



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE MUROS
DE MAMPOSTERÍA CONFINADA, CON RELACIÓN
DE ASPECTO MAYOR A 1, SUJETOS A CARGAS
UNIFORMES FUERA DEL PLANO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. MARÍA ELENA NOVELO ARJONA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

Aunque este trabajo hubiera servido para el Examen de Grado y fuera aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

Los muros de mampostería confinada (MMC) son construidos utilizando piezas artificiales y es reforzada perimetralmente con elementos de concreto reforzado. En la península de Yucatán se usan los MMC para vivienda y edificaciones de baja altura. En su diseño se deben considerar las cargas fuera del plano que son producidas por la acción del viento, ya que es una región vulnerable al paso de los huracanes. En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) se han realizado estudios experimentales para evaluar el comportamiento de los MMC sujetos a cargas fuera del plano. En dichos estudios se han observado distintas etapas en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano. Los modelos analíticos que se han desarrollado se han enfocado en determinar la resistencia de los MMC. Por otra parte, el comportamiento inicial de los MMC, en el cual se presentan los primeros agrietamientos, ha sido poco estudiado.

El objetivo general de este trabajo de investigación fue desarrollar modelos computacionales no lineales del Método del Elemento Finito (MEF) para analizar la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se realizaron ensayos para obtener propiedades mecánicas bloques huecos de concreto de tres celdas verticales sometidos a tensión y flexión. Se realizaron modelos computacionales de bloques sometidos a flexión, muretes y muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Se utilizaron elementos hexaedros tridimensionales de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para los bloques de mampostería y los elementos confinantes. En las juntas de mortero se utilizaron elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Se asumió un modo de agrietamiento Tipo I (abertura) y un comportamiento constitutivo de Hordijk et al. (1991) con modelo de grieta discreta.

Con base en los resultados obtenidos se concluyó que el módulo de elasticidad del bloque sometido a flexión es inferior al módulo de elasticidad del bloque sometido a compresión axial. Las grietas verticales al centro del MMC son las primeras en presentarse y producen un cambio en la rigidez del muro; posteriormente se

produce un agrietamiento horizontal en la primera junta de mortero en la superficie de carga del muro. Finalmente, los modelos computacionales desarrollados para los muretes y muros de mampostería confinada aproximan satisfactoriamente los resultados experimentales y reproducen el mecanismo de falla observado experimentalmente.

ABSTRACT

Confined masonry walls (CMW) are constructed using artificial units and are strengthened in their perimeter with reinforced concrete elements. In the Yucatan peninsula, CMW are used for low-rise buildings and housing. Since this is a hurricane prone region, out-of-plane wind loads must be considered in their design. Experimental studies have been carried out at the College of Engineering of the Autonomous University of Yucatan (FIUADY) in order to evaluate the behavior of CMW subjected to out-of-plane loads. In these studies, different stages have been observed in the out-of-plane load-displacement curves. The analytical models that have been developed were focused on determining the out-of-plane strength of CMW. On the other hand, the initial behavior of CMW, in which the first cracks appear, has been little studied.

The objective of this research was to develop non-linear computational models of the Finite Element Method (FEM) in order to analyze the initial evolution of cracking of confined masonry walls, with aspect ratio greater than one, subjected to out-of-plane uniform loads. Tensile and bending tests were carried out to obtain mechanical properties of hollow concrete blocks with three vertical cells. Computational models of blocks, walls and confined masonry walls subjected to out-of-plane loads were developed. Three-dimensional hexahedron elements with 8 nodes and 3 degrees of freedom per node were used for units and confining elements. A Type I cracking mode (opening) and Hordijk et al (1991) constitutive behavior were considered with discrete cracking model.

Based on this research results, it was concluded that the modulus of elasticity of the block subjected to flexural stresses are smaller than the modulus of elasticity of the block subjected to axial compressive stresses. The vertical cracks in the center of the wall were observed firsts, these cracks reduced the wall stiffness; then horizontal cracking occurs in the first mortar joint on the bearing surface of the wall. Finally, the computational models developed for walls and confined masonry walls had a good approximation with experimental results and reproduced the failure mechanism observed in experiments.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivo	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3. Alcance	3
1.4. Organización de la tesis	3
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	5
2.1. Propiedades índices de la mampostería y concreto	5
2.2. Ensayes de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano	7
2.3. Mecánica de Fractura	11
2.3.1 Clasificación del proceso de agrietamiento	12
2.4. Mecánica de Fractura no lineal	14
2.4.1 Comportamiento mecánico a tensión del concreto	14
2.5. Tipos de Elementos Finitos	15
2.5.1 Elementos sólidos.....	16
2.5.2 Elementos de interfaz plana	17
2.6. Modelación de grietas	18
2.7. Modelación de pilas de mampostería con el MEF	18
2.8. Modelación de muretes de mampostería con el MEF	19
2.9. Modelación de muros de mampostería con el MEF	20

2.10. Observaciones de la revisión de la literatura	24
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Descripción general.....	26
3.2. Selección de especímenes de estudios experimentales.....	27
3.2.1 Selección de muretes	27
3.2.2 Selección de muros de mampostería confinada.....	28
3.3. Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada.....	31
3.4. Determinación de propiedades mecánicas de bloques huecos de concreto.....	35
3.4.1 Ensaye a tensión	35
3.4.2 Ensaye a flexión	36
3.4.3 Modelo del Método del Elemento Finito de bloques a flexión.....	38
3.5. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes ...	39
3.5.1 Modelos elásticos lineales	39
3.5.2 Modelos no lineales	42
3.6. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada.....	44
3.6.1 Modelos elásticos lineales	44
3.6.2 Modelos no lineales	48
3.6.3 Modelos elásticos lineales (muros agrietados)	49
4. RESULTADOS	51
4.1. Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada....	51
4.2. Determinación de propiedades mecánicas de bloques huecos de concreto.....	55

1.2.1	Ensaye a tensión	55
1.2.2	Ensaye a flexión	56
1.2.3	Modelo de Método del Elemento Finito de bloques a flexión.....	57
4.3.	Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes ...	58
4.3.1	Modelos elásticos lineales	58
4.3.2	Modelos no lineales	62
4.4.	Desarrollo de Modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada.....	63
4.4.1	Modelos elásticos lineales	63
4.4.2	Modelos no lineales	69
4.4.3	Modelos elásticos lineales (muros agrietados)	81
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
5.1.	Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada....	85
5.2.	Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes ...	89
5.3.	Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada.....	93
6.	CONCLUSIONES.....	100
7.	REFERENCIAS	103
APÉNDICE A	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Falla por adherencia bloque - mortero	6
Figura 2.2 a) Falla por adherencia bloque - mortero y b) Falla combinada adherencia bloque - mortero y tensión en bloques	7
Figura 2.3 Evolución del agrietamiento en los ensayos (Moreno 2014)	10
Figura 2.4 Modos de fractura.	12
Figura 2.5 Tipos de materiales de acuerdo con su comportamiento.	12
Figura 2.6 Tipos de fracturamiento. Adaptado de Bazant y Planas, 1998.....	13
Figura 2.7 Curva esfuerzo - deformación de un espécimen de concreto sometido a tensión.....	14
Figura 2.8 Proceso de fractura en el concreto. Adaptado de Fernández, 2002	15
Figura 2.9 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico hexaedro.	16
Figura 2.10 Sistema de coordenadas naturales en un elemento de interfaz plana.	17
Figura 2.11 Enfoque de modelación del agrietamiento.	18
Figura 2.12 Resultados del modelo computacional. Paleo 2016.....	24
Figura 3.1 Espécimen para prueba de tensión por flexión perpendicular a las juntas (dimensiones en mm) (Flores, 2008).....	28
Figura 3.2 Espécimen para prueba de tensión por flexión paralela a las juntas (dimensiones en mm) (Flores, 2008).....	28
Figura 3.3 Sistema de carga y apoyo de muros de mampostería confinada.....	29
Figura 3.4 Dimensiones y carga axial de los muros.	30
Figura 3.5 Gráfica original carga - desplazamiento fuera del plano.	31
Figura 3.6 Gráfica corregida carga - desplazamiento fuera del plano.	33

Figura 3.7 Definición de etapas iniciales de comportamiento en la curva carga - desplazamiento fuera del plano.....	34
Figura 3.8 Definición del punto de cambio de pendiente.....	34
Figura 3.9 Identificación del patrón de agrietamiento en la curva carga - desplazamiento fuera del plano.....	35
Figura 3.10 Ensaye a tensión de bloques huecos de concreto.	36
Figura 3.11 Ensaye a flexión de bloques huecos de concreto de 3 celdas.	37
Figura 3.12 Localización de cargas y apoyos en el ensaye a flexión de bloques..	37
Figura 3.13 Modelo computacional del ensaye a flexión de bloques huecos de concreto.....	38
Figura 3.14 Ensaye experimental tensión por flexión perpendicular a las juntas. .	39
Figura 3.15 Modelo computacional del murete ensayado por Flores (2008).....	40
Figura 3.16 Ensaye experimental tensión por flexión paralela a las juntas	41
Figura 3.17 Modelo computacional del murete ensayado por Flores (2008).....	42
Figura 3.18 Geometría del modelo computacional del muro con relación de aspecto 1.4	45
Figura 3.19 Geometría del modelo computacional del muro con relación de aspecto 2.0	46
Figura 3.20 Condiciones de apoyo para los muros de relación de aspecto 1.4 y 2.0	47
Figura 3.21 Condiciones de carga para los muros de relación de aspecto 1.4 y 2.0	47
Figura 3.22 Posición de la grieta vertical y forma deformada del muro de mampostería confinada con agrietamiento vertical	50
Figura 3.23 Condiciones de carga y apoyo para los muros de mampostería confinada agrietados	50

Figura 4.1 Evolución del agrietamiento del muro (M-1.4-0).....	52
Figura 4.2 Evolución del agrietamiento del muro (M-1.4-3.33).....	53
Figura 4.3 Evolución del agrietamiento del muro (M-2.0-0).....	54
Figura 4.4 Evolución del agrietamiento del muro (M-2.0-3.33).....	55
Figura 4.5 Curva carga - desplazamiento del bloque sometido a flexión.	56
Figura 4.6 Resultados experimentales y computacionales de la curva carga - desplazamiento de bloques sometidos a flexión.	57
Figura 4.7 Desplazamientos en la dirección y del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.....	58
Figura 4.8 Esfuerzos normales a compresión σ_{zz} (superficie superior) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.....	59
Figura 4.9 Esfuerzos normales a tensión σ_{zz} (superficie inferior) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.....	59
Figura 4.10 Esfuerzos normales σ_{nn} en los elementos de interfaz (mortero) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.....	59
Figura 4.11 Desplazamientos en la dirección y del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta.....	60
Figura 4.12 Esfuerzos normales a compresión σ_{xx} (superficie superior) del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta.....	61
Figura 4.13 Esfuerzos normales a tensión σ_{xx} (superficie inferior) del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta.....	61
Figura 4.14 Esfuerzos normales σ_{nn} en los elementos de interfaz de mortero y bloque del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta	61
Figura 4.15 Esfuerzos normales en la dirección z (σ_{zz}) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.....	62
Figura 4.16 Esfuerzos normales en la dirección x (σ_{xx}) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta	63

Figura 4.17 Resultados computacionales del muro (M-1.4-0) del modelo elástico	65
Figura 4.18 Resultados computacionales del muro (M-1.4-3.33) del modelo elástico	66
Figura 4.19 Resultados computacionales del muro (M-2.0-0) del modelo elástico	67
Figura 4.20 Resultados computacionales del muro (M-2.0-3.33) del modelo elástico	68
Figura 4.21 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal sin calibrar	69
Figura 4.22 Mecanismo de falla del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal sin calibrar	70
Figura 4.23 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal sin calibrar	70
Figura 4.24 Mecanismo de falla del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal sin calibrar	71
Figura 4.25 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal sin calibrar	71
Figura 4.26 Mecanismo de falla del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal sin calibrar	72
Figura 4.27 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal sin calibrar	72
Figura 4.28 Mecanismo de falla del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal sin calibrar	73
Figura 4.29 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal calibrado	74
Figura 4.30 Resultados computacionales del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal calibrado	75

Figura 4.31 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal calibrado	76
Figura 4.32 Resultados computacionales del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal calibrado.....	77
Figura 4.33 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal calibrado.....	78
Figura 4.34 Resultados computacionales del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal calibrado.....	79
Figura 4.35 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal calibrado	80
Figura 4.36 Resultados computacionales del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal calibrado.....	81
Figura 4.37 Curva carga - desplazamiento del muro M-1.4-0 agrietado	82
Figura 4.38 Curva carga - desplazamiento del muro M-1.4-3.33 agrietado	82
Figura 4.39 Curva carga - desplazamiento del muro M-2.0-0 agrietado	83
Figura 4.40 Curva carga - desplazamiento del muro M-2.0-3.33 agrietado	84
Figura 5.1 Carga - desplazamiento al centro del murete sometido tensión por flexión perpendicular a la junta	89
Figura 5.2 Carga - desplazamiento al centro del murete sometido tensión por flexión paralela a la junta	91
Figura 5.3 Abertura de grieta en elementos de interfaz para el murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Pasos de carga para el análisis no lineal de los muros	48
Tabla 4.1 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-1.4-0)	51
Tabla 4.2 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-1.4-3.33)	52
Tabla 4.3 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-2.0-0)	53
Tabla 4.4 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-2.0-3.33)	54
Tabla 4.5 Resistencia a tensión de bloques huecos de concreto.....	56
Tabla 4.6 Rigidez de los bloques.	57
Tabla 4.7 Módulo de Elasticidad del bloque para los muros de mampostería confinada.....	63
Tabla 5.1 Normalización de las cargas con respecto a la carga $W1$	86
Tabla 5.2 Normalización de las cargas con respecto a la carga W_{max}	86
Tabla 5.3 Relación entre la rigidez tangente y la rigidez inicial.	87
Tabla 5.4 Relación entre la rigidez secante y la rigidez inicial.	87
Tabla 5.5 Relación entre el módulo de elasticidad del bloque sometido a flexión y compresión axial	88
Tabla 5.6 Rigidez de cada ciclo del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta dividido entre la rigidez del modelo lineal.....	90
Tabla 5.7 Rigidez del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta ...	91
Tabla 5.8 Módulo de elasticidad del bloque para los modelos computacionales de muretes (MPa).....	92

Tabla 5.9 Resistencia a tensión de la interfaz mortero – bloque de los modelos computacionales de muretes (MPa).....	93
Tabla 5.10 Módulo de Elasticidad del bloque y rigidez tangente inicial para los muros de mampostería confinada.....	94
Tabla 5.11 Módulo de elasticidad del bloque (MPa) de los muros de mampostería confinada.....	94
Tabla 5.12 Resistencia a tensión de los elementos de interfaz de los muros de mampostería confinada.....	95
Tabla 5.13 Resistencia a tensión de los elementos de interfaz para muretes (MPa)	97
Tabla 5.14 Resistencia a tensión del elemento de interfaz para muros de mampostería confinada (MPa)	97
Tabla 5.15 Módulo de elasticidad de los bloques asociado a diferentes valores de módulo de elasticidad del mortero.....	98
Tabla 5.16 Rigideces de los muros.	99

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Se conoce como mampostería al sistema tradicional de construcción con piezas de geometría regular o irregular de piedra natural o artificial, unidas por un mortero aglutinante. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México (GCM, 2017) la mampostería se clasifica en confinada, muros diafragma, reforzada interiormente y de piedra natural. La mampostería confinada es aquella que está construida utilizando piezas artificiales tales como tabiques sólidos o huecos, bloques de concreto vibrocomprimido, entre otros y es reforzada perimetralmente con elementos de concreto reforzado llamados dalas y castillos. La mampostería confinada es ampliamente usada en México y en otros países con fines estructurales.

Los muros de mampostería confinada pueden estar sujetos a cargas en el plano y fuera del plano. La Península de Yucatán es una región vulnerable al paso de los huracanes, los cuales producen cargas fuera del plano en los muros. Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento de muros de mampostería confinada sujeta a cargas fuera del plano y desarrollar ecuaciones para su diseño. Para lo anterior se requieren hacer estudios experimentales y desarrollar modelos analíticos y computacionales.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán se han realizado estudios para conocer las propiedades de los materiales usados en la región, así como el comportamiento de muros confinados sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio consideradas han sido: condiciones de apoyo (Varela et al. 2011), relación de aspecto y relación de esbeltez (Varela et al. 2012a, Varela et al. 2019), carga axial (Varela et al. 2012b), aberturas (Varela et al. 2015) y tipo de pieza (Moreno 2014). Recientemente, Varela et al. (2020) ensayaron experimentalmente cuatro muros con

relación de aspecto mayor a 1. Estos estudios experimentales se han complementado con el desarrollo de modelos analíticos para determinar la carga máxima.

Fernández et al. (2018) modelaron con el Método del Elemento Finito el comportamiento de muros de mampostería confinada con relación de aspecto menor a uno sujetos a cargas fuera del plano. Observaron en la curva carga-desplazamiento tres etapas. En la primera etapa el muro tiene un comportamiento de placa. En la segunda etapa el muro tiene un comportamiento de viga en la dirección horizontal y un comportamiento gobernado por la formación de un puntal en la dirección vertical. En la tercera etapa el muro tiene un comportamiento gobernado por mecanismos de puntales en las dos direcciones.

Los códigos de diseño consideran estados límites de falla y de servicio. El estado límite de servicio en mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano está relacionado a la primera etapa de comportamiento, en la que se presentan los primeros agrietamientos. Esta etapa no ha sido estudiada lo suficientemente debido a la dificultad para detectar los primeros agrietamientos en los ensayos experimentales.

Gracias a los programas computacionales basados en el Método del Elemento Finito (MEF) es posible modelar elementos y sistemas estructurales en el rango lineal y no lineal. La modelación computacional permite analizar detalladamente el comportamiento, así como disminuir costos y tiempo con respecto a los estudios experimentales.

1.2. Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar modelos computacionales no lineales del Método del Elemento Finito para analizar la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas uniformes fuera del plano.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar modelos lineales de elementos finitos de muretes de mampostería sujetos a cargas fuera del plano para analizar la rigidez de los muretes y la distribución de esfuerzos.
- Desarrollar modelos no lineales de elementos finitos de muretes de mampostería sujetos a cargas fuera del plano para analizar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano paralela y perpendicular a la junta.
- Desarrollar modelos lineales de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano para analizar la rigidez de los muros y la distribución de esfuerzos.
- Desarrollar modelos no lineales de elementos finitos de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano para analizar los primeros agrietamientos.
- Determinar la evolución del agrietamiento en muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

1.3. Alcance

Este trabajo está limitado a simular computacionalmente la evolución del agrietamiento de muros de mampostería confinada con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Los muros son hechos de bloques huecos de concreto de tres celdas verticales y 15 cm de espesor.

1.4. Organización de la tesis

En el capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y el contenido de la tesis.

En el capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura sobre las propiedades índice de la mampostería y los ensayos llevados a cabo de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Se presentan los trabajos sobre modelación con el Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para la realización de este trabajo de investigación, que incluye ensayos y modelos computacionales de bloques huecos de concreto, selección de información de ensayos experimentales y desarrollo de modelos computacionales de muretes y muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos y modelos computacionales de los bloques, así como los resultados computacionales de los muretes y muros de mampostería confinada. Se comparan los resultados computacionales con los resultados experimentales.

En el capítulo 5 se analizan las etapas de la curva carga – desplazamiento fuera del plano de los muros de mampostería confinada. Se analizan los resultados elásticos y no lineales de los modelos computacionales de muretes y muros de mampostería confinada.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Propiedades índices de la mampostería y concreto

En la FIUADY se han realizado estudios para determinar las propiedades índices de la mampostería de la región. Se obtuvo la resistencia a compresión axial de la mampostería (González 2006; González 2010), el módulo de elasticidad del concreto (Rosado 2014), el módulo de elasticidad del mortero y módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto (Hernández 2015) y la resistencia a tensión por flexión fuera del plano paralela y perpendicular a las juntas de mortero de la mampostería (Flores 2008; Dorantes 2011; Baeza 2014; Moreno 2014). A continuación, se describen los estudios realizados.

González (2006) estudió las características y propiedades de bloques huecos de concreto prefabricado de 15 cm x 20 cm x 40 cm, así como los tipos de morteros empleados en la ciudad de Mérida, Yucatán. Por medio de ensayos de pilas determinó la resistencia a compresión axial de la mampostería. González (2010) evaluó la resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería fabricada con bloques de concreto con espesor de 12, 15 y 20 cm mediante ensayos experimentales de pilas y bloques. Propuso estimar el módulo de elasticidad a compresión de la mampostería (E_m) en función de la resistencia a compresión de los bloques (f_p) con la ecuación 2.1 (en MPa). Propone aplicar un factor correctivo (F_{EE}) de 1.13, 1 y 0.9 para los espesores de 12, 15 y 20 cm respectivamente.

$$E_m = 1300F_{EE}\sqrt{f_p} \quad (2.1)$$

Rosado (2014) realizó ensayos de cilindros de concreto para determinar el módulo de elasticidad del concreto (E_c) en función de la resistencia a compresión axial promedio (f'_c) obtenida de los ensayos del concreto con agregados de origen calizo empleados en la región, obteniendo la ecuación 2.2 (en MPa).

$$E_c = 3520\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

Hernández (2015) determinó el módulo de elasticidad del mortero de la región obteniendo un promedio de 7994 MPa. Por otra parte, realizó ensayos de pilas de mampostería y bloques de concreto de tres celdas. Propuso la ecuación 2.3 (en MPa) para determinar el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto (E_p) en función de la resistencia a compresión axial sobre el área neta (f_p) de bloques huecos de concreto.

$$E_p = 3300\sqrt{f_p} \quad (2.3)$$

Flores (2008) determinó la resistencia a tensión por flexión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto con espesor de 15 cm y tres celdas mediante el ensaye de 43 muretes. La resistencia de las juntas a tensión perpendicular (f_{tpe}) promedio fue de 0.14 MPa y está asociada a la falla en la adherencia bloque – mortero a lo largo de una junta horizontal (Figura 2.1). La resistencia de las juntas a tensión paralela promedio (f_{tpa}) fue de 0.40 MPa y está asociada a dos tipos de falla: (1) adherencia bloque – mortero (Figura 2.2 (a)) y (2) tensión en los bloques (Figura 2.2 (b)). Concluyó que dicha resistencia depende de la adherencia bloque-mortero.

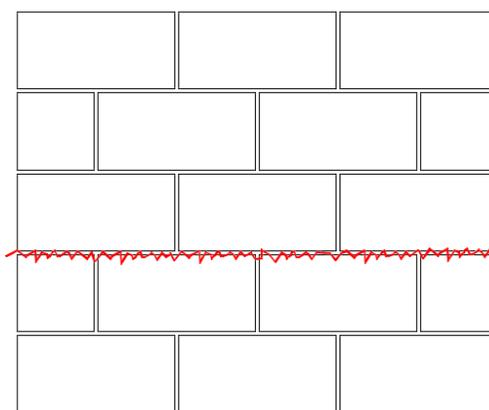


Figura 2.1 Falla por adherencia bloque - mortero

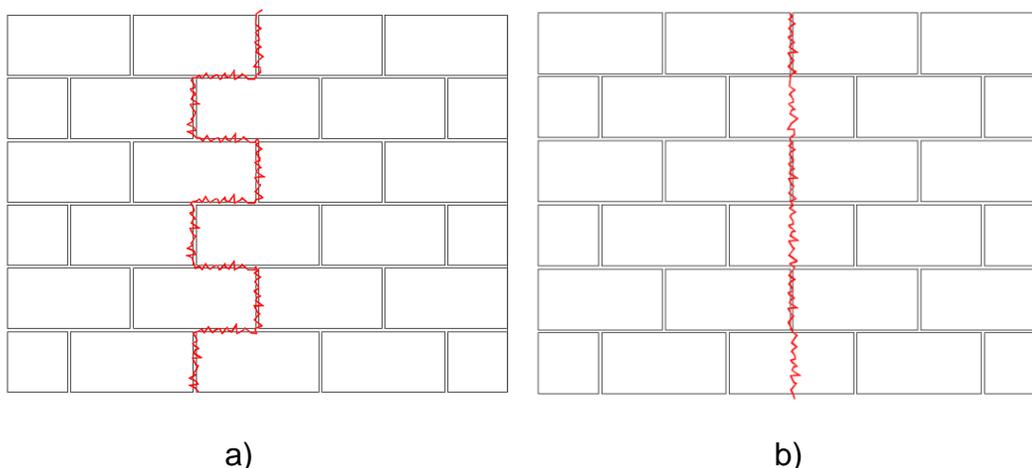


Figura 2.2 a) Falla por adherencia bloque - mortero y b) Falla combinada adherencia bloque - mortero y tensión en bloques

Dorantes (2011) determinó la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a la junta (f_{tpe}) y paralela a la junta (f_{tpa}) para la mampostería de bloques huecos de concreto de tres celdas con dimensiones nominales de 12 cm x 20 cm x 40 cm, obteniendo que f_{tpe} fue de 0.12 MPa y f_{tpa} fue de 0.37 MPa. Baeza (2014) determinó dichas resistencias para la mampostería de tabiques sólidos de arcilla con dimensiones nominales de 11.7 cm x 5.2 cm x 23.3 cm, obteniendo que f_{tpe} fue de 0.16 MPa y f_{tpa} fue de 0.56 MPa. Moreno (2014) determinó dichas resistencias para la mampostería de bloques huecos de concreto de dos celdas con dimensiones nominales de 12 cm x 20 cm x 40 cm, obteniendo que f_{tpe} fue de 0.13 MPa y f_{tpa} fue de 0.33 MPa.

2.2. Ensayes de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano

Varela et al. (2011) ensayaron 6 muros de Mampostería Confinada (MC) sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron las condiciones de apoyo, considerándose apoyos simples en 3 y 4 bordes. Se utilizaron bloques huecos de concreto de 3 celdas y espesor de 15 cm para la construcción. Las dimensiones de los muros fueron de 357 cm de longitud y 176 cm de altura. Se aplicó la carga por medio de bolsas de aire. Se observó que el patrón de agrietamiento de los especímenes fue

similar, formándose 5 segmentos (2 de forma trapezoidal, 2 triangular y 1 rectangular). El patrón de agrietamiento consistió en una grieta horizontal en el centro y grietas diagonales a 45° del centro hacia las cuatro esquinas del muro. En las curvas carga – desplazamiento fuera del plano se presentaron diferentes etapas. Cerca del final de la curva, en la última etapa, el comportamiento del muro fue asociado a un comportamiento de arco. Se observó que el desplazamiento vertical de los elementos confinantes (dallas y castillos) ocasionaron la rotación de los elementos confinantes superior e inferior y se generaron puntales de compresión. La falla estuvo asociada a la excesiva rotación de los segmentos del muro (inestabilidad de los segmentos).

Varela et al. (2012) estudiaron el comportamiento de seis muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron la relación de esbeltez y la de aspecto. Para estudiar la primera se ensayaron cuatro muros con espesor nominal de 12 cm a base de bloques de 12 cm x 20 cm x 40 cm y dos muros con espesor nominal de 15 cm a base de bloques de 15 cm x 20 cm x 40 cm. Se observó en la curva carga – desplazamiento la presencia de los agrietamientos en la primera etapa, así como la resistencia máxima en la última etapa de dicha curva. Para estudiar la relación de aspecto ensayaron dos muros de mampostería confinada con bloques de 15 cm x 20 cm x 40 cm. El primer muro con relación de aspecto de 0.75 y el segundo con relación de aspecto 1. Ambos muros fueron apoyados en los 4 lados. De igual forma se observó el mismo comportamiento en la curva carga – desplazamiento. El muro con relación de aspecto a 0.75 falló por la inestabilidad debida al desplazamiento de los bloques. El muro con relación de aspecto a 1 falló por aplastamiento de la mampostería.

Varela et al. (2015) ensayaron cuatro muros de mampostería confinada con cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron las aberturas (tres muros con ellas y uno sólido) y el tipo de castillo intermedio. Los muros tuvieron una relación de aspecto cercana a 0.75. Durante los ensayos se observaron las etapas mencionadas anteriormente en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano. La parte sólida de los muros especímenes se comportó en una primera etapa como una placa apoyada en tres lados. En la segunda etapa se comportó como una placa apoyada perimetralmente. Se determinó la resistencia analítica fuera del plano de cada uno

utilizando los métodos de puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Se compararon las resistencias analíticas con sus correspondientes experimentales. Con base en los resultados experimentales se concluyó que la resistencia fuera del plano incrementa conforme aumenta la relación de aspecto del panel del muro y la rigidez del castillo intermedio. Se observó que el método más adecuado para determinar la resistencia fuera del plano es el del puntal bidireccional.

Moreno et al. (2015) ensayaron 8 muros de MC a escala natural con cargas fuera del plano. Las variables estudiadas fueron el tipo de pieza (block hueco de concreto con 2 celdas y espesor de 12 cm, así como block hueco y sólido de arcilla) y la relación de aspecto (1 y 0.75). Se aplicó carga axial y carga fuera del plano uniforme por medio de bolsas de aire hasta llegar a la falla. Basándose en los resultados experimentales, se concluyó que a medida que la relación de aspecto aumenta, la fuerza fuera del plano aumenta. Se observó un comportamiento lineal elástico hasta la primera grieta, después de esto, el comportamiento fue no lineal, de igual firma se observó que el patrón de agrietamiento depende de la relación de aspecto. Se utilizó el Método de Puntal Bidireccional como modelo analítico para predecir la carga máxima y se concluyó que dicho método predice adecuadamente.

Moreno (2014) analizó los resultados reportados por Varela et al. (2011), Varela et al. (2012a), Varela et al. (2012b) y Varela et al. (2015). Adicionalmente, realizó el ensaye de 6 muros cuyas variables de estudio fueron la relación de aspecto y el tipo de pieza. Los tres primeros muros que ensayaron fueron de una relación de aspecto cercana a 0.75 y fueron a base de bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 cm x 20 cm x 40 cm (M1), de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 cm x 20 cm x 32.5 cm (M2) y de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 cm x 12 cm x 25 cm (M3). Los últimos tres fueron de una relación de aspecto cercana a 1 y a base de bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 cm x 20 cm x 40 cm (M4), de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 cm x 20 cm x 32.5 cm (M5) y de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 cm x 12 cm x 25 cm (M6). Durante el ensaye de los muros observó las etapas mencionadas. Concluyeron que el patrón de agrietamiento final depende de la relación de aspecto, pero no ni del tipo de pieza ni de la resistencia a compresión de la mampostería. Por otra parte, describieron los eventos de agrietamiento en la curva

carga – desplazamiento fuera del plano (Figura 2.3). Se observa que en un inicio se producen agrietamientos horizontales en el centro del muro, seguido por una etapa de degradación del panel de mampostería, que termina con la formación de las grietas a 45° para dar pie a la última etapa, asociada a un comportamiento de arco. Propone conservadoramente utilizar un valor del 25% de la resistencia máxima para obtener la resistencia de agrietamiento. Adicionalmente, desarrolló el Método del Puntal Bidireccional para predecir la carga máxima (Moreno et al. 2014).

