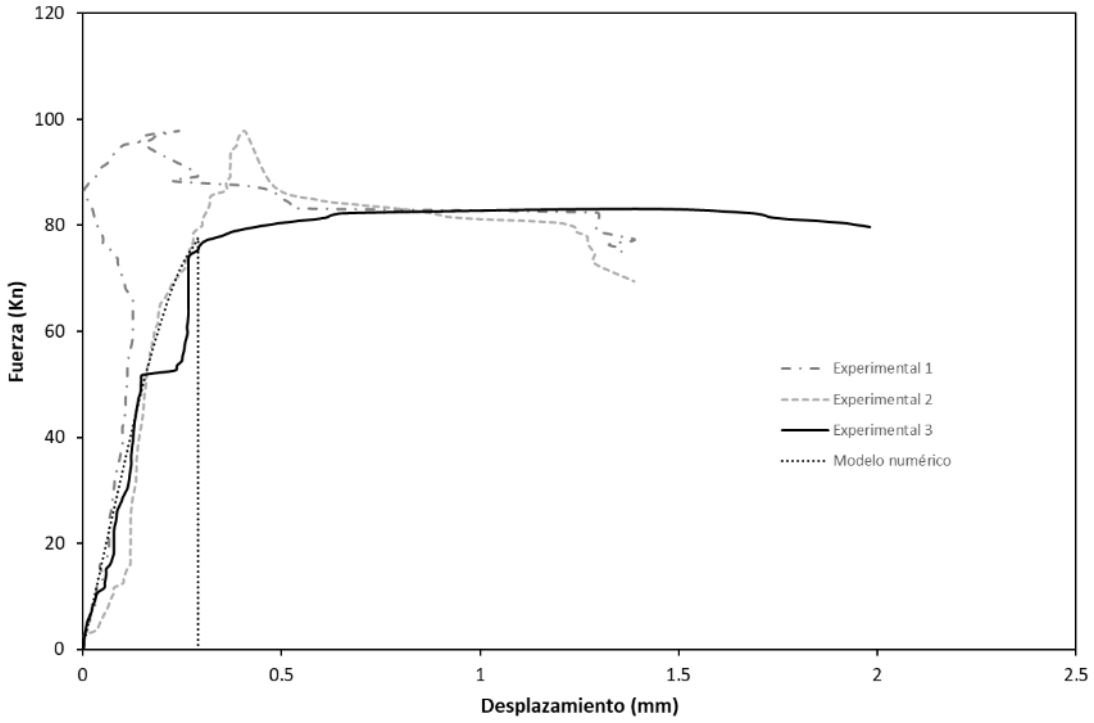
a)



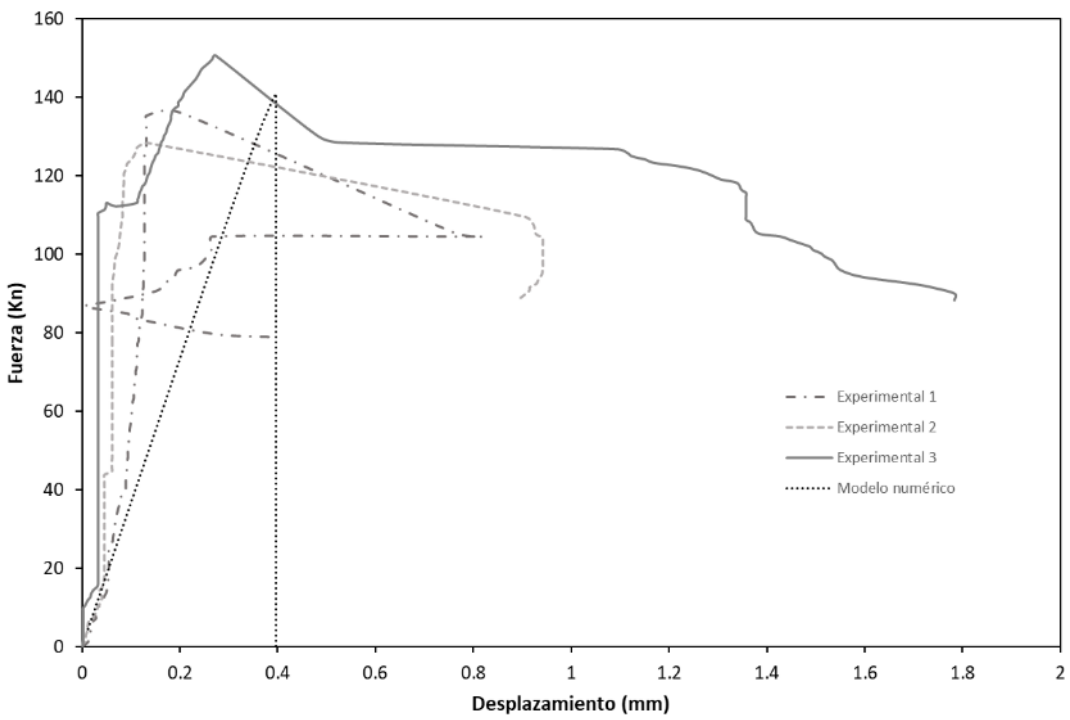
b)

