



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

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

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA POR EFECTOS DE
SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES.

PRESENTA

Ing. Víctor Daniel Galarza Pérez

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

TUTORES

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

Dra. Silvia Rodríguez Narciso

ASESOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Aguascalientes, Ags. 23 de noviembre de 2023

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL**

**M. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTE

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **VICTOR DANIEL GALARZA PEREZ** con ID **156764** quien realizó la tesis titulado: **VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA POR EFECTOS DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

**ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"**

Aguascalientes, Ags., a 22 de noviembre de 2023.


**Dr. Mario Eduardo Zermeno de León
Tutor de tesis**


**Dra. Silvia Rodríguez Narciso
Co-Tutor de tesis**


**Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Asesor**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19

Agradecimientos

Al CONACYT, por su enorme apoyo al avance científico y tecnológico de nuestro país.

A la empresa Dlubal, por dar acceso libre y total al programa RFEM 6, sin el cual, este trabajo no pudo haber sido realizado.

la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por ayudar a la formación de los profesionistas de nuestro Estado.

Al Dr. Zermeño y a la Dra. Silvia, por ser mis guías en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Edgar Fernández Vallejo, por ser quien ha contribuido enormemente a mi formación como ingeniero.

A mis padres, por la educación que me dieron y por ser los principales responsables de la persona que soy hoy.

A mi futura esposa, Nancy, por estar siempre a mi lado y ayudarme en todo lo que pudo para la realización de este trabajo.

Dedicatoria

A mi mamá, por su gran amor y por siempre estar presente.

A mi papá, por ser mi ejemplo a seguir y por su enorme cariño.

A mi futura esposa, Nancy, por ser mi persona y por haberme acompañado en este camino.



Índice general

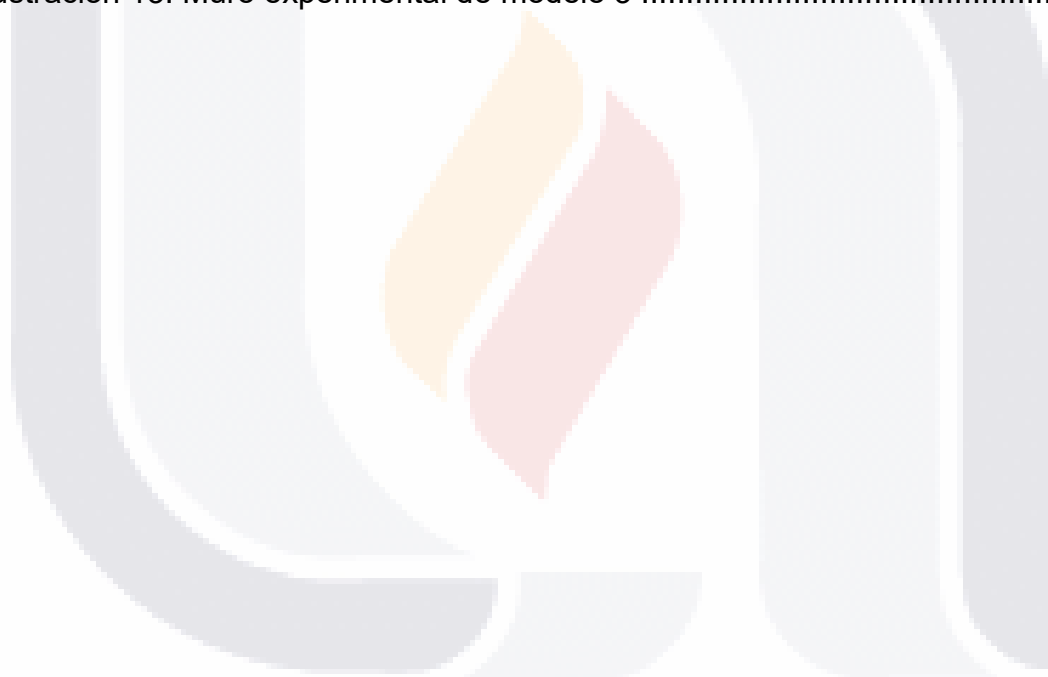
Índice de ilustraciones.....	3
Índice de tablas.....	4
Índice de gráficas.....	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
1. Introducción.....	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Justificación.....	10
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivos generales.....	15
1.3.2. Objetivos particulares.....	15
1.4. Hipótesis.....	16
2. Estado del arte.....	17
2.1. Estudios sobre la vulnerabilidad de estructuras de mampostería: Sismo.....	17
2.2. Estudios sobre la vulnerabilidad de estructuras de mampostería: Subsidencia.....	19
2.3. Funciones de vulnerabilidad.....	21
3. Marco teórico.....	24
3.1. Mampostería.....	24
3.2. Tipos de análisis estructural.....	27
3.2.1. Análisis estático lineal.....	27
3.2.2. Análisis estático no lineal.....	28
3.3. Análisis de estructuras de mampostería.....	28
3.3.1. Métodos de análisis de estructuras de mampostería.....	28
3.3.2. Comportamiento no lineal de la mampostería.....	31
3.4. Materiales y sus propiedades mecánicas.....	32
3.4.1. Normatividad.....	32
3.4.2. Propiedades de la mampostería.....	32
3.4.3. Mortero, concreto y acero de refuerzo.....	34
3.5. Subsistencia.....	35
3.5.1. Generalidades.....	35
3.5.2. Subsistencia en la ciudad de Aguascalientes.....	36
3.5.3. Efectos de la subsistencia en las edificaciones.....	37
4. Simulación numérica de muros de mampostería.....	39
4.1. Generalidades.....	39
4.2. Calibración de modelos en el software RFEM 6.....	39
4.2.1. Preliminares.....	39
4.2.2. Comparativa de comportamiento de un muro de mampostería real contra un muro de mampostería en el programa RFEM 6..	40
4.3. Resultados de la simulación de muros de mampostería sometidos a hundimientos usando el software RFEM 6.....	47
4.3.1. Preliminares.....	47

4.3.2. Modelos analíticos.....	48
5. Resultados de las simulaciones numéricas	51
5.1. Análisis estadístico	51
5.1.1. Generalidades	51
5.1.2. Modelo de probabilidad: Distribución Gamma.....	52
5.1.3. Pruebas de bondad de ajuste.....	55
5.1.4. Función de confiabilidad.....	57
5.2. Resultados de los modelos analíticos	57
6. Discusiones.....	67
7. Conclusiones	70
Referencias.....	72
Anexos	78



Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Curvas de vulnerabilidad sísmica para distintos grados de daño	18
Ilustración 2: Esquema general de un muro diafragma.....	25
Ilustración 3: Esquema general de muros de mampostería confinados.....	26
Ilustración 4: Esquema general de muros reforzados interiormente	26
Ilustración 5: Diagrama de esfuerzo-deformación del acero	27
Ilustración 6: Representación de los estados de falla de un muro de mampostería debido a una carga lateral.....	31
Ilustración 7: Esquema del muro experimental	42
Ilustración 8: Diagrama deformación-cortante del muro.....	43
Ilustración 9: Ventana de edición de propiedades del material de RFEM 6	46
Ilustración 10: Muro de mampostería modelado en RFEM 6	46
Ilustración 11: Muro experimental de Modelo 1.....	49
Ilustración 12: Muro experimental de modelo 2	50
Ilustración 13: Muro experimental de modelo 3	50



Índice de tablas

Tabla 1: Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, f_m , para algunos tipos de piezas, sobre área bruta 33

Tabla 2: Resistencia de diseño a compresión diagonal para algunos tipos de mampostería, sobre área bruta 33

Tabla 3: Propiedades de los muros de mampostería 43

Tabla 4: Propiedades de los modelos analíticos realizados 49

Tabla 5: Medidas descriptivas de los modelos analíticos 60

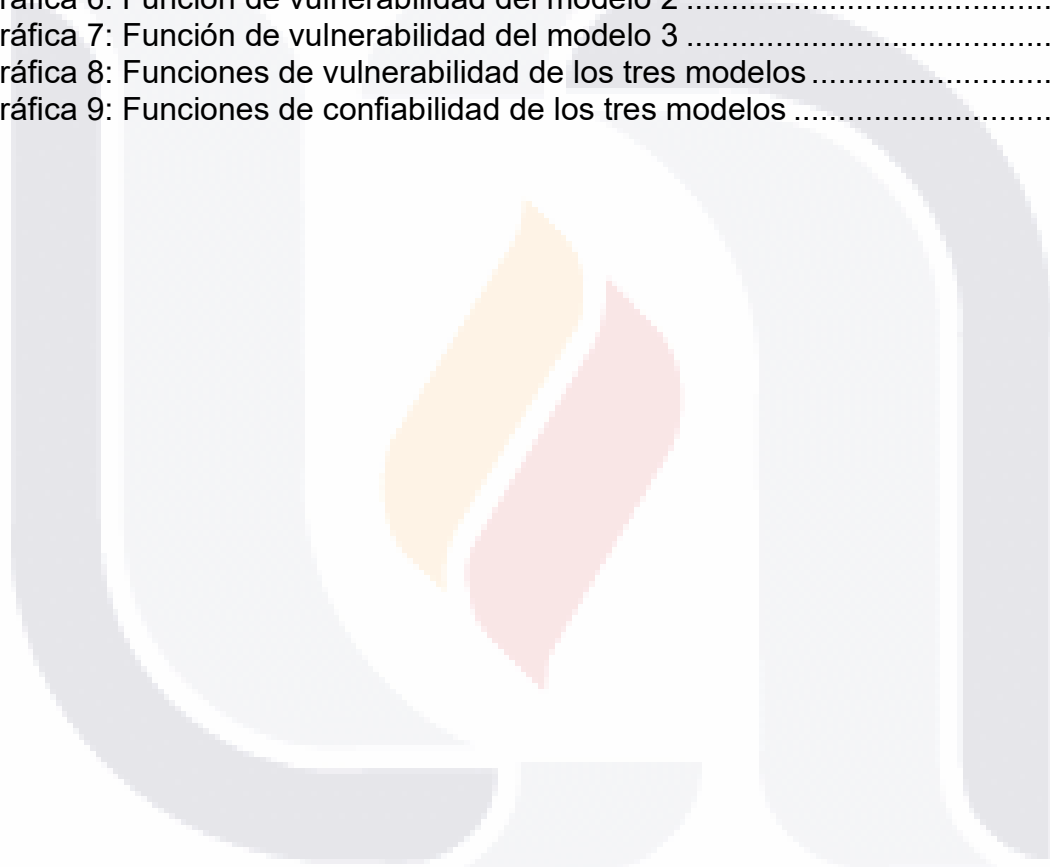
Tabla 6: Estimación de parámetros de la función Gamma de los tres modelos 61

Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste de los tres modelos..... 61



Índice de gráficas

Gráfica 1: Curva esfuerzo-deformación de muro modelado en RFEM 6.....	47
Gráfica 2: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 1.....	58
Gráfica 3: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 2.....	59
Gráfica 4: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 3.....	59
Gráfica 5: Función de vulnerabilidad del modelo 1	63
Gráfica 6: Función de vulnerabilidad del modelo 2	63
Gráfica 7: Función de vulnerabilidad del modelo 3	64
Gráfica 8: Funciones de vulnerabilidad de los tres modelos	65
Gráfica 9: Funciones de confiabilidad de los tres modelos	66



Resumen

Los hundimientos diferenciales debido a la subsidencia en la ciudad de Aguascalientes han provocado una gran cantidad de daños a todo tipo de estructuras dentro de la mancha urbana, siendo construidas con base en elementos de mampostería, una de las más afectadas. Dado lo anterior, es de vital importancia determinar qué tan vulnerables son este tipo de estructuras a la subsidencia para saber que tanto daño ha sufrido.

