



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA FRENTE A LA SUBSIDENCIA, APLICANDO LA
TÉCNICA DEL PULLDOWN.**

PRESENTA

Ing. Yaimara Chávez Pérez

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN INGENIERÍA CIVIL
EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

TUTOR

Dr. Ing. José Ángel Ortíz Lozano

COMITÉ TUTORIAL

Mtro. Jorge Eudave Muñoz

Dr. Ing. Luis Alfredo Hernández Castillo

Aguascalientes, Ags. 26 de junio del 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **YAIMARA CHÁVEZ PÉREZ** con ID 226105 quien realizó la tesis titulada: **ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA FRENTE A LA SUBSIDENCIA, APLICANDO LA TÉCNICA DEL PULLDOWN**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 31 de agosto de 2018.

Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis

Mtro. Jorge Eudave Muñoz
Asesor de tesis

Dr. Luis Alfredo Hernández Castillo
Asesor de tesis

✓ c.c.p.- Yaimara Chávez Pérez / Interesada
c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León / Secretario de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez / Jefe del Depto. de Construcción y Estructuras
c.c.p.- Archivo



Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Oficio: CCDC-D-339-2018
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA FRENTE A LA SUBSIDENCIA, APLICANDO LA TÉCNICA DEL PULLDOWN". Presentado por la sustentante: Yaimara Chávez Pérez con ID: 226105, egresada de la Maestría en Ingeniería Civil, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que la autora cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que a la interesada convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 04 de septiembre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

- c.c.p. Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p. Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p. Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de tesis
- ~~c.c.p.~~ Ing. Yaimara Chávez Pérez – Egresada de la Maestría en Ingeniería Civil
- c.c.p. Lic. Dolia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos
- c.c.p. Archivo

OVG/rbv

Agradecimientos

Muchas han sido las personas e instituciones que han contribuido a mi formación, llegué a todos mis agradecimientos, muy especialmente:

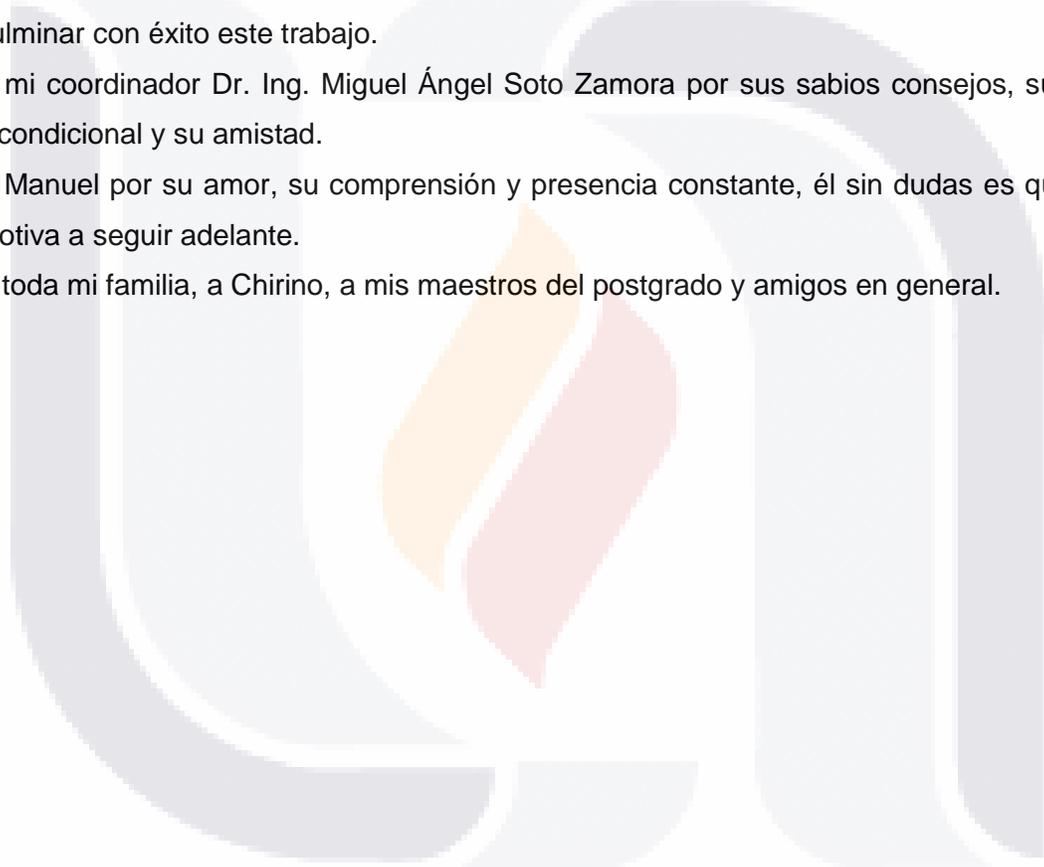
A CONACYT por su gran compromiso en el desarrollo de científicos de excelencia y por su apoyo para continuar mi formación como profesional.

Al Dr. Ing. José Ángel Ortiz Lozano por sus lecciones y enseñanzas en el ABAQUS. Por ayudarme, orientarme y brindarme confianza en todo momento; lo que me ha permitido culminar con éxito este trabajo.

A mi coordinador Dr. Ing. Miguel Ángel Soto Zamora por sus sabios consejos, su apoyo incondicional y su amistad.

A Manuel por su amor, su comprensión y presencia constante, él sin dudas es quien me motiva a seguir adelante.

A toda mi familia, a Chirino, a mis maestros del postgrado y amigos en general.



Dedicatoria

A mis tres M, Manuel, Mariana y Migue.

A mi mamá por todo su amor, paciencia y dedicación.

A mi papá por el apoyo y la confianza en todos los momentos de mi vida

A mi hermana por ser mi guía.



Índice general

Índice de figuras.....	4
Índice de tablas.....	7
Índice de gráficos.....	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Capítulo I: Introducción.....	11
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Definición del Problema.....	14
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo general.....	15
1.4.2 Objetivos particulares.....	15
1.5 Alcances del trabajo a desarrollar.....	16
1.6 Hipótesis.....	16
1.7 Metodología.....	16
1.8 Estructura de la tesis.....	17
Capítulo II: Estado del Conocimiento.....	19
2.1 Principales estudios numéricos en muros de mampostería.....	20
2.2 Principales estudios numéricos en muros de mampostería sometidos a asentamientos diferenciales.....	30
Capítulo III: Marco Teórico.....	35
3.1 Mampostería.....	35
3.1.2 Primeros usos de la mampostería.....	35
3.1.3 Descripción general de la mampostería.....	36
3.1.5 Propiedades mecánicas de la mampostería.....	40
2.1.5.1 Comportamiento bajo cargas de tensión uniaxial.....	40
3.1.5.2 Comportamiento bajo cargas de compresión uniaxial.....	42
3.1.5.3 Comportamiento de la mampostería frente cargas de cortante.....	43

3.1.5.4 Comportamiento biaxial de la mampostería.....	44
3.1.5.5 Criterios de rotura biaxial de la mampostería.....	45
3.1.5.5.1 Criterio de Rankine.....	46
3.1.5.5.2 Criterio de Morh-Coulomb.	46
3.1.5.5.3 Criterio de Samarasinghe y Hendry.....	47
3.1.5.5.4 Criterio de Page.....	48
3.1.5.5.4 Criterio de Lourenço.	48
3.1.6 Interface ladrillo mortero.....	49
3.2 Hundimientos diferenciales.....	49
3.2.1 Generalidades de los hundimientos diferenciales.....	49
3.2.2 Fenómeno de la subsidencia.....	50
3.2.3 Tipos de Subsidencia.....	52
3.2.3.1 Subsidencia por actividad minera.....	53
3.2.3.2 Subsidencia por extracción de petróleo y gas.....	53
3.2.3.2 Subsidencia por hidrocompactación.....	54
3.2.3.3 Subsidencia por disolución.....	55
3.2.3.4 Subsidencia por Extracción de Agua Subterránea.....	55
3.2.4 Subsidencia en México.....	56
3.2.4 Subsidencia en el Valle de Aguascalientes.....	57
3.3 Generalidades del método de elementos finitos.....	59
3.3.1 Análisis pushover.....	60
3.3.1 Análisis pulldown.....	61
3.4 Campañas experimentales para la calibración de los modelos numéricos.....	61
3.4.1 Campañas experimentales desarrolladas por Javier A. Charry Ablanque en 2010.....	61
3.4.2. Características de los modelos implementados por Charry en 2010.....	62
Capítulo IV: Diseño de experimento.....	70
4.1 Descripción del experimento numérico.....	70
4.2 Declaración de las variables.....	70
4.3 Modelación del problema.....	71
4.4 Modelación de la geometría.....	71
4.5 Modelación de los materiales.....	72

4.5.1 Tabiques	72
4.5.2 Mortero.....	73
4.6 Ensamblaje.....	74
4.7 Pasos para la modelación.....	75
4.8 Interacciones.	75
4.9 Cargas y condiciones de fronteras.....	76
4.10 Mallado	76
4.10.1 Densidad de malla.....	77
Capítulo V: Resultados.....	81
5.1 Resultados.....	81
5.1.1 Calibración de los modelos numéricos.	81
5.1.1.2 Campaña experimental I.	82
5.1.1.3 Campaña experimental II.....	83
5.1.1.4 Campaña experimental III.....	84
5.1.2 Evaluación ante asentamientos diferenciales.....	85
Capítulo VI: Análisis de los resultados.....	92
6.1 Análisis de los resultados.....	92
6.1.2 Muros de 1mx1m.....	93
6.1.3 Muros de 1.5mx1.5m y de 2mx2m.	94
6.1.4 Curvas de fragilidad.....	95
Capítulo VII: Conclusiones.	101
Capítulo VIII: Recomendaciones.	104
Referencias.....	105

Índice de figuras

Figura 1: Perspectiva del modelo numérico (ubicación del muro y de la carga explosiva) (Francisco, 2007).	21
Figura 2: Curva de fragilidad del muro (Francisco, 2007).	22
Figura 3: Comparación de los resultados numéricos y experimentales en la sección longitudinal del muro (D.-J. E. & S., 2009).....	23
Figura 4: Comparación de los resultados numéricos y experimentales en la sección transversal del muro (D.-J. E. & S., 2009).	23
Figura 5: Desplazamiento horizontal - Carga horizontal para dos mallados diferentes (B. & G., 1997).	24
Figura 6: Gráficos de carga-deformación angular (Agustín & Gustavo, 2001).	25
Figura 7: Curva de histéresis desplazamiento lateral - fuerza lateral (Mariana, A, Andrea, & Guido, 2005).	26
Figura 8: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo discreto 1) (Massimo et al., 2017).	27
Figura 9: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo discreto 2) (Massimo et al., 2017).	28
Figura 10: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo continuo) (Massimo et al., 2017).	28
Figura 11: Gráfico de esfuerzo-deformación para el muro de mampostería (Mario & Fabián, 2016).	29
Figura 12: Comparativa de modelos (B-T básico, modelo analítico y modelo numérico) (Alvaro, 2009).	30
Figura 13: Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la geometría 1 confinada y no confinada (Leonel, 2012).	31
Figura 14: Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la geometría 2 confinada y no confinada (Leonel, 2012).	31
Figura 15: Micro-modelado detallado del muro (Lara, 2016).	32
Figura 16: Micro-modelado simplificado del muro (Lara, 2016).	32
Figura 17: Gráfico esfuerzo-distorsión angular de los muros analizados (Lara, 2016).	33
Figura 18: Relaciones esfuerzo – deformación para mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Chiquillo, A., & Y., 2011).	37

Figura 19: Diagramas experimentales típicos tensión - desplazamiento para tracción en la dirección paralela a las juntas horizontales, (Bakes, 1985): a) falla por diagonal escalonada a través de juntas horizontales y verticales b) falla vertical a través de juntas (Alvaro, 2009)..... 41

Figura 20: Estado tensional en la unidad y el mortero en la mampostería sometida a esfuerzos de compresión (Chiquillo et al., 2011). 42

Figura 21: Comportamiento uniaxial de la mampostería bajo cargas horizontales normal al plano de las juntas horizontales. a) Columna de unidades y mortero. b) Probeta para ensayo RILEM. c) Diagrama tensión - deformación para diferentes valores de la resistencia (Chiquillo et al., 2011). 43

Figura 22: Ensayos establecidos para cargas de corte y compresión: a) Ensayo de un par, b) Ensayo de un triplete (Alvaro, 2009). 44

Figura 23: Diagramas experimentales tensiones – desplazamientos a cortante (Pluijm, 1993). 44

Figura 24: Formas para definir criterios de rotura biaxial para la obra de fábrica (Alberto, 2010). 45

Figura 25: Representación plana del estado de tensiones en un punto según criterio Mohr-Coulomb (Alberto, 2010). 47

Figura 26: Superficie de rotura biaxial tensión - compresión (Samarashinghe & Hendry, 1982). 47

Figura 27: Modelo conceptual del piso rocoso que condiciona la formación de agrietamientos (Jesús et al., 2013). 58

Figura 28: Zonas de fracturamientos asociados a subsidencia por extracción de agua del subsuelo en el Valle de Aguascalientes (Jesús et al., 2013). 59

Figura 29: Características geométricas de los muros de mampostería (Alberto, 2010). .. 63

Figura 30: Curva tensión deformación obtenida al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010). 65

Figura 31: Curva carga – desplazamiento horizontal (Alberto, 2010). 65

Figura 32: Curva tensión deformación al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010). 66

Figura 33: Curva carga - desplazamiento horizontal (Alberto, 2010). 67

Figura 34: Curva tensión deformación al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010). 68

Figura 35: Curva carga - desplazamiento horizontal (Alberto, 2010). 68

Figura 36: a) Modelo experimental 150V80H y b) Modelo numérico 150V80H. 82

Figura 37: a) Modelo experimental 9V50H y b) Modelo numérico 9V50H..... 84
Figura 38: Campaña III a) Modelo experimental 9V50H y b) Modelo numérico 9V50H. .. 85
Figura 39: Muros sometidos a asentamientos diferenciales a) Carga de 250 kN/m² y b) Carga de 300 kN/m²..... 86
Figura 40: Muros sometidos a asentamientos diferenciales con una carga de 350 kN/m² a) 1mx1m, b) 1.5mx1.5m y c) 2mx2m. 88
Figura 41: Resultados experimentales obtenidos por Daniel Lara en 2016. 92
Figura 42: Modelos numéricos. 93



Índice de tablas.

Tabla 1: Dimensiones de los muros (Jaramillo, 2002). 20

Tabla 2: Peso volumétrico neto mínimo de piezas en estado seco (Arnal et al., 2005)... 38

Tabla 3: Proporciones en volumen recomendadas, para morteros estructurales (Arnal et al., 2005). 40

Tabla 4: Principales zonas afectadas por la subsidencia en México (Jesús et al., 2011). 57

Tabla 5: Resistencias a flexión y compresión de las juntas de mortero (Alberto, 2010)... 63

Tabla 6: Resumen de las propiedades de los tabiques. 73

Tabla 7: Parámetros inelásticos de las juntas de contacto entre unidades. 76

Tabla 8: Cargas aplicadas..... 76

Tabla 9: Tipos de elementos finitos (Abaqus/CAE)..... 77

Tabla 10: Resumen del estudio de mallas..... 78

Tabla 11: Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos a escala real (Alberto, 2010)..... 81

Tabla 12: Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos a escala reducida (Alberto, 2010) 81

Tabla 13: Distorsión asociada a cada nivel de daño (Campaña experimental 1). Logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad. 96

Tabla 14: Distorsión asociada a cada nivel de daño (Campaña experimental II). Logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad. 98

Índice de gráficos

Gráfico 1: Curva cantidad de nodos - asentamiento.....	79
Gráfico 2: Curva carga desplazamiento para el muro 150V80H.....	83
Gráfico 3: Curva carga desplazamiento para el muro 9V5H.....	84
Gráfico 4: Curva carga desplazamiento para el muro 9V5H.....	85
Gráfico 5: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de	87
Gráfico 6: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión	87
Gráfico 7: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de	89
Gráfico 8: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 350 kN/m ² ,	89
Gráfico 9: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 350 kN/m ² ,	90
Gráfico 10: Curva esfuerzo distorsión angular.....	94
Gráfico 11: Curva esfuerzo distorsión angular (Muros de 1.5mx1.5m y 2mx2m).....	95
Gráfico 12: Curvas de fragilidad obtenidas para un muro de 1mx1m (Campaña experimental I).	97
Gráfico 13: Curvas de fragilidad obtenidas para un muro de 1mx1m, 1.5mx1.5m y 2mx2m (Campaña experimental II).....	99

Resumen

El hundimiento paulatino de la superficie provocado por la subsidencia, es un fenómeno que afecta a varios estados del centro de México, llegando a ocasionar cuantiosos daños materiales en elementos con baja resistencia a la tensión. Las estructuras de mampostería han sido de las más afectadas y presentan una alta vulnerabilidad ante este fenómeno; un ejemplo de ello resulta el valle de Aguascalientes, donde se tenían registradas aproximadamente 216 grietas y fallas superficiales, las que han afectado 324 km y ocasionado daños a 1900 inmuebles, por lo que se hace muy necesario estudiar su comportamiento ante este fenómeno.

La presente investigación propone utilizar el software Abaqus/CAE como herramienta computacional, para obtener modelos numéricos que describan correctamente el comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia. Para ello se realiza un proceso de calibración matemática, se obtienen los valores de distorsión angular para diferentes estados de carga y se comparan con los resultados experimentales presentados por el investigador Charry Ablanque en el año 2009, se estudia la influencia de las dimensiones del muro en su resistencia y se construyen las curvas de capacidad de carga y fragilidad del material, las que permiten evaluar el estado de daño del elemento, para un determinado valor de distorsión angular.

Abstract

The gradual subsidence of the surface caused the subsidence, is a phenomenon that affects several states of the center of Mexico, arriving to cause substantial material damages in elements with low resistance to the tension. The masonry structures have been the most affected and are highly vulnerable to this phenomenon; An example of this is the Aguascalientes Valley, where approximately 216 superficial injuries and faults have been incorporated, which have been affected by 324 km and caused damage to 1900 properties. Therefore, it is very necessary to study their behavior before this phenomenon. The present investigation proposes to use the software Abaqus / CAE as a computational tool, to obtain numerical models that correctly describe the behavior of masonry walls against subsidence. To do this, a mathematical calibration process is performed, the angular distortion values for different load states are obtained and compared with the experimental results presented by the researcher Charry Ablanque in 2009, the influence of the dimensions of the wall is studied in its resistance and its construction, the load capacity curves and the fragility of the material, which allow to evaluate the state of the damage of the element, for a certain value of angular distortion.

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



***CAPÍTULO I:
INTRODUCCIÓN***

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

Capítulo I: Introducción.

1.1 Antecedentes.

La mampostería constituye un material muy antiguo que ha sido utilizado desde tiempos inmemoriales en la construcción de grandes monumentos como el Coliseo Romano, importantes Iglesias y Catedrales, puentes en arco y muchas otras, la misma presenta direccionalidad en sus propiedades debido a las juntas de mortero y “está compuesta por piezas naturales o moldeadas de pequeño tamaño, de forma tal que puedan ser manipuladas por una persona y adheridas con mortero o lechada” (“Obras de Mampostería - Código de Buenas Prácticas,” 2009). Debido a su facilidad de construcción, su excelente durabilidad y su amplia disponibilidad, en muchos países la mampostería continúa destacando como uno de los materiales más usados.

Un ejemplo de ello resulta el valle de Aguascalientes en México, donde muchas de las construcciones existentes utilizan la mampostería como material principal, tanto en los muros de carga como en las divisiones interiores. A partir de los años ochenta aproximadamente, comenzaron a observarse de manera frecuente agrietamientos en los muros de mampostería, lo que comenzó a provocar cuantiosas pérdidas económicas, debido a la disminución de la capacidad resistente en algunos elementos estructurales, así como el incumplimiento del estado límite de servicio.

Luego de varias investigaciones se concluyó que estas grietas eran el resultado de hundimientos diferenciales del terreno. Los hundimientos diferenciales se pueden definir como “el proceso por el cual el terreno que da soporte a una estructura comienza a deformarse a diferentes velocidades en diferentes puntos del mismo (R. & O., 2014). Este fenómeno se produce fundamentalmente debido a un acelerado flujo plástico del suelo, la presencia de arcillas expansivas, la presencia de alguna falla geológica y además puede ser provocado por el fenómeno de la subsidencia.

Existen tres hipótesis que explican el acelerado crecimiento de los asentamientos diferenciales en el valle de Aguascalientes, una de ellas plantea que son debido a la extracción desmedida de agua del subsuelo, otra explica que las grietas son de origen tectónico y la otra trata la posibilidad de que el agrietamiento sea producto del flujo plástico del suelo impulsado por la gravedad. Debido a este fenómeno surge la necesidad

de estudiar los efectos de los hundimientos diferenciales en estructuras de mampostería, con el fin de obtener modelos numéricos y experimentales que simulen su comportamiento bajo distintas condiciones de carga y así poder realizar diseños de estructuras más estables. En este caso se prefirió realizar un análisis numérico pues los modelos experimentales requieren una considerable cantidad de tiempo y recursos económicos, debido al elevado número de ensayos que deberán realizarse para lograr una correcta caracterización del comportamiento de los elementos componentes de la mampostería.

El análisis numérico es un método muy utilizado para simular el comportamiento real de un muro de mampostería, este puede estar enfocado en la micro-modelación, de forma tal que se considere de manera separada las propiedades de los ladrillos y las juntas, así como las interacciones que se producen entre ellos o en la macro-modelación donde se considera la mampostería como un material compuesto.

Micro-modelación detallada: los ladrillos y morteros son representados por elementos continuos, mientras que el comportamiento de la interface mortero - ladrillo es representada por elementos discontinuos.

Micro-modelación simplificada: en este caso, los materiales están representados por un elemento continuo donde el comportamiento de las juntas de mortero y la interface mortero - ladrillo está separada por discontinuidades.

Macro-modelación: los ladrillos, mortero e interface ladrillo - mortero están englobados por un mismo elemento.

1.2 Justificación.

El estado de Aguascalientes a partir de los años ochenta, se vio afectado por un crecimiento acelerado de su población, debido a la inmigración proveniente de varios estados vecinos (Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí y Durango), además miles de familias se asentaron en el valle huyendo del sismo de 1985 en la Ciudad de México. Este acelerado crecimiento demográfico trajo consigo una gran problemática, pues la infraestructura básica resultaba claramente deficiente para atender las crecientes necesidades de una población cada vez mayor.

El abastecimiento de agua comenzó a ser uno de los problemas principales, pues el estado de Aguascalientes pertenece a una zona semiárida de México, donde las precipitaciones son someras y la cantidad de agua superficial no es suficiente para satisfacer las demandas de la población. Esto trajo como consecuencia que comenzara a utilizarse el agua subterránea de manera irracional, de forma tal que la extracción llegó a ser superior a la recarga de los acuíferos, ocasionando un notable descenso en el nivel freático.

Este problema aún se mantiene en el estado y es de tal magnitud que en la actualidad la extracción de agua potable se realiza a través de pozos con profundidades que llegan hasta los 450 metros. “Esta sobreexplotación de los acuíferos ocasionó hundimientos en todo Aguascalientes, lo cual se considera la teoría más aceptada para la aparición de fallas geológicas en el valle” (Ramos, 2013).

Daniel Lara plantea en su tesis de maestría que hasta el año 2009 se tenían registradas 216 grietas y fallas superficiales producto de la subsidencia, las que han afectado 324km del valle y ocasionado daños a aproximadamente 1900 inmuebles, gran parte ellos contruidos con mampostería (material que presenta baja resistencia a las distorsiones angulares).

Debido a este fenómeno surge la necesidad de estudiar los efectos de los hundimientos diferenciales en estructuras de mampostería, con el fin de obtener modelos numéricos que simulen su comportamiento bajo distintas condiciones de carga y así poder realizar diseños más estables, a partir de valores admisibles de distorsión angular.

1.3 Definición del Problema

¿Cómo determinar el comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia, utilizando el software Abaqus/CAE y apoyándose en la técnica del pulldown?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Determinar el comportamiento de un muro de mampostería frente asentamientos diferenciales provocados por el fenómeno de la subsidencia, apoyándose en el pulldown y utilizando como herramienta computacional el software Abaqus/CAE.

1.4.2 Objetivos particulares.

- Analizar el estado del conocimiento sobre el comportamiento mecánico de muros de mampostería, así como las propiedades de los elementos que lo componen.
- Obtener un modelo numérico que describa el comportamiento real de un muro de mampostería.
- Analizar los resultados obtenidos por varios investigadores en sus modelos experimentales, donde describen el comportamiento de muros de mampostería sometidos a cargas laterales.
- Comparar los resultados obtenidos a partir de los modelos numéricos, con los resultados experimentales antes analizados, hasta obtener un modelo calibrado cuyos resultados se acerquen lo más posible a la realidad.
- Simular el comportamiento de un muro de mampostería frente a la subsidencia, apoyándose en la técnica del pulldown.
- Obtener valores de distorsión angular para diferentes estados de carga.
- Analizar el comportamiento de los muros de mampostería sometidos a distorsiones angulares producto del asentamiento diferencial del terreno.
- Elaborar las curvas de fragilidad para establecer una medida de vulnerabilidad en términos probabilísticos del comportamiento del muro frente a las distorsiones angulares.
- Publicar un artículo en alguna revista especializada que nos permita dar a conocer a la comunidad científica nacional e internacional, el comportamiento de muros de mampostería sometidos a distorsiones angulares, producto del asentamiento diferencial del terreno.