Figura 93. Gráfica fuerza – desplazamiento de los muretes reforzados en el modelo numérico con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

Los resultados de los modelos comparados con el promedio de los resultados experimentales presentan algunas diferencias. Para el modelo constituido por piezas de 12 cm, el promedio de la carga máxima en los experimentos fue de 92.84 kN, por lo que la fuerza aplicada en el modelo difiere en -16.30%. De igual manera, el desplazamiento promedio en la experimentación fue de 0.68 mm, lo cual implica una diferencia de -58.82. Por otro lado, en el modelo de piezas de 15 cm, el promedio de la carga máxima aplicada en los ensayes corresponde a 138.32 kN, por lo que la fuerza aplicada en el modelo varía en +1.94%. Asimismo, el desplazamiento promedio de los muretes para estas piezas fue de 0.20 mm, dando como resultado una diferencia entre el modelo y el experimental de +95%. Las diferencias entre los ensayes y los modelos numéricos se muestran en la Figura 94.



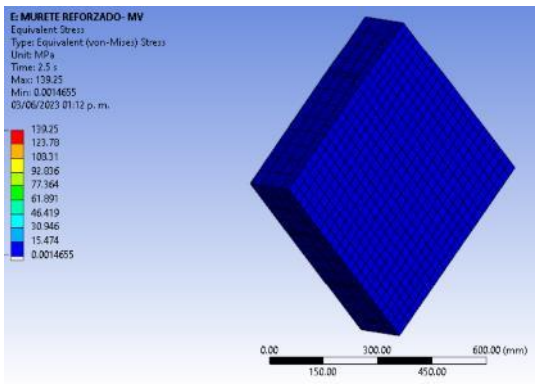
a)



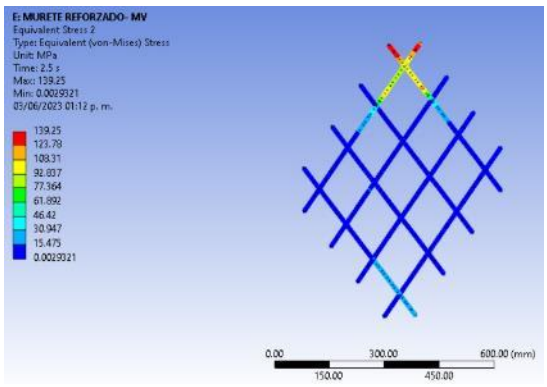
b)

Figura 94. Gráfica fuerza – desplazamiento de muretes reforzados experimentales y del modelo numérico para las piezas de a) 12 y b) 15 cm.