La vulnerabilidad de estructuras de mampostería se puede determinar mediante una simulación en un programa comercial de análisis estructural, teniendo en cuenta las características y propiedades de los elementos constructivos que se presentan en la realidad. Como segundo paso, se realiza un análisis estadístico que permite introducir variables de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de viviendas de mampostería y finalmente se determina la vulnerabilidad de la estructura que ha sido afectada por subsidencia.

Con la información obtenida, se pueden definir alternativas a seguir para la rehabilitación o demolición de la estructura; qué tan seguro es habitarla o hacer uso de ella.

Abstract

Differential settlements due to subsidence in the city of Aguascalientes have caused a large amount of damage to all types of structures within the urban area, with those built based on masonry elements being one of the most affected. Given this, it is vital to determine how vulnerable these types of structures are to subsidence to understand how much damage has been suffered.

The vulnerability of masonry structures can be determined through a simulation in a commercial structural analysis program, considering the characteristics and properties of the construction elements that are present in actual construction elements. Following this, a statistical analysis is performed that allows introducing variables of the mechanical properties of the materials used in the construction of masonry houses, and finally, the vulnerability of the structure that has been affected by subsidence is determined.

With the information obtained, alternatives can be defined for the rehabilitation or demolition of the structure; how safe it is to inhabit or make use of it.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los desastres naturales siempre han sido parte de la vida de los seres humanos a lo largo de toda la historia; muchos de estos desastres lamentablemente son impredecibles, no se puede saber con certeza cuándo y dónde ocurrirán, es por ello que existe la necesidad de crear estrategias para mitigar los efectos de dichos desastres en la vida y patrimonio de las personas.

En México, el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) es la institución encargada de evaluar y comprender los fenómenos (naturales y antropogénicos) y así crear estrategias que ayuden a reducir los riesgos que enfrenta la población mexicana se encuentra expuesta.

Una problemática de origen antropogénico que afecta a varias ciudades y regiones de México es el de la subsidencia. A grandes rasgos, la subsidencia es el hundimiento progresivo del suelo. Este hundimiento genera hundimientos diferenciales, los cuales cuando ocurren en zonas urbanas provocando afectaciones a construcciones, vialidades, redes hidráulicas de agua potable y de drenaje, entre otros. Estas afectaciones, muchas veces representan un enorme costo económico para la población en general y para los gobiernos, es por ello, que se han elaborado un sin número de estudios al respecto.

Una de las ciudades que han padecido los efectos de la subsidencia en los últimos años es Aguascalientes. La subsidencia en la ciudad de Aguascalientes ha sido una problemática ampliamente estudiada, ya que ésta ha provocado distintas afectaciones a la zona urbana, tales como viviendas, vialidades, redes de drenaje y de agua potable, entre otros. Por lo anterior, es de suma importancia realizar estudios que nos permitan determinar el comportamiento de estos hundimientos, con la finalidad de crear medidas preventivas que ayuden a mitigar los daños provocados por éstos.

Los hundimientos en el valle de Aguascalientes se deben a dos factores. El primero de ellos tiene un origen geológico: el suelo debajo de la ciudad está conformado mayoritariamente por sedimentos granulares y pobremente consolidados que, a su vez, descansa sobre una capa de roca volcánica; ambos sistemas dan origen al acuífero de la ciudad. El segundo factor tiene un origen humano: el nivel freático del acuífero ha estado descendiendo debido a la sobreexplotación provocada por la creciente demanda de agua para uso doméstico, industrial y agrícola. Este último factor es el que desencadena el fenómeno de la subsidencia (Romero-Navarro et al., 2010).

Los primeros reportes de grietas datan del final de la década de 1970, esto debido a que dichas grietas comenzaron a dañar algunas construcciones (Romero-Navarro et al., 2010). Dichas grietas han ido aumentando en cantidad y longitud, llegando a existir un total de 203 fallas geológicas y 108 grietas para mayo de 2021 (SIFAGG, 2021).

Por otro lado, según un estudio realizado por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019), los hundimientos en la ciudad de Aguascalientes han ido incrementándose desde 2015, siendo el año 2017 dónde se presentó el mayor hundimiento registrado, siendo este de 16 cm/año , lo que se correlaciona con la aparición de más grietas producto de estos hundimientos.

Dado lo anterior, mientras se siga extrayendo agua, y teniendo en cuenta que la industria sigue creciendo, así como la población, es lógico pensar que la necesidad del vital líquido se incrementará con el paso del tiempo, lo que inevitablemente incrementará los hundimientos y la aparición de grietas, esto se traducirá en una mayor cantidad de construcciones dañadas.

Por el motivo expuesto en el párrafo anterior, al ser inevitables los hundimientos, se tiene la necesidad de mitigar los daños que estos provocan actualmente y los que puedan provocar en el futuro, por ello, en el presente trabajo de investigación se propondrá una metodología que ayude a determinar cuán vulnerable es una estructura de mampostería debido a la subsidencia en la ciudad de Aguascalientes.

1.2. Justificación

Dado que la subsidencia no se puede evitar actualmente en la ciudad de Aguascalientes, existe la necesidad de buscar alternativas que nos permitan reducir el riesgo al que la población está expuesta debido a la subsidencia. Por ello,

primeramente, se tiene la necesidad de determinar los factores que se ven involucrados en el riesgo.

Según el CENAPRED, el riesgo depende del peligro, la vulnerabilidad y la exposición. Esta expresión, puede escribirse matemáticamente como se muestra a continuación (CENAPRED, 2006):

$$\text{Riesgo} = f(\text{peligro}, \text{vulnerabilidad}, \text{exposicion})$$

Con el planteamiento anterior, podemos establecer que, al reducir el peligro, la vulnerabilidad o la exposición, se puede reducir el riesgo. Dado lo anterior, es importante establecer cómo reducir estas características. Una definición de estas se presenta a continuación.

El CENAPRED define estos términos de la siguiente manera:

- *“El riesgo se define como la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos”* (CENAPRED, 2006).
- *“El peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado”* (CENAPRED, 2006).
- *“La exposición o Grado de Exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados”* (CENAPRED, 2006).

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- *“La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas” (CENAPRED, 2006).*

Con las definiciones anteriores se puede establecer lo siguiente: primero, el peligro es el agente que puede llegar a provocar un cierto daño, que para el presente trabajo será la subsidencia; segundo, la exposición es la cantidad de personas que se han sido afectadas por un agente, que para fines del presente trabajo, será la cantidad de viviendas que se han visto afectadas por la subsidencia; y tercero, la vulnerabilidad es el medio o sistema que se ve afectado por el peligro, que en el presente trabajo serán las viviendas hechas a base de mampostería.

Como se estableció anteriormente, la subsidencia es un fenómeno que se seguirá presentando en el futuro y no existe actualmente forma alguna de evitarlo, por lo tanto, no se pudo reducir el peligro al no poderse reducir el riesgo.

Después, la exposición a la subsidencia se puede reducir limitando la construcción de nuevas viviendas en zonas afectadas por subsidencia, sin embargo, esta medida no evita que las viviendas ya construidas se vean afectadas por ésta, por lo tanto, podemos establecer que la exposición se puede reducir un poco, pero no tanto como se desearía.

Por último, la vulnerabilidad de las viviendas sí se puede reducir en gran medida, ya que esta depende de las características propias de la estructura, como

pueden ser la cantidad de muros de carga, tipo de losa, cimentación, resistencia de los materiales, tipo de mampostería utilizada, etc. Estas características se pueden cuantificar con facilidad utilizando las fórmulas de análisis y diseño contempladas en los reglamentos de construcción vigentes; de esta forma, podemos determinar cómo los hundimientos afectan a la estructura y qué se puede hacer para mitigar los daños provocados en la misma, reduciendo así la vulnerabilidad y por consiguiente el riesgo.

A su vez, se sabe que la mayor parte de las viviendas en la ciudad de Aguascalientes están construidas a base de muros de carga elaborados con mampostería (ladrillos rojos, blocks de concreto, ladrillos de adobe, etc.) esto debido a su costo bajo en producción y en construcción, por ello, la mayoría de las construcciones que se verán afectadas por la subsidencia, serán las estructuras de mampostería.

Para estimar la vulnerabilidad debido a la subsidencia, existe muy poca información disponible, ya que la mayoría de los estudios que se han realizado están enfocados en la vulnerabilidad sísmica de las estructuras (Calvi et al., 2006).

Sin embargo, podemos encontrar algunos autores que han tratado el tema de la vulnerabilidad de estructuras debido a la subsidencia; como ejemplo tenemos a Peduto et al., los cuales, en un trabajo realizado en los Países Bajos en 2019, desarrollan curvas de fragilidad para construcciones afectadas por subsidencia; también tenemos a Liu et al. (2015) que tratan las afectaciones provocadas por

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

subsistencia en el metro de Shanghái; o el caso de Giardina et al. (2009) que estudian las estructuras de mampostería debido a la subsidencia provocada por la construcción de túneles subterráneos en áreas urbanas.

En la mayoría de los casos, los autores mencionados anteriormente, utilizan métodos análogos a los que se usan en la estimación de la vulnerabilidad sísmica para determinar la vulnerabilidad debido a la subsidencia. Entre los métodos más utilizados se encuentra el de matrices de daños, la cual requiere ponderar ciertos parámetros del estado actual de daño de una construcción dada, pero para ello, es necesario que una persona (de preferencia un experto en valuación) evalúe físicamente a la construcción y califique, según su propio criterio, el grado de daño que posee ésta. Esto puede provocar que la determinación de la vulnerabilidad sea un proceso que está sujeto a la subjetividad del evaluador y que pueda arrojar resultados muy poco concluyentes, por lo que se recomienda utilizar a varios valuadores para determinar la vulnerabilidad de una estructura (Rondón et al., 2007).

Lo dicho en el párrafo anterior puede dar lugar a que la inversión de recursos que se requiera hacer para realizar un estudio de vulnerabilidad sea elevada y poco práctica, ya que si se quieren obtener resultados satisfactorios, es necesario contratar valuadores expertos; por ello, existe una necesidad de crear una metodología que sea capaz de determinar la vulnerabilidad debido a subsidencia de una estructura de mampostería de forma objetiva y que no demanden muchos recursos, y que a su vez, permitan a los individuos o a los gobiernos poder tomar

decisiones sobre qué hacer con las construcciones dañadas por efectos de subsidencia.