1.5 Alcances del trabajo a desarrollar.

Este trabajo se limitará al análisis numérico en el software Abaqus/CAE del comportamiento de muros de mampostería aislados, no confinados, no reforzados y de dimensiones variables frente a la subsidencia.

- Los muros se considerarán compuestos por piezas macizas de tabique rojo recocido de 29x14x7 cm (N.CMT.2.01.001/02) y juntas de mortero de 1.0 cm (N.CMT.2.01.001/02).
- Se utilizará la micro-modelación para obtener un modelo numérico calibrado a partir de ensayos experimentales.
- Se someterá al modelo calibrado a cargas verticales que simulen el efecto de un asentamiento diferencial.
- Se analizará el comportamiento del muro frente a la subsidencia y se obtendrán los valores de distorsión angular.
- Se realizará un análisis probabilístico del comportamiento del muro, estableciendo la probabilidad de que su respuesta estructural exceda un determinado estado límite, en función de la distorsión angular.
- Se obtendrán valores admisibles de distorsión angular que podrán ser utilizados en la revisión, el diseño y evaluación del estado de daño de un muro de mampostería.

1.6 Hipótesis.

Utilizando el software Abaqus/CAE en el análisis numérico de muros de mampostería sometidos a asentamientos diferenciales, es posible obtener los valores de distorsión angular que condicionan el comportamiento del muro.

1.7 Metodología.

La siguiente investigación se desarrollará en varias etapas:

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Análisis del estado del conocimiento sobre el comportamiento mecánico de muros de mampostería, las propiedades de los elementos que lo componen, así como los principales trabajos realizados, tanto numéricos como experimentales, sobre el comportamiento de este material frente a los esfuerzos generados por los asentamientos diferenciales.
 - Utilizar la micro-modelación para la obtención y determinación de un modelo físico matemático capaz de reproducir el comportamiento real de un muro de mampostería bajo el efecto del pushover (carga lateral monotónica), para luego compararlos con los resultados obtenidos en varios estudios experimentales, con el objetivo de obtener un modelo calibrado que se ajuste al verdadero comportamiento de este elemento estructural.
 - A partir del modelo calibrado el muro será sometido al efecto del pulldown (carga vertical) con el objetivo de simular el efecto de los asentamientos diferenciales en la estructura y obtener los valores de distorsión angular para los diferentes valores de carga.
 - Posteriormente se construirán las curvas de fragilidad del material, mediante las cuales se realizará un análisis probabilístico del comportamiento del muro, estableciendo la probabilidad de que la respuesta estructural del mismo exceda un determinado estado límite, en función de la distorsión angular.
 - Se analizarán los resultados obtenidos para establecer valores admisibles de distorsión angular, en el diseño y la revisión de muros de mampostería, además de poder evaluar el estado de daño de una estructura, en función del valor de la distorsión angular al que esté sometido.

1.8 Estructura de la tesis.

CAPÍTULO I

En el primer capítulo se realiza una pequeña introducción del tema a desarrollar, se explica la necesidad e importancia de realizar esta investigación, así como sus objetivos generales y particulares. Finalmente se establece el alcance, la metodología y la estructura de la tesis

CAPÍTULO II

En el segundo capítulo se hace un resumen sobre el estado del conocimiento, analizando los más recientes estudios e investigaciones sobre el comportamiento de muros de mampostería.

CAPÍTULO III

En el tercer capítulo se presentan las principales definiciones y materiales que componen la mampostería, así como sus propiedades mecánicas. También se explica en qué consisten el fenómeno de la subsidencia, las causas que la originan y sus manifestaciones en Aguascalientes.

CAPÍTULO IV

En el cuarto capítulo se presenta el diseño de experimento, en donde se describe detalladamente las características geométricas del modelo, las interacciones entre sus elementos y las propiedades de los materiales que lo componen.

CAPÍTULO V

En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos en las campañas experimentales I y II, así como todo el proceso de calibración.

CAPÍTULO VI

En el sexto capítulo se analizan los resultados obtenidos y se elaboran las curvas de fragilidad para daño leve, moderado y severo, que corresponden a muros de mampostería con diferentes dimensiones.

CAPÍTULO VII

En el séptimo capítulo se plantean las conclusiones a las que se arribaron al concluir la investigación.

CAPÍTULO VIII

En el octavo capítulo se proponen algunas recomendaciones para la continuidad de la presente investigación.

CAPÍTULO IX

En el noveno capítulo quedan plasmadas las referencias utilizadas para el desarrollo de la presente tesis.



***CAPÍTULO II:
ESTADO DEL CONOCIMIENTO***

Capítulo II: Estado del Conocimiento.

2.1 Principales estudios numéricos en muros de mampostería.

El investigador Juan Diego Jaramillo en el año 2002 utiliza el método de elementos finitos para estudiar los mecanismos de resistencia sísmica de la mampostería no reforzada. Para ello considera dos muros a base de bloques macizos cuyas dimensiones se especifican en la tabla 1.

Tabla 1: Dimensiones de los muros (Jaramillo, 2002).

	Dimensiones del bloque (cm)	Espesor del mortero (cm)
Muro 1	23x9x7.5	1.0
Muro 2	38.5x19x14	1.0

Con el objetivo de simplificar sus modelos, Jaramillo desprecia el aporte a tensión del mortero y no considera cargas verticales, ni restricciones al desplazamiento en este sentido.

Para demostrar la validez de su investigación, lleva a cabo una campaña experimental en la que cada modelo es sometido a diferentes valores de aceleración y luego compara los valores obtenidos en el laboratorio, con los numéricos.

En el muro 1 la aceleración resistente predicha por el modelo fue de 0.95 g, sin embargo en las pruebas de laboratorio se alcanzó un valor menor de aproximadamente 0.85 g y por el contrario, el momento resistente de las hileras interiores de ladrillo fue de 265 N·m en el análisis numérico y de 311 N·m en los ensayos.

En el muro 2 la aceleración resistente predicha por el modelo fue de 1.68 g, que está por debajo de la última que se logró registrar en el dispositivo de aplicación de cargas inerciales.

El autor plantea que a pesar de que en algunos casos las desviaciones entre lo predicho por el modelo y lo medido en los ensayos llega al 15%, los números estimados con el modelo dan ideas muy claras de lo que se puede esperar en cuanto a la aceleración resistente.

Finalmente los modelos propuestos por Jaramillo permiten explicar algunos de los daños en edificaciones de mampostería no reforzada después de sismos intensos y llamar la

atención sobre algunas prácticas en la construcción, que reducen considerablemente la resistencia en los muros de mampostería.

El investigador Gabriel Francisco Aráoz (2007) obtiene una curva de fragilidad para un muro de mampostería bajo la acción de cargas explosivas, utilizando el software AUTODYN, basado en el método de elementos finitos.

En sus modelos consideró un muro de mampostería empotrado en todos sus bordes y con dimensiones de: 3.04 m de ancho, 3.04 m de altura y 0.15 m de espesor, asumiendo un módulo de elasticidad de 1367770 KPa y un coeficiente de Poisson de 0.15.

Para la aplicación de la carga consideró un volumen de aire de 3.04 m de ancho x 3.04 m de alto x 5.00 m de largo, por donde se propaga la onda explosiva y en el cual está inmerso el muro. La carga se considera en el centro de la sección transversal con valores desde 0.10 Kg hasta 100 Kg (Ver figura 1).

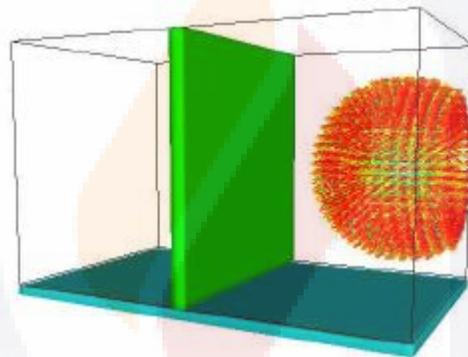


Figura 1: Perspectiva del modelo numérico (ubicación del muro y de la carga explosiva) (Francisco, 2007).

El autor analiza varios modelos numéricos en los que considera 10 valores distintos de límite de erosión (obtenidos de forma aleatoria), hasta llegar a un límite de máximo de 0.2, que corresponde a un daño severo.

Aráoz concluye que el límite de erosión de la estructura tiene una gran influencia en la probabilidad de colapso de la misma y que las curvas de fragilidad permiten tener en cuenta las incertidumbres propias del material (Ver figura 2).

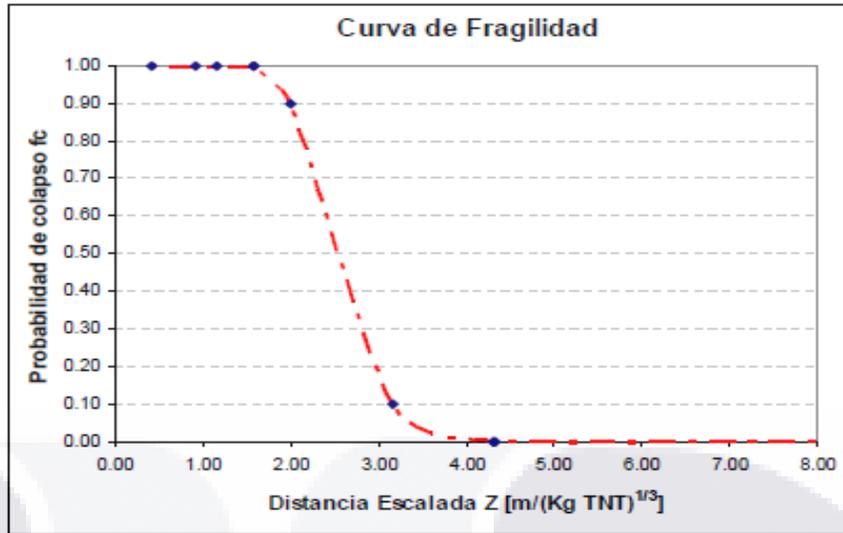


Figura 2: Curva de fragilidad del muro (Francisco, 2007).

En el año 2009 los investigadores E. Dumova-Jovanoska y S. Churilov, utilizaron la micro-modelación para obtener un modelo calibrado de muros mampostería, a través del cual se pudiera estudiar el comportamiento de este elemento estructural. Para ello utilizaron resultados experimentales obtenidos en el proyecto PROHITECH (Protección contra terremotos de Edificios Históricos construidos con tecnologías mixtas) y el software UDEC 2005.

En esta investigación los autores realizan un análisis no lineal, en el que varían de forma aleatoria, las propiedades de las piezas y el mortero, la geometría del modelo y sus condiciones de frontera, con el objetivo de comparar los diferentes mecanismos de falla y obtener la capacidad de carga final de la estructura.

Para simplificar sus modelos consideraron las piezas como elementos continuos deformables y el mortero como un elemento discontinuo. Para describir el comportamiento del material, utilizaron el modelo constitutivo Mohr-Coulomb.

En la modelación utilizaron el método de elementos discretos, que considera un comportamiento no lineal de los materiales y utiliza el mismo algoritmo tanto para el análisis estático como para el dinámico.

Finalmente los autores comparan las curvas de desplazamiento - carga vertical obtenidas numéricamente, con los resultados experimentales, observando que ambas tienen un comportamiento similar (Ver figura 3 y 4).

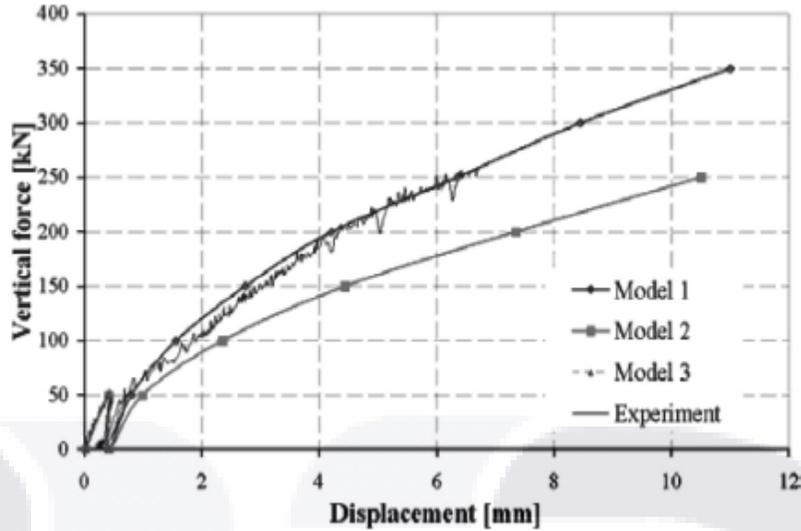


Figura 3: Comparación de los resultados numéricos y experimentales en la sección longitudinal del muro (D.-J. E. & S., 2009).

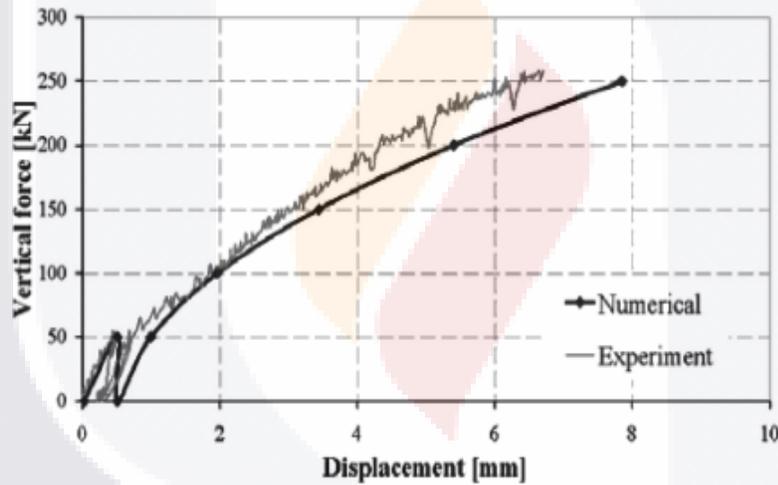


Figura 4: Comparación de los resultados numéricos y experimentales en la sección transversal del muro (D.-J. E. & S., 2009).

Los investigadores demuestran que tanto el análisis numérico como el método de elementos discretos, son capaces de reproducir con elevada precisión, el mecanismo de falla de una estructura compuesta por muros de mampostería.

En el año 1997 Paulo B. Lourenco y Jan G. Rots llevaron a cabo una investigación encaminada a estudiar el comportamiento de muros de mampostería no reforzada, considerando las interacciones entre las piezas y el mortero. Para ello utilizaron un

modelo constitutivo elasto-plástico Mohr-Coulomb, elementos finitos de 8 nodos y tabiques como elementos discontinuos en contacto con el mortero. Finalmente obtienen curvas de desplazamiento horizontal - cargas horizontales, que describen correctamente el comportamiento del muro (Ver figura 5).

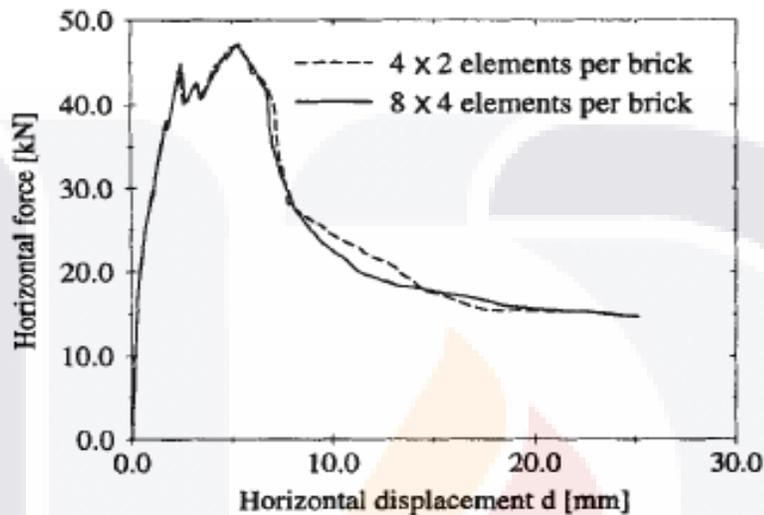


Figura 5: Desplazamiento horizontal - Carga horizontal para dos mallados diferentes (B. & G., 1997).

Al finalizar la investigación, los autores demuestran que la micro-modelación detallada es capaz de reproducir todos los mecanismos de falla de los muros, por lo que concluyen que es un método muy eficiente para diseñar estructuras de mampostería.

En el año 2001 los investigadores Agustín Orduña y A. Gustavo Ayala, desarrollaron una investigación encaminada a obtener un modelo numérico de muros de mampostería confinada, capaz de reproducir su comportamiento frente a cargas laterales.

Para ello consideraron un modelo no lineal de elementos finitos, utilizando el software DIANA (TNO 1996), que fue calibrado a partir de ensayos experimentales.

El muro de mampostería y las juntas de mortero se modelaron con elementos cuadriláteros de cuatro nodos.

Para el mortero consideraron un modelo constitutivo Von Mises para falla en compresión y Rankine para falla en tensión, en la mampostería consideraron el modelo Von Mises para falla en compresión y un criterio lineal para la tensión.

Orduña y Ayala utilizaron tres modelos de diferente geometría, en el primero analizaban el muro como un elemento continuo, en el segundo consideraron los muros como 3 diagonales apoyadas en los marcos de concreto y en el último consideraron el muro como una diagonal, resultando un modelo más simplificado.

Finalmente obtuvieron gráficos de carga - deformación angular para cada geometría (Ver figura 6).

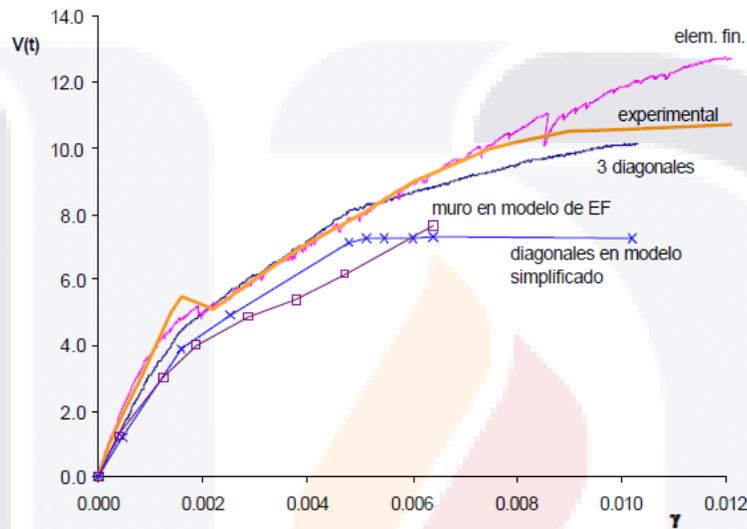


Figura 6: Gráficos de carga-deformación angular (Agustín & Gustavo, 2001).

Al finalizar la investigación los autores concluyen que a través de los modelos numéricos basados en el método de elementos finitos, se puede reproducir satisfactoriamente el comportamiento de los muros de mampostería frente a carga lateral, al menos hasta los niveles de distorsión permitidos por los reglamentos de construcción. También plantean que el modelo de las tres diagonales tiene el potencial de representar las principales características del comportamiento de los muros diafragma de mampostería, por lo que una vez desarrollado completamente puede convertirse en una herramienta poderosa para el análisis y diseño de estos elementos.

Los investigadores Mariana Asinaria, Carlos A. Pratob, Andrea Pennac y Guido Magenesd, desarrollaron varios modelos numéricos para estudiar el comportamiento de

paneles de mampostería encadenada, sometidos a cargas laterales utilizando macro-elementos.

En su investigación consideraron un comportamiento no lineal de los materiales a través del software TREMURI y se analizaron 11 muros de diferente geometría. Además tuvieron en cuenta dos mecanismos de falla, uno por corte-deslizamiento y otro por flexo-rotación. El modelo se analizó considerando un desplazamiento de 1 mm y una carga vertical de 208.25 kN, así como elementos finitos de 8 nodos. Los autores llevaron a cabo un análisis pushover y obtuvieron la curva de histéresis desplazamiento lateral - fuerza lateral, la que compararon con resultados experimentales para calibrar sus modelos. (Ver figura 7).

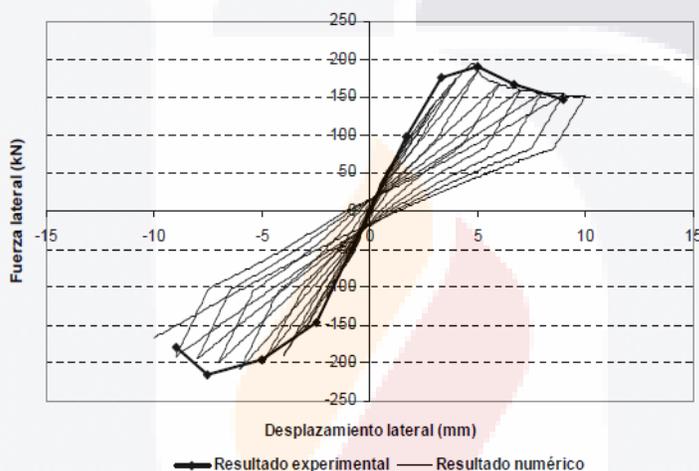


Figura 7: Curva de histéresis desplazamiento lateral - fuerza lateral (Mariana, A, Andrea, & Guido, 2005).

Al finalizar la investigación los autores concluyen que el modelo de macro-elementos representa un criterio simple, pero adecuado para estimar la resistencia de los muros de mampostería encadenada sometidos a acciones laterales y que la modelación utilizando el software TREMURI es capaz de representar la falla del panel de mampostería y de las columnas del encadenado.

En el año 2017, Massimo Petracca, Luca Pelá, Riccardo Rossia, Stefano Zaghia, Guido Camatac y Enrico Spaconec desarrollaron una investigación encaminada a comparar los resultados de análisis numéricos a micro-escala (continuos y discretos), en muros de mampostería frente a cargas de corte.

“Un micro-modelo discreto discretiza la microestructura de la mampostería con interfaces no lineales para el mortero y elementos continuos para las unidades. El micro-modelo continuo discretiza ambas unidades (mortero y juntas) con elementos continuos” (Massimo et al., 2017)

Los autores proponen un micro-modelo continuo en 2D, cuyos resultados se comparan con dos micro-modelos discretos también analizados en 2D y luego con un modelo en 3D, para ello utilizaron el software Kratos Multiphysics.

Las propiedades de los materiales y las interacciones entre los elementos se definieron a través del modelo constitutivo Mohr-Coulomb.

Finalmente los autores concluyen que el comportamiento de los tres modelos (2D) seleccionados, ofrecen similares resultados entre ellos y con las pruebas de laboratorio y que básicamente las diferencias están en que cada modelo introduce simplificaciones diferentes (Ver figura 8, 9 y 10).

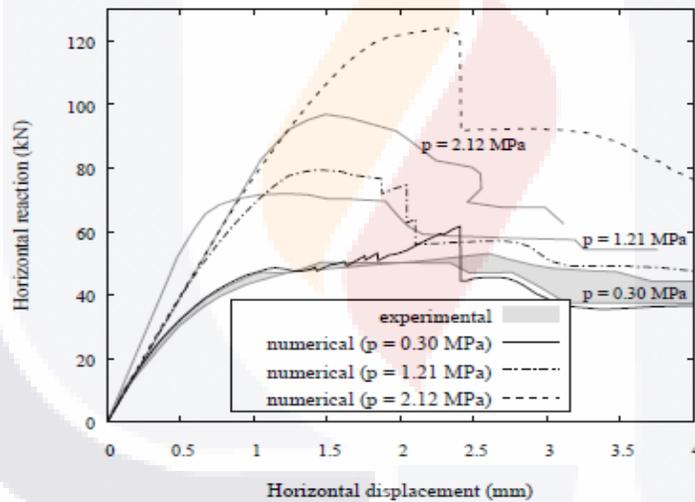


Figura 8: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo discreto 1) (Massimo et al., 2017).

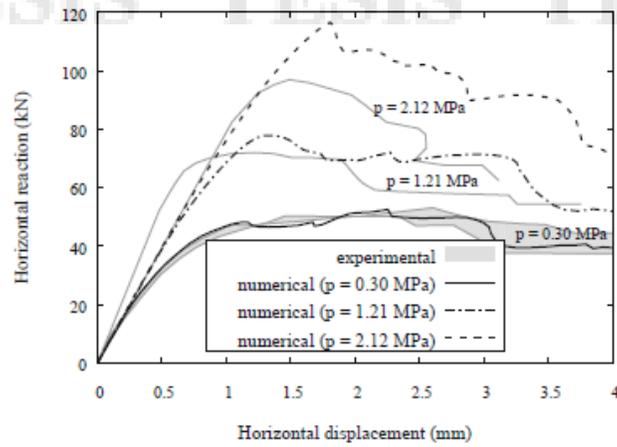


Figura 9: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo discreto 2) (Massimo et al., 2017).

