



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE MURETES DE  
MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE  
CONCRETO, SUJETOS A COMPRESIÓN DIAGONAL”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**I.C. MARCO ANTONIO BENÍTEZ ILACEDO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2018**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido 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.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán por el apoyo recibido durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

## RESUMEN

La mampostería es uno de los materiales más utilizados en México para la construcción. La mayoría de las edificaciones en la península de Yucatán son construidas de mampostería de bloques huecos de concreto. Dado el amplio uso de la mampostería de bloques huecos de concreto en edificaciones, se requiere estudiar su comportamiento, lo cual puede realizarse de manera experimental, analítica o computacional. Los estudios experimentales del comportamiento de la mampostería inician con las pruebas para determinar las propiedades básicas, tales como compresión axial, tensión por flexión y compresión diagonal, entre otras. Por otra parte, el uso de modelos computacionales permite ahorrar tiempo y costo con respecto a la realización de ensayos de laboratorio.

El objetivo general de esta investigación fue desarrollar modelos computacionales no lineales con el Método del Elemento Finito de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, sujetos a compresión diagonal.

Se elaboraron modelos computacionales lineales de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto de 12 y 15 cm de espesor. Se consideran dos tipos de elementos para juntas de mortero: (1) elementos de interfaz rígida con un modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y (2) elementos de interfaz flexible con un modelo constitutivo compuesto. Se elaboraron 5 diferentes modelos computacionales no lineales de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto de 15 cm de espesor. Uno de los modelos no lineales tuvo elementos de interfaz rígida con un modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y los otros cuatro modelos tuvieron elementos de interfaz flexible con un modelo constitutivo compuesto. Se utilizaron elementos isoparamétricos cuadriláteros de esfuerzo plano de 4 nodos y dos grados de libertad por nodo para los bloques de mampostería; por su parte, se utilizaron elementos de interfaz lineal de 4 nodos y 2 grados de libertad por nodo para las juntas de mortero. Se asumió un modo de agrietamiento modo I (abertura) y modo II (deslizamiento) en los elementos de interfaz. El modelo no lineal se calibró con los resultados experimentales obtenidos de ensayos de muretes cuadrados de 122 cm x 122 cm y 15 cm de espesor realizados por Marín (2008).

Con base en los resultados de los modelos lineales se concluyó que los esfuerzos en todas las juntas horizontales y verticales son de compresión y cortante. De los resultados no lineales se concluyó que el modelo de interfaz de Mohr-Coulomb permite simular el agrietamiento correspondiente a una falla por deslizamiento en los muretes. Para modelar adecuadamente las juntas en muros de mampostería de bloques huecos de concreto se propuso una ecuación que considera un modelo de Mohr-Coulomb y las diferencias en la colocación del mortero en las juntas horizontales y las verticales. El agrietamiento correspondiente a una falla diagonal de los muretes se puede modelar si se consideran las mismas propiedades constitutivas en las juntas horizontales y en las juntas verticales. Del análisis de sensibilidad se concluyó que el ángulo de fricción interna de la junta de mortero afecta significativamente la resistencia máxima de los muretes.

## ABSTRACT

Masonry is one of the most used materials in Mexico for construction. Buildings in the Yucatan Peninsula are mainly constructed with masonry of hollow concrete blocks. Given the extensive use of hollow concrete block masonry in buildings, its behavior must be determined by experimental testing, analytical models or computational simulations. Experimental studies of masonry behavior start with basic tests such as axial compression, out of plane flexural tension and diagonal tension among others. On the other hand, the use of computer models saves time and cost in comparison to the performance of laboratory tests.

The main objective of this investigation was to develop non-linear computational models using the Finite Element Method of masonry wallets of hollow concrete blocks, subjected to diagonal tension.

Linear computational models of masonry wallets of hollow concrete blocks of 12 and 15 cm thickness were developed. Two types of elements for mortar joints were considered: (1) rigid interface elements with a Mohr-Coulomb constitutive model and (2) flexible interface elements with a composite constitutive model. Five different non-linear computational models of masonry panels of hollow concrete blocks of 15 cm thickness were developed. One of the non-linear models had rigid interface elements with a Mohr-Coulomb constitutive model and the other four models had flexible interface elements with a composite constitutive model. Four node quadrilateral plane stress isoparametric elements with two degrees of freedom per node were used for masonry blocks, while linear interface elements of 4 nodes and 2 degrees of freedom per node were used for mortar joints. A cracking mode I (opening) and a cracking mode II (sliding) was assumed in the interface elements. The non-linear model was calibrated with the experimental results obtained from tests of square masonry panels of 122 cm x 122 cm and 15 cm thickness tested by Marín (2008).

Based on the results of the linear models, it was concluded that all the horizontal and vertical joints have compressive and shear stresses. From the non-linear results it was concluded that the Mohr-Coulomb interface model allows to simulate the cracking corresponding to a slip failure of the masonry wallets. To model the joints in masonry

wallets of hollow concrete blocks, an equation was proposed that considers a Mohr-Coulomb model and the differences in mortar placement in the horizontal and vertical joints. Diagonal cracking failure in masonry wallets can be modeled if the same constitutive properties are considered in the horizontal joints and in the vertical joints. From the sensitivity analysis it was concluded that the internal friction angle of the mortar joint significantly affects the maximum strength of the masonry wallets.

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Planteamiento del problema</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	3
1.2.1 Elementos de esfuerzo plano .....	3
1.2.2 Objetivos particulares .....	3
<b>1.3 Alcance de la tesis</b> .....	3
<b>1.4 Organización de la tesis</b> .....	4
<b>CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	5
<b>2.1 Mecánica de la fractura</b> .....	5
<b>2.2 Tipos de elementos finitos</b> .....	8
2.2.1 Elementos de esfuerzo plano .....	8
2.2.2 Elementos de interfaz lineales.....	9
<b>2.3 Modelación de mampostería con el MEF</b> .....	10
2.3.1 Modelo de interfaz friccionante.....	11
2.3.2 Modelo de interfaz compuesto .....	12
2.3.3 Tipos de falla de la mampostería .....	14
<b>2.4 Propiedades índices de la mampostería</b> .....	16
<b>2.5 Ensaye de muretes sujetos a cargas en el plano.</b> .....	17
<b>2.6 Modelación de mampostería con el Método del Elemento Finito</b> .....	19
<b>2.7 Conclusiones de la revisión de la literatura</b> .....	23
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b> .....	24
<b>3.1 Descripción general</b> .....	24
<b>3.2 Selección de muretes ensayados experimentalmente</b> .....	24
<b>3.3 Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de muretes</b> .....	26
3.3.1 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería.....	27
3.3.2 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero.....	28
3.3.3 Análisis lineal.....	29
3.3.4 Distribución de esfuerzos en las juntas horizontales .....	30
<b>3.4 Desarrollo de modelos no lineales de elemento finito de muretes</b> .....	30
3.4.1 Relación de resistencia de las juntas .....	32
3.4.2 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería.....	35



3.4.3 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero.....	36
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1 Modelos lineales</b> .....	<b>39</b>
4.1.1 Distribución de esfuerzos .....	39
4.1.2 Análisis de la distribución de esfuerzos.....	45
<b>4.2 Modelos no lineales de muretes de mampostería</b> .....	<b>48</b>
4.2.1 Modelo 1 (Modelo de interfaz friccionante).....	48
4.2.2 Modelo 2 (Modelo de interfaz compuesto sin juntas verticales) .....	52
4.2.3 Modelo 3 (Modelo de interfaz compuesto con juntas verticales y horizontales)	57
4.2.4 Modelo 4 (Modelo de interfaz compuesto con juntas verticales y horizontales)	64
4.2.5 Modelo 5 (Modelo de interfaz compuesto sin juntas horizontales en el borde)	69
<b>4.3 Evolución del agrietamiento en los modelos no lineales</b> .....	<b>76</b>
4.3.1 Modelo de interfaz friccionante.....	77
4.3.2 Modelo de interfaz compuesta .....	77
<b>CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>
<b>5.1 Modelos elástico-lineales</b> .....	<b>80</b>
<b>5.2 Análisis del comportamiento de los modelos de interfaz</b> .....	<b>81</b>
<b>5.3 Análisis de sensibilidad del ángulo <math>\varphi</math> en el modelo de interfaz compuesta</b>	<b>83</b>
<b>5.4 Análisis de sensibilidad de los parámetros no lineales del modelo de interfaz compuesta</b> .....	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES</b> .....	<b>87</b>
<b>CAPÍTULO VII. REFERENCIAS</b> .....	<b>90</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Modos de desplazamiento de la superficie de fractura.....	5
Figura 2.2 Tipos de materiales de acuerdo con su comportamiento.....	6
Figura 2.3 Modelo de grieta cohesiva para el concreto.....	7
Figura 2.4 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico cuadrilátero de esfuerzo plano.....	8
Figura 2.5 Topología de elemento de interfaz lineal.....	9
Figura 2.6 Enfoques de modelación del agrietamiento.....	10
Figura 2.7 Modelo friccionante de Coulomb.....	11
Figura 2.8 Modelo de interfaz compuesto.....	12
Figura 2.9 Tipos de falla en la mampostería.....	15
Figura 3.1 Ensayo de muretes de mampostería de acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE.....	25
Figura 3.2 Características de muretes ensayados por a) Marín (2008) y b) Sosa (2013) .....	25
Figura 3.3 Condiciones de frontera de los modelos elásticos de muretes y malla de elementos finitos en ejes locales.....	27
Figura 3.4 Modelo de pila usado en la calibración de la rigidez normal de las juntas.....	28
Figura 3.5 Características de los modelos no lineales de muretes.....	32
Figura 3.6 Colocación de mortero en juntas horizontales y verticales.....	32
Figura 3.7 Dimensiones de los bloques.....	35
Figura 3.8 Configuración de juntas en los modelos 2, 3, 4 y 5.....	38
Figura 4.1 Esfuerzos normales $\sigma_y'y'$ en el murete de 12 cm de espesor.....	41
Figura 4.2 Esfuerzos cortantes $\tau_{xy}$ en el murete de 12 cm de espesor.....	42
Figura 4.3 Esfuerzos principales $\sigma_{11}$ en el murete de 12 cm de espesor.....	42
Figura 4.4 Modos de falla de los muretes.....	43
Figura 4.5 Esfuerzos normales $\sigma_y'y'$ en el murete de 15 cm de espesor.....	43
Figura 4.6 Esfuerzos cortantes $\tau_{xy}$ en el murete de 15 cm de espesor.....	44
Figura 4.7 Esfuerzos principales $\sigma_{11}$ en el murete de 15 cm de espesor.....	44

Figura 4.8 Localización de partículas analizadas en el murete.....	45
Figura 4.9 Esfuerzos en una partícula en hilada superior del murete.....	46
Figura 4.10 Esfuerzos en una partícula en el centro del murete.....	46
Figura 4.11 Curva $\tau_{x'y'}$ - $\sigma_{y'y'}$ .....	47
Figura 4.12 Curva carga-desplazamiento del modelo 1.....	48
Figura 4.13 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	49
Figura 4.14 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.25 mm.....	49
Figura 4.15 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.55 mm.....	50
Figura 4.16 Distribución de esfuerzos cortantes en el murete.....	51
Figura 4.17 Deformada del modelo 1 previa a la carga máxima.....	52
Figura 4.18 Curva carga-desplazamiento del modelo 2.....	52
Figura 4.19 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	53
Figura 4.20 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm.....	54
Figura 4.21 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm.....	54
Figura 4.22 Distribución de esfuerzos cortantes en el murete.....	56
Figura 4.23 Deformada del modelo 2 previa a la carga máxima.....	57
Figura 4.24 Curva carga-desplazamiento del modelo 3.....	58
Figura 4.25 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	59
Figura 4.26 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	59
Figura 4.27 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.33 mm.....	60
Figura 4.28 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.33 mm.....	60

Figura 4.29 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm.....	61
Figura 4.30 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm.....	61
Figura 4.31 Distribución de esfuerzos principales $\sigma_{11}$ en el murete.....	63
Figura 4.32 Deformada del modelo 3 en la carga máxima.....	64
Figura 4.33 Curva carga-desplazamiento del modelo 4.....	65
Figura 4.34 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.20 mm.....	66
Figura 4.35 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.20 mm.....	66
Figura 4.36 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.375 mm.....	67
Figura 4.37 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.375 mm.....	67
Figura 4.38 Distribución de esfuerzos principales $\sigma_{11}$ en el murete.....	68
Figura 4.39 Deformada del modelo 4 previo a la carga máxima.....	69
Figura 4.40 Curva carga-desplazamiento del modelo 5.....	70
Figura 4.41 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	71
Figura 4.42 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm.....	71
Figura 4.43 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm.....	72
Figura 4.44 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm.....	72
Figura 4.45 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.77 mm.....	73
Figura 4.46 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.77 mm.....	73
Figura 4.47 Distribución de esfuerzos principales $\sigma_{11}$ en el murete.....	75

Figura 4.48 Deformada del modelo 5 en la carga máxima.....	76
Figura 4.49 Evolución del agrietamiento en el modelo 3.....	78
Figura 4.50 Evolución del agrietamiento en el modelo 4.....	78
Figura 4.51 Patrón de agrietamiento del Modelo 5 y el murete M4BP5.....	79
Figura 5.1 Curva carga-desplazamiento de los diferentes modelos de muretes analizados.....	81
Figura 5.2 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad del ángulo $\varphi$ .....	84
Figura 5.3 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad de la resistencia a la tensión.....	85
Figura 5.4 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad del ángulo $\psi$ .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades típicas para los elementos de interfaz.....	14
Tabla 2.2 Coeficiente $c_2$ .....	17
Tabla 2.3 Resistencia a compresión diagonal de muretes de mampostería.....	17
Tabla 2.4 Resistencia a compresión diagonal de muretes de mampostería.....	18
Tabla 2.5 Módulo de cortante de muretes.....	19
Tabla 3.1 Dimensiones promedio de los bloques huecos de concreto.....	34
Tabla 3.2 Parámetros iniciales empleados en el modelo de interfaz compuesto..	36
Tabla 4.1 Propiedades lineales de muretes de mampostería de 12 cm de espesor.....	39
Tabla 4.2 Propiedades lineales de muretes de mampostería de 15 cm de espesor.....	40
Tabla 4.3 Parámetros utilizados en los modelos no lineales de muretes.....	76
Tabla 5.1 Ángulo de fricción interna, carga y desplazamiento máximo.....	83
Tabla 5.2 Resistencia a la tensión y energía de fractura, carga y desplazamiento máximo.....	85
Tabla 5.3 Ángulo de dilatación, carga y desplazamiento máximo.....	86

# CAPÍTULO I.

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La mampostería es uno de los materiales más utilizados en México para la construcción. En el sureste de México se utiliza la mampostería confinada de bloques huecos de concreto. Los muros de mampostería confinada son aquellos que están conformados por piezas artificiales (e.g. tabiques, bloques de concreto, etc.) y se encuentran reforzados perimetralmente con elementos de concreto reforzado (castillos y cadenas).

Los muros de mampostería confinada son usados comúnmente como elementos estructurales en las construcciones, particularmente en las viviendas, donde se emplean como muros de carga o muros divisorios. En condiciones habituales los muros pueden estar sometidos a cargas en el plano y fuera del plano. Las cargas en el plano del muro se pueden producir por cargas gravitacionales, por sismo o viento. En el caso de los efectos del viento, las cargas laterales en el plano se producen en muros usados para proveer soporte lateral a muros sometidos a la presión del viento.

Dado el amplio uso de la mampostería de bloques huecos de concreto en edificaciones, se requiere estudiar su comportamiento, lo cual puede realizarse de manera experimental, analítica o computacional. Los estudios experimentales del comportamiento de la mampostería inician con las pruebas para determinar las propiedades básicas tales como: compresión axial, tensión por flexión y compresión diagonal, entre otros.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán se han realizado diversos estudios experimentales para determinar las propiedades de la mampostería y evaluar el comportamiento de muros de mampostería sujetos a cargas en su plano. Se han realizado estudios para determinar la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería (Marín, 2008), la resistencia a flexión fuera del plano de la mampostería (Flores, 2008), resistencia a compresión axial y módulo de

elasticidad (González, 2010), el comportamiento no lineal de la mampostería sujeta a cargas axiales en su plano (Hernández, 2015).

El avance en la capacidad de procesamiento de los sistemas informáticos actualmente permite llevar a cabo la modelación computacional de elementos estructurales mediante el uso del Método del Elemento Finito, (MEF). Los modelos pueden ser lineales o no lineales. Con los modelos no lineales se puede simular el proceso de agrietamiento de la mampostería. Los modelos computacionales deben ser calibrados con información experimental. El uso de modelos computacionales permite ahorrar tiempo y costo con respecto a la realización de ensayos de laboratorio. En la Facultad de Ingeniería se han desarrollado estudios de modelación de mampostería de bloques huecos de concreto sujeta a cargas en su plano mediante el MEF. Marín (2008) llevó a cabo modelos lineales de muretes de 15 cm de espesor, Hernández (2015) elaboró modelos no lineales de pilas de mampostería de 12, 15 y 20 cm de espesor, Raygoza (2012) elaboró modelos lineales de muros de mampostería con relación de aspecto mayor a uno, de 15 cm de espesor. Actualmente no se han llevado a cabo estudios de modelación no lineal en MEF de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto sujetos a compresión diagonal. A nivel internacional se han realizado estudios sobre modelación de mampostería mediante el MEF.

Para modelar computacionalmente muros de mampostería confinada se requiere tener modelos constitutivos que reproduzcan el comportamiento del material. Para esto, se requiere desarrollar modelos computacionales que reproduzcan el comportamiento de muretes para ensayos de compresión diagonal, para posteriormente reproducir el comportamiento de la mampostería confinada.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Elementos de esfuerzo plano**

Desarrollar modelos computacionales no lineales con el Método del Elemento Finito de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, sujetos a compresión diagonal.

### **1.2.2 Objetivos particulares**

- Desarrollar modelos lineales de elementos finitos de muretes de bloques huecos de concreto.
- Desarrollar modelos no lineales de elementos finitos de muretes de bloques huecos de concreto, considerando modelos de grieta discreta.
- Determinar la evolución del agrietamiento en muretes de mampostería de bloques huecos de concreto.

## **1.3 Alcance de la tesis**

En este trabajo se modelaron muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, sujetos a compresión diagonal. En los modelos elásticos se consideraron bloques huecos de concreto de 12 y 15 cm de espesor. Para simular el agrietamiento de muretes se usó un modelo de grieta discreta. Se consideraron elementos isoparamétricos cuadriláteros de 4 nodos y 2 grados de libertad por nodo para los bloques de mampostería y elementos de interfaz plana de 4 nodos y dos grados de libertad por nodo para las juntas de mortero. Se consideraron dos tipos de agrietamientos para los elementos de interfaz: Modo I (apertura) y Modo II (deslizamiento). Con los modelos realizados se simuló computacionalmente la evolución del agrietamiento en los muretes.

## **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 la modelación del agrietamiento en elementos de mampostería, las características de los modelos de elemento finito y los ensayos de muretes a compresión diagonal. Se presentan los trabajos sobre modelación con el MEF de elementos de mampostería sujetos a cargas en su plano.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para la realización de esta investigación, que incluye selección de muretes ensayados experimentalmente, desarrollo de modelos computacionales elásticos e inelásticos de muretes de mampostería.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los modelos computacionales elásticos e inelásticos de los muretes. Se presenta el estado de esfuerzos en los modelos lineales de muretes de 12 y 15 cm de espesor. Se describe el proceso de agrietamiento de los modelos no lineales de muretes de mampostería.

En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos de los modelos computacionales de muretes de mampostería. Se analiza el comportamiento de los diferentes modelos de interfaz utilizados para modelar las juntas de mortero en la mampostería. Se propone un modelo de Mohr-Coulomb modificado. Se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros no lineales del modelo.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta investigación.

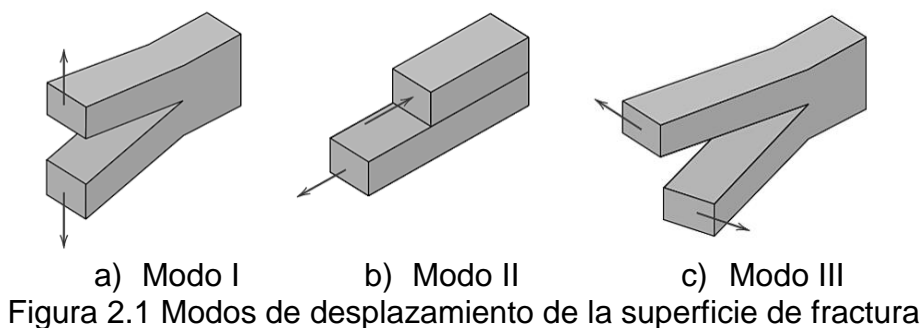
## CAPÍTULO II.

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 2.1 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura es la teoría que determina la falla de los materiales mediante un criterio de energía en conjunto con un criterio de resistencia. Dos procesos fundamentales de la mecánica de la fractura son: el proceso de generación de grietas y el comportamiento del material después que ha alcanzado la superficie de falla (Bazant y Planas, 1998)

En la mecánica de la fractura se pueden identificar tres modos principales de desplazamiento de la superficie de fractura. Estos modos son (Figura 2.1): Modo I (de abertura o tensión), Modo II (deslizamiento) y Modo III (desgarre).



El comportamiento mecánico de las estructuras depende de las propiedades del material usado. Las propiedades del material definen el comportamiento típico de fractura del material. Dependiendo de la relación entre el esfuerzo a tensión y la deformación, los materiales se pueden clasificar en: frágiles, dúctiles y cuasi-frágiles (Figura 2.2) (Shah, et al., 1995). Los materiales frágiles, presentan una disminución de esfuerzos rápida frente al agrietamiento. La falla de estos materiales tiende a ser catastrófica. Los materiales dúctiles presentan comportamiento elasto-plástico después de alcanzar el máximo esfuerzo a tensión. Los materiales cuasi-frágiles, presentan una reducción gradual de los esfuerzos después de alcanzar el esfuerzo a tensión máximo.

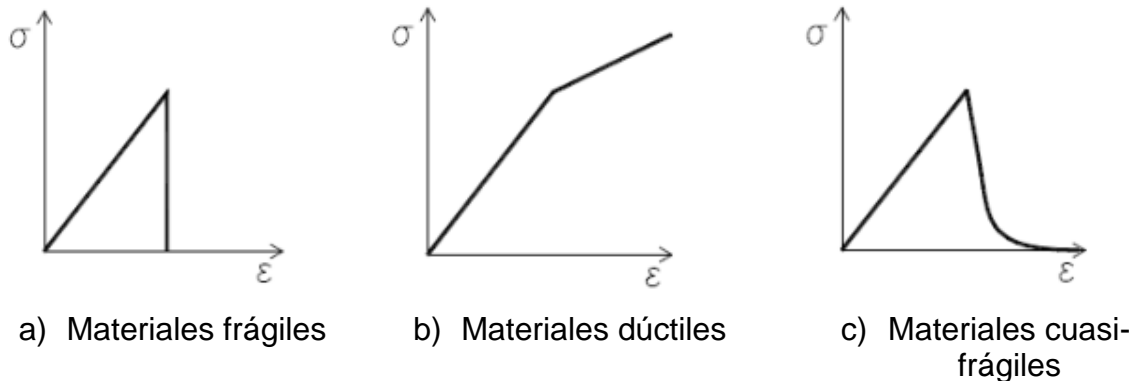


Figura 2.2 Tipos de materiales de acuerdo con su comportamiento

El criterio de Griffith puede usarse para describir la formación de grietas. Si se considera una grieta microscópica con una longitud de  $2c$  el esfuerzo crítico ( $\sigma$ ) está definido por la Ecuación (2.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (2.1)$$

En donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material alrededor de la grieta y  $\gamma$  es la energía de superficie y la energía de fractura en una escala microscópica.

El modelo se basa en un balance de energía, por lo tanto, es necesario que la energía almacenada en la estructura sobrepase la energía de superficie del material para que se produzca la aparición de una grieta. Debido a que la fractura se caracteriza por el rompimiento de uniones atómicas, el esfuerzo en el nivel atómico debe ser igual al esfuerzo cohesivo.

En cuanto se produce una grieta microscópica, se inicia un proceso de acumulación de daño, el cual lleva al agrietamiento. La aparición de grietas macroscópicas se debe a la acumulación de un gran número de grietas microscópicas.

El modelo cohesivo de la fractura se basa en la hipótesis que para una grieta en el modo I, la zona de proceso de fractura (FPZ) es de un ancho finito y se puede describir como una grieta lineal ficticia, la cual transmite esfuerzos normales  $\sigma_x$ . Los esfuerzos

( $\sigma$ ), disminuyen en función de la abertura de grieta, (Ecuación (2.2)). Este modelo se utiliza ampliamente en materiales cuasi-frágiles como el concreto.

$$\sigma = f(w) \quad (2.2)$$

El punto inicial de la curva definida por la función anterior representa la resistencia a la tensión local del concreto  $f(0) = f'$ , y el punto final de la curva de ablandamiento  $f(w_f) = 0$ . Dicha función presenta un descenso marcado en la parte inicial, presentando un cambio de pendiente y un descenso suave aproximadamente entre el 15 a 33% de  $f'$  (Figura 2.3). Lo anterior dificulta la estimación de la energía de fractura correspondiente al área bajo la curva total.

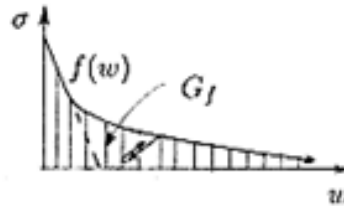


Figura 2.3 Modelo de grieta cohesiva para el concreto

El área bajo la curva completa  $f(w)$  representa la energía total disipada por la fractura, por unidad de área del plano de grieta,  $G_F$  ( $\frac{J}{m^2}$ ), ya que las caras de la grieta están completamente separadas en un punto determinado.

Considerando una aproximación bilineal de la función  $f(w)$ , el modelo de la grieta cohesiva se caracteriza por la energía de fractura:

$$G_F = \int_0^{\infty} f(w) dw \quad (2.3)$$

$$G_f = \frac{f'_t{}^2}{2\sigma'_0} = \frac{w_0^2 \sigma'_0}{2} \quad (2.4)$$

$G_F$  corresponde al área bajo la curva total, mientras  $G_f$  denota el área bajo la tangente inicial del descenso  $\sigma'_0$ , cuyo valor se asume controla la máxima carga de las estructuras y el efecto del tamaño.

Para calcular el valor de las cargas máximas de una estructura con el modelo de la grieta cohesiva, es necesario conocer únicamente  $G_f$ . La parte final de la curva de ablandamiento  $f(w)$ , resulta innecesaria para lo anterior y  $G_f$  se necesita únicamente para calcular las deformaciones posteriores.

## 2.2 Tipos de elementos finitos

En esta sección se presentan las características de elementos usados en la modelación del agrietamiento de la mampostería en el plano. El modelamiento se hace usando la herramienta computacional DIANA FEA (TNO, 2017), la cual presenta un entorno gráfico para el pre-proceso y postproceso de modelos de elementos finitos.

### 2.2.1 Elementos de esfuerzo plano

Los elementos isoparamétricos cuadriláteros de esfuerzo plano de 4 nodos se denominan Q8MEM en DIANA (TNO, 2017) (Figura 2.4). El elemento se basa en interpolación lineal y tiene un esquema de integración de Gauss de  $2 \times 2$ . El campo de desplazamientos  $u, v$  puede aproximarse en función de las coordenadas naturales  $\xi, \eta$ . Los desplazamientos  $u, v$  están considerados en las direcciones  $x, y$  respectivamente.

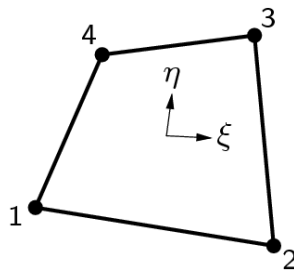


Figura 2.4 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico cuadrilátero de esfuerzo plano

La relación constitutiva general (Ecuación (2.5)):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.5)$$

Para un elemento de esfuerzo plano toma la forma:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

En donde  $E$  es el módulo de elasticidad,  $\nu$  es la relación de Poisson,  $\{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}$  es el vector de esfuerzos y  $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}$ , es el vector de deformaciones unitarias.