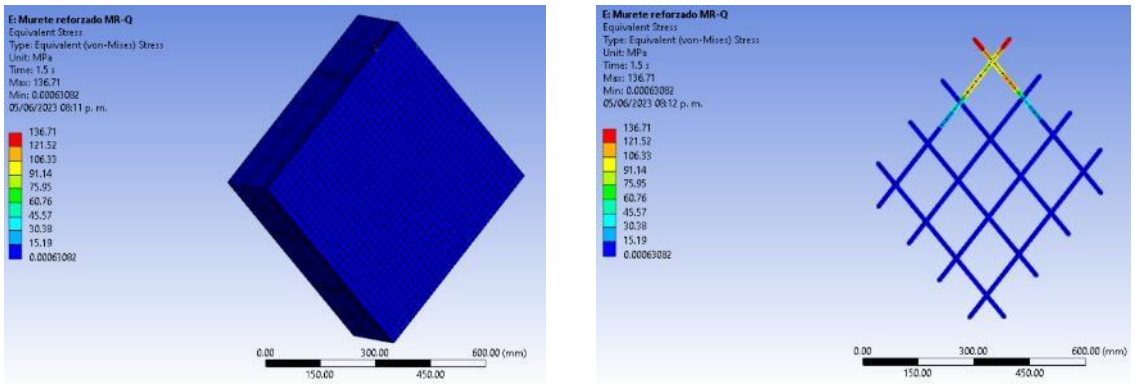
En la Figura 95 se muestran los resultados de los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y en la Figura 96 se observa la deformación de las piezas en el eje "Y". Para los muretes de piezas de 12 cm el esfuerzo máximo fue de 139.25 MPa y para los muretes de piezas de 15 cm fue de 136.71 MPa. Cabe mencionar que, en el modelo, la mayor parte de los esfuerzos los absorbe la malla electrosoldada, como se logra observar en las figuras.



a.1)

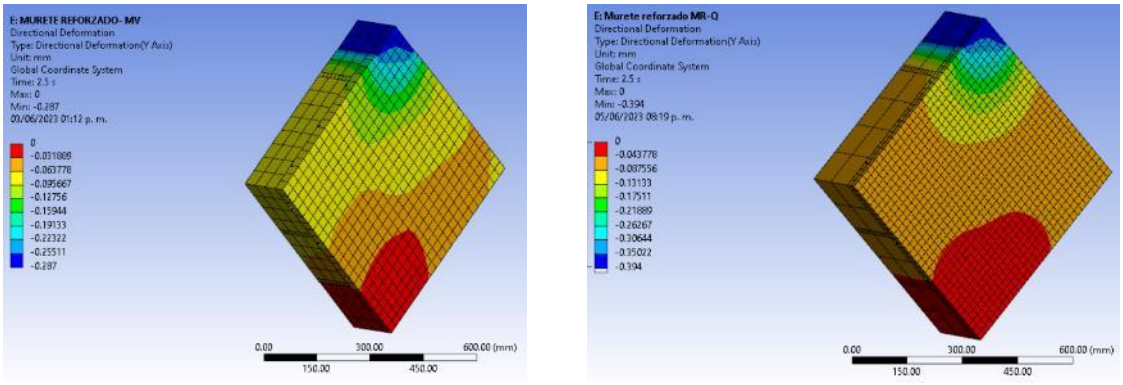


a.2)



b.1) **b.2)**

Figura 95. Gráfica de los esfuerzos equivalentes de Von – Mises para muretes reforzados, mostrando el recubrimiento y la malla para piezas de: a.1) a.2) 12 cm y b.1) b.2) 15 cm.



a) **b)**

Figura 96. Gráfica de deformación en el eje "Y" para muretes reforzados con piezas de: a) 12 cm y b) 15 cm.

5.3 Determinación de bondad de ajuste del modelo

5.3.1 Regresión polinómica y bondad de ajuste

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones de las regresiones polinómicas de segundo grado para el promedio de desplazamientos se presentan en la Tabla 22, al igual que se incorpora el procedimiento realizado para la prueba estadística "chi-cuadrada".