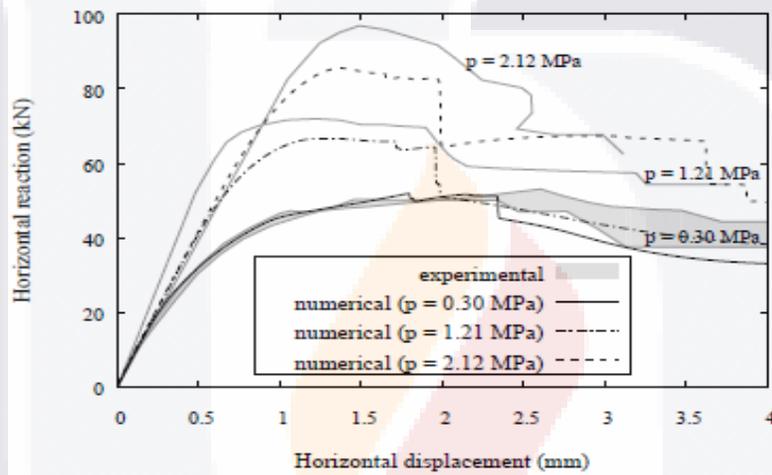


Figura 10: Curva carga - desplazamiento para diferentes valores de pre-compresión (micro-modelo continuo) (Massimo et al., 2017).

Sin embargo si se comparan los modelos 3D, con los modelos 2D, se puede observar una ligera subestimación de la resistencia al corte de los muros en estos últimos.

En el año 2016 Mario Covarrubias Navarro y Fabián Ruvalcaba Ayala utilizaron el software Abaqus/CAE para estudiar el comportamiento térmico-estructural de muros de mampostería en dos etapas: acoplada y no acoplada.

Los investigadores simularon la acción del fuego a través del modelo térmico de transferencia de calor y el comportamiento de la estructura con el modelo estructural de plasticidad del concreto dañado (PCD).

Para la modelación de las piezas y el mortero se utilizaron elementos continuos tridimensionales de ocho nodos (C3D8), que admite tres grados de libertad de desplazamiento y para el modelo no acoplado de transferencia de calor los elementos

DC3D8. El mallado es de dimensiones 10x10x10 mm en las piezas y en el mortero sigue una relación semejante pero de menor dimensión, ajustándose al espesor de la junta. Finalmente los investigadores obtuvieron un gráfico esfuerzo - deformación para el muro, que fue sometido a temperaturas de hasta 800°C (Ver figura 11).

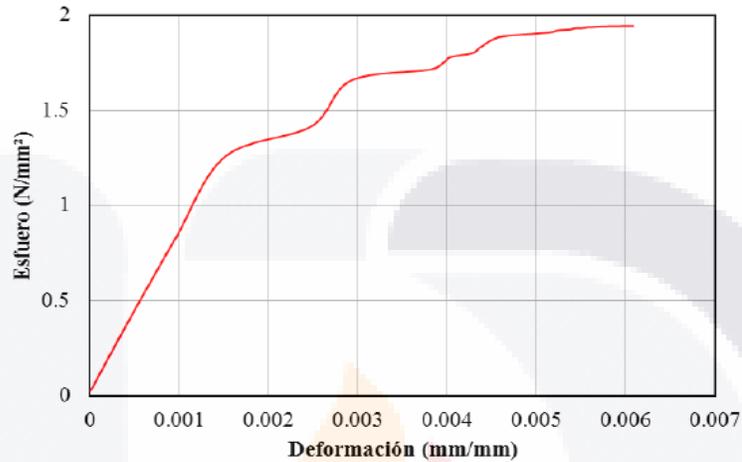


Figura 11: Gráfico de esfuerzo-deformación para el muro de mampostería (Mario & Fabián, 2016).

Al concluir la investigación se demostró el alcance del modelo térmico-estructural acoplado, se observó la consistencia en los resultados, obteniendo valores cercanos a los resultados experimentales y se presentaron los fenómenos característicos del comportamiento de los muros de mampostería cuando están sometidos a altas temperaturas.

En el año 2009 el investigador Álvaro Viviescas Jaimes propone un método de análisis simplificado para muros macizos de mampostería sometidos a estados de cargas biaxiales en el plano. Para ello utiliza la micro-modelación y evalúa la incidencia de la geometría y los materiales en la respuesta del modelo.

El autor utiliza un elemento finito de 8 nodos para analizar el comportamiento de los bloques y representa la interface ladrillo-mortero con una junta de espesor nulo de 6 nodos.

Finalmente concluye, que dependiendo del estado de compresiones a las que se encuentre sometido el muro, el mecanismo de rotura evoluciona desde un fallo por deslizamiento a través de las juntas de contacto horizontales (zona I), pasando por un

estado intermedio correspondiente a la fisuración diagonal de unidades y mortero (zona II), hasta llegar a un fallo del elemento por compresión o aplastamiento (zona III) (Ver figura 12).

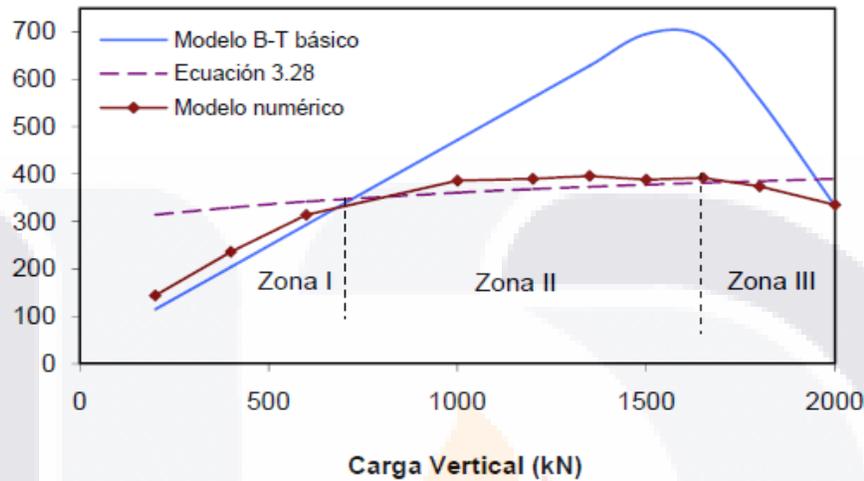


Figura 12: Comparativa de modelos (B-T básico, modelo analítico y modelo numérico) (Alvaro, 2009).

Viviescas demuestra que la cohesión es un parámetro con gran influencia en la respuesta del muro y que a medida que aumenta, crece la capacidad resistente de la estructura. Además concluye que la micro-modelación es una herramienta que permite reproducir con gran exactitud el comportamiento de los muros de mampostería, bajo diferentes condiciones de cargas.

2.2 Principales estudios numéricos en muros de mampostería sometidos a asentamientos diferenciales.

El investigador Leonel Campos Rodríguez en el año 2012, estudió la relación entre los hundimientos diferenciales del terreno y el agrietamiento en los muros de mampostería confinada, utilizando como herramienta computacional el software ANSYS.

Para ello definió 6 modelos numéricos (el modelo 1 considera dos vanos para ventanas, mientras el modelo 2 considera un solo vano y los modelos 3, 4, 5 y 6 se consideraron sin vanos usando relaciones altura/longitud de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0, sometidos a cuatro condiciones de carga diferentes (desplazamiento al centro de 10 mm con distribución

parabólica, desplazamiento de 16 mm en la columna, desplazamiento de 16 mm en los dos extremos y desplazamiento de 16 mm en un extremo).

Campos concluye que para las geometrías 1 y 2 existe mayor esfuerzo, para un desplazamiento unitario de 1 mm, cuando se considera el muro confinado, sin embargo para alcanzar el esfuerzo de fractura $\sigma=0.147 \text{ kg/mm}^2$, se observa que donde no existe confinamiento se necesita mayor desplazamiento, debido a la rigidez impuesta por la trabe (Ver figura 13 y 14).

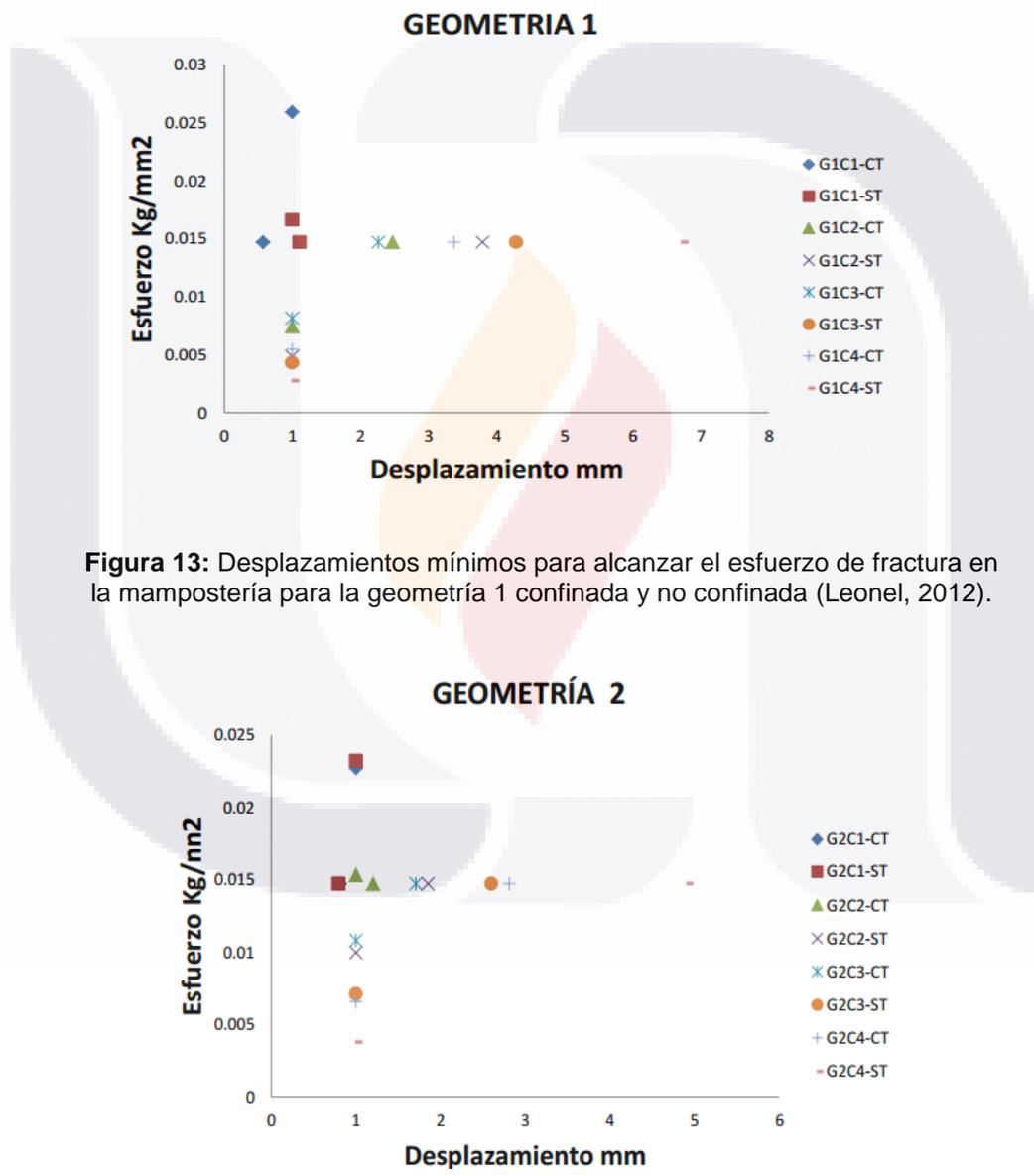


Figura 13: Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la geometría 1 confinada y no confinada (Leonel, 2012).

Figura 14: Desplazamientos mínimos para alcanzar el esfuerzo de fractura en la mampostería para la geometría 2 confinada y no confinada (Leonel, 2012).

Además plantea que en las geometrías 3, 4, 5 y 6, la mayor resistencia se obtiene cuando la relación altura longitud es igual a 0,5 y que a medida que aumenta esta relación disminuye la confiabilidad del muro.

En el año 2016, Daniel Lara desarrolló un estudio del comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia, el cual dividió en dos etapas fundamentales: experimental y numérica.

Para el análisis numérico se utilizó el software Abaqus/CAE, considerando un micro-modelado continuo y uno discreto. La interacción entre los elementos se consideró de tipo “Hard-contact” con un coeficiente de fricción de 0.5 (Ver figura 15 y 16).

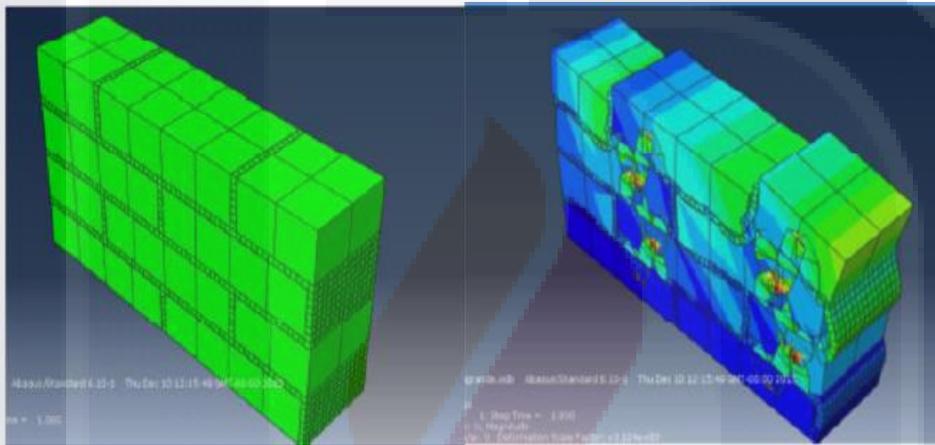


Figura 15: Micro-modelado detallado del muro (Lara, 2016).

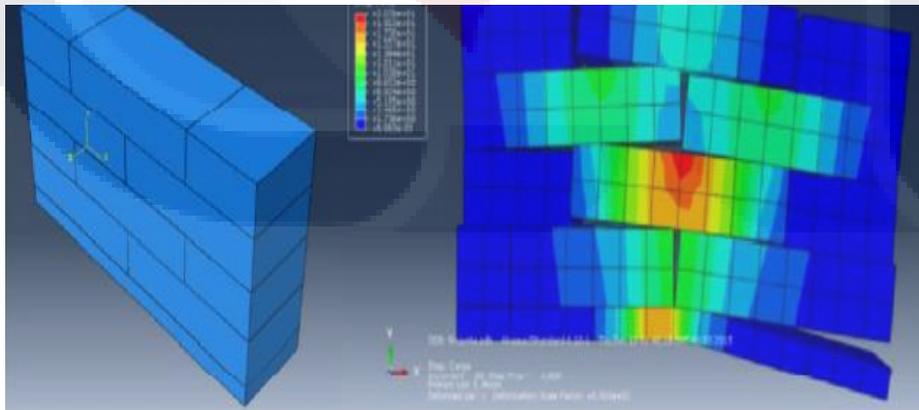


Figura 16: Micro-modelado simplificado del muro (Lara, 2016).

El autor utiliza un modelo simplificado para reducir el tiempo de cómputo y considera elementos cuadriláteros de cuatro nodos (C3D8R), para analizar el comportamiento de los tabiques.

Finalmente se modelaron cinco muros de mampostería y se obtuvieron curvas esfuerzo-distorsión angular, en las que se pudo apreciar el estado de daño de cada elemento en función del valor de la distorsión angular, tomando como referencia los valores propuestos por Meli en 2014 (Ver figura 17).

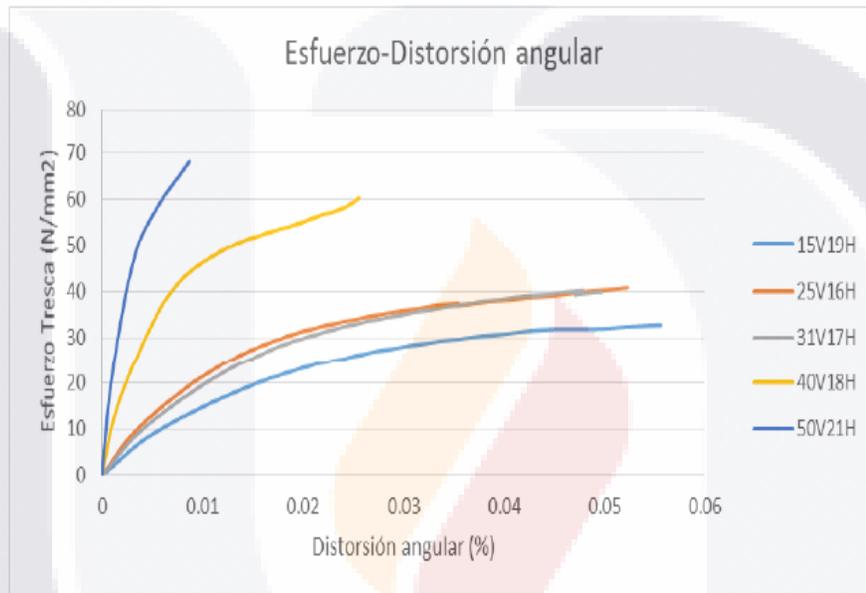


Figura 17: Gráfico esfuerzo-distorsión angular de los muros analizados (Lara, 2016).

Lara concluye que la diferencia en el comportamiento de los muros se debe principalmente al estado de esfuerzos al que se encuentran sometidos en su etapa inicial, reafirmando que el estado de esfuerzos del muro define el tipo de falla que luego presentará.

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



***CAPÍTULO III:
MARCO TEÓRICO***

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

Capítulo III: Marco Teórico.

3.1 Mampostería.

3.1.2 Primeros usos de la mampostería.

Desde los tiempos más antiguos hasta nuestros días se pueden observar una gran variedad de construcciones de mampostería, algunas que, aun en la actualidad, con técnicas y maquinarias modernas sería muy difícil y costoso poder reproducirlas.

Las primeras civilizaciones se asentaban cerca de las riberas de los ríos y utilizaban los materiales depositados en ambientes aluviales para formar ladrillos, con los que construían sus propias viviendas. La cultura mesopotámica se ubicó entre los ríos Tigris y Éufrates y creó toda una arquitectura con ladrillos. Los egipcios utilizaron las rocas provenientes de las montañas del valle del Nilo para la construcción de parte de sus monumentos más espectaculares. Algunas ciudades de poco más de 10000 años encontradas en Babilonia, Estados Unidos, América Central y América del Sur, utilizaban en sus construcciones ladrillos de barro secados al sol.

Los primeros indicios del uso de la mampostería como material compuesto se observan en construcciones antiguas que utilizaban en sus paredes un conjunto de agregados de diferentes tamaños que eran unidos unos con otros utilizando tierra húmeda como mortero. Los egipcios utilizaban yeso calcinado y los griegos y romanos una mezcla de limo con agua, al que le adicionaron posteriormente arenas, rocas o ladrillos obteniendo los primeros tipos de concreto.

Dentro de las construcciones más espectaculares de mampostería destacan el Coliseo Romano, la pirámide Zigurat en Mesopotamia, el templo de Quetzal-Mariposa en Teotihuacán, el Castillo de Ruinas de Chichen Itzá, el Partenón de Atenas en Grecia, el Faro de Alejandría considerado una las siete maravillas del mundo antiguo y hasta la Gran Muralla China se compone en gran parte por ladrillos de arcilla unidos con mortero de cal.

Ya a finales del siglo XVIII y principios del XIX, se hace más extensivo el uso de la mampostería, pues surge y se patenta el cemento Portland como material aglutinante, comienzan las grandes producciones de ladrillos de arcilla macizos y extruidos secados en hornos de producción continua, se usa por primera vez la mampostería reforzada y se producen los primeros bloques de concreto.

3.1.3 Descripción general de la mampostería.

“La mampostería se identifica como un material compuesto, formado por piezas tales como ladrillos, bloques de hormigón, sillerías, piedras de cantería irregulares o adobes, ejecutadas manualmente y unidas entre sí mediante un compuesto aglutinante (mortero de cal en edificios históricos o el mortero de cemento Portland en las edificaciones contemporáneas)” (Araiza & Gerardo, 2005). Además es un material que presenta direccionalidad en sus propiedades debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad, por lo que la aparición repentina y progresiva de grietas en estas juntas puede estar indicando un fallo de la estructura, cuyas propiedades mecánicas dependen en gran medida de sus materiales componentes.

Las propiedades de los materiales componentes de la mampostería se determinan individualmente a partir de ensayos experimentales y pruebas de laboratorio. Las propiedades mecánicas del sistema en conjunto son más difíciles de predecir, debido a la gran variedad de obras de fábricas existentes, así como los diferentes procedimientos constructivos empleados.

En el diagrama esfuerzo - deformación de la mampostería (Ver figura 18) se describe el comportamiento del material frente a carga cíclicas, mostrando un excelente comportamiento en el rango elástico y una falla repentina al llegar al valor máximo de carga, donde las deformaciones comienzan a ser plásticas.

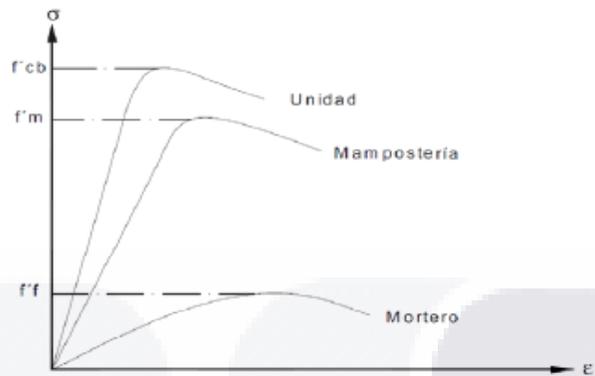


Figura 18: Relaciones esfuerzo – deformación para mortero, las unidades aisladas y los paneles de mampostería (Chiquillo, A., & Y., 2011).

3.1.4 Unidades o piezas que componen la mampostería.

Las piezas o unidades son los componentes básicos de la mampostería, estas pueden ser piedra labrada, cerámica, bloques de concreto o ladrillos. Su geometría y propiedades mecánicas dependen fundamentalmente de la naturaleza de la piedra o ladrillo y deben cumplir con los requisitos de calidad que establecen las Normas Mexicanas NMX-C-006, NMX-C-010 y NMX-404-ONNCE.

3.1.4.1. Geometría.

Las piezas que componen la mampostería pueden ser macizas o huecas. “En caso de piezas macizas su sección transversal más desfavorable deberá ser por lo menos el 75% del área bruta y con espesores mayores de 20 mm, para las piezas huecas la sección transversal más desfavorable deberá ser por lo menos el 50 % del área bruta, con espesores de entre 13 y 15 mm” (Arnal, Luis, & Max, 2005).

3.1.4.2 Peso volumétrico.

El peso volumétrico mínimo de las piezas que componen la mampostería, en estado seco, oscila entre 13 y 17 kN/m³ (Ver tabla 2).

Tabla 2: Peso volumétrico neto mínimo de piezas en estado seco (Arnal et al., 2005).

Tipo de pieza	Peso volumétrico (kN/m ³)
Tabique de barro recocido	13
Tabique de barro con huecos verticales	17
Bloque de concreto	17
Tabique de concreto (tabicón)	15

3.1.4.3 Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión de las piezas de mampostería depende en gran medida de la naturaleza de la pieza, esta se determina experimentalmente de acuerdo con los ensayos especificados en la norma NMX-C-036. "En los diseños se empleará un valor de la resistencia (f_p^*) medida sobre el área bruta y que corresponde al 98% del valor alcanzado por cada una de las piezas producidas" (Arnal et al., 2005). Según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal del año 2004, la resistencia a compresión (f_p^*) de cada pieza se determina utilizando la siguiente expresión:

$$f_p^* = \frac{f_p}{1 + 2.5C_p}$$

Donde:

f_p : media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta.

C_p : coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

3.1.4.4 Resistencia a tensión y flexo-tensión.

La mampostería se caracteriza por tener una baja resistencia a tensión, sin embargo sus materiales componentes no carecen de esta propiedad mecánica. La resistencia a tensión está muy relacionada con la resistencia a flexo-tensión y con las dimensiones de las probetas, pues en muchas ocasiones su valor se determina experimentalmente utilizando

los valores de flexo-tensión. “También en algunos casos se considera la resistencia a tensión entre el 5 y el 10% de la resistencia a compresión de la pieza” (Alvaro, 2009).

3.1.4.5 Módulo de elasticidad.

Francisco J. Marulanda Ocampo plantea en su tesis de maestría del año 2012, que el módulo de elasticidad de la mampostería se determina a través de la curva esfuerzo deformación del material y su valor depende mayormente de las características del mortero, por considerarse el material de menor rigidez dentro del compuesto.