La deformación unitaria para un elemento de esfuerzo plano se puede expresar como (Ecuación (2.7)):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Elementos de interfaz lineales

En la aplicación DIANA los elementos de interfaz de 4 nodos se denominan L8IF (TNO, 2017). El elemento tiene una interpolación lineal. La integración es de Newton-Cotes de 2x2.

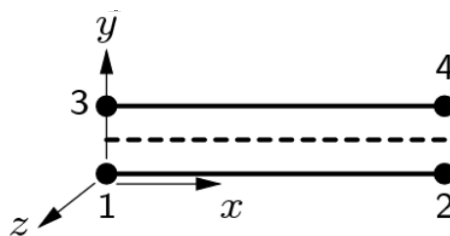


Figura 2.5 Topología de elemento de interfaz lineal

El vector de tracciones  $\{t\}$  se puede calcular como el producto de la matriz diagonal  $[D]$  multiplicada por el vector de desplazamientos relativos  $\{\Delta u\}$  (Ecuación (2.8))

$$\{t\} = [D]\{\Delta u\} \quad (2.8)$$

Para un elemento de interfaz lineal la relación constitutiva toma la forma (Ecuación (2.9))

$$\begin{Bmatrix} t_{sx} \\ t_{ny} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{nn} & 0 \\ 0 & D_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{sx} \\ \Delta u_{ny} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

La tracción  $t_{sx}$  y el desplazamiento relativo  $\Delta u_{sx}$  son tangentes al elemento de interfaz; la tracción  $t_{ny}$  y el desplazamiento relativo  $\Delta u_{ny}$  son normales al elemento de interfaz.

### 2.3 Modelación de mampostería con el MEF

La modelación de los materiales que presentan grietas cohesivas como la mampostería se puede llevar a cabo mediante 3 enfoques básicos (Bazant y Planas, 1998); con grieta discreta entre los elementos (Figura 2.6 (a)), con grieta distribuida en elementos continuos (Figura 2.6 (b)) y con grieta embebida en el interior del elemento (Figura 2.6 (c)).

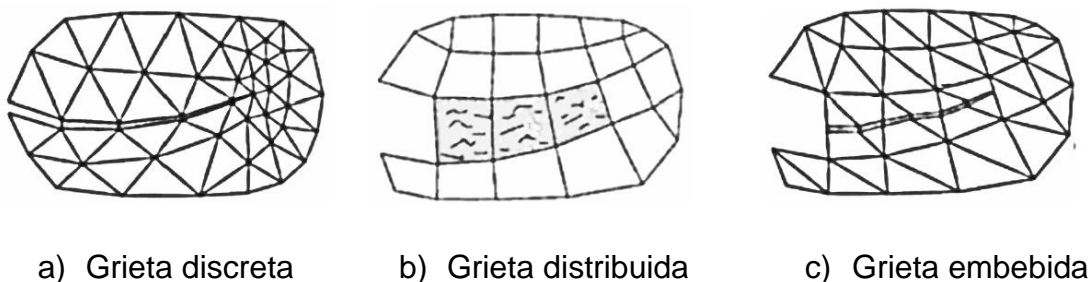


Figura 2.6 Enfoques de modelación del agrietamiento

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).

### 2.3.1 Modelo de interfaz friccionante

En general la interfaz entre elementos de una estructura presenta un comportamiento friccionante. El comportamiento friccionante puede ser modelado con el modelo de fricción de Coulomb.

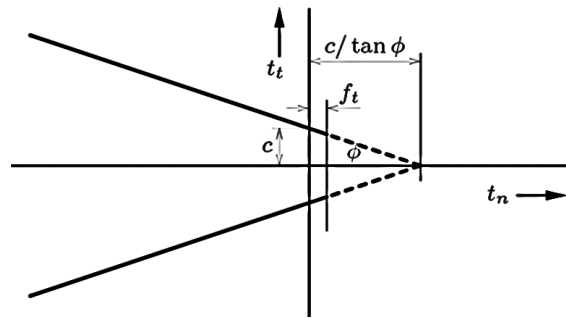


Figura 2.7 Modelo friccionante de Coulomb

Se asume la descomposición del desplazamiento relativo total  $\Delta \dot{u}$  en una parte reversible  $\Delta \dot{u}^e$  y una parte irreversible  $\Delta \dot{u}^P$  de tal forma que:

$$\Delta \dot{u} = \Delta \dot{u}^e + \Delta \dot{u}^P \quad (2.10)$$

Lo cual resulta en el vector de tracciones:

$$\dot{t} = D^e \Delta \dot{u}^e \quad (2.11)$$

La variación del desplazamiento irreversible  $\Delta \dot{u}^P$  se determina mediante la teoría de flujo de plasticidad.

El modelo de fricción de Coulomb está determinado por la superficie de falla y la superficie de potencial plástico:

$$f = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \phi} (\kappa) - \bar{c}(\kappa) = 0 \quad (2.12)$$

$$g = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \psi}$$

En donde  $\tan \phi(k)$  es el coeficiente de fricción en función del parámetro interno  $\kappa$ , y  $\bar{c}(\kappa)$  es la cohesión como una función del parámetro interno  $\kappa$ . La dirección del desplazamiento irreversible está determinada por la función de potencial plástico  $g$  en donde el levantamiento está determinado por el ángulo de dilatación  $\psi$ .

### 2.3.2 Modelo de interfaz compuesto

El modelo de interfaz compuesto es adecuado para la simulación, del agrietamiento, el deslizamiento por fricción y el aplastamiento en las interfaces. Usualmente los bloques se modelan como elementos elásticos lineales y las juntas se modelan como elementos de interfaz las cuales responden al comportamiento no lineal descrito por este modelo. (TNO, 2017).

El modelo está definido por un criterio de falla compuesto, el cual consiste en un límite por tensión, el modelo de fricción de Coulomb y un 'cap' elíptico (2.8) (Lourenco, 1996).

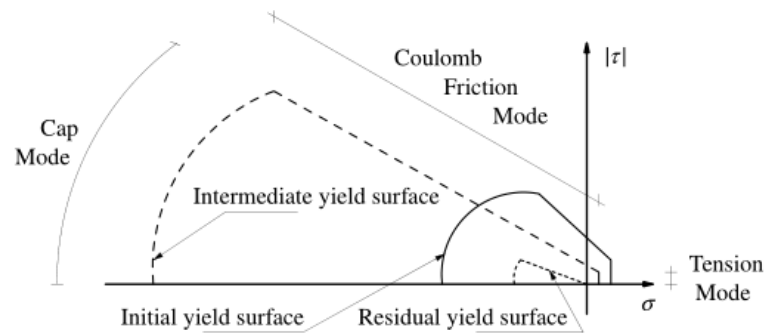


Figura 2.8 Modelo de interfaz compuesto

La falla por tensión está controlada por la siguiente función de falla:

$$f_1(\sigma, k_1) = \sigma - \bar{\sigma}_1(k_1) \quad (2.13)$$

en donde el valor  $\bar{\sigma}_1$  es:

$$\bar{\sigma}_1 = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f^I} k_1\right) \quad (2.14)$$

En la expresión anterior  $f_t$  es la resistencia a tensión de la junta y  $G_f^I$  la energía de fractura del modo 1. Se considera una regla de flujo y una hipótesis de ablandamiento por deformación.

La función de falla para el modo de fricción de Mohr-Coulomb es:

$$f_2(\sigma, k_2) = |\tau| + \sigma \tan \phi(k_2) - \bar{\sigma}_2(k_2) \quad (2.15)$$

el valor de la falla  $\bar{\sigma}_2$  es:

$$\bar{\sigma}_2 = c \exp\left(-\frac{c}{G_f^{II}} k_2\right) \quad (2.16)$$

y el ángulo de fricción está acoplado con el ablandamiento de la cohesión mediante:

$$\tan \phi = \tan \phi_0 + (\tan \phi_r - \tan \phi_0) \frac{c - \bar{\sigma}_2}{c} \quad (2.17)$$

En las expresiones anteriores  $c$  representa la cohesión de la interfaz,  $\phi_0$  el ángulo de fricción inicial,  $\phi_r$  el ángulo de fricción residual y  $G_f^{II}$  la energía de fractura del modo II. Se asume ablandamiento exponencial para la cohesión y el ablandamiento del ángulo de fricción se toma proporcional al ablandamiento de la cohesión.

Adicionalmente se considera un potencial plástico no asociado  $g_2$ ,

$$g_2 = |\tau| + \sigma \tan \psi - c \quad (2.18)$$

con un ángulo de dilatación  $\psi$  y una hipótesis de ablandamiento por deformación. El ángulo de dilatación se considera como una función del desplazamiento plástico relativo por cortante y la presión de confinamiento normal.

La función de falla para el 'cap' de compresión en una configuración bidimensional, está dada por:

$$f_3(\sigma, k_3) = C_{nn}\sigma^2 + C_{ss}\tau^2 + C_n\sigma - (\bar{\sigma}_3(k_2))^2 \quad (2.19)$$

En la cual  $C_{nn}$ ,  $C_{ss}$  y  $C_n$  son un conjunto de parámetros del material y  $\bar{\sigma}_3$  el valor de falla. Los parámetros  $C_{nn}$  y  $C_n$  controlan el centro de la tapa y su intersección con la parte de tensión del eje de esfuerzos normales, en tanto el parámetro  $C_{ss}$  controla la contribución del esfuerzo cortante a la condición de falla.

Una propiedad importante de la superficie de falla compuesta es el acoplamiento del ablandamiento por tensión y cortante debido a que ambos fenómenos están relacionados a la adhesión entre los bloques y el mortero. Se asumió ablandamiento isotrópico, lo cual significa que los porcentajes del ablandamiento de la cohesión y la resistencia a la tensión son iguales durante todo el proceso de degradación.

(Lourenco, 1996) obtuvo los parámetros típicos del material necesarios para el modelo a partir de micro-experimentos en bloques, juntas y muestras de mampostería pequeñas (Tabla 2.1)

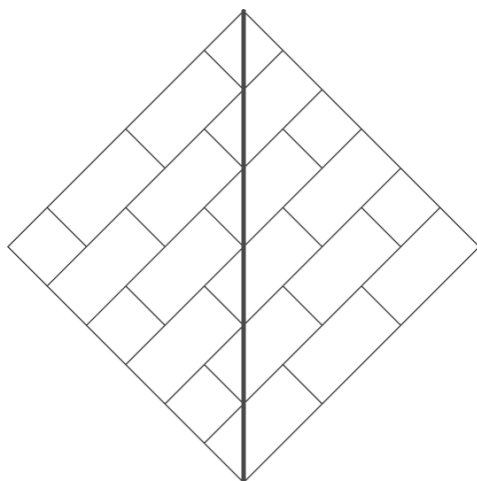
Tabla 2.1 Propiedades típicas para los elementos de interfaz

Tensión		Cortante				Cap	
$f_t$	$G_f^I$	$c$	$\tan \phi$	$\tan \psi$	$G_f^{II}$	$f_m$	$C_{ss}$
0.25 a 0.16 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.018 a 0.012 [N/mm <sup>2</sup> ]	$1.4 f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.75	0.0 a 0.57	0.125 a 0.05 [N/mm <sup>2</sup> ]	8.5 a 11.5 [N/mm <sup>2</sup> ]	9.0

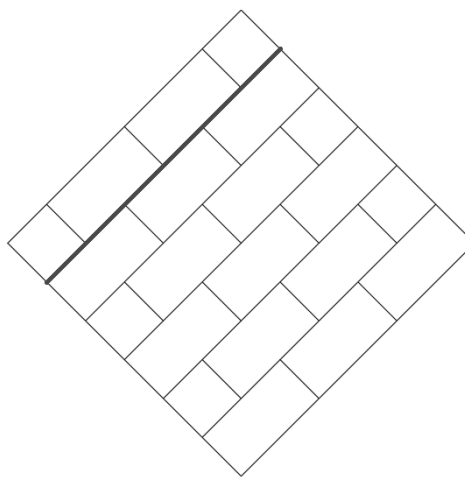
### 2.3.3 Tipos de falla de la mampostería

En ensayos a compresión diagonal de la mampostería se han observado tres tipos diferentes de falla (Marín, 2008) (Figura 2.9):

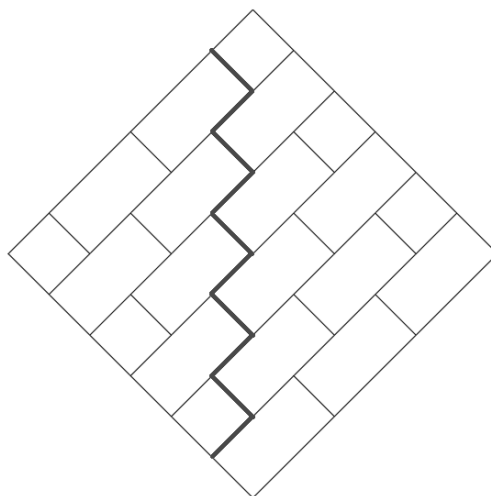
- Falla por tensión diagonal en bloques. Se caracteriza por la aparición de una grieta diagonal la cual atraviesa predominantemente las piezas en una trayectoria aproximadamente recta.
- Falla por tensión diagonal en juntas. Es producida por la falla de adherencia entre las piezas de mampostería y el mortero, la trayectoria es aproximadamente escalonado al centro del murete.
- Falla por deslizamiento. Es causada por fricción entre las piezas y el mortero, produciendo el desprendimiento de cualquier junta horizontal.



a) Falla por tensión diagonal en bloques



b) Falla por deslizamiento



c) Falla por tensión diagonal en juntas

Figura 2.9 Tipos de falla en la mampostería

## 2.4 Propiedades índices de la mampostería

En la FIUADY se realizaron estudios para determinar las propiedades índices de la mampostería local. En específico se determinó la resistencia a compresión axial de la mampostería (González, 2010), la resistencia a cortante directo de la mampostería (González, 2011), el módulo de elasticidad del mortero y de los bloques huecos de concreto (Hernández 2015) y la resistencia a la tensión por flexión fuera del plano paralela y perpendicular a las juntas de mortero de la mampostería (Flores, 2008). A continuación, se describen los estudios realizados.

González (2010) evaluó el comportamiento de la mampostería de bloques huecos de concreto de diferente espesor, sujeta a compresión axial. Realizó ensayos experimentales en bloques y pilas de mampostería de 12, 15 y 20 cm de espesor. Propuso estimar la resistencia a compresión de la mampostería en función de la resistencia a compresión de los bloques con la Ecuación (2.20)

$$E_m^* = 1300 \sqrt{f_p^*} \quad (2.20)$$

Hernández (2015) estudió pilas de mampostería de bloques huecos de concreto de 3 celdas. Determinó el valor promedio del módulo de elasticidad de 7994 MPa para el mortero de la región mediante el ensaye de cubos y cilindros de mortero en proporcionamiento 1:2:7 por volumen (cemento Portland:cal:arena). Propuso la Ecuación (2.21) para estimar el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto ( $E_{pn}$ ) en función de la resistencia a compresión axial sobre área neta de bloques huecos de concreto ( $f_{pn}$ )

$$E_{pn} = c_2 \sqrt{f_{pn}} \quad (2.21)$$

Determinó el valor del coeficiente  $c_2$  para bloques de 12 y 15 cm de espesor (Tabla 2.2)

Tabla 2.2 Coeficiente  $c_2$ 

Bloque	$c_2$
12 x 20 x 40 cm	2872
15 x 20 x 40 cm	3655

Flores (2008) determinó la resistencia a la tensión fuera del plano de la mampostería de 15 cm de espesor. Determinó la resistencia a la tensión por flexión perpendicular a las juntas promedio de 0.13 MPa y la paralela a las juntas promedio de 0.40 MPa.

## 2.5 Ensayo de muretes sujetos a cargas en el plano.

(Marín, 2008) ensayó 18 muretes cuadrados de 1200 mm x 1200 mm construidos con bloques huecos de concreto de 15 cm de espesor provenientes de diversas plantas de la ciudad de Mérida. Probó los muretes a compresión diagonal con el objetivo de determinar la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería.

Tabla 2.3 Resistencia a compresión diagonal de muretes de mampostería

Murete	$P_{max}$ (kg)	t (cm)	$L_c$ (cm)	$V_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Modo de falla
M1BP4D	6786	14.47	170.50	2.75	17073	Diagonal
M2BP4D	6147	14.47	170.50	2.49	17344	Diagonal
M3BP4D	7769	14.47	171.00	3.14	17954	Deslizamiento
M4BP4D	5686	14.47	171.00	2.30	12609	Diagonal
M1BP5D	8113	14.44	171.00	3.29	18032	Deslizamiento
M2BP5D	7398	14.44	171.00	3.00	17914	Deslizamiento
M3BP5D	7157	14.44	171.00	2.90	16594	Deslizamiento
M4BP5D*	7522	14.44	171.00	3.05	16732	Diagonal
M5BP5D	7515	14.44	171.50	3.03	17343	Deslizamiento
M6BP5D	8505	14.44	171.50	3.43	18073.	Deslizamiento
M7BP5D**	7729	14.36	171.50	3.14	14949	Diagonal
M8BP5D**	7116	14.36	171.50	2.89	15936	Diagonal

\* Murete reforzado con varillas corrugadas de ½" de diámetro en los extremos.

\*\* Muretes construidos con bloques con espesores de las paredes de las celdas más pequeños.

Con base a sus resultados experimentales determinó que la resistencia a compresión de la mampostería es función de la adherencia entre el mortero y el bloque, ya que la falla siempre se presentó en la junta. Observó dos modos de falla: por tensión diagonal en la junta y falla por deslizamiento. Llevó a cabo un análisis por el Método del Elemento Finito y determinó la presencia de esfuerzos normales a compresión y esfuerzos de cortante para ambos tipos de falla en las juntas.

Propuso emplear un valor de diseño de resistencia a la compresión diagonal de la mampostería de  $1.80 \text{ kg/cm}^2$  y estimar el módulo de cortante de la mampostería con la Ecuación (2.22):

$$G_m^* = 0.40 E_m^* \quad (2.22)$$

(Sosa, 2013), ensayó 3 muretes de mampostería. Las dimensiones de los muretes fueron de  $1220 \text{ mm} \times 1220 \text{ mm}$  Probó los muretes a compresión diagonal mediante el uso de un marco de carga.

Tabla 2.4 Resistencia a compresión diagonal de muretes de mampostería

Murete	$P_{\text{máx}}$ kN (Ton)	$V_m$ MPa ( $\text{kg/cm}^2$ )	Modo de falla
Murete 1	39.64 (4.04)	0.21 (2.14)	Deslizamiento
Murete 2	57.84 (5.90)	0.29 (2.96)	Deslizamiento
Murete 3	51.21 (5.22)	0.26 (2.65)	Deslizamiento y tensión diagonal

Observa la falla en los muretes por deslizamiento, excepto para el murete 3 en el cual la falla fue por combinación de deslizamiento y tensión diagonal.

Estimó el módulo de cortante de la mampostería considerando las deformaciones y los esfuerzos al 20 y 40% de la carga última, mediante la aproximación de la curva esfuerzo- deformación de cada murete a una ecuación polinomial. Posteriormente usó la ecuación propuesta por (Marín, 2008) para estimar la rigidez a cortante de los muros.



Tabla 2.5 Módulo de cortante de muretes

Murete	$G_m$ MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
Murete 1	1710.14 (17438.57)
Murete 2	1468.36 (14973.10)
Murete 3	1492.55 (15219.77)

## 2.6 Modelación de mampostería con el Método del Elemento Finito

Lourenco y Rots (1997), desarrollaron un modelo para el análisis de la mampostería. El modelo se basa en elementos de interfaz con superficies de plasticidad múltiples. Desarrollaron un modelo de interfaz tipo 'cap' en el cual se consideran los mecanismos de falla posibles. Compararon los resultados del modelo con ensayos realizados a muros de mampostería no confinada de 90 x 100 cm de tabiques de arcilla de 20 x 10 x 50 cm. con juntas de mortero de 10 cm de espesor. De los muros probados dos fueron construido con una abertura en el centro, los tres restantes fueron sólidos con cargas axiales diferentes. Los elementos finitos usados para modelar fueron elementos de esfuerzo plano cuadriláteros de 8 nodos y elementos de interfaz planos de 6 nodos. Se modelaron los tabiques con una malla de 4 x 2 elementos. Se adoptó un modelo de fractura simple Modo I para los tabiques y una función compuesta para la falla del material en las juntas. Concluyeron que el modelo numérico es capaz de reproducir adecuadamente los resultados experimentales.

Bolhassani *et al.* (2015) modelaron muretes de mampostería de bloques huecos de concreto de 2 celdas. Modelaron los bloques huecos de concreto utilizando elementos cúbicos de 8 nodos de 50 mm por lado con un modelo constitutivo de plasticidad del concreto. Las juntas de mortero se modelaron empleando elementos de interfaz con un modelo constitutivo de cohesivo. Modelaron muretes rellenos de mortero y muretes no rellenos. Consideraron la iniciación del daño basándose en la resistencia del mortero y del relleno de las celdas para la mampostería no rellena y rellena respectivamente. Llevaron a cabo pruebas experimentales de muretes de bloques huecos de concretos rellenos de mortero y no rellenos de mortero de 1200 x 1200 mm y 200 mm de espesor en compresión diagonal. Concluyeron de las pruebas

experimentales que el mortero de relleno tiende a reforzar las juntas produciendo mayor uniformidad en la mampostería incrementando la resistencia a cortante, tensión diagonal y compresión de los muretes. El modelo numérico propuesto pudo modelar de forma adecuada la mampostería rellena y no rellena.

Zhang *et al.* (2017) desarrollaron un micro-modelo para la modelación de la mampostería de piedra. Propusieron un algoritmo de contacto entre los nodos, implementaron un modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y consideraron condiciones para la fricción. Calibraron los parámetros mediante un murete de mampostería de piedra probado en compresión diagonal. Determinaron la necesidad de establecer pruebas estandarizadas para obtener las propiedades de los materiales de la mampostería de piedra. Concluyeron que el micro-modelo es adecuado para determinar el efecto de las propiedades de los materiales en la simulación de la mampostería de piedra.

Calderini *et al.* (2010) realizaron un estudio con muretes de mampostería sujetos a compresión diagonal. Aplicaron cargas en los bordes para evitar la aparición de esfuerzos de tensión en las juntas en el centro del panel. Elaboraron muretes de 1290 x 1290 mm y de 855 x 855 mm. Con base en los resultados obtenidos de las pruebas proponen un procedimiento para la obtención de valores del coeficiente de fricción interna y de la cohesión. Para validar el procedimiento elaboraron modelos no lineales de elemento finito utilizando un modelo discreto modelando de forma separada los bloques y las juntas de mortero. Los bloques y las juntas se modelaron mediante elementos tipo "shell". Las juntas de mortero se modelaron de 10 mm de espesor. Concluyeron que los modelos matemáticos aproximaron adecuadamente los experimentales.

Gabor *et al.* (2006) realizaron un análisis numérico y experimental de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto. Desarrollaron modelos de elemento finito no lineales de muretes de bloques huecos de concreto sujetos a compresión diagonal. Los bloques y las juntas de mortero se modelaron mediante elementos planos de 4 nodos. La dimensión de la malla fue variable. Consideraron los bloques como elementos elásticos y un modelo constitutivo elasto-plástico para las juntas de

mortero. Los principales parámetros considerados en el modelo fueron la cohesión y la fricción residual. Para el análisis experimental construyeron muretes de mampostería de 870 x 870 x 100 mm. Los muretes fueron probados en compresión diagonal. Concluyeron que los modelos matemáticos aproximan adecuadamente el comportamiento experimental.

Attard *et al.* (2007) llevaron a cabo la micro-modelación de elementos de mampostería como elementos discontinuos unidos por nodos de interface. Usaron elementos triangulares con nodos a lo largo de la interfaz lateral de los mismos. El comportamiento inelástico se modeló considerando leyes constitutivas para las fuerzas normales y cortantes en los nodos de interfaz. La fractura se limitó a los elementos de interfaz. Modelaron el comportamiento de paneles de mampostería reducidos considerando bloques de pequeña escala de 48 x 10 x 25 mm y simulando cada bloque como una malla de 4 x 4. Hicieron modelos considerando morteros con diferentes propiedades. Concluyeron que el modelo presenta ventajas al permitir el rastreo del comportamiento inelástico debido a la interacción de la tensión, el deslizamiento y la dilatación en las uniones del mortero y los bloques.

Giamundo *et al.* (2014) investigaron la idoneidad de emplear el MEF continuo o el método de Elementos Discretos (DEM) para la modelación de la mampostería de baja resistencia. Realizaron pruebas de compresión diagonal en muretes de 1020 x 1020 mm construidos con bloques de toba volcánica de 400 x 110 x 250 mm unidos mediante mortero. La modelación en FEM se llevó a cabo en el software DIANA empleando la micromodelación. Modelaron los bloques y el mortero individualmente utilizando elementos isoparametricos cuadrilateros de esfuerzo plano. El modelo constitutivo empleado fue el de grieta fija multidireccional. La modelación en DEM se llevó a cabo en el software UDEC. Modelaron los bloques como elementos deformables con un modelo constitutivo de plasticidad de Mohr-Coulomb. Las juntas se modelaron como elementos de interfaz con un modelo constitutivo de deslizamiento de Coulomb. Compararon los resultados obtenidos de ambos métodos de modelación con los resultados experimentales. Concluyeron que la modelación mediante MEF continuo es adecuada para la mampostería en la cual los bloques son de baja

resistencia, mientras que para la mampostería donde la junta es de baja resistencia el DEM es adecuado.

Milosevic, *et. al.* (2013) llevaron a cabo pruebas de compresión diagonal en muretes de mampostería de piedra de 1200 x 1200 mm y 700 mm de espesor construidos con diferentes tipos de mortero. Elaboraron modelos de FEM continuos y de DEM (Discrete Element Method) de los muretes. La modelación FEM de los muretes de mampostería fue en el software DIANA. Modelaron la mampostería mediante elementos isoparámetros de esfuerzo plano de 8 nodos de 50 mm con un modelo de grieta distribuida y un modelo constitutivo de agrietamiento por deformación total. La modelación DEM se llevó a cabo en el software UDEC. Modelaron los bloques de piedra como elementos poligonales de tamaño aleatorio generados de forma automática, con propiedades lineales elásticas. Modelaron el contacto entre los bloques como elementos de interfaz con un modelo de deslizamiento de Coulomb. Concluyeron que los resultados de ambos modelos numéricos aproximaban los resultados experimentales y que con el modelo de FEM se puede obtener la curva completa de carga – desplazamiento y con el modelo DEM únicamente la carga máxima.

## 2.7 Conclusiones de la revisión de la literatura

A partir de la revisión de la literatura se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Existe información experimental suficiente del comportamiento de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto.
- Se identificaron dos modos de falla principales en las pruebas experimentales realizadas en muretes: 1) por deslizamiento y 2) por tensión diagonal. Los tipos de falla previos están asociados principalmente a la falla en la junta entre el bloque y el mortero.
- Se ha propuesto una ecuación para determinar el módulo de cortante de diseño de la mampostería con base en el módulo de elasticidad de diseño de la mampostería.
- Se encontraron valores típicos de cohesión de 0.22 a 0.35 MPa y de ángulo de fricción de  $36^\circ$  para la mampostería.
- En los trabajos desarrollados con el MEF de mampostería sujeta compresión diagonal se han considerado en su mayoría modelos no lineales con un enfoque de grieta discreta considerando los bloques como elementos elásticos y la propagación del agrietamiento a través de las juntas.

## **CAPÍTULO III.**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Descripción general**

En esta sección se presenta la metodología para desarrollar modelos computacionales no lineales con el Método del Elemento Finito de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, empleados en la determinación de la resistencia a compresión diagonal. Se utilizan modelos de esfuerzo plano con elementos isoparamétricos cuadriláteros y elementos de interfaz lineales. En el procedimiento se analiza la carga máxima y el proceso de agrietamiento de los muretes. A continuación, se enlistan las actividades realizadas:

1. Selección de muretes ensayados experimentalmente
2. Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de muretes
  - 2.1 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería
  - 2.2 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero
  - 2.3 Análisis lineal
  - 2.4 Distribución de esfuerzos en las juntas horizontales
3. Desarrollo de modelos no lineales de elemento finito de muretes
  - 3.1 Relación de resistencia de las juntas
  - 3.2 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería
  - 3.3 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero

#### **3.2 Selección de muretes ensayados experimentalmente**

Los muretes seleccionados para los modelos de elementos finitos son los ensayados por (Marín, 2008) y (Sosa, 2013), los cuales corresponden a pruebas de compresión diagonal. En los ensayos la falla se presentó en las juntas, por tensión diagonal, por deslizamiento o por combinación de ambos. Los muretes se ensayaron a compresión diagonal mediante un marco de carga de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma NMX-C-464-ONNCCE (Figura 3.1). En la figura 3.2 se presentan las características de los muros ensayados por Marín (2008) y Sosa (2013).