Tabla 22. Determinación del valor chi – cuadrada mediante la distribución de frecuencias observadas y obtenidas a) M-QR b) M-VR

	Distribuciones de frecuencias		Estadistico de prueba "Chi-cuadrada"		
Desplazamiento promedio eje "Y" (mm)	F(x)-QR	F(x)-MO	(fi - ei)	$(fi - ei)^2$	$(fi - ei)^2 / ei$
	Valores de Fuerza obtenidos (kN)				
0.0215	9.7794	2.4396	7.3398	53.8731	22.0829
0.0229	11.7036	3.1845	8.5191	72.5751	22.7900
0.0665	64.2808	24.5374	39.7434	1579.5383	64.3727
0.0443	38.8131	13.9286	24.8845	619.2394	44.4581
0.0443	38.8131	13.9286	24.8845	619.2394	44.4581
0.0484	43.6889	15.9163	27.7726	771.3153	48.4607
0.0508	46.5263	17.0818	29.4444	866.9748	50.7542
0.0560	52.5617	19.5837	32.9780	1087.5508	55.5336
0.0617	58.9745	22.2779	36.6966	1346.6432	60.4475
0.0627	60.0882	22.7498	37.3384	1394.1588	61.2823
0.0640	61.5647	23.3773	38.1874	1458.2803	62.3802
0.0655	63.1795	24.0661	39.1134	1529.8573	63.5690
0.0667	64.4890	24.6266	39.8624	1589.0074	64.5239
0.0680	65.9367	25.2485	40.6883	1655.5357	65.5698
0.0693	67.3749	25.8684	41.5065	1722.7896	66.5983
0.0703	68.3974	26.3105	42.0869	1771.3080	67.3232
0.0727	70.9283	27.4098	43.5184	1893.8518	69.0938
0.0727	70.9738	27.4297	43.5441	1896.0911	69.1254
0.0743	72.6743	28.1726	44.5018	1980.4068	70.2956
0.0769	75.3445	29.3459	45.9985	2115.8666	72.1009
0.0792	77.7470	30.4091	47.3379	2240.8723	73.6908
0.0810	79.5493	31.2115	48.3378	2336.5433	74.8615
0.1096	106.2772	43.6896	62.5876	3917.2125	89.6602
0.1160	111.6460	46.3580	65.2880	4262.5246	91.9479
0.1276	120.8541	51.1037	69.7505	4865.1276	95.2012
0.1605	142.9530	63.7468	79.2062	6273.6199	98.4146
0.2103	165.2960	80.6872	84.6088	7158.6469	88.7210
				$X^2 =$	**1757.7173**

a)

	Distribuciones de frecuencias		Estadistico de prueba "Chi-cuadrada"		
Desplazamiento promedio eje "Y" (mm)	F(x)-VR	F(x)-MO	(fi - ei)	$(fi - ei)^2$	$(fi - ei)^2 / ei$
	Valores de Fuerza obtenidos (kN)				
0.0242	-0.0044	6.4222	-6.4265	41.3004	6.4309
0.0270	1.2426	7.6527	-6.4102	41.0902	5.3694
0.0426	8.0689	14.3073	-6.2385	38.9188	2.7202
0.0585	14.8479	20.7689	-5.9211	35.0589	1.6880
0.0707	19.9013	25.4816	-5.5802	31.1392	1.2220
0.0864	26.1968	31.2159	-5.0192	25.1919	0.8070
0.0873	26.5492	31.5322	-4.9830	24.8301	0.7875
0.0889	27.1557	32.0752	-4.9195	24.2014	0.7545
0.0949	29.5125	34.1702	-4.6577	21.6946	0.6349
0.1047	33.2368	37.4301	-4.1933	17.5841	0.4698
0.1106	35.4686	39.3523	-3.8837	15.0833	0.3833
0.1161	37.5035	41.0835	-3.5800	12.8160	0.3120
0.1209	39.2642	42.5641	-3.2999	10.8896	0.2558
0.1245	40.5561	43.6401	-3.0840	9.5111	0.2179
0.1303	42.6593	45.3722	-2.7129	7.3597	0.1622
0.1349	44.2621	46.6753	-2.4131	5.8232	0.1248
0.1388	45.6521	47.7931	-2.1410	4.5837	0.0959
0.1734	57.1795	56.5742	0.6053	0.3664	0.0065
0.1825	60.0361	58.5974	1.4387	2.0698	0.0353
0.1891	62.0849	60.0056	2.0793	4.3235	0.0721
0.1930	63.2689	60.8021	2.4667	6.0847	0.1001
0.1977	64.6597	61.7210	2.9387	8.6360	0.1399
0.1979	64.7236	61.7628	2.9609	8.7667	0.1419
0.2040	66.5145	62.9167	3.5978	12.9439	0.2057
0.2061	67.1365	63.3098	3.8266	14.6432	0.2313
0.2242	72.2246	66.3648	5.8598	34.3369	0.5174
0.2958	89.6425	73.8945	15.7479	247.9974	3.3561
				X^2=	27.2424

b)