Por lo tanto, es posible plantearse las siguientes preguntas: ¿se puede determinar el daño que puede sufrir una estructura de mampostería debido a la subsidencia utilizando una función de vulnerabilidad? En dado caso de que sea afirmativo, ¿Qué se requiere para lograrlo?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Determinar una metodología que sirva para estimar la vulnerabilidad de un muro de mampostería debido a la subsidencia.
- Determinar la probabilidad de que de un muro de mampostería que ha sido afectado por subsidencia no llegue al colapso.

1.3.2. Objetivos particulares

- Proponer una metodología basada en funciones de vulnerabilidad que nos permita determinar la probabilidad de colapso de un muro de mampostería en función del hundimiento al que se somete.
- Proponer un modelo estadístico que nos permita estimar la función de vulnerabilidad y que esta se construya a partir de las características y propiedades de un muro de mampostería.

1.4. Hipótesis

Es posible determinar la vulnerabilidad de un muro de mampostería que ha sido afectado por subsidencia utilizando una función de distribución de probabilidad tomando en cuenta las propiedades mecánicas del muro, así como su longitud y su altura.



2. Estado del arte

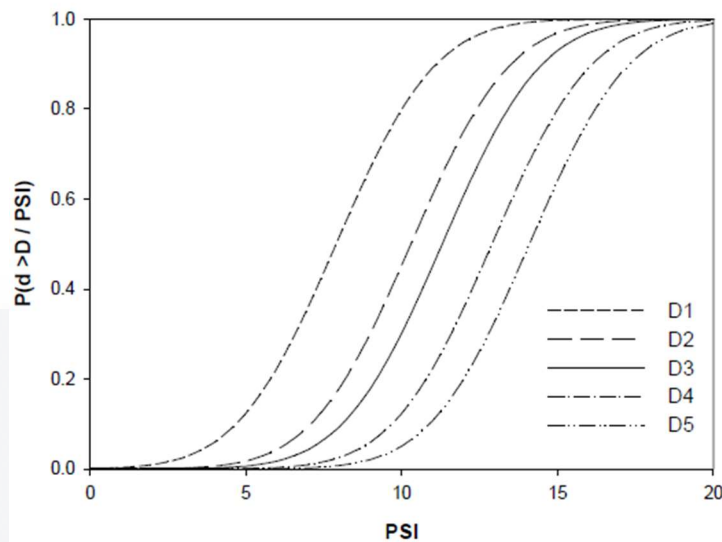
2.1. Estudios sobre la vulnerabilidad de estructuras de mampostería: Sismo

Como se mencionó en el primer capítulo, los primeros estudios que se realizaron sobre la vulnerabilidad de estructuras de mampostería fueron los relacionados con los sismos. Calvi et al. (2006) describe el desarrollo que han tenido las metodologías a lo largo de 30 años, resaltando que los métodos empíricos fueron afinados para que el factor humano no sea tan determinante para estimar la vulnerabilidad de una estructura; por otro lado, describe los avances que los métodos semi-empíricos y analíticos han sufrido gracias a los avances tecnológicos que permiten un poder de cómputo más grande.

En la ilustración 1 se observan curvas de vulnerabilidad retomadas por Cavi et al. (2006). Estas curvas representan el grado de daño más probable que una estructura puede alcanzar (eje vertical) en función de la aceleración del suelo provocada por un sismo (eje horizontal).

Después en 2007, De Alba Ramírez et al. incluyen unos parámetros para determinar el índice de vulnerabilidad, estando en función de los coeficientes sísmicos, la tipología estructural y el tipo de terreno, siendo los primeros en incluir estos parámetros para determinar cuan vulnerable es una estructura.

Ilustración 1: Curvas de vulnerabilidad sísmica para distintos grados de daño



Fuente: Tomado de (Calvi et al., 2006)

Como se puede observar, los estudios realizados se han centrado principalmente en aquellas estructuras que se han visto afectadas por un sismo, determinando la vulnerabilidad de la estructura en función del daño visto en la misma utilizando métodos empíricos; por otro lado, se ha tratado mediante métodos analíticos, estimar la vulnerabilidad de una estructura de mampostería para un sismo determinado, tomando en consideración las características propias de la estructura, así como los materiales que la componen.

A su vez y gracias a los avances tecnológicos y a la generalización del uso de softwares de análisis y diseño estructural, los autores Rodríguez (2005), Terán y Zúñiga (2007) y Ruiz y Negrete (2007) proponen procedimientos basados en un desplazamiento lateral para la evaluación de edificios de mampostería que son afectados por un sismo.

Astroza y Schmidt (2004) fueron los primeros en proponer el desarrollo de curvas de fragilidad para muros de mampostería confinada mediante experimentación y tiempo después, García (2009), propone utilizar la metodología del desplazamiento lateral, para estimar las curvas de fragilidad tomando en consideración el tipo de la pieza del muro, el nivel de esfuerzo vertical de compresión e incluso la cantidad de refuerzo horizontal, complementando así las investigaciones de los autores mencionados al inicio de este párrafo.

Conforme ha pasado el tiempo, se han realizado un sin número de investigaciones para desarrollar completamente esta metodología que pasó a ser denominada como *pushover* (Ganzerli, 2000).

La técnica de *pushover* ha ganado gran aceptación en tiempos recientes, esto gracias a que permite visualizar con gran facilidad el comportamiento que tiene una estructura que está sometida a un desplazamiento (lo que a final de cuentas es lo que termina produciendo un sismo).

2.2. Estudios sobre la vulnerabilidad de estructuras de mampostería: Subsistencia

Si bien el fenómeno de la subsistencia tiene varias décadas de estudio, sus efectos sobre las estructuras no se habían estudiado hasta que Giorgia et al. en 2009 proponen utilizar las metodologías de la vulnerabilidad debido a sismo para determinar la vulnerabilidad debido a la subsistencia.

A su vez, Saedi et al. (2009) propusieron utilizar matrices de daños y de esta forma crear funciones de vulnerabilidad que se ajustaran a una determinada función de probabilidad, la cual plantea la idea de que una estructura iguale o alcance cierto grado de daño según su hundimiento.

Años después, Saedi et al. (2009) propusieron un método analítico para determinar la vulnerabilidad de estructuras de mampostería; este método considera la estructura en cuestión como una viga simplemente apoyada con características específicas: longitud, rigidez, módulo de elasticidad y de cortante y deformación; al conocerse la deformación (hundimiento) y la longitud total de la estructura, por estática, se puede determinar una carga uniformemente distribuida que esté produciendo dicha deformación, y con esta información se pueden obtener los elementos mecánicos internos de la estructura y así determinar los posibles daños que se puedan presentar.

Este método, sin embargo, tiene varias limitantes; la primera de ellas es que, si el hundimiento se presenta fuera del centro de la estructura, no se puede aplicar la idealización de la viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida por lo que se tendría que hacer otras consideraciones que quedan fuera de la investigación realizada por los autores.

Como se comentó en el tema anterior, el método *pushover* ha sido de gran utilidad para determinar la vulnerabilidad de estructuras debido a sismo, por lo que se ha propuesto un método análogo para la subsidencia; si el *pushover* simula lo

que le ocurre a la estructura en un desplazamiento horizontal dado, lo mismo se puede hacer para un desplazamiento vertical y es así como nace el método *pulldown* (Chirino, 2018).

El *pulldown* nos ayuda a determinar el comportamiento de un sistema estructural dado un hundimiento; el análisis de una estructura con estas características puede ser muy difícil de realizar sin la ayuda de un programa de computadora, sin embargo, con los recursos tecnológicos actuales, realizar este método es relativamente sencillo, además de que si se utiliza un programa que cuenta con la herramienta de elementos finitos, se puede visualizar los esfuerzos internos en muros y determinar así que tan dañados pueden llegar a estar.

2.3. Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad son utilizadas para determinar qué tan frágil es un sistema dado. Saeidi et al. (2009) propusieron una función de vulnerabilidad debido a la subsidencia que se ajustase a otras funciones de vulnerabilidad utilizadas en las áreas de ingeniería sísmica y volcánica. Esta función establece la probabilidad de que una construcción alcance cierto grado de daño en función de la relación de deformación vertical y horizontal a la que se somete la estructura. Los parámetros μ y σ se determinan a partir de las características propias de la edificación, esto, utilizando métodos empíricos. La función que Saeidi et al. (2009) se muestra a continuación:

$$P[\text{Damage} \geq D_i | \varepsilon] = \int_0^\varepsilon \frac{1}{\varepsilon \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\varepsilon) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] d\varepsilon$$

Por otro lado, el ACT-58-1 (2011) propuso una guía para desarrollar curvas de vulnerabilidad sísmica. La función de vulnerabilidad que se plantea determinar la probabilidad de que un elemento alcance un nivel de daño dado en función de dos parámetros: la media (θ) y la varianza (β). Estos parámetros, a su vez, están en función de las características de la edificación, representando la variabilidad de los datos que se obtienen en campo por medio de métodos empíricos de vulnerabilidad. Dicha función se muestra a continuación:

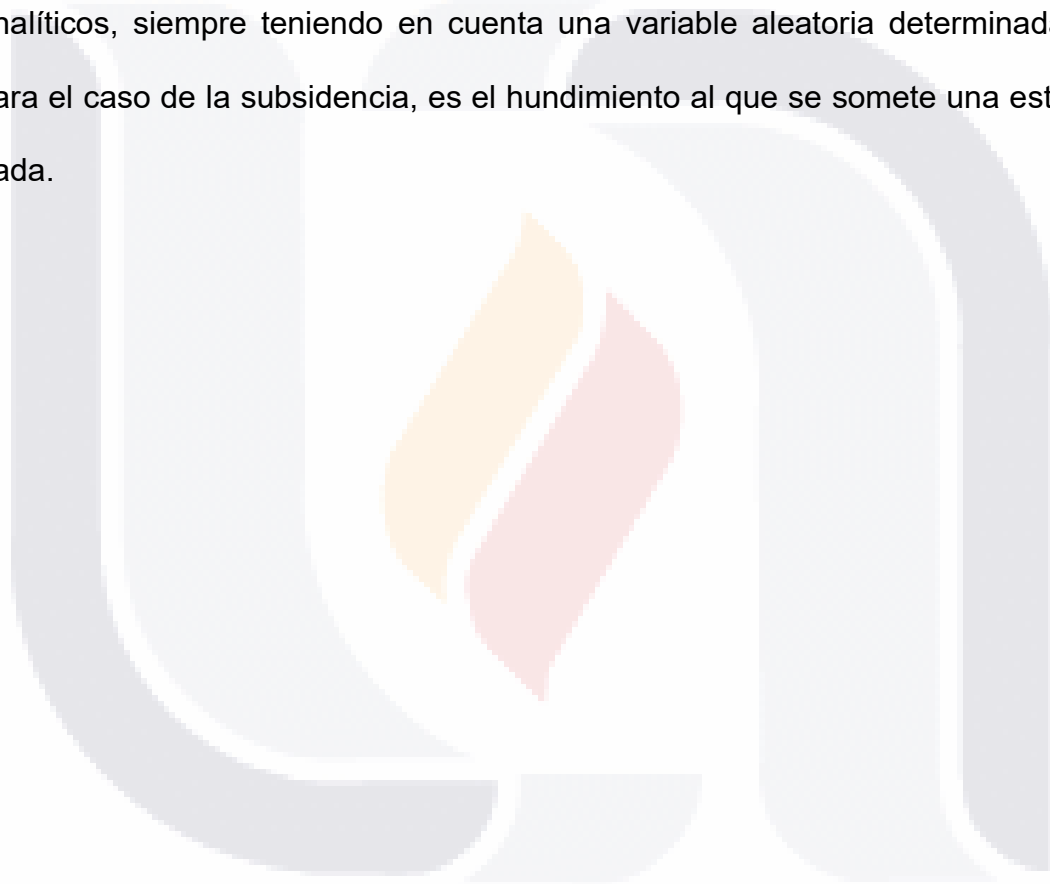
$$F_i(D) = \phi \left(\frac{\ln \left(\frac{D}{\theta_i} \right)}{\beta_i} \right)$$

Chávez (2018), utilizó una distribución acumulada de probabilidad de logaritmo natural (similar a la utilizada por Saeidi et al.) para determinar la probabilidad de que un muro dado alcance un cierto grado de daño al someterse a una distorsión angular debido a un hundimiento diferencial. En dicha función, se utilizan los parámetros μ y σ (media y desviación estándar respectivamente) que se obtienen a partir del análisis estadístico de los datos que se obtienen y que dependen enteramente de las características propias de los muros analizados.