Figura 3.1 Ensayo de muretes de mampostería de acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE

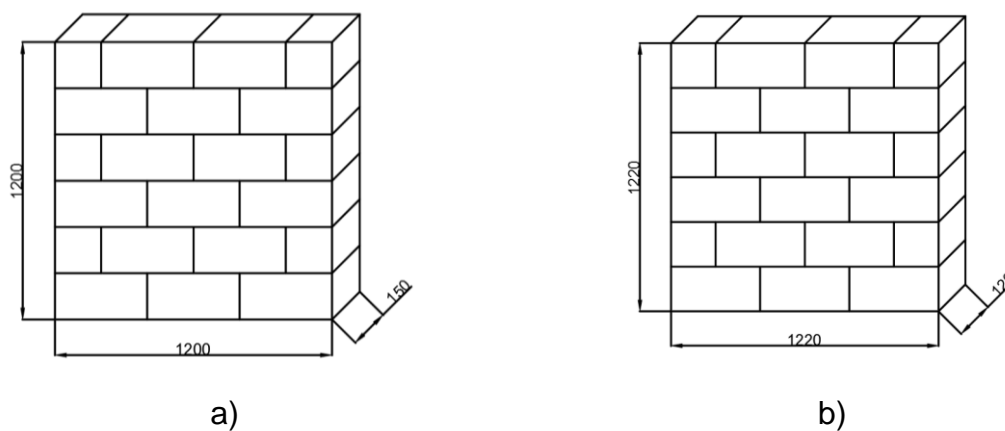


Figura 3.2 Características de muretes ensayados por a) Marín (2008) y b) Sosa (2013)

Se consideraron las propiedades promedio de los muretes de las pruebas denominadas definitivas por Marín (2008) y el promedio de los muretes ensayados por Sosa (2013).

Las características de los muretes fueron las siguientes:

- Relación de aspecto de 1.0
- Los muretes ensayados por Marín (2008) tenían dimensiones nominales de 120 x 120 x 15 cm. y los de Sosa (2013) tenían dimensiones nominales de 122 x 122 x 12 cm.
- La resistencia promedio de la mampostería fue de 4.86 MPa (Marín, 2008) y de 4.09 MPa (Sosa, 2013)
- Las juntas de mortero eran de 1 cm de espesor.
- El mortero tenía una proporción en volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena)

### **3.3 Desarrollo de modelos elásticos de elemento finito de muretes**

Se desarrollaron modelos elásticos de elemento finito de los muretes ensayados por Marín (2008) y Sosa (2013). Los modelos elásticos permitieron identificar las zonas de concentración de esfuerzos y el tipo de esfuerzos presentes. Lo anterior permite identificar las posibles zonas de aparición del agrietamiento.

Se elaboraron modelos de esfuerzo plano de los muretes, con dimensiones de 1.20 x 1.20 m y espesores de 12 y 15 cm. Las condiciones de frontera de los muretes se simularon modelando los cabezales de acero, aproximando las condiciones experimentales. En el cabezal inferior se restringieron los desplazamientos en las direcciones x, y. En el cabezal superior se restringieron los desplazamientos en dirección x y se permitió el desplazamiento en dirección y. La carga se impuso mediante un desplazamiento prescrito en el cabezal superior. (Figura 3.3a).

La mampostería se modeló mediante una malla estructurada con elementos finitos isoparamétricos de 4 nodos, con dimensiones de 25 x 25 mm. Se consideró un comportamiento elástico lineal de la mampostería; los ejes locales se orientaron a 45° para que coincidan con las juntas horizontales de los muretes (Figura 3.3b).

Las juntas se modelaron como elementos de interfaz lineal de 2 nodos. Se consideraron dos configuraciones en las juntas: en la primera, se consideró un modelo de interfaz rígida y bloques con propiedades de la mampostería; en la segunda, un



modelo de interfaz flexible y propiedades del bloque de concreto y del mortero. Dichas configuraciones se describen en las secciones 3.3.1 y 3.3.2.

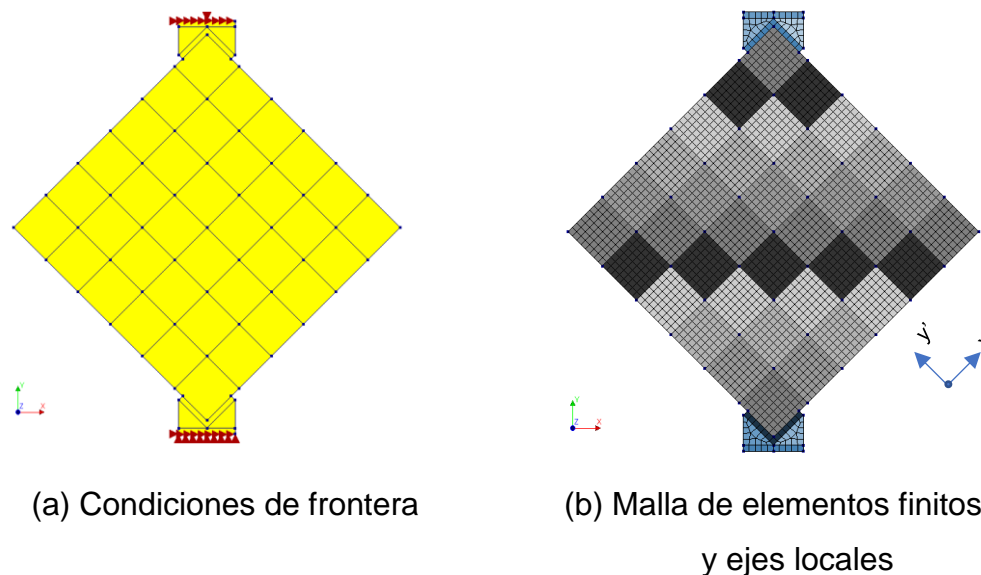


Figura 3.3 Condiciones de frontera de los modelos elásticos de muretes y malla de elementos finitos en ejes locales

### 3.3.1 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería

En el modelo de interfaz rígida los bloques se modelaron considerando las propiedades elásticas de la mampostería como un material elástico lineal con módulo de elasticidad de 4645 MPa y una relación de Poisson de 0.25 (Raygoza, 2012) para la mampostería de 15 cm de espesor y un módulo de elasticidad de 5214 MPa y una relación de Poisson de 0.25 para la mampostería de 12 cm de espesor. La interfaz lineal se modeló mediante un modelo friccionante de Mohr-Coulomb. La rigidez en la dirección normal y transversal de la interfaz se obtuvieron mediante un modelo elástico de una pila de mampostería de 3 bloques de concreto unidos por un elemento de interfaz (Figura 3.4), considerando que el conjunto de los bloques y las juntas mantuvieran una rigidez similar a la rigidez de la mampostería.



a) Malla de elementos finitos

b) Desplazamientos en dirección Y global

Figura 3.4 Modelo de pila usado en la calibración de la rigidez normal de las juntas

### 3.3.2 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero

La segunda estrategia de modelación consistió en emplear las propiedades elásticas del mortero para la modelación de las juntas. En este caso las juntas se modelaron mediante un modelo de interfaz compuesto (Lourenco, 1996). Las propiedades de la interfaz utilizada fueron de  $799.4 \text{ N/mm}^3$  de módulo de rigidez normal, el cual fue obtenido considerando un módulo de elasticidad del mortero de  $7994 \text{ MPa}$  (Hernández, 2015) y un espesor de las juntas de  $10 \text{ mm}$ . Se consideró un módulo de rigidez cortante de  $320 \text{ N/mm}^3$ . El módulo de rigidez normal y el módulo de rigidez cortante se determinaron con las Ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente, para el caso de la junta vertical, en la cual el mortero está aplicado en todo el ancho del bloque.

$$K_n = \frac{E_j}{t} \quad (3.1)$$

$$K_\tau = \frac{G_j}{t} \quad (3.2)$$

En donde  $E_j$  el módulo de elasticidad del mortero,  $G_j$  es el módulo de cortante del mortero el cual se determinó con la Ecuación (3.3), y  $\nu$  la relación de Poisson del mortero,  $K_n$  es el módulo de rigidez normal de la junta,  $K_\tau$  es el módulo de rigidez tangencial de la junta, y  $t$  el espesor de la junta.

$$G_j = \frac{E_j}{2(1 + \nu)} \quad (3.3)$$

El módulo de rigidez normal de la junta horizontal se determinó con la Ecuación (3.4) y el módulo de rigidez cortante de la junta horizontal se determinó con la Ecuación (3.5).

$$K_{nh} = \frac{K_n}{\lambda} \quad (3.4)$$

$$K_{th} = \frac{K_t}{\lambda} \quad (3.5)$$

En donde  $K_{nh}$  es el módulo de rigidez normal de la junta horizontal,  $K_{th}$  es el módulo de rigidez cortante de la junta horizontal y  $\lambda$  es un factor adimensional determinado como se establece en la sección 3.3.4.

Una vez que se obtuvo el módulo de rigidez de la junta horizontal con las ecuaciones anteriores, se observa que el módulo de elasticidad de la pila de mampostería se aproxima al de la mampostería. Se puede ajustar el módulo de elasticidad de los bloques para que el módulo de elasticidad de la pila sea igual al de la mampostería.

### 3.3.3 Análisis lineal

El análisis elástico de los muretes se realizó mediante el siguiente procedimiento:

1. Se aplicó un desplazamiento unitario prescrito en el cabezal superior en la dirección vertical y en ejes globales y se determinó la reacción en el apoyo.
2. Con la magnitud de la reacción y considerando un comportamiento elástico lineal, se calculó el desplazamiento necesario para producir una reacción igual al valor de la carga última reportada. En el caso de los muretes de 12 cm de espesor, la carga última es 49.56 kN y el desplazamiento requerido es de -0.250 mm. Para los muretes de 15 cm de espesor, la carga última es de 70.48 kN y el desplazamiento requerido es de -0.311 mm.
3. Se obtuvo la distribución de esfuerzos normales en ejes locales  $\sigma_{yy}$ , esfuerzos cortantes en ejes locales  $\tau_{xy}$  y esfuerzos principales  $\sigma_{11}$ .

### 3.3.4 Distribución de esfuerzos en las juntas horizontales

Del análisis elástico lineal del murete de bloques huecos de concreto se obtuvo la distribución de esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}$ ) y esfuerzos normales ( $\sigma_{yy}$ ) en las juntas horizontales. Se graficó la curva  $\tau_{xy}$ - $\sigma_{yy}$  en la hilada superior del murete para la carga de falla, con el propósito de establecer valores preliminares de la cohesión  $c$  para la modelación de la falla por deslizamiento.

### 3.4 Desarrollo de modelos no lineales de elemento finito de muretes

Se desarrollaron modelos no lineales de elemento finito de muretes de mampostería de 15 cm de espesor sujetos a compresión diagonal en su plano. En los ensayos experimentales los agrietamientos se presentaron principalmente en las juntas. Debido a lo anterior en la modelación se consideró un modelo de grieta discreta mediante elementos de interfaz lineal con los cuales se simularon las juntas de mortero. En los muretes ensayados se presentaron principalmente modos de falla de Modo I (abertura) y Modo II (deslizamiento).

Se elaboraron 5 modelos de esfuerzo plano de muretes sujetos a compresión diagonal en su plano. En uno de los modelos se consideró una relación constitutiva de Mohr-Coulomb en la interfaz y en cuatro modelos se consideró una relación constitutiva de tipo compuesta en la interfaz. El murete modelado con elementos de interfaz de Mohr-Coulomb se denominó modelo 1, mientras que los modelos elaborados con interfaz compuesta se denominaron modelo 2, 3, 4 y 5.

El modelado de los muretes se llevó a cabo de la siguiente forma:

- Geometría: murete con dimensiones de 1200 x 1200 mm y 150 mm de espesor, conformado por 6 filas de 3 bloques de concreto de dimensiones 150 x 200 x 400 mm. Los elementos bloque están unidos entre ellos mediante elementos de interfaz lineal de 150 mm de espesor.

- Elementos: los bloques de concreto se modelaron mediante elementos isoparamétricos cuadriláteros de 4 nodos y 2 grados de libertad por nodo (Q8MEM). Las juntas se modelaron mediante elementos de interfaz lineal de dos nodos y dos grados de libertad por nodo (L8IF). Las características de los elementos finitos se detallan en la sección 2.2.
- Materiales: se consideraron dos estrategias para la modelación de los elementos estructurales. En el modelo 1 se consideró un modelo de interfaz rígida (Sección 3.4.2). En los modelos 2, 3, 4 y 5 se usó un modelo de interfaz flexible (Sección 3.4.3). Las propiedades no lineales de las juntas se ajustaron en función de la relación entre el espesor promedio de las paredes exteriores inferiores y superiores en los bloques de concreto y la pared lateral. (Sección 3.4.1).
- Condiciones de frontera: se modelaron los cabezales de acero. Al cabezal inferior se le restringió en los desplazamientos en la dirección  $x$  y  $y$ . Al cabezal superior se le restringió en los desplazamientos en dirección  $x$  y se permitió el desplazamiento en dirección  $y$ .
- Carga: se aplicó una carga, en el cabezal superior, asociada a un desplazamiento prescrito de 0.05 mm. Con dicha carga se obtuvo el primer paso de carga de la respuesta elástica.
- Análisis no lineal: se llevó a cabo mediante un control de desplazamientos, el cual consistió en la aplicación de desplazamientos prescritos de manera incremental hasta obtener la carga de falla. Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton-Raphson regular con criterios de convergencia simultáneos de energía y fuerza.

En la figura 3.5 (a) se presenta la geometría y las condiciones de frontera de los modelos no lineales de muretes. Se señalan con líneas de color rojo la posición de las juntas horizontales y verticales modeladas. En la figura 3.5 (b) se presenta la malla de elementos finitos de los modelos no lineales de muretes.

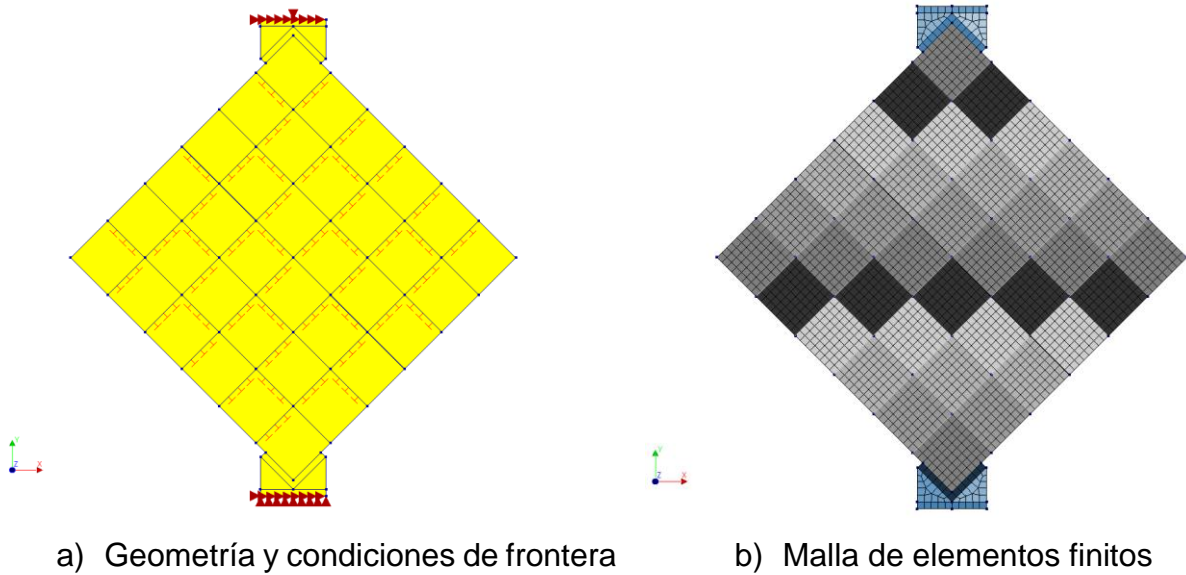


Figura 3.5 Características de los modelos no lineales de muretes

### 3.4.1 Relación de resistencia de las juntas

En un modelo de esfuerzo plano se considera que el cuerpo es sólido en la dirección perpendicular al plano. Para este propósito se puede utilizar propiedades de los bloques sobre área bruta. Por otra parte, las juntas horizontales y las verticales no pueden tener las mismas propiedades, ya que la junta vertical tiene mortero en todo el espesor del bloque, mientras que la junta horizontal tiene mortero únicamente en el espesor de la pared del bloque, como se presenta en la Figura (3.6).

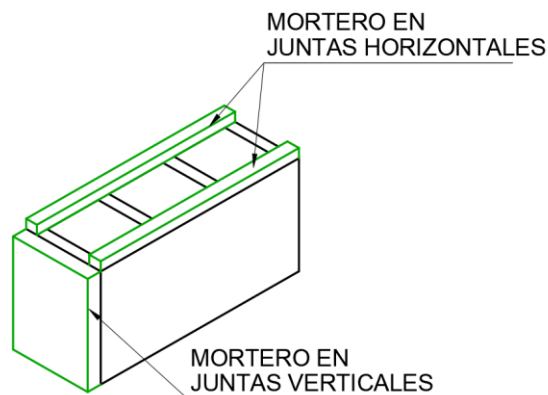


Figura 3.6 Colocación de mortero en juntas horizontales y verticales

La fuerza resistente de una junta ( $R$ ) se puede calcular como (Ecuación (3.6)):

$$R = (f)(t)L \quad (3.6)$$

donde  $f$  el esfuerzo resistente en la junta,  $t$  el espesor de la junta y  $L$  la longitud de la junta. En las juntas horizontales el mortero se aplica en el espesor de las paredes de los bloques, por lo tanto, la Ecuación (3.6) se reescribe la ecuación en función del espesor de la pared del bloque  $t_{pared\_bloque}$  (Ecuación (3.7)):

$$R = (f)(2t_{pared\_bloque})L \quad (3.7)$$

Dado que en el espesor en el modelo  $t_{modelo}$  es de 150 mm, que es el espesor del bloque, y es mayor que el espesor de la pared del bloque, se puede calcular un esfuerzo resistente equivalente de la junta horizontal ( $f_{modelo}$ ) para efecto de modelado como (Ecuación (3.8)):

$$f_{modelo} = \frac{R}{(t_{modelo})L} = \frac{(f)(2t_{pared\_bloque})L}{(t_{modelo})L} = \frac{f}{\lambda} \quad (3.8)$$

Se establece un factor adimensional  $\lambda$  el cual se obtiene de la relación del espesor del modelo y dos veces la pared del bloque hueco de concreto:

$$\lambda = \frac{t_{modelo}}{2t_{pared\_bloque}} \quad (3.9)$$

El esfuerzo resistente de la junta es función de la cohesión y del ángulo de fricción interna en un modelo de Mohr-Coulomb. Por lo tanto, sustituyendo la ecuación de Mohr-Coulomb (Ecuación (2.15)) en la Ecuación (3.9), se obtiene el esfuerzo resistente equivalente de la junta horizontal como (Ecuación (3.10)):

$$f_{modelo} = \frac{f}{\lambda} = \frac{c + \sigma_n \tan \varphi}{\lambda} = \sigma_n \frac{\tan \varphi}{\lambda} + \frac{c}{\lambda} \quad (3.10)$$

Por lo tanto, la cohesión y el ángulo de fricción interna equivalente de la junta horizontal para el modelo se determina como (Ecuación (3.11) y Ecuación (3.12)):

$$c_{modelo} = \frac{c}{\lambda} \quad (3.11)$$

$$\varphi_{modelo} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi}{\lambda} \right) \quad (3.12)$$

El esfuerzo resistente a tensión equivalente de las juntas horizontales ( $f_{t\_modelo}$ ) se calcula con un modelo de Rankine (Ecuación (3.13)):

$$f_{t\_modelo} = \frac{f_t}{\lambda} \quad (3.13)$$

En donde  $f_t$  es el esfuerzo resistente a tensión de la junta.

Las dimensiones geométricas de los bloques consideradas para calcular el factor  $\lambda$  están basadas en las mediciones reportadas por Raygoza (2012) (Tabla 3.1) (Figura 3.7). La relación entre el espesor promedio de las paredes exteriores inferiores y superiores en los bloques de concreto (25.54 mm) y la pared lateral de los bloques de concreto (144.07 mm) es 2.82, por lo cual se usa este valor para el factor  $\lambda$ .

Tabla 3.1 Dimensiones promedio de los bloques huecos de concreto

A	TI5	TI6	TI7	TI8	TI9	TI10	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10
144.07	26.72	25.72	24.54	26.18	25.33	25.88	24.49	26.19	24.04	25.62	25.36	26.15
	PROMEDIO=25.54											

Dimensiones en mm.



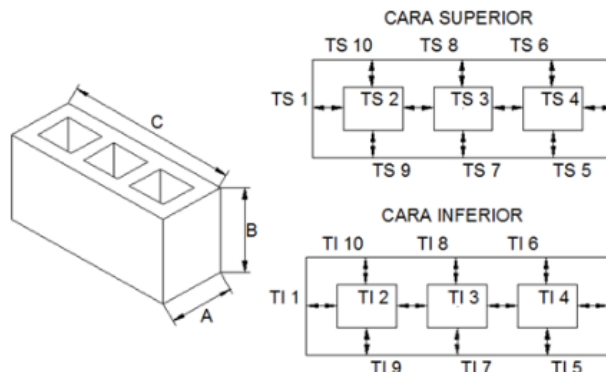


Figura 3.7 Dimensiones de los bloques

### 3.4.2 Modelo de interfaz rígida y propiedades de mampostería

En el modelo 1 se consideraron interfaces rígidas para las juntas. Los bloques se modelaron como elementos elásticos con módulo de elasticidad de 4645 MPa y las juntas como elementos de interfaz rígida con las propiedades elásticas establecidas en la sección 3.3.1. En los elementos de interfaz se consideró un modelo de junta friccionante de Mohr-Coulomb. Con base en los resultados obtenidos del análisis elástico lineal del murete de bloques huecos de concreto se obtuvieron valores de cohesión preliminares para la falla por deslizamiento, mediante el ajuste de la ecuación de Mohr-Coulomb (Ecuación 3.6 de la Sección 3.3.4). Para aproximarse a la carga de falla se varió la resistencia a la cohesión de la junta  $c$  a partir del valor preliminar. Se observó que la falla en las juntas se presenta de manera simultánea en la hilada inferior y superior del murete. En los experimentos se produce la falla en una de las juntas, ya que no todas las juntas tienen la misma resistencia. Para reproducir esto, se aumentó la cohesión de las juntas en un 5%, salvo la de la hilada superior, lo cual permite que en esta hilada se presente la falla por deslizamiento esperada.

### 3.4.3 Modelo de interfaz flexible y propiedades de bloque y mortero

En los modelos 2, 3, 4 y 5 se consideró una interfaz flexible para las juntas. Las propiedades elásticas de la interfaz fueron determinadas en la sección 3.3.2. En los elementos de interfaz se consideró un modelo constitutivo compuesto. Se consideró la resistencia a la tensión para las juntas horizontales de 0.13 MPa (Flores, 2008). La resistencia a la tensión para las juntas verticales se incrementó en el factor  $\lambda$  con respecto a la resistencia a la tensión de las juntas horizontales. La energía de fractura del modo 1 ( $G_f^I$ ) se ajustó linealmente con respecto al valor propuesto por Lourenco (1996). La cohesión para las juntas horizontales y verticales se tomó inicialmente igual al valor obtenido en la calibración del modelo de interfaz friccionante. En la tabla 3.1 se presenta un resumen de las propiedades no lineales usadas para los modelos de muretes.

Tabla 3.2 Parámetros iniciales empleados en el modelo de interfaz compuesto

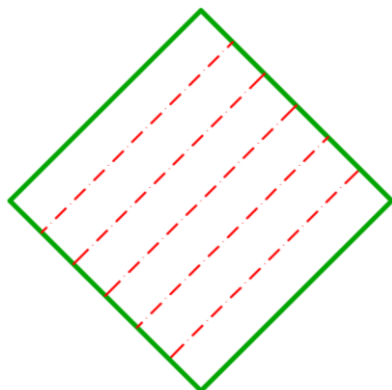
Rigidez		Tensión		Cortante			Cap	
$K_n$	$K_\tau$	$f_t$	$G_f^I$	$\tan \phi$	$\tan \psi$	$G_f^{II}$	$f_m$	$C_{ss}$
Junta horizontal								
266	106	0.14	0.01	0.26	0.21	0.125	8.5	9.0
Junta vertical								
799	320	0.38	0.03	0.73	0.57	0.125	8.5	9.0
[N/mm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]			[N/mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	

En el modelo 2 se consideraron únicamente las juntas horizontales. Inicialmente se utilizó el valor de la cohesión calibrado en el modelo 1. Las juntas verticales no se modelaron para garantizar que se produzca la falla en la junta horizontal. Los resultados se compararon con los obtenidos en el modelo 1 debido a que el modelo de interfaz compuesto es una extensión del modelo de interfaz friccionante. En la figura 3.8 (a) se presenta la localización de las juntas horizontales con línea punteada de color rojo.

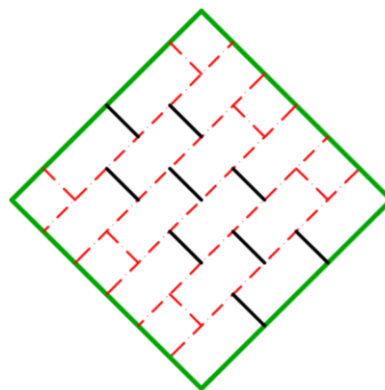
En el modelo 3 se consideraron las juntas horizontales y las verticales. En este modelo se considera una resistencia a la tensión en la interfaz. La cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia a tensión de las juntas verticales y horizontales se relacionan a través del factor  $\lambda$  en la Ecuación (3.11), Ecuación (3.12) y Ecuación (3.13), respectivamente (Sección 3.4.1). Debido al método constructivo empleado en el cual los bloques de 3 celdas se dividen por la mitad y se les coloca mortero únicamente en el espesor de las paredes laterales, se consideraron las juntas de los extremos con propiedades de junta horizontal. En la figura 3.8 (b) se presenta la localización de las juntas correspondiente a mortero colocado sobre el espesor de las paredes de las celdas (juntas horizontales), con línea punteada de color rojo, y las juntas correspondientes a mortero colocado en todo el espesor del bloque (juntas verticales), con línea continua de color negro.

En el modelo 4 se consideraron las mismas propiedades de la interfaz para las juntas verticales y horizontales. Las propiedades de la interfaz corresponden al de las verticales del modelo 3. El modelo corresponde a un murete construido con bloques sólidos (Figura 3.8 (c)).

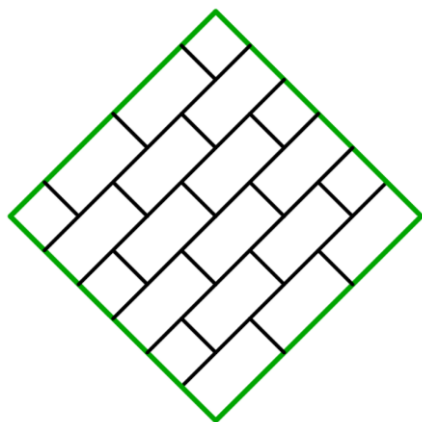
En el modelo 5 se modificó el modelo 3 eliminando las juntas horizontales de los extremos con el propósito de simular las condiciones del murete M4BP5D investigado por Marín (2008), en el cual se reforzaron los extremos del murete mediante una varilla de  $\frac{1}{2}$ " en los espacios de los bloques del extremo en forma similar a un castillo ahogado. Los valores de la cohesión en las juntas horizontales y verticales se ajustaron para obtener la carga de falla reportada. En este modelo se modelaron las juntas verticales de los extremos con propiedades de junta horizontal de forma similar al modelo 3 (Figura 3.8 (d)).