3.1.4.6 Morteros.

Los morteros en la construcción se consideran mezclas compuesta por un material aglomerante, áridos finos, agua y en algunas ocasiones aditivos. En el caso de la mampostería como material compuesto, predominan los morteros que utilizan el cemento hidráulico y la cal hidratada como cementante.

Los morteros utilizados en la mampostería no requieren una alta resistencia a compresión, debido a que sus principales funciones dentro del compuesto son rellenar las juntas impidiendo el paso del agua, regularizar el asiento entre bloques o unidades y repartir uniformemente las sollicitaciones. El valor de la resistencia a compresión se determina a través de los ensayos especificados en la norma NMX-C-061-ONNCCE.

3.1.4.7 Resistencia a compresión de los morteros.

Según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Luis Arnal Simón y Max Betancourt Suárez, 2004), los morteros que se utilicen en la construcción de elementos estructurales de mampostería, deberán cumplir con los siguientes requisitos:

- Su resistencia a compresión será por lo menos de 4 MPa.
- Deberá utilizar un contenido mínimo de cemento según se indica en la tabla 3.
- La dosificación arena cemento estará entre 2.25 y 3.
- El contenido de agua será mínimo.
- El mortero deberá tener una alta laborabilidad.

Tabla 3: Proporciones en volumen recomendadas, para morteros estructurales (Arnal et al., 2005).

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento	Partes de cal hidratada	Partes de arena.	Resistencia nominal a compresión en (MPa).
I	1	-	0 a ¼	Relación-arena cemento:	12.5
	1	0 a ½	-		
II	1	-	¼ a ½	o: entre 2.25 y 3.	7.5
	1	½ a 1	-		
III	1	-	¼ a 1 ¼		4

Los morteros de relleno en elementos estructurales de mampostería deberán tener una resistencia a compresión de al menos 12.5 MPa, con áridos que no excedan los 10 mm de tamaño máximo y un contenido de agua que asegure la fluidez de la mezcla.

3.1.5 Propiedades mecánicas de la mampostería.

El correcto conocimiento del comportamiento resistente de la mampostería ha sido objeto de muchas investigaciones en los últimos años, todas ellas con el objetivo común de poder desarrollar herramientas apropiadas de diseño y comprobación para estas estructuras. Dentro de las propiedades mecánicas de la mampostería destaca su baja resistencia a tensión y su excelente resistencia a compresión.

2.1.5.1 Comportamiento bajo cargas de tensión uniaxial.

“La resistencia a tensión de la mampostería depende de la resistencia a tensión de la unión ladrillo-mortero. Para cargas a tensión en sentido perpendicular a las juntas de mortero, el colapso es causado por la disminución de la resistencia a tensión relativa en la interface ladrillo-mortero”(J., S., & E., 1998). Sin embargo en el caso de uniones ladrillo-

mortero de alta resistencia y presencia de piezas perforadas, la falla por tensión puede ocurrir en la unidad antes que en la unión.

El comportamiento de la mampostería bajo cargas de tensión uniaxial ha sido parte de varias investigaciones y campañas experimentales, todas con el objetivo de establecer un ensayo que logre describir de manera correcta el comportamiento del material frente a esta sollicitación.

Backes (1985) desarrolló un estudio en el que analizaba el comportamiento a tensión de las juntas horizontales de la mampostería, donde obtuvo curvas de carga - desplazamiento por control de desplazamiento y observó dos tipos de fallo en las juntas. El primero de ellos se presentaba como una grieta diagonal y escalonada a través de las juntas horizontales y verticales y el segundo eran pequeñas fisuras prácticamente verticales a través de las unidades y juntas verticales (Ver figura 19).

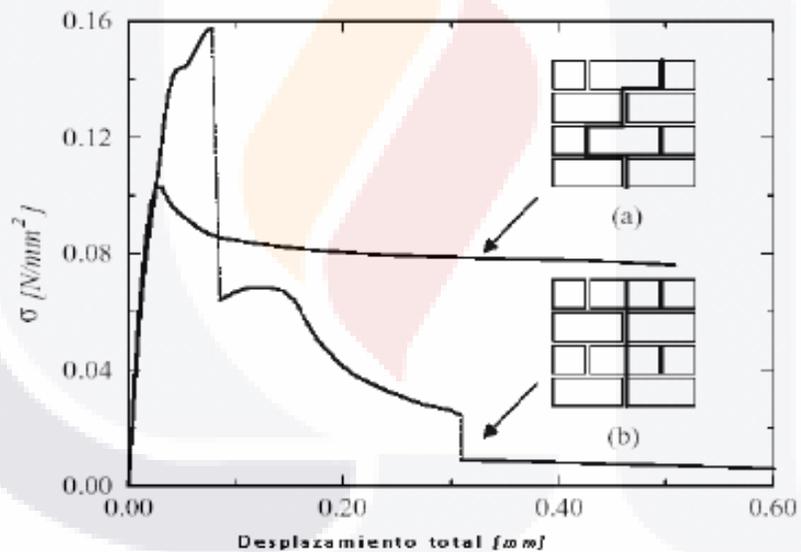


Figura 19: Diagramas experimentales típicos tensión - desplazamiento para tracción en la dirección paralela a las juntas horizontales, (Bakes, 1985): a) falla por diagonal escalonada a través de juntas horizontales y verticales b) falla vertical a través de juntas (Alvaro, 2009).

En 1992 el investigador Pluijm realizó ensayos de tensión directa sobre probetas de mampostería, considerando una carga monotónica actuando sobre bloques de arcilla, unidos por un mortero de cemento hidráulico. A través de esta investigación pudo concluir

que el área de contacto de las probetas ensayadas era menor que la de su sección transversal.

En la actualidad solo existen dos grupos de ensayos para determinar la resistencia a tensión uniaxial de la interface ladrillo - mortero (ensayos a tensión directa y ensayos a flexión), aunque parte de la comunidad científica recomienda utilizar los ensayos a tensión directa por considerar que estos ofrecen resultados más cercanos a la realidad.

3.1.5.2 Comportamiento bajo cargas de compresión uniaxial.

La excelente resistencia a compresión de la mampostería está dada fundamentalmente por el aporte de sus materiales componentes y se considera un valor intermedio entre la resistencia a compresión de las piezas y el mortero. Esta interacción está dada por el confinamiento que aportan las piezas al mortero, el que aumenta su resistencia a medida que aumenta el confinamiento (Ver figura 20).

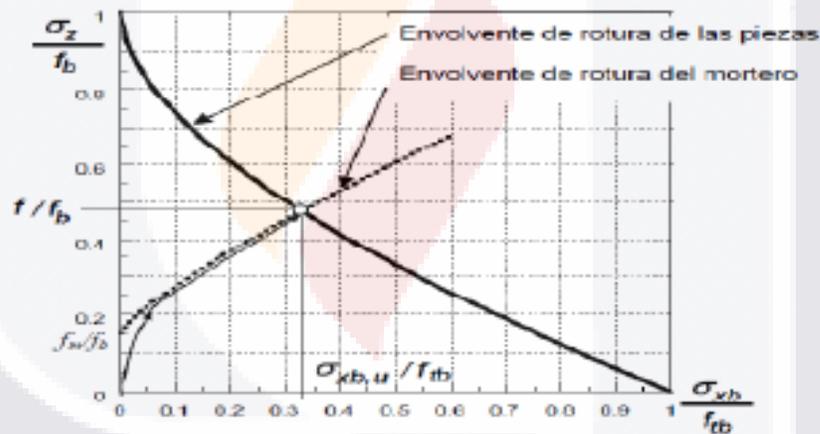


Figura 20: Estado tensional en la unidad y el mortero en la mampostería sometida a esfuerzos de compresión (Chiquillo et al., 2011).

Varias son las pruebas experimentales que se utilizan para obtener la resistencia a compresión uniaxial de la mampostería, un ensayo muy usado es el del prisma con elementos apilados, aunque los resultados que se obtienen presentan un alto grado de incertidumbre. Otro de los ensayos utilizados es el RILEM, a través del cual se obtienen resultados más confiables, pero es un ensayo que requiere una mayor cantidad de tiempo y recursos (Ver figura 21).

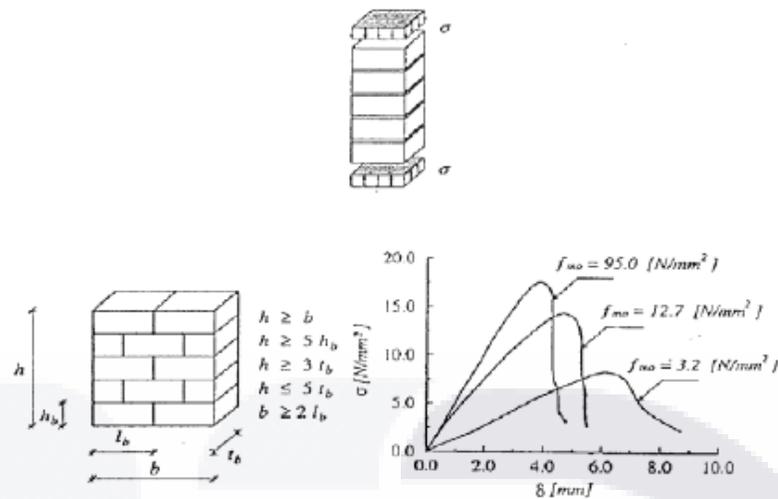


Figura 21: Comportamiento uniaxial de la mampostería bajo cargas horizontales normal al plano de las juntas horizontales. a) Columna de unidades y mortero. b) Probeta para ensayo RILEM. c) Diagrama tensión - deformación para diferentes valores de la resistencia (Chiquillo et al., 2011).

Las investigaciones realizadas por McNary y Abrams (1985), Naraine y Sinha (1989) y Anthoine (1992) plantean que la compresión uniaxial de la mampostería conduce a un estado triaxial de compresión en el mortero y a una compresión - tensión en el ladrillo, que indican que las primeras fisuras verticales aparecen en el ladrillo a lo largo de la línea media de las piezas, coincidiendo usualmente con la continuación de las juntas verticales del mortero. Además concluyen que los primeros indicios del fallo de la mampostería a compresión uniaxial son las fisuras verticales o la segmentación de las piezas.

3.1.5.3 Comportamiento de la mampostería frente cargas de cortante.

“El cortante es la sollicitación que rige el tipo de fallo en muros de mampostería sometidos a esfuerzos biaxiales, encontrándose estos altamente influenciados por el nivel de esfuerzos de compresión normales a las juntas horizontales” (Alvaro, 2009). Existen varios ensayos experimentales que caracterizan con elevada precisión el comportamiento de la mampostería frente a cargas de cortante, aunque su realización se torna un poco compleja pues se requiere mantener un estado uniforme de compresión en las juntas horizontales, evitando la presencia de esfuerzos de flexión significativos. Los ensayos más usados son el de corte directo o ensayo a un par (dos unidades y una junta) y el ensayo a tripletes (tres unidades y dos juntas) (Ver figura 22).

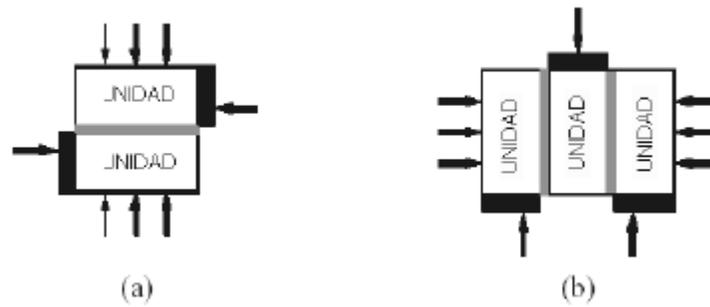


Figura 22: Ensayos establecidos para cargas de corte y compresión: a) Ensayo de un par, b) Ensayo de un triplete (Alvaro, 2009).

Pluijm en 1993 realizó una campaña experimental para estudiar el comportamiento de la mampostería frente a las sollicitaciones cortantes, para ello desarrolló una nueva configuración para los ensayos de laboratorio donde logró mantener constantes los esfuerzos de compresión. En su investigación utilizó una probeta compuesta por dos unidades y una junta rígidamente unida a los elementos metálicos que se encargan de la aplicación de la carga y finalmente obtuvo diagramas experimentales de tensiones-desplazamientos a cortante (Ver figura 23).

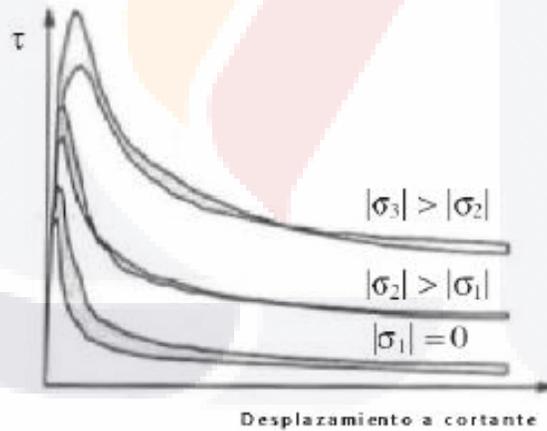


Figura 23: Diagramas experimentales tensiones – desplazamientos a cortante (Pluijm, 1993).

3.1.5.4 Comportamiento biaxial de la mampostería.

El comportamiento biaxial de la mampostería bajo estados biaxiales de tensión, puede no ser completamente descrito por una ley constitutiva bajo condiciones de carga uniaxiales.

“La influencia del estado biaxial de tensiones es importante con el fin de conocer el comportamiento resistente, el cual no puede ser descrito solamente en términos de tensiones principales, ya que la mampostería es un material anisótropo. Por tanto, la envolvente de tensiones biaxiales de mampostería puede ser descrita en términos de orientación de los ejes respecto al material y de las tensiones principales” (Leonel, 2012).

3.1.5.5 Criterios de rotura biaxial de la mampostería.

La mampostería presenta direccionalidad en sus propiedades pues las juntas de mortero actúan como planos de debilidad y disminuyen la resistencia del compuesto, debido a las diferentes orientaciones entre las tensiones principales y las juntas. Esta disminución puede ser aún mayor si las piezas tienen un marcado carácter anisótropo debido a las perforaciones, este comportamiento de la mampostería dificulta notablemente el estudio y comprensión de sus criterios de rotura biaxial.

Javier A. Charry Ablanque en el año 2009 realizó una campaña experimental para su tesis de doctorado, donde se refiere a los criterios de rotura biaxial de la mampostería, a través de una superficie tridimensional en términos de dos tensiones principales ($\sigma_1 > \sigma_3$) y su orientación con respecto a las juntas horizontales (θ), o bien las tensiones normales y paralelas a las juntas (σ_n y σ_p) más la tensión tangencial en las juntas (τ) (Ver figura 24).

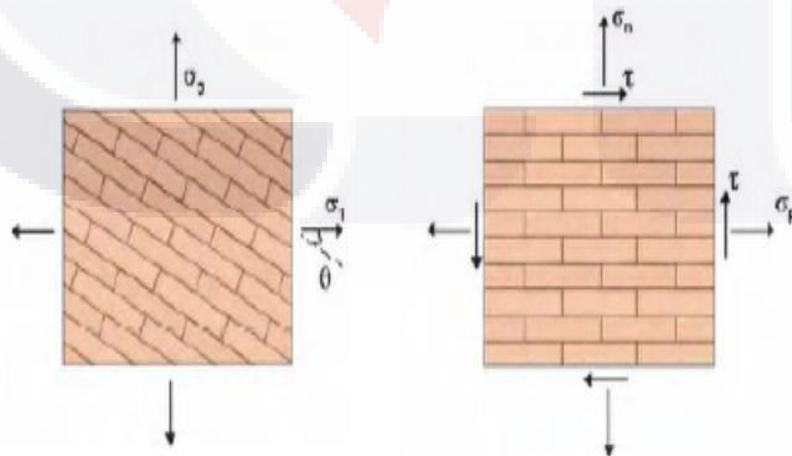


Figura 24: Formas para definir criterios de rotura biaxial para la obra de fábrica (Alberto, 2010).

3.1.5.5.1 Criterio de Rankine.

Este criterio fue formulado por Rankine en el año 1876 y tiene como principal característica, que depende únicamente de la máxima resistencia uniaxial de tensión ($\sigma_{Tm\acute{a}x}$) del material. Lo que conduce a los investigadores a suponer que la fractura ocurre cuando la máxima tensión principal alcanza el valor de resistencia uniaxial a tensión, donde $(\sigma_1, \sigma_3) < \sigma_{Tm\acute{a}x}$.

Investigadores como Turnšek y Čačovič (1971), Dhanasekar, Page y Kleeman (1985) y Lourenço (1996) han utilizado este criterio en sus modelaciones debido a que permite analizar la plasticidad anisótropa con relativa facilidad.

3.1.5.5.2 Criterio de Morh-Coulomb.

El modelo constitutivo Morh-Coulomb se considera uno de los primeros criterios utilizados por la mecánica de suelos para describir el comportamiento elasto-plástico de materiales frágiles como rocas, mampostería, concreto y suelos.

Este criterio fue formulado por Coulomb en 1773 y desarrollado por Morh en 1882 y depende del ángulo de fricción interna entre las partículas (ϕ) y de la cohesión (c). Según Javier A. Charry Ablanque (2010) la resistencia del material en un punto, crece a medida que aumenta el rozamiento entre partículas (τ) y este a su vez depende de la tensión normal (σ_n) y de la cohesión (c) entre ellas (Ver figura 25).

Independientemente de ser un criterio clásico, en la actualidad varios investigadores y normativas lo utilizan, debido a que sus parámetros se pueden obtener fácilmente y a su representación aceptada de las fallas en los materiales frágiles.

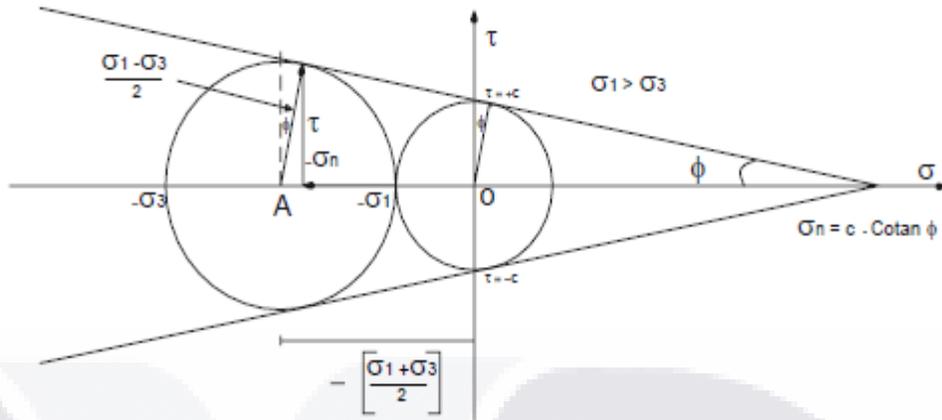


Figura 25: Representación plana del estado de tensiones en un punto según criterio Mohr-Coulomb (Alberto, 2010).

3.1.5.5.3 Criterio de Samarasinghe y Hendry.

El modelo constitutivo propuesto por Samarasinghe y Hendry en 1982 se obtuvo como resultado de su campaña experimental sobre paneles de ladrillo sometidos a tensión-compresión. Este criterio utiliza un conjunto de curvas hiperbólicas, a fin de simplificar y generalizar el fenómeno de rotura biaxial en algunos materiales (Ver figura 26).

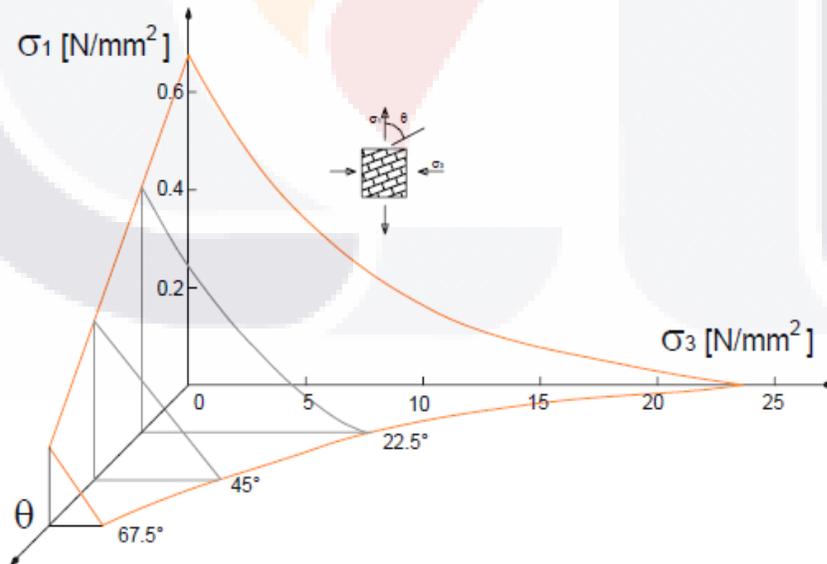


Figura 26: Superficie de rotura biaxial tensión - compresión (Samarasinghe & Hendry, 1982).

3.1.5.5.4 Criterio de Page.

El modelo constitutivo propuesto por Page (1980, 1981 y 1983), para analizar la rotura biaxial en la mampostería, se derivó de su extensa campaña experimental a escala reducida de paneles de ladrillo con mortero de cemento y cal sometidos a compresión biaxial, tensión - compresión y tensión - tensión.

Al finalizar su investigación, Page concluye con respecto a los esfuerzos tensión - tensión, que la superficie de rotura de la mampostería es directamente proporcional a la relación entre las tensiones principales y a la inclinación de la tensión principal con respecto a las juntas horizontales. También notó que la forma de rotura dependía de la relación entre la resistencia a cortante y a tensión de las juntas del panel.

El caso de compresión biaxial, Page observó dos tipos de fallos que dependían de la relación entre las tensiones principales. En los ensayos de compresión uniaxial, la rotura ocurría en el plano normal al plano del muro y en los ensayos de compresión biaxial con carga paralela a las juntas horizontales, la rotura ocurría mediante divisiones en el muro por las juntas horizontales.

En el caso de la tensión - compresión el investigador observó una disminución significativa de la resistencia del compuesto, cuando la dirección principal de tensión se acerca a la dirección normal de las juntas. “Apreciando que en todos los ensayos la rotura se producía de manera frágil, tanto en la interface, como en mecanismos mixtos de rotura de piezas y mortero” (Alberto, 2010).

3.1.5.5.4 Criterio de Lourenço.

Lourenço en 1994 y 1996 presentó un nuevo modelo constitutivo para analizar el comportamiento de la mampostería frente a sollicitaciones biaxiales, donde considera solos dos mecanismos posibles para la rotura del material, uno asociado a un proceso de fractura denotado por el agrietamiento del material y otro asociado al aplastamiento.

Este criterio es considerado como una continuación del propuesto por Rankine (tensión) y Hill (compresión). Su mayor relevancia se encuentra en considerar la anisotropía de la mampostería en base al endurecimiento y reblandecimiento del material sobre cada eje, aspectos que no se tienen en cuenta en otros modelos.

3.1.6 Interface ladrillo mortero.

La interface ladrillo mortero es el componente más débil de la mampostería, debido a la respuesta no lineal de las juntas de mortero. Esta unión se considera de naturaleza mecánica, pues al producirse el contacto mortero - ladrillo, este último succiona la lechada que penetra por sus poros capilares, hasta que endurece el material y se forma la junta mecánica entre los elementos.

Dos fenómenos diferentes caracterizan el comportamiento de la interface unidad -mortero, uno de ellos está asociado con la falla a tracción (modo I) y el otro está asociado con la falla a cortante (modo II).

3.1.6.1 Modo de falla a tracción.

El modo de falla I fue estudiado por Pluijm en el año 1992, quien realizó varios ensayos de deformación controlada sobre pequeños especímenes de obra de fábrica compuestos por unidades macizas de arcilla y silicato cálcico. Estos ensayos resultaron en una curva exponencial para el reblandecimiento por tracción, considerando una energía de fractura (G_F^I) en el rango de 0.005 a 0.02 (N/mm²) para una resistencia a tracción de la interface en el rango de 0.3 a 0.9 (N/mm²).

3.1.6.2 Modo de falla a cortante.

Para determinar la respuesta a cortante de la mampostería es necesario generar un estado uniforme de tensiones en la unión ladrillo - mortero, lo que resulta muy complicado pues las restricciones laterales introducen tensiones normales no uniformes en las juntas. El modo de fallo II (fallo a cortante) tiene una gran influencia en el comportamiento de la obra de fábrica y fue descrito con mayor detalle en la sección 3.1.5.3.

3.2 Hundimientos diferenciales.

3.2.1 Generalidades de los hundimientos diferenciales.

“Se define como hundimiento a la consolidación bajo carga de un suelo, que dependerá fundamentalmente del tipo de suelo y por tanto de la deformación máxima a asumir por este, así como del tiempo necesario para alcanzar la misma” (Xavier et al., 2006). Los

hundimientos en cimentaciones pueden ocurrir de manera inmediata (elásticos) o por consolidación, donde comienza el proceso de plastificación y se produce la falla de la estructura. Estos pueden ocurrir de manera uniforme o diferencial.