A continuación, se muestra la función de distribución de probabilidad que utilizó Chávez (2018) en su trabajo de investigación:

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

Como puede observarse en las funciones propuestas por los autores citados, en la mayoría de los casos se utilizan funciones de distribución de probabilidad que se ajusten mejor a la información observada en campo o a partir de estudios analíticos, siempre teniendo en cuenta una variable aleatoria determinada, que, para el caso de la subsidencia, es el hundimiento al que se somete una estructura dada.



3. Marco teórico

3.1. Mampostería

La mampostería es un sistema estructural que está constituido por varias piezas individuales de piedras naturales o artificiales, que en conjunto y apiladas de forma vertical, forman muros que son utilizados para transmitir cargas a su base y proporcionar rigidez lateral a distintos tipos de edificaciones.

La unión entre las piezas de mampostería se lleva a cabo mediante una argamasa de materiales llamada comúnmente como mortero; generalmente este está constituido por una mezcla de cemento portland, cal y arena.

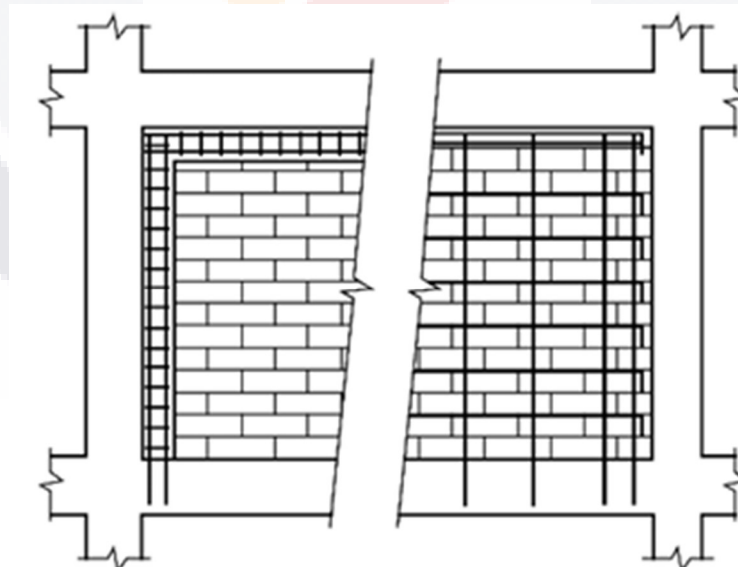
Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México (2017) consideran la estructuración de cuatro tipos de muros: muros diafragma, muros confinados, muros reforzados interiormente y muros de piedras naturales. Se definen como sigue:

- Muros diafragma: *Son los que se encuentran rodeados por las vigas y columnas de un marco estructural al que proporcionan rigidez y resistencia ante cargas laterales.* (NTC Mampostería, 2017).
- Muros de mampostería confinada: Es la que está reforzada con castillos y dadas para confinar las piezas de mampostería. Los castillos son elementos verticales de concreto reforzado colocados a no más de 3.5m entre elementos o colocados en esquinas o en intersecciones con otros

muros. Las dalas son elementos horizontales de concreto reforzado colocados a nos mas de 2.8m entre elementos o en remates de muros. El conjunto de estos elementos proporciona rigidez y resistencia ante cargas laterales y verticales.

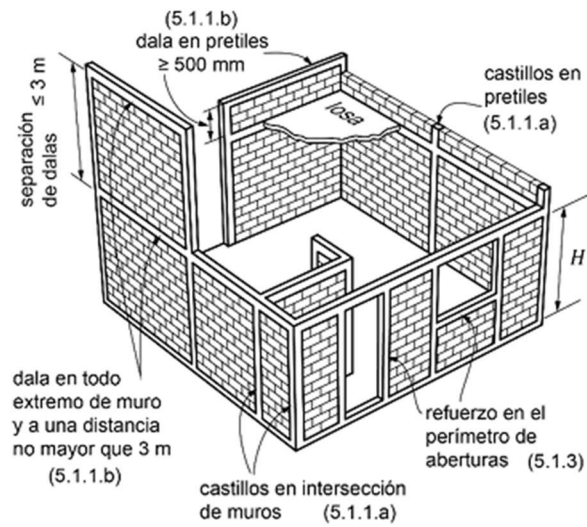
- Muros de mampostería reforzada interiormente: *Es aquella con muros reforzados con barras o alambres corrugados de acero, horizontales y verticales, colocados en las celdas de las piezas, en ductos o en las juntas. El acero de refuerzo, tanto horizontal como vertical, se distribuirá a lo alto y largo del muro. (NTC Mampostería, 2017).*
- Muros de mampostería de piedras naturales: Es la que está conformada por piedras naturales sin labrar unidas con mortero. (NTC Mampostería, 2017).

Ilustración 2: Esquema general de un muro diafragma



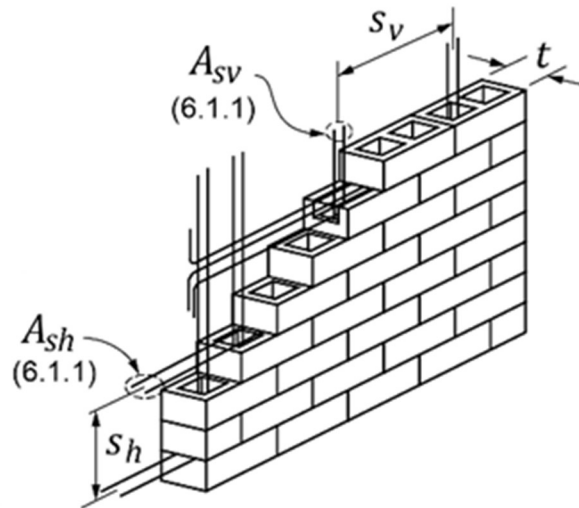
Fuente: Tomado de (NTC Mampostería, 2017)

Ilustración 3: Esquema general de muros de mampostería confinados



Fuente: Tomado de (NTC Mampostería, 2017)

Ilustración 4: Esquema general de muros reforzados interiormente



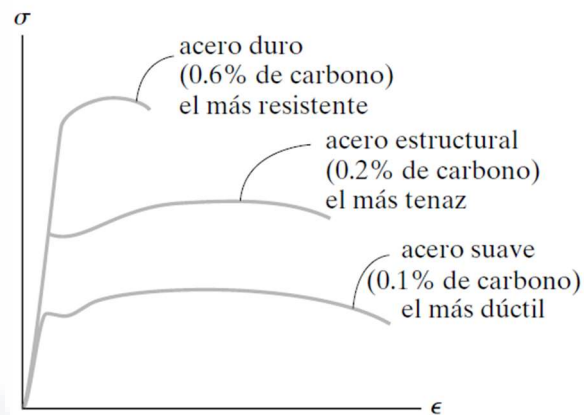
Fuente: Tomado de (NTC Mampostería, 2017)

3.2. Tipos de análisis estructural

3.2.1. Análisis estático lineal

El análisis estático lineal es un método utilizado para evaluar el comportamiento de elementos estructurales sometidos a cargas estáticas. El comportamiento de los materiales bajo este análisis supone que la relación entre carga y deformación de los materiales es lineal (Ilustración 5).

Ilustración 5: Diagrama de esfuerzo-deformación del acero



Fuente: Tomado de (Hibbeler, 2017)

En la mayor parte de los reglamentos de análisis y diseño estructural, se considera que los materiales siempre se mantienen en su rango lineal y que estos fallan cuando llegan a su rango no lineal. Esto se hace para tener un rango de seguridad en caso de que los esfuerzos actuantes excedan a los esfuerzos esperados. A su vez, el comportamiento lineal de un material es fácilmente de evaluar dado su comportamiento predecible, lo que hace que muchas de las teorías y formulaciones se cumplan en la mayoría de los casos.

3.2.2. Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal es un enfoque más complejo para evaluar la respuesta de una estructura ante cargas estáticas. El comportamiento de los materiales dentro de este enfoque supone que la relación entre esfuerzo-deformación es lineal hasta un cierto punto (fluencia) y después de este, el material no es capaz de resistir más esfuerzos y comienza a tener grandes deformaciones (plastificación) hasta llegar a un punto de falla total.

La mayor parte de los reglamentos en la actualidad no permiten considerar que los materiales entren en su rango no lineal debido a lo complejo que resulta ser predecir el comportamiento de un material en esta etapa, además de lo complejo que resulta en su análisis.

Sin embargo, algunos reglamentos han comenzado a permitir considerar que los elementos estructurales entren a un rango no lineal, siempre y cuando se cumplan con ciertas características y bajo ciertas condiciones.

3.3. Análisis de estructuras de mampostería

3.3.1. Métodos de análisis de estructuras de mampostería

El análisis de estructuras de mampostería resulta un tanto complicado dada su naturaleza, ya que, al estar conformada por distintos materiales y cuyas propiedades mecánicas son diferentes entre sí, resulta complejo lograr determinar los esfuerzos internos a los que el muro se somete.

Las NTC de mampostería de la Ciudad de México (2017) plantean varias suposiciones para realizar el análisis de este tipo de estructuras:

- La mampostería se comporta como un solo elemento, esto es, se considera que es un material homogéneo.
- Los esfuerzos a los que se somete el muro son distribuidos uniformemente.
- Los esfuerzos de tensión son resistidos únicamente por los elementos de acero de refuerzo. En caso de que no se cuente con este tipo de material, la resistencia a la tensión es nula.
- La mampostería únicamente resiste cargas verticales y laterales.
- La mampostería no resiste momentos flexionantes. Si se desea que un muro resista este tipo de fuerza, se requerirá colocar acero de refuerzo forzosamente.
- La mampostería posee un comportamiento lineal y se considerará que el muro falla al alcanzar su agrietamiento (punto de fluencia).
- El tipo de falla que se presenta en el muro es frágil, esto es, que el muro pierde su resistencia súbitamente.