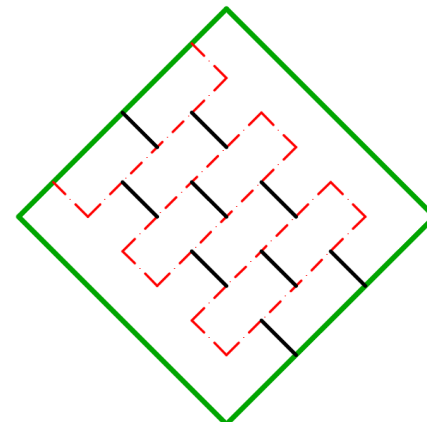
a) Configuración de juntas del modelo 1 y 2



b) Configuración de juntas del modelo 3



c) Configuración de juntas del modelo 4



d) Configuración de juntas del modelo 5

Figura 3.8 Configuración de juntas en los modelos 2, 3, 4 y 5

## CAPÍTULO IV.

### RESULTADOS

#### 4.1 Modelos lineales

##### 4.1.1 Distribución de esfuerzos

Se modelaron muretes de mampostería de 12 y 15 cm de espesor. El módulo de elasticidad de los bloques ( $E_b$ ) del modelo de junta rígida se obtuvo de los datos experimentales, el módulo de rigidez normal ( $K_n$ ) y el módulo de rigidez tangencial ( $K_t$ ) del modelo de junta rígida se calibraron mediante el procedimiento de la sección 3.3.1. El módulo de elasticidad de los bloques ( $E_b$ ), el módulo de rigidez normal ( $K_n$ ) y el módulo de rigidez tangencial ( $K_t$ ) del modelo de junta flexible se calcularon analíticamente mediante el procedimiento de la sección 3.3.2.

En la tabla 4.1 se presentan las propiedades lineales obtenidas en los modelos de junta rígida y junta flexible de los muretes de 12 cm de espesor.

Tabla 4.1 Propiedades lineales de muretes de mampostería de 12 cm de espesor

Muretes de mampostería de 12 cm de espesor				
	Junta horizontal		Junta vertical	
$E_b$ (MPa)	$K_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_t$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_t$ (N/mm <sup>3</sup> )
Modelo de junta rígida				
5214	10000	4000	10000	4000
Modelo de junta flexible				
5580	283	113	799	320

En la tabla 4.2 se presentan las propiedades lineales obtenidas en los modelos de junta rígida y junta flexible de los muretes de 15 cm de espesor.

Tabla 4.2 Propiedades lineales de muretes de mampostería de 15 cm de espesor

Muretes de mampostería de 15 cm de espesor				
	Junta horizontal		Junta vertical	
$E_b$ (MPa)	$K_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_t$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_n$ (N/mm <sup>3</sup> )	$K_t$ (N/mm <sup>3</sup> )
Modelo de junta rígida				
4645	10000	4000	10000	4000
Modelo de junta flexible				
5100	283	113	799	320

Hernández (2015) desarrolló una ecuación (Ec. 2.21) para obtener el módulo de elasticidad de los bloques de concreto en función de su resistencia sobre área neta. Considerando una resistencia sobre área bruta de 8.65 MPa para los bloques de 12 cm y 6.92 MPa para los bloques de 15 cm, el módulo de elasticidad es 8446 y 9614 MPa para los bloques de 12 y 15 cm respectivamente. El módulo de elasticidad sobre área neta y el módulo de elasticidad sobre área total se relacionan mediante la siguiente ecuación (Ec. 4.1):

$$E_{pt} = E_{pn} \frac{A_n}{A_t} \quad (4.1)$$

Considerando una relación entre área neta y área total de 0.64 para los bloques de 12 cm y 0.52 para los bloques de 15 cm, el módulo de elasticidad sobre área total es de 5406 y 5000 MPa para los bloques de 12 y 15 cm, respectivamente. Se observa que estos módulos de elasticidad son similares a los obtenidos en este trabajo en el modelo de junta flexible de 12 cm y 15 cm de espesor, que fueron de 5580 MPa y 5100 MPa, respectivamente.

En la figura 4.1 se grafican los esfuerzos normales  $\sigma_{yy}$ , en el modelo de junta rígida (a) y en el modelo de junta flexible (b) para los análisis elásticos de muretes de 12 cm

de espesor; la orientación de los ejes locales  $x'y'$  coincide con la orientación de las juntas. Se observa que los esfuerzos son en su mayor parte de compresión, con los mayores valores en la zona de los cabezales de aplicación de la carga en donde se puede producir un agrietamiento por deslizamiento (Figura 4.4a). La distribución de esfuerzos en ambos modelos es similar.

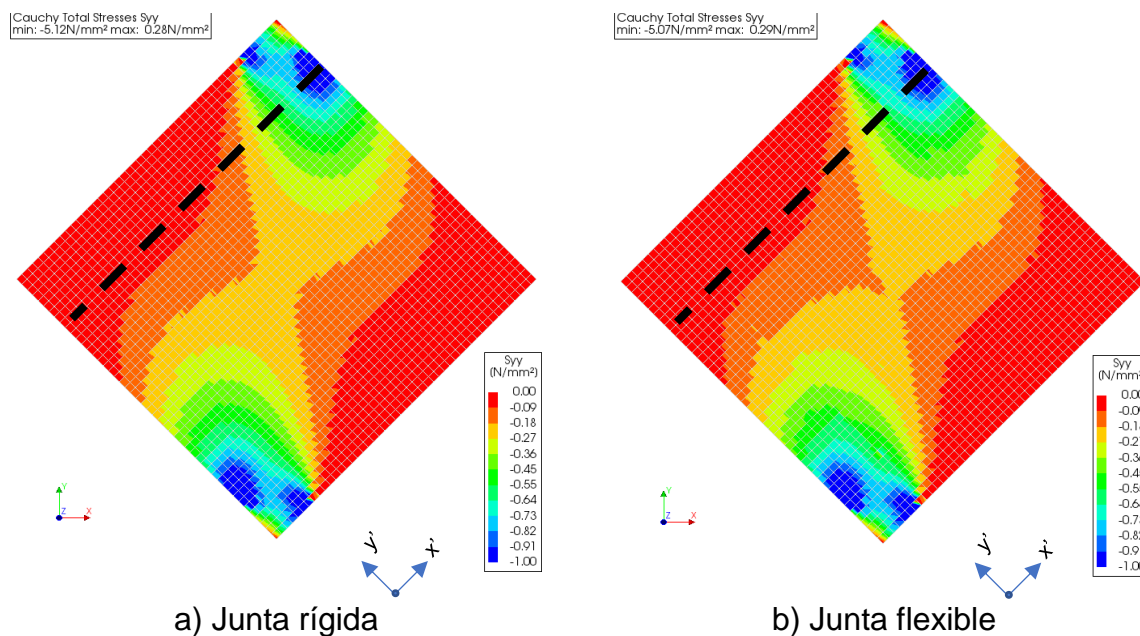


Figura 4.1 Esfuerzos normales  $\sigma_{yy}$  en el murete de 12 cm de espesor

En la Figura 4.2 se grafican los esfuerzos cortantes en ejes locales ( $\tau_{xy}$ ), para el modelo de junta rígida (a) y para el modelo de junta flexible (b). La distribución de esfuerzos en ambos modelos es similar. Se observa mayores esfuerzos cortantes en la zona cercana a los cabezales de aplicación de la carga.

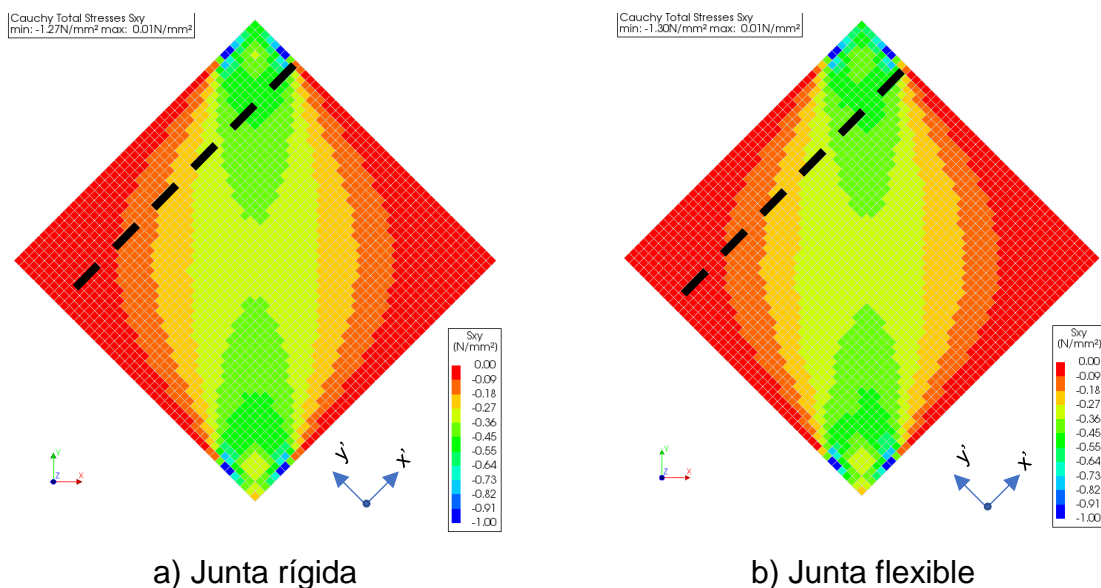


Figura 4.2 Esfuerzos cortantes  $\tau_{xy}$  en el murete de 12 cm de espesor

En la figura 4.3 se presentan los esfuerzos principales para el modelo de junta rígida (a) y para el modelo de junta flexible (b). Se observan los mayores esfuerzos a tensión en la zona central del murete, donde se puede producir un agrietamiento diagonal como el observado experimentalmente (Figura 4.4). La distribución de esfuerzos en el modelo de junta rígida y en el modelo de junta flexible es similar.

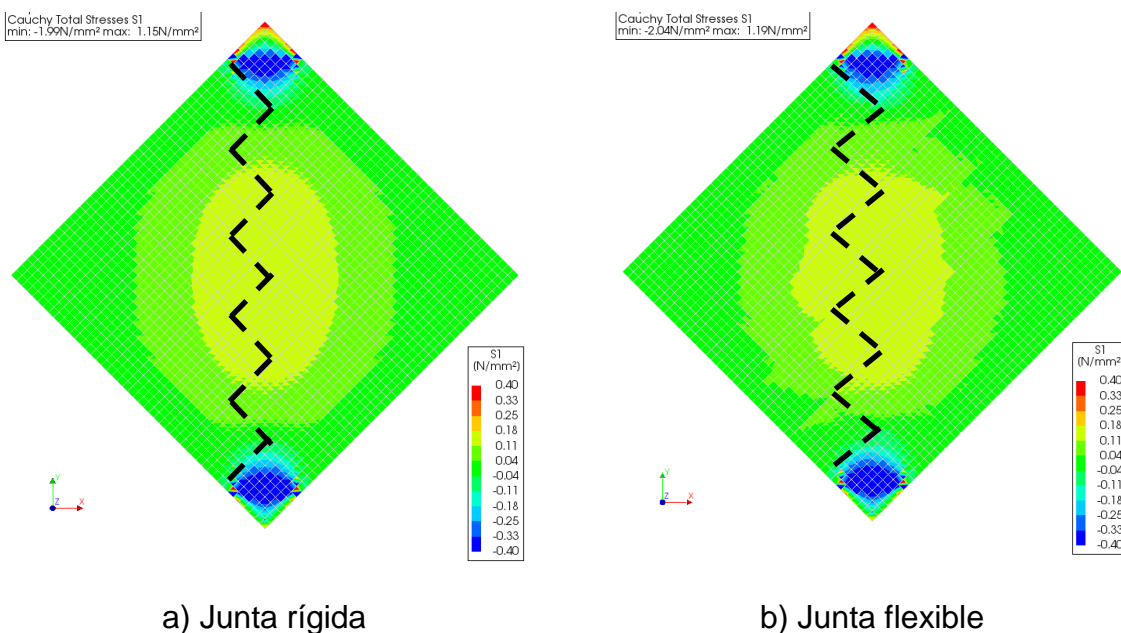


Figura 4.3 Esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  en el murete de 12 cm de espesor





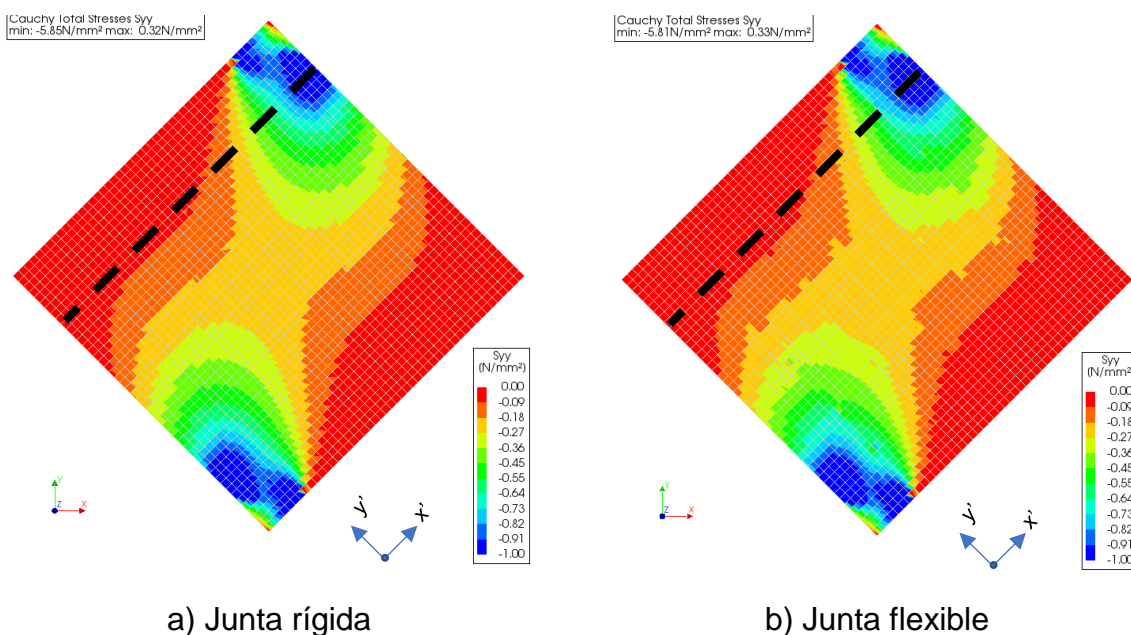
a) Falla por deslizamiento



b) Falla por tensión diagonal

Figura 4.4 Modos de falla de los muretes

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se presentan los resultados de los modelos de junta rígida (a) y en el modelo de junta flexible (b) para los análisis elásticos de muretes de 15 cm de espesor. Se observa que los resultados son similares a los obtenidos en los muretes de 12 cm de espesor. La distribución de esfuerzos normales y cortantes en ejes locales, así como de esfuerzos principales, son similares.

Figura 4.5 Esfuerzos normales  $\sigma_{yy}$  en el murete de 15 cm de espesor

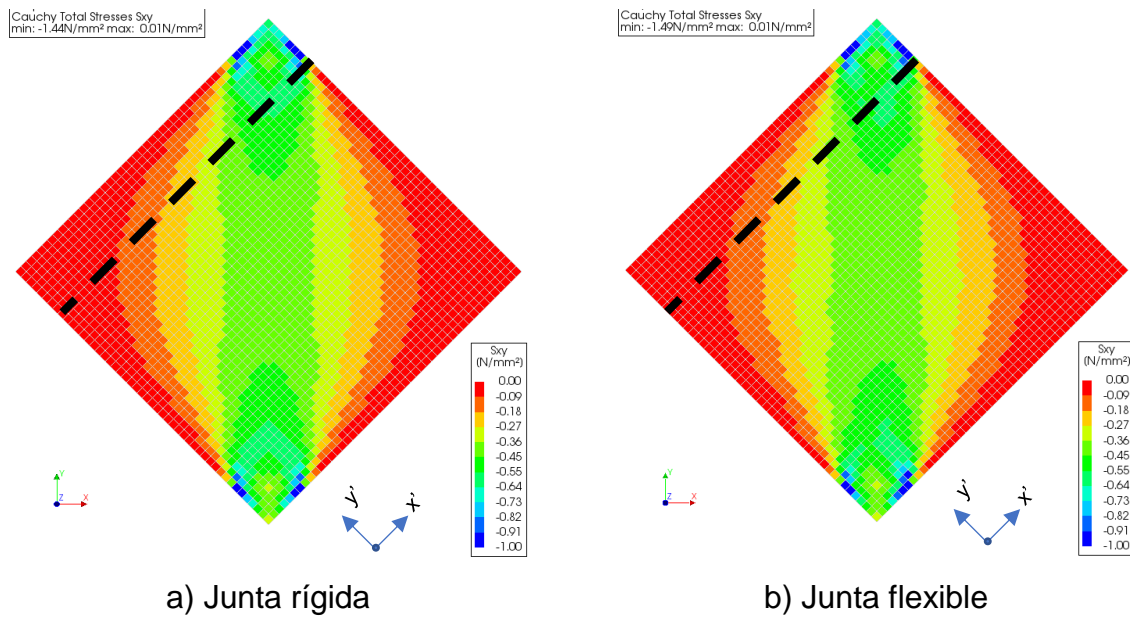


Figura 4.6 Esfuerzos cortantes  $\tau_{xy}$  en el murete de 15 cm de espesor

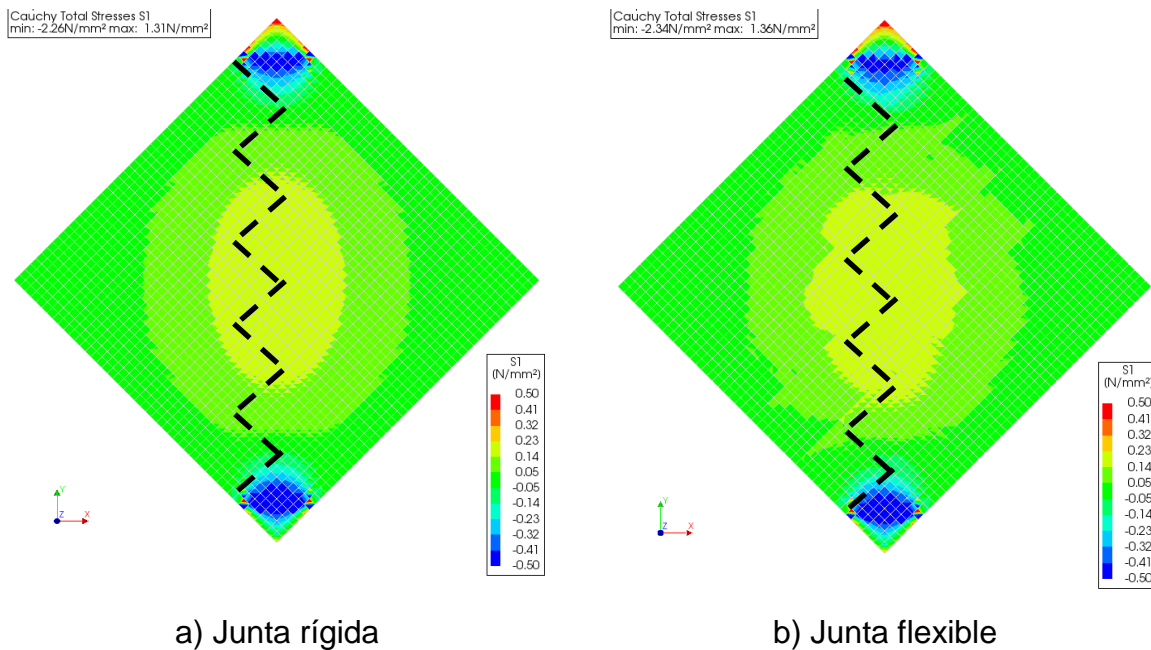


Figura 4.7 Esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  en el murete de 15 cm de espesor

Los esfuerzos de compresión y de cortante sobre la junta horizontal están asociados a la falla por deslizamiento observada en los muretes de mampostería. Los esfuerzos

principales de tensión observados en el centro del murete están asociados a la falla por tensión diagonal.

#### 4.1.2 Análisis de la distribución de esfuerzos

Se analizó la distribución de esfuerzos en el murete en preparación a los análisis no lineales del Método del Elemento Finito. En la Figura 4.8 se presenta la localización de las partículas estudiadas en la junta de la hilada superior y en el centro del murete. Los esfuerzos principales de una partícula localizada en la junta horizontal de la hilada superior se presentan en la figura 4.9 (a), mientras que los esfuerzos en los ejes locales  $x'y'$  se presentan en la Figura 4.9 (b). Se observa que las juntas están sometidas a esfuerzos de compresión y de cortante (en ejes locales  $x'y'$ ). Por otra parte, los esfuerzos principales de una partícula localizada en una junta en la zona central del murete se presentan en la Figura 4.10 (a), mientras que los esfuerzos en ejes locales  $x'y'$  se presentan Figura 4.10 (b). Se observa que los esfuerzos son de compresión y de cortante (en ejes locales  $x'y'$ ). En los ensayos experimentales de muretes con piezas fuertes y juntas débiles se observa que la falla se produce en la junta. Los análisis computacionales indican que en los esfuerzos cortantes en las juntas horizontales producen la falla por deslizamiento; sin embargo, se observa que al centro del murete no hay esfuerzos de tensión en las juntas, por lo tanto, la falla por tensión diagonal también está asociada a la falla por esfuerzos cortantes.

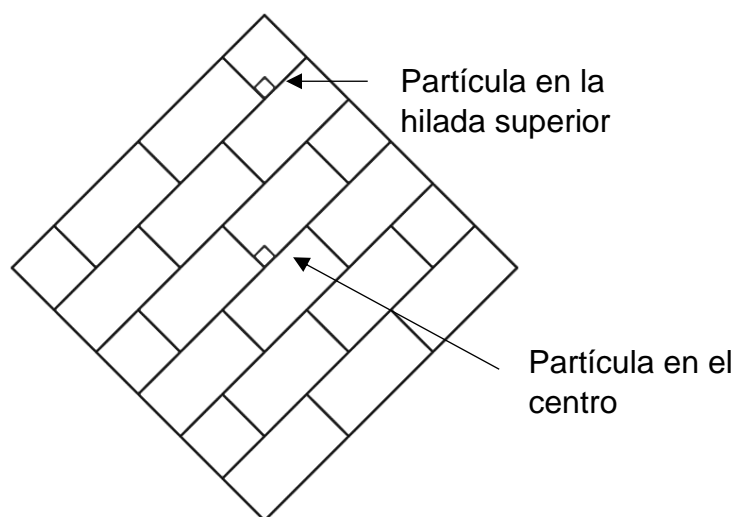


Figura 4.8 Localización de partículas analizadas en el murete

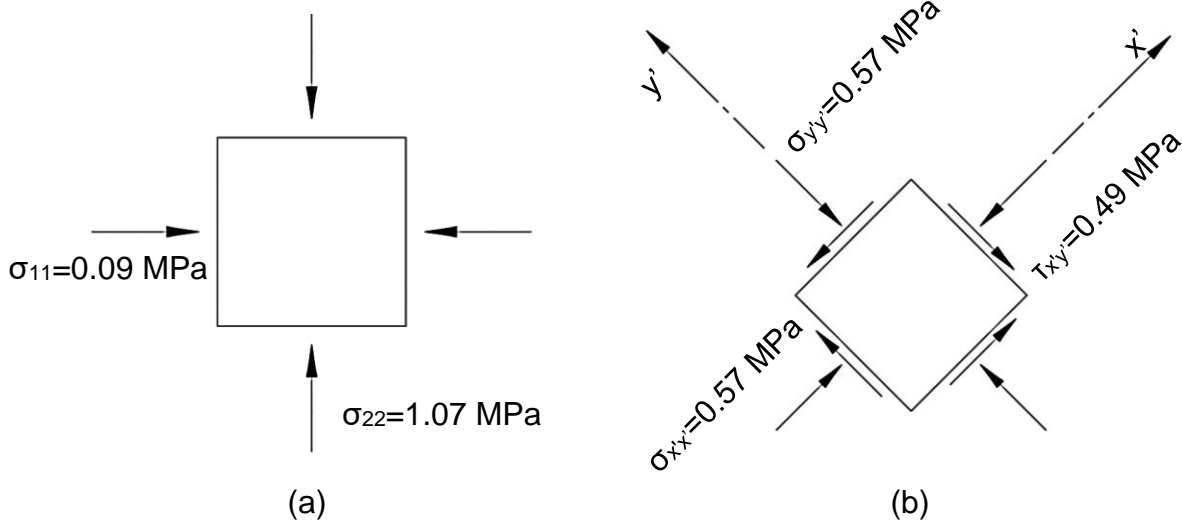


Figura 4.9 Esfuerzos en una partícula en hilada superior del murete

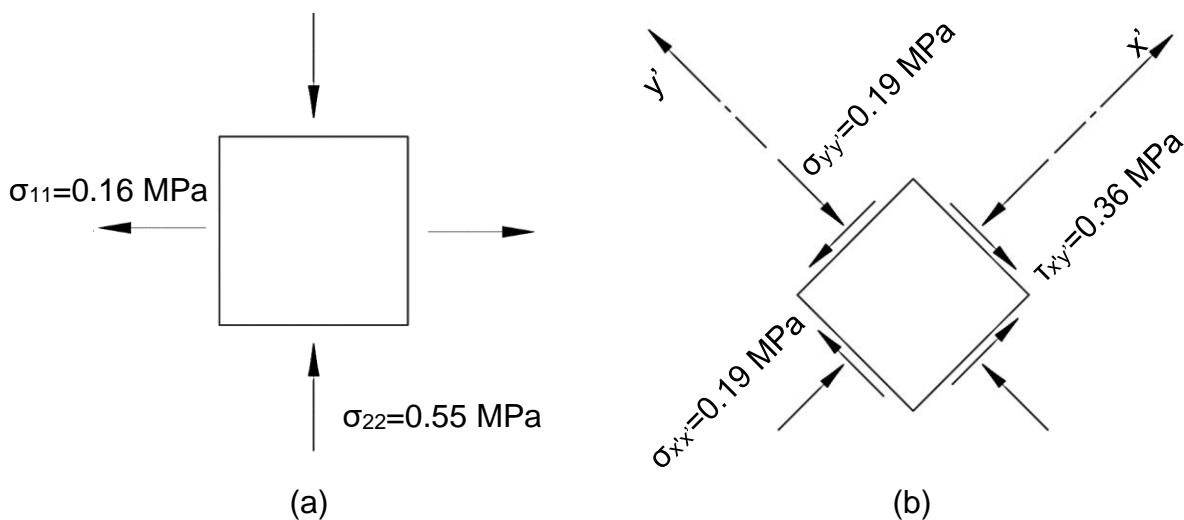
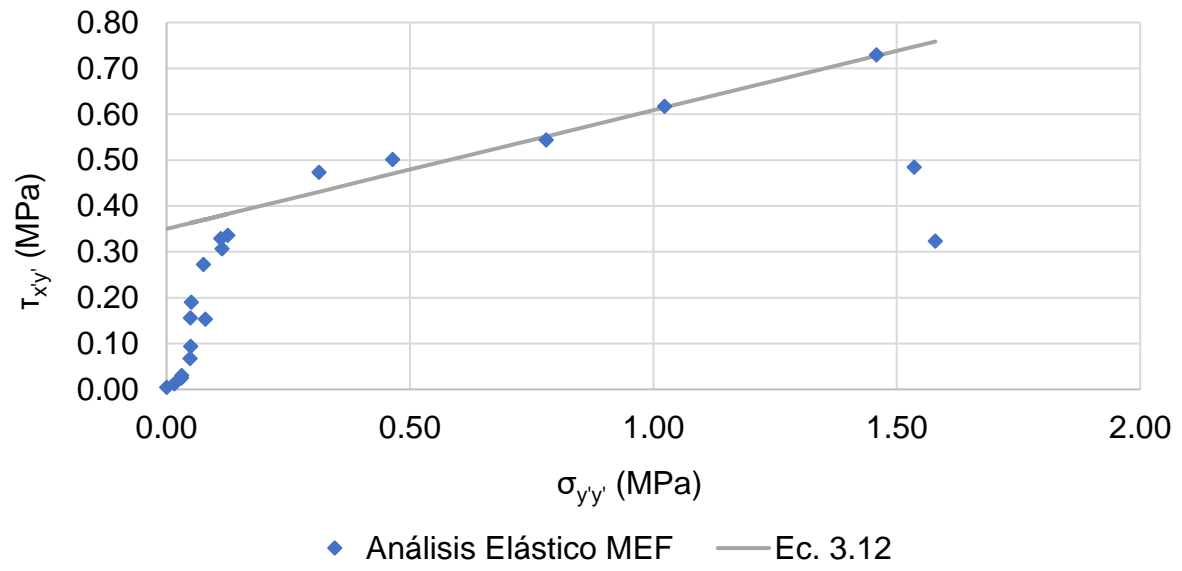


Figura 4.10 Esfuerzos en una partícula en el centro del murete

En la Figura 4.11 se grafican los esfuerzos en ejes locales en las juntas horizontales de la hilada superior del murete. Adicionalmente, se grafica la Ecuación (3.10), correspondiente al Modelo de Mohr-Coulomb modificado para la junta horizontal considerando un valor de la cohesión de 0.35 MPa y un valor del ángulo de fricción interna  $\varphi$  (Ecuación 3.13) de  $14.5^\circ$ .