Según Xavier Broto (2006) los asentamientos diferenciales se producen en zonas localizadas de la estructura y resultan los asentamientos más problemáticos, al quedar parte de los cimientos sin el apoyo suficiente, la estructura debe deformarse y acoplarse a la nueva forma de sustentación. Generalmente la estructura no tolerará esta deformación y se producirá la rotura, manifestada en grietas y fisuras. Las principales causas que provocan la deformación del terreno, a diferentes velocidades en diferentes puntos del mismo, son la presencia de estructuras geológicas, de arcillas expansivas, de oquedades en el terreno y hasta el propio proceso de consolidación del suelo.

Los métodos analíticos desarrollados para estimar valores de asentamientos diferenciales en edificaciones, utilizan consideraciones conjuntas de la teoría de las estructuras y de la mecánica de suelo, estos métodos de diseño presentan cierta incertidumbre, debido a que la mayor parte de los asentamientos que afectan las construcciones se producen muy lentamente en el transcurso del tiempo.

En la mayoría de los casos, no es necesario tener en cuenta los hundimientos diferenciales en el diseño de la cimentación, pues a diferencia de lo que sucede para las cargas impuestas los efectos de las deformaciones tienden a disiparse conforme más se deforma la estructura. Cuando los asentamientos sean excesivamente grandes y sobrepasen ciertos límites en construcciones particularmente sensibles a los movimientos diferenciales, debe entonces realizarse un análisis estructural de sus efectos

3.2.2 Fenómeno de la subsidencia.

Según la Real Academia de la Lengua Española, “la subsidencia se define como el hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo o desecación”. El Dr. Jesús Pacheco Martínez en el año 2007, plantea que la subsidencia no es más que el fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor y agua) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de agrietamientos en la masa del

relleno granular. Esta representa un peligro geológico inducido por el hombre y afecta a muchas ciudades alrededor del mundo.

El Dr. Jesús Pacheco Martínez en el año 2011 hace referencia que el primer agrietamiento del terreno por subsidencia estudiado y documentado, ocurrió en la localidad de Picacho, en el Centro-Sur de Arizona, en una zona con un potencial de consolidación alto, rodeada de montañas y con una elevada sobreexplotación de acuíferos.

Algunos países como Estados Unidos, Japón, Italia, China, y México han sido afectados por el fenómeno de la subsidencia, provocado fundamentalmente por la extracción de agua subterránea.

Debido al amplio crecimiento y expansión progresiva de los núcleos poblacionales, ha aumentado considerablemente la demanda de agua, dejando de ser suficiente el agua superficial y teniendo que recurrir al aprovechamiento del agua subterránea. Esto ha provocado que en varias regiones la “cantidad de agua que se extrae del subsuelo sea más grande que la cantidad de agua que entra al acuífero por infiltración (sobreexplotación de acuíferos)” (Jesús & Jorge, 2007). La sobreexplotación del acuífero de una cuenca que contiene rellenos granulares, aluviales y lacustres, puede generar hundimientos graduales del terreno.

Actualmente se sabe que para que se presente la subsidencia y el agrietamiento, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Que exista un basamento incompresible con importantes irregularidades.
- Que exista un abatimiento del nivel freático importante, es decir, una variación brusca en los abatimientos piezométricos.
- Que por lo menos en algún estrato del material de relleno sobre el basamento incompresible posea una plasticidad de media a baja.

La subsidencia es un fenómeno que se puede presentar de manera profunda o superficial. La subsidencia profunda se produce entre varios centenares de metros hasta unos pocos kilómetros bajo la superficie y está fundamentalmente asociada a la extracción de petróleo y gas. La subsidencia superficial ocurre cerca de la superficie del terreno y está

relacionada fundamentalmente, a la extracción de agua subterránea, la hidrocompactación, la disolución de rocas o sales, la oxidación de materia orgánica y la actividad minera.

3.2.3 Tipos de Subsistencia.

“El fenómeno de la subsidencia no es más que la manifestación en el terreno de una serie de mecanismos de deformación de la superficie y el interior de la corteza terrestre, que se pueden clasificar en dos tipos: endógena y exógena” (Roberto, Gerardo, José, & Fernando, 2009).

La subsidencia endógena hace referencia a los hundimientos del terreno que son el resultado de la acción de procesos geológicos del interior de la superficie terrestre (pliegues, fallas, vulcanismo y sismicidad) y la exógena se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos.

Existen otras clasificaciones para referirse a la subsidencia, entre las más usadas se encuentran aquellas que se refiere a los mecanismos que la desencadenan:

- Actividades de extracción de mineral en galerías subterráneas.
- El descenso del nivel freático.
- La disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua.
- Los procesos tectónicos y sedimentación.
- Consolidación de suelos blandos u orgánicos.
- Extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos.

La subsidencia causada por la extracción de fluidos ha sido reportada desde aproximadamente los años 20 del siglo pasado y es un problema que ha aumentado considerablemente sus dimensiones. “Cualquier país en donde se tenga una intensa explotación de agua subterránea, en acuíferos constituidos por rellenos granulares, son o serán afectados por el fenómeno de la subsidencia” (Jesús, Ángel, Eduardo, & Otero, 2011).

3.2.3.1 Subsistencia por actividad minera.

Roberto Tomás, Gerardo Herrera, José Delgado y Fernando Peña, en un artículo publicado en el año 2009, se refieren a la subsidencia por actividad minera como el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de las galerías generadas para la extracción de minerales. Los valores de hundimiento por excavación minera son proporcionales a la altura del área de excavación y su probabilidad de ocurrencia se ve incrementada donde las fracturas intersectan al techo de la mina, aunque no es este el único factor que controla la ocurrencia o no del fenómeno.

Factores que controlan la subsidencia minera:

- Dimensión del techo de la mina que no se encuentra estabilizado por soportes.
- Densidad y dimensión de las fracturas del terreno.
- Espesor del material sobre yacente a la excavación minera.
- Corrientes de agua subterránea (pueden deteriorar los soportes del techo o la roca que constituye la mina).

La subsidencia provocada por este mecanismo generalmente afecta a muy pocas personas y tiene un carácter local. Un caso de hundimiento por excavación minera se presentó en el municipio de la Unión (Murcia, España) en el año 1998, cuando se produjeron notables asientos de terreno en un área aproximada de 1 km x 1 km, afectando las edificaciones de un polígono industrial que se encontraba muy cerca. La Consejería de Industria y Medio Ambiente de la zona determinó que la causa de estos asentamientos había sido el colapso de unas minas de plomo y zinc que fueron explotadas intermitentemente hasta finales del siglo XX y luego quedaron las galerías en desuso debajo de la ciudad.

En el estado de Ohio (USA) el fenómeno de la subsidencia por excavación minera ha afectado desde el año 1923, ocasionando daños graves a cimentaciones, cañerías subterráneas y carreteras.

3.2.3.2 Subsistencia por extracción de petróleo y gas.

La extracción de gas o petróleo es una de las causas principales de los hundimientos del terreno, pues provoca una reducción de la presión de poros debido a la extracción de

fluidos, mientras que la carga de la roca sobre yacente es gradualmente transferida a las rocas del reservorio (principalmente estratos de arcillas y pizarras), produciendo su compactación.

Generalmente en las zonas de extracción de petróleo o gas se observan hundimientos diferenciales hacia el centro del área, a veces acompañado de agrietamientos en la superficie del terreno. “La subsidencia relacionada exclusivamente con la extracción de gas, provoca pequeños hundimientos, mientras que la asociada a la extracción de petróleo, puede provocar asentamientos de grandes magnitudes” (Ramos, 2013).

En la industria del gas y el petróleo existen algunos casos conocidos de subsidencia, el Campo de Goose Creek, al sur de Houston, fue uno de los primeros en los que se reportó hundimiento del terreno debido a la extracción de gas y petróleo, este fenómeno comenzó a ser observado en el año 1918 y alcanzó con el tiempo un valor de 0.9 m de descenso de la superficie del terreno. El ejemplo más dramático de subsidencia relacionada a la extracción de petróleo, ha tenido lugar en Wilmington, en las cercanías de Long Beach, en donde se alcanzó un registro de 8.7 m para el período 1928 - 1972.

3.2.3.2 Subsidencia por hidrocompactación.

La subsidencia por hidrocompactación ocurre fundamentalmente por la rápida saturación de depósitos de suelo fino, que se encuentran situados sobre el manto freático, con un bajo nivel de humedad y pobremente compactados.

Según Roberto Tomás, Gerardo Herrera, José Delgado y Fernando Peña, en un artículo publicado en el año 2009, la presencia de agua puede causar dos efectos diferentes en este tipo de suelos, la disolución de los enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares, que en ambos casos sostienen las partículas de suelo para configurar su estructura.

La subsidencia por hidrocompactación es muy común en ambientes desérticos, aunque también hay algunos registros en regiones semiáridas y puede causar asentamientos entre 1 y 5 m. Este fenómeno ocurre generalmente en depósitos formados por la acción del viento, compuestos por limos arenosos (entre 0.0039 a 0.0625 mm de diámetro) o en

depósitos algo arcillosos de abanicos aluviales. En España existen suelos limosos susceptibles de sufrir este efecto en la zona de Levante y el valle del Ebro.

3.2.3.3 Subsistencia por disolución.

La disolución de materiales como el yeso, las rocas carbonatadas y el cloruro de sodio, pueden generar grandes oquedades bajo la superficie, la deformación y colapso de estas oquedades, puede provocar hundimientos del terreno con carácter localizado. Este proceso se produce fundamentalmente por la acción de medios ácidos (agua de lluvia y dióxido de carbono) sobre rocas calizas y dolomías y puede ocurrir de forma repentina (colapsos) o muy lentamente, con tasas de hundimiento comprendidas entre 12 y 120 mm/año. Los paisajes kársticos formados por cavernas y sumideros, son los más vulnerables a la ocurrencia de subsidencia por disolución.

Los problemas ambientales más comunes en relieves kársticos están asociados a la ingeniería de cimentación y a la pérdida de agua subterránea, siendo muy común la ocurrencia de asentamientos diferenciales, de erosión sub-superficial y el colapso de la superficie del terreno dentro de las cavidades subterráneas, siendo esta la manifestación más abrupta de subsidencia por disolución y la que más daños puede ocasionar.

En el municipio de Zaragoza (España) predominan las rocas calizas y las dolomías, por lo que hay una elevada presencia de relieves kársticos. Desde el año 1970 la subsidencia por disolución ha tenido un número de elevado de manifestaciones en esta zona, ocurriendo fundamentalmente por el colapso de cavidades subterráneas y ocasionando daños a edificios, carreteras, autopistas, ferrocarriles y redes de abastecimiento de agua.

Una de las manifestaciones de subsidencia por disolución que mayores pérdidas ha ocasionado hasta el presente, ocurrió en el año 1981 en Winter Peak Sinkhole, Florida, donde de manera súbita se produjo un hundimiento de 30 m de profundidad en solo 72 horas.

3.2.3.4 Subsistencia por Extracción de Agua Subterránea.

La subsidencia por extracción de agua subterránea puede ocurrir en suelos granulares porosos, meteorizados o en arcillas.

En un artículo publicado por el Dr. Jesús Pacheco Martínez en el año 2007, plantea que la extracción continua de agua del subsuelo, en suelos granulares porosos o meteorizados (basalto muy fracturado), tiene como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo por consolidación.

En el caso de las arcillas, la extracción de agua hacia la superficie provoca una reducción de la presión de poros, lo que produce un reacomodo del material sedimentario (pierde volumen y se compacta) que resulta en hundimientos en el terreno. “Por tanto una de las causas principales de subsidencia, es la compactación de sedimentos de grano fino (fundamentalmente arcillas) en un sistema de acuíferos sometidos a una severa extracción, por un largo período de tiempo, en donde el ritmo de extracción excede al de recarga” (Ramos, 2013).

Por tanto se puede concluir que este tipo de subsidencia es un riesgo geológico inducido por el hombre, que se produce de manera lenta y gradual, con magnitudes de hundimiento de solo unos pocos centímetros al año, sin embargo con el paso del tiempo estos asentamientos tienden a generar agrietamientos en viviendas, carreteras y cambios en el drenaje natural del área que se hunde.

Los acuíferos con bases irregulares generalmente producen hundimientos acompañados de grietas o desplazamientos verticales del terreno, afectando frecuentemente todo tipo de infraestructura civil, este mecanismo de subsidencia es el más extendido, severo y costoso a nivel mundial.

La subsidencia causada por extracción de agua desde el subsuelo, afecta a importantes ciudades en todo el mundo, como la Ciudad de México, Venecia, Valle de San Joaquín (EE.UU.), Taipei (Taiwán), Tokio (Japón), Pekín (China) y muchas otras.

En el valle de San Joaquín (California), se produjo uno de los casos más severos de hundimiento por extracción de agua, con un registro máximo de 9 m en el período de 1925 a 1977.

3.2.4 Subsidencia en México.

En México el fenómeno de la subsidencia se presenta en varias zonas del país donde se han dado las condiciones hidrogeológicas para la aparición de hundimientos y generación

de agrietamientos. En los valles donde se produce una intensa explotación de agua subterránea, se han dado notables manifestaciones de este fenómeno.

En algunos lugares como la zona de Chalco en el valle de México, se han producido hundimientos de hasta 8 m en 1991, con velocidades de hundimiento de 0.4 m/año. En la tabla 4 se presentan las principales zonas y poblaciones afectadas por la subsidencia en México.

Tabla 4: Principales zonas afectadas por la subsidencia en México (Jesús et al., 2011).

Zona	Principales poblaciones afectadas
Valle de Querétaro	Santiago de Querétaro
Valle de San Luis Potosí	San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez.
Valle de Aguascalientes	Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de Los Romo, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Cosío.
Valle de Tesislán	Nextipac
Valle de México	Ciudad de México, Delegación Iztapalapa y Chalco.
Valle de Toluca	Toluca
Valle de Bajío	Celaya, Irapuato, Silao y Salamanca
Valle de Morelia	Morelia

3.2.4 Subsidencia en el Valle de Aguascalientes.

“El agrietamiento del suelo del Valle de Aguascalientes se detectó a mediados de los ochenta del siglo pasado y más recientemente se observó que la ciudad presenta hundimientos que alcanzan valores de 12 cm por año y que la mayoría de los

agrietamientos se alinean con las estructuras geológicas del valle” (Z. d. L. M. E., Rubén, Antonio, Enrique, & Javier).

El Dr. Jesús Pacheco Martínez en el año 2011 realizó una análisis de los perfiles gravimétricos levantados en las zonas fracturadas del valle, observando que presentaba una amplitud importante de la anomalía en la zona de los agrietamientos, por lo que concluyó que el lecho rocoso juega un papel pasivo en la formación de grietas y fallas en Aguascalientes, considerando que la verdadera causa de los hundimientos es la disminución del nivel freático por extracción de agua subterránea, es decir la sobreexplotación de acuíferos ha provocado la compactación del relleno granular, resultando en hundimientos del terreno y aparición de grietas en la superficie (Ver figura 27).

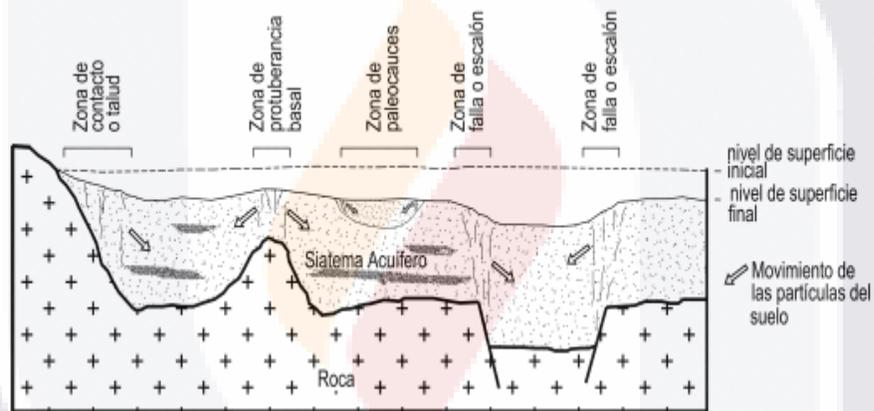


Figura 27: Modelo conceptual del piso rocoso que condiciona la formación de agrietamientos (Jesús et al., 2013).

Mario E. Zermeño de León en el año 2005 confirmó la relación entre el hundimiento en ciertas zonas del estado de Aguascalientes y la extracción de agua, para ello realizó la medición de los hundimientos en varios testigos instalados en la ciudad, para posteriormente elaborar un mapa de subsidencia. Este mapa se comparó con los mapas de extracción de agua obtenidos de la Comisión de Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes observando una correlación entre ellos.

Actualmente los hundimientos por subsidencia en el valle de Aguascalientes constituyen un fenómeno muy generalizado, conociéndose ya la existencia de 277 de fallas y fracturas superficiales asociadas a este fenómeno, que han afectado a 8 municipios del estado y a un gran número de viviendas, redes y viales (Ver figura 28). Aunque varios investigadores concuerdan que los hundimientos del valle son cada vez menor, pero aún se mantienen constante.

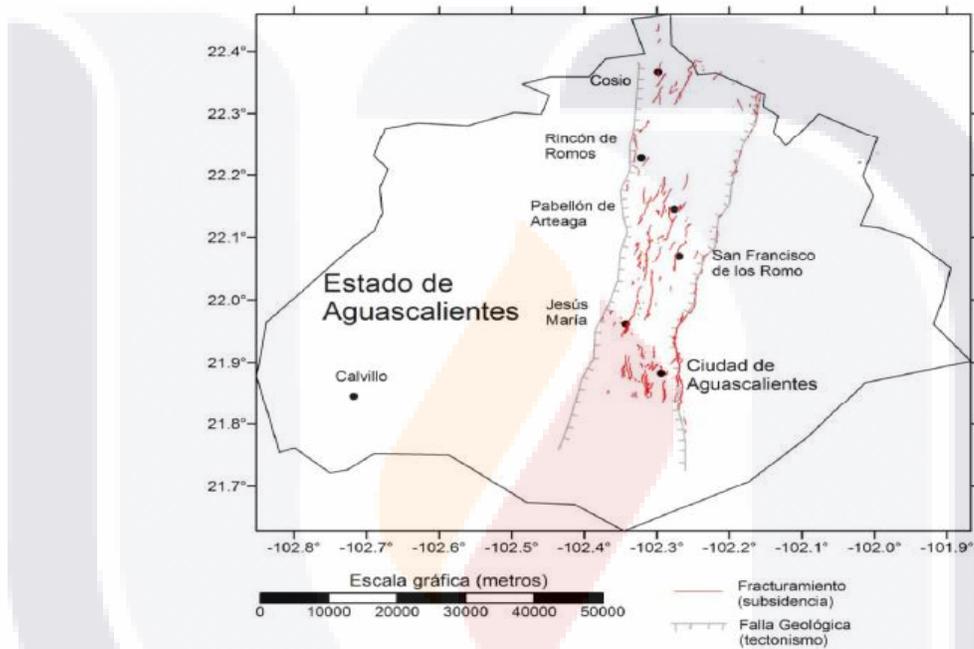


Figura 28: Zonas de fracturamientos asociados a subsidencia por extracción de agua del subsuelo en el Valle de Aguascalientes (Jesús et al., 2013).

3.3 Generalidades del método de elementos finitos.

“El Método de Elementos Finitos (MEF) permite solucionar problemas de ingeniería que requieren el empleo de geometrías complejas y cargas no distribuidas, este procedimiento aproxima el comportamiento de una estructura con infinitos grados de libertad por el de otra, con aproximadamente las mismas propiedades físicas y geométricas, pero con un número finito de grados de libertad, cuyas ecuaciones de equilibrio pueden expresarse por un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un número limitado de incógnitas” (Oller, 2001).

El MEF proporciona soluciones numéricas aproximadas sobre un cuerpo, estructura o dominio, sobre el que se definen ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, denominados elementos finitos. Cada elemento está compuesto por una serie de puntos denominados nodos y el conjunto de nodos con sus relaciones de adyacencia se denomina malla.

La generación de las mallas para el análisis del comportamiento de una estructura se realiza, generalmente, con programas especiales generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. El MEF convierte un problema definido por ecuaciones diferenciales, en un problema matricial, que ofrece una solución correcta para un número finito de puntos e interpola la solución al resto del dominio y como resultado se obtiene una solución aproximada.

Los software que utilizan el MEF como herramienta de cálculo transitan por tres etapas básicas en el análisis:

Etapa uno o pre-proceso: consiste en definir las características físico-mecánicas de las diferentes regiones del dominio (geometría, propiedades de los materiales, condiciones de contorno y mallado), para obtener un modelo matemático adecuado, que permita analizar el comportamiento de una estructura.

Etapa dos o cálculo: consiste en solucionar el sistema de ecuaciones que se generan al concluir el pre-proceso, empleando los métodos de solución de ecuaciones algebraicas simultáneas lineales.

Etapa tres o post-proceso: análisis de los resultados numéricos obtenidos al finalizar la etapa de cálculo (interpolación y determinación de errores de aproximación, aplicación de operaciones de suavizado y determinación de magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos).

3.3.1 Análisis pushover.

“El análisis Pushover es aquel en el que el modelo de la estructura, se somete a una carga horizontal monotónica, previamente definida, la cual se va incrementando hasta que se alcance la deformación máxima considerada o que la estructura falle. El propósito del

análisis Pushover, es evaluar el desempeño estructural, estimando la resistencia y capacidades de deformación usando un análisis estático no lineal y comparando estas capacidades con las demandas en los niveles de desempeño correspondiente “(Ramos, 2013).

El análisis Pushover se representa por medio de la curva de capacidad de carga última de la estructura y resulta un método sencillo y muy preciso que permite realizar una evaluación directa de la respuesta de una estructura, sometidas a desplazamientos horizontales, generados por sismos de magnitud considerable.

3.3.1 Análisis pulldown.

El efecto de Pulldown en una estructura es considerado cuando alguno de los apoyos sufre un desplazamiento vertical. Este tipo de análisis resulta ser similar al que ocurre cuando se realiza un análisis Pushover, la diferencia radica en la dirección en que se evalúan los desplazamientos.

En el análisis Pushover se evalúan desplazamientos horizontales, mientras que en el análisis Pulldown, estos se consideran en sentido vertical, los que pueden generarse por diferentes causas, siendo la más común los asentamientos en el terreno. Una característica importante en este tipo de asentamiento vertical, es la velocidad de los desplazamientos, que depende del tipo de deslizamiento del suelo que afecte a la estructura.

En esta investigación se consideran los asentamientos diferenciales provocados por la subsidencia en el valle de Aguascalientes.

3.4 Campañas experimentales para la calibración de los modelos numéricos.

3.4.1 Campañas experimentales desarrolladas por Javier A. Charry Ablanque en 2010.

El investigador Javier A. Charry Ablanque en el año 2010, presenta cinco campañas experimentales, con el objetivo de caracterizar la respuesta resistente ante cargas laterales de muros de mampostería.

Durante las campañas experimentales Charry consideró las cargas bajo estados de esfuerzos no uniformes, simulando las condiciones reales de viento o sismo y cada una de las campañas se dividió en tres etapas principales.

En primer lugar se realizaron ensayos independientes a los elementos que componen la mampostería, donde obtuvo la resistencia a tensión y flexión del ladrillo y la resistencia a flexión del mortero. Posteriormente realizó ensayos uniaxiales, biaxiales de cortante y de compresión, para determinar las propiedades medias del material sobre pequeños ensamblajes. Finalmente centró su investigación en muros de mayores dimensiones, tanto a escala real como a escala reducida, a los que sometió a cargas horizontales hasta su rotura.

Para calibrar el modelo numérico con el que se pretende estudiar el comportamiento de la mampostería, se utilizarán las características físico - mecánicas de las campañas I, II y III desarrolladas por Charry en el año 2010, con el objetivo de obtener un modelo que describa satisfactoriamente, el comportamiento de este material frente a diferentes estados de carga.

3.4.2. Características de los modelos implementados por Charry en 2010.

Los modelos I, II y III analizados por Charry en su tesis de doctorado consideraron:

- 1- 10 muros escala 1:1 con giro superior libre.
- 2- 17 muros escala 1:4 con giro superior impedido.
- 3- 15 muros escala 1:4 con giro superior libre.

3.4.2.1 Características geométricas.

La campaña experimental I fue realizada sobre paneles de 1200 mm por 1000 mm, mediante la superposición de 16 hiladas de 4 ladrillos macizos con dimensiones 290x50x140 mm y un espesor de junta, tanto horizontal como vertical, de aproximadamente 10 mm. Las campañas experimentales II y III fueron realizadas a escala reducida 1:4, con las dimensiones que se muestran en la Figura 29, considerando en su mayoría juntas verticales y horizontales de 2.5 mm. También se realizaron varios ensayos sobre el mortero de unión entre las juntas determinando su resistencia a flexión y compresión (Ver tabla 5).

Tabla 5: Resistencias a flexión y compresión de las juntas de mortero (Alberto, 2010).