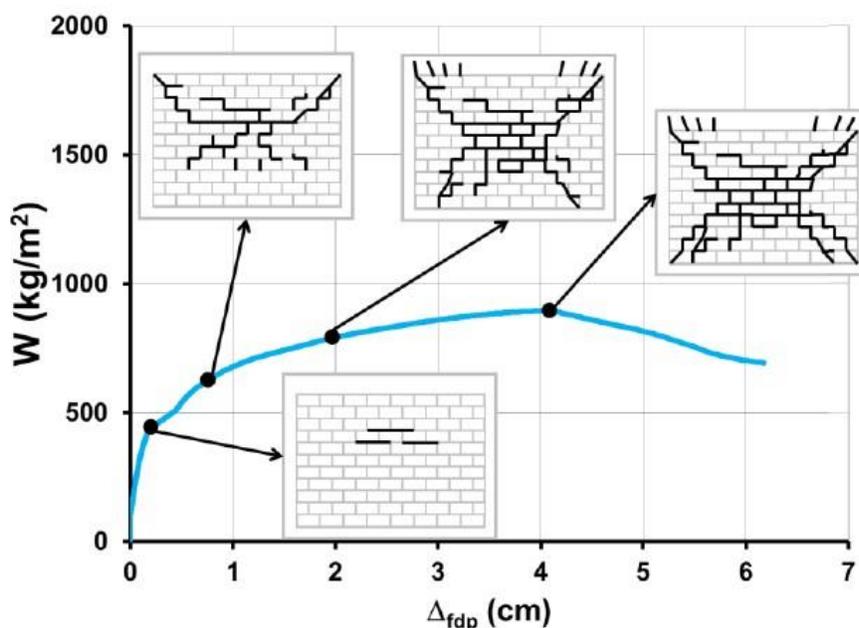


Figura 2.3 Evolución del agrietamiento en los ensayos (Moreno 2014)

Varela et al. (2020) ensayaron 4 muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. Se consideraron dos muros con relación de aspecto de 1.4 y dos muros con relación de aspecto 2.0. Para cada relación de aspecto se consideró un muro con carga axial nula y otro con una carga axial de 3.33 Kg/cm^2 . Se utilizaron bloques huecos de concreto de 3 celdas y espesor de 15 cm. Se aplicó la carga fuera del plano por medio de bolsas de aire. Se observó que el patrón de agrietamiento final de los muros fue en general similar y que la resistencia fuera del plano aumentaba a medida que la relación de aspecto o el esfuerzo de compresión axial aumentaba. La falla de los muros se atribuyó al aplastamiento de la mampostería. Se utilizó el Método de Puntal

Bidireccional como modelo analítico para predecir la carga máxima y se concluyó que dicho método predice adecuadamente.

2.3. Mecánica de Fractura

La Mecánica de la Fractura es el estudio de la respuesta y la falla de las estructuras como consecuencia de la aparición y propagación de agrietamientos de éstas (Shah et al. 1995). La aplicación de la Mecánica de la Fractura al análisis y diseño estructural es justificable por el hecho de que la falla en las estructuras de concreto se debe principalmente al agrietamiento y pueden ocurrir de forma catastrófica. Ciertos aspectos de la falla no pueden ser predichos satisfactoriamente por relaciones empíricas obtenidas de pruebas de laboratorio, sin embargo, pueden ser explicadas racionalmente a través de la Mecánica de la Fractura. El análisis estructural basado en los principios de la Mecánica de la Fractura permite estimar mejor el tamaño de grieta y la respuesta después de la falla durante el colapso (Gettu y Shah, 1994).

Dos aspectos fundamentales de la Mecánica de la Fractura son: el proceso de generación de grietas y el comportamiento de un material después que ha alcanzado una superficie de falla (Bazant y Planas, 1998). La Mecánica de la Fractura identifica tres modos básicos en que puede producirse el agrietamiento (Figura 2.4) y que describen tres movimientos cinemáticamente independientes (Oller, 2001):

- Modo I o de abertura. Las caras de la grieta se separan entre sí en dirección normal a éstas. Se desarrolla ante esfuerzos de tensión.
- Modo II o de desplazamiento. Las caras de la grieta se deslizan una sobre otra. Se desarrolla ante esfuerzos por cortante.
- Modo III o de torsión o de rasgado. Las caras de la grieta se deslizan lateralmente una con respecto a la otra. Se desarrolla ante esfuerzos por cortante.

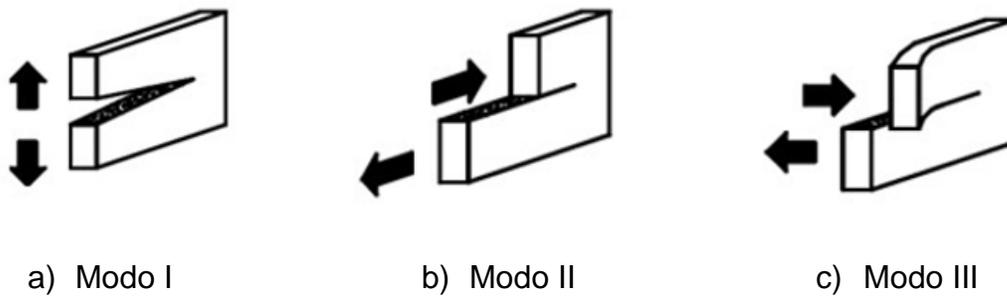


Figura 2.4 Modos de fractura.

2.3.1 Clasificación del proceso de agrietamiento

La mayoría de los materiales empleados en la ingeniería pueden clasificarse en tres grupos (Shah et al., 1995; Fernández, 2002), con base en su respuesta “esfuerzo – deformación” a tensión (Figura 2.5):

- Frágiles. Se caracterizan por una rápida disminución de los esfuerzos cuando el material se ha fracturado.
- Dúctil. Se caracterizan porque, una vez que se ha alcanzado el nivel de esfuerzo de fluencia, los esfuerzos se mantienen constantes o se incrementan gradualmente cuando la deformación aumenta.
- Cuasi-frágil. Se caracterizan porque, después de que el material alcanza su máximo nivel de esfuerzo, se presenta una disminución gradual de los esfuerzos.

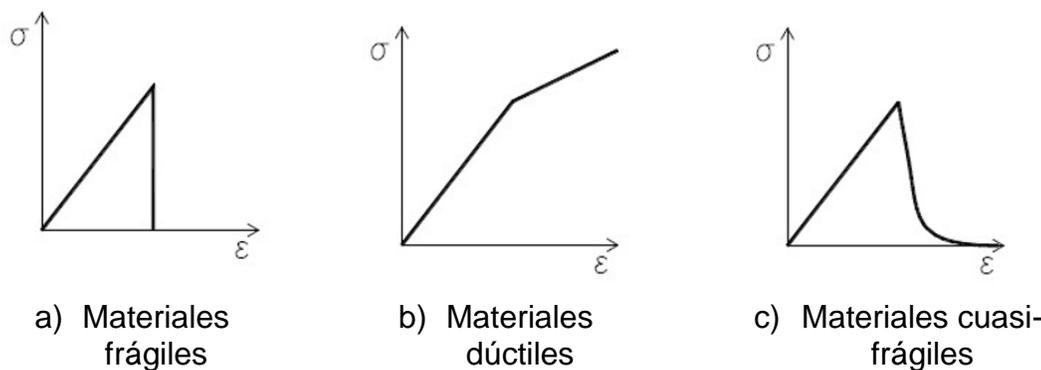
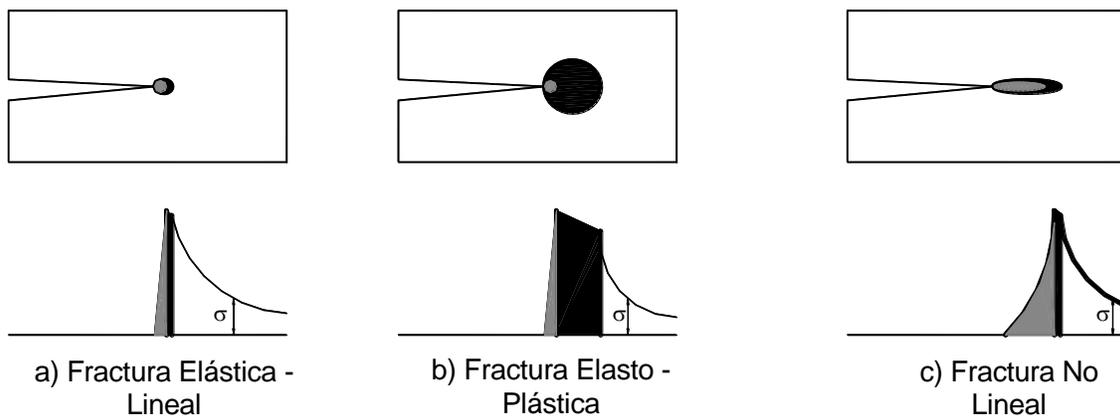


Figura 2.5 Tipos de materiales de acuerdo con su comportamiento.

La distribución de esfuerzos entorno a la punta de la grieta se caracteriza por el tipo de comportamiento del material. En ésta distribución pueden identificarse tres zonas: (1) zona de proceso de fractura, (2) zona plástica y (3) zona elástica. La primera es donde se lleva a cabo el proceso de agrietamiento y se caracteriza por un ablandamiento progresivo para el cual el nivel de esfuerzos va decreciendo conforme aumenta la deformación. Se encuentra rodeada por una zona plástica en la que se puede presentar plasticidad perfecta o endurecimiento por deformación. El material que se encuentra fuera de ambas zonas se considera elástico lineal. De acuerdo con el tamaño relativo de estas tres zonas se identifican tres tipos de fracturamiento que se muestran esquemáticamente en la Figura 2.6 (Bazant y Planas, 1998):

- a) Elástico lineal
- b) Elasto – plástico
- c) No lineal



- Zona de proceso de fractura
- Zona plástica
- Zona elástica

Figura 2.6 Tipos de fracturamiento. Adaptado de Bazant y Planas, 1998.

2.4. Mecánica de Fractura no lineal

2.4.1 Comportamiento mecánico a tensión del concreto

Los materiales cuasifrágiles presentan un comportamiento altamente no lineal después de que alcanzan el nivel de esfuerzo máximo a tensión. El concreto, por ejemplo, se caracteriza por tener una curva esfuerzo – deformación a tensión como se muestra en la Figura 2.7. En ésta puede observarse que el comportamiento esfuerzo – deformación del concreto se caracteriza por tener varios intervalos. El primer intervalo ocurre antes del punto A, el cual representa aproximadamente el 30 % del esfuerzo máximo a tensión. En este intervalo el comienzo de formación de grietas es despreciable. El segundo está comprendido entre los puntos A y B, que representa aproximadamente el 80 % del esfuerzo máximo a tensión. En éste se inicia la formación y propagación de las grietas internas, que se distribuyen en forma aleatoria en todo el espécimen de prueba propagándose en la dirección perpendicular al de la aplicación de la carga. El tercero se encuentra entre los puntos B y C; en ésta las grietas internas comienzan a conformar una grieta mayor, que crece conforme la carga va incrementándose. Este fenómeno se conoce como localización del daño o localización de deformaciones. La propagación de la grieta es estable hasta antes de presentarse el esfuerzo máximo, es decir, la grieta se propaga solamente si la carga se incrementa. El cuarto intervalo ocurre después del esfuerzo máximo; la grieta principal continúa propagándose aún si se disminuye la carga; en éste se produce un incremento de las deformaciones en la zona de localización, mientras que fuera de ella ocurre una descarga (Shah et al. 1995). Éste último intervalo se conoce como ablandamiento por deformación.

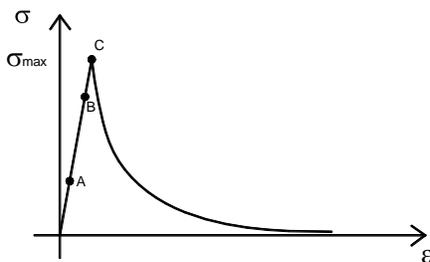


Figura 2.7 Curva esfuerzo - deformación de un espécimen de concreto sometido a tensión.

En el intervalo de ablandamiento por deformación, la no linealidad se debe a que en la zona de proceso de fractura pueden presentarse esfuerzos que se oponen a la abertura y propagación de la grieta. Se deben a diversos fenómenos, de entre los cuales destaca el puenteo de agregados, donde la propagación de la grieta es frenada debido a que durante su trayecto se encuentra con una partícula relativamente fuerte (granos de arena o grava) y para continuar propagándose la grieta debe rodear a la partícula. Si la partícula no es rota o se desprende de una de las caras, ésta es capaz de mantener continuidad en el material y transmitir esfuerzos (Van Mier, 1997; Gettu y Shah, 1994) tal y como se muestra en la Figura 2.8. Adicionalmente, la fricción de las caras de la grieta y los agregados también contribuyen a la no linealidad del proceso de fractura, de igual forma se oponen a la abertura de la grieta. En conjunto, el puenteo de agregados y la fricción interna generan lo que se conoce como esfuerzos cohesivos, los cuales se oponen a la abertura y propagación de la grieta.

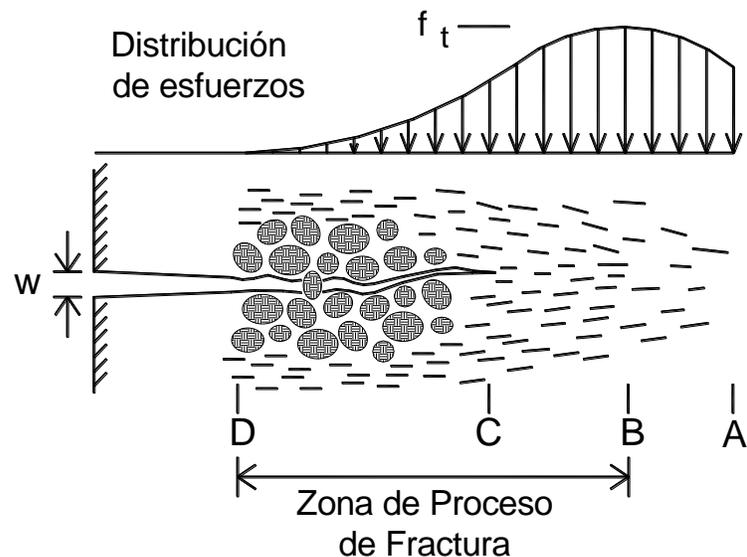


Figura 2.8 Proceso de fractura en el concreto. Adaptado de Fernández, 2002

2.5. Tipos de Elementos Finitos

Se presentan las características de elementos típicamente utilizados en la modelación tridimensional del agrietamiento en la mampostería, utilizando el programa computacional DIANA (TNO, 2019).

2.5.1 Elementos sólidos

Los elementos isoparamétricos hexaedros (elementos sólidos) de 8 nodos son denominados "HX24L" en DIANA (Figura 2.9). Utiliza una interpolación lineal y tiene un esquema de integración de Gauss de $2 \times 2 \times 2$. La aproximación del campo de desplazamientos u, v, w , puede ser expresada en función de las coordenadas naturales ξ, η, ζ . Los desplazamientos u, v, w son en la dirección x, y, z , respectivamente.

La relación constitutiva general está expresada en la Ecuación (2.4).

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.4)$$

En donde $\{\sigma\}$ es el vector de esfuerzos $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})^T$, $\{\varepsilon\}$ es el vector de desplazamientos relativos $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})^T$ y $[D]$ es la matriz constitutiva (Ecuación 2.5), en función del módulo de elasticidad E y la relación de poisson ν .

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{1-\nu} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

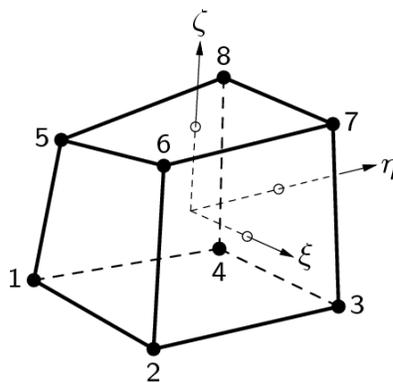


Figura 2.9 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico hexaedro.

2.5.2 Elementos de interfaz plana

En DIANA los elementos de interfaz plana de ocho nodos son denominados “Q24IF” (Figura 2.10). Este elemento está basado en una interpolación lineal. Para él se aplica una integración de Newton – Cotes de 2×2 . Los elementos de interfaz describen su comportamiento en las coordenadas naturales n , t , s en términos de la relación entre los desplazamientos relativos normales (Δu_n) y cortantes (Δu_t , Δu_s) y las tracciones normales (t_n) y cortantes (t_t , t_s).

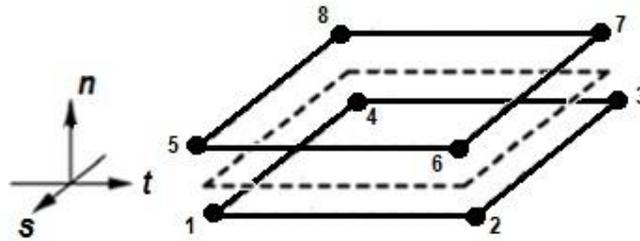


Figura 2.10 Sistema de coordenadas naturales en un elemento de interfaz plana.

La relación constitutiva general, es asumida incrementalmente lineal (Ecuación 2.6).

$$\{t\} = [D]\{\Delta u\} \quad (2.6)$$

En donde $\{t\}$ es el vector de tracciones $(t_n, t_t, t_s)^T$, $\{\Delta u\}$ es el vector de desplazamientos $(\Delta u_n, \Delta u_t, \Delta u_s)^T$ y $[D]$ es la matriz (Ecuación 2.7).

$$D = \begin{bmatrix} D_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & D_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Las Ecuaciones (2.8, 2.9, 2.10) definen los coeficientes de la matriz de rigidez tangencial, para el caso de modelación de agrietamiento discreto con elementos de interfaz plana.

$$D_{nn} = \frac{\partial t_n}{\partial \Delta u_n} \quad (2.8)$$

$$D_{tt} = \frac{\partial t_t}{\partial \Delta u_t} \quad (2.9)$$

$$D_{ss} = \frac{\partial t_s}{\partial \Delta u_s} \quad (2.10)$$

2.6. Modelación de grietas

Para el modelado de materiales que presentan grietas cohesivas se pueden usar tres enfoques básicos (Bazant y Planas, 1998): con grieta discreta entre los elementos (Figura 2.11 (a)), con grieta distribuida en elementos continuos (Figura 2.11 (b)) y con grieta embebida en el interior del elemento (Figura 2.11 (c)).

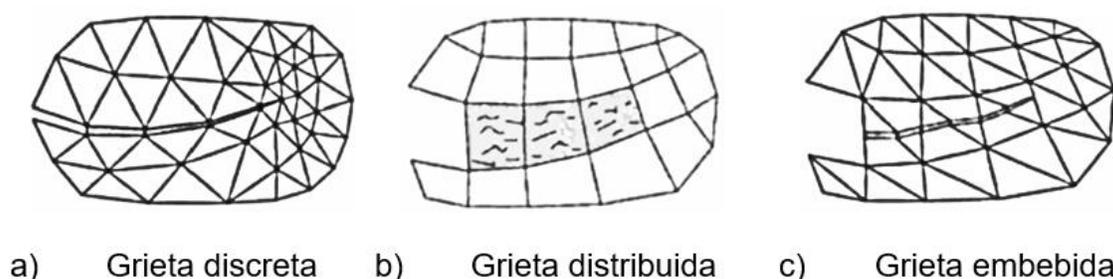


Figura 2.11 Enfoque de modelación del agrietamiento.

En el modelo de grieta discreta, la propagación del agrietamiento se presenta entre los elementos, se simulan las fuerzas cohesivas ya sea por condiciones de frontera o usando elementos de interfaz conectando los nodos en ambos lados de la grieta. En el modelo de grieta distribuida, se consideran formulaciones convencionales de elementos finitos modificando las relaciones constitutivas esfuerzo – deformación para simular el efecto producido por la abertura de la grieta en el elemento. En el modelo de grieta embebida en el interior del elemento, se considera la localización de la zona de agrietamiento, reemplazando la aproximación del campo de desplazamientos para considerar la aparición de la grieta. (Bazant y Planas, 1998).

2.7. Modelación de pilas de mampostería con el MEF

González (2010) realizó modelos tridimensionales de pilas sujetas a compresión axial, con el Método del Elemento Finito, para conocer la distribución de esfuerzos en los materiales. Realizó un modelo de pila sin agrietamiento y uno con agrietamiento, en el que asumió que la grieta pasa por el centro de la pila. Para ambos modelos se consideró que el material tiene un comportamiento elástico lineal e isotrópico. Calculó

los valores del módulo de elasticidad de los materiales de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Observó que los máximos esfuerzos de compresión se presentan en el mortero para ambos modelos. Concluyó que el módulo de elasticidad de la mampostería depende aproximadamente en un 90% del módulo de elasticidad de los bloques y en un 10% del módulo de elasticidad del mortero.

Hernández (2015) desarrolló modelos analíticos (en dos y tres dimensiones) y computacionales del comportamiento no lineal hasta la falla de pilas de mampostería de bloques huecos de concreto sujetas a compresión axial con base en resultados experimentales. En los modelos computacionales en dos dimensiones se utilizaron elementos isoparamétricos cuadriláteros de 4 nodos de esfuerzo plano y el criterio de falla de Drucker-Prager. En los modelos computacionales en tres dimensiones se utilizaron elementos isoparamétricos hexaedros de 20 nodos, elementos de interfaz de 16 nodos, para simular el agrietamiento de la pila y el criterio de falla de Drucker-Prager. Se concluyó que el modelo en dos dimensiones ajusta exactamente al modelo analítico de la pila, mientras que el modelo en tres dimensiones ajusta satisfactoriamente al modelo analítico.

2.8. Modelación de muretes de mampostería con el MEF

Paleo (2016) modeló muretes por medio del MEF para calibrar los parámetros del modelo de un muro de mampostería confinada. Estos modelos permitieron verificar la rigidez del sistema y determinar la resistencia a tensión por flexión perpendicular de las juntas. El primer parámetro permite verificar el valor del módulo de elasticidad de los bloques. El segundo determinar la resistencia a tensión del elemento de interfaz utilizado en la junta de mortero. El murete seleccionado para verificar el modelo fue el ensayado por Dorantes (2011), que corresponde al ensaye para obtener la resistencia a tensión por flexión perpendicular de las juntas. En los bloques de concreto se utilizaron elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; las dimensiones de las aristas de los elementos fueron de 2.5 cm. Las juntas fueron modeladas con elementos planos de interfaz de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Los primeros se colocaron en los sitios dónde se colocó mortero. Se obtuvo

una carga máxima de 3070 N que corresponde al 94% de la carga máxima promedio obtenida experimentalmente por Dorantes (2011).

2.9. Modelación de muros de mampostería con el MEF

Se han realizado diversas investigaciones a nivel internacional sobre modelación de la mampostería, con el MEF. Se presenta a continuación algunos estudios computacionales de muros de mampostería con cargas fuera del plano.

Lourenço (2000) propuso un modelo para el análisis numérico de la mampostería sometida a cargas fuera del plano. Utilizó un modelo continuo anisotrópico capaz de reproducir el comportamiento elástico e inelástico. En éste modelo empleó el criterio de falla de Rankine para la parte a tensión y el criterio de falla de Hill para la parte a compresión. El modelo fue validado con resultados experimentales obtenidos de ensayar cinco muros de mampostería a base de bloques huecos de concreto. Los muros fueron de 15 cm de espesor y una altura de 280 cm, su relación de aspecto varió de 0.80 a 0.50, y fueron ensayados con una presión constante fuera del plano. Para el análisis numérico se utilizó el software DIANA y se emplearon elementos finitos tipo cascarón degradados de 8 nodos con una integración en el plano de Gauss de 2 x 2 y una integración a través del espesor de Simpson de 7 puntos. El modelo fue capaz de predecir el comportamiento de la mampostería a flexión con una buena aproximación.

Milani et al. (2006) presenta un modelo simple de homogenización para el análisis de la mampostería sometida a cargas fuera del plano. La superficie de falla anisotrópica fuera del plano se obtiene mediante un enfoque de análisis de límites. Se utiliza una representación polinómica de los componentes del tensor de esfuerzos en un número finito de subdominios se combina con elementos finitos triangulares utilizados para analizar los límites superior e inferior. Los resultados del análisis límite permitieron identificar la distribución de fuerzas internas en las secciones críticas y obtener los modos de colapso, así como las cargas de falla. Para el análisis límite inferior, se adoptó un análisis de elementos finitos basado en un elemento placa triangular a flexión. Para el análisis límite superior, se adoptó un modelo de elementos finitos basado en un elemento triangular. El campo de desplazamiento se supuso lineal

dentro de cada elemento y las velocidades nodales tomaron como variables de optimización. Los cálculos numéricos se compararon con resultados experimentales de dos universidades. Para la primera fueron muros a base de bloques huecos de concreto de 280 cm de altura y 340, 500 (3) y 580 cm de ancho, sometidos a carga fuera de plano. Para la segunda cinco muros de tabiques sólidos de arcilla de 247.5 cm de altura y 560 cm de ancho. Se encontró una buena aproximación en todos los casos. Se debe tomar en cuenta la incapacidad para predecir desplazamientos en colapso y la suposición de una capacidad de deformación plástica del material infinita.

Beam y Schultz (2011) desarrollaron modelos de elementos finitos no lineales, y los utilizaron para simular la respuesta de doce muros postensionados de mampostería 354 cm de altura, ancho de 81 cm y espesor de 10 cm aplicando cargas uniformes fuera del plano. Las variables incluyeron el tipo de mampostería, relación de esbeltez, grado de restricción, y la magnitud de pretensado. Las relaciones fuerza-desplazamiento obtenidas de las pruebas experimentales de los muros fueron simuladas utilizando modelos desarrollados mediante el uso de una versión ampliada del programa de Dynamic Response Analysis of Inelastic Two- Dimensional Structures (DRAIN-2DX), y los resultados mostraron la influencia de la resistencia a la tensión, tipo de mampostería, magnitud de pretensado, y las restricciones en respuesta a la carga lateral fuera de plano. Los muros de mampostería postensados sometidos a cargas fuera del plano mostraron dos fases distintas de comportamiento de carga-deflexión. La primera se definió por la respuesta elástica lineal de la carga hasta el agrietamiento de la mampostería a causa de la tensión por flexión. El segundo comportamiento fue característico de la fase postagrietamiento y la respuesta fue no lineal hasta la falla. Se utilizaron elementos de dos nodos tipo marco para modelar la mampostería en el muro postensado. El comportamiento no lineal del elemento, bajo carga axial y flexión combinada, se aproximó por relaciones esfuerzo – deformación multilineales para los elementos. Los cálculos indican que la respuesta de desplazamiento de carga de los muros de mampostería está influenciada por la resistencia a la tracción de la mampostería y que la rigidez y el número de restricciones tienen un efecto directo en la capacidad de carga máxima y la pendiente de descarga posterior al pico. Se concluyó que las simulaciones realizadas de elementos finitos

reproducen el comportamiento inicial elástico de los muros de las pruebas, carga máxima, el desplazamiento en la carga máxima, y el comportamiento posterior a la carga máxima.

Reccia et al. (2012) investigaron los resultados del Método de Elementos Discretos (DEM) aplicado a los análisis de límites cinemáticos del comportamiento fuera del plano de los muros de mampostería. Los elementos discretos permiten hacer frente a los procesos de interacción, fractura y fragmentación. Se propuso un modelo discreto de mampostería, que supone que los bloques son rígidos y están conectados por una interfaz de mortero: esto es apropiado para la mampostería histórica, donde el mortero es mucho más deformable que los bloques y el grosor de las juntas es insignificante. En el estudio analizaron dos tipos de mampostería, uno que tiene piezas traslapadas y presenta un comportamiento monolítico y otro que tiene piezas apiladas y se comporta como dos paneles separados. Para el análisis se utilizó el software Y2D para análisis MEF/DEM de código abierto. La malla es de elementos 2D de tres nodos con longitud característica de 6 cm, cada block fue discretizado en ocho elementos, el número de elementos en el modelo varía de 64 a 256. El espesor del muro se mantuvo en 48 cm y la relación de esbeltez varió de 0.4 a 4. El módulo de elasticidad de los bloques fue de 1000 MPa, el del mortero de 1×10^{-6} MPa y el coeficiente de Poisson para ambos fue nulo. Debido al espesor de los muros y el hecho de que la mampostería estudiada consistía en paneles dobles, los modos de falla eran deslizamiento o volteo. Concluyeron que la aplicación del método es adecuada para simular el comportamiento de ese tipo de muros ya que presenta resultados aproximados.

Paleo (2016) simuló computacionalmente la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano mediante modelos tridimensionales no lineales con el Método del Elemento Finito. Se realizaron ensayos experimentales y se desarrollaron modelos computacionales para determinar el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto de tres celdas sometidos a flexión. De los resultados de los ensayos y modelos de los bloques se observó que el módulo de elasticidad empleado en los modelos de elementos finitos es 1120 MPa, el cual es un valor inferior al de 8560 MPa observado por Hernández (2015) de pruebas a compresión axial. Se utilizaron elementos hexaedros tridimensionales de 8 nodos y

3 grados de libertad por nodo para los bloques huecos de concreto y los elementos confinantes. Para las juntas de mortero se consideraron elementos planos de interfaz de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Se asumió que el modo básico de agrietamiento es modo I (modo de abertura), con un comportamiento frágil al formarse las grietas. Se calibró el modelo de muros de mampostería confinada considerando los resultados experimentales de tres ensayos a escala natural de muros de mampostería confinada con relación de aspecto cercana a 0.75. En la Figura 2.12 se grafica la relación carga – desplazamiento fuera del plano al centro del MMC obtenida experimentalmente y con el modelo computacional. En el modelo computacional se consideró una resistencia a tensión de la junta de 0.29 MPa. En la parte inferior de la figura se presentan los eventos de agrietamiento observados en el modelo computacional; las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga) y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro (cara libre). De los resultados computacionales se obtuvo que la primera se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques (Figura 2.12.1). El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro (Figura 2.12.2). El tercer evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la junta de mortero de la hilada superior de bloques (Figura 2.12.3). Finalmente se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos (Figura 2.12.4). Con base en los resultados obtenidos se concluyó que los modelos computacionales desarrollados aproximan adecuadamente los resultados experimentales. De igual forma se concluye que el modelo computacional permite registrar los agrietamientos en la cara posterior del muro, que son difíciles de observar en los ensayos experimentales.

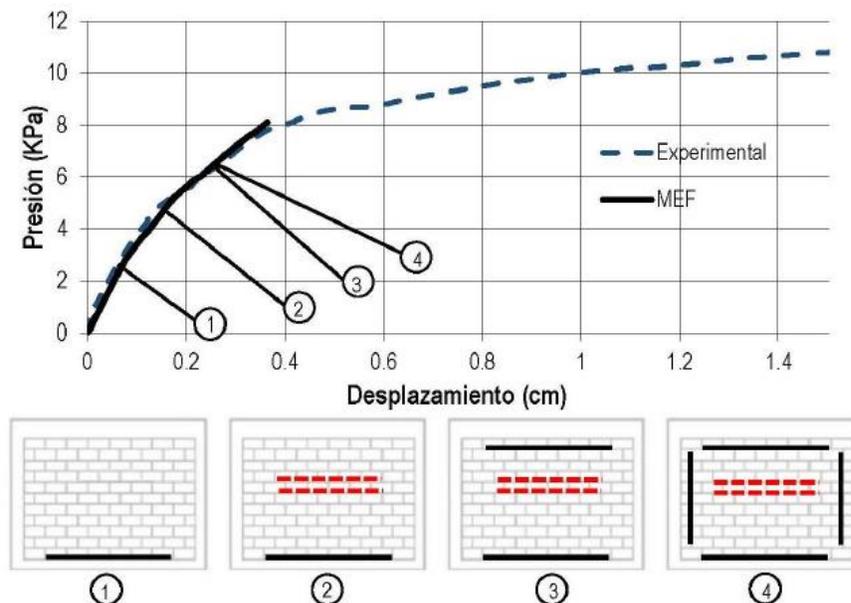


Figura 2.12 Resultados del modelo computacional. Paleo 2016.