Ya que se cuenta con los valores de *"X^2"* para cada uno de los grupos, se realizó la gráfica de distribución para cada grupo, en la Figura 97 se muestra la gráfica correspondiente a la chi-cuadrada para "M-QR", de acuerdo con el estadístico de prueba y con el número de frecuencias, se tomó un valor de grados de libertad "v" igual a 27 con un valor de "P" igual a 0.95, dando como resultado un valor de X= 40.11, por lo que comparando el valor de X^2= 46.36, cae en la región critica, evidenciando que no existe un buen ajuste entre las distribuciones.

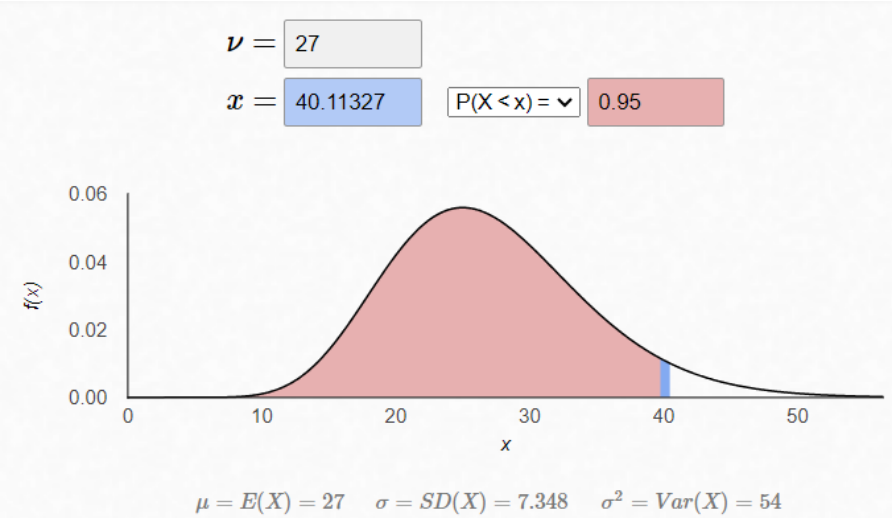


Figura 97. Distribución de chi-cuadrada para el grupo "M-QR" mediante el software Matt Bognar 2021

Por otra parte, en la en la Figura 98 se muestra la gráfica correspondiente a la chi-cuadrada para "M-VR", de acuerdo con el estadístico de prueba y con el número de frecuencias, se tomó un valor de grados de libertad "ν" igual a 26 con un valor de "P" igual a 0.95, dando como resultado un valor de X= 38.88, por lo que comparando el valor de X^2= 27.24, no cae en la región critica, evidenciando que existe un buen ajuste entre las distribuciones.