Campaña experimental	Resistencia a flexión del mortero (MPa)	Resistencia a compresión del mortero (MPa)
Campaña experimental I	2.68	8.34
Campaña experimental II	3.08	8.63
Campaña experimental III	3.03	9.83

Campaña Experimental	Cantidad	Unidades (mm)			Esquema
		A	B	C	
II Muros a carga biaxial 1:4 giro superior impedido (MS14GSI)	17	300	250	35	
III Muros a carga biaxial 1:4 giro superior libre (MS14GSL)	15	300	250	35	
IV Muros a carga biaxial 1:4 giro superior libre / distintas dimensiones (MSDD14GSL)	2	150	250	35	
	2	225	250	35	
	2	300	250	35	
	2	300	135	35	
V Muros a carga biaxial 1:4 giro superior libre / sin mortero en llagas (MSSML14GSL)	5	300	250	35	

Figura 29: Características geométricas de los muros de mampostería (Alberto, 2010).

3.4.2.2 Instrumentación del ensayo.

Los equipos utilizados para generar las cargas en los ensayos se integran únicamente con el objetivo de someter al muro tanto a cargas verticales como horizontales. El procedimiento incluye la utilización de un actuador servo - hidráulico (MTS) integrado en un pórtico, que genera sobre los paneles la carga vertical y un gato hidráulico acoplado a un contrafuerte que genera la carga horizontal.

Además se emplearon algunos equipos auxiliares para la aplicación de la carga, una estructura de tope que ofrece una reacción a la carga horizontal y unas estructuras de arriostramiento que dan estabilidad lateral al panel.

Para permitir el libre movimiento del muro en la dirección horizontal se colocaron láminas de teflón aceitadas entre la estructura de arriostramiento y la trabe de concreto.

3.4.2.3 Aplicación de las cargas.

En cada una de las campañas experimentales la carga fue aplicada de manera uniforme, utilizando para la carga vertical un gato servo controlado y para la carga horizontal otro gato que actuaba luego de la aplicación de la carga vertical.

La aplicación de las cargas se realizó mediante una rampa de carga, con el fin de captar el comportamiento continuo del modelo. Las velocidades de aplicación de la campaña fueron de 1 kN/s para la carga vertical y de 0.205 kN/s para la carga horizontal. Las cargas verticales que se emplearon en los ensayos fueron 150 kN, 250 kN, 400 kN, 500 kN, 650 kN y 1000 kN y así hasta provocar el fallo del muro.

3.4.2.4 Resultados obtenidos en las campañas experimentales.

Campaña experimental I

Al finalizar la campaña experimental número I, Charry concluyó que en su mayoría los muros presentan un comportamiento similar, comenzando con un pequeño acomodamiento para luego pasar a una tramo de pre - comprensión atribuida, es decir, los muros se rigidizan al aumentar la tensión de compresión a un cierto nivel y luego

disminuyen sus valores de rigidez (Ver figura 30), observando que en el caso de los muros de mayor rigidez la rotura se produce fundamentalmente por esfuerzos de compresión.

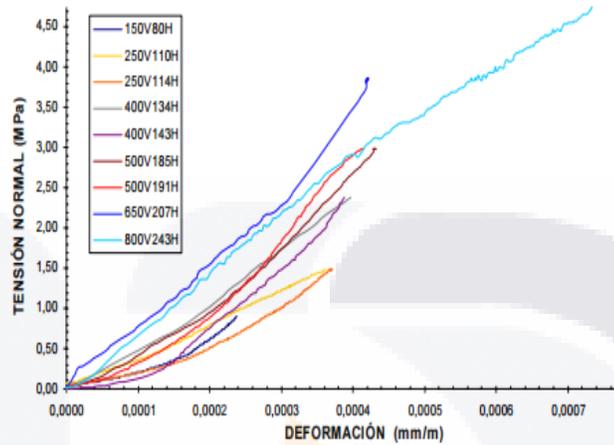


Figura 30: Curva tensión deformación obtenida al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010).

Además en su tesis de doctorado Charry analizó el comportamiento de la mampostería frente a cargas horizontales, haciendo referencia a sollicitaciones que pueden ser generadas por la acción del viento y de las ondas sísmicas. En sus resultados obtuvo varias curvas carga – desplazamiento horizontal (Ver figura 31) que varían en dependencia de la sollicitación y van incrementándose hasta alcanzar la rotura del material.

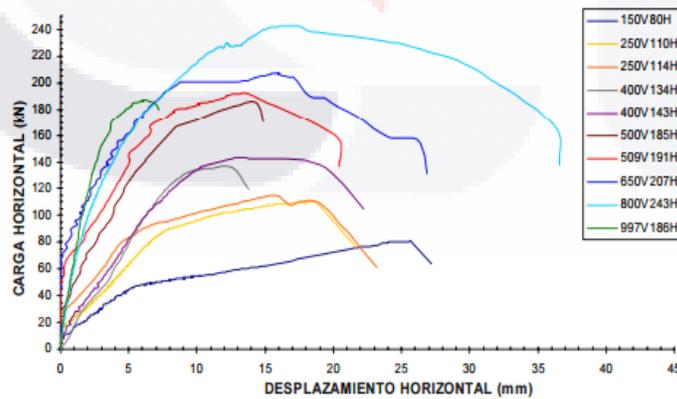


Figura 31: Curva carga – desplazamiento horizontal (Alberto, 2010).

Campaña experimental II.

En la campaña experimental II fueron ensayados 17 paneles similares a los utilizados en la campaña experimental I, variando solo en la escala (1:4) (300x250 mm), considerando 16 hiladas de tabiques con juntas de mortero de aproximadamente 2.5 mm y restringiendo el giro superior en los paneles.

Al finalizar la campaña experimental II Charry puede concluir que al aplicar cargas verticales en paneles de mampostería sin giro superior, se producen grandes deformaciones en muros sometidos a tensiones de compresión bajas y luego comienzan a rigidizarse de forma muy abrupta. Pero al igual que las paredes de escala real los muros sometidos a altas tensiones de compresión, pierden rigidez una vez sobrepasaban cierto límite de tensión vertical (Ver figura 32).

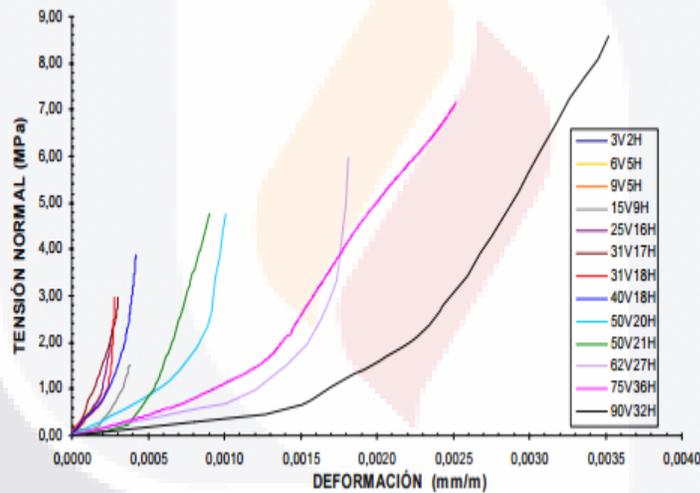


Figura 32: Curva tensión deformación al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010).

“En el caso de las cargas horizontales bajo una tensión de compresión, se observan grandes desplazamientos en los muros sometidos a tensiones de compresión bajas y estos desplazamientos van disminuyendo con el aumento de la tensión de compresión (Ver figura 33)” (Alberto, 2010).

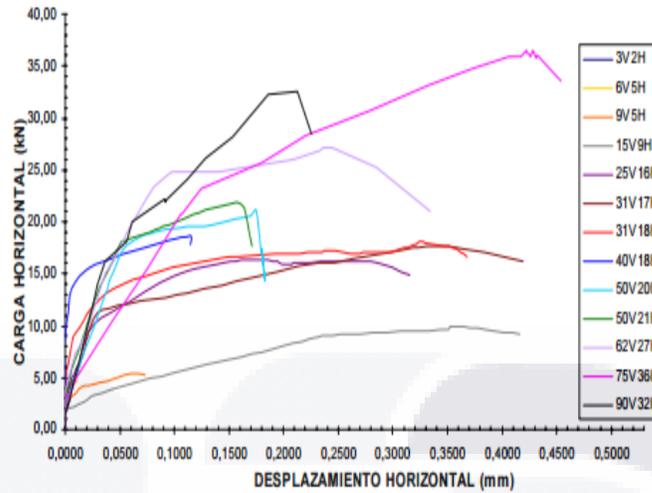


Figura 33: Curva carga - desplazamiento horizontal (Alberto, 2010).

Campaña experimental III.

En la campaña experimental III 15 paneles fueron sometidos a carga biaxial, solo diferenciándose de la campaña experimental I por la geometría (paneles de 300x250 mm) y considerando igualmente giro superior libre.

En este caso Charry llega a la conclusión que al aplicar una tensión normal sobre estos paneles, ellos mantienen un comportamiento lineal hasta alcanzar un valor de carga entre 3 y 4 MPa y que, a partir de esta tensión, el muro comienza a perder rigidez (Ver figura 34).

En el caso de las cargas horizontales los paneles mantuvieron el mismo comportamiento que en las campañas experimentales anteriores (Ver figura 35).

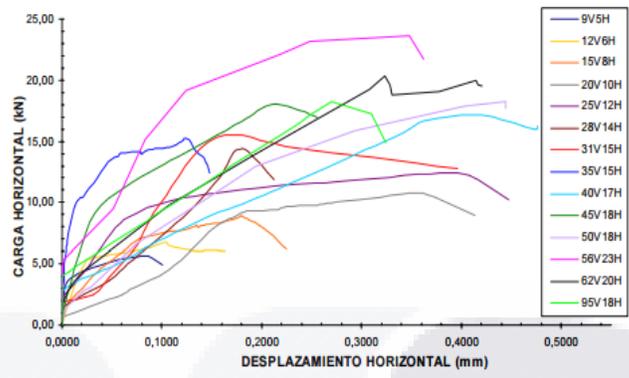


Figura 34: Curva tensión deformación al aplicar la carga vertical (Alberto, 2010).

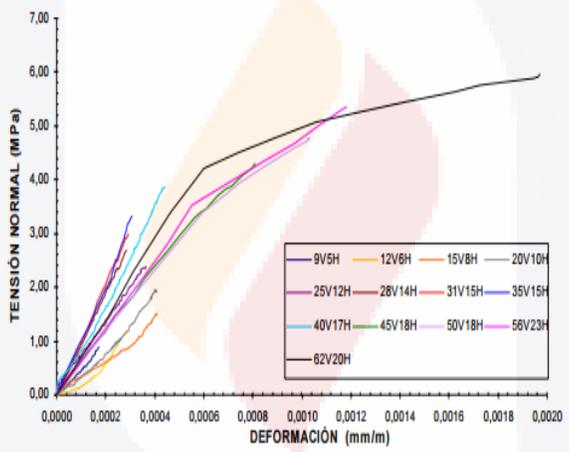


Figura 35: Curva carga - desplazamiento horizontal (Alberto, 2010).



***CAPÍTULO IV:
DISEÑO DE EXPERIMENTO***

Capítulo IV: Diseño de experimento.

4.1 Descripción del experimento numérico.

En el valle de Aguascalientes numerosas edificaciones se han visto afectadas por el hundimiento diferencial del terreno, fenómeno que se ha incrementado en los últimos años debido a la sobreexplotación de los acuíferos. Este fenómeno ha provocado que comiencen a presentarse numerosas grietas en las estructuras, debido al aumento en las tensiones a las que están sometidas. Los muros de mampostería han sido de los elementos estructurales más afectados por la subsidencia, siendo entonces una necesidad el estudio de su comportamiento frente a distorsiones angulares. Por lo que esta investigación va encaminada al diseño de un experimento numérico con el objetivo de reproducir, a través de un modelo físico - matemático, el comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia, utilizando como herramienta computacional el software Abaqus/CAE.

Este experimento numérico que se desarrollará en dos etapas:

- 4- Primera etapa: se considerará un muro aislado, no confinado y no reforzado de 1mx1m, que se someterá a varias cargas verticales en uno de sus apoyos, analizando su comportamiento hasta llegar a la falla del elemento.
- 5- Segunda etapa: se analizarán tres muros aislados, no confinados y no reforzados de diferentes dimensiones (1mx1m, 1.5mx1.5m y 2mx2m), sometidos al mismo valor de carga, para observar la influencia de las dimensiones en la resistencia del muro.

Los muros se considerarán compuestos por piezas macizas de tabique rojo recocido de 29x14x7 cm (N.CMT.2.01.001/02) y juntas de mortero de 1.0 cm (N.CMT.2.01.001/02).

4.2 Declaración de las variables.

Variables independientes:

Las variables independientes son aquellas que el investigador manipula para estudiar como inciden en el comportamiento del objeto que se desea analizar, mediante las variables dependientes.

Las variables independientes en esta investigación fueron determinandas en función de las dos etapas que anteriormente fueron definidas:

- Primera etapa: valores de la carga.
- Segunda etapa: dimensiones del muro.

Variables dependientes:

“Las variables dependientes se corresponden con la respuesta del objeto de estudio ante la variación de los parámetros correspondientes a las variables independientes” (Bonilla, 2008).

La variable dependiente analizada fue la misma para cada una de las etapas:

- Distorsión angular.

4.3 Modelación del problema.

El estudio del comportamiento de los muros de mampostería frente a la subsidencia, se realizó empleando herramientas de simulación computacional, por lo que se establecieron y definieron las características que identifican cada uno de los parámetros que rigen el proceso de modelación en el software Abaqus/CAE:

- Geometría.
- Propiedades de los materiales.
- Ensamblaje.
- Pasos de cálculo.
- Interacciones.
- Cargas y condiciones de fronteras.
- Mallado.

4.4 Modelación de la geometría.

En la modelación de los muros el primer aspecto a considerar es la geometría de los elementos que lo componen.

Las dimensiones de los muros fueron especificadas anteriormente en el epígrafe 4.1, así como las características de los tabiques y el mortero que forman el elemento en sí.

4.5 Modelación de los materiales.

En la modelación de los muros uno de los aspectos fundamentales a definir, son los modelos constitutivos que se utilizarán para simular el comportamiento de los diferentes materiales.

“Los modelos constitutivos deben basarse en las características físico - mecánicas de las partículas que lo componen y por tal razón deben ser capaces de reproducir los giros, deslizamientos y deformaciones que en ellas ocurren, sin embargo, en el estado del conocimiento actual no existe un modelo que cumpla con todas estas exigencias“ (Chen, 1975).

Este trabajo de investigación pretende utilizar el micromodelado para describir el comportamiento de los muros de mampostería, por lo que se deben especificar modelos constitutivos para cada uno de los elementos que lo componen (tabique y mortero).

4.5.1 Tabiques

Para simular el comportamiento de los tabiques se considerará un modelo elasto plástico del material, con el objetivo de poder observar los valores reales para los cuales el muro comienza a agrietarse hasta su falla.

Se utilizará el modelo constitutivo Mohr - Coulomb, considerando un ángulo de fricción de 35° , una cohesión de 0.4 N/mm^2 y un ángulo de dilatación de 0, siguiendo las recomendaciones de E. Dumova - Jovanoska & S. Churilov para tabiques de arcilla.

Además de considerar el modelo constitutivo Mohr - Coulomb, se tuvo en cuenta la densidad de los materiales (γ) y un modelo elástico definido por el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

La densidad de las piezas se obtuvo de las normas técnicas (N.CMT 2.01.001/02).

El módulo de elasticidad se consideró igual al del mortero debido a que “la deformabilidad de la mampostería se debe principalmente a la participación del mortero, por ser este su componente menos rígido” (Lara, 2016).

El coeficiente de Poisson para los ladrillos se encuentra entre 0.10 a 0.15, en este caso se asumió un valor de 0.15 (Ver tabla 6).

Tabla 6: Resumen de las propiedades de los tabiques.

Densidad (kN/m³)	Módulo de Young (kN/m²)	Coefficiente de Poisson
13	4170000	0.15

4.5.2 Mortero

En un gran número de investigaciones el mortero se ha considerado como un material lineal - elástico, sin embargo en los últimos años los modelos de daño plástico de Mohr-Coulomb y Drucker - Prager han sido utilizados (Maharaj en 2003, Broche en 2005 y Bonilla en 2008) para simular el comportamiento de este material, cuando es sometido a diferentes valores de carga.

En la presente tesis se pretende simular el comportamiento de las juntas de mortero empleando el modelo de daño plástico Drucker - Prager. Este modelo constitutivo exige cinco parámetros de entrada básicos, el ángulo de fricción interna, el ángulo de dilatación, el rango de esfuerzos que origina deformación plástica, la tensión de fluencia y la deformación plástica absoluta, también se tuvo en cuenta el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν) y la densidad (γ) del material.

Los parámetros que se introdujeron en el programa se obtienen de la siguiente forma:

- El ángulo de fricción y el ángulo de dilatación, según lo planteado por Oller en 2001, se consideran igual a cero para hormigones que no presentan daños y toman su valor máximo ($\Phi=36^\circ$ y $\psi=15^\circ$) cuando este se encuentra defectuoso. En este caso se considera un mortero sin daños estructurales por lo que el ángulo de fricción y el ángulo de dilatación son considerados igual a cero.
- “El rango de esfuerzos que origina deformación plástica (k_p) varía entre cero y uno; para $k_p=0$ no se producen daños en el material y para $k_p=1$ se establece el daño plástico en su totalidad, que puede ser interpretado como una pérdida de toda la resistencia del material o como una discontinuidad en el elemento estructural” (Oller, 2001). En la modelación

numérica se establece el rango de esfuerzos que origina deformación plástica igual a 0.8 ($k_p=0.8$).

- La tensión de fluencia plástica se determina por la siguiente expresión:

$$\xi_c^{pl} = \xi_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (\text{P. Kmiecik, 2011}).$$

Donde:

d_c : tensión de fluencia plástica.

ξ_c^{pl} : deformación plástica.

ξ_c^{in} : deformación inelástica.

E_0 : módulo de elasticidad.

σ_c : tensión de compresión.

La tensión de fluencia plástica se encuentra tabulada a partir de la ecuación anterior para diferentes valores de resistencia a la compresión.

En la presente tesis la resistencia a la compresión del mortero se considerará de 8 MPa, por tanto, la tensión de fluencia plástica es de 4 MPa.

- La deformación plástica absoluta se considera nula, lo que se traduce en valores constantes de plasticidad, que no tienen en cuenta la influencia de la temperatura.

- Según la investigación realizada por V. Flores, S. Sánchez-Tizapa, R. Arroyo y R. Barragán en 2013, para morteros de 8 MPa el módulo de elasticidad se considera de 4170000 kN/m² (V. Flores, 2013).

- El coeficiente de Poisson ν del mortero es muy dependiente del estado de esfuerzos y suele determinarse su valor en ensayos uniaxiales, sin embargo en la mayoría de los casos se asume un valor de 0.2.

- La densidad (γ) del mortero se consideró 2000.0 kg/m³.

4.6 Ensamblaje.

En el módulo Assembly, cada una de las partes creadas se coloca en su posición definitiva y posteriormente, se define un eje global de referencia para las piezas ensambladas.

4.7 Pasos para la modelación.

En el módulo Step se establecen tres pasos de cálculo para el análisis de los muros de mampostería:

- El paso inicial, donde el programa aplica las interacciones definidas entre las piezas y el mortero, así como las condiciones de bordes que se impusieron al modelo.
- El paso donde se considera el peso propio del elemento.
- El paso donde comienza a aplicarse la carga.

4.8 Interacciones.

En el programa Abaqus/CAE las interacciones entre las partes o entre los materiales se denominan contacto. En la presente tesis se establecieron dos interacciones diferentes, entre las piezas y el mortero:

Interacción pieza - mortero: se define como un contacto de superficie a superficie (surface to surface), considerando los parámetros elásticos e inelásticos de las juntas de mortero.

Parámetros elásticos

Oliveira en el año 2003 utiliza varios criterios analíticos para determinar los parámetros de rigidez de las juntas mortero - ladrillo, determinando que estos dependen fundamentalmente de la carga vertical de precompresión. En la presente tesis la rigidez normal K_n se tomará igual a 420.3 N/mm^3 y la rigidez tangencial K_s igual a 195.49 N/mm^3 , valores recomendados para cargas mayores de 250 kN.

Parámetros inelásticos

Los parámetros inelásticos de las juntas se obtuvieron de la tesis de Álvaro Viviescas (Ver tabla 7).

Tabla 7: Parámetros inelásticos de las juntas de contacto entre unidades.

Tensión		Cortante	
ft (MPa)	G'f (MPa)	c (MPa)	G''f (MPa)
0.55	0.13	0.4	0.045

4.9 Cargas y condiciones de fronteras.

En el proceso de modelación se aplicaron cargas axiales en unos de los apoyos inferiores del muro (pulldow), simulando asentamientos diferenciales en el terreno y su magnitud se fue variando hasta alcanzar la rotura del material (Ver tabla 8).

Tabla 8: Cargas aplicadas.

Dimensiones del muro (m)	Cargas (KN/m ²)
1x1	270 y 300
1x1	350
1.5x1.5	350
2x2	350

Para simular los asentamientos diferenciales se supone el muro empotrado en la mitad de su base.

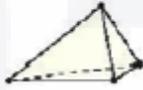
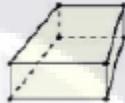
4.10 Mallado.

El software Abaqus/CAE se basa en el MEF para el análisis estructural, este es un método numérico aproximado cuyo nivel de precisión depende del tipo y densidad de mallado que se le aplique al modelo.

En el módulo Mesh se puede definir la densidad de malla tanto a nivel global como local, así como la forma del elemento finito utilizado en el mallado: tetraédrico (pirámide de base triangular), hexaédrico (prismáticos de seis lados) o tipo cuña (prismáticos de cinco lados), estos elementos pueden ser de primer o segundo orden (interpolación lineal o

cuadrática), en los elementos de primer orden de interpolación, los nodos se ubican únicamente en los vértices de su geometría, mientras que los de segundo orden, presentan nodos en los vértices e intermedios de las aristas (Ver tabla 9).

Tabla 9: Tipos de elementos finitos (Abaqus/CAE).

	Tetraedro	Cuña	Hexaedro
Primer orden (lineal)	<p>C3D4</p> 	<p>C3D6</p> 	<p>C3D8</p> 
Segundo orden (cuadrático)	<p>C3D10</p> 	<p>C3D15</p> 	<p>C3D20</p> 

“La cantidad de nodos le confiere a los elementos finitos de segundo orden una mayor precisión en el análisis matemático, pero dificultan la convergencia en problemas complejos de no linealidad en el contacto y provocan distorsiones severas de las mallas, fenómeno previsible en pruebas de carga sobre cimentaciones” (Quintero, 2013).

El análisis matemático con elementos finitos de interpolación cuadrática, requiere equipos de alta velocidad y capacidad de procesamiento, siendo estas las principales razones por las que, en la presente tesis se utilizarán elementos finitos de primer orden del tipo C3D8.

4.10.1 Densidad de malla.

Durante el proceso de calibración matemática no solo se determina el TEF, sino también el tamaño óptimo de los mismos, con el objetivo de lograr un equilibrio entre la precisión de los resultados y el costo computacional. Una correcta calibración matemática tiene en cuenta la selección de una densidad de malla óptima, para cada uno de los elementos que componen el modelo, lo que implica una mayor precisión y un mayor tiempo de

cálculo, en la presente tesis se consideró una relación 1:3 entre la densidad de malla de los tabiques y el mortero

Durante el estudio de mallas se analizaron seis densidades diferentes y se aplicó la técnica de mallado global, en la que se establece el tamaño de los elementos finitos para discretizar el modelo.

Para definir la densidad de malla óptima se obtuvieron los asentamientos y se calculó la diferencia porcentual o error relativo entre las mallas, tomando como referencia la malla más fina analizada, también se tuvo en cuenta el tiempo de cada una de las corridas, que depende de la velocidad y capacidad de procesamiento del equipo donde se realice la modelación, en este caso se trata de un Intel Core i7 y 12 GB de memoria RAM (Ver tabla 10).

Tabla 10: Resumen del estudio de mallas.

Densidad de malla	Cantidad de nodos	Asentamiento (mm)	Dif%	tiempo (h:m)
0.02	134434	25.95	0	4:10:00
0.03	114434	26.00	0.19	3:20:00
0.04	82820	26.26	1.19	1:09:00
0.05	58122	27.892	7.48	1:03:00
0.06	57898	32.78	26.32	0:48:00
0.07	57562	38.35	47.78	0:40:00

La malla de 0.05 presenta una pequeña diferencia porcentual con respecto a la malla más fina corrida y el tiempo de cálculo es aceptable, además a partir de este punto la curva cantidad de nodos - asentamiento, experimenta un comportamiento asintótico, por lo que se espera exista una convergencia en las soluciones (Ver gráfico 1).