2.10. Observaciones de la revisión de la literatura

De la revisión de la literatura se concluye que:

- Se cuenta con información experimental de la resistencia a tensión por flexión de la mampostería y del comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano.
- Las variables que más influyen en la resistencia máxima de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano son: relación de aspecto, resistencia a compresión axial de la pieza y relación de esbeltez.
- El patrón de agrietamiento final depende de la relación de aspecto, pero no ni del tipo de pieza ni de la resistencia a compresión de la mampostería.
- Los estudios para determinar la carga de agrietamiento en muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano han sido escasos.
- La mayoría de los modelos del MEF desarrollados han sido utilizados para mampostería no reforzada.
- En los trabajos con modelación con el MEF de mampostería con cargas fuera del plano se han empleado mayormente modelos no lineales con un enfoque de falla distribuida en los elementos continuos tipo placa.

- Se puede modelar el agrietamiento en muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano utilizando modelos de fractura discreta.
- En los modelos del Método del Elemento Finito de muretes de mampostería tridimensionales sujetos a cargas fuera del plano, se requiere utilizar un módulo de elasticidad reducido en los bloques para aproximar la rigidez de los muretes.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Descripción general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar modelos computacionales no lineales del Método del Elemento Finito para analizar la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se usaron modelos tridimensionales con elementos isoparamétricos hexaédricos y elementos de interfaz plana. Primero se analizaron muretes de mampostería simple. Estos modelos permitieron entender el tipo de falla que se presenta en la mampostería. Posteriormente se analizaron muros de mampostería confinada. Los modelos se calibraron con base en los resultados de los ensayos experimentales. Para alcanzar el objetivo de este trabajo de investigación se realizaron las siguientes actividades:

1. Selección de especímenes de estudios experimentales.
 - 1.1 Muretes.
 - 1.2 Muros de mampostería confinada.
2. Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada.
3. Determinación de propiedades mecánicas de bloques huecos de concreto.
 - 3.1 Ensaye a tensión.
 - 3.2 Ensaye a flexión.
 - 3.3 Modelo de Método del Elemento Finito de bloques a flexión.
4. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes.
 - 4.1 Modelos elásticos lineales.
 - 4.2 Modelos no lineales.
5. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada.
 - 5.1 Modelos elásticos lineales.
 - 5.2 Modelos no lineales.
 - 5.3 Modelos elásticos lineales (muros agrietados).

3.2. Selección de especímenes de estudios experimentales

Se consideraron dos tipos de ensaye. El primero corresponde al ensaye de muretes sujetos a cargas fuera del plano, los cuales son utilizados para obtener la resistencia a tensión por flexión perpendicular y paralela a las juntas. El segundo corresponde al ensaye de muros de mampostería confinada a escala natural sujetos a cargas uniformes fuera del plano.

3.2.1 Selección de muretes

La resistencia a tensión por flexión fuera del plano de la mampostería puede ser perpendicular o paralela a las juntas. Dicha clasificación se refiere a la dirección en la que actúan los esfuerzos de tensión, causados por la flexión, con respecto a las juntas horizontales de los muros.

Los muretes seleccionados fueron los ensayados por Flores (2008). Se utilizó información experimental de los ensayos realizados para obtener la resistencia a tensión por flexión perpendicular y paralela a las juntas. Se utilizó información de los muretes construidos con bloques de la planta 5. Se seleccionó este estudio experimental ya que los muretes ensayados eran de bloques huecos de concreto de tres celdas y 15 cm de espesor, que es el tipo de pieza utilizado en los muros de mampostería confinada seleccionados, como se indica en la siguiente sección.

Las dimensiones de los especímenes para pruebas de flexión por tensión perpendicular a las juntas fueron de 100 cm de largo (L) por 120 de ancho (H) (Figura 3.1). Las dimensiones de los especímenes para pruebas de flexión por tensión paralela a las juntas fueron de 160 cm de largo (L) por 120 cm de ancho (H) (Figura 3.2). El ensaye se llevó a cabo de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E72-02. Se seleccionaron especímenes de la planta 5 que corresponden a bloques con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 40 cm (espesor x altura x longitud) y un espesor promedio de las paredes de 2.52 cm, una resistencia a compresión promedio sobre área neta de los bloques (f_p) de 9.52 MPa y mortero 1:2:7 con resistencia a compresión de 3.43 MPa.

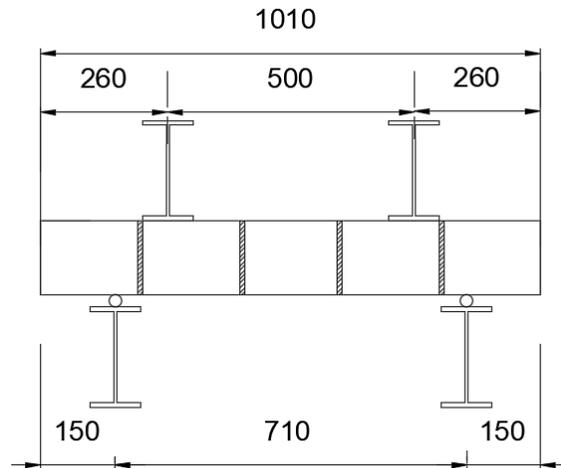


Figura 3.1 Espécimen para prueba de tensión por flexión perpendicular a las juntas (dimensiones en mm) (Flores, 2008).

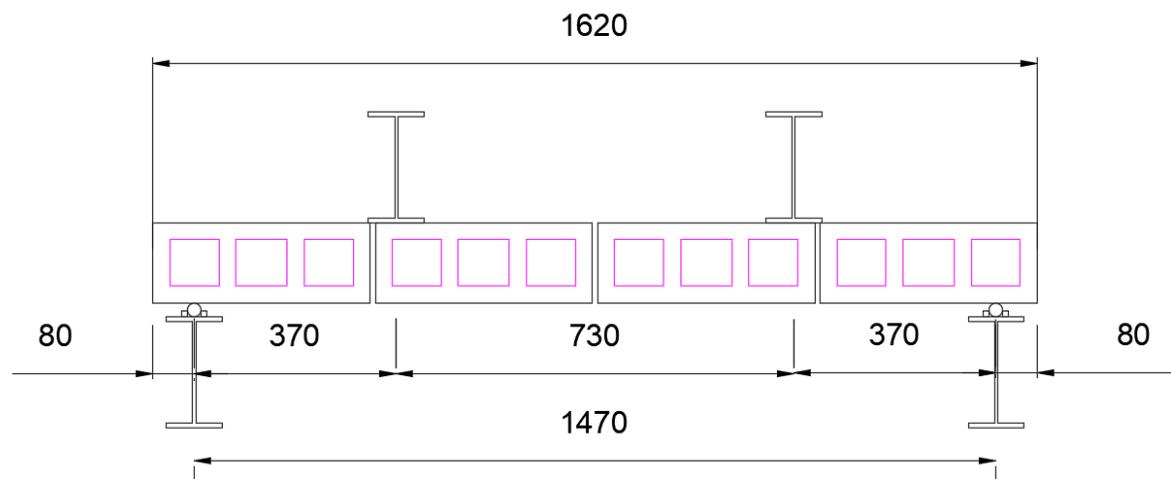


Figura 3.2 Espécimen para prueba de tensión por flexión paralela a las juntas (dimensiones en mm) (Flores, 2008).

3.2.2 Selección de muros de mampostería confinada

Los muros de mampostería confinada seleccionados fueron los ensayados por Cacep (2019) y publicados por Varela et al. (2020). Los muros tenían una relación de aspecto mayor a uno y fueron hechos de bloques huecos de concreto de tres celdas verticales. Los muros fueron sometidos a cargas uniformes fuera del plano y para aplicar las cargas se utilizaron dos bolsas de aire, que se apoyaron en un muro de reacción. La

carga axial se aplicó utilizando dos actuadores hidráulicos. La presión de dichos actuadores se mantuvo constante durante el ensaye utilizando un controlador de presión hidráulico; este controlador se conecta a una bomba hidráulica. Los apoyos se realizaron empotrando la base del muro y restringiendo el deslizamiento fuera del plano de la periferia del muro mediante un sistema de soporte a base de perfiles tubulares de acero localizados a lo largo de los elementos confinantes. En la Figura 3.3 se presentan imágenes del sistema de carga y apoyo de los muros.

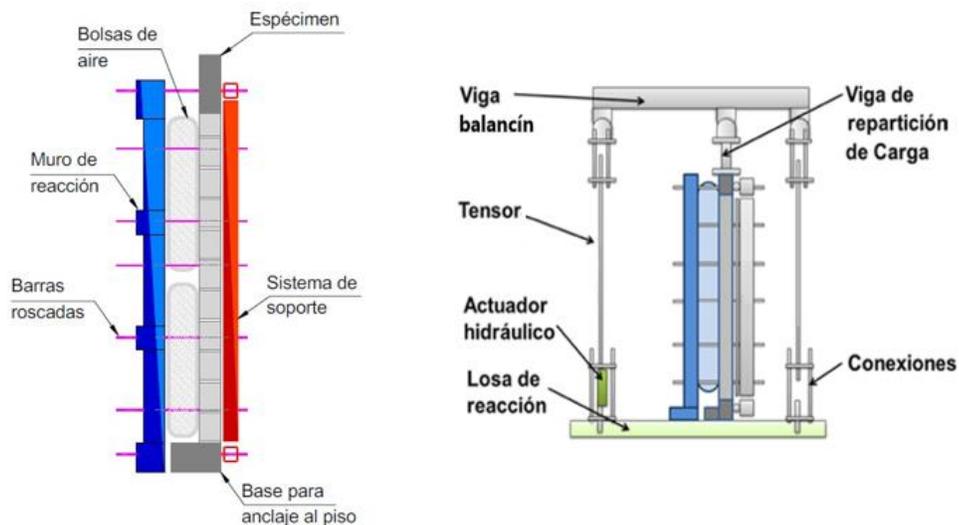


Figura 3.3 Sistema de carga y apoyo de muros de mampostería confinada (Cacep, 2019).

Las características de los muros de mampostería confinada fueron:

- Altura (H) de los muros: 271 cm.
- Longitud (L) de los muros: 193 cm y 133 cm.
- Espesor (t) de los muros: 15 cm.
- Relación de aspecto (H/L) de los muros: 1.4 y 2.
- Esfuerzos axiales: 0 kg/cm² y 3.33 kg/cm².
- Mortero: 1:2:7 en proporciones por volumen (cemento Portland: cal: arena).

- Piezas: Bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 x 20 x 40 cm. (espesor x altura x longitud).
- Resistencia a compresión axial de los bloques huecos de concreto sobre área neta (f_p): 9.66 MPa.
- Resistencia a compresión axial del mortero (f_j): 2.86 MPa.
- Resistencia a compresión axial del concreto (f_c): 26.93 MPa.
- Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal (f_y): 425.88 MPa.
- Resistencia a compresión de la mampostería sobre área total (f_m): 3.28 MPa.
- Módulo de elasticidad de la mampostería sobre área total (E_m): 3494.46 MPa.
- Espesor promedio de la junta: 1 cm.

En la Figura 3.4 se presentan las dimensiones y la carga axial de los muros de mampostería confinada seleccionados.

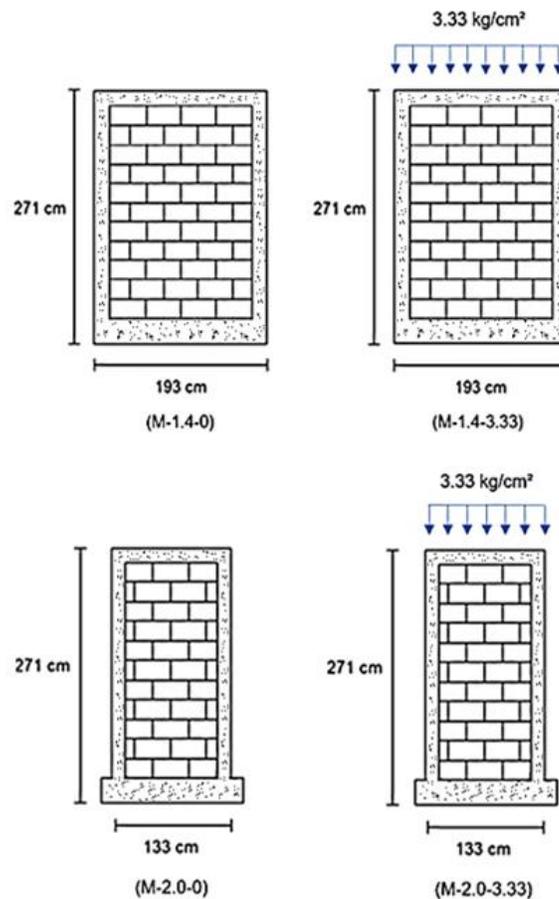


Figura 3.4 Dimensiones y carga axial de los muros.

3.3. Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada

Los muros se ensayaron bajo cargas fuera del plano monotónicas incrementales hasta alcanzar la falla (Cacep 2019). La prueba se detuvo ocasionalmente con el propósito de marcar en los muros la aparición y el avance del agrietamiento. La detención de la prueba generó ligeros cambios de presión en las bolsas de aire. Durante los ensayos algunas lecturas de desplazamientos se vieron afectadas por ligeros movimientos en los potenciómetros lineales. Adicionalmente, la superficie de aplicación de la carga fuera del plano por medio de las bolsas de aire no abarcó el área total de los muros. En la Figura 3.5 se presenta la curva carga-desplazamiento de un muro como se obtiene después de un ensaye.

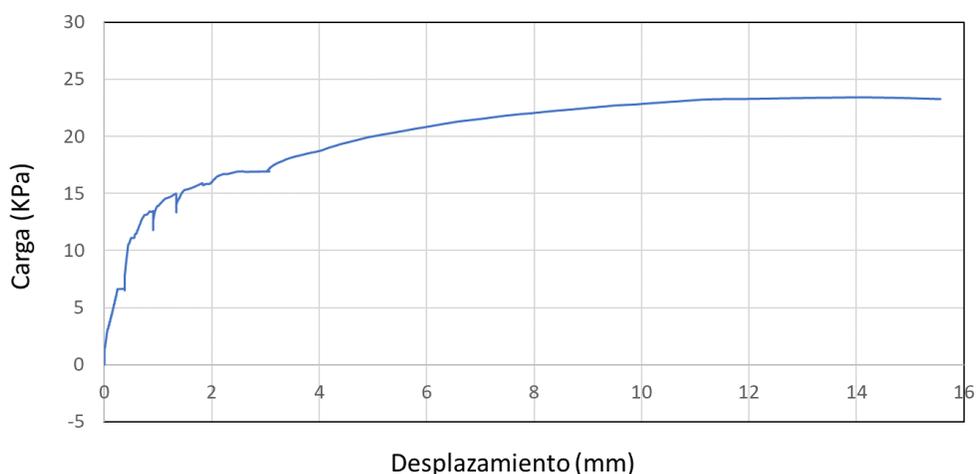


Figura 3.5 Gráfica original carga - desplazamiento fuera del plano.

Por lo anteriormente expuesto, fue necesario realizar un proceso para la corrección de las curvas carga-desplazamiento de los muros. Este proceso se divide en las siguientes etapas:

1. Depurado de datos experimentales.

- 1.1. Los puntos en los que se observó una caída de presión debido a la detención de la prueba fueron eliminados para dar continuidad a la curva carga-desplazamiento.

1.2. Los puntos en los que se observó un salto en el desplazamiento horizontal fuera del plano debido al movimiento de los potenciómetros lineales fueron corregidos de la siguiente forma: eliminación de los datos correspondientes a la carga asociada.

1.3. Se desplazó la curva con el fin de darle continuidad después de la eliminación de datos.

2. Suavizado de las curvas carga-desplazamiento por medio de un filtro.

El filtro consistió en la determinación de la media aritmética de conjuntos de 5 valores en el registro de la historia de carga – desplazamiento.

3. Factor de corrección por la forma de aplicación de la carga.

La Ecuación 3.1 se utilizó para transformar las cargas por área efectiva a cargas equivalentes por área total en los muros.

$$FC = \frac{4}{3} * \left(\frac{A_m}{A_b}\right) * \left(2 - \frac{L_m}{L_b}\right) * \left(2 - \frac{H_m}{H_b}\right) \quad (3.1)$$

Donde:

FC	Factor de corrección
H_m	Altura del muro
H_b	Altura efectiva de las bolsas
L_m	Longitud total del muro
L_b	Longitud efectiva de las bolsas
A_m	Área total del muro
A_b	Área efectiva de las bolsas

El área efectiva de la bolsa se calculó restando a su área original (sin inflar), un área que es función de la separación que existe entre el muro de reacción y el muro espécimen al alcanzar la resistencia fuera del plano. Dicha separación se calculó como la suma de la separación inicial entre ambos muros y el desplazamiento fuera

del plano del muro al momento de alcanzar la resistencia fuera del plano. En la Figura 3.6 se presenta una gráfica corregida carga – desplazamiento fuera del plano del muro M-1.4-0.

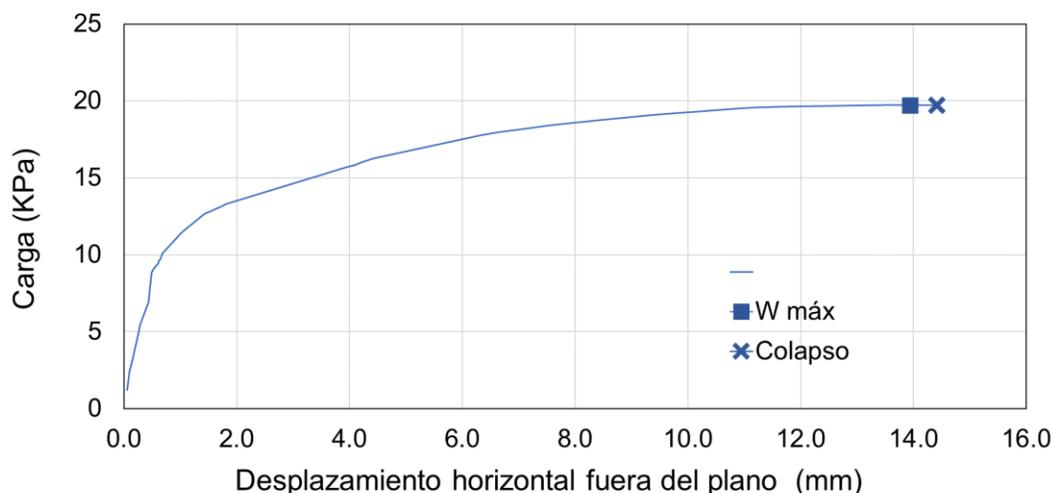


Figura 3.6 Gráfica corregida carga - desplazamiento fuera del plano.

El proceso de corrección descrito fue desarrollado por Cacep (2019) y revisado en este trabajo. Posteriormente, se realizó un análisis de curvas carga – desplazamiento fuera del plano con el propósito de identificar los valores de carga y desplazamiento en los cuales ocurrieron los eventos de agrietamiento. Estos eventos fueron asociados a cambios en la rigidez de los muros. En dicho análisis se realizaron las siguientes actividades:

1. Definición de etapas iniciales del comportamiento en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano (Figura 3.7).

En las curvas se identificaron tres etapas, cuyos límites corresponden a cambios en la rigidez del muro. Estas tres etapas se marcan en color rojo (1ª etapa), verde (2ª etapa) y amarillo (3ª etapa), como se ilustra en la Figura 3.7.

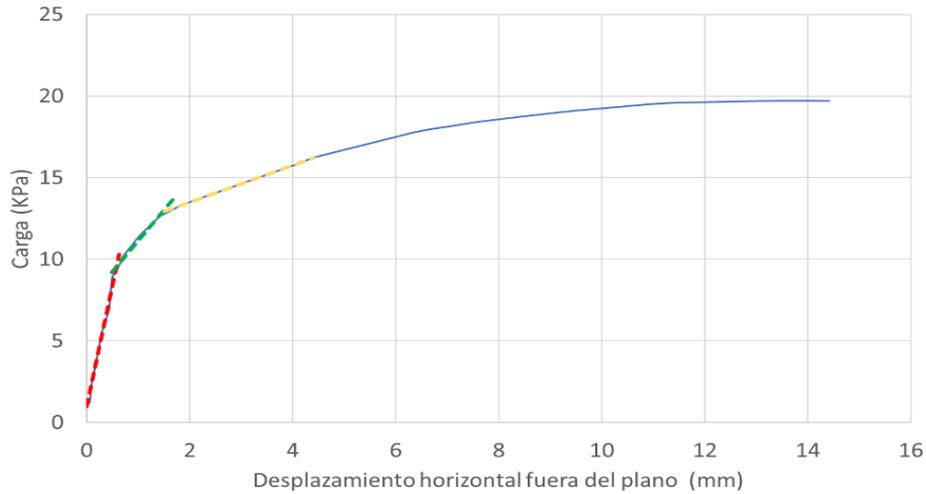


Figura 3.7 Definición de etapas iniciales de comportamiento en la curva carga - desplazamiento fuera del plano.

2. Definición del punto de cambio de pendiente (Figura 3.8).

La localización de los puntos de cambio de pendiente se calculó como la intersección de las rectas de línea de tendencia del comportamiento de la curva carga – desplazamiento fuera del plano. Las líneas de tendencia se calcularon considerando todos los puntos asociados a una etapa. En estos puntos se presenta un cambio en la rigidez de los muros.

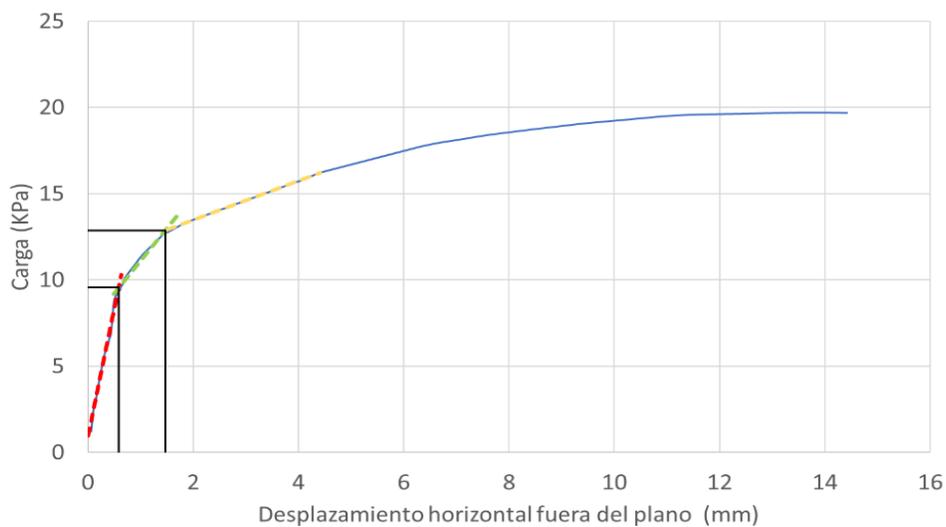


Figura 3.8 Definición del punto de cambio de pendiente.

3. Asociación del patrón de agrietamiento con la curva carga – desplazamiento fuera del plano (Figura 3.9).

Con base en los registros de los ensayos experimentales realizados por Cacep (2019), se asociaron los patrones de agrietamiento observados experimentalmente con puntos específicos de la curva carga – desplazamiento fuera del plano. Finalmente se compararon los resultados de los análisis de los cuatro muros ensayados y se formularon conclusiones.

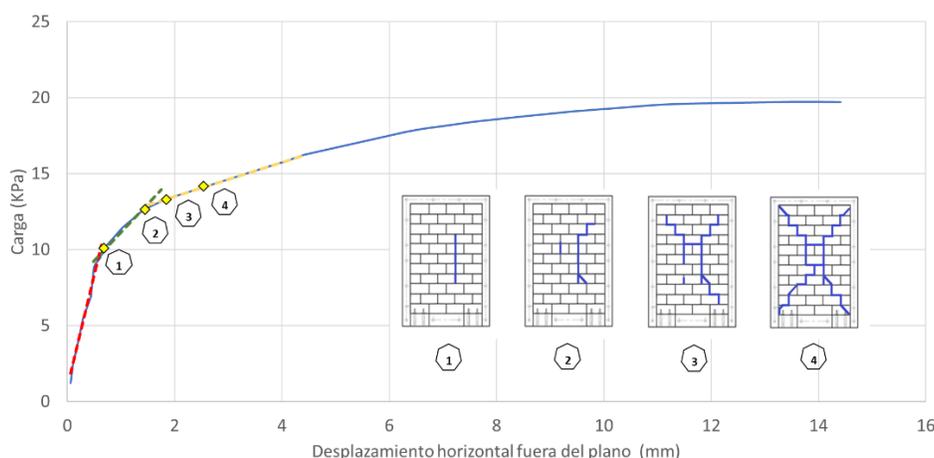


Figura 3.9 Identificación del patrón de agrietamiento en la curva carga - desplazamiento fuera del plano.

3.4. Determinación de propiedades mecánicas de bloques huecos de concreto

3.4.1 Ensayo a tensión

El ensayo de bloques a tensión se realizó de acuerdo con la norma ASTM-C-1006-2001 (ASTM 2001). Se ensayaron 5 bloques procedentes del mismo lote que los utilizados en los muros ensayados por Cacep (2019). El procedimiento que se siguió para el ensayo fue el siguiente (Figura 3.10):

- 1) Se colocaron varillas lisas de 1" de diámetro, paralelas a la cara larga de la pieza, colocadas sobre una pasta de yeso, tanto en la cara superior como inferior.

- 2) Se colocó una placa de acero de 2" de espesor sobre la varilla superior para la aplicación uniforme de la carga.
- 3) Para la aplicación de la carga se utilizó la máquina universal marca SATEC con capacidad de 60 toneladas ubicada en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la FIUADY. La resistencia a tensión se calculó con la Ecuación 3.2.

$$T = \frac{2P}{\pi Lh} \quad (3.2)$$

Donde:

- T Es la resistencia a tensión
- P Es la carga máxima aplicada
- L Es la longitud neta (suma de espesores de las paredes interiores)
- h Es la altura de la pieza



a) Colocación de varillas

b) Colocación para ensaye

c) Falla de la pieza

Figura 3.10 Ensaye a tensión de bloques huecos de concreto.

3.4.2 Ensaye a flexión

Se realizaron ensayos a flexión de bloques para obtener el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto de tres celdas. Se seleccionaron seis bloques para los

ensayos, los cuales fueron del mismo lote que los utilizados en los muros ensayados por Cacep (2019). Los ensayos (Figura 3.11) se realizaron bajo el esquema de flexión a cuatro puntos en la máquina universal marca “SATEC” con una capacidad de 60 toneladas ubicada en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la FIUADY. Para la lectura del desplazamiento al centro del bloque se utilizó un potenciómetro lineal marca ETI modelo LCP12S-25, de 1.2 cm de longitud. Los apoyos se encontraron a 1.25 cm del borde de los bloques y las cargas se aplicaron a 13.75 cm de los bordes (Figura 3.12). La rigidez del bloque (K) se calculó con la Ecuación 3.3, considerando que la respuesta observada es lineal hasta aproximadamente el 80% de la carga máxima.

$$K = \frac{P_2 - P_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (3.3)$$

En donde P_1 y δ_1 son la carga y el desplazamiento asociados a un 30% de la carga máxima y P_2 y δ_2 son la carga y el desplazamiento asociados a un 60% de la carga máxima



Figura 3.11 Ensayo a flexión de bloques huecos de concreto de 3 celdas.

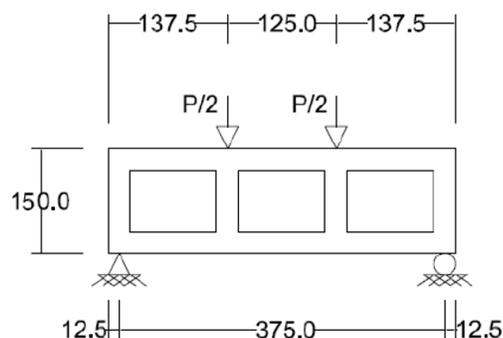


Figura 3.12 Localización de cargas y apoyos en el ensayo a flexión de bloques.

3.4.3 Modelo del Método del Elemento Finito de bloques a flexión.

Se realizaron modelos computacionales para obtener el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto de tres celdas sometidos a flexión. Los modelos numéricos (Figura 3.13) se realizaron considerando promedios de los especímenes ensayados experimentalmente.

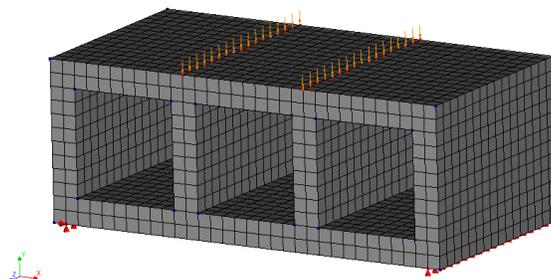


Figura 3.13 Modelo computacional del ensaye a flexión de bloques huecos de concreto.

El modelado del ensaye fue el siguiente:

- Geometría: Bloque hueco de concreto de 3 celdas de dimensiones de 15 cm x 20 cm x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm.
- Tipo de elementos: Se utilizaron elementos isoparamétricos hexaedros tridimensionales de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; las dimensiones de las aristas de los elementos fueron de 1.25 cm.
- Propiedades de materiales: Se consideró un comportamiento elástico lineal para los bloques con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad de los bloques que aproxime la rigidez promedio obtenida experimentalmente.
- Condiciones de carga y apoyos: Los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental, se restringieron los nodos posicionados a 1.25 cm de los bordes en la dirección x y y para el primer apoyo y en la dirección y para el segundo apoyo; adicionalmente, se restringió en la dirección z en dos puntos de las líneas de apoyo. Se aplicó una carga de 3745.27 N en la dirección y distribuida de manera lineal; esta carga corresponde a la carga promedio de falla.

3.5. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes

3.5.1 Modelos elásticos lineales

Se modelaron muretes sujetos a cargas fuera del plano con el propósito de determinar las propiedades de los materiales de la mampostería simple sujeta a cargas fuera del plano, con el propósito de tener valores de referencia para los modelos de los muros de mampostería confinada. A través de análisis elásticos se calculó el módulo de elasticidad de los bloques que permite aproximar la rigidez inicial de los muretes. Se asumió un modelo elástico isotrópico. En los modelos se asumió un valor del módulo de elasticidad del mortero.

Murete con tensión por flexión perpendicular a la junta

Las características del murete modelado corresponden a los valores promedios de los especímenes construidos con bloques de la planta 5 Flores (2008). Con base en la curva experimental carga – desplazamiento fuera del plano se calculó la rigidez promedio del primer ciclo histerético, que fue de 14312 N/mm. Este valor se utilizó como parámetro para calibrar los modelos elásticos.

- Geometría (Figura 3.14): Murete de 120 cm x 100 cm conformado por 5 filas de 3 bloques de concreto de 3 celdas de dimensiones de 15 cm x 20 cm x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm. Las juntas de mortero se modelaron con elementos de interfaz plana de espesor nulo. Estos elementos fueron colocados en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales y en toda la pared para las juntas verticales.

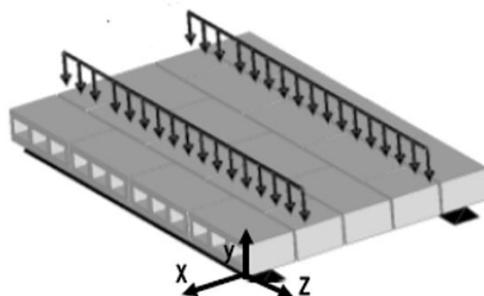


Figura 3.14 Ensaye experimental tensión por flexión perpendicular a las juntas.