Figura 4.11 Curva  $\tau_{x'y'} - \sigma_{y'y'}$

## 4.2 Modelos no lineales de muretes de mampostería

### 4.2.1 Modelo 1 (Modelo de interfaz friccionante)

Se modeló un murete de mampostería de 150 mm de espesor con un valor de cohesión de 0.24 MPa para las juntas horizontales y 0.67 MPa para las juntas verticales, el valor del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fue de  $14.5^\circ$  para las juntas horizontales y de  $36^\circ$  para las juntas verticales. Los valores de las juntas horizontales y verticales se relacionan a través de las ecuaciones 3.11 - 3.12. La carga máxima obtenida como resultado del análisis es de 71.85 kN (7326 kg) la cual aproxima la carga máxima promedio reportada por Marín (2008) de 7287 kg. En la figura 4.12 se presenta la curva carga-desplazamiento del modelo 1.

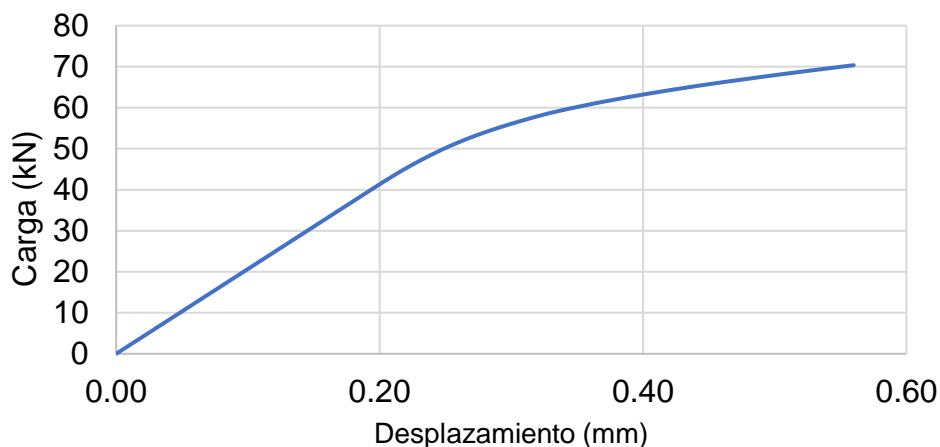


Figura 4.12 Curva carga-desplazamiento del modelo 1

En las figuras 4.13 – 4.15 se grafican las tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, asociados a distintos niveles de carga. Las tracciones corresponden a los esfuerzos normales ( $\sigma_{y'y'}$ ) y esfuerzos cortantes ( $\tau_{x'y'}$ ) en la superficie de la interfaz. Adicionalmente, se grafica una línea de referencia correspondiente a la resistencia dada por el modelo de Mohr-Coulomb (Ec. 3.10). En la figura 4.13 se presentan las tracciones cuando el murete tiene un comportamiento elástico (sin grietas), para un desplazamiento del apoyo superior de 0.10 mm. En la figura 4.14 se presentan las tracciones cuando inicia el agrietamiento en el murete,

para un desplazamiento del apoyo superior de 0.25 mm. En la figura 4.15 se presentan las tracciones cuando se ha desarrollado la grieta, antes de alcanzar la carga máxima, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.55 mm.

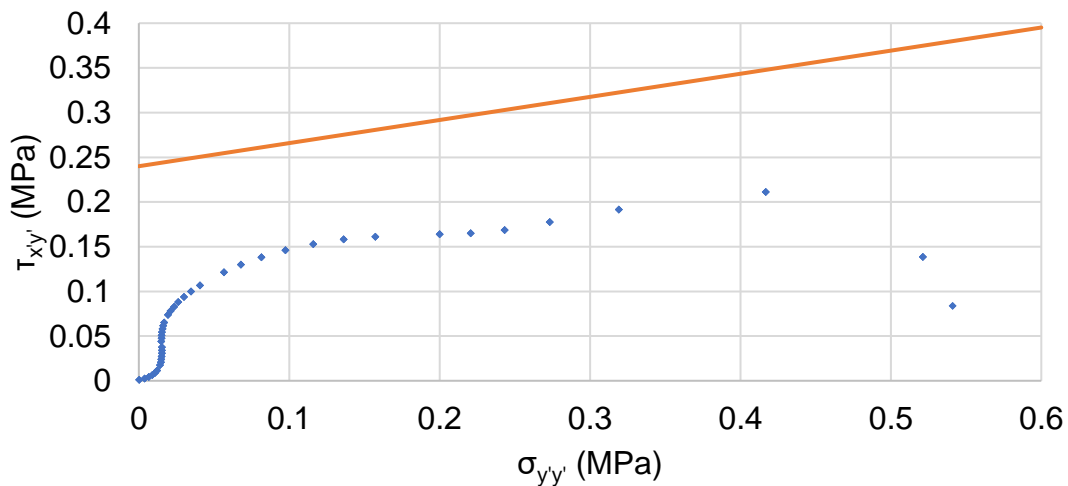


Figura 4.13 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

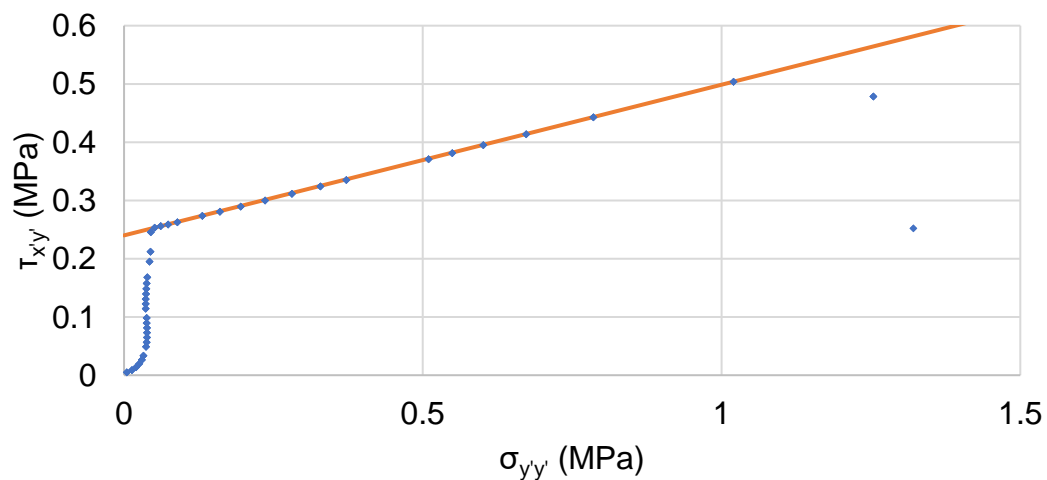


Figura 4.14 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.25 mm

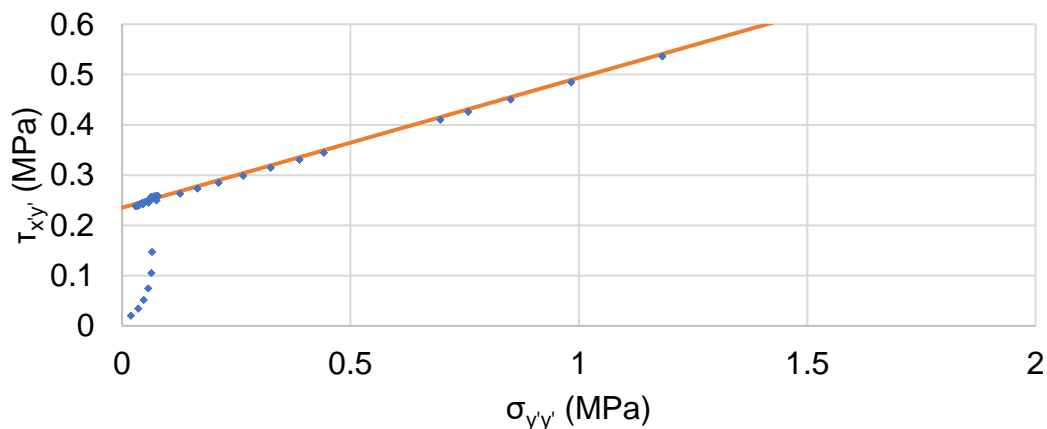
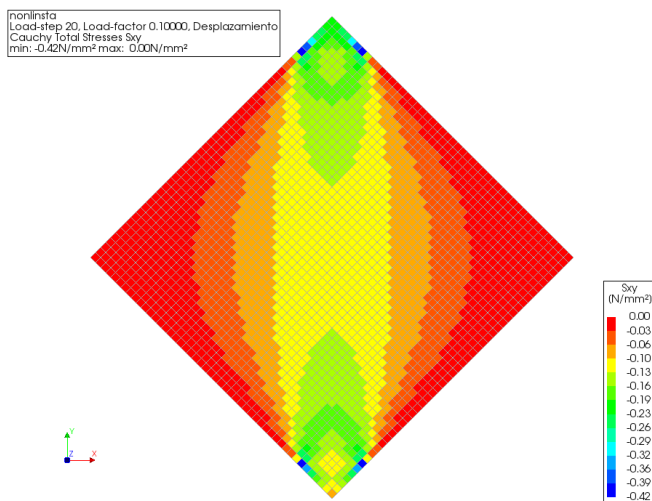


Figura 4.15 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.55 mm

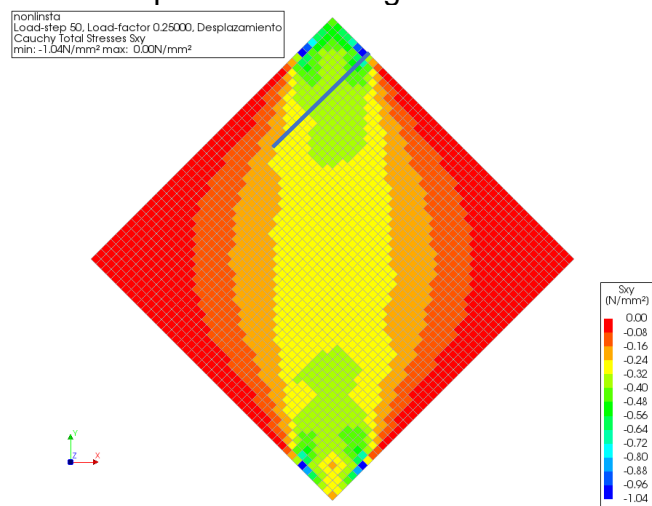
En la figura 4.13 el murete está en el intervalo elástico, los esfuerzos cortantes presentan valores inferiores a la resistencia de la junta. En la figura 4.14 ha iniciado el proceso de agrietamiento, hay valores de esfuerzos cortantes que han alcanzado la resistencia de la junta. En la figura 4.15 el murete está próximo a la condición de falla, la mayoría de los valores de esfuerzos cortantes han alcanzado la resistencia de la junta.

En la figura 4.16 se grafica la distribución de esfuerzos cortantes en ejes locales a las juntas ( $\tau_{xy}$ ), asociados a los distintos niveles de carga analizados previamente. En esta figura se grafica con una línea continua de color azul la posición de la grieta. El inicio del agrietamiento ocurre en el borde del murete posteriormente el agrietamiento se extiende a lo largo de toda la junta. En la figura 4.17 se grafica la deformada del murete para un nivel de carga próximo a la carga última.

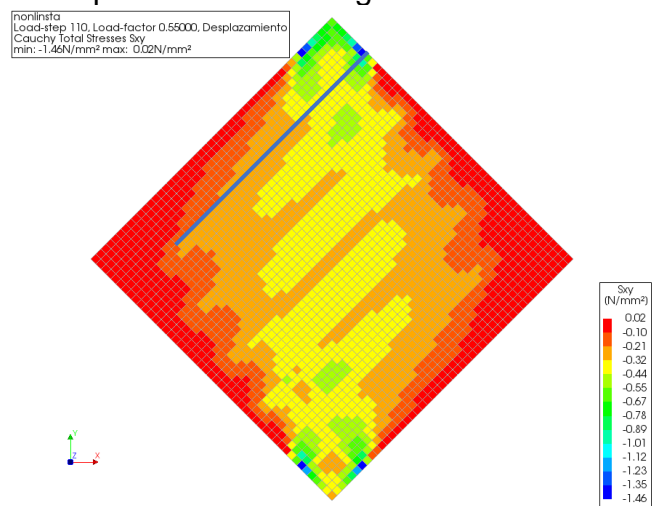




Etapa elástica sin agrietamiento



Etapa de transición: agrietamiento inicial



Etapa inelástica: agrietamiento en la mayor parte de la hilada superior  
Figura 4.16 Distribución de esfuerzos cortantes en el murete

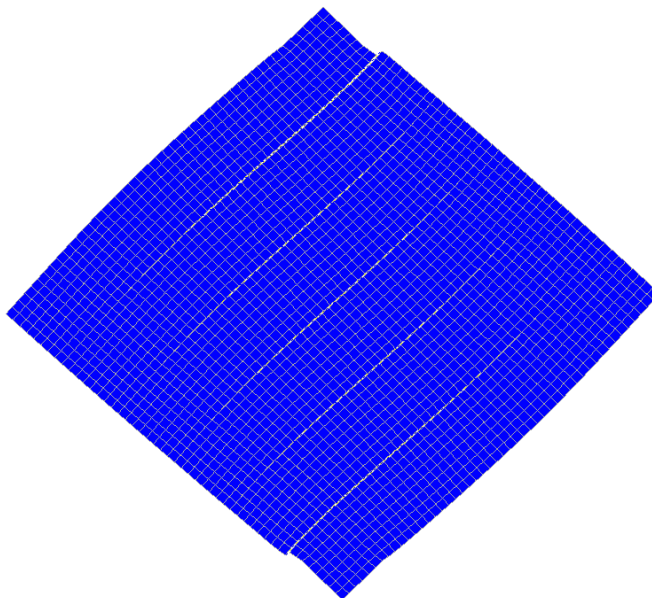


Figura 4.17 Deformada del modelo 1 previa a la carga máxima

#### 4.2.2 Modelo 2 (Modelo de interfaz compuesto sin juntas verticales)

Se modeló un murete de mampostería de 150 mm de espesor con un valor de cohesión de 0.29 MPa para las juntas horizontales, las juntas verticales no se modelaron, el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fue de  $14.5^\circ$ . La carga máxima obtenida como resultado del análisis es de 71.68 kN (7308 kg) la cual aproxima la carga máxima promedio reportada por Marín (2008) de 7287 kg. En la figura 4.18 se presenta la curva carga-desplazamiento del modelo 2.

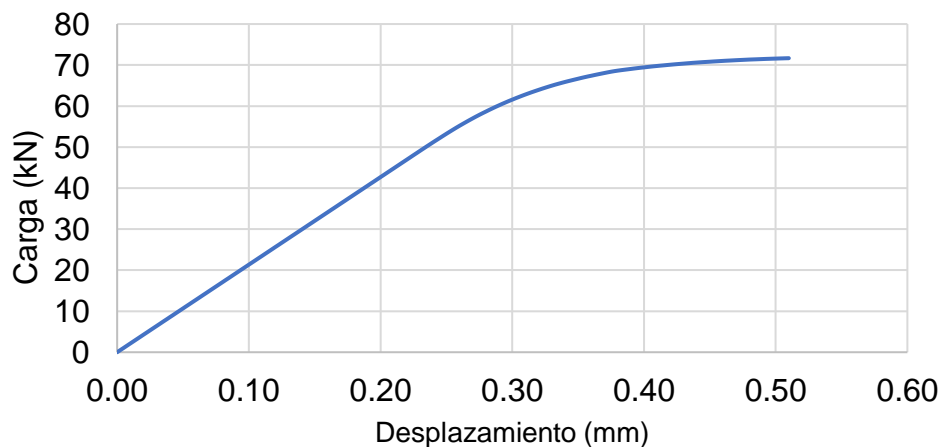


Figura 4.18 Curva carga-desplazamiento del modelo 2

En las figuras 4.19 – 4.21 se grafican las tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, asociados a distintos niveles de carga. Las tracciones corresponden a los esfuerzos normales ( $\sigma_{xy}$ ) y esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}$ ) en la superficie de la interfaz. Adicionalmente, se grafica una línea de referencia correspondiente a la resistencia dada por el modelo de Mohr-Coulomb. En la figura 4.19 se presentan las tracciones cuando el murete tiene un comportamiento elástico (sin grietas), para un desplazamiento del apoyo superior de 0.10 mm. En la figura 4.20 se presentan las tracciones cuando inicia el agrietamiento en el murete, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.30 mm. En la figura 4.21 se presentan las tracciones cuando se ha desarrollado la grieta, antes de alcanzar la carga máxima, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.50 mm.

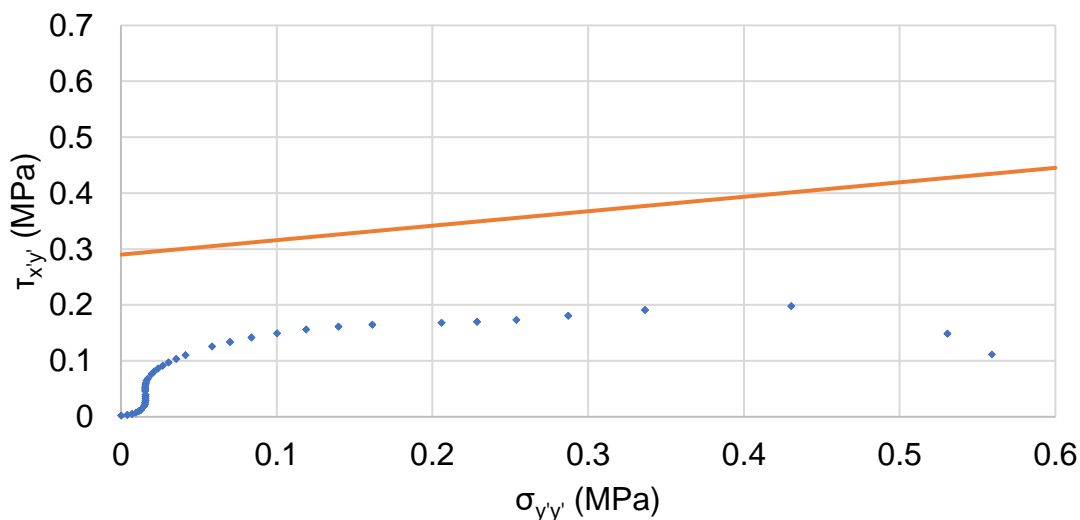


Figura 4.19 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

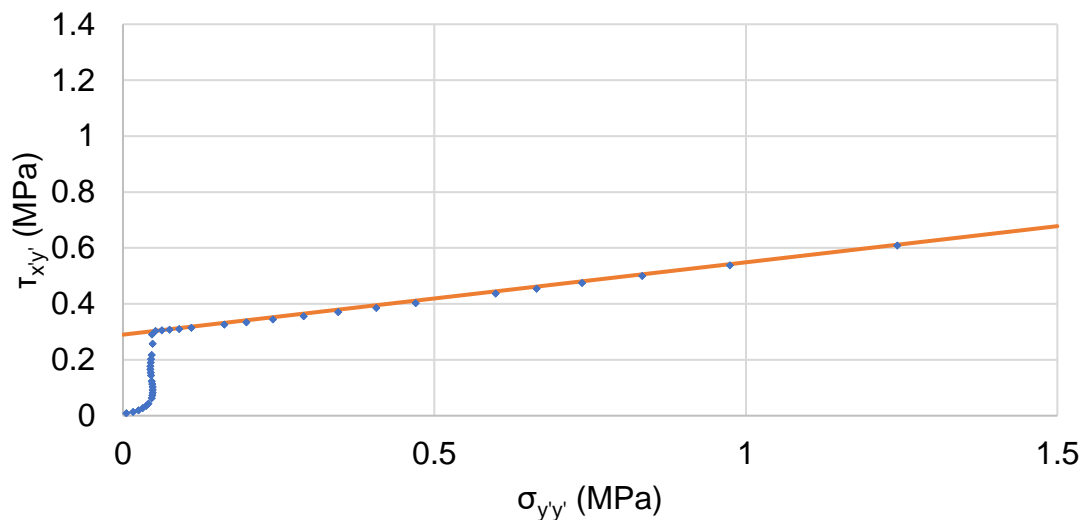


Figura 4.20 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm

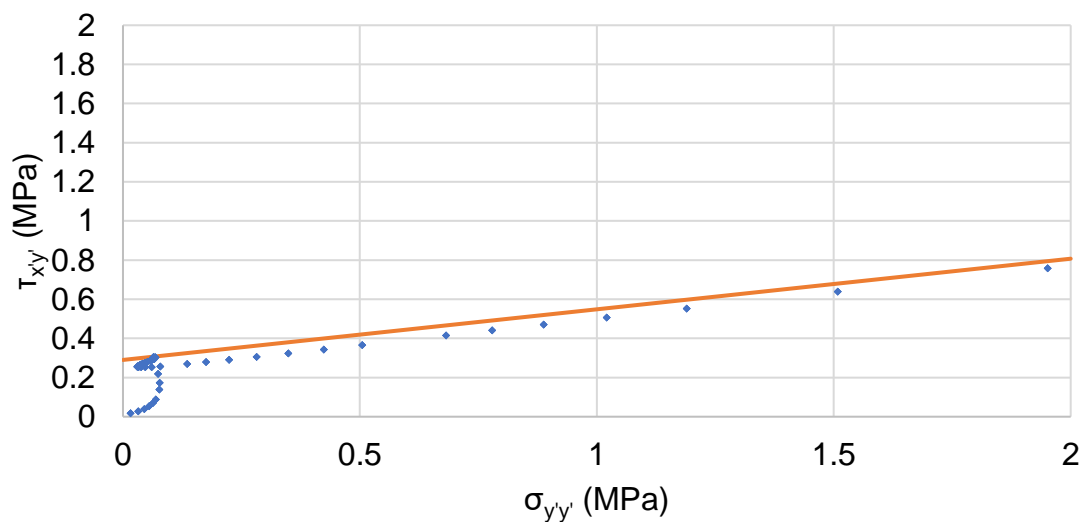


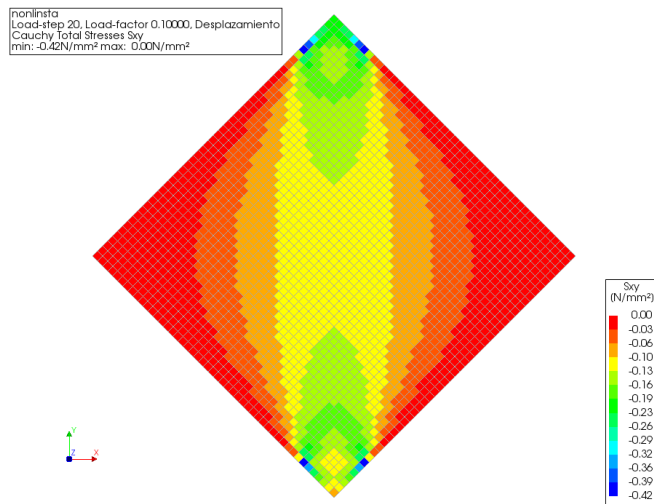
Figura 4.21 Tracciones en la junta horizontal de la hilada superior del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm

En la figura 4.19 el murete está en el intervalo elástico, los esfuerzos cortantes presentan valores inferiores a la resistencia de la junta. En la figura 4.20 ha iniciado el proceso de agrietamiento, hay valores de esfuerzos cortantes que han alcanzado la

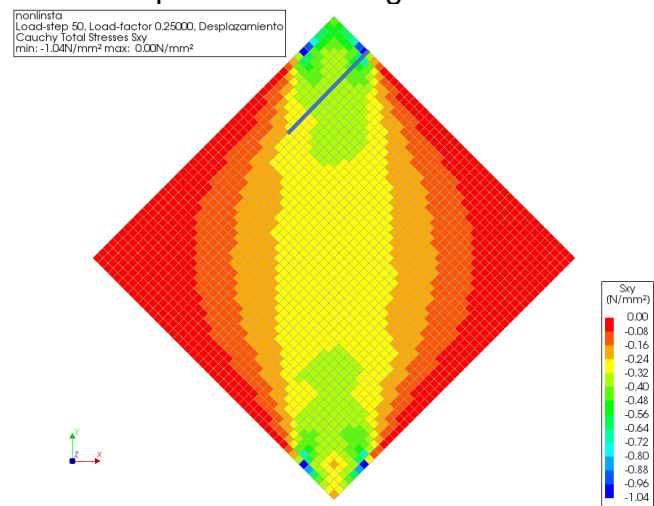
resistencia de la junta. En la figura 4.21 el murete está próximo a la condición de falla, la mayoría de los valores de esfuerzos cortantes han alcanzado la resistencia de la junta. La superficie de falla en este caso es la superficie de falla reducida debido a la deformación plástica presente en las juntas del murete en este estado de carga.

En la figura 4.22 se grafican la distribución de esfuerzos cortantes en ejes locales a las juntas ( $\tau_{xy}$ ), asociados a los distintos niveles de carga analizados previamente. En esta figura se grafica con una línea continua de color azul la posición de la grieta. La distribución de esfuerzos en la etapa elástica es similar a la distribución observada en el modelo 1. El inicio del agrietamiento ocurre en el borde, posteriormente el agrietamiento se extiende a lo largo de toda la junta. Se observa el mecanismo de falla por deslizamiento de la última hilada de bloques.

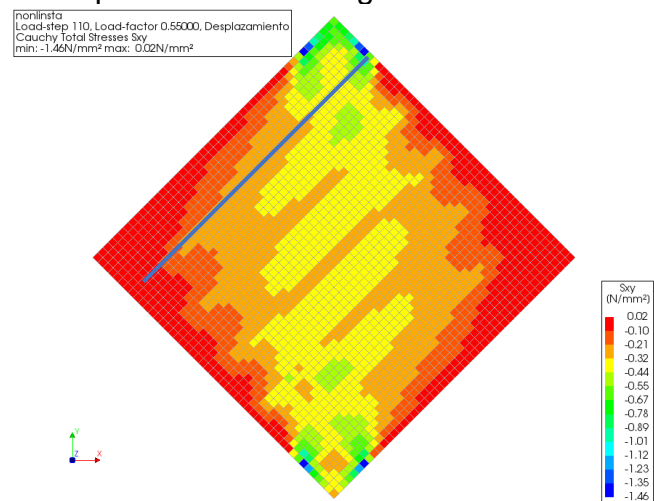
En la figura 4.23 se grafica la deformada del murete para un nivel de carga próximo a la carga última.



Etapa elástica sin agrietamiento



Etapa de transición: agrietamiento inicial



Etapa inelástica: agrietamiento en la mayor parte de la primera hilada

Figura 4.22 Distribución de esfuerzos cortantes en el murete

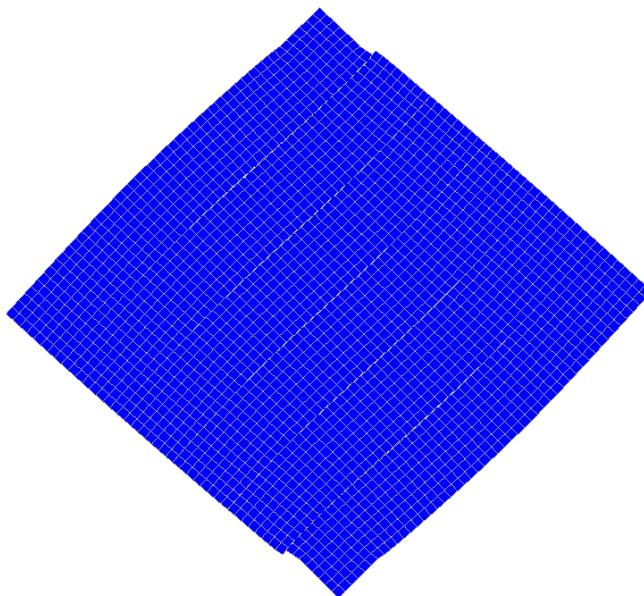


Figura 4.23 Deformada del modelo 2 previa a la carga máxima

#### 4.2.3 Modelo 3 (Modelo de interfaz compuesto con juntas verticales y horizontales)

Se modeló un murete de mampostería de 150 mm de espesor con un valor de cohesión de 0.29 MPa para las juntas horizontales y 0.81 MPa para las juntas verticales, el valor del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fue de  $14.5^\circ$  para las juntas horizontales y de  $36^\circ$  para las juntas verticales. Se consideró un valor de resistencia a la tensión de 0.13 MPa para la junta horizontal y de 0.36 para la junta vertical (Flores, 2008). La carga máxima obtenida como resultado del análisis es de 71.17 kN (7257 kg) la cual aproxima la carga máxima promedio reportada por Marín (2008) de 7287 kg. En la figura 4.24 se presenta la curva carga-desplazamiento del modelo 3.