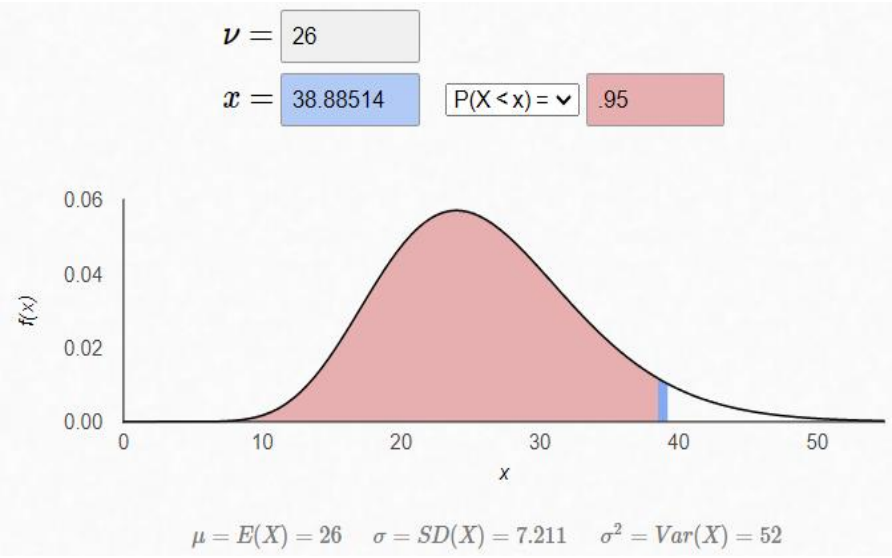


Figura 98. Distribución de chi-cuadrada para el grupo "M-VR" mediante el software Matt Bognar 2021

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se llevó a cabo la calibración de un modelo numérico basado en el método de elementos finitos y mediante la aplicación de un modelo constitutivo de microplano con daño y plasticidad acoplado. Los datos para la calibración del modelo fueron obtenidos mediante ensayes experimentales de los materiales, tanto de forma individual como en conjunto, además, se implementaron fórmulas para la obtención de valores que por falta de equipo de laboratorio no fueron posibles de obtener.

El modelo demostró tener la capacidad de representar el comportamiento mecánico de los muretes con refuerzo de acero, con una precisión mayor para las piezas de 12 cm que para las de 15 cm, puesto que la aplicación del estadístico de prueba "chi cuadrada" para determinar la bondad de ajuste de las distribuciones, arrojó que para el caso del modelo de piezas de 12 cm en comparación con los resultados experimentales existe un buen ajuste (con un valor de P=0.95 y un valor de X=38.88 en relación con un X^2 = 27.24). Por otra parte, para el modelo de las piezas de 15 cm, el estadístico de prueba arrojó que no existía un buen ajuste entre las distribuciones (con un valor de P=0.95 y un valor de X= 40.11 en relación con un X^2 = 46.36)

Es importante recalcar que a pesar de que no resulto un buen ajuste para el murete reforzado con block de 15 cm debido a la deformación que no pudo representar adecuadamente el modelo, los datos finales en cargas máximas antes del punto de falla fue una diferencia porcentual del -1.94 %, por lo que la discrepancia entre los resultados experimentales y los del modelo estarían en los desplazamientos.

Producto del trabajo de investigación, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Para las pruebas experimentales de los materiales, se recomienda utilizar equipo más sofisticado que permita medir un mayor número de variables para obtener un mejor ajuste en el modelo numérico y se tenga una mayor exactitud en las variables.
- Considerar la característica de absorción de las piezas de bloque, ya que de acuerdo con el tipo de material utilizado para elaborar las piezas puede o no, absorber una mayor cantidad de agua que pudiese reducir la resistencia tanto de las juntas como

del recubrimiento del mortero, teniendo una mayor incertidumbre en los valores para el modelo numérico.

- Calibrar el mortero por separado para cada una de las piezas, tanto en pilas como en muretes, ya que al calibrar primero con un tipo de piezas en todos los prototipos de pilas y muretes, únicamente se apegara al comportamiento de esas piezas, por lo que si se utilizan los mismos datos para el otro tipo de pieza existirán ciertas variaciones que hagan que se desapegue el comportamiento para esos prototipos, existiendo la posibilidad que sea debido a una reducción de la resistencia del mortero debido al tipo de pieza.
- Llevar a cabo experimentaciones futuras con muros a tamaño real para comparar resultados experimentales con el modelo numérico propuesto, tanto en muros con refuerzo como en aquellos que tengan un refuerzo con malla de acero.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baqueiro, F., Gómez, M., Rivera, V., & Marín, V. (2009). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto. In Ingeniería (Vol. 13, Issue 2).

Bernat-Maso, E., Gil, L., & Roca, P. (2015). Numerical analysis of the load-bearing capacity of brick masonry walls strengthened with textile reinforced mortar and subjected to eccentric compressive loading. Engineering Structures, 91, 96–111. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.032

Brignola, A., Frumento, S., Lagomarsino, S., & Podestá, S. (2008). Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test. In International Journal of Architectural Heritage (Vol. 3, Issue 1, pp. 52–73). Routledge. https://doi.org/10.1080/15583050802138634

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2020). En el cinturón de fuego del pacifico la actividad sigue siento normal. www.gob.mx/cenapred.com

Comisión Federal de Electricidad (2015). Manual de diseño de obras civiles. Criterios Generales de análisis y diseño. Diseño por sismo.