- Propiedades de materiales: Para los bloques se consideró una resistencia a compresión promedio sobre área neta de los bloques de 15 cm de 9.52 MPa (Flores, 2008); la relación de poisson de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Para las propiedades de interfaz se asumió un módulo de elasticidad del mortero de 1000 MPa, que corresponde a $100 N/mm^3$ de módulo de rigidez normal y $41.6 N/mm^3$ de módulo de rigidez tangencial considerando 1 cm de espesor en las juntas de mortero.
- Elementos Finitos: Los bloques fueron modelados utilizando elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. La dimensión de las aristas de los elementos fue de 1.25 cm. Las juntas fueron modeladas con elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo.
- Condiciones de carga y apoyos (Figura 3.15): Los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental, se restringieron los nodos posicionados a 15 cm de los bordes en la dirección x y y para un apoyo y en la dirección y para el segundo apoyo; adicionalmente, se restringió en la dirección z en dos puntos de las líneas de apoyo. Se utilizaron 3 grupos de carga, el primero corresponde a las fuerzas de cuerpo (peso propio) del murete, donde se consideró un peso volumétrico de $19.6 KN/m^3$. El segundo corresponde al peso del equipo de aplicación de carga de 926 N. El tercero corresponde a las cargas aplicadas por los gatos hidráulicos en el ensaye, que fue en promedio de 4791 N.

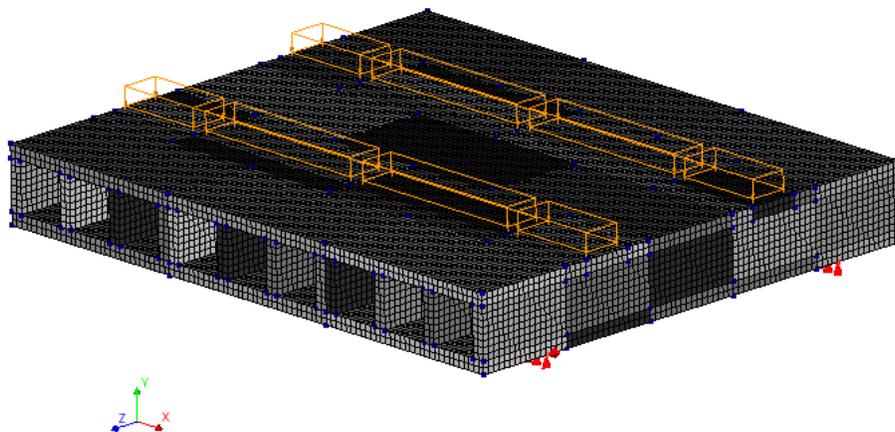


Figura 3.15 Modelo computacional del murete ensayado por Flores (2008).

Murete con tensión por flexión paralela a la junta

Las características del murete modelado corresponden a los valores promedios de los especímenes construidos con bloques de la planta 5 (Flores,2008). Con base en la curva experimental carga – desplazamiento fuera del plano se calculó la rigidez promedio del primer ciclo histerético, que fue de 12619 N/mm. Este valor se utilizó como parámetro para calibrar los modelos elásticos.

- Geometría (Figura 3.16): Murete de 120 cm x 160 cm conformado por 6 filas de 4 bloques de concreto de 3 celdas de dimensiones de 15 cm x 20 cm x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm. Las juntas de mortero se modelaron con elementos de interfaz plana de espesor nulo. Estos elementos fueron colocados en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales y en toda la pared para las juntas verticales.

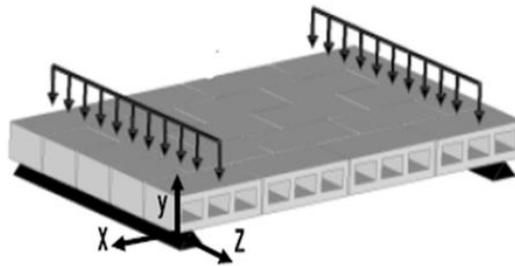


Figura 3.16 Ensaye experimental tensión por flexión paralela a las juntas

- Propiedades de materiales: Para los bloques se consideró una resistencia a compresión promedio sobre área neta de los bloques de 15 cm de 9.52 MPa (Flores, 2008); la relación de poisson de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Para las propiedades de interfaz plana se asumió un módulo de elasticidad del mortero de 1000 MPa, que corresponde a 100 N/mm³ de módulo de rigidez normal y 41.6 N/mm³ de módulo de rigidez tangencial considerando 1 cm de espesor en las juntas de mortero.
- Elementos finitos: Los bloques fueron modelados utilizando elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; la dimensión de las aristas de los elementos fue de 1.25 cm. Las juntas fueron

modeladas con elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo.

- Condiciones de carga y apoyos (Figura 3.17): Los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental, se restringieron los nodos posicionados a 15 cm de los bordes en la dirección x y y para el primer apoyo y en la dirección y para el segundo apoyo; adicionalmente, se restringió en la dirección z en dos puntos de las líneas de apoyo. Se utilizaron 3 grupos de carga. El primero corresponde a las fuerzas de cuerpo (peso propio) del murete, donde se consideró un peso volumétrico de 19.6 KN/m^3 . El segundo corresponde al peso del equipo de aplicación de carga de 926 N . El tercero corresponde a las cargas aplicadas por los gatos hidráulicos en el ensaye de 6570.5 N .

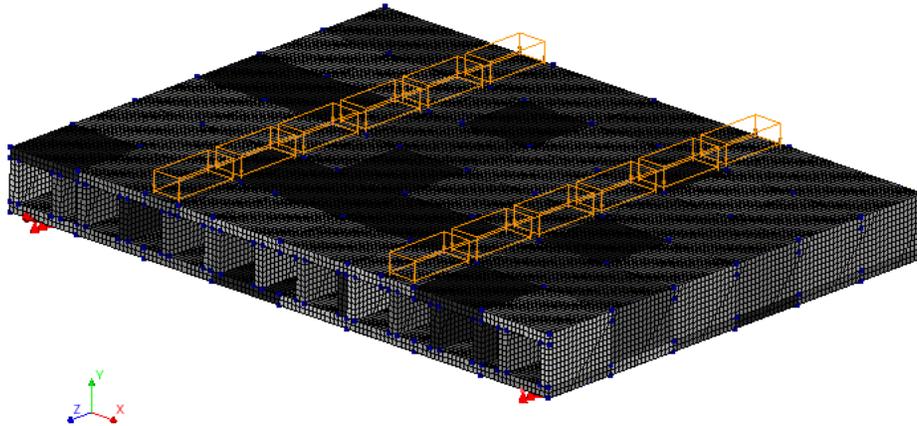


Figura 3.17 Modelo computacional del murete ensayado por Flores (2008).

3.5.2 Modelos no lineales

El objetivo de los análisis no lineales fue calcular el valor del esfuerzo resistente para los elementos de interfaz que permite reproducir la carga de falla. Se consideró un modelo de grieta discreta para simular el proceso de fractura de los muretes. Este modelo reproduce un Modo I (Abertura) de agrietamiento. La falla del elemento se obtiene al alcanzar un esfuerzo normal en la interfaz igual a la resistencia a tensión del material. Las características descritas para los modelos elásticos lineales se

mantienen. Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton – Raphson Regular. Se utilizó un criterio de convergencia de desplazamiento dado que se aplicaron incrementos de carga.

Murete con tensión por flexión perpendicular a la junta

La falla en los muretes con tensión por flexión perpendicular a la junta ocurrió en la junta de mortero. Por lo que se calculó la resistencia a tensión de la interfaz de mortero que permite reproducir la carga de falla. Se utilizó un comportamiento constitutivo para el modelo de grieta discreta de Hordijk et al. (1991). Se asumió una energía de fractura para el mortero de 0.08 N/mm (van Mier, 1997). Se aplicó un control de carga con los siguientes pasos:

- Peso propio: 2 pasos del 50%
- Peso del equipo: 2 pasos del 50%
- Carga aplicada: 18 pasos del 5% y 15 pasos del 1%

Murete con tensión por flexión paralela a la junta

La falla en los muretes con tensión por flexión paralela a la junta ocurrió en la junta de mortero y en el bloque (falla combinada) en el ensaye seleccionado. Este tipo de falla se presenta en la periferia de los muros de mampostería confinada. Por lo que se calculó la resistencia a tensión de la interfaz de mortero y la resistencia a tensión del bloque que permite reproducir la carga de falla. De las fallas observadas en los experimentos se puede concluir que, generalmente, la resistencia a tensión de la interfaz de mortero debe ser menor que la resistencia a tensión del bloque. Uno de los retos en este análisis es que se requiere calibrar dos valores de resistencia. Por lo anterior, dado que la falla observada es súbita y que para algunas plantas se observó falla por adherencia y en otras una falla combinada, se asumió que la relación entre la resistencia a tensión de la interfaz de mortero y la interfaz del bloque de concreto es de 0.70. Este valor es propuesto con base en la relación entre la resistencia a tensión por flexión paralela a la junta con falla por adherencia y con falla combinada observada en los resultados de Flores (2008). Se utilizó un comportamiento constitutivo para el modelo de grieta discreta de Hordijk et al. (1991). Se asumió una energía de fractura

de 0.1 N/mm para los bloques y de 0.08 N/mm para el mortero (van Mier,1997). Se aplicó un control de carga con los siguientes pasos:

- Peso propio: 2 pasos del 40% y 2 pasos del 10%
- Peso del equipo: 5 pasos del 20%
- Carga aplicada: 20 pasos del 2% y 60 pasos del 1%

3.6. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada

3.6.1 Modelos elásticos lineales

Se modelaron muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano ensayados por Cacep (2019) y publicados por Varela et al. (2020). A través de análisis elásticos se calculó el módulo de elasticidad de los bloques que permite aproximar la rigidez inicial de los muros de mampostería confinada. Se asumió un modelo elástico isotrópico. En los modelos se asumió un valor del módulo de elasticidad del mortero. Las características de los muros fueron las siguientes:

- Geometría de los muros con relación de aspecto 1.4 (Figura 3.18): muro de 193 cm x 271 cm con un panel de mampostería conformado por 11 filas de 4 bloques huecos de concreto de 3 celdas de dimensiones nominales 15 cm x 20 cm x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm. Las juntas de mortero fueron modeladas con elementos de interfaz plana de espesor nulo; estos elementos fueron colocados, en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales y en toda la pared para las juntas verticales, de acuerdo con el procedimiento constructivo del muro. Adicionalmente se consideraron interfaces planas de espesor nulo para simular el agrietamiento vertical de los bloques. Los elementos confinantes constaron de una cadena inferior de 25 cm de peralte y 15 cm de espesor, castillos de 15 cm de ancho y 15 cm de espesor, y cada superior de 15 cm de peralte y 15 cm de espesor.

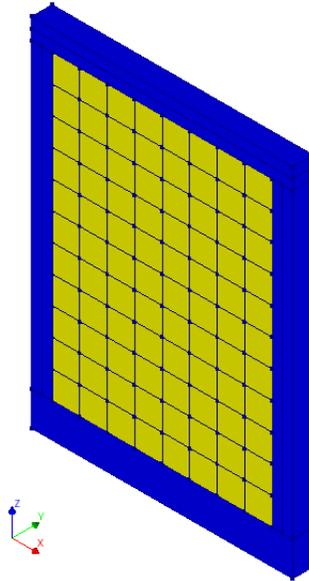


Figura 3.18 Geometría del modelo computacional del muro con relación de aspecto 1.4

- Geometría de los muros con relación de aspecto 2.0 (Figura 3.19): muro de 133 cm x 271 cm con un panel de mampostería conformado por 11 filas de 2.5 bloques huecos de concreto de 3 celdas de dimensiones nominales 15 cm x 20 cm x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm. Las juntas de mortero fueron modeladas con elementos de interfaz plana de espesor nulo; estos elementos fueron colocados en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales y en toda la pared para las juntas verticales, de acuerdo con el procedimiento constructivo del muro. Adicionalmente se consideraron interfaces planas de espesor nulo para simular el agrietamiento vertical de los bloques. Los elementos confinantes constaron de una cadena inferior de 25 cm de peralte y 15 cm de espesor, castillos de 15 cm de ancho y 15 cm de espesor, y cada superior de 15 cm de peralte y 15 cm de espesor.

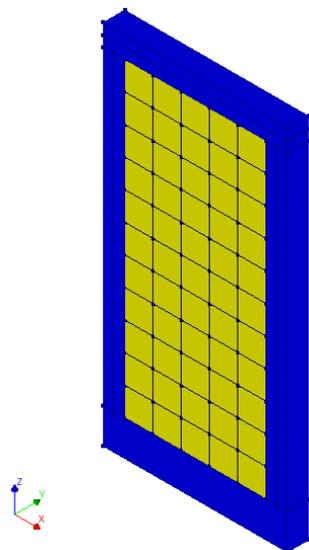


Figura 3.19 Geometría del modelo computacional del muro con relación de aspecto 2.0

- Propiedades de materiales: Para los bloques se consideró una resistencia a compresión promedio sobre área neta de los bloques de 15 cm de 9.66 MPa (Cacep, 2019); la relación de poisson de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Para los elementos confinantes se consideró la resistencia a compresión promedio del concreto f_c de 24.28 MPa (Cacep, 2019) y la relación de poisson de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Para las propiedades de interfaz plana se asumió un módulo de elasticidad del mortero de 1000 MPa, que corresponde a 100 N/mm³ de módulo de rigidez normal y 41.6 N/mm³ de módulo de rigidez tangencial considerando 1 cm de espesor en las juntas de mortero.
- Elementos finitos: Los bloques y elementos confinantes fueron modelados utilizando elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; la dimensión de las aristas de los elementos fue de 2.5 cm. Las juntas fueron modeladas con elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo.
- Condiciones de carga y apoyo: Los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental, empotrando la base y restringiendo el desplazamiento fuera del plano (dirección y) los elementos confinantes como se muestra en la Figura 3.20. Se utilizaron 2 grupos de cargas. El primer grupo correspondió al peso

propio del muro, se consideró un peso volumétrico de 19.6 KN/m^3 para los bloques y un peso volumétrico de 24 KN/m^3 para el concreto de los elementos confinantes (GDF, 2004). El segundo grupo de cargas correspondió a las cargas fuera del plano aplicadas sobre la superficie del panel de mampostería como se muestra en la Figura 3.21.

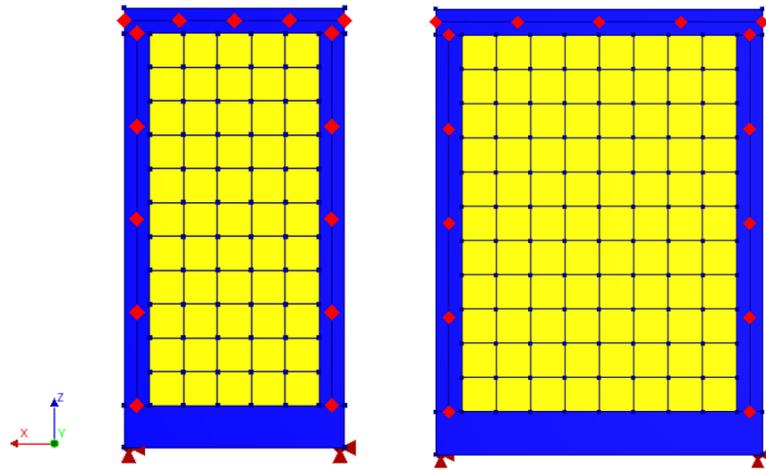


Figura 3.20 Condiciones de apoyo para los muros de relación de aspecto 1.4 y 2.0

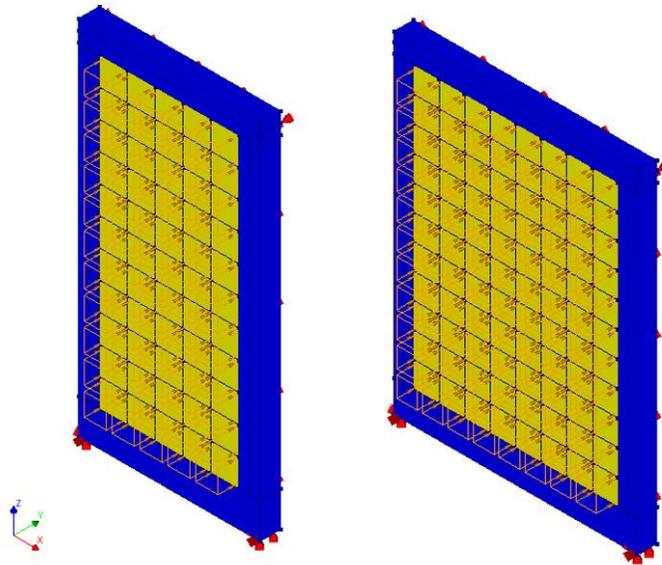


Figura 3.21 Condiciones de carga para los muros de relación de aspecto 1.4 y 2.0

3.6.2 Modelos no lineales

El objetivo de los análisis no lineales fue calcular el valor del esfuerzo resistente para los elementos de interfaz que permite reproducir la carga de falla asociada al primer cambio de rigidez en la curva carga - desplazamiento. Se consideró un modelo de grieta discreta para simular el proceso de fractura de los muros. Este modelo reproduce un Modo I (Abertura) de agrietamiento. La falla del elemento se obtiene al alcanzar un esfuerzo normal en la interfaz igual a la resistencia a tensión del material. Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton – Raphson Regular. Se utilizó un criterio de convergencia de desplazamiento dado que se aplicaron incrementos de carga. Se utilizó un comportamiento constitutivo para el modelo de grieta discreta de Hordijk et al. (1991). Se asumió una energía de fractura de 0.1 N/mm para los bloques y de 0.08 N/mm para el mortero (van Mier,1997).

Se aplicó un control de carga para los análisis no lineales de los muros. Los pasos de carga se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Pasos de carga para el análisis no lineal de los muros

M-1.4-0 y M-2.0-0	M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33
Peso propio: 2 pasos del 50%	Peso propio: 2 pasos del 50%
Carga aplicada fuera del plano: 25 pasos del 2% y 50 pasos del 1%	Carga axial: 2 pasos del 50%
	Carga aplicada fuera del plano: 25 pasos del 2% y 50 pasos del 1%

Los modelos no lineales se realizaron considerando los siguientes escenarios:

- Análisis del comportamiento del muro considerando las propiedades obtenidas de los muretes.

Las características descritas para los modelos elásticos lineales se mantienen. Se utilizó una resistencia a tensión de 0.13 MPa y 0.38 MPa para los elementos de interfaz utilizadas en el mortero horizontal y vertical, respectivamente; adicionalmente se utilizó una resistencia a tensión de 0.54 MPa para los elementos de interfaz del bloque. Estas propiedades fueron obtenidas de los análisis computacionales de los muretes

realizados en este trabajo. Este análisis tiene como propósito determinar la carga que produce el agrietamiento vertical.

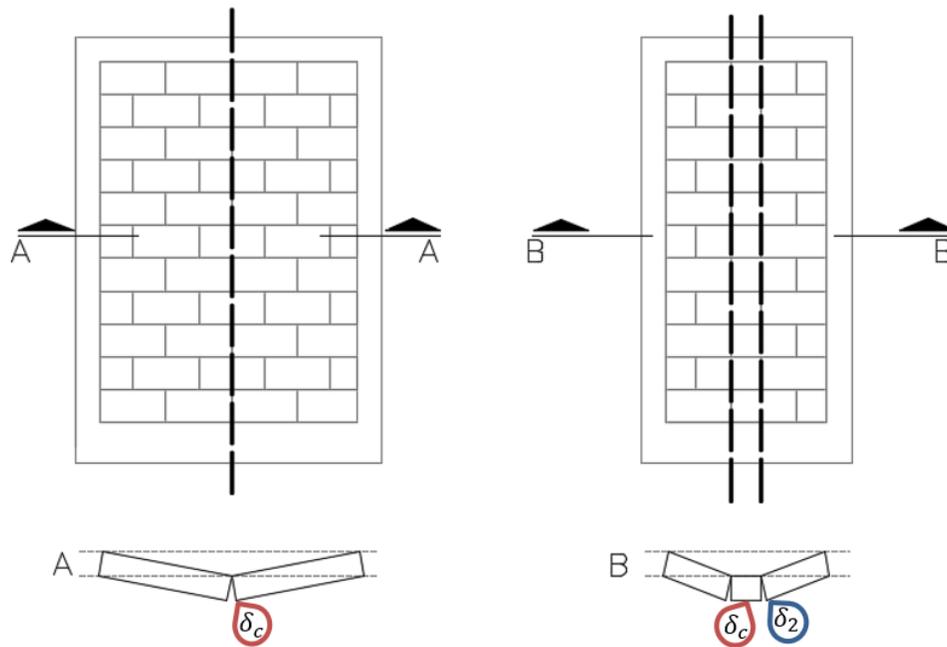
- b) Propuesta de valores de resistencia para predecir el primer agrietamiento vertical del muro.

Las características descritas para los modelos elásticos lineales se mantienen. La resistencia a tensión del elemento de interfaz de mortero debe ser menor que la resistencia a tensión del bloque, por lo que se asumió que la relación entre la resistencia de la interfaz de mortero y la interfaz del bloque de concreto es de 0.90. Este valor es propuesto para que se forme la grieta en la junta de mortero y en el bloque de manera casi simultánea y se presente la continuidad de la abertura de grieta en los modelos computacionales de los muros, como se observó experimentalmente. Este análisis tiene como propósito determinar la resistencia a tensión de los elementos de interfaz que permite predecir la carga que produce el agrietamiento vertical del muro.

3.6.3 Modelos elásticos lineales (muros agrietados)

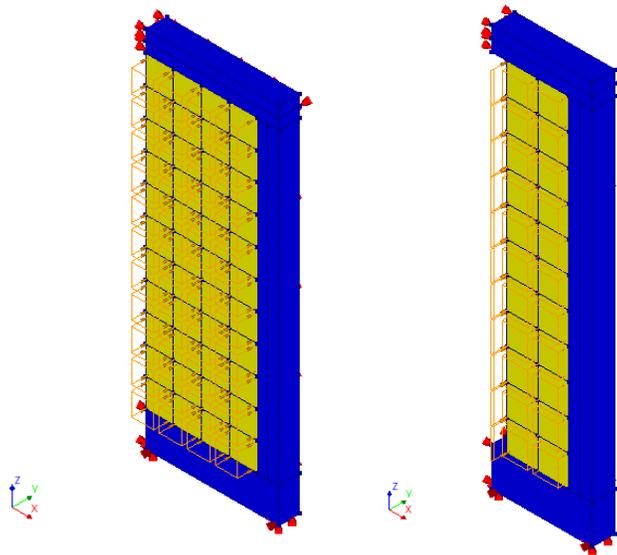
Se modelaron muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano ensayados por Cacep (2019) y publicados por Varela et al. (2020) asumiendo una grieta vertical al centro del claro. El objetivo de los análisis fue obtener la degradación de la rigidez del muro posterior a la aparición de la grieta vertical. Se modeló una grieta vertical para los muros con relación de aspecto de 1.4 y dos grietas verticales para los muros con relación de aspecto de 2.0. La rigidez se calcula con el desplazamiento fuera del plano al centro del muro (δ_c); para los muros con relación de aspecto de 2.0 se asumió que $\delta_c = \delta_2$ (Figura 3.22). Las características descritas para los modelos elásticos lineales se mantienen en general. Se añadió una restricción al desplazamiento en la dirección x en los elementos confinantes horizontales. En el caso de los elementos con relación de aspecto de 2.0 se añadió una carga lineal correspondiente al 50% el segmento central localizado entre las dos grietas verticales; esta carga lineal fue 32.35 KPa y 68.12 KPa para los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 respectivamente, que se calculó como la sumatoria de la carga de aplicación y peso

propio correspondiente al área descrita (0.11 m^2). En la Figura 3.22 se presenta la geometría de los modelos y las condiciones de carga y de frontera.



(a) Muro con relación de aspecto de 1.4 (b) Muro con relación de aspecto de 2.0

Figura 3.22 Posición de la grieta vertical y forma deformada del muro de mampostería confinada con agrietamiento vertical



(a) Muro con relación de aspecto de 1.4 (b) Muro con relación de aspecto de 2.0

Figura 3.23 Condiciones de carga y apoyo para los muros de mampostería confinada agrietados

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de las curvas carga – desplazamiento fuera del plano de los resultados experimentales de los muros de mampostería confinada seleccionados. Se presentan los resultados de los ensayos experimentales y modelos computacionales de los bloques huecos de concreto de tres celdas. Se presentan los resultados elásticos y no lineales de los modelos computacionales de los muretes y los muros de mampostería confinada.

4.1. Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada

Del análisis de las curvas carga – desplazamiento fuera del plano obtenidas de los ensayos experimentales de los 4 muros, se calcularon los niveles de carga en los que ocurrió el cambio de rigidez entre las etapas. La primera etapa se presenta en un rango del 47% al 85% de la carga máxima aplicada. La segunda etapa se presenta en un rango del 65% al 88% de la carga máxima aplicada. La tercera etapa se presenta en un rango del 81% al 95% de la carga máxima aplicada.

En la Tabla 4.1 se presenta la carga y el porcentaje que ésta representa con respecto a la carga máxima para los cuatro patrones de agrietamiento registrados durante el experimento. En la Figura 4.1 se presenta la asociación del patrón de agrietamiento observado experimentalmente con la curva carga – desplazamiento del muro M-1.4-0. Los patrones de agrietamiento están señalados con números dentro de un círculo.

Tabla 4.1 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-1.4-0)

Patrón de agrietamiento	Carga (KPa)	Porcentaje de carga máxima
1	10.08	51.13
2	12.64	64.08
3	13.30	67.44
4	14.18	71.88

En la Figura 4.1 se presentan las 3 etapas iniciales identificadas con línea discontinua roja, verde y amarilla, respectivamente. Se señala el punto de intersección entre las líneas con marcadores circulares amarillos. El límite entre las etapas 1 y 2 corresponde a una carga de 9.54 KPa (48.42% de la carga máxima). El límite entre las etapas 2 y 3 corresponde a una carga de 12.88 KPa (65.31% de la carga máxima).

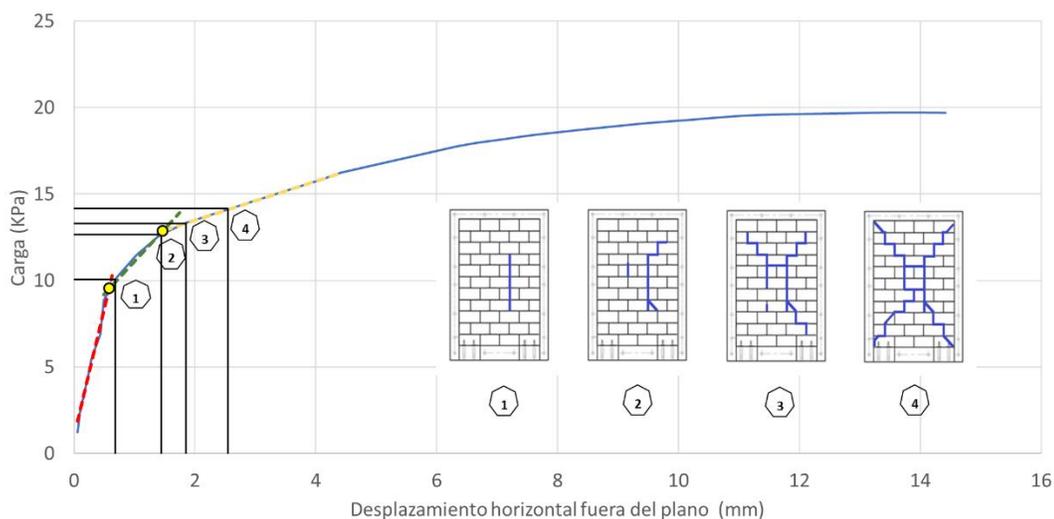


Figura 4.1 Evolución del agrietamiento del muro (M-1.4-0).

En la Tabla 4.2 se presenta la carga y el porcentaje que ésta representa con respecto a la carga máxima para los tres patrones de agrietamiento registrados durante el experimento. En la Figura 4.2 se presenta la asociación del patrón de agrietamiento observado experimentalmente con la curva carga – desplazamiento del muro M-1.4-3.33. Los patrones de agrietamiento están señalados con números dentro de un círculo.

Tabla 4.2 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-1.4-3.33)

Patrón de agrietamiento	Carga (KPa)	Porcentaje de carga máxima
1	14.28	58.95
2	17.36	71.64
3	19.48	80.42

En la Figura 4.2 se presentan las 3 etapas iniciales identificadas con línea discontinua roja, verde y amarilla, respectivamente. Se señala el punto de intersección entre las líneas con marcadores circulares amarillos. El límite entre las etapas 1 y 2 corresponde a una carga de 13.05 KPa (53.85% de la carga máxima). El límite entre las etapas 2 y 3 corresponde a una carga de 17.74 KPa (73.23% de la carga máxima).

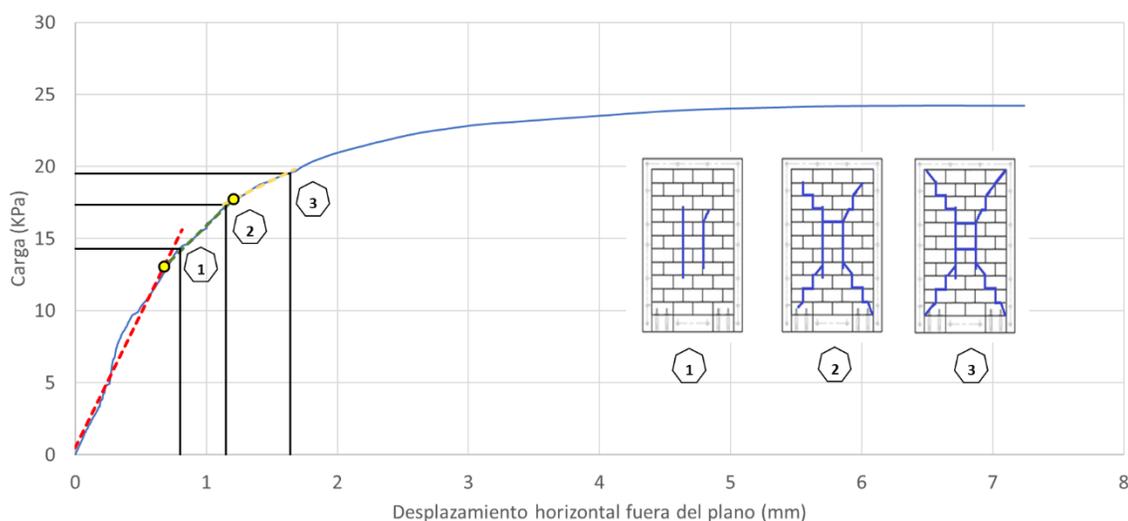


Figura 4.2 Evolución del agrietamiento del muro (M-1.4-3.33).

En la Tabla 4.3 se presenta la carga y el porcentaje que ésta representa con respecto a la carga máxima para los tres patrones de agrietamiento registrados durante el experimento. En la Figura 4.3 se presenta la asociación del patrón de agrietamiento observado experimentalmente con la curva carga – desplazamiento del muro M-2.0-0. Los patrones de agrietamiento están señalados con números dentro de un círculo.

Tabla 4.3 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-2.0-0)

Patrón de agrietamiento	Carga (KPa)	Porcentaje de carga máxima
1	15.31	48.4
2	20.89	66.03
3	23.63	74.69

En la Figura 4.3 se presentan las 3 etapas iniciales identificadas con línea discontinua roja, verde y amarilla, respectivamente. Se señala el punto de intersección entre las líneas con marcadores circulares amarillos. El límite entre las etapas 1 y 2 corresponde a una carga de 14.97 KPa (47.32% de la carga máxima). El límite entre las etapas 2 y 3 corresponde a una carga de 22.82 KPa (72.11% de la carga máxima).