Como se puede observar con este breve resumen, las normas mexicanas suelen ser conservadoras para realizar un análisis de estructuras de mampostería, sin embargo, estas suposiciones han arrojado resultados satisfactorios y técnicamente viables para la ejecución de este tipo de obras.

A su vez, las mismas normas describen dos métodos válidos para analizar este tipo de estructuras en programas de computadora: el método de la columna ancha y el método por elementos finitos.

El primer método descrito trata sobre modelar el muro como un elemento tipo barra, misma que tiene asignada las propiedades mecánicas de la mampostería y las dimensiones reales de muro. A su vez, este se une con otros elementos mediante enlaces rígidos (la unión se considera infinitamente rígida). Este método es ampliamente usado dado su facilidad de modelado y poca capacidad computacional que se requiere para llevarlo a cabo.

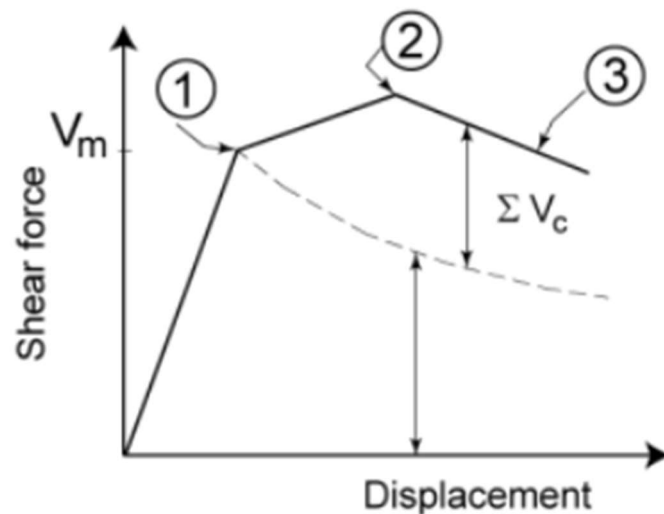
El segundo método descrito trata sobre modelar el muro como un elemento tipo “membrana” o “cascaron” delimitado por elementos tipo barra (castillos y dalas). En este método, el programa subdivide el muro en elementos más pequeños (elementos finitos) con las propiedades mecánicas del muro. El tamaño de estos elementos puede variar en función de las necesidades del usuario, además, el tamaño puede ser determinante a la hora de obtener resultados.

El método por elementos finitos ha demostrado representar fielmente el comportamiento real de los muros, además de que los resultados que se obtienen son más confiables que el método de la columna ancha.

3.3.2. Comportamiento no lineal de la mampostería

Dado que el comportamiento lineal de la mampostería es en algunos casos complicado de determinar, con mayor razón lo es determinar el comportamiento no lineal. Algunos estudios han encontrado que los muros de mampostería siguen un patrón de falla determinado en función de la relación entre una carga y la distorsión laterales producida por la carga. Este método es conocido como el método trilineal, el cual estipula que el muro posee tres puntos de inflexión: el primero ocurre cuando sucede el agrietamiento diagonal del muro; el segundo ocurre un poco después que el primero, sin embargo, este es el punto máximo de resistencia que puede resistir la mampostería, después de este punto, el muro comienza a perder su capacidad de resistencia y finalmente llega al último punto que es la falla ultima o falla total del muro. Este comportamiento se puede apreciar en la ilustración 6.

Ilustración 6: Representación de los estados de falla de un muro de mampostería debido a una carga lateral



Fuente: Tomado de (Pérez et. al., 2023)

3.4. Materiales y sus propiedades mecánicas

3.4.1. Normatividad

Para el caso de la ciudad de Aguascalientes, la normatividad vigente a la fecha de publicación de este trabajo (2023) permite el uso de las normas técnicas complementarias de la ciudad de México versión 2017 (NTC-2017) para determinar acciones y resistencias de los materiales empleados para la construcción de todo tipo de edificaciones. Por lo anterior, no es de extrañarse que la mayor parte del diseño estructural en la ciudad tenga su base en esta normatividad.

3.4.2. Propiedades de la mampostería

El tipo de mampuesto más utilizado en la ciudad es el ladrillo rojo recocido de elaboración artesanal. Sin embargo, en los últimos años, se ha extendido el uso del block de concreto y tabicón.

Para determinar la resistencia a la compresión ($f'm$) de piezas de mampostería, las Normas técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC Mampostería) plantean varias metodologías para obtener dicha información. Sin embargo, en muchos casos estas metodologías no se pueden emplear dado su alto costo económico, por lo que se opta por utilizar los valores mínimos recomendados por las normas citadas en la tabla 2.8.4, los cuales ya incluyen la resistencia en conjunto de las piezas de mampostería y el mortero.

Tabla 1: Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, $f'm$, para algunos tipos de piezas, sobre área bruta

Tipo de pieza	$f'm$ (kg/cm ²)
Tabique macizo de pieza artesanal	15
Tabique de arcilla extruido	20
Bloque de concreto	15
Tabique de concreto (tabicón)	15

Fuente: Tomado de (Tabla 2.8.4, NTC Mampostería, 2017)

En las normas citadas, se realiza la aclaración que estos valores solo podrán tomarse en cuenta para el caso en el que se desee diseñar estructuras tipo I (cuya importancia es poca, como puede ser el caso de casas habitación) y que los mismos son muy conservadores.

De modo análogo, para determinar la resistencia a la compresión diagonal ($v'm$), las normas citadas se puede hacer uso de la Tabla 2.8.5, teniendo en cuenta la misma aclaración que se hace para el caso de la resistencia a la compresión.

Tabla 2: Resistencia de diseño a compresión diagonal para algunos tipos de mampostería, sobre área bruta

Tipo de pieza	$v'm$ (kg/cm ²)
Tabique macizo de pieza artesanal	20
Tabique de arcilla extruido	20
Bloque de concreto	20
Tabique de concreto (tabicón)	20

Fuente: Tomado de (Tabla 2.8.5, NTC Mampostería, 2017)

Con los valores de la resistencia a la compresión ($f'm$) y resistencia a la compresión diagonal ($v'm$), las normas permiten determinar los valores del módulo de elasticidad y módulo de cortante. Para ello, establece que se deben considerar dos tipos de condiciones: para cargas de corta duración (como pueden ser acciones

de sismo o viento); y para cargas sostenidas (como pueden ser acciones de carga gravitacional o por hundimientos diferenciales). Para el presente trabajo, se utilizará la segunda condición y su fórmula será la 2.8.6 de las normas citadas:

$$E_m = 350f'_m$$

Para el caso del módulo de cortante, las normas estipulan que en caso de que se utilice un programa de cómputo para realizar el análisis, deberá considerarse un coeficiente de Poisson igual 0.25 y se determinará con la fórmula 2.8.7 de las normas citadas:

$$G_m = 0.2E_m$$

Se hace hincapié en que esta información sobre las propiedades mecánicas de la mampostería se puede utilizar como valores mínimos recomendados, y que el cumplimiento de estos es responsabilidad de los constructores.

3.4.3. Mortero, concreto y acero de refuerzo.

Como se mencionó en párrafos anteriores, las fórmulas presentadas por las NTC Mampostería 2017 para las propiedades mecánicas de la mampostería contemplan el comportamiento en conjunto de las piezas individuales de mampuestos y mortero; por lo que se hará omisión de la determinación de las propiedades mecánicas del mortero.

Por otro lado, para el caso de los elementos de concreto, se usarán las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. La norma NTC Mampostería establece que la resistencia mínima del concreto para elementos castillo o dala será de $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$.

Finalmente, para el caso del acero de refuerzo, las normas citadas establecen que estará constituido por barras corrugadas, por malla de acero, por alambres corrugados laminados en frío, o por armaduras soldadas por resistencia eléctrica de alambre de acero para castillos y dalas.

3.5. Subsistencia

3.5.1. Generalidades

La subsidencia es el fenómeno mediante el cual el suelo sufre un hundimiento progresivo debido a la consolidación de este. Dicha consolidación del suelo se desencadena debido a varios factores, tales como derrumbe de cuevas o minas, extracción de recursos naturales (agua, petróleo o gas) e inclusive por actividad tectónica (Chávez, 2018).

Los hundimientos provocados por la subsidencia pueden llegar a generar grietas en la superficie. Sin embargo, el efecto más nocivo es el de los hundimientos diferenciales, ya que estos ocasionan problemas en la infraestructura y vivienda en las zonas urbanas.

En 2011, Pacheco Martínez et. al., relatan que el primer agrietamiento estudiado sucedió en el estado de Arizona, en Estados Unidos. Se hace mención que este agrietamiento sucedió debido a la consolidación del suelo (subsistencia) debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos de la zona.

El fenómeno de la subsistencia se ha registrado en varios países alrededor del mundo, entre ellos, México. Para el caso de la república mexicana, Pacheco et. al. (2011) relatan que existen ocho zonas en las que se presenta este fenómeno, las cuales son: Valle de Querétaro, Valle de San Luis Potosí, Valle de Aguascalientes, Valle de Toluca, Valle de México, Valle de Toluca, Valles del Bajío y Valle de Morelia.

3.5.2. Subsistencia en la ciudad de Aguascalientes

Se hace mención que los primeros agrietamientos registrados en Estados Unidos fueron descritos en el informe de la UNESCO de 1984 "Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal", en el cual se relata que el fracturamiento del suelo se comenzó después de que éste se comenzó a consolidar debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos.

Este fenómeno ha provocado daños (en algunos casos irreversibles) sobre la infraestructura pública, monumentos que son patrimonio y sobre todo en viviendas. El problema ha sido tal que el reglamento de construcción de la ciudad de Aguascalientes establece medidas prohibitivas en la construcción de cualquier tipo de edificación cercana a las fallas y grietas registradas ante las autoridades.

Mientras que la prohibición del reglamento previene que nuevas construcciones se vean dañadas por los hundimientos, el mismo no ayuda a evitar se sigan provocando daños en construcciones existentes; además, según varios estudios, hasta que no se detenga la sobreexplotación de los mantos acuíferos, el fenómeno de la subsidencia seguirá ocurriendo, lo que inevitablemente provocará más daños en la infraestructura y vivienda urbana e inclusive, la aparición de más grietas en zonas donde no las había.

Varios estudios han tratado de determinar la mejor solución posible para evitar que se sigan presentando estos hundimientos. Sin embargo, varios de estos métodos son poco prácticos o su coste económico es muy elevado, por lo que forzosamente se requieren de alternativas más prácticas y con costes económicos relativamente bajos.