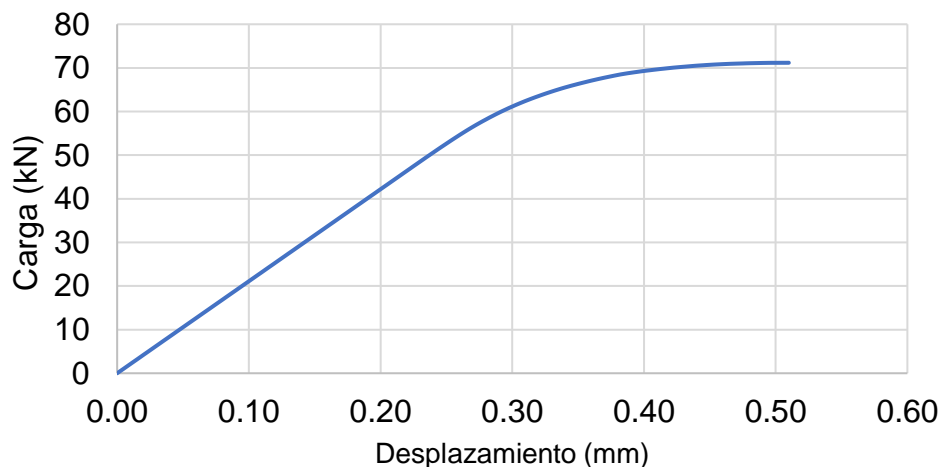


Figura 4.24 Curva carga-desplazamiento del modelo 3

En las figuras 4.25 – 4.30 se grafican las tracciones en las juntas horizontales y verticales del murete en las cuales aparece la falla, asociados a distintos niveles de carga. Las tracciones corresponden a los esfuerzos normales ( $\sigma_{yy}$ ) y esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}$ ) en la superficie de la interfaz. Adicionalmente, se grafica una línea de referencia correspondiente a la resistencia dada por el modelo de Mohr-Coulomb. En las juntas verticales se observó que la falla está asociada la tensión y se grafica una línea de referencia correspondiente a la máxima resistencia a la tensión. En la figura 4.25 y 4.26 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando el murete tiene un comportamiento elástico (sin grietas), para un desplazamiento del apoyo superior de 0.10 mm. En la figura 4.27 y 4.28 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando inicia el agrietamiento en el murete, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.33 mm. En la figura 4.29 y 4.30 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando se ha desarrollado la grieta, antes de alcanzar la carga máxima, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.50 mm. Las tracciones en las juntas tienen valores inferiores a los máximos posibles debido a la reducción de la capacidad de la junta ocasionada por la deformación plástica en este estado de carga.



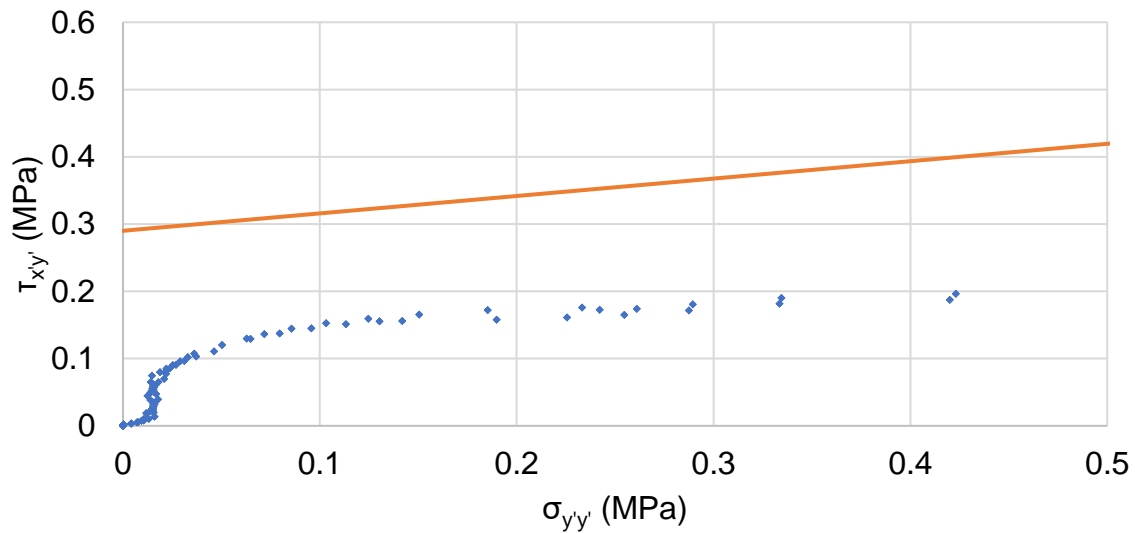


Figura 4.25 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

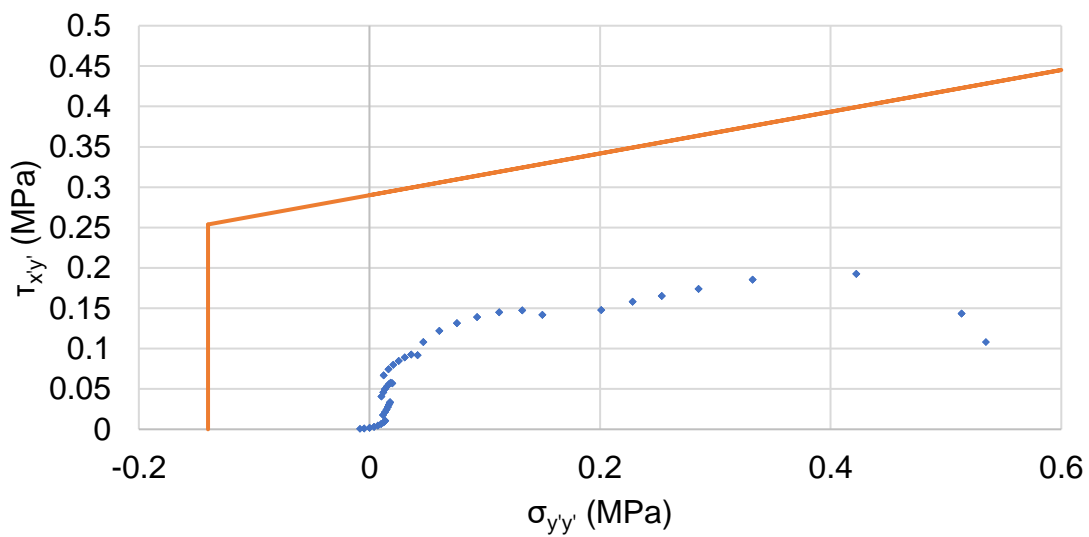


Figura 4.26 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

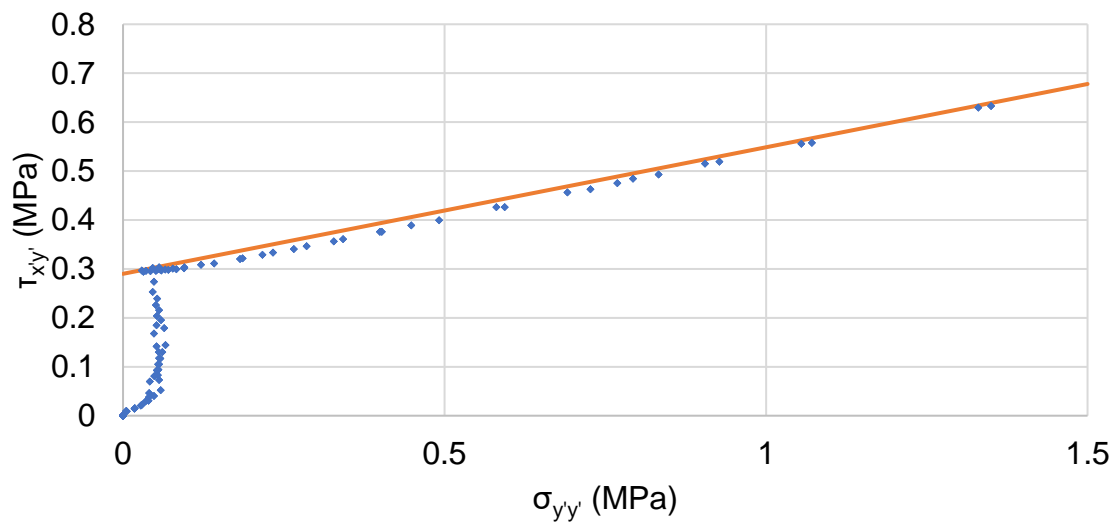


Figura 4.27 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.33 mm

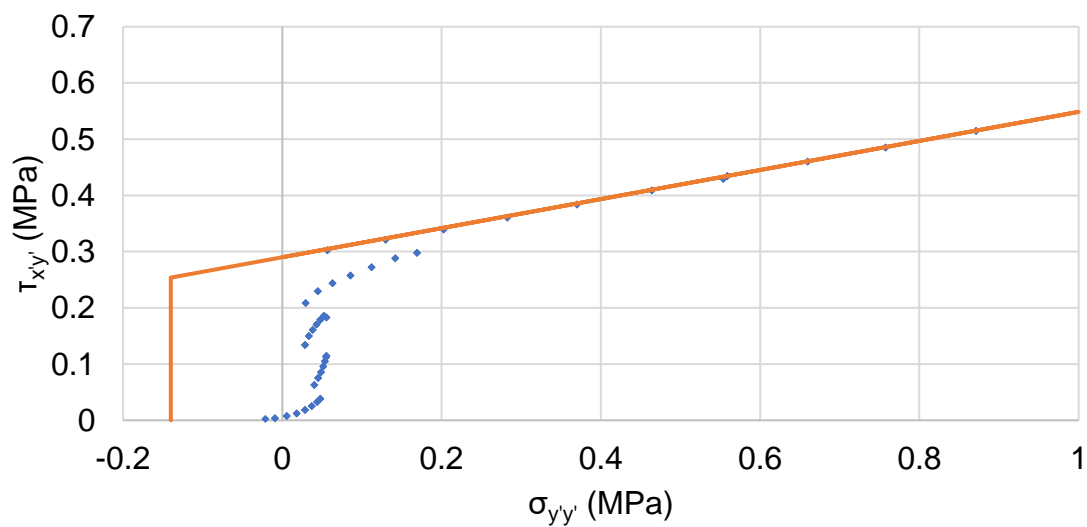


Figura 4.28 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.33 mm

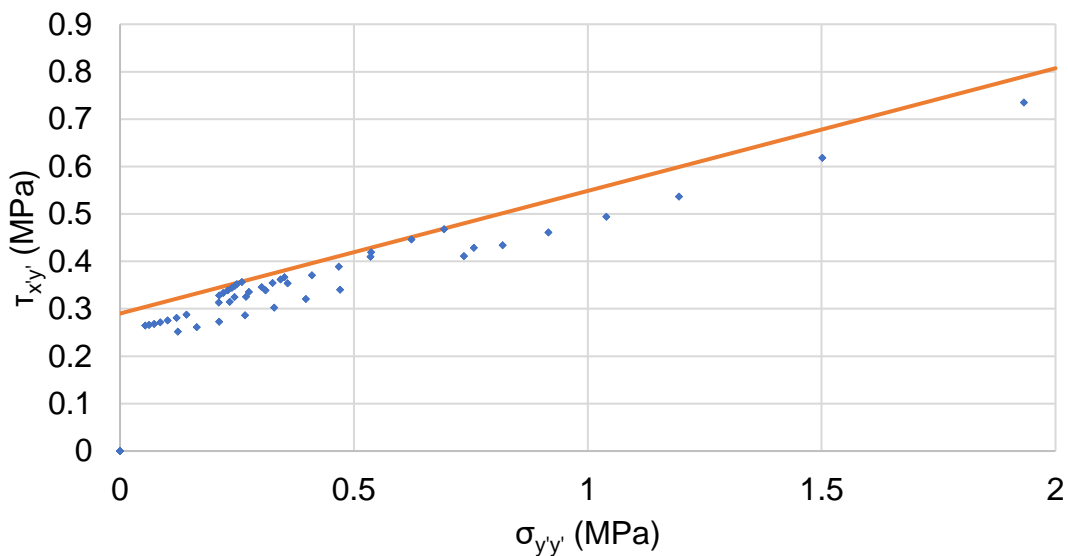


Figura 4.29 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm

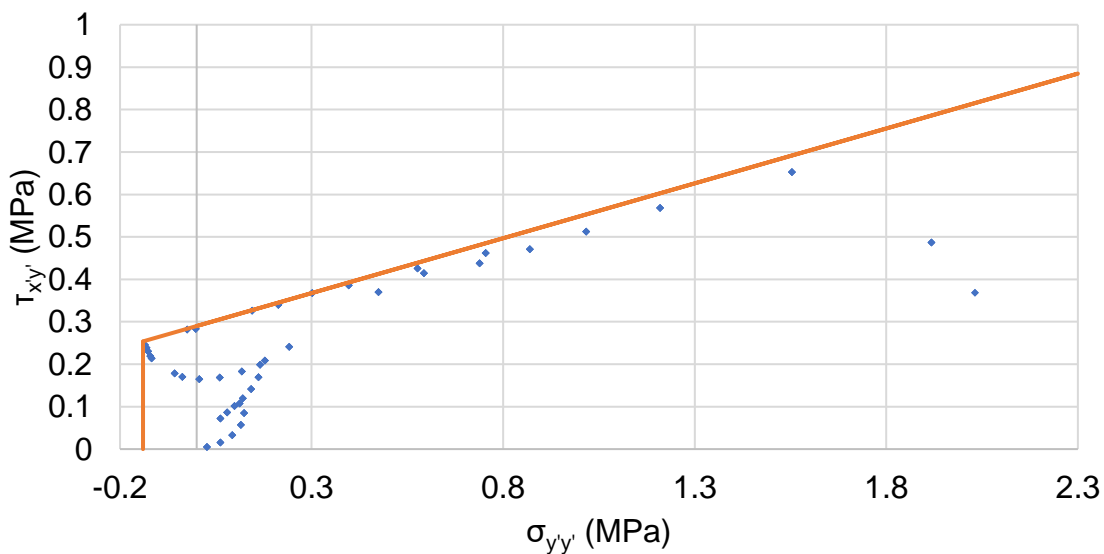
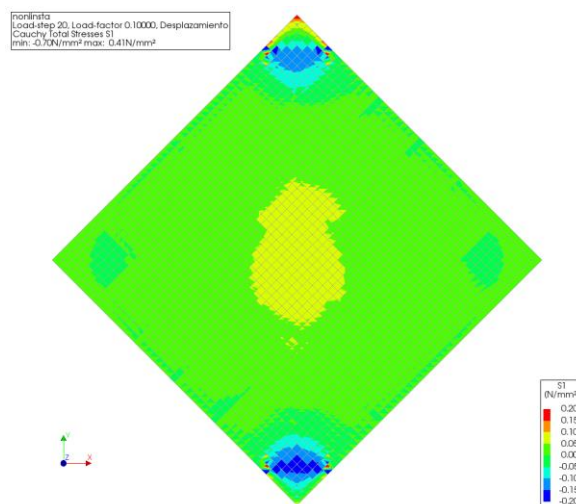


Figura 4.30 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.50 mm

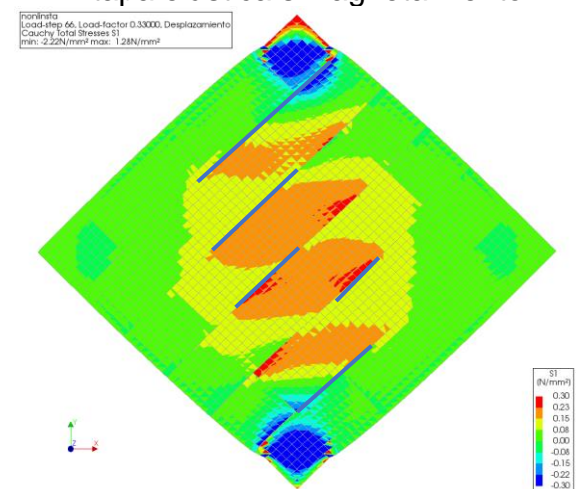
En la figura 4.31 se grafican la distribución de esfuerzos principales en el murete, asociados a los distintos niveles de carga analizados previamente. En esta figura se grafica con una línea continua de color azul la posición de la grieta. El inicio del

agrietamiento ocurre en las juntas horizontales de la última hilada del murete. Posteriormente se presenta el agrietamiento de las juntas horizontales de la zona central del murete. En la etapa inelástica aparece agrietamiento en algunas juntas verticales el cual es originado por esfuerzos de tensión normales a la junta. El mecanismo de falla final no se observa ya que la junta vertical en el centro del murete permanece conectada debido que se presentan esfuerzos de compresión sobre la junta y no se alcanza la superficie de falla.

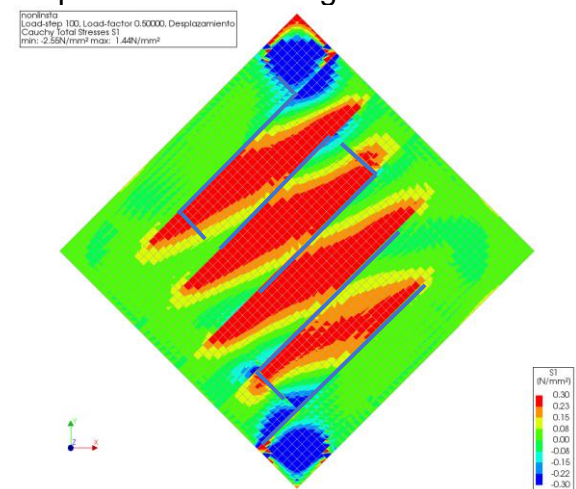
En la figura 4.32 se grafica la deformada del murete en la carga máxima.



Etapa elástica sin agrietamiento



Etapa de transición: agrietamiento inicial



Etapa inelástica: agrietamientos en las juntas

Figura 4.31 Distribución de esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  en el murete

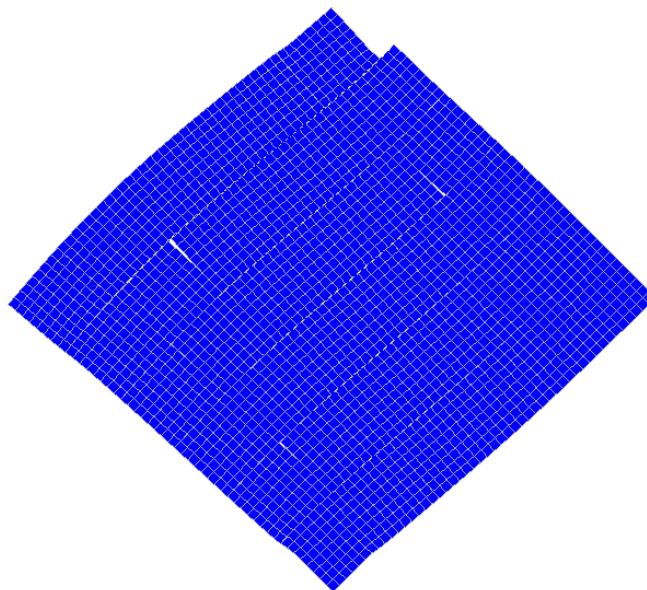


Figura 4.32 Deformada del modelo 3 en la carga máxima

#### 4.2.4 Modelo 4 (Modelo de interfaz compuesto con juntas verticales y horizontales)

Se modeló un murete de mampostería de 150 mm de espesor con un valor de cohesión de 0.23 MPa para las juntas horizontales y un valor de cohesión de 0.23 para las juntas verticales, el ángulo de fricción interna ( $\varphi$ ) fue de  $36^\circ$ . Para ambas juntas se consideró un valor de resistencia a la tensión de 0.36 MPa (Flores, 2008). La carga máxima obtenida como resultado del análisis es de 71.6 kN (7305 kg) la cual aproxima la carga máxima promedio reportada por Marín (2008) de 7287 kg. En la figura 4.33 se presenta la curva carga-desplazamiento del modelo 4.

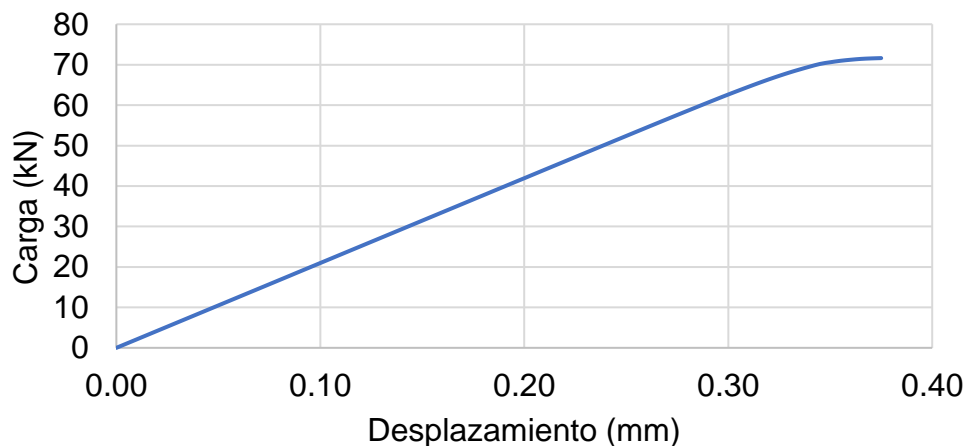


Figura 4.33 Curva carga-desplazamiento del modelo 4

En las figuras 4.34 – 4.37 se grafican las tracciones en las juntas horizontales y verticales del murete en las cuales aparece la falla, asociados a distintos niveles de carga. Las tracciones corresponden a los esfuerzos normales ( $\sigma_{yy}$ ) y esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}$ ) en la superficie de la interfaz. Adicionalmente, se grafica una línea de referencia correspondiente a la resistencia dada por el modelo de Mohr-Coulomb. El inicio del agrietamiento ocurrió en un desplazamiento muy cercano al desplazamiento asociado a la carga máxima por lo cual solo se graficaron las tracciones correspondientes al comportamiento elástico y a la carga máxima. En la figura 4.34 y 4.35 se presentan las tracciones cuando el murete tiene un comportamiento elástico (sin grietas), para un desplazamiento del apoyo superior de 0.20 mm. En la figura 4.36 y 4.37 se presentan las tracciones cuando se ha desarrollado la grieta, antes de alcanzar la carga máxima, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.375 mm.

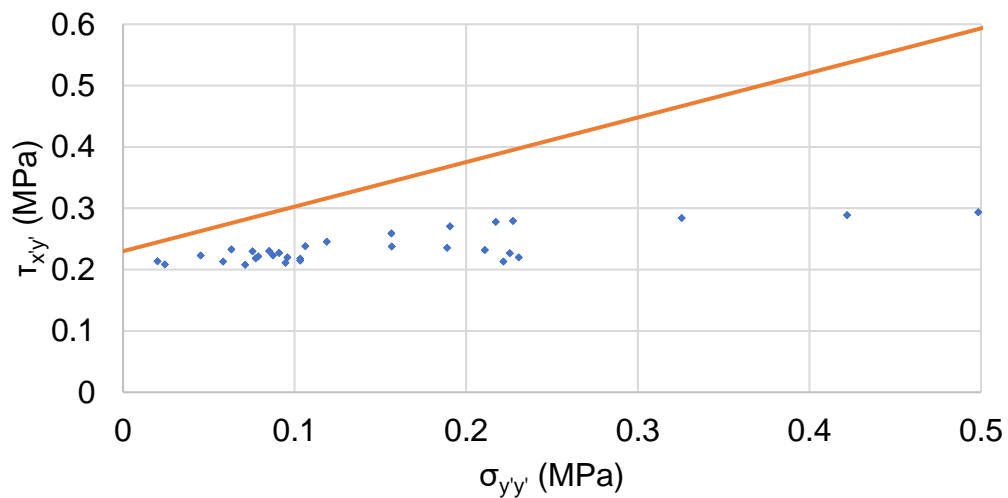


Figura 4.34 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.20 mm

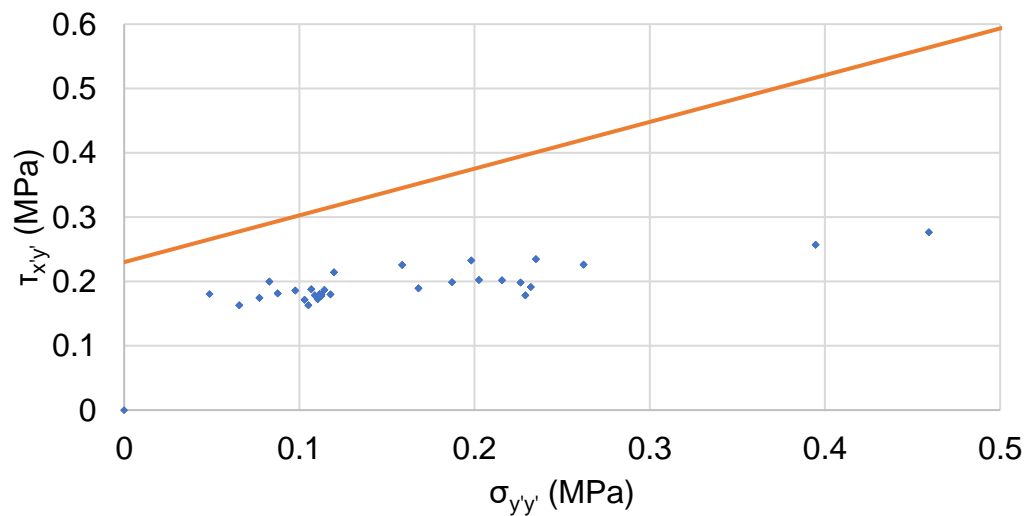


Figura 4.35 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.20 mm



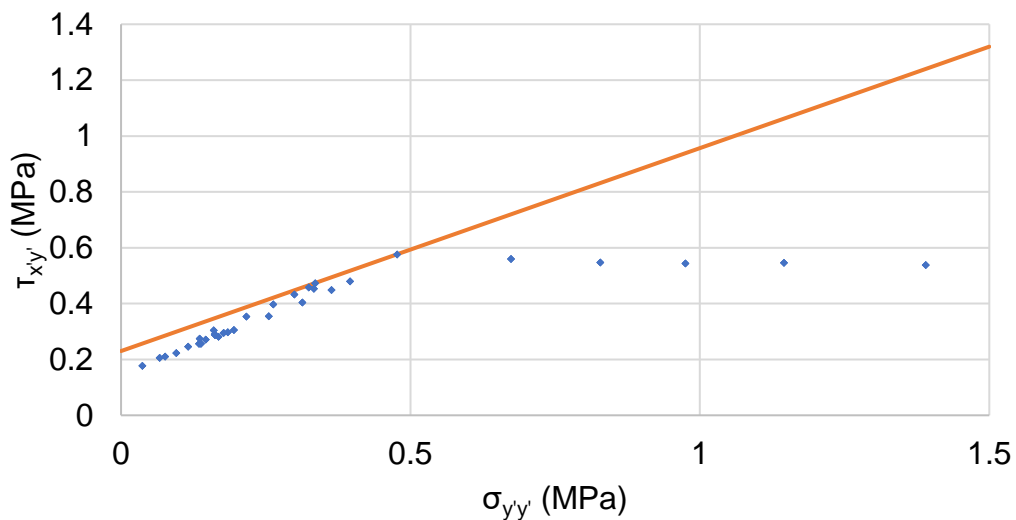


Figura 4.36 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.375 mm

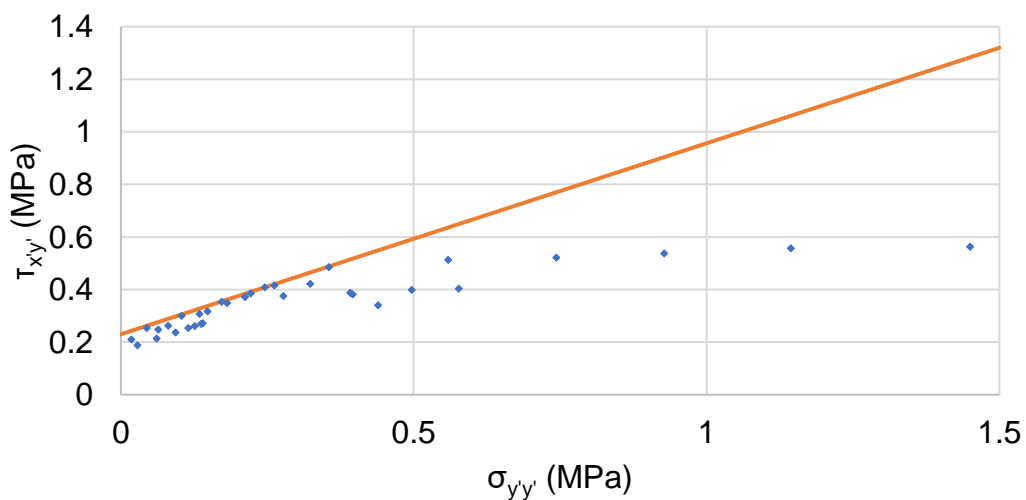
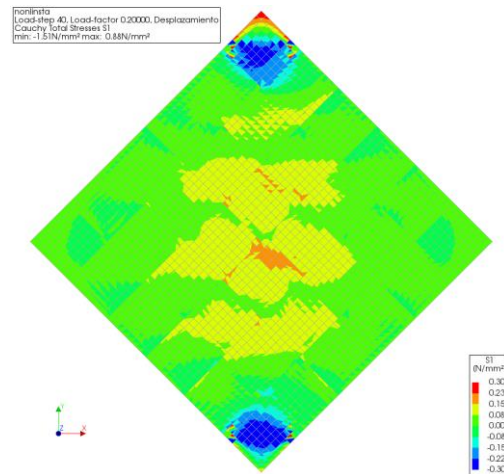


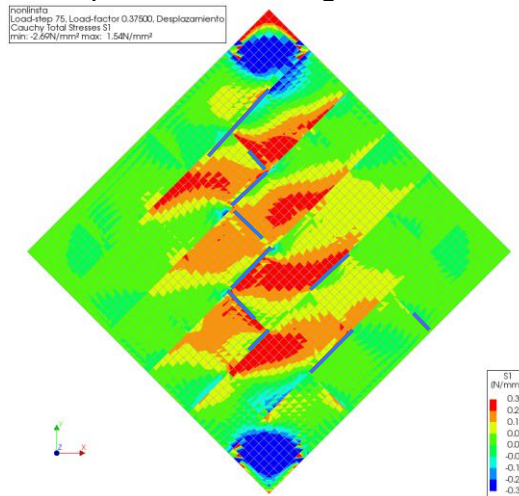
Figura 4.37 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.375 mm

En la figura 4.38 se grafican la distribución de esfuerzos principales en el murete, asociados a los distintos niveles de carga analizados previamente. En esta figura se grafica con una línea de color azul la posición de la grieta. El inicio del agrietamiento ocurre en las juntas horizontales en la zona central del murete. En la etapa inelástica aparece agrietamiento las juntas verticales de la zona central del murete el cual es

originado por cortante. En este murete es posible observar la aparición del mecanismo de falla por cortante diagonal. En la figura 4.39 se grafica la deformada del murete en un nivel de carga próximo a la carga máxima.