Cruz A. V. & Krishna S. (2017). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciencia UNAM. www.ciencia.unam.mx

D'Altri, A. M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., & de Miranda, S. (2020). Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. Archives of Computational Methods in Engineering, 27(4), 1153–1185. https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x

Dizhur, D., & Ingham, J. M. (2013). Diagonal tension strength of vintage unreinforced clay brick masonry wall panels. Construction and Building Materials, 43, 418–427. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.015

Espíndola C. & Pérez C. (2018). ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden?. Ciencia. (Vol. 69, Issue 3).

G. Suarez. (1992). El sismo de Jalapa del 3 de enero de 1920. Revista de ingeniería sísmica. (Vol. 42, pp. 1-10, 1992).

G. Suárez & D. A. Novelo-Casanova (1992). A pioneering Aftershock study of the destructive 4 january 1920 Jalapa, Mexico, earthquake. Seismological research letters. (vol. 89, No. 5, pp. 1-4, September 2018).

INEGI (2021). Viviendas particulares habitadas por entidad federativa, serie de años censales de 1990 a 2020. Instituto nacional de estadística y geografía. https://www.inegi.org.mx

INEGI (2020). Viviendas. Instituto nacional de estadística y geografía. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/vivienda.aspx, 2020

Kostoglodov V. & Pacheco J. F. (1999). Cien años de sismicidad en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Geofísica. www.geofisica.unam.mx

López J., Oller S. & Oñate E. (1998). Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería. Campus Norte. Monografía.

Magomedov, I. A., & Sebaeva, Z. S. (2020). Comparative study of finite element analysis software packages. Journal of Physics: Conference Series, 1515(3). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032073

Milosevic, J., Lopes, M., Gago, A. S., & Bento, R. (2013). Testing and modeling the diagonal tension strength of rubble stone masonry panels. Engineering Structures, 52, 581–591. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.019

Najar A. (2018). Sismo 2017 en México: las lecciones no aprendidas que dejó el terremoto del 19 de septiembre. BBC News Mundo.

Norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de mampostería (NTC)(2020).

Ordaz A. (2019). En México, 7.4 millones de viviendas están construidas con materiales precarios. Forbes. https://www.forbes.com.mx, noviembre 2019

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2010) Industria de la construcción –Mampostería – Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto – métodos de ensayo. (NMX-C-464-ONNCCE-2010)

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2012) Industria de la construcción –Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de prueba. (NMX-C-404-ONNCCE-2012)

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2004) Industria de la construcción –Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – Resistencia a la compresión – método de prueba. (NMX-C-036-ONNCCE-2004)

Rodríguez-Mariscal, J. D., Ma, Q., & Solís, M. (2020). Experimental analysis of diagonal compression and splitting tests for the characterization of shear and tensile behavior of adobe masonry. Engineering Structures, 215. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110633

Ruiz J., Zepeda J.A., & Alcocer S.M. & Meli R. (1994). Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural. Memorias del IX

congreso nacional de ingeniería estructural. Vol. II, Zacatecas, Zac. Octubre 29. 1 pp. 596-605.

Triola, M. F. (2009). Estadística. Décima edición. Pearson educación. México 2009. Pp 904.

Universidad Autonoma de México (UNAM) (2018). Repositorio digital de la facultad de ingeniería. Conceptos básicos del método por elemento finito. México 2018.

SSN (2010). Sismos históricos. Sismo de 1920 en Xalapa, Veracruz. Servicio Sismológico Nacional. SSN. (pp. 1-5, 2010).

Zeevaert, L. (2001). Compendio de sismo-geodinámica : selección de articulos del Dr. Leonardo Zeevaert Wiechers sobre ingeniería sísmica. Fundación ICA.

Zreid, I., & Kaliske, M. (2018). A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete. Computational Mechanics, 62(5), 1239–1257. https://doi.org/10.1007/s00466-018-1561-1