3.5.3. Efectos de la subsidencia en las edificaciones

El principal efecto nocivo que tienen los hundimientos provocados por la subsidencia son los llamados hundimientos diferenciales. Estos provocan que la base de la estructura (cimentación) sufra un desplazamiento vertical, alterando significativamente las condiciones para las que fue diseñada la misma.

Dado que en la ciudad de Aguascalientes el tipo de construcción predominante es el de la mampostería y al ser esta extremadamente susceptible a los hundimientos (la mampostería es un material frágil), son las que más han sufrido los efectos de este fenómeno, siendo en su mayoría viviendas.

Para realizar el diseño correcto de una estructura de mampostería, se supone que la cimentación es capaz de distribuir todo el peso de la estructura, y si bien es cierto que se permiten ciertas deformaciones debajo de la cimentación, estos deben de cumplir con el reglamento y no ser elevados.

Debido al comportamiento frágil de la mampostería (esto es, que cuando falla, lo hace de forma súbita), un hundimiento de algunos milímetros puede provocar la aparición de grietas de algunos milímetros de profundidad o en los casos extremos, el muro puede perder totalmente su continuidad, reduciendo significativamente su resistencia.

Sin embargo, la aparición de las grietas en los muros de mampostería no significa que el muro ha fallado catastróficamente, sino que únicamente ha perdido parte de su resistencia total. Esto significa que el diseño que se realizó para ese muro ya no es válido y que ahora éste se comporta de forma impredecible, lo que nos deja con un elevado grado de incertidumbre si es seguro o no habitar el inmueble afectado.

4. Simulación numérica de muros de mampostería

4.1. Generalidades

Como se ha mencionado con anterioridad, el análisis y diseño de estructuras de mampostería puede llegar a ser complicado dado el alto grado de incertidumbre que este tipo de material presenta en la realidad. Sin embargo, una gran cantidad de softwares comerciales han logrado representar con cierto grado de precisión el comportamiento de la mampostería, entre estos softwares se encuentra el RFEM 6, de la empresa Dlubal (2023). Este programa computacional cuenta con un módulo especializado en mampostería, el cual, incluye el comportamiento no lineal del material, y, sobre todo, toma en cuenta una de las condiciones fundamentales que imponen las NTC de mampostería: No se permiten tensiones en el material de mampostería.

Para la elaboración del presente trabajo, se optó por utilizar este software ya que la empresa dueña permite una licencia total y amplia para estudiantes e investigadores de posgrados

4.2. Calibración de modelos en el software RFEM 6

4.2.1. Preliminares

Como se ha mencionado anteriormente, el problema de los programas de cómputo de análisis y diseño estructural para el caso de mampostería es que en muchas ocasiones no consideran el comportamiento no lineal de este material, por

lo que podemos llegar a observar que se presentan tensiones una vez que se ha hecho el análisis, lo que en teoría no está permitido.

El software RFEM 6 posee un módulo para permitir que la mampostería trabaje como un material no lineal, dando la oportunidad de dar de alta un diagrama esfuerzo-deformación que describe hasta cierto punto el comportamiento no lineal; y no solamente eso, sino que, por defecto, el material no admite esfuerzos de tensión, por lo que este software permite visualizar lo más realista posible el comportamiento de un muro de mampostería, incluido su comportamiento en el rango no lineal.

El objetivo principal de este experimento es simular el comportamiento que se observa en los muros reales sometidos a hundimientos diferenciales dentro de un modelo analítico del programa RFEM 6; una vez teniendo las características y parámetros necesarios que simulen el comportamiento real de un muro, se pueden realizar otros experimentos con otras condiciones, pero teniendo la certeza que el programa sí realiza el análisis como se está suponiendo.

4.2.2. Comparativa de comportamiento de un muro de mampostería real contra un muro de mampostería en el programa RFEM 6

Experimentos a escala real

Comencemos con el comportamiento que presenta un muro de mampostería real afectado por hundimientos diferenciales. Para esto, tomaremos los resultados

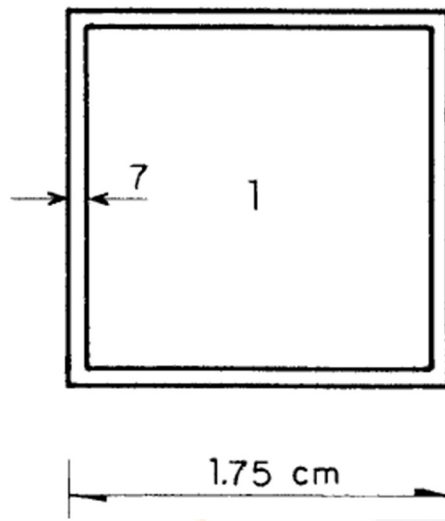
obtenidos por R. Meli y O. Hernández en su trabajo “Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería” del año de 1975.

En dicho documento, los autores realizan experimentos sobre muros reales de mampostería. Estos, consisten en replicar el hundimiento diferencial hasta hacer fallar el muro de la misma forma en que lo haría en caso de presentarse hundimientos diferenciales.

En total, los autores ensayaron 26 muros construidos a base de 9 tipos de piezas diferentes, dos tipos de mortero (uno de baja calidad y otro de buena calidad) y tres tipos de estructuración, cada muro midiendo 1.61m x1.61m, únicamente para la zona de mampostería, sin tomar en cuenta los anchos de los elementos confinantes (Ver ilustración 7).

- a) *“Un marco perimetral de concreto de 7cm de peralte y del espesor del muro, reforzado con dos varillas No. 4.”* (Meli R. y Hernández O., 1975)
- b) *“Un marco perimetral de 15cm de peralte, con 4 varillas No.4”* (Meli R. y Hernández O., 1975)
- c) *“Un marco perimetral de 7cm de peralte y además 3 castillos colados en los huecos de las piezas perforadas y reforzados con una varilla No. 4 en cada castillo.”* (Meli R. y Hernández O., 1975)

Ilustración 7: Esquema del muro experimental

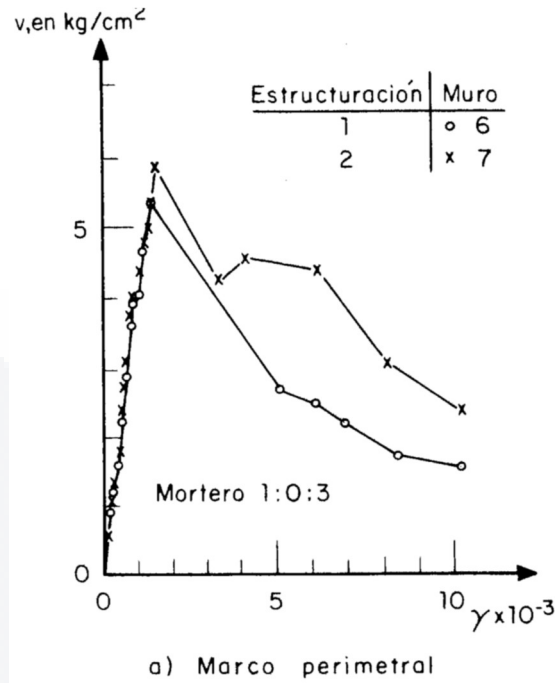


Fuente: Tomado de (Meli y Hernández, 1975)

Usando la primer y segunda estructuración propuesta, usando un mortero de baja calidad y un tabique de tipo rejilla, los autores obtuvieron los resultados de la ilustración 8, en la cual, se puede observar que el muro tiene un comportamiento lineal, hasta que llega a un máximo (cortante de agrietamiento), después de este punto, el muro tiene una cierta reserva de carga disponible, para después caer súbitamente hasta el colapso. El comportamiento mostrado aquí, coincide con las investigaciones recientes dadas en el modelo trilineal mostrado en capítulos anteriores.

En la tabla 3 se muestran las propiedades y resultados de los muros de mampostería a los que se le aplicaron los hundimientos. Se tiene la resistencia a la compresión de la mampostería, resistencia al cortante diagonal de agrietamiento, resistencia al cortante diagonal último y al módulo de cortante hasta el agrietamiento.

Ilustración 8: Diagrama deformación-cortante del muro



Fuente: Tomado de (Meli y Hernández, 1975)

Tabla 3: Propiedades de los muros de mampostería

Tipo de pieza	Estructuración	f'm (kg/cm ²)	v'm agr (kg/cm ²)	v'm max (kg/cm ²)	Gm agr (kg/cm ²)
Tabique de rejilla	1	142	5.4	5.4	4200
	2	142	5.8	5.8	4300

Fuente: Tomado de (Meli, R. y Hernández, O., 1975)

De los resultados mostrados, los autores concluyen que un mayor tamaño en los elementos confinantes, las resistencias generales del muro también aumentan, sin embargo, estas diferencias no son sustancialmente significativas.

Simulaciones en modelos analíticos en modelos del programa RFEM 6

Dentro del software RFEM 6, podemos modelar muros de mampostería como elementos tipo “cascaron” y los castillos y dalas como elementos tipo “barra”. Además, podemos asignarle los valores de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y módulo de cortante, así como sus propiedades no lineales.

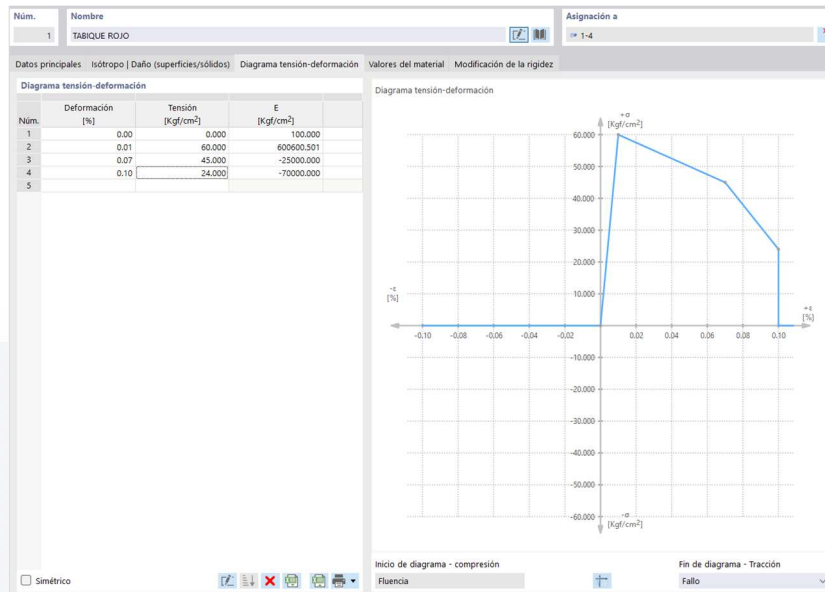
Para calibrar que un modelo represente, por ejemplo, el muro 7 de los experimentos reales (con el tipo de estructuración 2) y que éste simule el comportamiento real del muro de mampostería, se requiere realizar los siguientes pasos:

1. Definir el tipo de material como “Básico” y el modelo del material como “Isótopo de daños (superficies/solidos). Esto nos activará una pestaña en la que podemos colocar el diagrama de esfuerzo-deformación de nuestro material.
2. En la pestaña “Tensión-Deformación” colocamos tres puntos representativos que se obtienen a partir de la gráfica de la ilustración 9. Estos puntos serian el inicial, el punto de agrietamiento y finalmente el punto de falla total. Como se puede observar, el diagrama representa que el material únicamente resiste esfuerzos de compresión, y que cuando se presenten esfuerzos de tensión, el material fallará. A su vez, se muestra que, en un inicio, el material tiene un comportamiento lineal hasta un cierto valor, después cae

abruptamente hasta un tercer valor que cuando es alcanzado, el material falla totalmente.