Etapa elástica sin agrietamiento



Etapa inelástica: agrietamientos en las juntas

Figura 4.38 Distribución de esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  en el murete

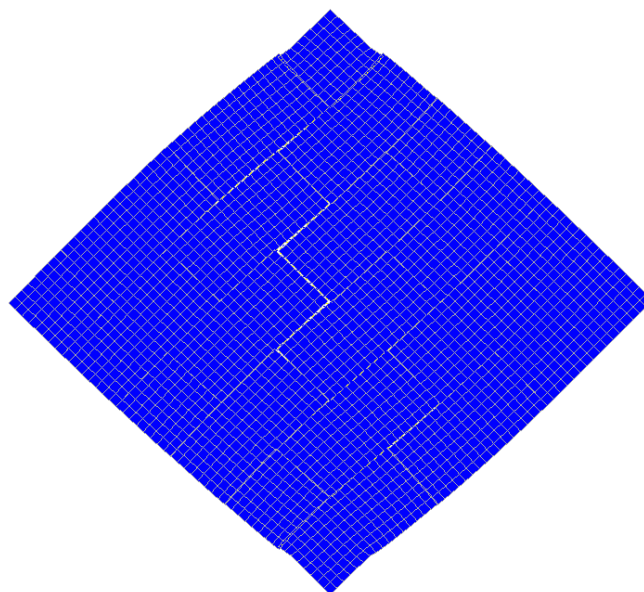


Figura 4.39 Deformada del modelo 4 previo a la carga máxima

#### 4.2.5 Modelo 5 (Modelo de interfaz compuesto sin juntas horizontales en el borde)

Se modeló un murete de mampostería de 150 mm de espesor con un valor de cohesión de 0.24 MPa para las juntas horizontales y 0.67 MPa para las juntas verticales, el valor del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fue de  $14.5^\circ$  para las juntas horizontales y de  $36^\circ$  para las juntas verticales. Se consideró un valor de resistencia a la tensión de 0.13 MPa para la junta horizontal y de 0.36 para la junta vertical (Flores, 2008). Se eliminaron las juntas horizontales en los extremos del murete. La carga máxima obtenida como resultado del análisis es de 70.81 kN (7220 kg) la cual aproxima la carga máxima promedio reportada por Marín (2008) de 7287 kg. En la figura 4.40 se presenta la curva carga-desplazamiento del modelo 5.

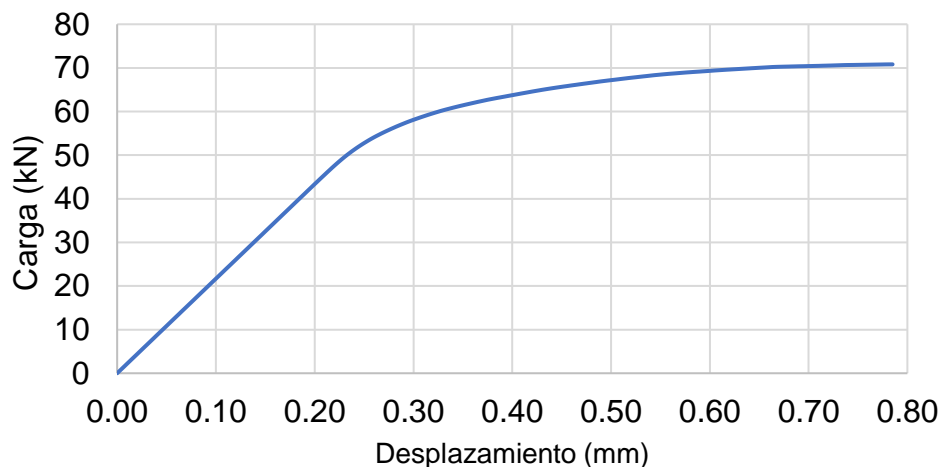


Figura 4.40 Curva carga-desplazamiento del modelo 5

En las figuras 4.41 – 4.46 se grafican las tracciones en las juntas horizontales y verticales del murete en las cuales aparece la falla, asociados a distintos niveles de carga. Las tracciones corresponden a los esfuerzos normales ( $\sigma_{yy}$ ) y esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}$ ) en la superficie de la interfaz. Adicionalmente, se grafica una línea de referencia correspondiente a la resistencia dada por el modelo de Mohr-Coulomb. En las juntas verticales se observó que la falla está asociada a la tensión y se grafica una línea de referencia correspondiente a la máxima resistencia a la tensión. En la figura 4.41 y 4.42 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando el murete tiene un comportamiento elástico (sin grietas), para un desplazamiento del apoyo superior de 0.10 mm. En la figura 4.43 y 4.44 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando inicia el agrietamiento en el murete, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.30 mm. En la figura 4.45 y 4.46 se presentan las tracciones en las juntas horizontales y verticales, respectivamente, cuando se ha desarrollado la grieta, antes de alcanzar la carga máxima, para un desplazamiento del apoyo superior de 0.77 mm.

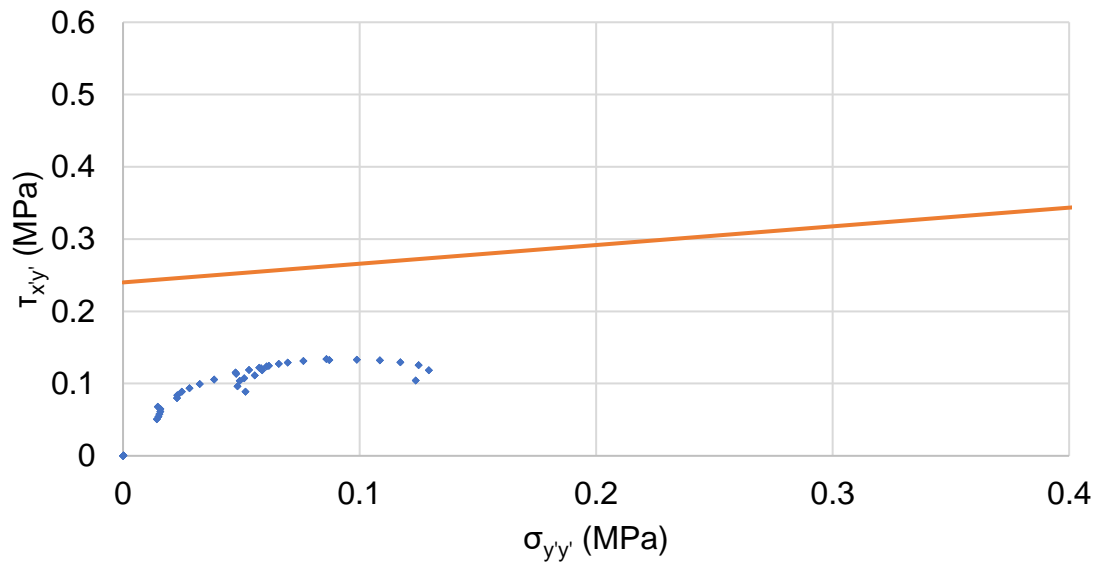


Figura 4.41 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

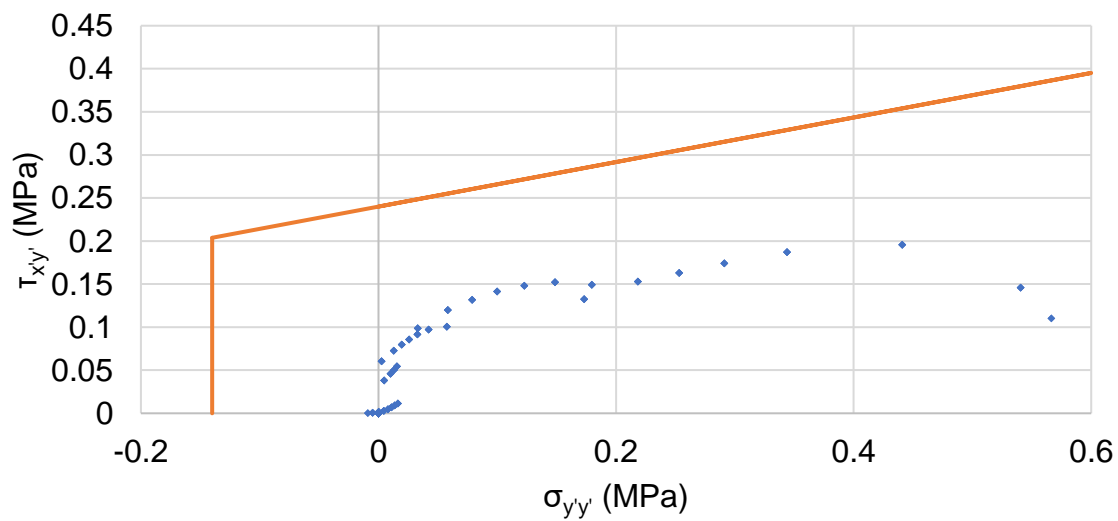


Figura 4.42 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.10 mm

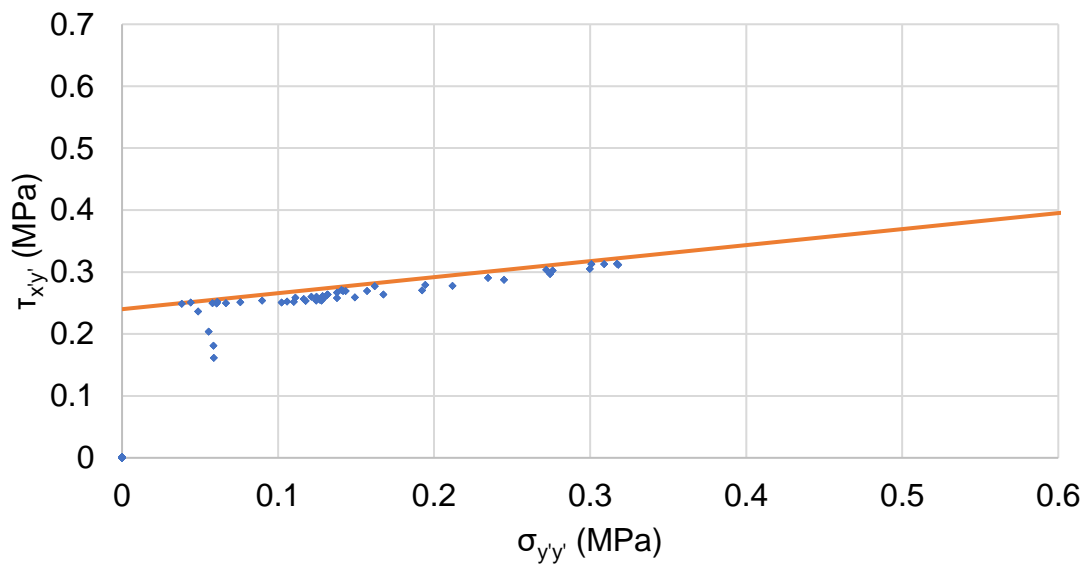


Figura 4.43 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm

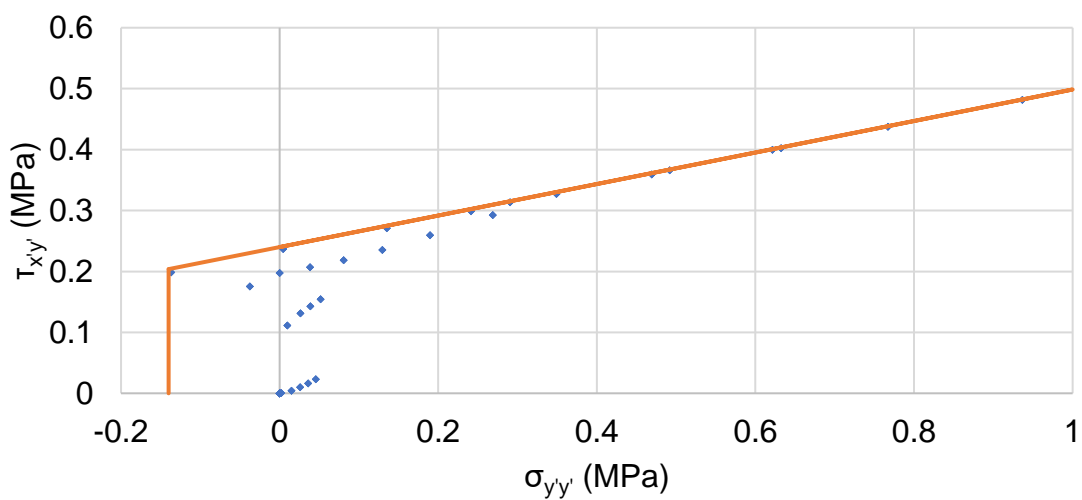


Figura 4.44 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.30 mm

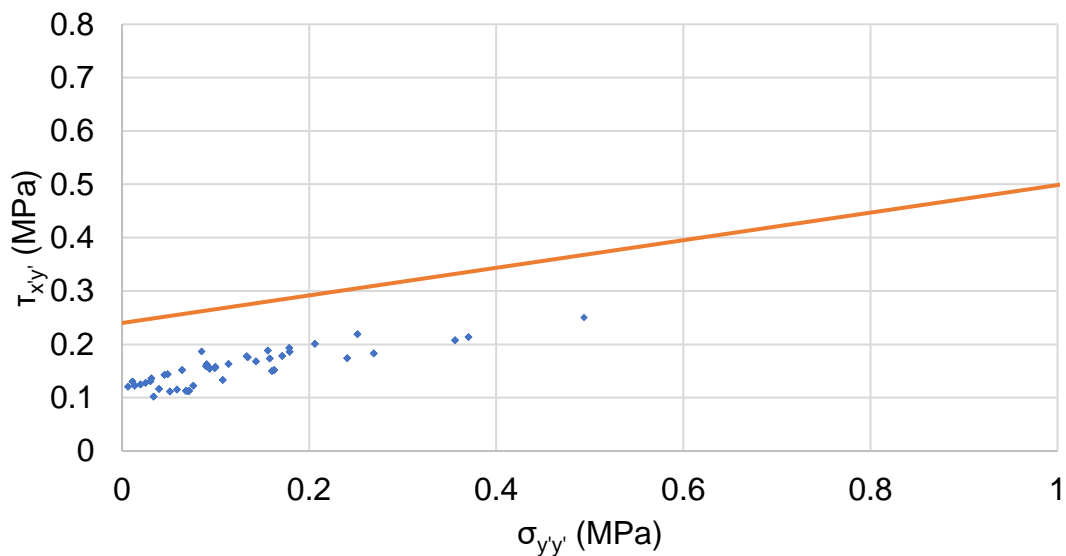


Figura 4.45 Tracciones en las juntas horizontales del murete, para un desplazamiento de 0.77 mm

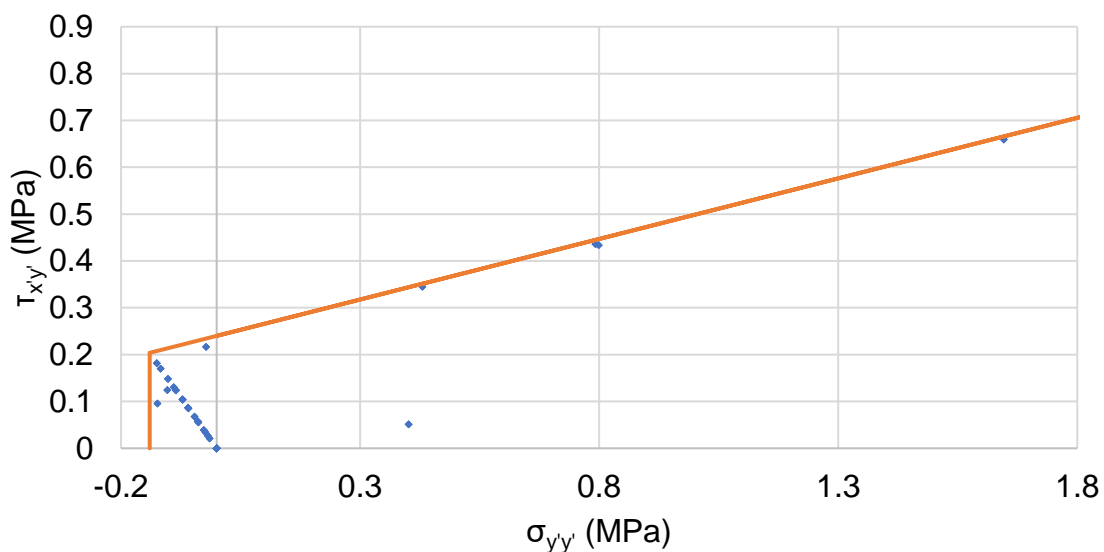


Figura 4.46 Tracciones en las juntas verticales del murete, para un desplazamiento de 0.77 mm

En la figura 4.47 se grafican la distribución de esfuerzos principales en el murete, asociados a los distintos niveles de carga analizados previamente. En esta figura se grafica con una línea continua de color azul la posición de la grieta. El inicio del

agrietamiento ocurre en las juntas horizontales en la zona central del murete. En la etapa inelástica aparece agrietamiento en algunas juntas verticales el cual es originado por esfuerzos de tensión normales a la junta. El agrietamiento en las juntas verticales es notable en las juntas cercanas al borde, en particular en el extremo de aplicación de la carga. El mecanismo de falla final no se observa ya que la junta vertical en el centro del murete permanece conectada. En la figura 4.48 se presenta la deformada del murete en la carga máxima.



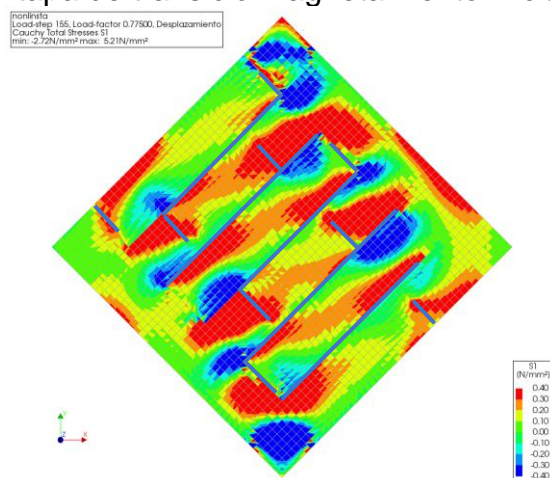
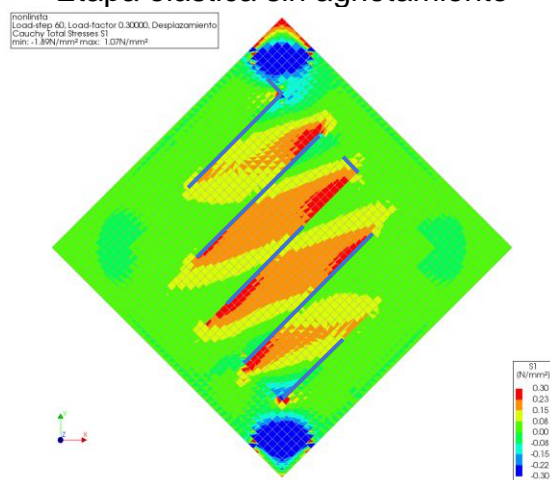
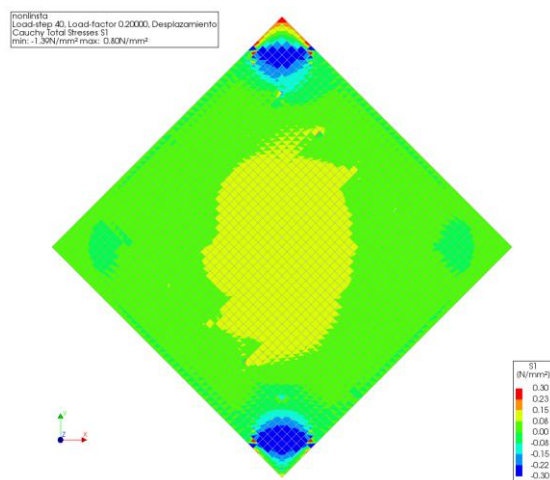


Figura 4.47 Distribución de esfuerzos principales  $\sigma_{11}$  en el murete

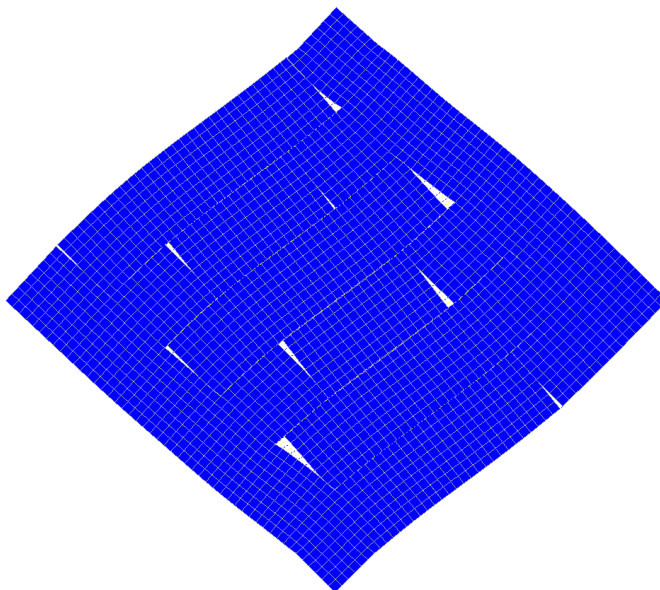


Figura 4.48 Deformada del modelo 5 en la carga máxima

### 4.3 Evolución del agrietamiento en los modelos no lineales

En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros utilizados en la elaboración de los 5 modelos no lineales. El modelo 1 corresponde a un modelo de junta friccionante. Los modelos 2, 3, 4 y 5 se elaboraron con el modelo de junta compuesta.

Tabla 4.3 Parámetros utilizados en los modelos no lineales de muretes

MODELO	$\varphi$		c (MPa)		$f_t$ (MPa)		Carga máxima (kN)
	Junta horizontal	Junta vertical	Junta horizontal	Junta vertical	Junta horizontal	Junta vertical	
1	14.5°	36°	0.24	0.67	-	-	70.30
2	14.5°	-	0.29	-	-	-	71.68
3	14.5°	36°	0.29	0.81	0.13	0.36	71.17
4	14.5°	36°	0.23	0.23	0.13	0.36	71.60
5	14.5°	36°	0.24	0.67	0.13	0.36	70.81

### 4.3.1 Modelo de interfaz friccionante

El comportamiento del modelo 1 elaborado con el modelo de junta friccionante se puede describir en tres etapas. En la primera el comportamiento es completamente elástico y no se presenta agrietamiento. En la segunda etapa se producen deslizamientos en las juntas horizontales en la zona de aplicación de la carga. En la tercera etapa los deslizamientos en las juntas se extienden a lo largo de la última hilada, produciendo el mecanismo de falla por deslizamiento. El modelo 1 simula la falla por deslizamiento que se ha observado en algunos de los muretes ensayados experimentalmente.

### 4.3.2 Modelo de interfaz compuesta

En el modelo 2 se presentó un comportamiento similar al observado en el modelo 1 con una etapa elástica inicial, una etapa de transición y el agrietamiento final. El agrietamiento inicia en las juntas cercanas a la zona de aplicación de la carga de la última hilada del murete. Posteriormente se presenta el agrietamiento en las juntas en el centro del murete. Finalmente se presenta el deslizamiento de la última hilada del murete.

En el modelo 3, se observan tres etapas en el comportamiento del modelo. La primera etapa corresponde a un comportamiento elástico sin agrietamiento. La segunda etapa corresponde al agrietamiento inicial el cual se presenta por deslizamientos en las juntas horizontales de la primera y última hiladas. En la tercera etapa se presenta el agrietamiento de las juntas horizontales de la zona central del murete el cual se extiende a los extremos del murete. En la última etapa se presentan agrietamientos en las juntas verticales de los extremos del murete. Las juntas verticales en el centro del murete permanecen sin agrietarse. En la Figura 4.49 se presenta la evolución del agrietamiento del modelo 3.