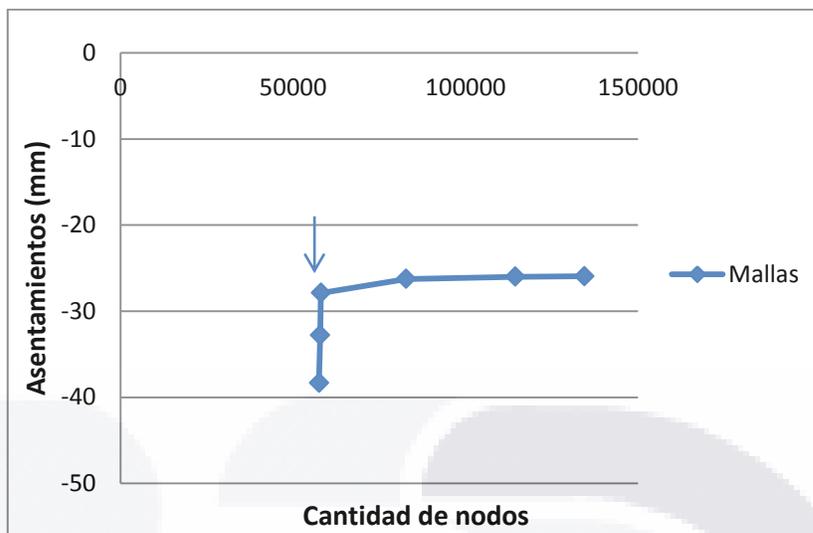


Gráfico 1: Curva cantidad de nodos - asentamiento.



***CAPÍTULO V:
RESULTADOS***

Capítulo V: Resultados

5.1 Resultados.

5.1.1 Calibración de los modelos numéricos.

Para la calibración de los modelos numéricos se utilizaron los resultados de las campañas experimentales I, II y III, desarrolladas por Charry en su tesis de doctorado. La instrumentación de las probetas, sus características geométricas y las cargas a las que fueron sometidas se encuentran descritas en el epígrafe 3.3. En el caso de las propiedades de los materiales, estas fueron simuladas utilizando los modelos de daño plástico Mohr - Coulomb para los tabiques y Drucker - Prager para el mortero (Ver tabla 11 y 12).

Tabla 11: Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos a escala real (Alberto, 2010).

Cohesión (MPa).	Ángulo de fricción (°).	Resistencia a compresión del mortero (MPa).
0.32	45	11.6

Tabla 12: Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos a escala reducida (Alberto, 2010)

Cohesión (MPa).	Ángulo de fricción (°).	Resistencia a compresión del mortero (MPa).
0.46	33.42	10.65

Durante la calibración se hicieron varias pruebas variando el módulo de elasticidad de las piezas y el coeficiente de fricción de las juntas, parámetros que no fueron definidos por Charry en su tesis de doctorado. Finalmente se consideró un módulo de elasticidad de 5000 MPa y un coeficiente de fricción de 2.5.

Para concluir con el proceso de calibración, se determina la diferencia porcentual entre los desplazamientos obtenidos durante la modelación numérica y los obtenidos en los ensayos de laboratorio.

$$Dif \% = \frac{|U_{e(i)} - U_{m(i)}|}{U_{m(i)}} \quad (C.a, \quad 1994).$$

Donde:

Ue (i): desplazamiento correspondiente a la carga (i) en el ensayo experimental.

Um (i): desplazamiento correspondiente a la misma carga en la modelación matemática.

5.1.1.2 Campaña experimental I.

Charry durante su primera campaña experimental, ensayó 10 muros sometidos a 10 estados de carga diferentes.

En el caso de la calibración se consideró una carga vertical de 150 kN y una carga horizontal de 80 kN, sollicitaciones que ocasionaron dos tipos de fallas en el muro (rotura a tensión de los ladrillos y deslizamiento de las juntas) (Ver figura 36).

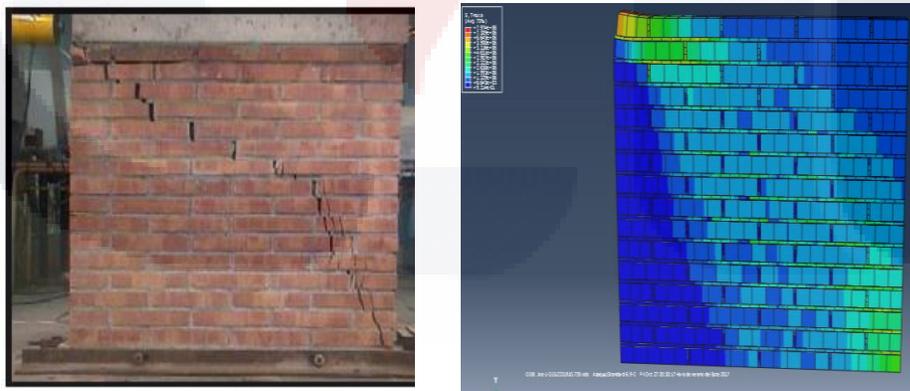


Figura 36: a) Modelo experimental 150V80H y b) Modelo numérico 150V80H.

La diferencia porcentual entre el modelo numérico y el experimental fue de 13.57%, considerando desplazamientos de 31.24 mm en el modelo numérico y de 27 mm en el experimental (Ver gráfico 2).

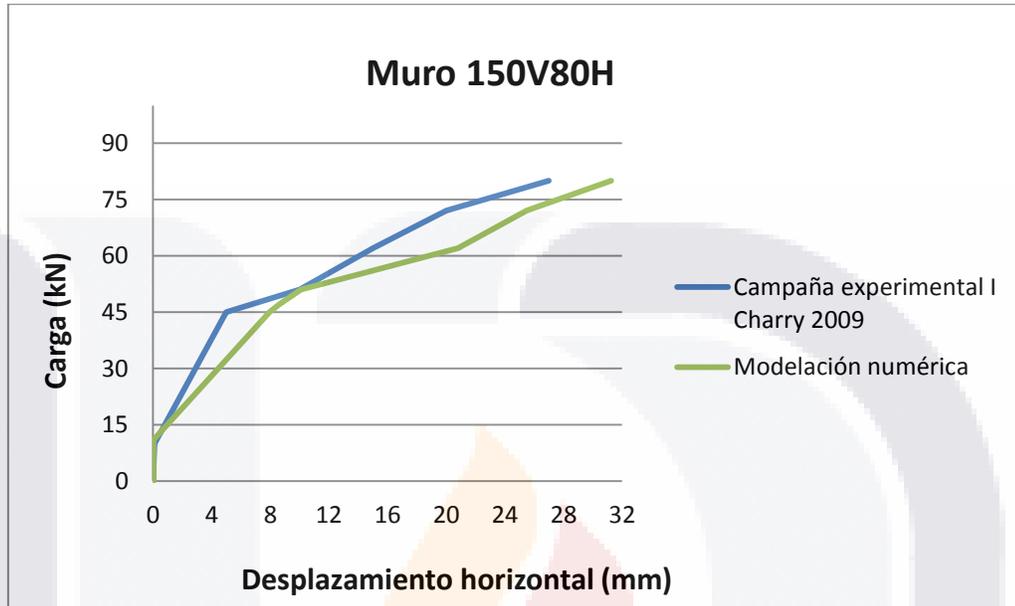


Gráfico 2: Curva carga desplazamiento para el muro 150V80H.

5.1.1.3 Campaña experimental II.

Charry durante su segunda campaña experimental, ensayó 17 muros sometidos a 17 estados de carga diferentes.

En el caso de la calibración se consideró una carga vertical de 9 kN y una carga horizontal de 5 kN, sollicitaciones que ocasionaron deslizamiento en las juntas del muro (Ver figura 37).



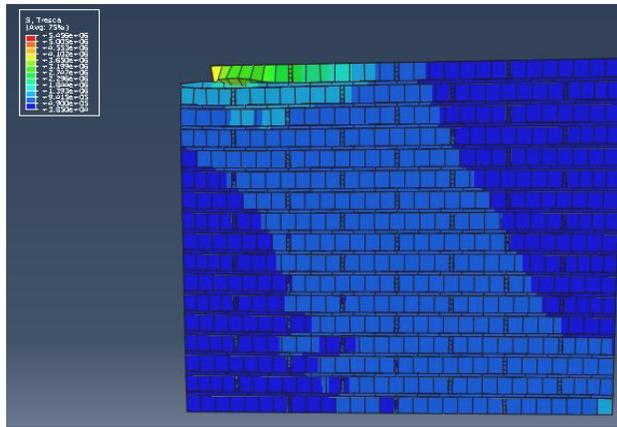


Figura 37: a) Modelo experimental 9V50H y b) Modelo numérico 9V50H.

La diferencia porcentual entre el modelo numérico y el experimental fue de 31.43%, considerando desplazamientos de 0.035 mm en el modelo numérico y de 0.046 mm en el experimental (Ver gráfico 3).

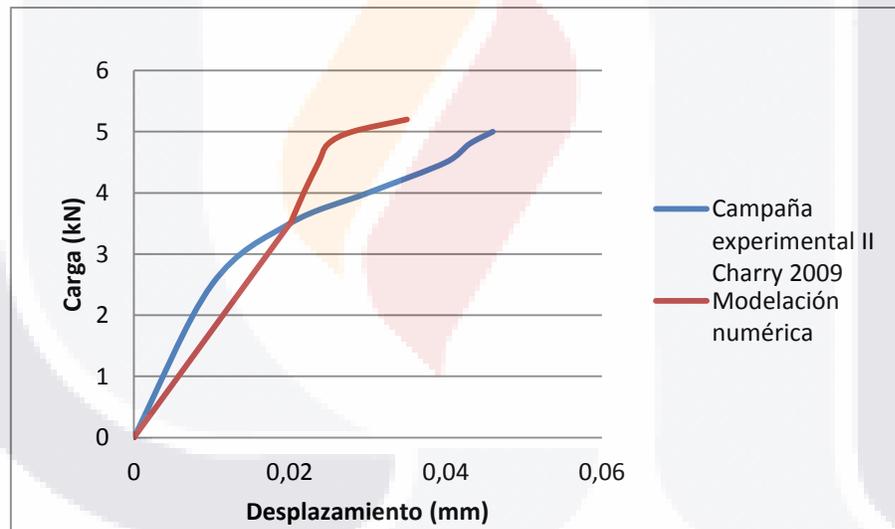


Gráfico 3: Curva carga desplazamiento para el muro 9V5H.

5.1.1.4 Campaña experimental III.

Charry durante su tercera campaña experimental, ensayó 15 muros sometidos a 15 estados de carga diferentes.

En el caso de la calibración se consideró una carga vertical de 9 kN y una carga horizontal de 5 kN, sollicitaciones que ocasionaron deslizamiento en las juntas del muro (Ver figura 38).

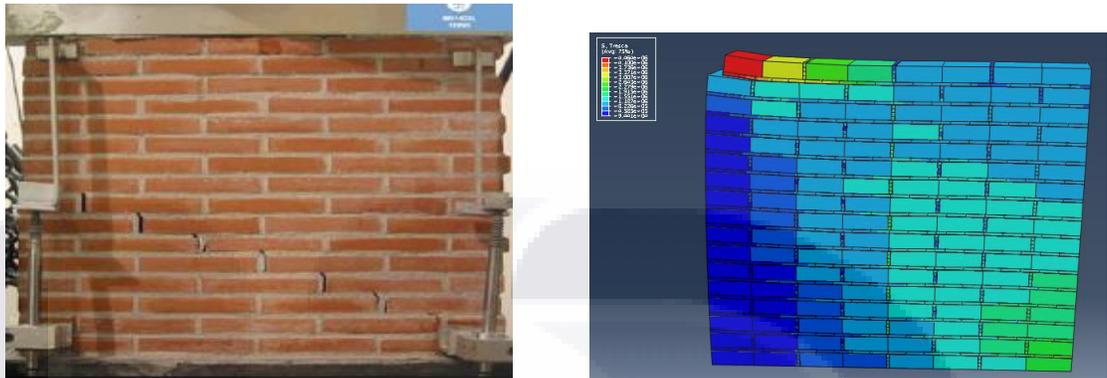


Figura 38: Campaña III a) Modelo experimental 9V50H y b) Modelo numérico 9V50H.

La diferencia porcentual entre el modelo numérico y el experimental fue de 12.39%, considerando desplazamientos de 0.114 mm en el modelo numérico y de 0.1 mm en el experimental (Ver gráfico 4).

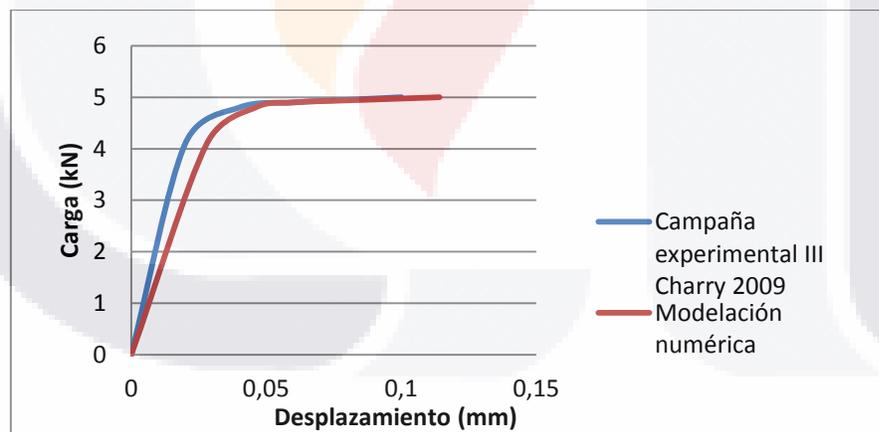


Gráfico 4: Curva carga desplazamiento para el muro 9V5H.

5.1.2 Evaluación ante asentamientos diferenciales.

Al finalizar el proceso de calibración, los modelos fueron sometidos a una carga vertical de presión en su base, la que simulaba los efectos de hundimientos diferenciales en el

terreno. La geometría, las propiedades de los materiales, los valores de carga y las condiciones de frontera, son descritos detalladamente en el capítulo 4.

Campaña experimental I

Durante la campaña experimental I se modelaron en el software Abaqus/CAE, dos muros de 1mx1m con diferentes valores de carga aplicados en la mitad de su base, observando las zonas donde se acumulan las mayores tensiones (Ver figura 39) y midiendo los valores de distorsión angular, hasta alcanzar la falla del elemento (Ver gráficos 5 y 6).

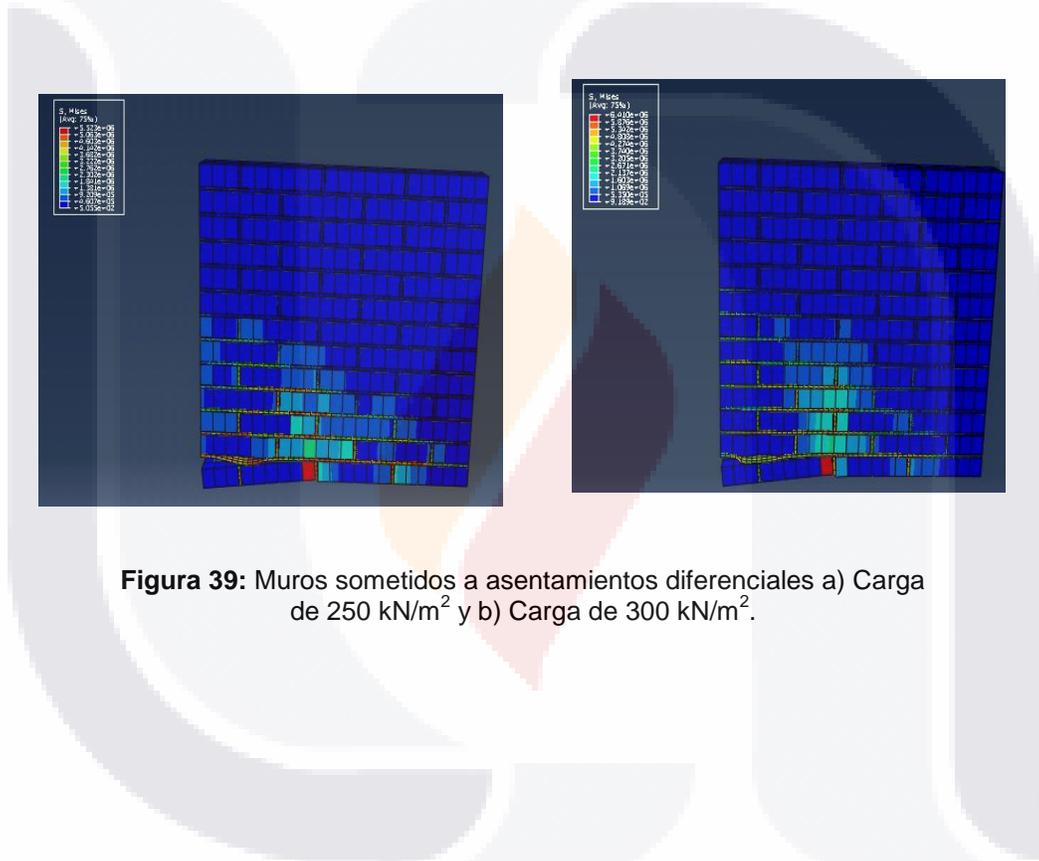


Figura 39: Muros sometidos a asentamientos diferenciales a) Carga de 250 kN/m² y b) Carga de 300 kN/m².

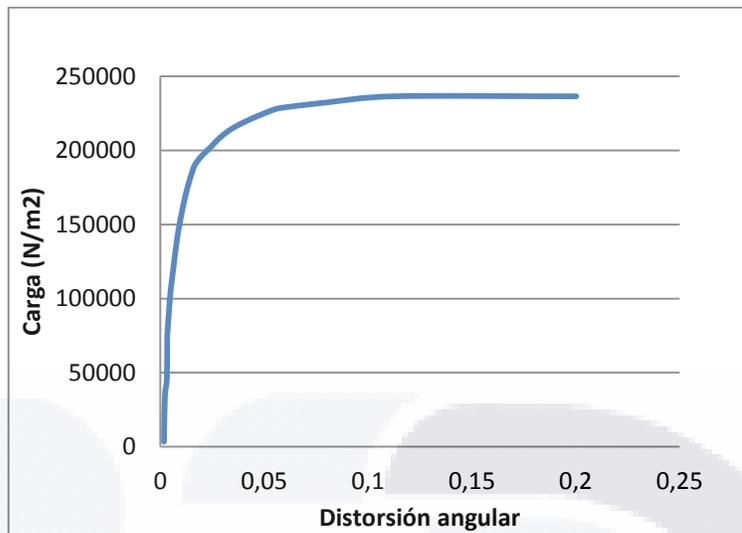


Gráfico 5: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 250 kN/m².

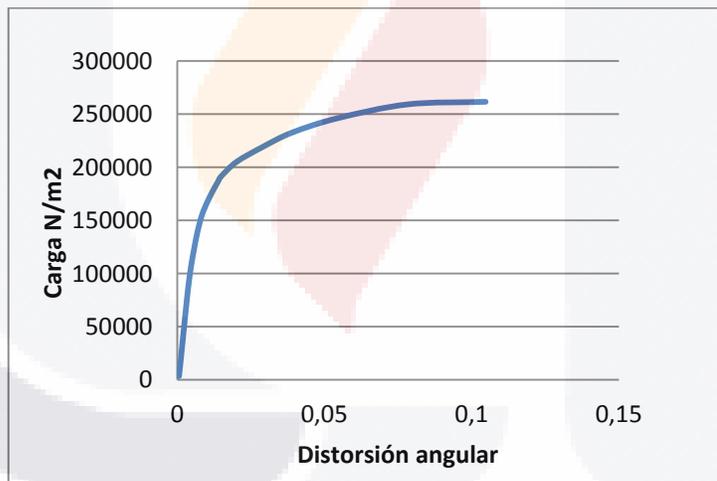


Gráfico 6: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 300 kN/m².

Campaña experimental II

Durante la campaña experimental II se modelaron en el software Abaqus/CAE, tres muros con dimensiones variables (1mx1m, 1.5mx1.5m y 2mx2m), considerando un mismo valor de carga aplicado a la mitad de su base, observando las zonas donde se acumulan las mayores tensiones (Ver figura 40) y midiendo los valores de distorsión angular, hasta alcanzar la falla del elemento (Ver gráficos 7, 8 y 9).

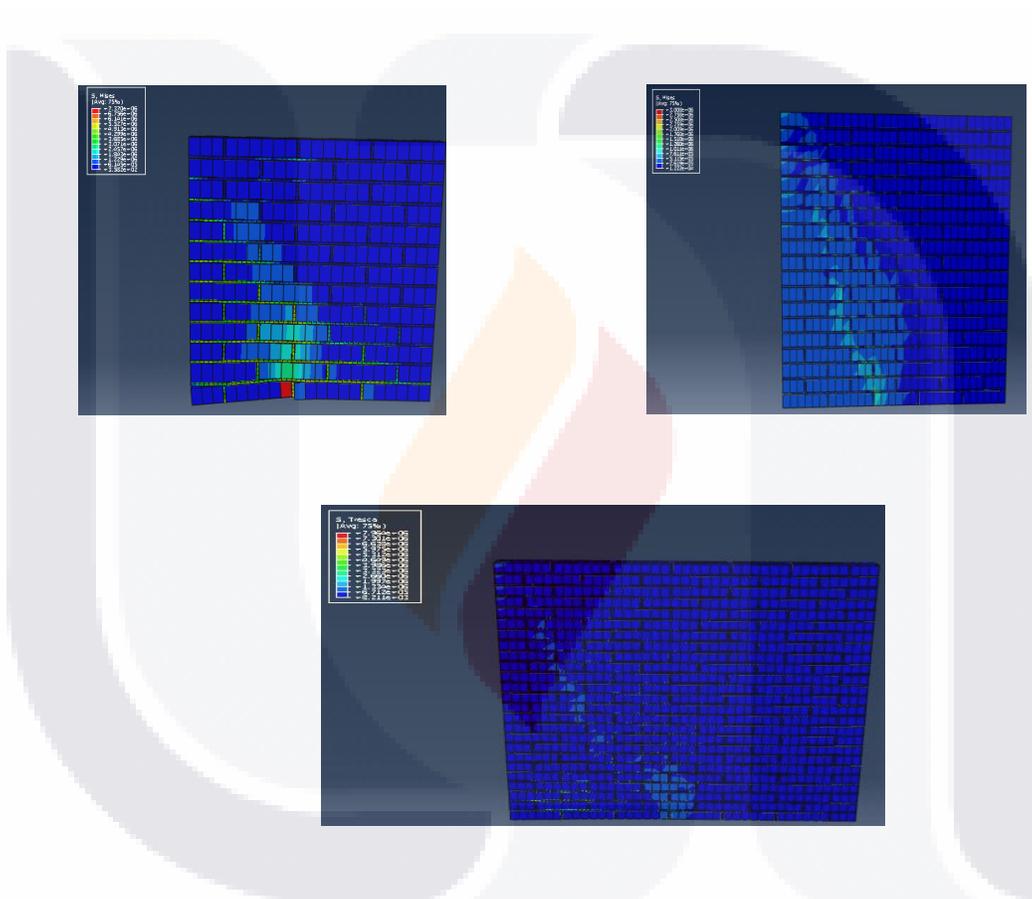


Figura 40: Muros sometidos a asentamientos diferenciales con una carga de 350 kN/m² a) 1mx1m, b) 1.5mx1.5m y c) 2mx2m.

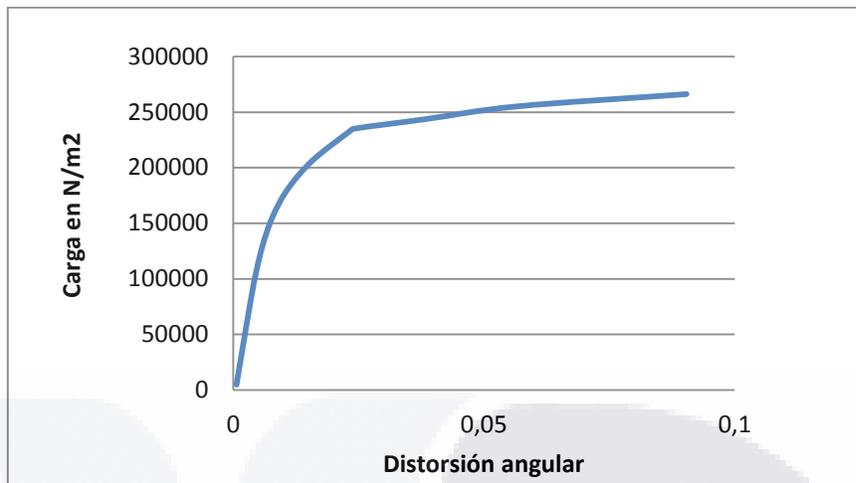


Gráfico 7: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 350 kN/m², muro de 1mx1m.