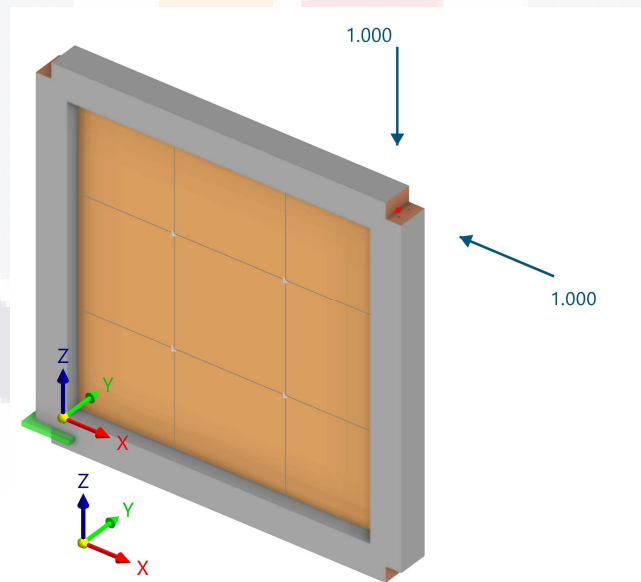
3. Se da de alta el material para el concreto que estará presente en los castillos. Para ello, definimos el material como “hormigón” y el modelo del material como “isótropo elástico lineal” (la no linealidad de los elementos de concreto se abordará en pasos subsiguientes). Dentro de la pestaña de definición de materiales, se colocan los valores fundamentales de éste: resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, que, para este caso, se está usando la fórmula que las NTC de Concreto proporcionan.
4. Se definen las secciones de los elementos confinantes. Para este caso, serian elementos tipo barra de 15cm x 15cm.
5. Se definen las no linealidades de las barras; se considera que las barras de concreto fallan en el instante en que se presenten tensiones.
6. Se define el espesor del muro, que para este caso es de 15cm.
7. Se procede con el modelado del muro de 1.61m x 1.61m. En la esquina inferior izquierda se coloca un apoyo rígido. El sistema se muestra en la ilustración 10.
8. Se define una condición de carga llamada “Prueba”.
9. Se colocan dos cargas en una de las esquinas del muro, una vertical y otra horizontal de magnitud igual a 1 tonelada.
10. Se procede a realizar el cálculo y se obtiene la curva de esfuerzo-deformación (Ver gráfica 1).

Ilustración 9: Ventana de edición de propiedades del material de RFEM 6



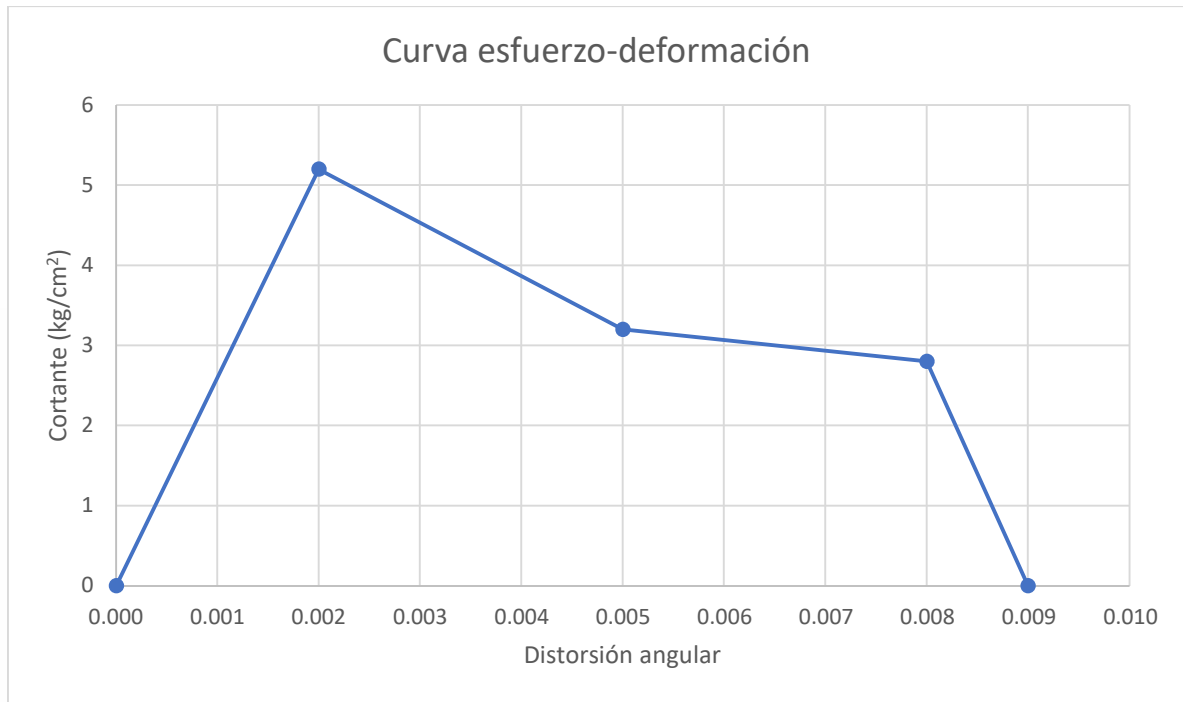
Fuente: Tomado de (Autor)

Ilustración 10: Muro de mampostería modelado en RFEM 6



Fuente: Tomado de (Autor)

Gráfica 1: Curva esfuerzo-deformación de muro modelado en RFEM 6



Fuente: Tomado de (Autor)

Si comparamos la gráfica 1 con la ilustración 4 podemos observar que el modelo analítico en RFEM 6 sigue el mismo patrón que el modelo a escala real de R. Meli y O. Hernández (1975). Con esto, comprobamos que las características y el procedimiento descrito anteriormente son válidos para poder predecir el comportamiento de un muro de mampostería.

4.3. Resultados de la simulación de muros de mampostería sometidos a hundimientos usando el software RFEM 6.

4.3.1. Preliminares

Una vez que se tiene calibrado un modelo estructural en el software RFEM 6, se procede con la experimentación de muros de mampostería sometidos a

hundimientos diferenciales, usando las mismas características del modelo calibrado.

4.3.2. Modelos analíticos

En el trabajo de tesis se estudiaron tres modelos analíticos, los cuales fueron sometidos al método “*pulldown*”. A cada muro se le asignaron propiedades y características únicas.

Para llevar a cabo el método “*pulldown*” en el programa RFEM 6, se da de alta una condición de carga llamada “Hundimiento” y se establece que el programa fraccione esta carga en 10% y posteriormente incremente la carga en la misma fracción (esto es, que en el primer incremento se tiene el 10% de la carga impuesta, en el segundo, el 20% y así sucesivamente); este procedimiento se sigue hasta que la estructura modelada se vuelve inestable (esto es, que colapsa).

Posteriormente se procede a colocar el tipo de carga “Deformación impuesta en línea” desde el punto medio del muro hasta una de sus esquinas. La deformación en el punto inicial es de 0.0mm y al final del muro es de 300mm, esto genera una deformación lineal (ver Ilustraciones 11, 12 y 13).

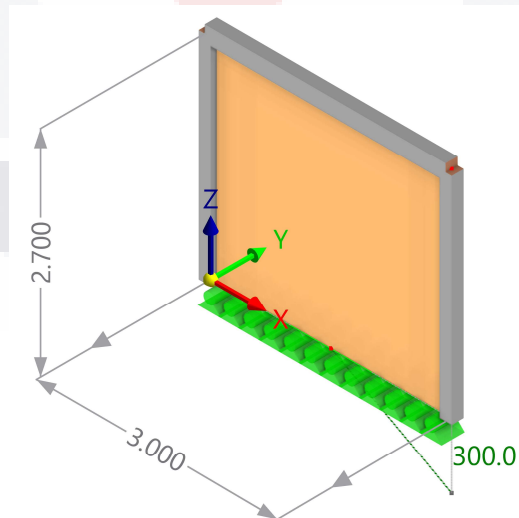
Finalmente, las propiedades de los materiales empleados serán las que se presentan en tabla 4 y posteriormente se procede a correr el análisis bajo la condición de hundimientos, se accede a la sección de “Diagramas de cálculo” y se obtiene la gráfica de hundimientos contra cargas resistidas.

Tabla 4: Propiedades de los modelos analíticos realizados

Propiedad	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Longitud (m)	3.00	5.00	5.00
Altura (m)	2.70	4.70	4.70
Espesor de muro (cm)	15	15	30
Tipo de apoyo	Simplemente apoyado	Simplemente apoyado	Simplemente apoyado
Porcentaje de afectación del muro (%)	50	50	50
Secciones del marco de concreto (cm)	15x20	15x20	30x20
f'_m (kg/cm ²) ⁽¹⁾	142		
v'_m (kg/cm ²) ⁽²⁾	5.4		
v'_{ultm} (kg/cm ²) ⁽³⁾	5.4		
E_m (kg/cm ²) ⁽⁴⁾	400000		
E_c (kg/cm ²) ⁽⁵⁾	221359		
G_m (kg/cm ²) ⁽⁶⁾	4200		
Ilustración del modelo	11	12	13

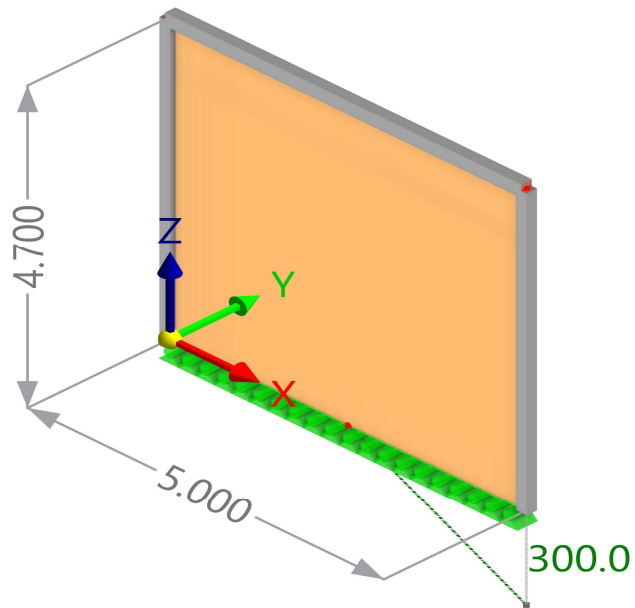
- (1) Resistencia a la compresión.
- (2) Resistencia al cortante diagonal de agrietamiento.
- (3) Resistencia al cortante diagonal último.
- (4) Módulo de elasticidad de la mampostería
- (5) Módulo de elasticidad de concreto (según las NTC Concreto, 2017).
- (6) Módulo de rigidez de la mampostería