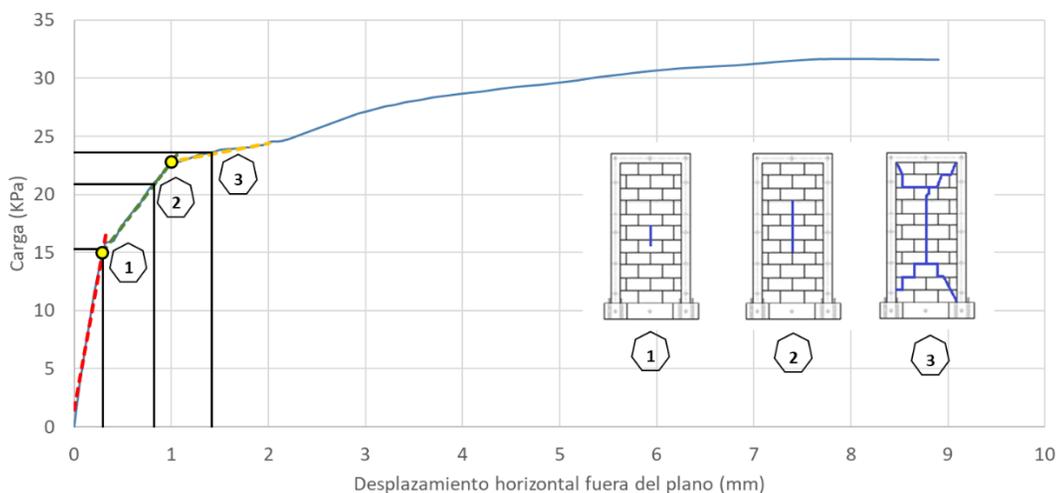


Figura 4.3 Evolución del agrietamiento del muro (M-2.0-0).

En la Tabla 4.4 se presenta la carga y el porcentaje que ésta representa con respecto a la carga máxima para los dos patrones de agrietamiento registrados durante el experimento. En la Figura 4.4 se presenta la asociación del patrón de agrietamiento observado experimentalmente con la curva carga – desplazamiento del muro M-2.0-3.33. Los patrones de agrietamiento están señalados con números dentro de un círculo.

Tabla 4.4 Cargas correspondientes a patrones de agrietamiento del muro (M-2.0-3.33)

Patrones de agrietamiento	Carga (KPa)	Porcentaje de carga máxima
1	32.82	85.71
2	36.55	95.46

En la Figura 4.4 se presentan las 2 etapas iniciales identificadas con línea discontinua roja y amarilla, respectivamente. Se señala un punto de intersección entre las líneas con un marcador circular amarillo. Notar que el comportamiento de este muro es atípico, ya que no se identificó una etapa 2 como ocurrió en los otros tres muros. El límite superior de la etapa 1 corresponde a una carga de 32.85 KPa (85.81% de la carga máxima).

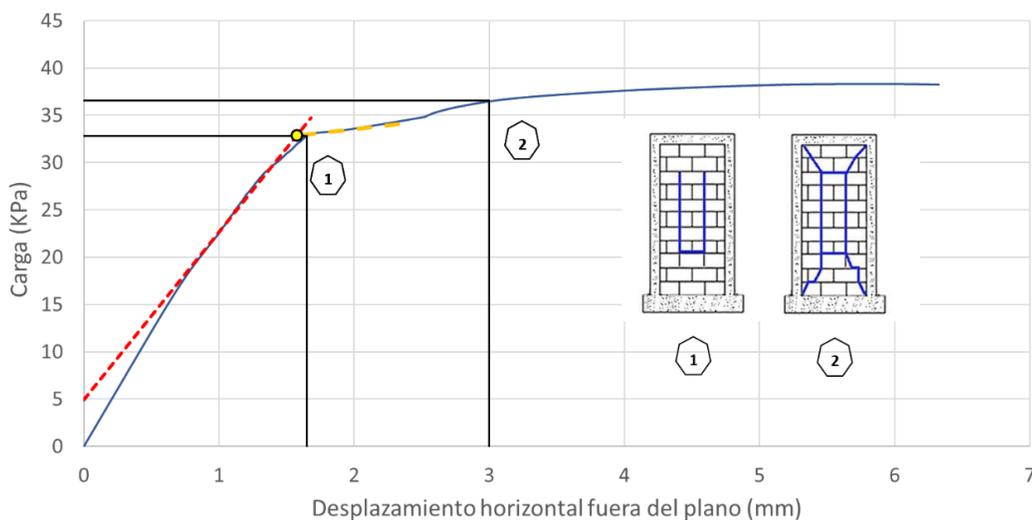


Figura 4.4 Evolución del agrietamiento del muro (M-2.0-3.33).

4.2. Determinación de propiedades mecánicas de bloques huecos de concreto

4.2.1 Ensaye a tensión

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados del ensaye a tensión de los bloques huecos de concreto de 15 cm de espesor. La resistencia a tensión promedio fue 0.483 MPa.

Tabla 4.5 Resistencia a tensión de bloques huecos de concreto.

Bloque	P (Kg)	L (cm)	H (cm)	MPa
B1	1992	11.34	19.45	0.564
B2	1523	11.15	19.4	0.440
B3	1898	11.06	19.3	0.555
B4	1615	11.23	19.6	0.458
B5	1383	11.14	19.4	0.400
Media				0.483
Coeficiente de Variación				0.151

4.2.2 Ensayo a flexión

En la Figura 4.5 se presentan las curvas carga – desplazamiento al centro de la pieza de los bloques ensayados. Se observa que el comportamiento es aproximadamente lineal hasta la falla.

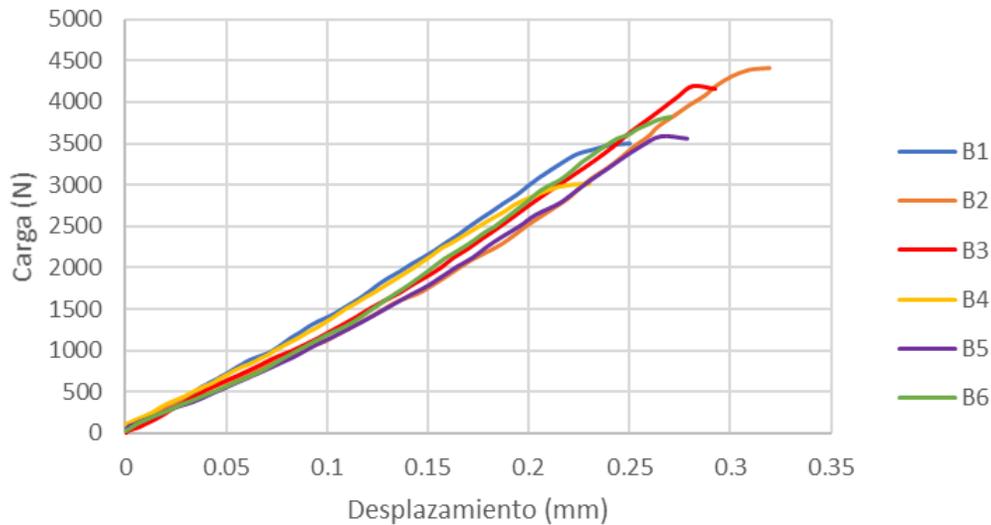


Figura 4.5 Curva carga - desplazamiento del bloque sometido a flexión.

En la Tabla 4.6 se presentan las rigideces calculadas para cada bloque. La rigidez promedio fue 14572 N/mm.

Tabla 4.6 Rigidez de los bloques.

Bloque	$P_1(N)$	$P_2(N)$	$\delta_1(mm)$	$\delta_2(mm)$	$K(N/mm)$
B1	1060	2132	0.077	0.148	15083
B2	1347	2606	0.117	0.205	14272
B3	1223	2482	0.101	0.185	14992
B4	910	1783	0.067	0.128	14262
B5	1068	2126	0.094	0.172	13540
B6	1078	2270	0.091	0.169	15285
Media					14572
Coeficiente de Variación					0.045

4.2.3 Modelo de Método del Elemento Finito de bloques a flexión

En la Figura 4.6 se presenta la comparación de los resultados experimentales y computacionales de los bloques. Para el modelo computacional se determinó que un módulo de elasticidad del bloque de 3851.84 MPa permite reproducir la rigidez de 14572 N/mm obtenida de los resultados experimentales.

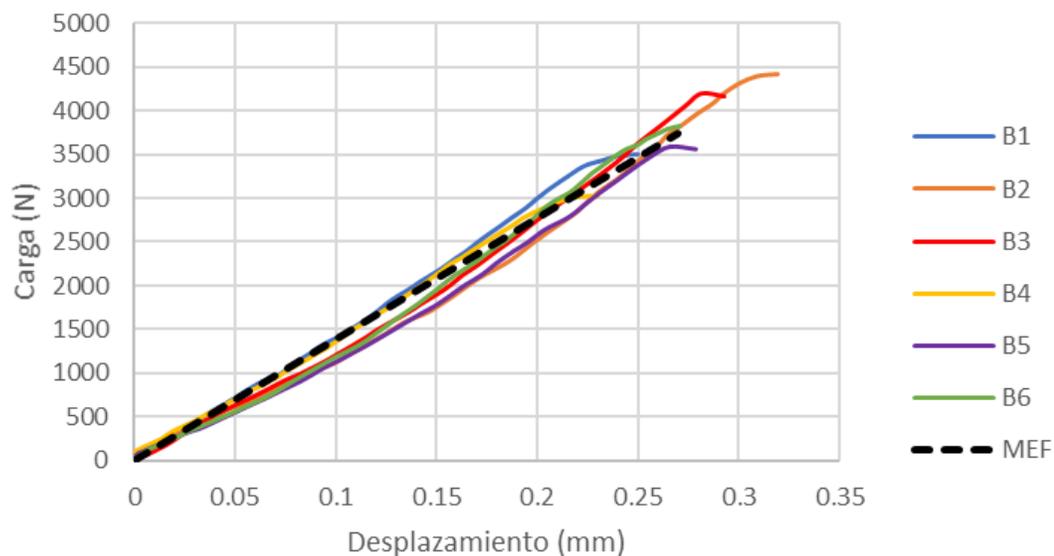


Figura 4.6 Resultados experimentales y computacionales de la curva carga - desplazamiento de bloques sometidos a flexión.

4.3. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes

4.3.1 Modelos elásticos lineales

Murete con tensión por flexión perpendicular a la junta

En la Figura 4.7 se presentan los desplazamientos fuera del plano (dirección y) del murete modelado con MEF. Para el modelo computacional se determinó que el módulo de elasticidad de 425 MPa para el bloque permite reproducir la rigidez observada en los ensayos experimentales (14312 N/mm).

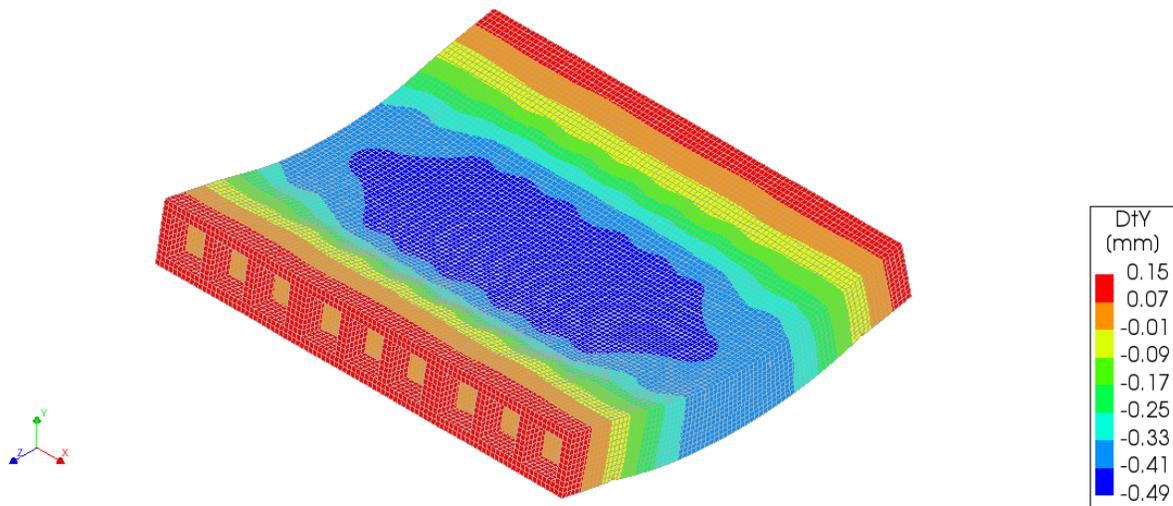


Figura 4.7 Desplazamientos en la dirección y del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta

En las Figura 4.8 y Figura 4.9 se presentan los esfuerzos normales en la dirección z (σ_{zz}) en la superficie superior e inferior del murete, respectivamente. En la Figura 4.10 se presentan los esfuerzos normales (σ_{nn}) en los elementos de interfaz del murete. Los resultados presentados en las Figuras 4.7 – 4.10 son obtenidos de la aplicación de la carga muerta, carga del equipo y carga aplicada de falla promedio (4791 N).

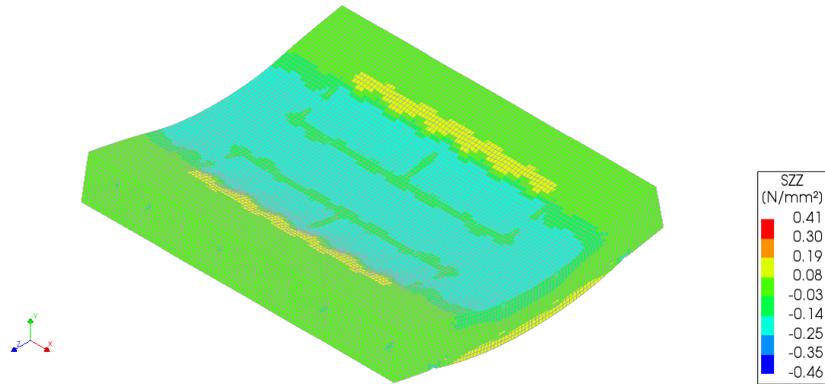


Figura 4.8 Esfuerzos normales a compresión σ_{zz} (superficie superior) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta

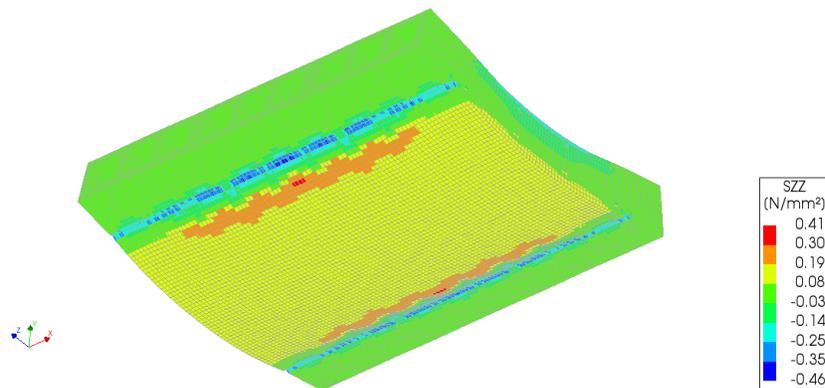


Figura 4.9 Esfuerzos normales a tensión σ_{zz} (superficie inferior) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta

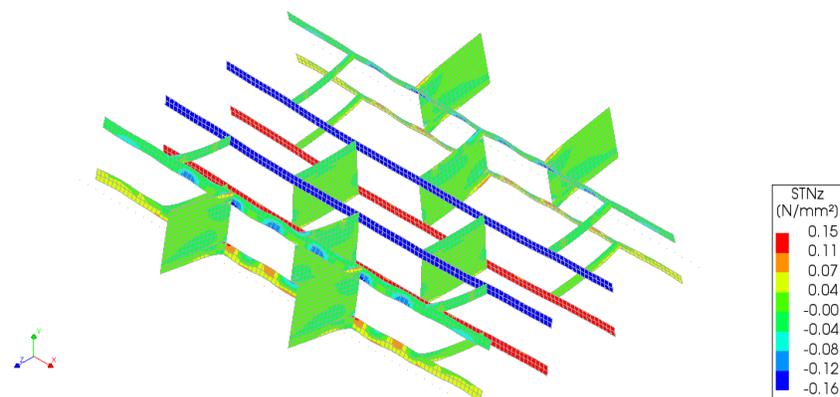


Figura 4.10 Esfuerzos normales σ_{nn} en los elementos de interfaz (mortero) del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta

Murete con tensión por flexión paralela a la junta

En la Figura 4.11 se presentan los desplazamientos fuera del plano (dirección y) del murete modelado con MEF. Para el modelo computacional se determinó que el módulo de elasticidad de 4365 MPa para el bloque permite reproducir la rigidez observada en los ensayos experimentales (12619 N/mm).

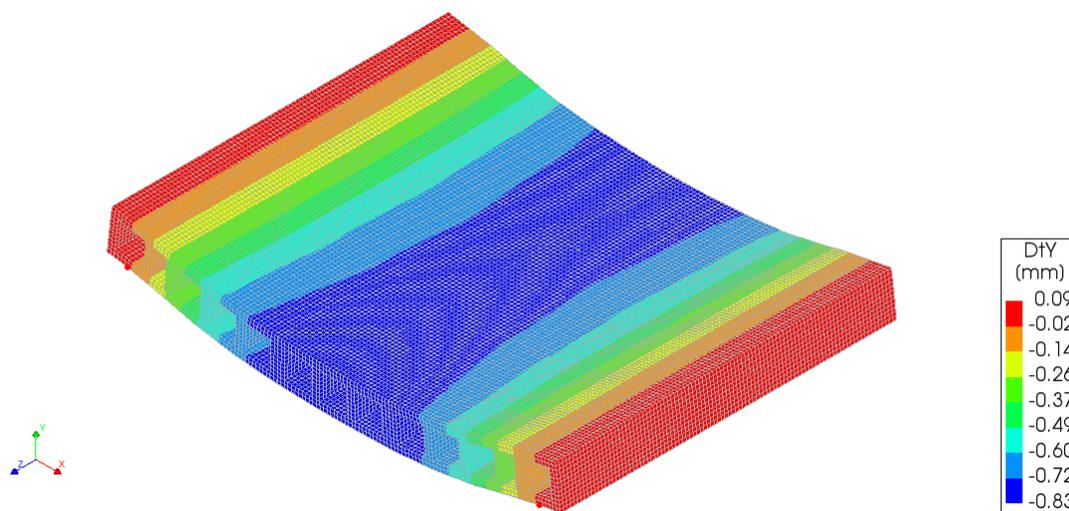


Figura 4.11 Desplazamientos en la dirección y del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

En las Figura 4.12 y Figura 4.13 se presentan los esfuerzos normales en la dirección x (σ_{xx}) en la superficie superior e inferior del murete, respectivamente. En la Figura 4.14 se presentan los esfuerzos normales (σ_{nn}) en los elementos de interfaz del murete. Los resultados presentados en las Figuras 4.12 - 4.14 son obtenidos de la aplicación de la carga muerta, carga del equipo y carga aplicada de falla promedio (6570.5 N).

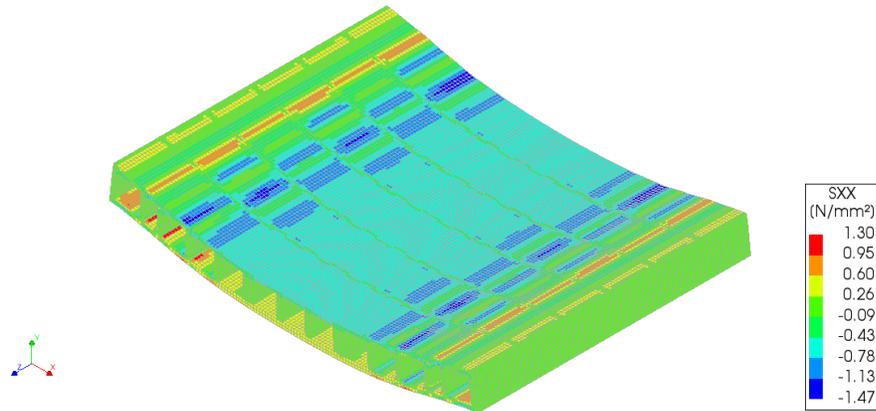


Figura 4.12 Esfuerzos normales a compresión σ_{xx} (superficie superior) del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

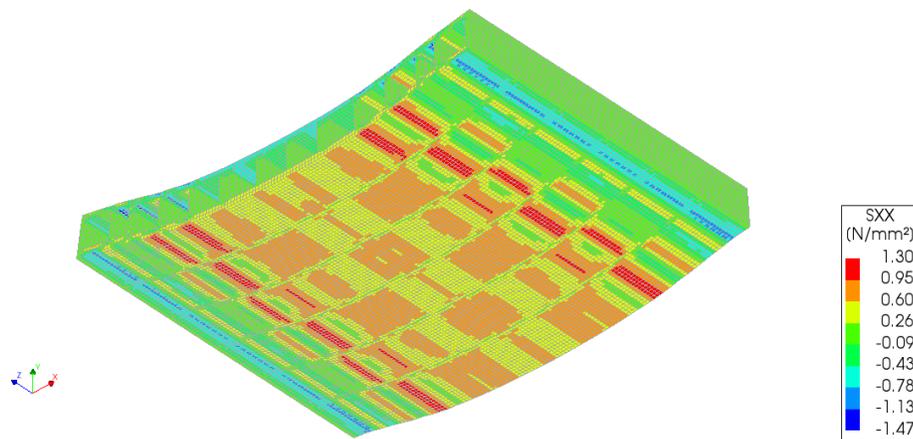


Figura 4.13 Esfuerzos normales a tensión σ_{xx} (superficie inferior) del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

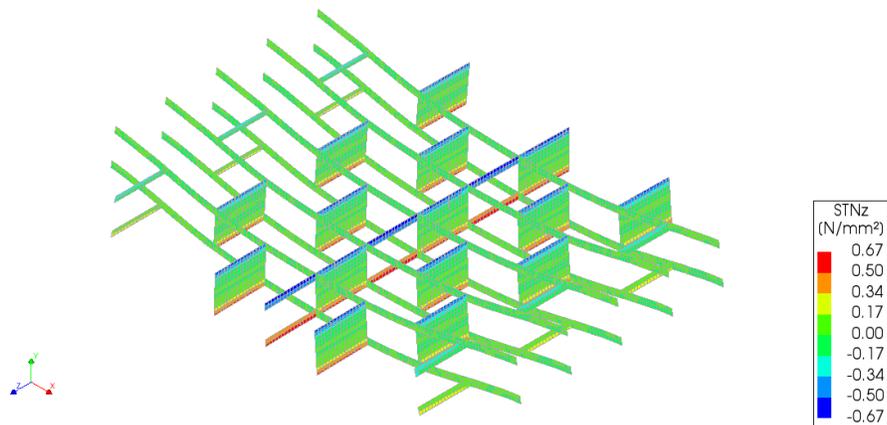


Figura 4.14 Esfuerzos normales σ_{nn} en los elementos de interfaz de mortero y bloque del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

4.3.2 Modelos no lineales

Murete con tensión por flexión perpendicular a la junta

En la Figura 4.15 se presentan los esfuerzos normales en la dirección z (σ_{zz}). En esta figura se presenta la malla deformada y se señala con línea discontinua negra la abertura de grieta a la carga de falla. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.13 MPa para los elementos de interfaz de mortero permiten reproducir la carga de falla (4791 N).

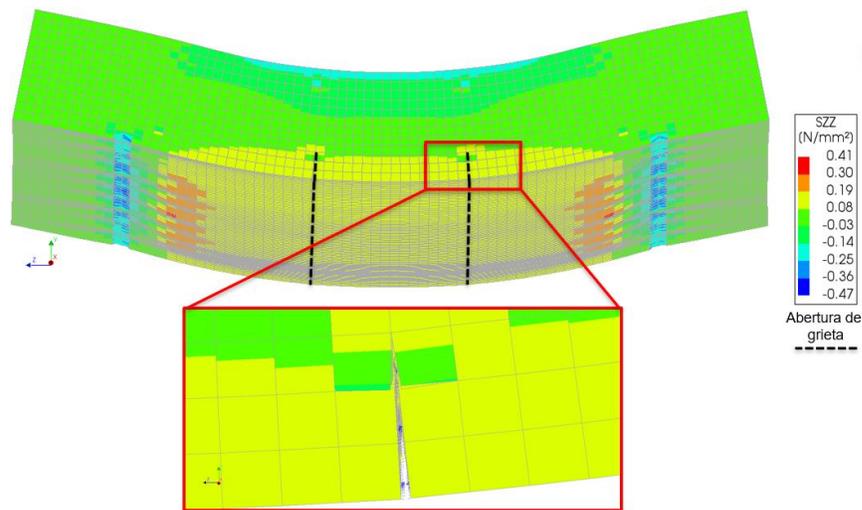


Figura 4.15 Esfuerzos normales en la dirección z (σ_{zz}) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta.

Murete con tensión por flexión paralela a la junta

En la Figura 4.16 se presentan los esfuerzos normales en la dirección x (σ_{xx}). En esta figura se presenta la malla deformada y se señala con línea discontinua negra la abertura de grieta a la carga de falla. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.38 MPa para los elementos de interfaz (mortero) y 0.55 MPa para los elementos de interfaz (tensión del bloque) permiten reproducir la carga de falla (6570.5 N).

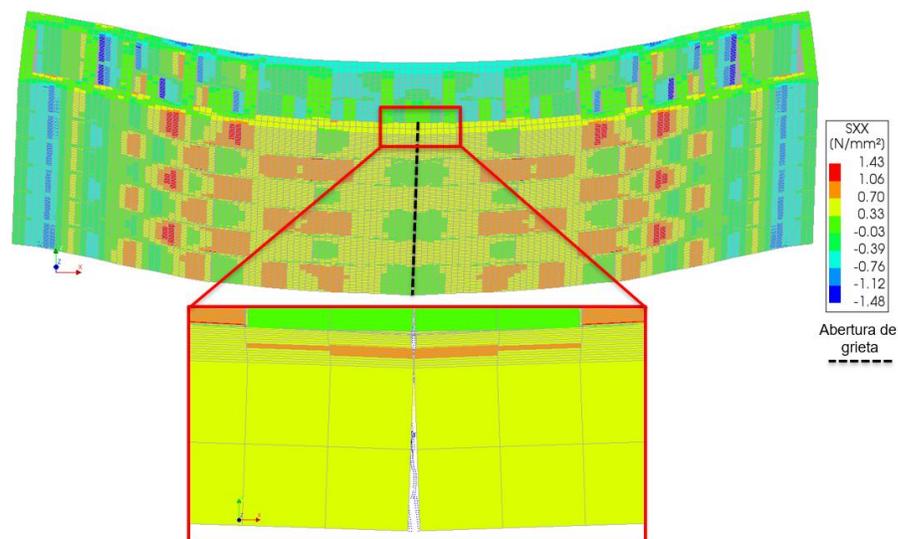


Figura 4.16 Esfuerzos normales en la dirección x (σ_{xx}) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

4.4. Desarrollo de Modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada

4.4.1 Modelos elásticos lineales

En la Tabla 4.7 se presenta el módulo de elasticidad del bloque que permite reproducir la rigidez observada en los ensayos experimentales para cada muro modelado computacionalmente. Se observa que el muro M-2.0-3.33 es atípico. Considerando los primeros tres muros se observa que en promedio se requiere de un módulo de elasticidad del bloque de 6556 MPa para reproducir la rigidez observada en los ensayos experimentales.

Tabla 4.7 Módulo de Elasticidad del bloque para los muros de mampostería confinada

Muro	Módulo de Elasticidad (MPa)
M-1.4-0	5283
M-1.4-3.33	6928
M-2.0-0	7458
M-2.0-3.33	2408

De la Figura 4.17 a la Figura 4.20 se presentan los resultados de los modelos computacionales de los muros M-1.4-0, M-1.4-3.33, M-2.0-0 y M-2.0-3.33. En estas figuras se presentan (a) los esfuerzos normales obtenidos en la dirección x (σ_{xx}) y (b) los esfuerzos normales en la dirección z (σ_{zz}); en la primera columna se presentan los esfuerzos en la superficie de aplicación de carga y en la segunda columna en la superficie libre. Adicionalmente se presentan los esfuerzos normales (σ_{nn}) en los elementos de interfaz del murete (c). Los resultados de dichas tablas son producidos por la aplicación de la carga muerta y carga aplicada asociada al primer cambio de rigidez en la curva carga – desplazamiento fuera del plano (Sección 4.3.2).