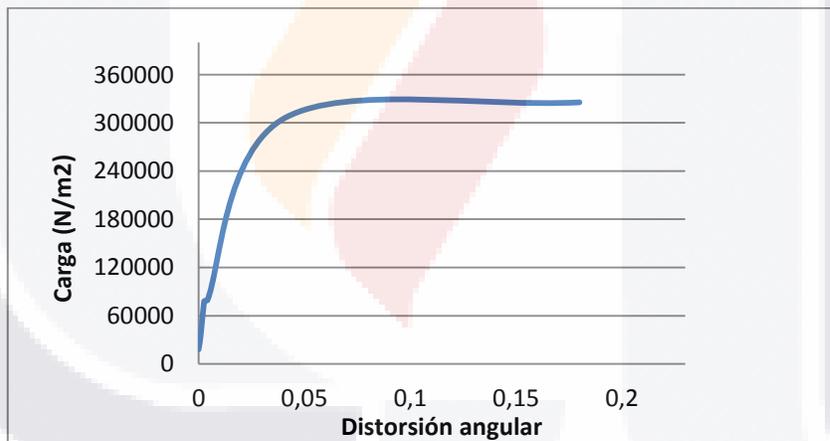


Gráfico 8: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 350 kN/m², muro de 1.5mx1.5m.

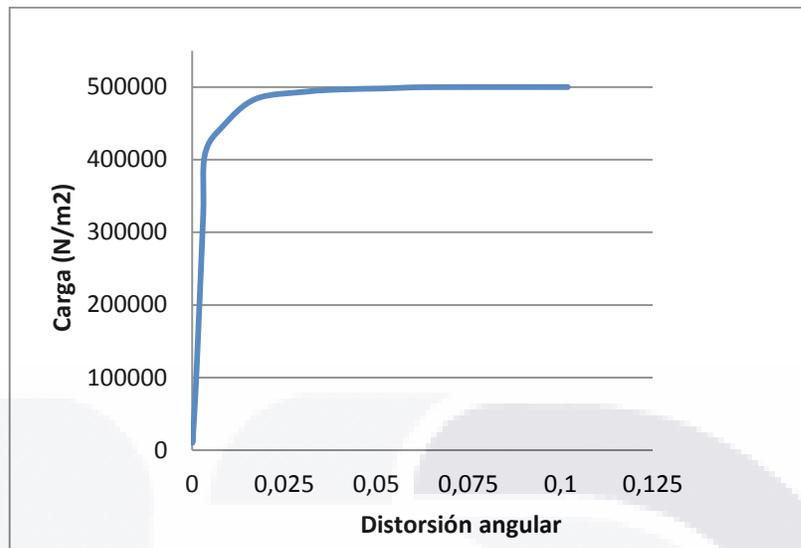


Gráfico 9: Curva esfuerzo distorsión angular para una presión de 350 kN/m², muro de 2mx2m.



CAPÍTULO VI
ANÁLISIS DE RESULTADOS

Capítulo VI: Análisis de los resultados

6.1 Análisis de los resultados.

Los resultados numéricos fueron comparados con las pruebas experimentales desarrolladas por Daniel Lara como parte de su tesis de maestría. Observando que en ambos casos las tensiones comienzan en la base del muro y se van extendiendo hacia los laterales con una inclinación de aproximadamente 45° (Ver figura 41 y 42).



Figura 41: Resultados experimentales obtenidos por Daniel Lara en 2016.

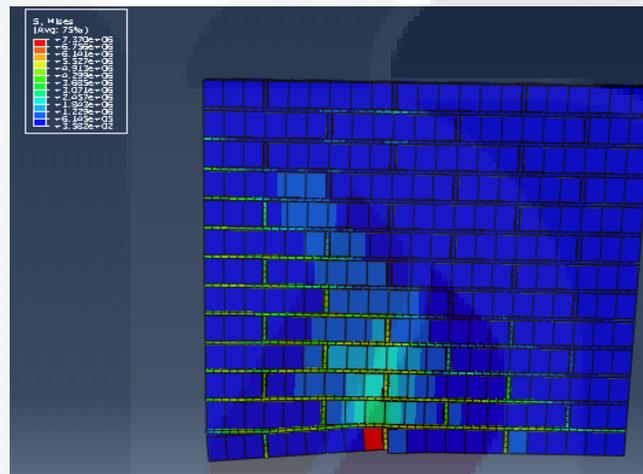
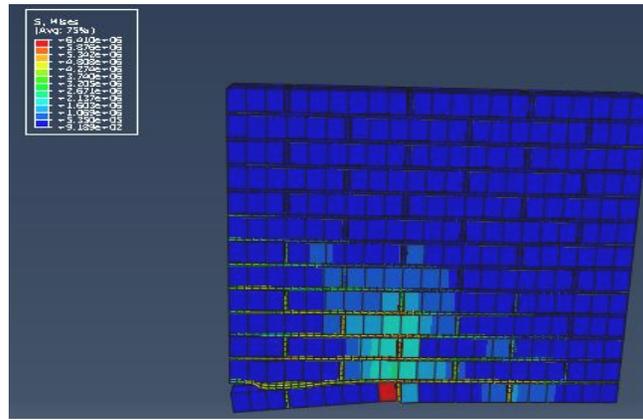


Figura 42: Modelos numéricos.

En las distorsiones angulares se observa que al alcanzar un valor de aproximadamente 0.04 el material comienza a tener un comportamiento plástico, llegando a la falla del mismo. Este valor concuerda con el propuesto por Meli en el año 2014, para evaluar el estado de daño de un muro de mampostería, frente a asentamientos diferenciales.

Se determina que el tipo de fallo predominante en los muros es el de rotura a tensión de los ladrillos, aunque también se observan deslizamientos de las juntas tanto verticales como horizontales.

6.1.2 Muros de 1mx1m.

En las campañas experimentales se propone analizar el comportamiento de un muro de 1mx1m, sometido a diferentes valores de carga en su base, simulando un asentamiento diferencial (Ver gráfico 10).

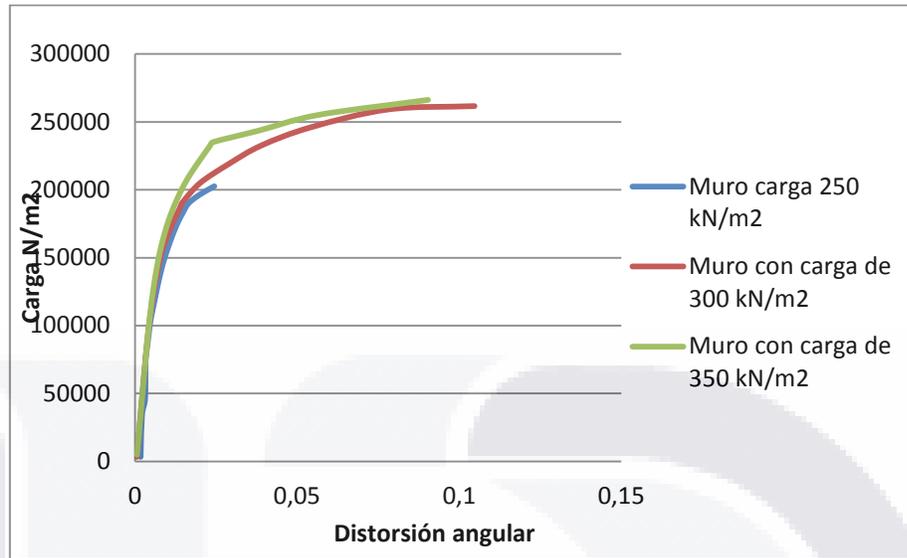


Gráfico 10: Curva esfuerzo distorsión angular.

Las curvas de esfuerzo distorsión angular en el muro de 1mx1m, muestran una mayor ductilidad para condiciones de carga menores, al presentar distorsiones angulares superiores a 0.03, con esfuerzos más pequeños y aun sin alcanzar la falla del muro.

La diferencia en el comportamiento del muro, se debe principalmente al estado de esfuerzos al que se encuentra sometido en su etapa inicial, lo que concuerda con lo planteado por Meli en el año 2014, donde afirma que el estado de esfuerzos inicial, define el tipo de falla que se presentará.

6.1.3 Muros de 1.5mx1.5m y de 2mx2m.

Durante la segunda campaña experimental se analiza el comportamiento de muros de 1.5mx1.5m y 2mx2m, los que fueron sometidos a un mismo valor de carga, aplicada en su base, para simular un asentamiento diferencial (Ver gráfico 11).

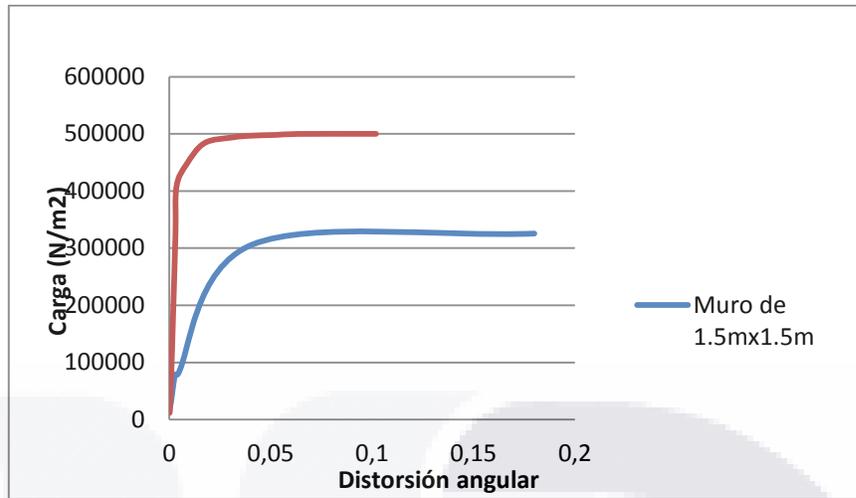


Gráfico 11: Curva esfuerzo distorsión angular (Muros de 1.5mx1.5m y 2mx2m).

El muro de 2mx2m muestra menores valores de distorsión angular que el muro de 1.5mx1.5m, para valores de carga similares, aunque en ambos concuerda que el fallo del elemento se produce para un valor de distorsión de aproximadamente 0.04. Lo que demuestra que al aumentar las dimensiones del muro (manteniendo la relación ancho/largo igual a 1), crece su resistencia ante asentamientos diferenciales, necesitando esfuerzos mayores para llegar a su falla.

6.1.4 Curvas de fragilidad.

Las curvas de fragilidad se utilizan para establecer una medida de vulnerabilidad, en términos probabilísticos, del comportamiento de un determinado sistema.

En la presente investigación se usarán para determinar la probabilidad de que un sistema de muros de mampostería, alcance cierto grado de daño, cuando se somete a una distorsión angular producto de hundimientos diferenciales.

Las curvas de fragilidad se elaboran en base a una distribución de probabilidad de logaritmo normal, cuya función de densidad corresponde a la siguiente expresión:

$$F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{(\ln X - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$$

Donde μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo natural de la variable X.

De los resultados del análisis pulldown, se tomaron las tensiones máximas correspondientes al mayor valor distorsión, para el que comienza el comportamiento plástico del muro. Además se determinaron las distorsiones asociadas al 50 % y al 65 % del valor de tensión máxima, los que se consideran niveles de daño leve, moderado y severo.

Luego se calculó el logaritmo natural, la media y la desviación estándar, considerando los resultados de cada campaña experimental, para posteriormente graficar las curvas de fragilidad.

Campaña experimental I

Durante la campaña experimental I se analizaron tres muros sometidos a hundimientos diferenciales y se utilizaron los valores de distorsión angular, correspondientes a daños leves, moderados y severos, para elaborar las curvas de fragilidad del material (Ver tabla 13) (Ver gráfico 12).

Tabla 13: Distorsión asociada a cada nivel de daño (Campaña experimental 1). Logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad.

Campaña experimental I	Distorsión angular en %			Ln de distorsión angular en %		
	0.5 Tensión máxima	0.65 Tensión máxima	Tensión máxima	0.5 Tensión máxima	0.65 Tensión máxima	Tensión máxima
1mx1m P=250kN/m2	1	1.8	6	-4.605	-4.017	-2.813
1mx1m P=300kN/m2	1.2	2	5	-3.507	-3.912	-2.996
1mx1m P=350kN/m2	1.4	1.89	6	-4.269	-3.969	-2.813
Media	0.0120	0.0190	0.0567	-4.2390	-3.9660	-2.8740
Desviación estándar	0.00943	0.000818	0.00471	0.518	0.0429	0.086

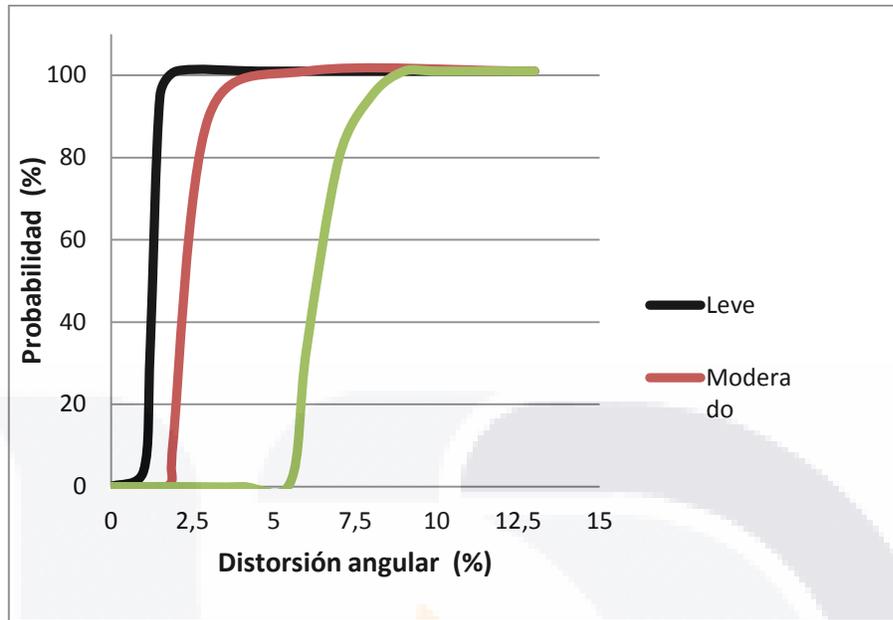


Gráfico 12: Curvas de fragilidad obtenidas para un muro de 1mx1m (Campaña experimental I).

Campaña experimental II

Durante la campaña experimental II se analizaron tres muros de diferentes dimensiones (1mx1m, 1.5mx1.5m y 2mx2m) sometidos a un mismo valor de carga y se utilizaron los valores de distorsión angular, correspondientes a daños leves, moderados y severos, para elaborar las curvas de fragilidad del material (Ver tabla 14) (Ver gráfico 13).

Tabla 14: Distorsión asociada a cada nivel de daño (Campaña experimental II). Logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad.

	Distorsión angular en %			Ln de distorsión angular en %		
	0,5 Tensión máxima	0,65 Tensión máxima	Tensión máxima	0,5 Tensión máxima	0,65 Tensión máxima	Tensión máxima
1mx1m P=350kN/m2	1.4	1.89	6	-4.269	-3.969	-2.813
1.5mx1.5m P=350kN/m2	1.9	1.98	5.2	-3.963	-3.922	-2.957
2mx2m P=350kN/m2	0.7	1.0	4.0	-4.962	-4.605	-3.219
Media	0.0133	0.0162	0.051	-4.398	-4.165	-2.996
Desviación estándar	0.00492	0.00442	0.00822	0.418	0.311	0.168

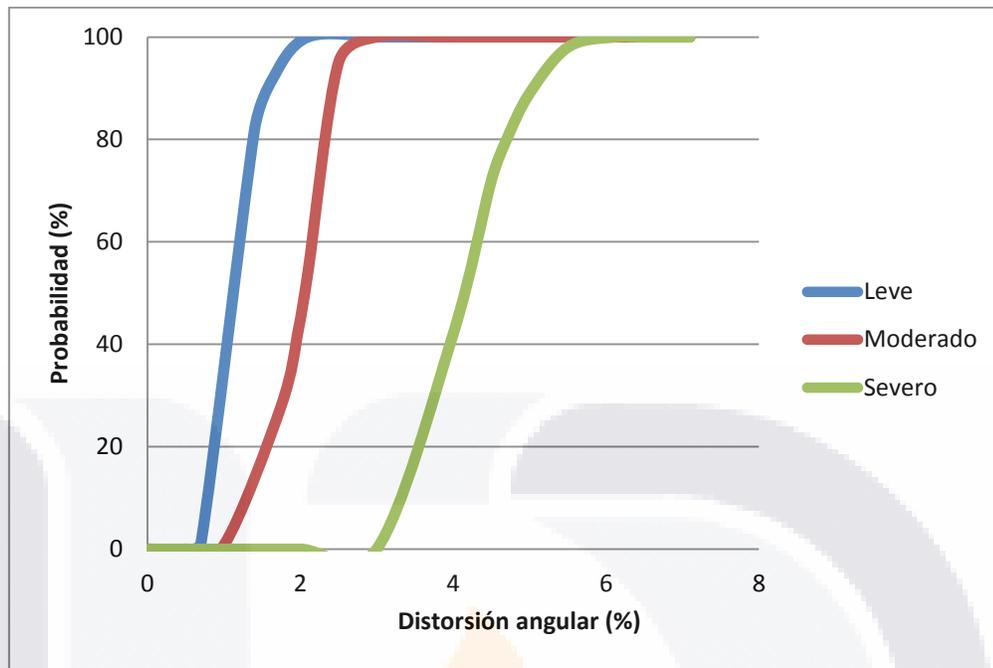


Gráfico 13: Curvas de fragilidad obtenidas para un muro de 1mx1m, 1.5mx1.5m y 2mx2m (Campaña experimental II).



***CAPÍTULO VII:
CONCLUSIONES***

Capítulo VII: Conclusiones.

El hundimiento paulatino de la superficie provocado por la subsidencia, es un fenómeno geológico que afecta de manera significativa el valle de Aguascalientes, ocasionando daños materiales cuantiosos, fundamentalmente, en edificaciones con baja resistencia a tensión.

Las estructuras de mampostería han sido de las más afectadas por hundimientos diferenciales y presentan una alta vulnerabilidad ante este fenómeno. El objetivo principal de esta investigación es evaluar el comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia. Todo el proceso numérico por el que se transitó para obtener los resultados esperados, arrojan las siguientes conclusiones:

- 1- La modelación computacional empleando el software Abaqus/CAE, basado en el Método de Elementos Finitos, constituye una herramienta muy precisa para el análisis de muros de mampostería frente a la subsidencia. Lo que permitió obtener un modelo numérico calibrado y los valores de distorsión angular para muros de 1.0mx1.0m, 1.5mx1.5m y 2.0mx2.0m.
- 2- Los agrietamientos en los muros provocados por la subsidencia comienzan en la base y se van extendiendo hacia los laterales con una inclinación de aproximadamente 45 °.
- 3- En las distorsiones angulares se observa que al alcanzar un valor de aproximadamente 0.04, el material comienza a tener un comportamiento plástico, llegando a la falla del mismo. Este valor concuerda con el propuesto por Meli en el año 2014, para evaluar el estado de daño de un muro de mampostería, frente a asentamientos diferenciales.
- 4- Las curvas de esfuerzo distorsión angular en el muro de 1mx1m, muestran una mayor ductilidad para condiciones de carga menores, al presentar distorsiones angulares superiores a 0.03, con esfuerzos más pequeños y aun sin alcanzar la falla del muro.
- 5- El muro de 2mx2m muestra menores valores de distorsión angular que el muro de 1.5mx1.5m, para valores de carga similares, aunque en ambos concuerda que el fallo del elemento se produce para un valor de distorsión de aproximadamente 0.04. Lo que demuestra que al aumentar las dimensiones del muro (manteniendo

la relación ancho/largo igual a 1), crece su resistencia ante asentamientos diferenciales, necesitando mayores esfuerzos para llegar a su falla.

- 6- Las curvas de fragilidad constituyen una herramienta muy útil para evaluar el estado de daño de un muro de mampostería.





***CAPÍTULO VIII:
RECOMENDACIONES***

Capítulo VIII: Recomendaciones.

Los modelos numéricos obtenidos durante esta investigación, suponen un buen acercamiento al comportamiento de los muros de mampostería frente a la subsidencia, aunque aún queda mucho trabajo por desarrollar, por lo que se recomienda:

- 1- Obtener nuevos modelos numéricos donde se estudie con mayor profundidad la influencia de los parámetros que se consideran en la interface ladrillo – mortero, debido a su gran influencia en la capacidad resistente de un muro de mampostería.
- 2- Utilizar la micro – modelación simplificada para estudiar el comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia y comparar los resultados obtenidos con los presentados en este trabajo, con el objetivo de reducir el tiempo de modelación.
- 3- Realizar modelos numéricos que estudien el comportamiento de muros de mampostería confinada, de forma tal que se puedan incrementar las dimensiones del elemento, sin presentar grandes distorsiones.



***CAPÍTULO IX:
REFERENCIAS***

Capítulo IX: Referencias.

- Agustín, O., & Gustavo, A. A. (2001). Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales 11.
- Alberto, C. A. J. (2010). *Estudio experimental del comportamiento de paredes de obra de fábrica de ladrillo ante la acción de cargas laterales.* . Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona, España.
- Alvaro, V. J. (2009). *Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano.* (Doctorado), Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Araiza, & Gerardo, G. (2005). *Reparación y refuerzo de paredes de obra de fábrica. Estudio experimental de la respuesta ante tensiones de corte.*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España.
- Arnal, Luis, S., & Max, B. S. (2005). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. In.
- B., L. P., & G., R. J. (1997). Multisurface interface model for analysis of Masonry Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 660 a 668.
- Bonilla. (2008). *Estudio del comportamiento de conectores tipo perno de estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica.* Universidad Central "Marta Abreu" Las Villas, Cuba.
- Chen, W.-F. (1975). Limit Analysis and Soil Plasticity. Elsevier Scientific. In.
- Chiquillo, A., S. J., & Y., P. O. F. (2011). *Contribución al estudio de la respuesta última de los muros de mampostería.* Santánder, Bucaramanga.
- E., D.-J., & S., C. (2009). Calibration of a numerical model for masonry with application to experimental results. *Protection of Historical Buildings*, 39 a 45.
- E., Z. d. L. M., Rubén, E. R., Antonio, H. N., Enrique, M. O., & Javier, A. S.). Influencia de la extracción de agua en la subsidencia y agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. *Investigación y Ciencia*.
- Francisco, A. G. (2007). Curva de fragilidad para muro de mampostería, bajo cargas explosivas a partir de la simulación numérica.
- J., L., S., O., & E., O. (1998). *Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos* (1ra edición ed.). Barcelona, España.

- Jaramillo, J. D. (2002). Mecanismo de transmisión de cargas perpendiculares al plano del muro en muros de mampostería no reforzada. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 53-78.
- Jesús, P. M., Enrique, M. O., Francisco, L. S. J., Hernández, Martín, M., Norma, G. C., . . . Eduardo, Z. d. L. M. (2013). *Sismicidad en zonas de subsidencia: caso Aguascalientes*. Paper presented at the Presented at the XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, México.
- Jesús, P. M., & Jorge, A. F. (2007). Análisis multicapa, de la subsidencia en el valle Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 389 a 402.
- Jesús, P. M., Ángel, O. L. J., Eduardo, Z. d. L. M., & Otero, M. (2011). *Líneas de investigación vigentes y pertinentes en subsidencia y generación de agrietamientos*. Paper presented at the Presented at the 1er Foro Internacional en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos. Convergencias del diseño y la construcción., Aguascalientes, México.
- Lara, D. d. L. D. (2016). *Análisis numérico de muros de mampostería afectados por el fenómeno de subsidencia.*, Universidad Autónoma de Aguascalientes Aguascalientes, México.
- Leonel, C. R. (2012). *Agrietamiento por hundimiento en muros de mampostería*. México, D.F. .
- Mariana, A., A, P. C., Andrea, P., & Guido, M. (2005). Modelación numérica de paneles de mampostería encadenada a través de macro-elementos.
- Mario, C. N., & Fabián, R. A. (2016). *Comportamiento térmico y estructural de muros de mampostería sometidos a altas temperaturas*. Paper presented at the XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida, Yucatán.
- Massimo, P., Luca, P., Riccardo, R., Stefano, Z., Guido, C., & Enrico, S. (2017). Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls *Construction and Building Materials*.
- Obras de Mampostería - Código de Buenas Prácticas. (2009). In. La Habana Cuba.
- Oller, S. (2001). *Mecánica de la fractura. Enfoque global*.
- P. Kmiecik, M. K. (2011). *Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration*.

- Quintero, J. C. (2013). *Validación de métodos gráficos para determinar la capacidad de carga a partir de resultados de la modelación matemática*. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", La Habana.
- R., M., & O., H. (2014). *Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería*. Ciudad de México.
- Ramos, R. F. J. (2013). *Simulación numérica y experimental de estructuras de acero rolado en frío por hundimientos diferenciales asociados al fenómeno de la subsidencia*. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Roberto, T., Gerardo, H., José, D., & Fernando, P. (2009). *Subsidencia del terreno. Enseñanzas de Ciencias de la Tierra*. Madrid, España.
- V. Flores, S. S.-T., R. Arroyo, R. Barragán. (2013). Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizada en Chilpancingo, Gro (México) In. México.
- Xavier, B., Sergio, V., Verónica, S., Inma, M., Eduardo, M., Ariel, J., & Ana, M. (2006). *Patologías de la construcción en cimentaciones. In Tratados Broto de la construcción. . In Enciclopedia de los elementos constructivos*. (III ed.). Barcelona España.