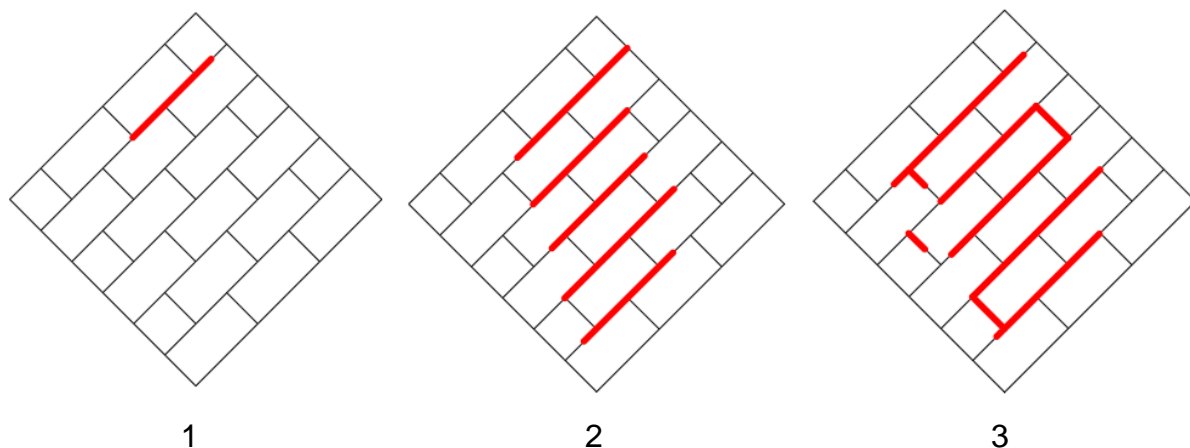


Figura 4.49 Evolución del agrietamiento en el modelo 3

La evolución del agrietamiento en el modelo 4 se divide en tres etapas. En la primera el comportamiento es completamente elástico y no se presenta agrietamiento. En la segunda etapa se producen deslizamientos en las juntas horizontales en el centro del murete. En la tercera etapa se producen deslizamientos en las juntas verticales en el centro del murete. En la Figura 4.50 se presenta la evolución del agrietamiento en el modelo 4.

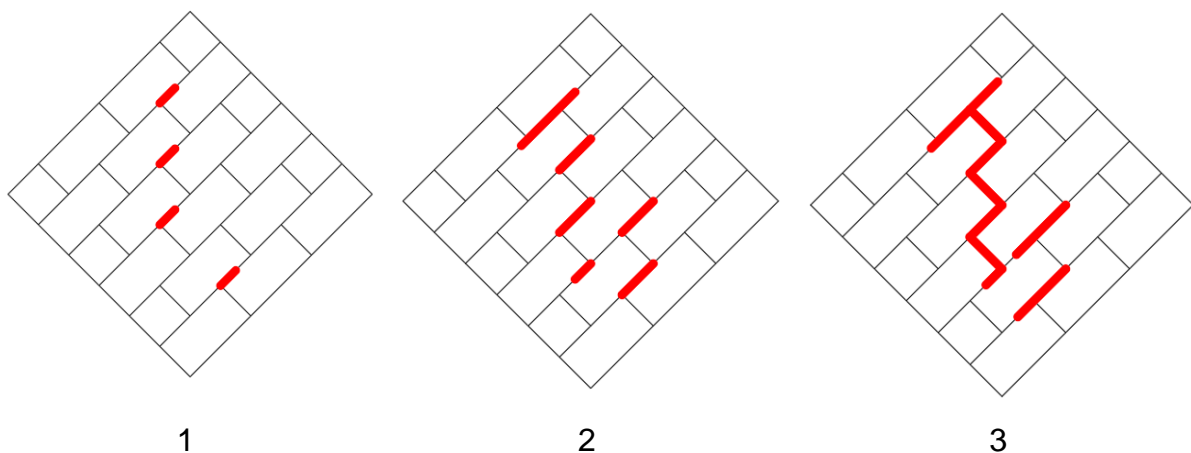
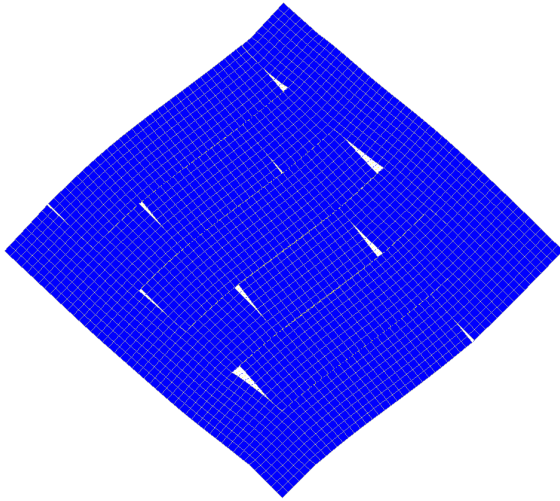


Figura 4.50 Evolución del agrietamiento en el modelo 4

La evolución del agrietamiento en el modelo 5, se puede dividir en 3 etapas. En la primera el comportamiento es elástico y no se presentan agrietamientos. En la segunda etapa se presentan agrietamientos en las juntas horizontales de la zona central del murete. Posteriormente en la tercera etapa se presentan agrietamientos en las juntas verticales de los extremos del murete. La junta vertical en el centro del

murete permanece conectada. El modelo 5 reproduce el patrón de agrietamiento observado en el murete M4BP5 ensayado por Marín (2008) (Figura 4.51).



a) Modelo de MEF



b) Murete M4BP5

Figura 4.51 Patrón de agrietamiento del Modelo 5 y el murete M4BP5

## CAPÍTULO V.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de los modelos computacionales de muretes de mampostería. Se analiza el comportamiento de los diferentes modelos de interfaz utilizados para modelar las juntas de mortero en la mampostería. Se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros no lineales del modelo.

#### 5.1 Modelos elástico-lineales

Con base en los resultados obtenidos a partir de los modelos lineales de muretes de mampostería se observa lo siguiente:

- a) Los muretes de mampostería de 12 cm y 15 cm de espesor modelados con juntas rígidas y con juntas flexibles presentan distribuciones similares de esfuerzos normales, esfuerzos cortantes y esfuerzos principales. Los esfuerzos en todas las juntas horizontales y verticales son de compresión y de cortante.
- b) Los mayores esfuerzos normales y cortantes en las juntas de los muretes se presentan en las zonas cercanas a los cabezales. Esto indica que en estas zonas iniciará la falla por deslizamiento.
- c) Los esfuerzos principales de tensión se presentan mayormente en la zona central del murete, lo cual se asocia a la aparición del agrietamiento diagonal. Sin embargo, se observa en los análisis elásticos que al centro del murete no hay esfuerzos de tensión en las juntas, por lo tanto, la falla denominada por tensión diagonal en las juntas está asociada a la falla producida por esfuerzos cortantes.

## 5.2 Análisis del comportamiento de los modelos de interfaz

En la figura 5.1 se comparan las curvas de carga desplazamiento de los diferentes modelos de muretes analizados.

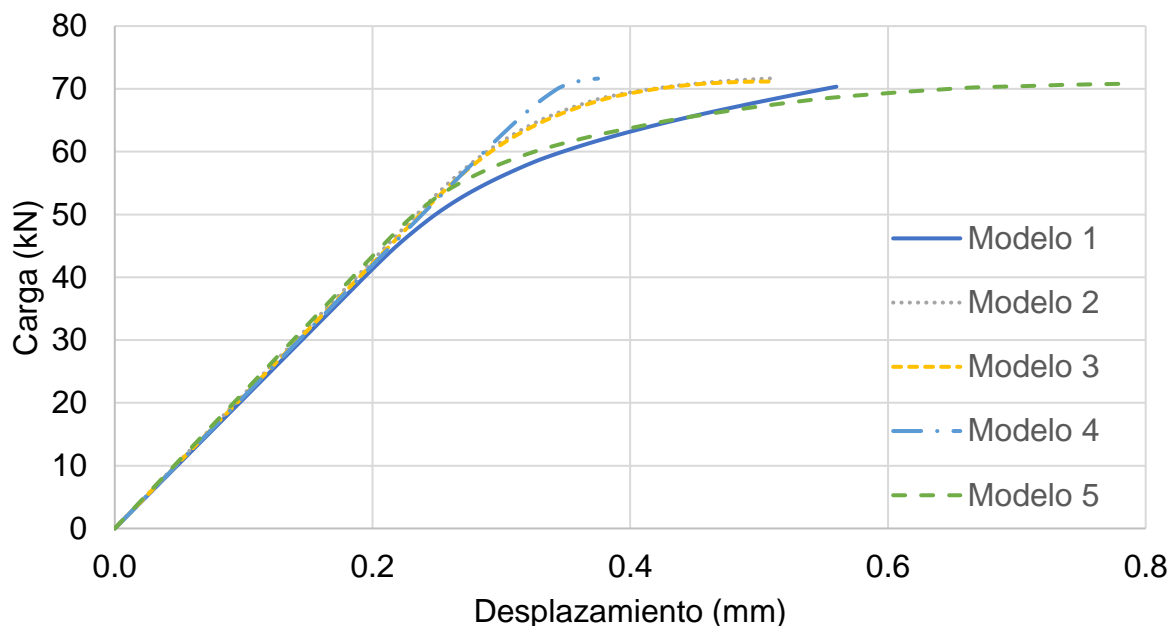


Figura 5.1 Curva carga-desplazamiento de los diferentes modelos de muretes analizados

El modelo de interfaz friccionante de Mohr-Coulomb (Modelo 1) permite simular el proceso de agrietamiento correspondiente a una falla por deslizamiento en un murete. Para un ángulo de fricción interno de  $14.5^\circ$  en las juntas horizontales y de  $36^\circ$  en las juntas verticales, el modelo permite la desconexión total de las juntas en la última hilada debido a que los esfuerzos cortantes son mayores que la resistencia de la junta horizontal. En la etapa elástica no se presentan agrietamientos. En la etapa de transición se presenta el agrietamiento inicial de las juntas horizontales de la última hilada en la zona de aplicación de la carga debido a los elevados valores de esfuerzos cortantes. En la última etapa el agrietamiento se extiende a lo largo de la hilada hasta producir la desconexión total de la misma.

El modelo de interfaz compuesta, en el cual no se colocaron elementos de interfaz en las juntas verticales (Modelo 2), presenta un comportamiento elástico en la primera

etapa. En la segunda etapa se presentan deslizamientos debidos a los elevados valores de esfuerzos cortantes en las juntas horizontales. En la tercera etapa se presenta el deslizamiento de la última hilada del murete.

El modelo de interfaz compuesta, en el cual se colocaron elementos de interfaz en las juntas horizontales y verticales (Modelo 3), presenta un comportamiento elástico en la primera etapa. En la segunda etapa se presentan deslizamientos debidos a cortantes en las juntas horizontales. En la tercera etapa se presenta el deslizamiento de la última hilada del murete y agrietamientos debidos a esfuerzos de tensión en las juntas verticales en los extremos del murete.

El modelo 2 y el modelo 3 presentan un comportamiento similar. Esto se debe a que la falla se debe a deslizamientos por esfuerzos cortantes en las juntas horizontales. Las grietas en las juntas verticales que se observa en el Modelo 3, poco antes de la falla, no afecta la resistencia del murete.

En el modelo 4 se colocaron en las juntas elementos de interfaz compuesta con las mismas propiedades (cohesión y ángulo de fricción interna) en las juntas horizontales y verticales, lo cual permite simular el agrietamiento en la diagonal del murete a través de las juntas. El escenario de este modelo corresponde al caso cuando no se aplica mortero en la totalidad de la cara vertical de los bloques huecos de concreto o cuando se utilizan bloques sólidos.

En el modelo 5 se presenta la etapa no lineal más extensa de todos los modelos. El deslizamiento de las juntas horizontales se presenta en la zona central del murete debido a la eliminación de las juntas cercanas al punto de aplicación de la carga que es donde se encuentran los mayores esfuerzos cortantes. En la última etapa se presentan esfuerzos de tensión en las juntas verticales situadas en los extremos del murete provocando la apertura de las juntas y la falla del murete. La eliminación de las juntas horizontales en los extremos del murete permite desplazamientos mayores previos a la aparición de esfuerzos de tensión en las juntas verticales. La junta vertical en el centro del murete no presenta agrietamiento debido a que su resistencia a cortante es elevada. El mecanismo de falla final está asociado a cortante en las juntas horizontales y tensión en las juntas verticales.



El modelo de interfaz friccionante permite simular la falla asociada al deslizamiento de la última hilada de bloques del murete. El modelo de interfaz friccionante no permite simular la falla por tensión diagonal en las juntas debido a que no considera el ángulo de dilatancia. El modelo de interfaz compuesta permite simular la evolución del agrietamiento por tensión diagonal en las juntas del murete. El modelo simula la separación de las juntas al considerar el ángulo de dilatancia. El modelo considera parámetros no lineales adicionales como: la energía de fractura del modo I y II, los cuales permiten simular la reducción de resistencia en las juntas.

El modelo de interfaz compuesta es adecuado para simular la evolución del agrietamiento en muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, dado que la resistencia de la junta vertical es mayor que la horizontal de acuerdo con el método constructivo utilizado en la región.

### 5.3 Análisis de sensibilidad del ángulo $\varphi$ en el modelo de interfaz compuesta

En la tabla 5.1 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del modelo de interfaz compuesto con juntas verticales y horizontales (modelo 3). Se presenta el ángulo de fricción interna utilizado en cada modelo la carga máxima obtenida en el modelo y el desplazamiento máximo de cada modelo.

Tabla 5.1 Ángulo de fricción interna, carga y desplazamiento máximo

$\varphi$ (°) Junta horizontal	$\varphi$ (°) Junta vertical	P (kN)	$\Delta$ (mm)
11.60	30	68.22	0.51
14.50	36	71.17	0.51
19.50	45	79.50	0.65

En la figura 5.2 se presentan las curvas Carga-Desplazamiento obtenidas modificando el ángulo de fricción interna en las juntas del modelo con los valores de la tabla 5.1.

Se observó un incremento de la resistencia y del desplazamiento al incrementar el ángulo de fricción interna.

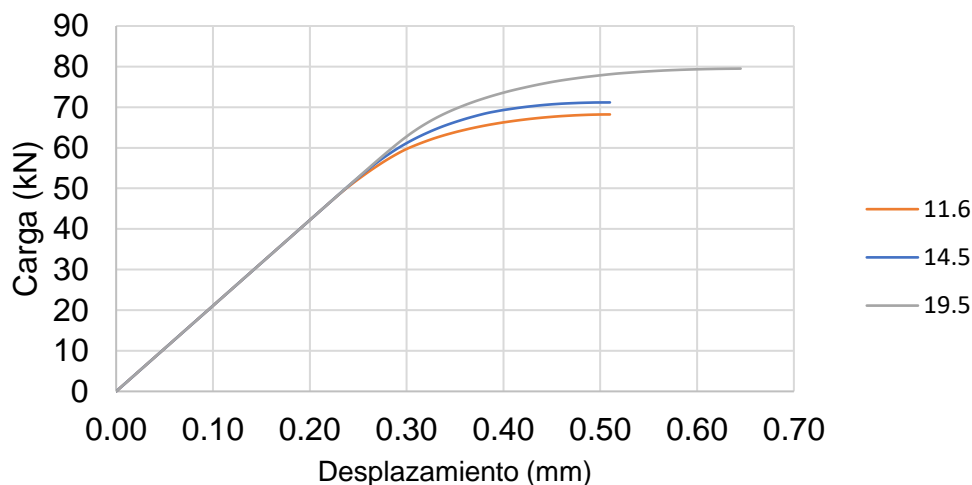


Figura 5.2 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad del ángulo  $\varphi$

El mecanismo de falla es el mismo para los diferentes valores del ángulo  $\varphi$ . El efecto de la variación del ángulo de fricción interna en la resistencia máxima del modelo es significativo debido a que el mecanismo de falla del murete es ocasionado por deslizamientos en las juntas horizontales. El incremento del ángulo de fricción interna en las juntas horizontales incrementa la resistencia al cortante de las mismas.

#### 5.4 Análisis de sensibilidad de los parámetros no lineales del modelo de interfaz compuesta.

El análisis de sensibilidad interna de los diferentes parámetros no lineales del modelo permitió determinar el efecto de la variación de la resistencia a la tensión ( $F_t$ ) de las juntas y de la energía de fractura ( $G_f$ ) asociada al modo I de falla, y de la variación del ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) tienen sobre el mecanismo de falla y la resistencia máxima del modelo del murete.

En la figura 5.3 se presentan las curvas Carga-Desplazamiento obtenidas modificando la resistencia a la tensión y la energía de fractura del modo I de las juntas con los valores de la tabla 5.2. Se observó el mismo mecanismo de falla.

Tabla 5.2 Resistencia a la tensión y energía de fractura, carga y desplazamiento máximo

$F_t$ (MPa) Junta horizontal	$G_f$ (N/mm) Junta horizontal	$F_t$ (MPa) Junta vertical	$G_f$ (N/mm) Junta vertical	P (kN)	$\Delta$ (mm)
0.14	0.009	0.38	0.027	71.17	0.51
0.17	0.012	0.46	0.033	71.25	0.51
0.20	0.015	0.54	0.54	71.30	0.51

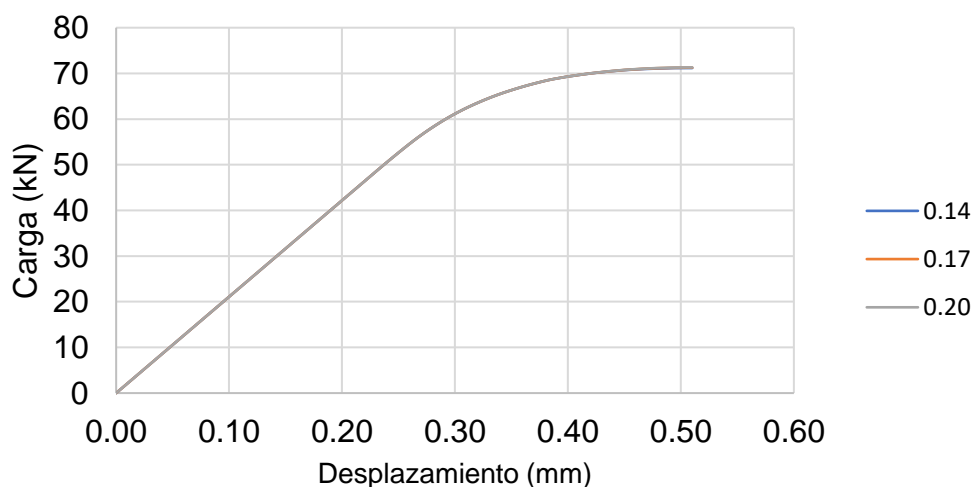


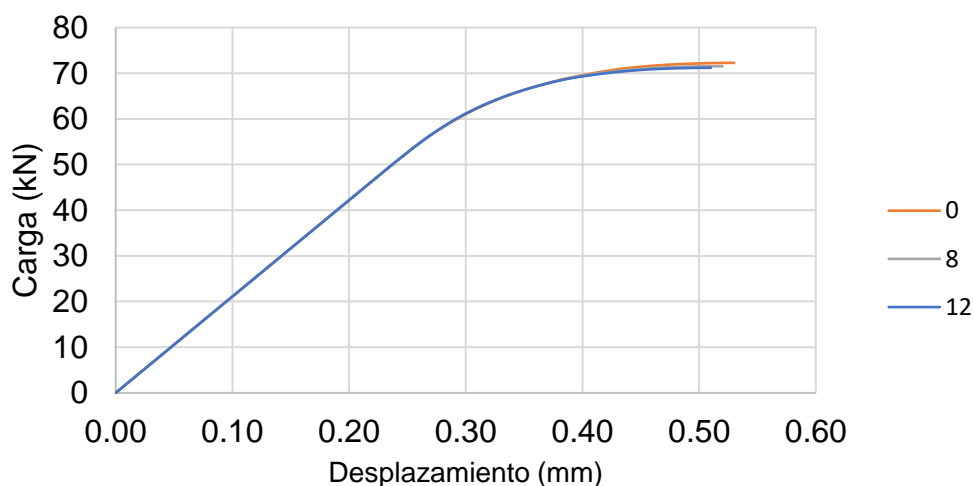
Figura 5.3 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad de la resistencia a la tensión

El efecto de la variación de la resistencia a la tensión en la resistencia máxima del modelo no es significativo debido a que el agrietamiento del murete es ocasionado principalmente por deslizamientos en las juntas horizontales.

En la figura 5.4 se presentan las curvas Carga-Desplazamiento obtenidas modificando el ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) de las juntas con los valores de la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Ángulo de dilatación, carga y desplazamiento máximo

$\Psi$ (°) Junta horizontal	$\Psi$ (°) Junta vertical	P (kN)	$\Delta$ (mm)
0	0	72.27	0.53
8	20	71.51	0.52
12	30	71.17	0.51

Figura 5.4 Curvas carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad del ángulo  $\psi$ 

El mecanismo de falla es el mismo para los diferentes valores del ángulo de dilatación. El ángulo de dilatación mide la separación de las juntas al ocurrir la falla por cortante. El efecto del ángulo de dilatación en el modelo depende del confinamiento de los elementos. Debido a que los modelos de muretes no están confinados las juntas pueden separarse libremente, por lo cual el efecto del ángulo de dilatación no es significativo.

## CAPÍTULO VI.

### CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue desarrollar modelos computacionales no lineales con el Método del Elemento Finito de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, empleados en la determinación de la resistencia a compresión diagonal. Se elaboraron modelos computacionales lineales de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto de 12 y 15 cm de espesor simulando las juntas de mortero utilizando elementos de interfaz de Mohr-Coulomb y elementos de interfaz compuesta. Se elaboraron 5 modelos computacionales no lineales de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto de 15 cm de espesor utilizando elementos de interfaz de Mohr-Coulomb en uno de ellos y elementos de interfaz compuesta en los restantes. Con base en los resultados obtenidos se formulan las siguientes conclusiones:

- Del modelo elástico se observa que los modelos de muretes con juntas rígidas y con juntas flexibles presentan distribuciones similares de esfuerzos normales, esfuerzos cortantes y esfuerzos principales. Los esfuerzos en todas las juntas horizontales y verticales son de compresión y de cortante.
- Del modelo elástico se observa que los esfuerzos principales de tensión se presentan mayormente en la zona central del murete, lo cual se asocia a la aparición del agrietamiento diagonal. Sin embargo, se observa en los análisis elásticos que al centro del murete no hay esfuerzos de tensión en las juntas, por lo tanto, la falla por tensión diagonal está asociada a la falla producida por esfuerzos cortantes.
- El modelo de interfaz friccionante de Mohr-Coulomb permite simular el proceso de agrietamiento correspondiente a una falla por deslizamiento en un murete. Para un ángulo de fricción interno de  $14.5^\circ$  en las juntas horizontales y de  $36^\circ$  en las juntas verticales, el modelo permite la desconexión total de las juntas en la última hilada debido a que los esfuerzos cortantes son mayores que la resistencia de la junta horizontal.

- La evolución del agrietamiento en el murete de mampostería modelado con interfaz friccionante de Mohr-Coulomb se divide en tres etapas. En la primera el comportamiento es completamente elástico y no se presenta agrietamiento. En la segunda etapa se producen agrietamientos debidos a esfuerzos cortantes en las juntas horizontales en la zona de aplicación de la carga. En la tercera etapa los deslizamientos en las juntas se extienden a los bordes del murete, produciendo el mecanismo de falla por deslizamiento.
- El modelo de interfaz friccionante permite simular la falla asociada al deslizamiento de la última hilada de bloques del murete. El modelo de interfaz friccionante no permite simular la falla por tensión diagonal en las juntas debido a que no considera el ángulo de dilatancia.
- Para modelar adecuadamente las juntas en muros de mampostería de bloques huecos de concreto, se propone una ecuación que considera un modelo de Mohr-Coulomb y las diferencias en la colocación del mortero en las juntas horizontales y las verticales. Esta ecuación considera que la cohesión y la tangente del ángulo de fricción interna en la junta horizontal se debe reducir por un factor  $\lambda$  con respecto al valor de la cohesión y el ángulo de fricción interna en la junta vertical. El factor  $\lambda$  relaciona el espesor promedio de las paredes exteriores inferiores y superiores en los bloques de concreto y la pared lateral de los bloques de concreto.
- La evolución del agrietamiento en el murete de mampostería modelado con interfaz compuesta se divide en tres etapas. En la primera el comportamiento es completamente elástico y no se presenta agrietamiento. En la segunda etapa se presentan deslizamientos debidos a cortantes en las juntas horizontales. En la tercera etapa se presenta el deslizamiento de la última hilada del murete y agrietamientos debidos a esfuerzos de tensión en las juntas verticales en los extremos del murete.
- La modelación de las juntas con interfaz compuesta y las mismas propiedades en las juntas horizontales y verticales permite simular el agrietamiento en la diagonal del murete a través de las juntas. Los agrietamientos de ambas juntas

están asociados a deslizamientos por cortante. El escenario de este modelo corresponde al caso cuando no se aplica mortero en la totalidad de la cara vertical de los bloques huecos de concreto o cuando se utilizan bloques sólidos.

- El modelo de interfaz compuesta permite simular la evolución del agrietamiento por tensión diagonal en las juntas del murete. El modelo de interfaz compuesta simula la separación de las juntas al considerar el ángulo de dilatancia. El modelo considera parámetros no lineales adicionales como: la energía de fractura del modo I y II, los cuales permiten simular la reducción de resistencia en las juntas.
- El modelo de interfaz compuesta es adecuado para simular la evolución del agrietamiento en muretes de mampostería de bloques huecos de concreto, dado que la resistencia de la junta vertical es mayor que la horizontal de acuerdo con el método constructivo utilizado en la región.

Del análisis de sensibilidad realizado al modelo de interfaz compuesta (Modelo 3) se concluye:

- El efecto de la variación del ángulo de fricción interna en la resistencia máxima del modelo es significativo debido a que el mecanismo de falla del murete es ocasionado por deslizamientos en las juntas horizontales. El incremento del ángulo de fricción interna en las juntas horizontales incrementa la resistencia al cortante de las mismas.
- La variación de la resistencia a tensión de las juntas verticales no modifica el mecanismo de falla del murete. El efecto de la variación de la resistencia a la tensión en la resistencia máxima del modelo no es significativo debido a que el agrietamiento del murete es ocasionado principalmente por deslizamientos en las juntas horizontales.
- El mecanismo de falla es el mismo para diferentes valores del ángulo de dilatancia. Esto se debe a que los modelos de muretes no están confinados y las juntas pueden separarse libremente, por lo cual la variación del ángulo de dilatancia no es significativa.

## CAPÍTULO VII.

### REFERENCIAS

Anderson, T. L., (2005). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 2° edición, CRC Press, U.S.A.

Attard, M. M., Nappi, A., Tin-Loi, F., (2007). Modeling Fracture in Masonry. "Journal of Structural Engineering ASCE", 133(10) 1385-1392.

Bažant Zdeněk P., Planas Jaime (1998). Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, 1° edición, CRC Press, U.S.A.

Bolhassani Mohammad, Hamid Ahmad A., Lau Alan C.W., Moon Franklin (2006) Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. "Construction and Building Materials", 20, 308-321.

Calderini Chiara, Cattari Serena, Lagomarsino Sergio (2010) The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanic parameters of masonry, "Construction and Building Materials", 24, 677-685.

Drysdale Robert G., Hamid Ahmad A. (2008). Masonry structures behavior and design, 3a edición, The Masonry Society, U.S.A.

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.

Gabor A., Ferrier E., Jacquelin E., Hamelin P., (2006) Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels "Construction and Building Materials", 20, 308-321.

Giamundo V., Sarhosis V., Lignola G.P., Sheng Y., Manfredi G. (2014) Evaluation of different computational modeling strategies for the analysis of low strength masonry structures. "Engineering Structures" 73, 160-169.

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

Hernández Santillán J. (2015). Comportamiento no lineal de la mampostería de bloques huecos de concreto sujeta a compresión axial. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Lourenço Paulo B., (1996) Computational Strategies for Masonry Structures, Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Delft, Países Bajos.

Lourenço Paulo B., Rots Jan. G. (1997). Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. "Journal of Structural Engineering, ASCE", 123(7), 660-668.



Marín Gómez, F., (2008). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de piezas de concreto. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Milosevic J., Lopes M., Sousa A., Bento R. (2013) Testing and modeling the diagonal tension strength of rubble stone masonry panels. "Engineering Structures", 52, 581-591.

Raygoza Luna, E., (2012). Muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto de 15 cm, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas laterales. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Shah, S. P., Swartz, S. E. y Ouyang, C. (1995). Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials, John Wiley and Sons, U.S.A.

Sosa Moreno, M., (2013). Comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas laterales en su plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

TNO (2011). DIANA. User's Manual. Delft: TNO.

Zhang S., Mousavi S., Richart N. Molinari J-F, Beyer K., (2017) Micro-mechanical finite element modeling of diagonal compression test for historical stone masonry structure. "International Journal of Solids and Structures"