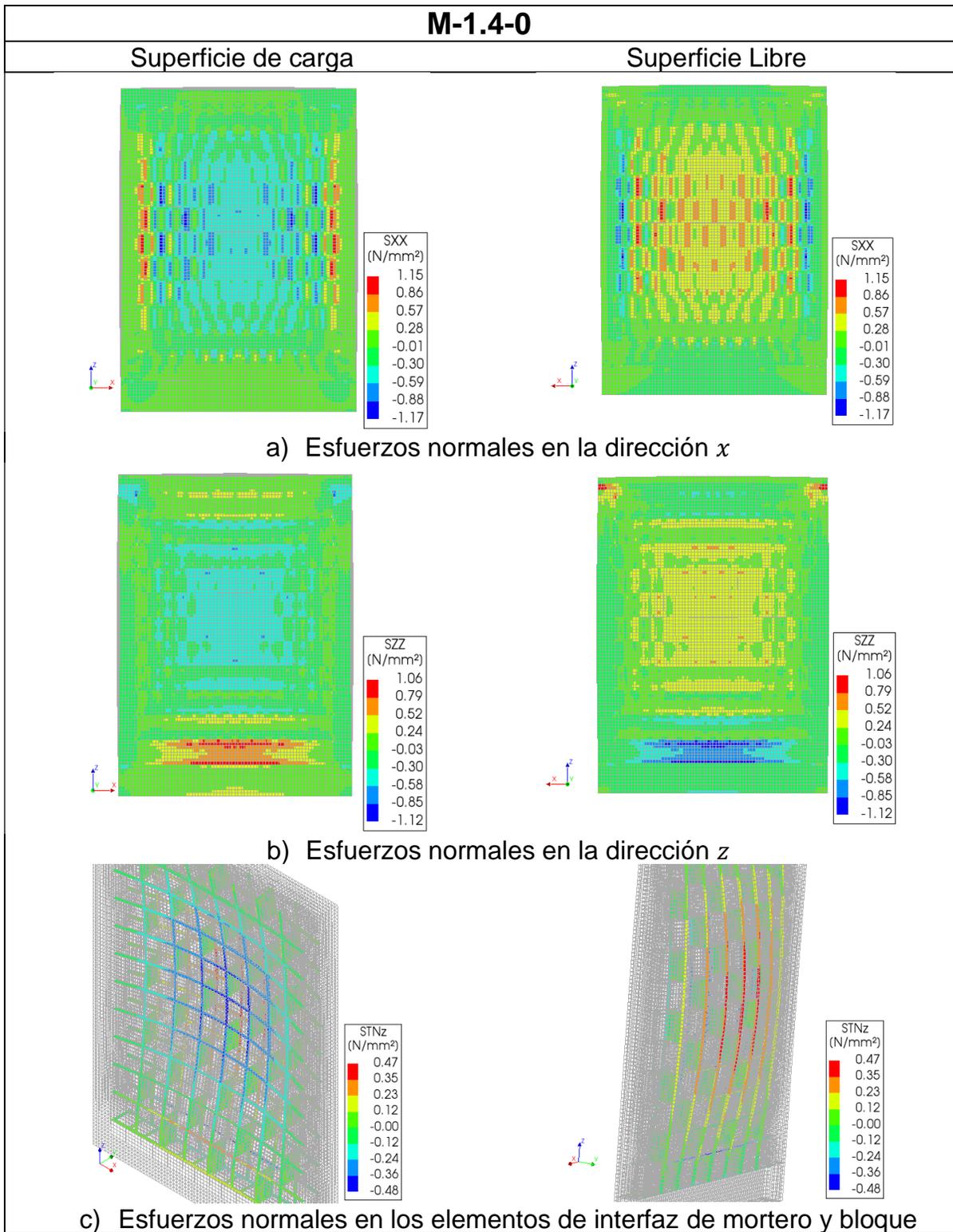


Figura 4.17 Resultados computacionales del muro (M-1.4-0) del modelo elástico

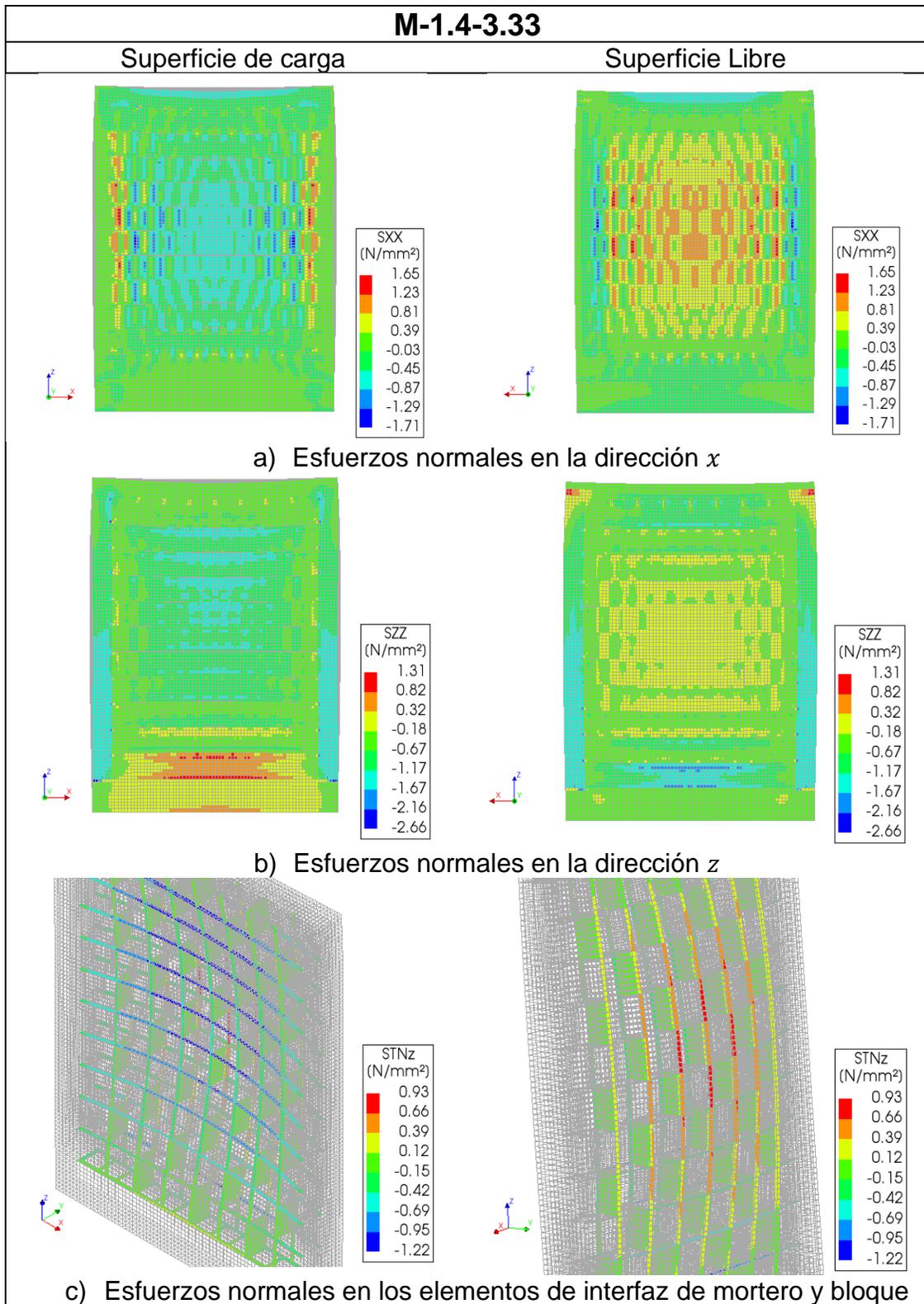


Figura 4.18 Resultados computacionales del muro (M-1.4-3.33) del modelo elástico

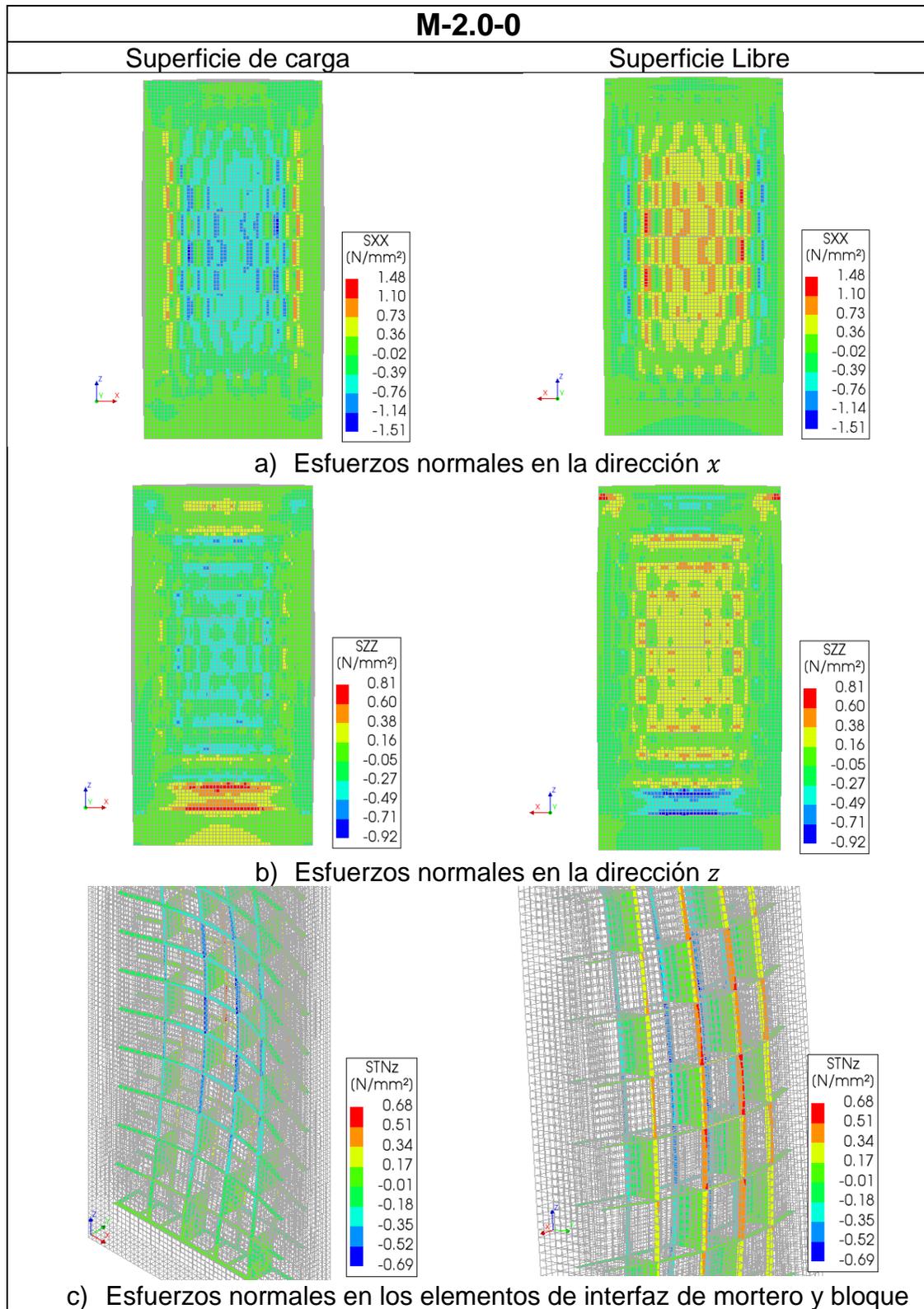


Figura 4.19 Resultados computacionales del muro (M-2.0-0) del modelo elástico

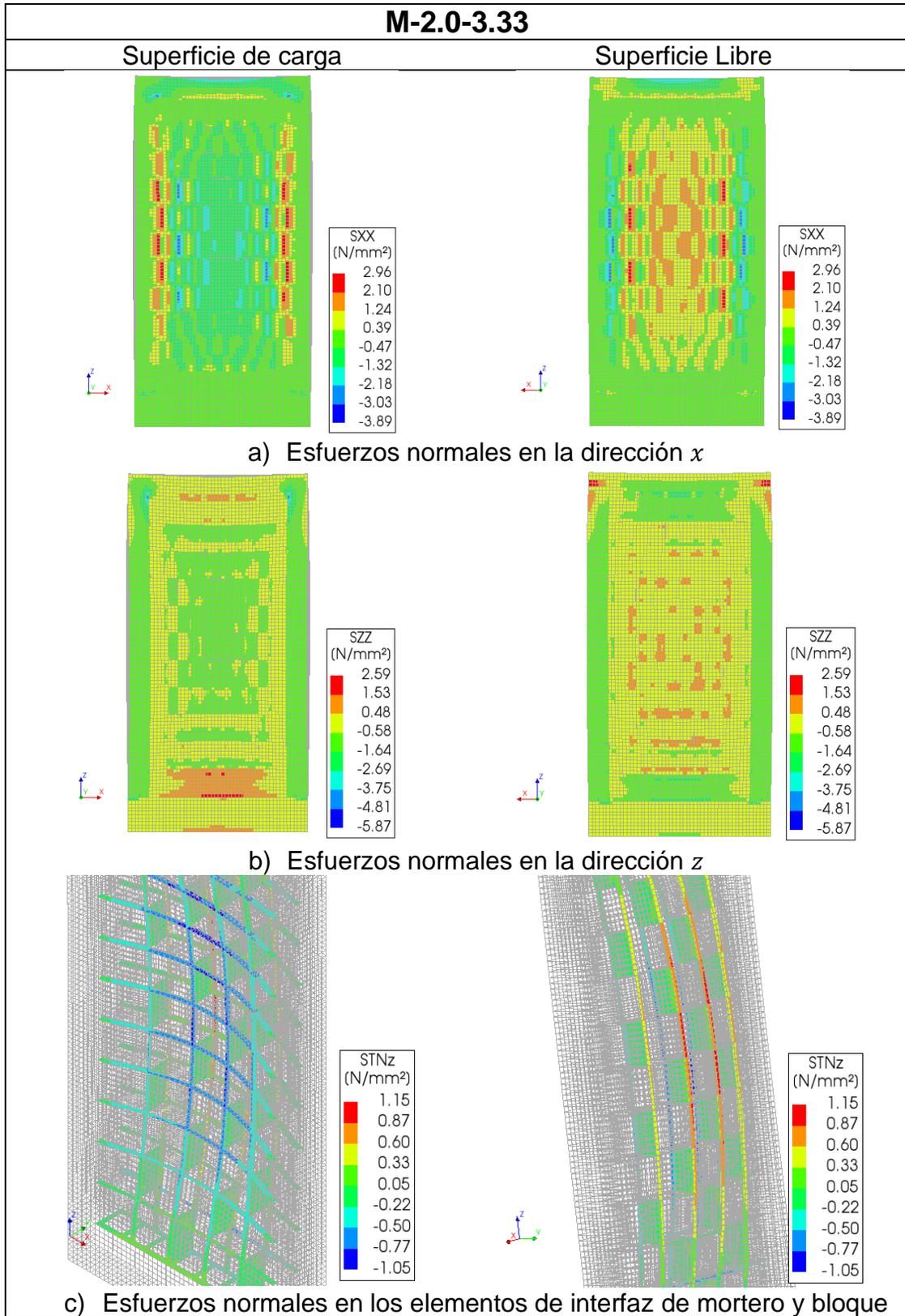


Figura 4.20 Resultados computacionales del muro (M-2.0-3.33) del modelo elástico

4.4.2 Modelos no lineales

- a) Análisis del comportamiento del muro considerando las propiedades obtenidas de los muretes.

Muro M-1.4-0

En la Figura 4.21 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-0) con la curva obtenida del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaz de la junta horizontal.

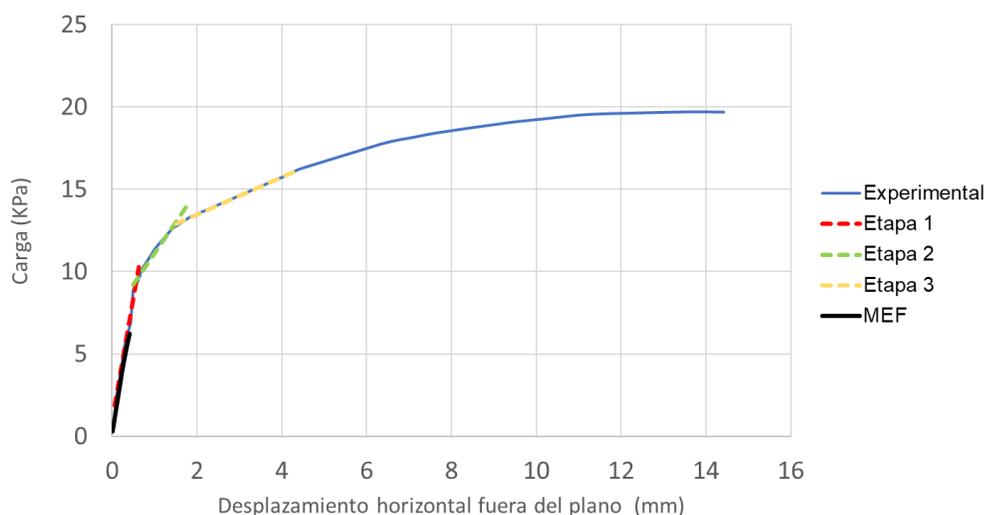


Figura 4.21 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal sin calibrar

En la Figura 4.22 se presenta el mecanismo de falla del muro (M-1.4-0) del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. Se observa que dicho mecanismo de falla no corresponde al observado experimentalmente al presentarse grietas horizontales al centro del muro. Se concluye que el confinamiento incrementa la resistencia a tensión de la interfaz de mortero de la junta horizontal, que del ensaye de muretes fue 0.13 MPa.

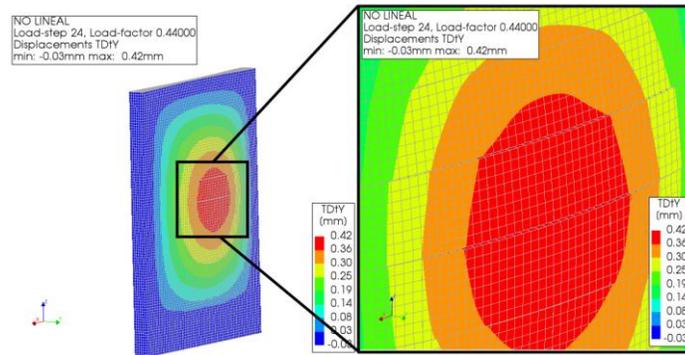


Figura 4.22 Mecanismo de falla del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal sin calibrar

Muro M-1.4-3.33

En la Figura 4.23 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

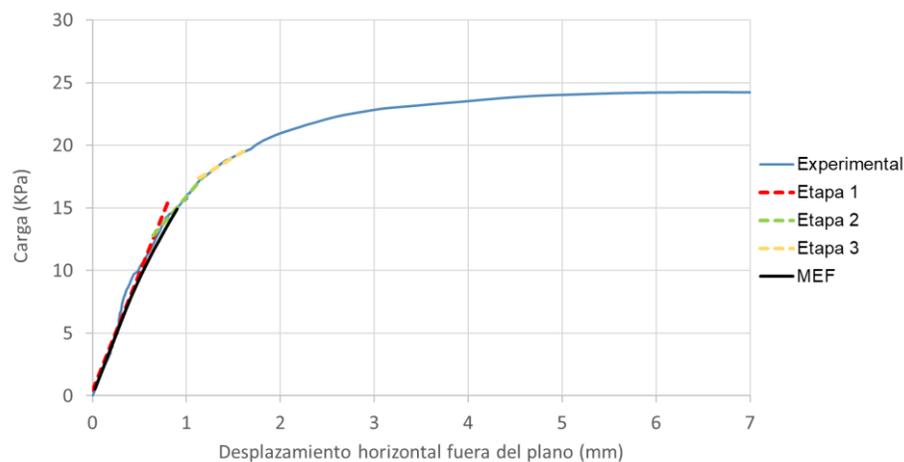


Figura 4.23 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal sin calibrar

En la Figura 4.24 se presenta el mecanismo de falla del muro (M-1.4-3.33) del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional

de muretes en este trabajo. Se observa la formación de grietas verticales al centro del muro de manera consistente con lo observado experimentalmente.

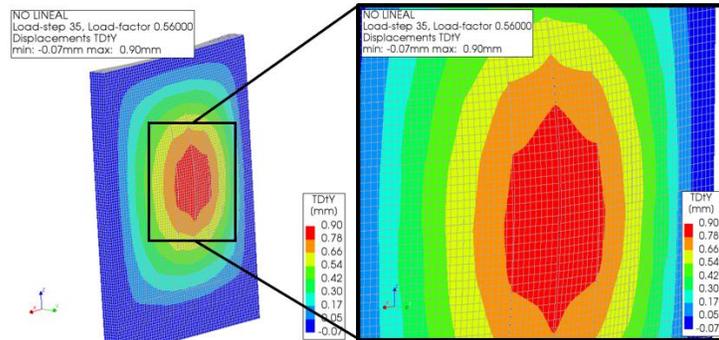


Figura 4.24 Mecanismo de falla del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal sin calibrar

Muro M-2.0-0

En la Figura 4.25 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-0) con la curva obtenida del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaz de la junta horizontal.

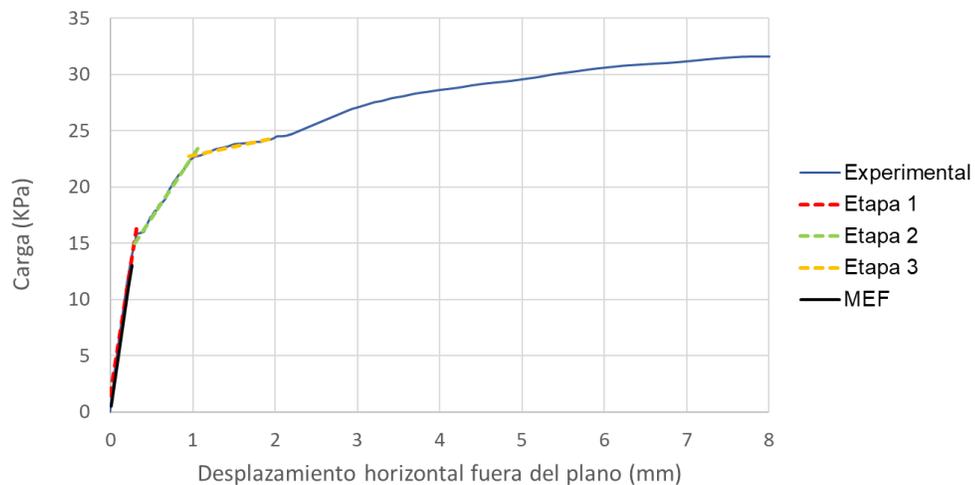


Figura 4.25 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal sin calibrar

En la Figura 4.26 se presenta el mecanismo de falla del muro (M-2.0-0) del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. Se observa que dicho mecanismo de falla no corresponde al observado experimentalmente al presentarse grietas horizontales al centro del muro. Se concluye que el confinamiento incrementa la resistencia a tensión de la interfaz de mortero de la junta horizontal, que del ensaye de muretes fue 0.13 MPa.

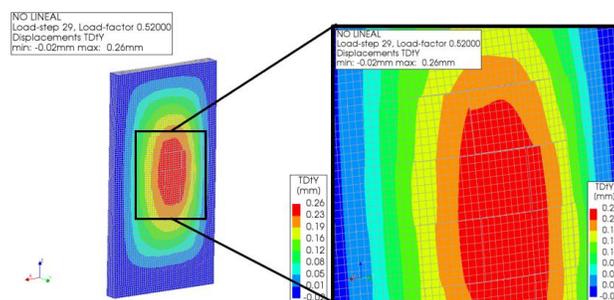


Figura 4.26 Mecanismo de falla del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal sin calibrar

Muro M-2.0-3.33

En la Figura 4.27 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

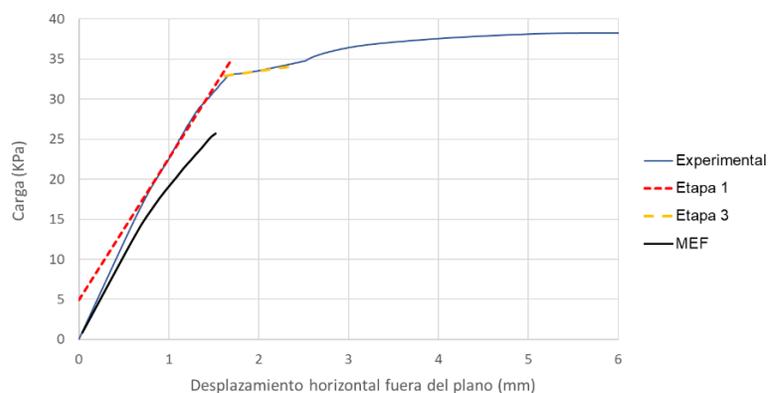


Figura 4.27 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal sin calibrar

En la Figura 4.28 se presenta el mecanismo de falla del muro (M-2.0-3.33) del modelo computacional considerando los resultados obtenidos de la modelación computacional de muretes en este trabajo. Se observa la formación de grietas verticales al centro del muro de manera consistente con lo observado experimentalmente.

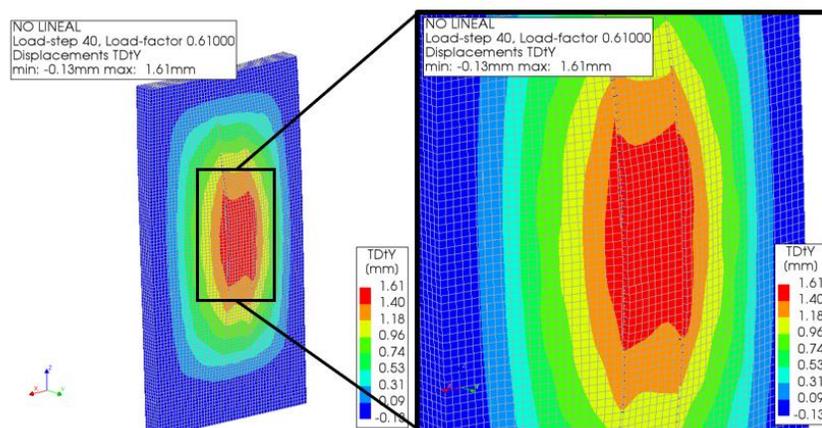


Figura 4.28 Mecanismo de falla del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal sin calibrar

- b) Propuesta de valores de resistencia para predecir el primer agrietamiento vertical del muro.

Muro M-1.4-0

En la Figura 4.29 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-0) con la curva obtenida del modelo computacional. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.32 MPa como valor mínimo para los elementos de interfaz (mortero horizontal), 0.30 MPa para los elementos de interfaz (mortero vertical) y 0.34 MPa para los elementos de interfaz del bloque (fractura a tensión) permiten reproducir el agrietamiento asociado al primer cambio de rigidez en la curva carga – desplazamiento fuera del plano con la formación de la grieta vertical al centro del muro. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

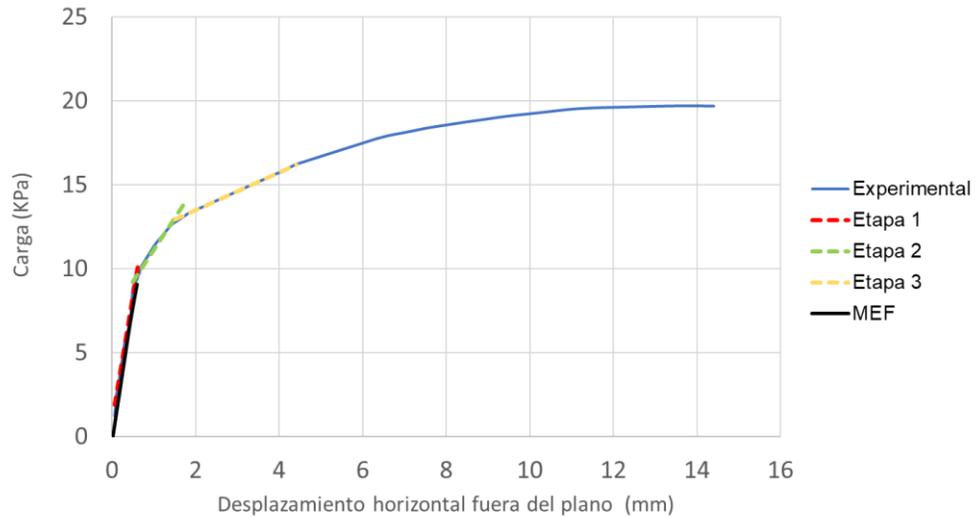


Figura 4.29 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal calibrado

En la Figura 4.30 se presentan los resultados del modelo del muro M-1.4-0. Se presentan (a) los esfuerzos normales (σ_{nn}) y (b) desplazamientos normales (Δu_{nn}) de los elementos de interfaz de mortero y bloque. Se puede observar que los mayores esfuerzos y desplazamientos de las juntas se presentan de manera vertical al centro del muro en la superficie libre. Adicionalmente se presentan esfuerzos y desplazamientos importantes en la segunda junta horizontal de mortero en la superficie de carga.

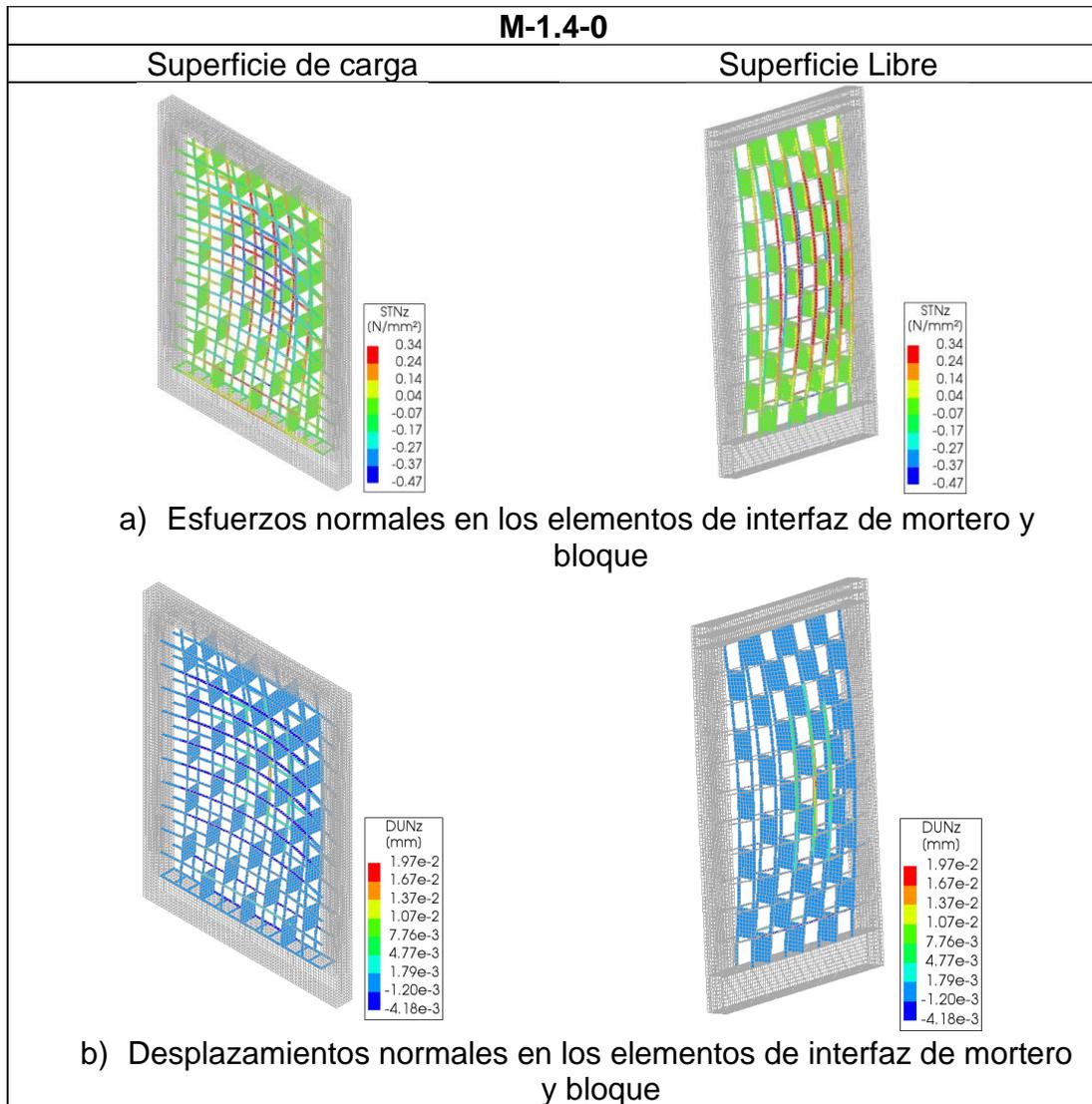


Figura 4.30 Resultados computacionales del muro (M-1.4-0) del modelo no lineal calibrado

Muro M-1.4-3.33

En la Figura 4.31 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.13 MPa como valor mínimo para los elementos de interfaz (mortero horizontal), 0.40 MPa para los elementos de interfaz (mortero vertical) y 0.44 MPa para los elementos de interfaz del bloque (fractura a tensión) permiten reproducir el agrietamiento asociado al primer

cambio de rigidez en la curva carga – desplazamiento fuera del plano con la formación de la grieta vertical al centro del muro. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

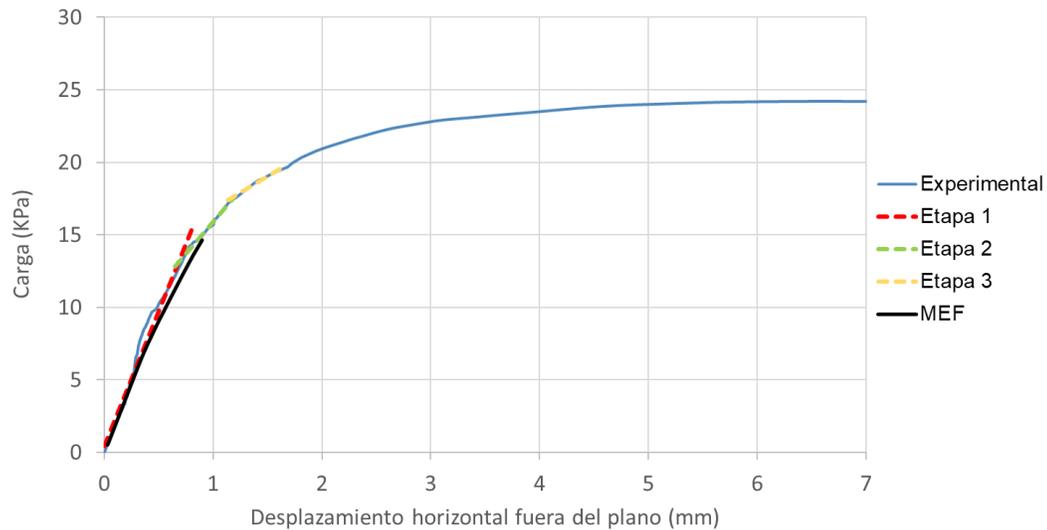


Figura 4.31 Curva carga - desplazamiento del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal calibrado

En la Figura 4.32 se presentan los resultados del modelo del muro M-1.4-3.33. Se presentan (a) los esfuerzos normales (σ_{nn}) y (b) desplazamientos normales (Δu_{nn}) de los elementos de interfaz de mortero y bloque. Se puede observar que los mayores esfuerzos y desplazamientos de las juntas se presentan de manera vertical al centro del muro en la superficie libre. Adicionalmente se presentan esfuerzos y desplazamientos importantes en la primera junta horizontal de mortero en la superficie de carga.

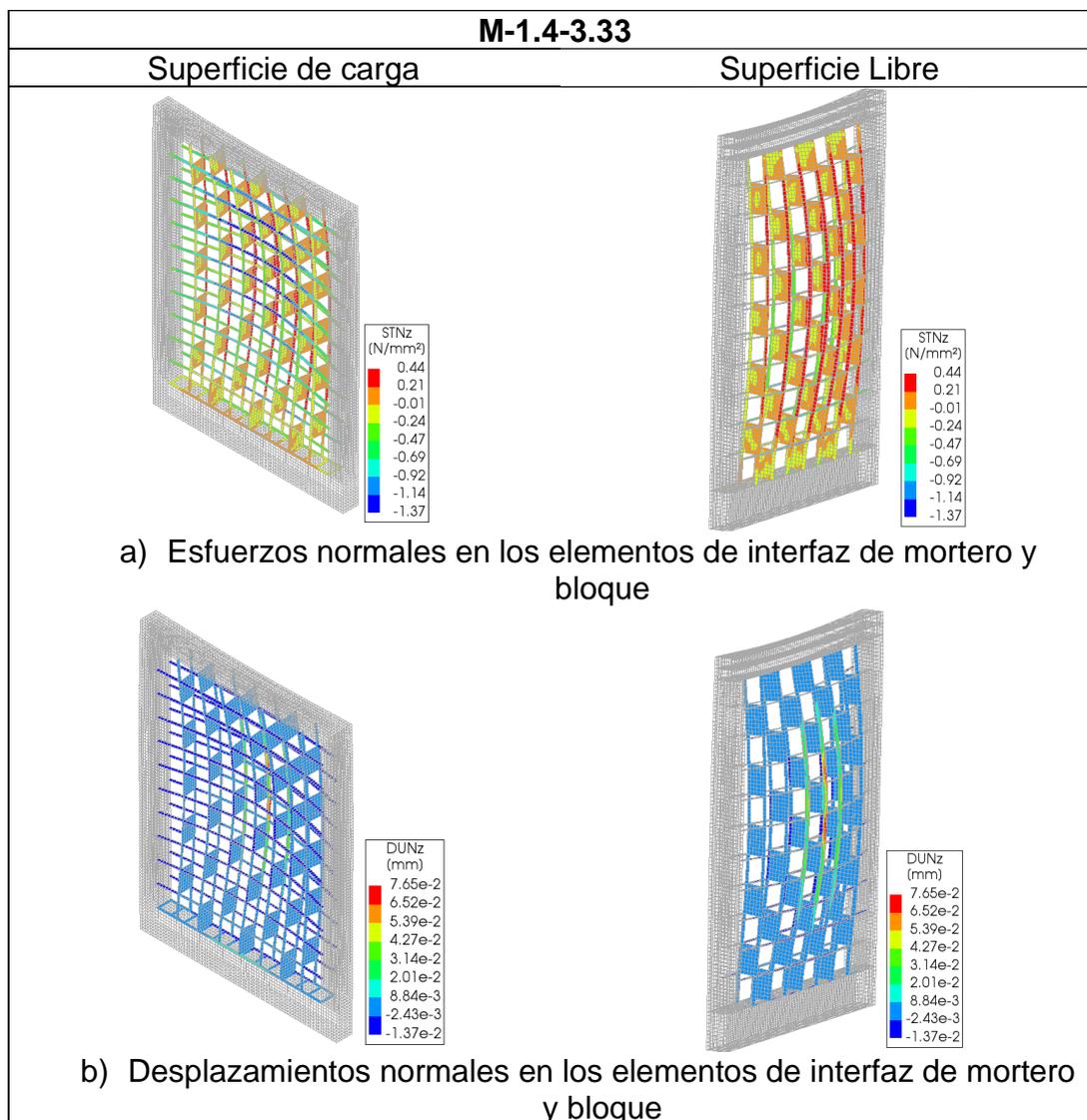


Figura 4.32 Resultados computacionales del muro (M-1.4-3.33) del modelo no lineal calibrado

Muro M-2.0-0

En la Figura 4.33 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-0) con la curva obtenida del modelo computacional. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.27 MPa como valor mínimo para los elementos de interfaz (mortero horizontal), 0.31 MPa para los elementos de interfaz (mortero vertical) y 0.35 MPa para los elementos de interfaz del bloque (fractura a tensión) permiten reproducir el agrietamiento asociado al primer cambio de rigidez en

la curva carga – desplazamiento fuera del plano con la formación de la grieta vertical al centro del muro. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

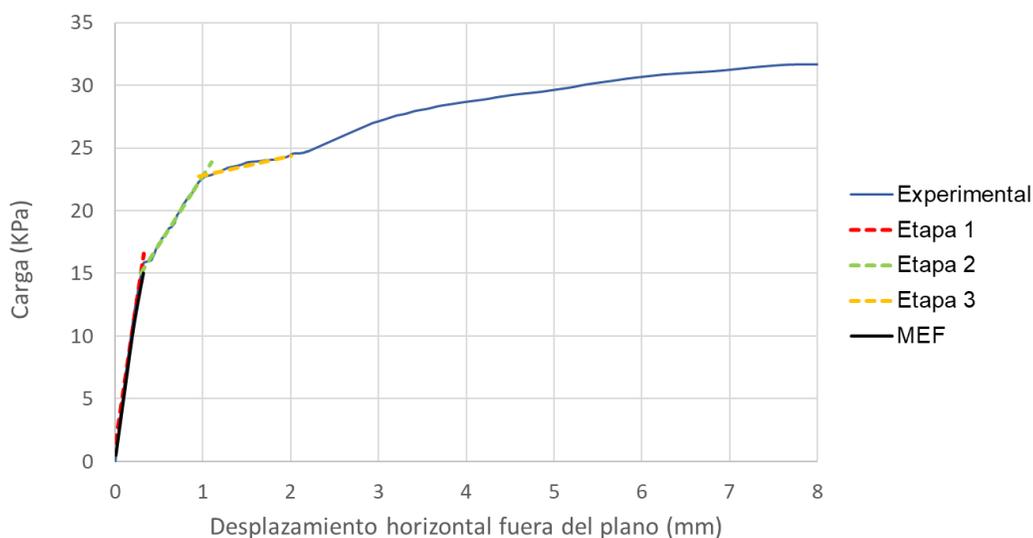


Figura 4.33 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal calibrado

En la Figura 4.34 se presentan los resultados del modelo del muro M-2.0-0. Se presentan (a) los esfuerzos normales (σ_{nn}) y (b) desplazamientos normales (Δu_{nn}) de los elementos de interfaz de mortero y bloque. Se puede observar que los mayores esfuerzos y desplazamientos de las juntas se presentan de manera vertical al centro del muro en la superficie libre. Adicionalmente se presentan esfuerzos y desplazamientos importantes en la segunda junta horizontal de mortero en la superficie de carga.

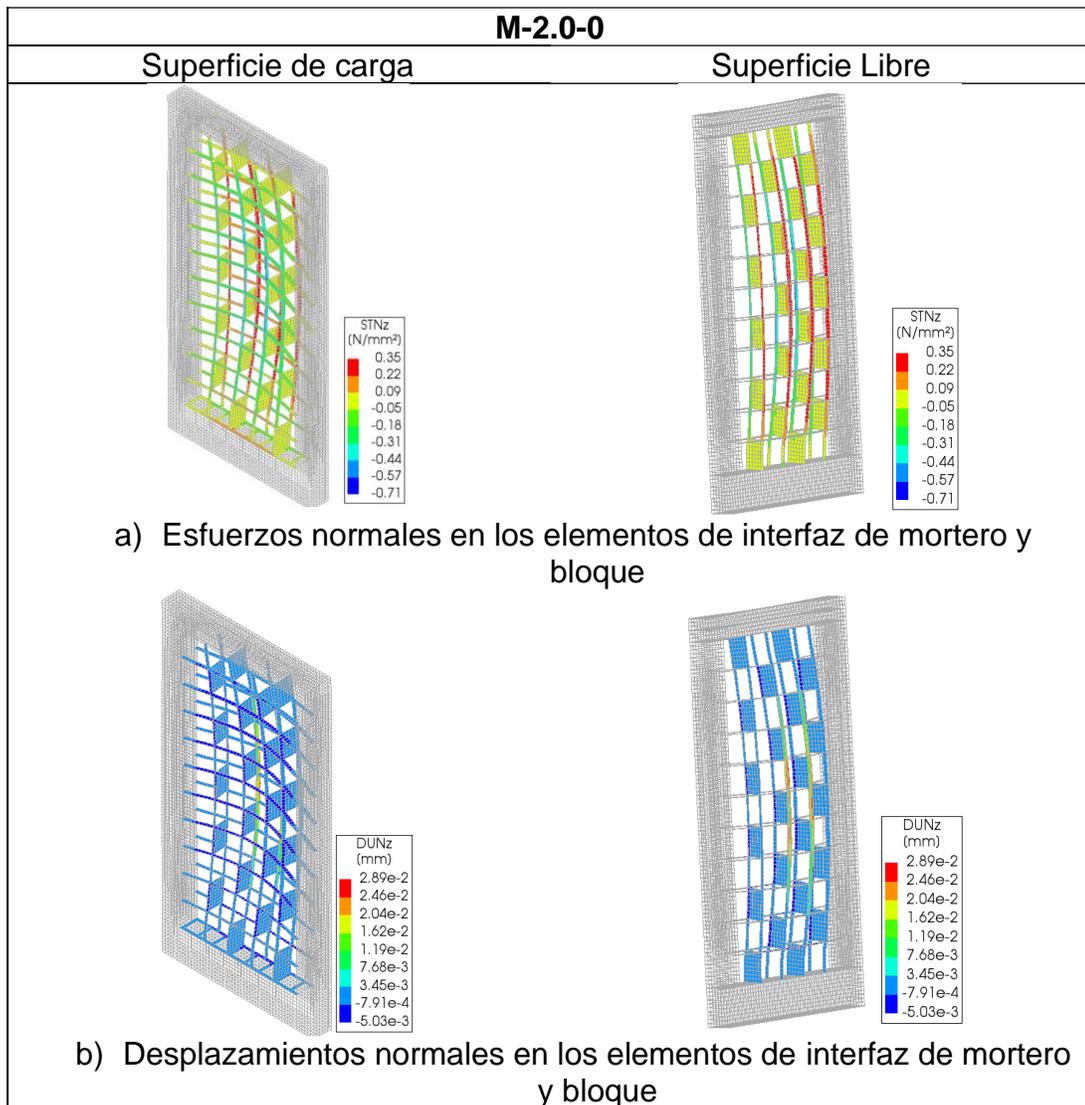


Figura 4.34 Resultados computacionales del muro (M-2.0-0) del modelo no lineal calibrado

Muro M-2.0-3.33

En la Figura 4.35 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional. Para el modelo computacional se determinó que la resistencia a tensión de 0.33 MPa como valor mínimo para los elementos de interfaz (mortero horizontal), 0.98 MPa para los elementos de interfaz (mortero vertical) y 1.08 MPa para los elementos de interfaz del bloque (fractura a tensión) permiten reproducir el agrietamiento asociado al primer

cambio de rigidez en la curva carga – desplazamiento fuera del plano con la formación de la grieta vertical al centro del muro. El análisis computacional se detuvo al alcanzar las resistencias a tensión máximas de los elementos de interfaces verticales mortero y bloque.

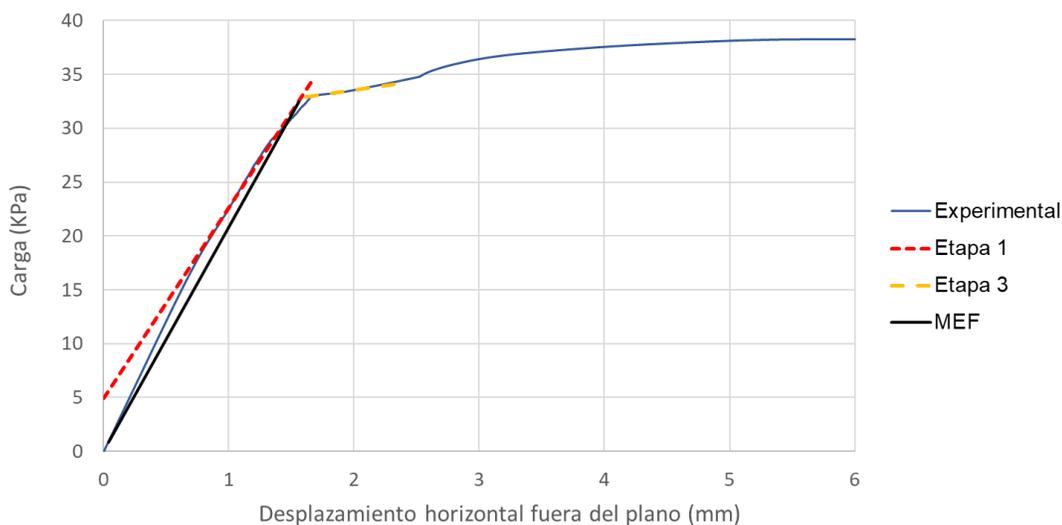


Figura 4.35 Curva carga - desplazamiento del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal calibrado

En la Figura 4.36 se presentan los resultados del modelo del muro M-2.0-3.33. Se presentan (a) los esfuerzos normales (σ_{nn}) y (b) desplazamientos normales (Δu_{nn}) de los elementos de interfaz de mortero y bloque. Se puede observar que los mayores esfuerzos y desplazamientos de las juntas se presentan de manera vertical al centro del muro en la superficie libre. Adicionalmente se presentan esfuerzos y desplazamientos importantes en la primera junta horizontal de mortero en la superficie de carga.

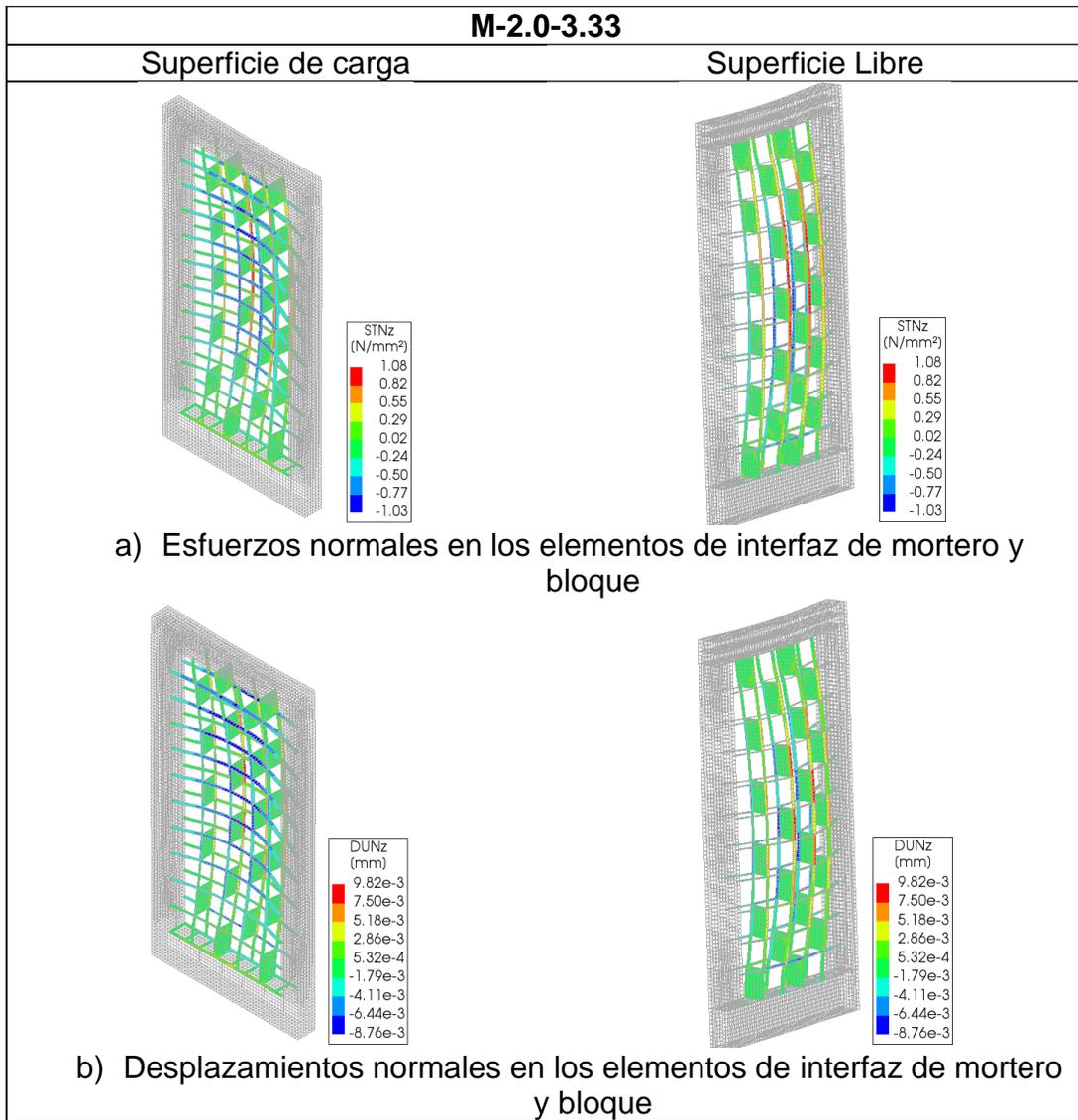


Figura 4.36 Resultados computacionales del muro (M-2.0-3.33) del modelo no lineal calibrado

4.4.3 Modelos elásticos lineales (muros agrietados)

Muro M-1.4-0

En la Figura 4.37 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-0) con la curva obtenida del modelo computacional no lineal con valores de resistencia calibrados para predecir el primer agrietamiento vertical del muro (MEF 1)

y la curva obtenida del modelo computacional elástico con una grieta vertical al centro (MEF 2).

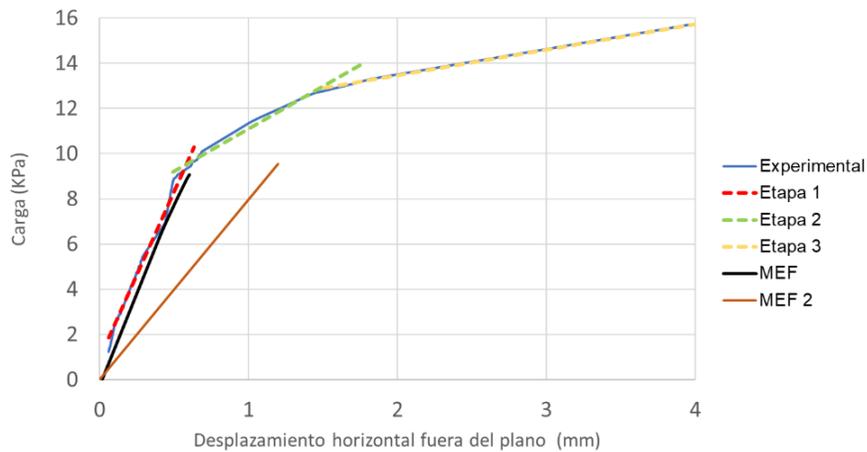


Figura 4.37 Curva carga - desplazamiento del muro M-1.4-0 agrietado

Muro M-1.4-3.33

En la Figura 4.38 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-1.4-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional no lineal con valores de resistencia calibrados para predecir el primer agrietamiento vertical del muro (MEF 1) y la curva obtenida del modelo computacional elástico con una grieta vertical al centro (MEF 2).

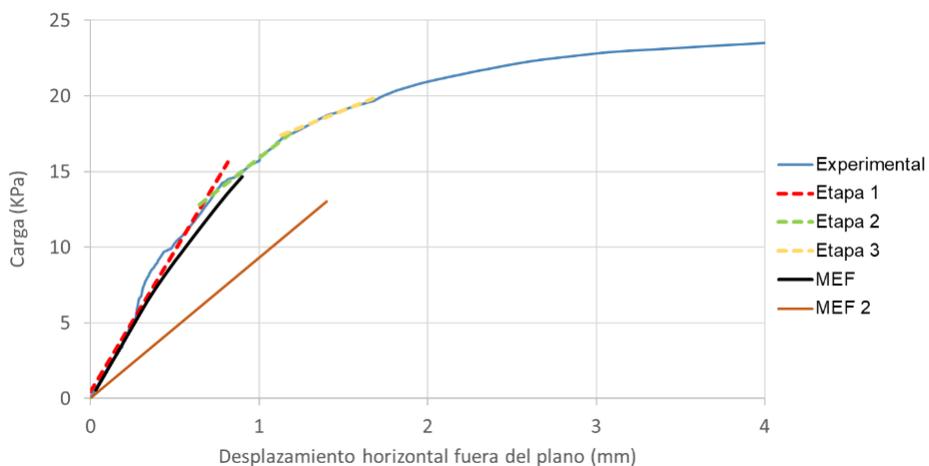


Figura 4.38 Curva carga - desplazamiento del muro M-1.4-3.33 agrietado

Muro M-2.0-0

En la Figura 4.39 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-0) con la curva obtenida del modelo computacional no lineal con valores de resistencia calibrados para predecir el primer agrietamiento vertical del muro (MEF 1) y la curva obtenida del modelo computacional elástico con dos grietas verticales al centro (MEF 2).

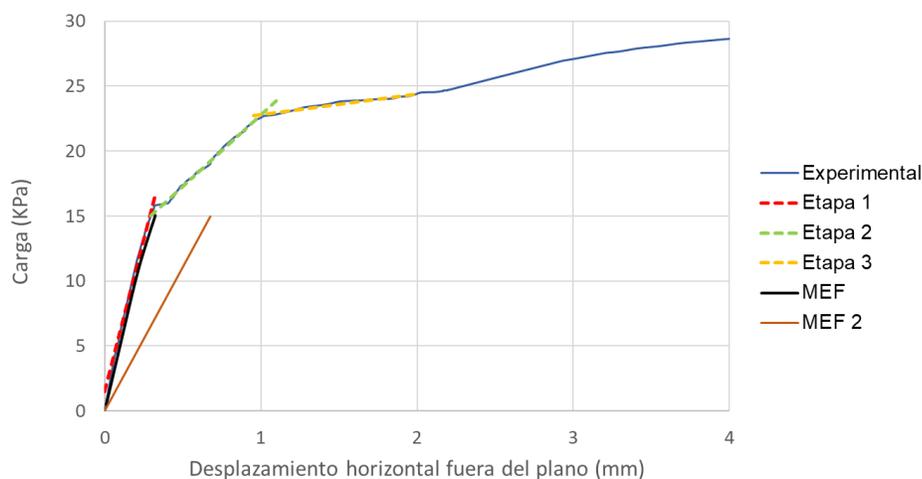


Figura 4.39 Curva carga - desplazamiento del muro M-2.0-0 agrietado

Muro M-2.0-3.33

En la Figura 4.40 se presenta la comparación de la curva experimental del muro (M-2.0-3.33) con la curva obtenida del modelo computacional no lineal con valores de resistencia calibrados para predecir el primer agrietamiento vertical del muro (MEF 1) y la curva obtenida del modelo computacional elástico con dos grietas verticales al centro (MEF 2).

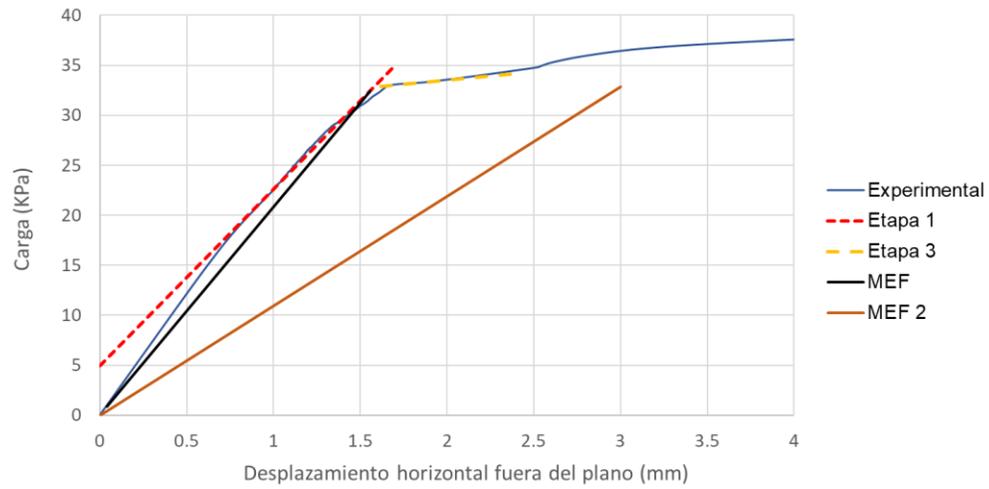


Figura 4.40 Curva carga - desplazamiento del muro M-2.0-3.33 agrietado

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada

En general, las curvas carga – desplazamiento de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano se caracterizaron por tener tres etapas de comportamiento inicial. Los límites de estas etapas están asociados a un cambio significativo en la rigidez. La primera etapa corresponde al comportamiento inicial del muro hasta antes de que ocurran los agrietamientos verticales al centro de la cara frontal del muro (W_1); en esta etapa hay un comportamiento de placa que actúa en ambas direcciones. La segunda etapa corresponde al comportamiento del muro después de los agrietamientos verticales al centro de la cara frontal del muro hasta el agrietamiento diagonal a 45° (W_2); en esta etapa el comportamiento de placa se modifica por la discontinuidad producida por la grieta vertical. La tercera etapa describe el comportamiento del muro después de los agrietamientos diagonales a 45° ; el límite superior de la etapa 3 se define como W_3 . Posterior a la tercera etapa, en el muro se presenta un mecanismo de arco. Estas tres etapas han sido aproximadas de manera lineal en este trabajo.

En la Tabla 5.1 se presentan los valores de las cargas W_1 , W_2 , W_3 y W_{max} (resistencia del muro) normalizados con respecto a W_1 . Se observa que el muro M-2.0-3.33 es atípico ya que el agrietamiento vertical se presentó simultáneamente con la formación de la grieta horizontal, de tal suerte que $W_1 = W_2$. Considerando los primeros tres muros se observa que la carga W_2 se alcanza a un valor promedio de $1.41 W_1$, la carga W_3 a un valor promedio de $1.61 W_1$ y el valor máximo a un valor promedio de $2.01 W_1$.

Tabla 5.1 Normalización de las cargas con respecto a la carga W_1 .

W_i/W_1	M-1.4-0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33
W_1/W_1	1	1	1	1
W_2/W_1	1.35	1.36	1.52	
W_3/W_1	1.70	1.51	1.63	1.03
W_{max}/W_1	2.07	1.86	2.11	1.17

En la Tabla 5.2 se presentan los valores de las cargas W_1 , W_2 , W_3 y W_{max} (resistencia del muro) normalizados con respecto a W_{max} . Se observa que el muro M-2.0-3.33 es atípico ya que la relación W_1/W_{max} fue significativamente mayor que los valores obtenidos para los otros muros. Considerando los primeros tres muros se observa que la carga W_1 se alcanza a un valor promedio de $0.50 W_{max}$, la carga W_2 se alcanza a un valor promedio de $0.70 W_{max}$ y la carga W_3 se alcanza a un valor promedio de $0.80 W_{max}$.

Tabla 5.2 Normalización de las cargas con respecto a la carga W_{max}

W_i/W_{max}	M-1.4-0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33
W_1/W_{max}	0.48	0.54	0.47	0.86
W_2/W_{max}	0.65	0.73	0.72	
W_3/W_{max}	0.82	0.81	0.77	0.88
W_{max}/W_{max}	1	1	1	1

En la Tabla 5.3 se presenta la relación entre la rigidez tangente de cada etapa y la rigidez inicial para las tres etapas iniciales de la curva carga – desplazamiento de los muros. La rigidez tangente se determinó como la pendiente del ajuste lineal de cada etapa: K_{T1} , K_{T2} y K_{T3} . Considerando los primeros tres muros se observa que la rigidez tangente de la segunda etapa se reduce a un 30% de la rigidez inicial ($K_{T2} \approx 0.30 K_{T1}$). Asimismo, la rigidez tangente de la tercera etapa se reduce a un 10% de la rigidez inicial ($K_{T3} \approx 0.10 K_1$). Adicionalmente, se observa que la carga axial incrementa la rigidez tangente de la segunda etapa.

Tabla 5.3 Relación entre la rigidez tangente y la rigidez inicial.

K_{Ti}/K_{T1}	M-1.4-0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33
K_{T1}/K_{T1}	1	1	1	1
K_{T2}/K_{T1}	0.23	0.46	0.21	
K_{T3}/K_{T1}	0.07	0.21	0.03	0.08

En la Tabla 5.4 se presenta la relación entre la rigidez secante y la rigidez inicial para los límites de las tres etapas iniciales de la curva carga – desplazamiento de los muros. La rigidez secante se determinó como la carga entre el desplazamiento, obteniéndose 3 rigideces secantes K_{S1} , K_{S2} y K_{S3} que corresponden a las cargas W_1 , W_2 y W_3 , respectivamente. Considerando los primeros tres muros se observa que la rigidez secante para la carga W_2 disminuye al 58% de la rigidez inicial ($K_{S2} \approx 0.58 K_{S1}$). Asimismo, la rigidez secante para la carga W_3 disminuye al 36% de la rigidez inicial ($K_{S3} \approx 0.36 K_{S1}$). Adicionalmente, se observa que la carga axial incrementa la rigidez secante.

Tabla 5.4 Relación entre la rigidez secante y la rigidez inicial.

K_{Si}/K_{S1}	M-1.4-0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33
K_{S1}/K_{S1}	1	1	1	1
K_{S2}/K_{S1}	0.54	0.76	0.44	
K_{S3}/K_{S1}	0.22	0.61	0.24	0.75

5.2. Propiedades mecánicas del bloque hueco de concreto

En la Tabla 5.5 se presenta un análisis de la relación del módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto considerando un ensaye a compresión axial y un ensaye a flexión. Para este propósito se presenta el módulo de elasticidad del concreto calculado con la ecuación 2.2 desarrollada por Rosado (2014) para tres valores de resistencia a compresión axial. Estas resistencias corresponden a resistencias sobre área neta de bloques huecos de concreto (f_{pn}) ensayados en tres estudios diferentes: Flores (2008), Hernández (2015) y Cacep (2019).

Hernández (2015) midió experimentalmente el módulo de elasticidad de los bloques; se observa que existe una buena correlación con la fórmula de Rosado (2014). En este trabajo de investigación se ensayó a flexión los bloques de Cacep (2019) y se modeló elásticamente con el MEF; se observa que el módulo de elasticidad a flexión es el 35% del módulo de elasticidad a compresión axial. El módulo de elasticidad de los bloques para el modelo elástico del MEF de los muretes es el 40% del módulo de elasticidad a compresión axial. El módulo de elasticidad de los bloques para el modelo elástico del MEF de los muros de mampostería confinada es el 60% del módulo de elasticidad a compresión axial. Se concluye que el módulo de elasticidad del bloque sometido a flexión es inferior al módulo de elasticidad del bloque sometido a compresión axial. En el caso de mampostería simple, el módulo de elasticidad utilizado para modelar a flexión los bloques huecos de concreto debe ser el 40% del módulo de elasticidad de los bloques obtenida de un ensaye a compresión axial. En el caso de mampostería confinada, es el 60%.

Tabla 5.5 Relación entre el módulo de elasticidad del bloque sometido a flexión y compresión axial

	Prueba	f_{pn} (MPa)	E (MPa)	E/E_{Rosado}
Rosado, 2014	Compresión axial	9.52	10861	1
		9.66	10940	1
		8.93	10519	1
Hernández, 2015	Compresión axial	8.93	10921	1.04
Novelo, 2020 (MEF, BHC a flexión)	Flexión	9.66	3852	0.35
Novelo, 2020 (MEF, Murete a tensión por flexión paralela a las juntas)	Flexión	9.52	4365	0.40
Novelo, 2020 (MEF, MMC con cargas fuera del plano)	Flexión	9.66	6556	0.60

5.3. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muretes

Murete con tensión por flexión perpendicular a la junta

En la Figura 5.1 se compara la curva carga – desplazamiento de los muretes con tensión por flexión perpendicular a la junta, obtenida del modelo elástico, del modelo no lineal y del ensaye experimental. El modelo elástico y el no lineal tienen un comportamiento lineal; esto es porque el agrietamiento en el modelo no lineal se propaga de manera rápida en los últimos pasos de carga. Los modelos computacionales aproximan adecuadamente la rigidez asociada al primer ciclo de carga. La degradación de rigidez observada experimentalmente es un proceso complejo, que se puede asociar a la adherencia bloque – mortero y al comportamiento a tensión de los materiales, que no lo captura el modelo no lineal.

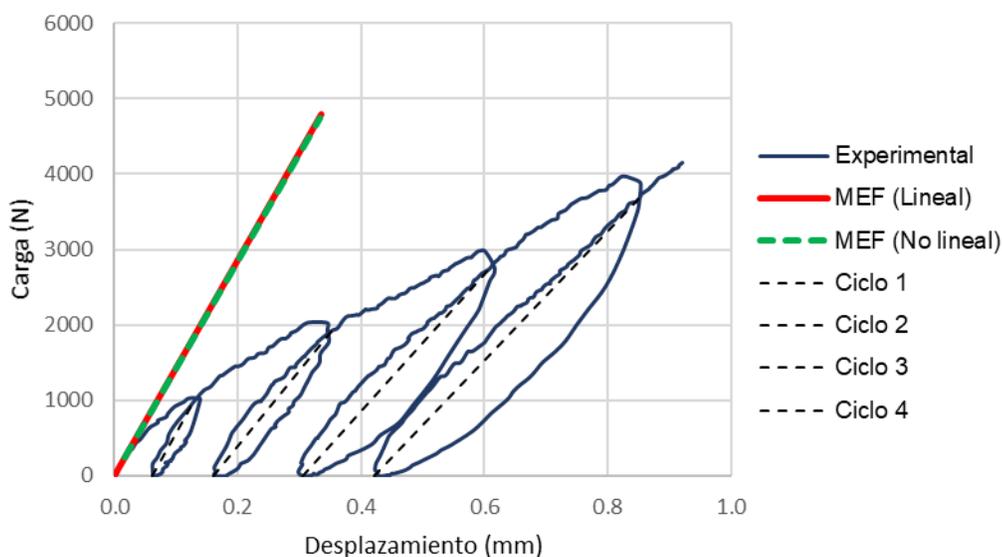


Figura 5.1 Carga - desplazamiento al centro del murete sometido tensión por flexión perpendicular a la junta

En la Tabla 5.6 se presentan las rigideces obtenidas para cada ciclo de carga registrado en el ensaye experimental, divididas entre la rigidez obtenida del modelo lineal. Se observa una degradación de la rigidez para cada ciclo de carga, generando un comportamiento no lineal de la mampostería simple.

Tabla 5.6 Rigidez de cada ciclo del murete sometido a tensión por flexión perpendicular a la junta dividido entre la rigidez del modelo lineal

	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Rigidez	M/M_{lineal}
MEF (LINEAL)	0.335	4791	14312	1.00
MEF (NO LINEAL)	0.484	4743	14420	1.01
CICLO 1	0.061	0	14549	1.02
	0.131	1020		
CICLO 2	0.161	0	10106	0.71
	0.352	1931		
CICLO 3	0.304	0	9057	0.63
	0.608	2745		
CICLO 4	0.422	0	8603	0.60
	0.853	3710		

Murete con tensión por flexión paralela a la junta

En la Figura 5.2 se compara la curva carga – desplazamiento de los muretes con tensión por flexión paralela a la junta, obtenida del modelo elástico, del modelo no lineal y del ensaye experimental. El modelo elástico y el no lineal tienen un comportamiento lineal; esto es porque el agrietamiento en el modelo no lineal se propaga de manera rápida en los últimos pasos de carga. Los modelos computacionales aproximan adecuadamente la rigidez asociada al primer ciclo de carga. La degradación de rigidez observada experimentalmente es un proceso complejo, que se puede asociar a la adherencia bloque – mortero y al comportamiento a tensión de los materiales, que no lo captura el modelo no lineal.

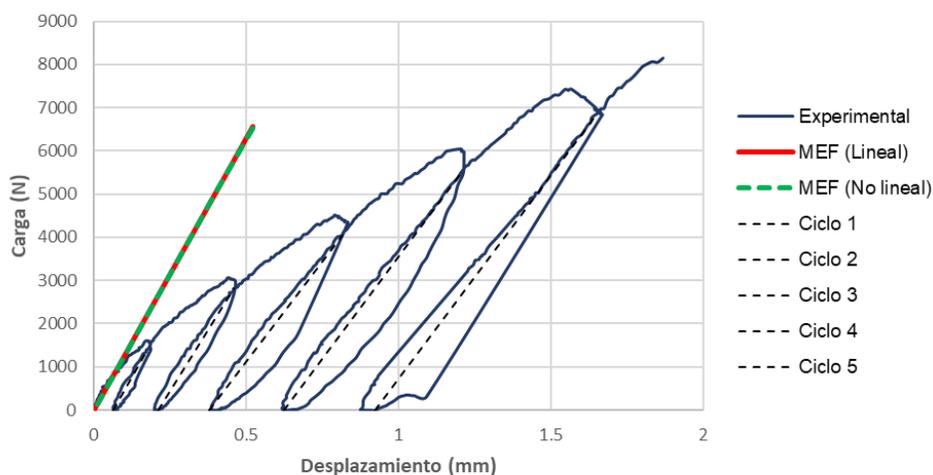


Figura 5.2 Carga - desplazamiento al centro del murete sometido tensión por flexión paralela a la junta

En la Tabla 5.7 se presentan las rigideces obtenidas para cada ciclo de carga registrado en el ensaye experimental, divididas entre la rigidez obtenida del modelo lineal. Se observa una degradación de la rigidez para cada ciclo de carga, generando un comportamiento no lineal de la mampostería simple.

Tabla 5.7 Rigidez del murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

	Desplazamiento (mm)	Carga (N)	Rigidez	M/M_{lineal}
MEF (LINEAL)	0.521	6571	12618	1.00
MEF (NO LINEAL)	0.781	6571	12507	0.99
CICLO 1	0.006	0	12440	0.99
	0.018	145		
CICLO 2	0.021	0	11329	0.90
	0.046	288		
CICLO 3	0.038	0	9334	0.74
	0.081	413		
CICLO 4	0.062	0	9465	0.75
	0.120	560		
CICLO 5	0.092	0	9416	0.75
	0.165	700		

Comparativa de murete a tensión por flexión perpendicular a la junta y murete a tensión por flexión paralela a la junta

Modelos elásticos lineales

En la Tabla 5.8 se comparan los módulos de elasticidad de los bloques obtenidos de la calibración de los modelos computacionales de los muretes sometidos a tensión por flexión perpendicular y paralela a la junta (MEF). Dada la diferencia significativa que se presentó en los modelos, se realizó un modelo simplificado de los muretes asumiendo un comportamiento de viga maciza y cuyos cálculos se presenta en el Apéndice A. La relación entre los módulos de elasticidad del bloque fue 10.27. Se concluye que el módulo de elasticidad del bloque sometido a tensión por flexión perpendicular a las juntas presenta un valor atípico; es posible que haya un error en los desplazamientos registrados en el ensaye experimental por un factor de 10.

Tabla 5.8 Módulo de elasticidad del bloque para los modelos computacionales de muretes (MPa)

	Tensión por flexión perpendicular a las juntas	Tensión por flexión paralela a las juntas
MEF	425	4365
Modelo simplificado	424	3309

Modelos no lineales

En la Tabla 5.9 se comparan los resultados obtenidos del modelo computacional de los muretes sometidos a tensión por flexión perpendicular y paralela a la junta, respecto a la resistencia a tensión del elemento de interfaz del mortero. La relación entre las resistencias a tensión fue 2.9. Se considera que esta diferencia en la resistencia está asociada a:

- El agrietamiento en los muretes sometidos a tensión por flexión perpendicular a la junta se propaga de manera continua y súbita; no hay restricciones para la abertura de la grieta.

- El agrietamiento en los muretes sometidos a tensión por flexión paralela a la junta se propaga de manera discontinua, ya que la presencia del bloque restringe la abertura de la grieta como se ilustra en la Figura 5.3.

Tabla 5.9 Resistencia a tensión de la interfaz mortero – bloque de los modelos computacionales de muretes (MPa).

Murete a tensión por flexión perpendicular a la junta	Murete a tensión por flexión paralela a la junta
0.13	0.382

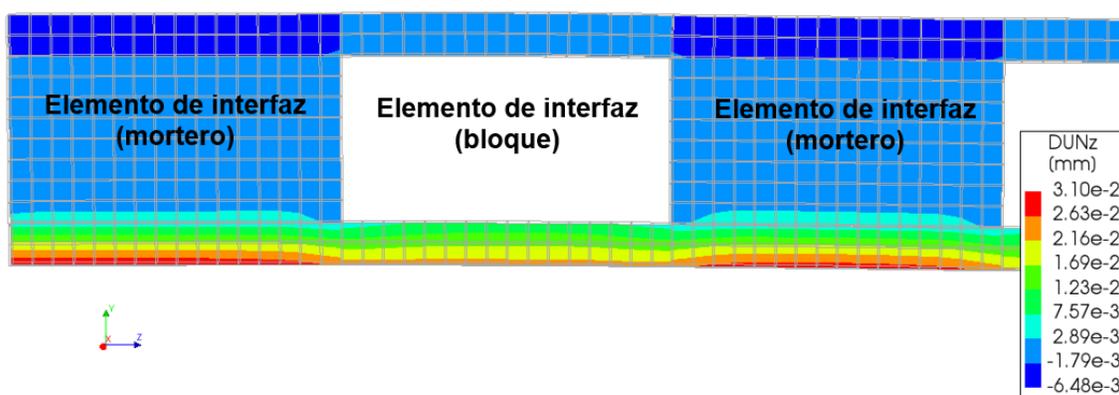


Figura 5.3 Abertura de grieta en elementos de interfaz para el murete sometido a tensión por flexión paralela a la junta

5.4. Desarrollo de modelos del Método del Elemento Finito de muros de mampostería confinada

Módulo de elasticidad del bloque

En la Tabla 5.10 se presenta el módulo de elasticidad del bloque que permite reproducir la rigidez observada en los ensayos experimentales para cada muro modelado computacionalmente. Adicionalmente se presenta la rigidez tangente inicial asociada a la primera etapa en la curva carga – desplazamiento de dichos muros. Se observan valores similares para los muros con relación de aspecto de 1.4; en este caso, se observa un incremento en la rigidez tangente del muro y en consecuencia, en el módulo de elasticidad del bloque, por efecto de la carga axial. En el caso de los

muros con relación de aspecto de 2.0 se observan valores significativamente diferentes. El muro M-2.0-3.33, que tiene carga axial, tiene una rigidez tangente de aproximadamente el 40% de la del muro M-2.0-0; se considera que los valores experimentales del muro M-2.0-3.33 tiene un comportamiento atípico, con valores bajos de rigidez tangente del muro y módulo de elasticidad del bloque.

Tabla 5.10 Módulo de Elasticidad del bloque y rigidez tangente inicial para los muros de mampostería confinada

Muro	Módulo de Elasticidad (MPa)	KT1
M-1.4-0	5283	1670148
M-1.4-3.33	6928	1967990
M-2.0-0	7458	5282903
M-2.0-3.33	2408	2124514

En la Tabla 5.11 se compara el módulo de elasticidad del bloque obtenido del modelo computacional del ensaye del bloque a flexión con respecto el promedio del módulo de elasticidad del bloque de los modelos computacionales de los muros de mampostería confinada. Se observa que el módulo de elasticidad para el bloque ensayado es menor que el del muro de mampostería. Esta diferencia se asocia a que los elementos confinantes en los muros proveen de una rigidez adicional.

Tabla 5.11 Módulo de elasticidad del bloque (MPa) de los muros de mampostería confinada

Ensaye a flexión del bloque	Módulo de elasticidad del bloque para los muros
3852	6556

Resistencia de los elementos de interfaz

En la Tabla 5.12 se presentan las resistencias a tensión de los elementos de interfaz que permite predecir la carga de agrietamiento vertical en los muros de mampostería

confinada. Se presenta la resistencia mínima que debe tener el elemento de interfaz de la junta de mortero horizontal, así como las resistencias a tensión asociadas al agrietamiento vertical de las juntas de mortero vertical y la junta del bloque. Las resistencias a tensión de los elementos de interfaz para los muros sin carga axial son similares. La presencia de la carga axial produjo un incremento en la resistencia a tensión de los elementos de interfaz para la junta vertical de mortero y de los bloques. El muro M-2.0-3.33 presentó un resultado atípico con una alta resistencia en comparación con los otros tres muros.

Tabla 5.12 Resistencia a tensión de los elementos de interfaz de los muros de mampostería confinada.

Muro	Resistencia de elementos de interfaz (MPa)		
	Mortero (horizontal)	Mortero (vertical)	Bloque (tensión)
M-1.4-0	0.32	0.30	0.34
M-1.4-3.33	0.13	0.40	0.44
M-2.0-0	0.27	0.31	0.35
M-2.0-3.33	0.33	0.98	1.08

A continuación, se comparan los resultados de este trabajo de investigación con los obtenidos por Paleo (2016), quien realizó un estudio similar con muros de mampostería confinada y muretes, pero de 12 cm de espesor. Los muros de mampostería confinada fueron de relación de aspecto menor a uno ($H/L=0.75$). Asumió que las resistencias a tensión del elemento de interfaz del mortero eran iguales para la junta horizontal y la junta vertical; esto es, no consideró que el mecanismo de falla por adherencia bloque – mortero y de falla combinada (adherencia bloque – mortero y tensión del bloque) conducen a dos resistencias diferentes en el elemento de interfaz de mortero.

En la Tabla 5.13 se presentan las resistencias a tensión de los elementos de interfaz del mortero y del bloque. Los resultados son los obtenidos de los modelos computacionales no lineales de muretes de este trabajo y de Paleo (2016). Se observa que son similares las resistencias a tensión del elemento de interfaz del mortero para la junta horizontal.

Tabla 5.13 Resistencia a tensión de los elementos de interfaz para muretes (MPa)

	Mortero (horizontal)	Mortero (vertical)	Bloque (tensión)
Novelo (2020)	0.13	0.38	0.55
Paleo (2016)	0.12	0.12	-

En la Tabla 5.14 se presentan las resistencias a tensión del elemento de interfaz del mortero y del bloque. Los resultados son los obtenidos de los modelos computacionales no lineales de muros de mampostería confinada de este trabajo y de Paleo (2016). Se observa que la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de mortero reportada por Paleo (2016) es similar a la obtenida en este trabajo en los muros de mampostería confinada sin carga axial (aproximadamente 0.30 MPa), tanto para juntas de mortero horizontal, como las juntas de mortero vertical. La resistencia a tensión del elemento de interfaz de concreto reportada por Paleo (2016) es similar a la obtenida en este trabajo para muros de mampostería confinada con carga axial (aproximadamente 0.45 MPa), que es a su vez similar a la resistencia a tensión de bloques huecos de concreto medida experimentalmente en este trabajo (0.48 MPa).

Tabla 5.14 Resistencia a tensión del elemento de interfaz para muros de mampostería confinada (MPa)

		Mortero (horizontal)	Mortero (vertical)	Bloque (tensión)
Novelo (2020)	Sin carga Axial	0.30	0.31	0.35
	Con carga Axial	0.13	0.40	0.44
Paleo (2016)		0.29	0.29	0.45

De la Tabla 5.13 y Tabla 5.14 se concluye que el efecto de confinamiento incrementa la resistencia a tensión del elemento de interfaz del mortero de la junta horizontal.

Efecto de la rigidez de la interfaz de mortero

Para conocer la influencia de la rigidez del elemento de interfaz de la junta de mortero, se realizó la calibración del módulo de elasticidad de los bloques del muro de mampostería confinada considerando dos valores de módulo de elasticidad del mortero: 4000 MPa y 1000 MPa. En la Tabla 5.15 se presentan los módulos de elasticidad de los bloques para los dos valores de módulo de elasticidad del mortero. Se observa que una reducción del 75% del módulo de elasticidad del mortero se requiere un incremento aproximado del 10% en el módulo de elasticidad del bloque para aproximar la rigidez inicial fuera del plano de los muros. Se concluye que los resultados de los análisis de los muros de mampostería confinada dependen principalmente del valor del módulo de elasticidad del bloque.

Tabla 5.15 Módulo de elasticidad de los bloques asociado a diferentes valores de módulo de elasticidad del mortero.

Muro	Módulo de Elasticidad del mortero (MPa)	
	4000	1000
	Módulo de Elasticidad del bloque (MPa)	
M-1.4-0	4913	5283
M-1.4-3.33	5971	6928
M-2.0-0	6707	7458
M-2.0-3.33	2320	2408

Efecto de la rigidez del muro agrietado

En la Tabla 5.16 se presenta la relación la rigidez de los muros (K_1) con la rigidez asociada a la formación de una grieta vertical al centro del muro (K_2). Adicionalmente se presenta la relación de la rigidez (K_2) con la rigidez tangente (KT_2) y secante (KS_2) al límite de la segunda etapa en la curva carga – desplazamiento fuera del plano. Considerando los primeros tres muros se observa que la presencia de una grieta vertical produce una significativa reducción de la rigidez del muro de mampostería confinada, siendo la rigidez del muro agrietado aproximadamente 47% de la rigidez inicial. Esta rigidez es similar a la rigidez secante al límite de la segunda etapa de los muros sin carga axial.

Tabla 5.16 Rigideces de los muros.

	M-1.4-0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33	Promedio
K1	1670148	1967990	5282903	2124514	2973681
K2	811414	950258	2265221	1116786	1342298
K2/K1	0.49	0.48	0.43	0.53	0.47
K2/KT2	2.12	1.06	2.01	-	1.73
K2/KS2	0.91	0.64	0.97	-	0.84

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

En esta tesis se desarrollaron modelos computacionales no lineales del Método del Elemento Finito para analizar la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se realizaron ensayos para obtener propiedades mecánicas bloques huecos de concreto de tres celdas y sometidos a tensión y flexión. Se realizaron modelos computacionales de bloques sometidos a flexión, así como de muretes y muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. De los resultados experimentales y computacionales de esta investigación se formularon las siguientes conclusiones:

1. Las curvas carga – desplazamiento de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano se caracterizaron por tener tres etapas de comportamiento inicial. Los límites de estas etapas están asociados a un cambio significativo en la rigidez. La primera etapa corresponde al comportamiento inicial del muro hasta antes de que ocurran los agrietamientos verticales al centro de la cara frontal del muro; en esta etapa hay un comportamiento de placa que actúa en ambas direcciones. La segunda etapa describe el comportamiento del muro después de los agrietamientos verticales al centro de la cara frontal del muro hasta el agrietamiento diagonal a 45° ; en esta etapa el comportamiento de placa se modifica por la discontinuidad producida por la grieta vertical, quedando como una placa con tres bordes apoyados. La tercera etapa describe el comportamiento del muro después de los agrietamientos diagonales a 45° . Posterior a la tercera etapa, en el muro se presenta un mecanismo de arco.
2. El módulo de elasticidad del bloque sometido a flexión es inferior al módulo de elasticidad del bloque sometido a compresión axial. En el caso de mampostería simple, el módulo de elasticidad utilizado para modelar a flexión los bloques

huecos de concreto debe ser el 40% del módulo de elasticidad de los bloques obtenida de un ensaye a compresión axial. En el caso de mampostería confinada, es el 60%.

3. La resistencia a tensión del elemento de interfaz del mortero de los modelos del murete sometido a flexión perpendicular a las juntas fue 0.13 MPa, que es menor que la de los modelos del murete sometido a flexión paralela a las juntas de 0.38 MPa. Esta diferencia está asociada a que el agrietamiento en los muretes sometidos a tensión por flexión paralela a la junta se propaga de manera discontinua, ya que la presencia del bloque restringe la abertura de la grieta.
4. Los modelos no lineales de los muretes son capaces de reproducir el mecanismo de falla observado experimentalmente, tanto para muretes ensayados a tensión por flexión perpendicular a la junta, como muretes ensayados a tensión por a flexión paralela a la junta con falla combinada.
5. El módulo de elasticidad de los bloques que aproxima la rigidez de los MMC fue en promedio 6556 MPa para los muros M-1.4-0, M-1.4-3.33 y M-2.0-0. Este valor es mayor que el observado para el bloque ensayado a flexión (3852 MPa). Este incremento se asocia a que los elementos confinantes en los muros proveen de una rigidez adicional.
6. Los modelos computacionales de los muros de mampostería confinada permiten identificar los agrietamientos iniciales. El primer agrietamiento corresponde a las juntas verticales al centro del muro en la superficie libre. El siguiente agrietamiento corresponde a la segunda junta horizontal de mortero en la superficie de carga del muro para aquellos con carga axial nula y en la primera junta horizontal de mortero para los muros con carga axial.
7. La presencia de la carga axial produjo un incremento en la resistencia a tensión de los elementos de interfaz para la junta vertical de mortero y de los bloques de los muros de mampostería confinada.
8. El efecto del confinamiento incrementa la resistencia a tensión del elemento de interfaz del mortero de la junta horizontal de los muros de mampostería confinada con respecto a los muretes de mampostería simple.

9. Los modelos no lineales de los muros de mampostería confinada son capaces de reproducir el mecanismo de falla observado experimentalmente, consistente una grieta vertical para muros de mampostería confinada con relación de aspecto de 1.4, así como dos grietas verticales para muros con relación de aspecto de 2.0.
10. La presencia de una grieta vertical en los muros de mampostería confinada produce una significativa reducción de la rigidez del muro de mampostería confinada, siendo la rigidez del muro agrietado aproximadamente 47% de la rigidez inicial. Esta rigidez del muro agrietado es similar a la rigidez secante en el límite superior de la segunda etapa de los muros sin carga axial.

REFERENCIAS

1. ASTM - The American Society for Testing and Materials (2013), Standard test method for splitting tensile strength of masonry units, ASTM C1006-07, ASTM, E.U.A.
2. Baeza Quintero J. (2014). Muros de mampostería confinada de tabiques sólidos sujetos a cargas fuera del plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
3. Bazant Z., Planas J. (1998). Fracture and size effect in concrete and quasi-brittle materials. CRC Press, 1998; Boca Raton, Florida, E. U. A.
4. Bean Popehn Jennifer R., Schultz Arturo E. (2011). Finite-Element Models for Slender, Posttensioned Masonry Walls Loaded Out-of-Plane. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 137(12), 1489-1498.
5. Cacep Rodríguez J. (2019). Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con relación de aspecto mayor que uno. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
6. Dorantes Sansores A. (2011). Resistencia a tensión por flexión fuera del plano de muretes de mampostería de 12 cm de espesor. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
7. Fernández B. L., Paleo A. S., Varela R. J., Moreno J.H., G. Cantón J. D. (2018) Modelación del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. "Memorias del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural". SMIE.
8. Fernández L. (2002). Modelado numérico de la fractura en el concreto. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
9. Flores Chan R. (2008). Determinación de la resistencia a tensión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

10. Gettu R., Shah S. (1997). Fracture Mechanics. En High performance concretes and applications. Shah S., Ahmad S. (Eds.), pp. 161 – 212, Edward Arnold, Gran Bretaña.
11. González Herrera M. (2010). Comportamiento de la mampostería de bloques huecos de concreto de distintos espesores, sujeta a compresión axial. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México
12. González V. J. (2006). Determinación de la resistencia a compresión axial de la mampostería de bloques de concreto usada en Yucatán. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
13. Hernández Santillán J. (2015). Modelación de la fractura en la mampostería típica de la península de Yucatán. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
14. Hordijk, D. A. (1991) Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology.
15. Lourenço Paulo B. (2000). Anisotropic softening model for masonry plates and shells. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 126(9), 1008-1016.
16. Milani Gabriele, Lourenço Paulo B, Tralli Antonio. (2006). Anisotropic softening model for masonry plates and shells. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 132(10), 1650-1663.
17. Moreno Herrera J. (2014). Propuesta de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
18. Moreno H. J., Varela R. J., Fernandez B. L., (2014). Bidirectional strut method: out-of-plane strength of confined masonry walls. “Canadian Journal of Civil Engineering”, 41, 1029-1035.
19. Moreno H. J., Varela R. J., Fernández B. L., (2015). Out-of-Plane Design Procedure for Confined Masonry Walls. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 142(2), 1-12.
20. Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de Estructuras de Mampostería (2017), Gaceta Municipal, Mérida, Yucatán, México.

21. Oller S. (2001). Fractura mecánica. Un enfoque global. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), 1a. Edición, Barcelona, España.
22. Paleo Torres A. (2016). Modelación del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto de 0.75, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
23. Reccia Emanuele, Cazzani Antonio, Cecchi Antonella (2012). FEM-DEM modeling for out-of-plane loaded masonry panels: a limit analysis approach. "The Open Civil Engineering Journal" 6: 231-238.
24. Rosado Gruital A. (2014). Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
25. Shah S., Swartz S., Ouyang C. (1995). Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. John Wiley & Sons, New York, E.U.A.
26. TNO (2019). DIANA. User's Manual. Delft: TNO
27. Van Mier J. (1997). Fracture processes of concrete. CRC Press, Boca Raton, Florida, E. U.
28. Varela Rivera, J. L., Navarrete Macías, D., Fernández Baqueiro, L. E., Moreno, E. I. (2010). Estudio experimental de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto sujetos a presiones perpendiculares a su plano. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-3, pp 149-160, ISSN: 1665-529-X.
29. Varela R. J., Navarrete M. D, Fernández B. L., Moreno E. I. (2011). Out of plane behavior of confined masonry walls. "Engineering Structures", 33(5), 1734-1741. 55.
30. Varela R. J., Polanco M. M., Fernández B. L., Moreno E. I. (2012). Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. "Canadian Journal of Civil Engineering", 39(4), 439-447.
31. Varela R. J, Chan E. S., Fernández B. L., Moreno H. J. (2015). Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. "Concreto y cemento. Investigación y desarrollo", 7(1), 52-65.

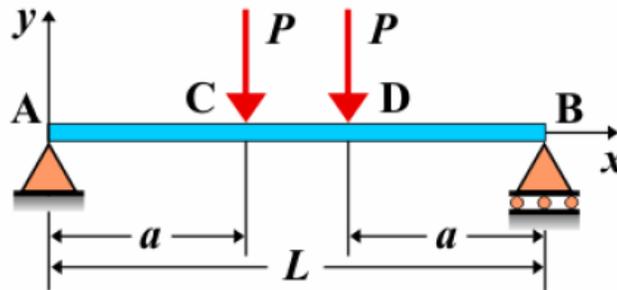
32. Varela Rivera, J., Moreno Herrera, J., Fernández Baqueiro, L., Cacep Rodríguez, J. y Freyre Pinto, C. (2020) Out of plane Behavior of Confined Walls with Aspect Ratios Greater than One. "Canadian Journal of Civil Engineering", 1(1), ISSN 0315-1468.
33. Wight, J. y MacGregor, J. (2009). Reinforced concrete mechanics y design. s.l.:Pearson.

APÉNDICE A

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MURETES

En este apéndice se presenta el cálculo del módulo de elasticidad de los muretes considerando un modelo de una viga simplemente apoyada con una sección maciza. El primer modelo corresponde a un murete sometido a tensión por flexión perpendicular a las juntas, mientras que el segundo corresponde a un murete sometido a tensión por flexión paralela a las juntas.

Muretes sometidos a tensión por flexión perpendicular a las juntas



Datos Experimentales

- Longitud (L) = 70 cm
- Distancia (a) = 17.5 cm
- Inercia $I = \frac{BH^3}{12} = \frac{(120)(15)^3}{12} = 33750 \text{ cm}^4$
- Carga (P) = 104 Kg
- Desplazamiento al centro del claro (δ) = 0.007 cm

Mecánica de materiales

La ecuación A.1 permite determinar el desplazamiento al centro del claro de la viga. De esta ecuación se despeja el módulo de elasticidad y se obtiene la ecuación A.2.

$$\delta_{Max} = \frac{P}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (\text{A.1})$$

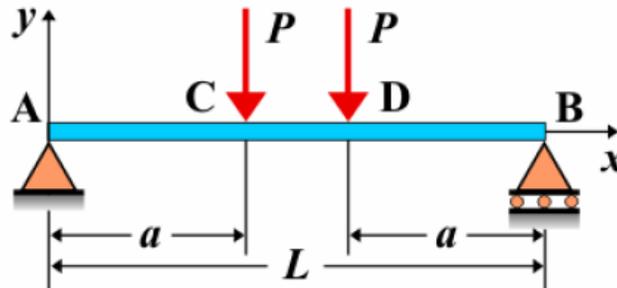
$$E = \frac{P}{24I\delta_{Max}} (3L^2 - 4a^2) \quad (A.2)$$

Sustituyendo los datos experimentales en la ecuación A.2 se puede obtener el módulo de elasticidad de la mampostería que ajusta la rigidez de los muretes sometidos a tensión por flexión perpendicular a las juntas, que es de 4,325 Kg/cm² (424.16 MPa).

$$E = \frac{P}{24I\delta_{Max}} (3L^2 - 4a^2) \quad (A.2)$$

$$E = \frac{104}{24(33750)(0.007)} (3(70)^2 - 4(17.5)^2) = 4325.308 \text{ Kg/cm}^2$$

Muretes sometidos a tensión por flexión paralela a las juntas



Datos Experimentales

- Longitud (L) = 145 cm
- Distancia (a) = 37.5 cm
- Inercia $I = \frac{BH^3}{12} = \frac{(120)(15)^3}{12} = 33750 \text{ cm}^4$
- Carga (P) = 145 Kg
- Desplazamiento al centro del claro (δ) = 0.01143 cm

Mecánica de materiales

La ecuación A.1 permite determinar el desplazamiento al centro del claro de la viga. De esta ecuación se despeja el módulo de elasticidad y se obtiene la ecuación A.2.

$$\delta_{Max} = \frac{P}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (A.1)$$

$$E = \frac{P}{24I\delta_{Max}} (3L^2 - 4a^2) \quad (A.2)$$

Sustituyendo los datos experimentales en la ecuación A.2 se puede obtener el módulo de elasticidad de la mampostería que ajusta la rigidez de los muretes sometidos a tensión por flexión paralela a las juntas, que es de 33,741 Kg/cm² (3,308.86 MPa).

$$E = \frac{P}{24I\delta_{Max}} (3L^2 - 4a^2) \quad (A.2)$$

$$E = \frac{145}{24(33750)(0.01143)} (3(145)^2 - 4(37.5)^2) = 33741.008 \text{ Kg/cm}^2$$