Ilustración 11: Muro experimental de Modelo 1



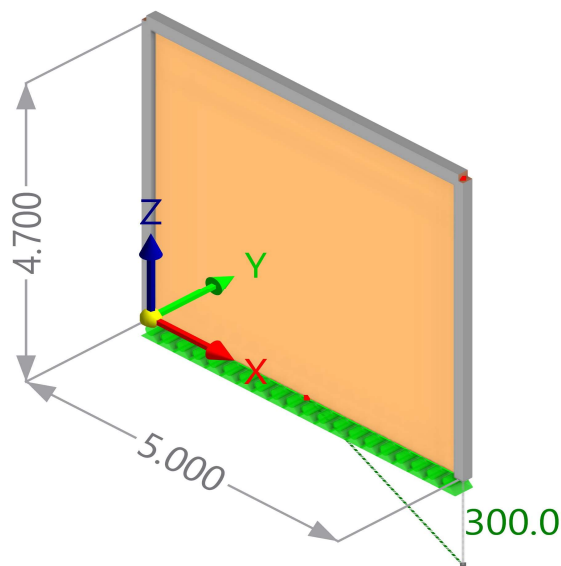
Fuente: Tomado de (Autor)

Ilustración 12: Muro experimental de modelo 2



Fuente: Tomado de (Autor)

Ilustración 13: Muro experimental de modelo 3



Fuente: Tomado de (Autor)

5. Resultados de las simulaciones numéricas

5.1. Análisis estadístico

5.1.1. Generalidades

La estadística es una disciplina que se enfoca en la recopilación, análisis, interpretación y presentación de datos numéricos. Su objetivo principal es obtener información útil a partir de conjuntos de datos, lo que permite tomar decisiones informadas en una variedad de campos (Gutiérrez, 2015). La estadística se utiliza para resumir datos, identificar patrones, calcular probabilidades y tomar decisiones basadas en evidencia empírica. Es una herramienta fundamental en la investigación y la toma de decisiones.

Para una mejor interpretación y visualización de los datos, se obtienen gráficas tales como los histogramas y graficas de barras, lo que facilita la identificación de tendencias y patrones, como, por ejemplo, identificar simetrías o asimetrías, las cuales describen la forma en que se distribuyen los datos (Walpole et al., 2012). Esto ayuda a resumir y visualizar la distribución que poseen éstos.

Para un análisis más profundo de los datos se realiza inferencia y modelación estadística, como pueden ser pruebas de hipótesis y estimación de modelos probabilísticos relacionando más de una variable.

En este trabajo se lleva a cabo un análisis estadístico de los hundimientos donde se presenta el estado de colapso en tres modelos analíticos que se describieron en

la sección anterior. También se analiza la carga axial que se alcanza, al momento del colapso.

En dicho análisis se obtienen medidas descriptivas para los hundimientos y cargas axiales. Se realiza un análisis gráfico para visualizar la distribución que poseen estas variables, y se plantean pruebas de bondad de ajuste. Por último, se obtienen funciones de confiabilidad y de vulnerabilidad para cada uno de los modelos analíticos propuestos.

5.1.2. Modelo de probabilidad: Distribución Gamma

La distribución Gamma es ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería debido a su gran flexibilidad para ajustarse a diversas formas y escalas; por lo general, se utiliza para modelar tiempos de vida de sistemas mecánicos, también se puede modelar la cantidad de lluvia acumulada en un periodo de tiempo, o para estimar la probabilidad de que un sistema determinado falle en función del tiempo, entre otros.

La distribución gamma es una distribución de probabilidad continua que depende de dos parámetros característicos: α , que es el parámetro de forma y λ , que es el parámetro de escala. Las propiedades de esta función de probabilidad se describen a continuación (Walpole et al., 2012):

La fórmula de la función de densidad de la distribución se define como:

$$f(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{\alpha-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\alpha)}$$

Donde los parámetros de forma y tasa deben ser números reales positivos:

$$\alpha, \lambda > 0$$

y la función gamma:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt.$$

El dominio de la función está dado por: $x \in (0, +\infty)$.

Si una variable aleatoria sigue una distribución gamma, se denota como sigue:

$$X \sim \Gamma(\alpha, \lambda)$$

La función de distribución acumulada se define como:

$$F(x) = \int_0^x \frac{\lambda(\lambda y)^{\alpha-1} e^{-\lambda y}}{\Gamma(\alpha)} dy$$

Dos momentos importantes de la distribución gamma son la media y la varianza. La media está dada por:

$$\mu = \frac{\alpha}{\lambda}.$$

La varianza está definida por:

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{\lambda^2}$$

Para realizar la estimación de los parámetros α y λ se pueden usar varios métodos: método de momentos y método de máxima verosimilitud. El primero de estos es el más sencillo de aplicar y modelar; consiste en igualar los momentos teóricos (μ y σ^2) a los momentos muestrales (\bar{x} y s^2).

Para un conjunto de datos de tamaño n , en el que se tienen observaciones $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, los momentos muestrales están dados por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Si igualamos los momentos teóricos y muestrales y resolvemos para los parámetros α y λ , tenemos que:

$$\alpha = \frac{\bar{x}^2}{s^2}$$

$$\lambda = \frac{s^2}{\bar{x}}$$

Estos son los estimadores de los parámetros de forma y de tasa de la distribución gamma, por el método de momentos. Este método puede presentar estimaciones menos precisas.

Por otro lado, el método de Máxima Verosimilitud es más preciso. Sin embargo, este requiere procedimientos matemáticos complejos e iterativos para ir ajustando los parámetros de forma y de escala hasta converger a una combinación que se ajuste a la función de distribución deseada. Generalmente, este método es sencillo de aplicar utilizando softwares de programación como pueden ser el programa R o el lenguaje de programación Python.

5.1.3. Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad y ajuste son utilizadas en el campo de la estadística para observar que tan bien se ajusta un conjunto de datos observados a un modelo teórico de una distribución de probabilidad (Walpole, 2012). Existen varias pruebas, tales como la prueba chi-cuadrado, prueba Kolmogórov-Smirnov, prueba Anderson-

Darling, entre otras. Estas pruebas poseen diferentes grados de sensibilidad y su uso depende en gran medida del tipo de problema que se está analizando, tamaño de la muestra y las suposiciones que se hacen sobre los datos.

Prueba Kolmogórov-Smirnov

Para llevar a cabo esta prueba, se requieren seguir una serie de pasos. Comencemos con los pasos preliminares (Rodríguez, 2021):

1. Obtención de la muestra.
2. Estimación de los parámetros α y λ . Se puede utilizar el método de momentos o el método de máxima verosimilitud.
3. Ordenar la muestra de menor a mayor.
4. Proponer una función de distribución acumulada teórica. Por ejemplo, la función de distribución acumulada Gamma.

Una vez se tengan los pasos preliminares, se puede proceder con los pasos del método Kolmogórov-Smirnov (K-S):

1. Con los datos de la muestra, crear una función de distribución acumulada empírica.
2. Utilizar la función de distribución acumulada teórica y la empírica para calcular la diferencia absoluta que existe entre ellas para cada uno de los puntos de ambas funciones.
3. Obtener el valor máximo de las diferencias.

4. Determinar el p-valor de significancia, que depende del tipo de distribución utilizada. Si el p-valor es menor que el valor de la significancia, la hipótesis se rechaza, en caso contrario, no se rechaza.

5.1.4. Función de confiabilidad

Esta función describe la probabilidad de que un sistema o modelo funcione correctamente durante un periodo dado. Generalmente el periodo se refiere al tiempo, pero éste puede tomar cualquier tipo de magnitud y adaptarse a las necesidades propias del problema analizado (Rodríguez, 2021).

Formalmente, la función de confiabilidad para un tiempo determinado se define como la probabilidad de que un sistema o modelo funcione correctamente desde un tiempo inicial. Matemáticamente hablando, esta función se expresa como el complemento de la función de distribución acumulada:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Esta función nos ayuda a determinar la probabilidad de que un sistema o modelo falle en función del tiempo t .

5.2. Resultados de los modelos analíticos

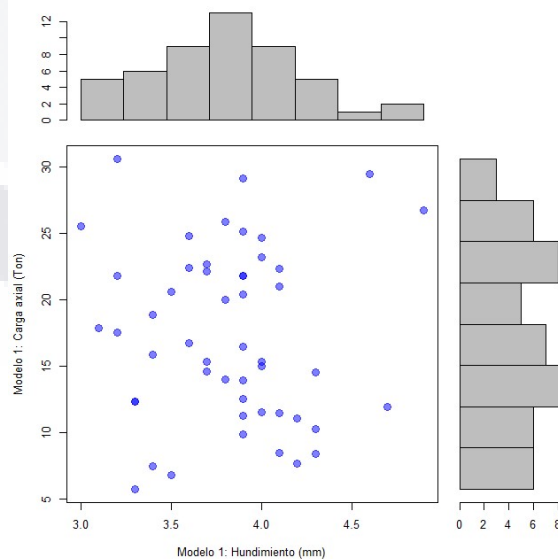
Usando el software R, se graficó la frecuencia de falla de los muros debido a los hundimientos y las cargas axiales resultantes. Esto se realizó para conocer su

comportamiento distribucional conjunto y marginal, además de revisar si existe alguna correlación entre ambas magnitudes.

En las gráficas 2, 3 y 4 se observa una gran variabilidad en el histograma de la carga axial, además, muestra un comportamiento poco definido. Sin embargo, en el histograma de hundimientos se puede observar un comportamiento menos variable y más definido.

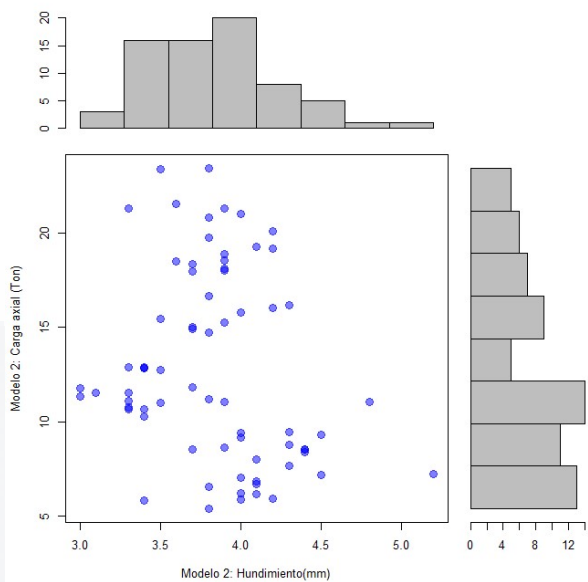
Por otro lado, es posible observar que la mayor parte de los hundimientos se localizan alrededor de 4.0mm para los tres modelos analíticos estudiados, además, los histogramas de hundimientos parecen seguir una distribución de probabilidad gamma.

Gráfica 2: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 1.



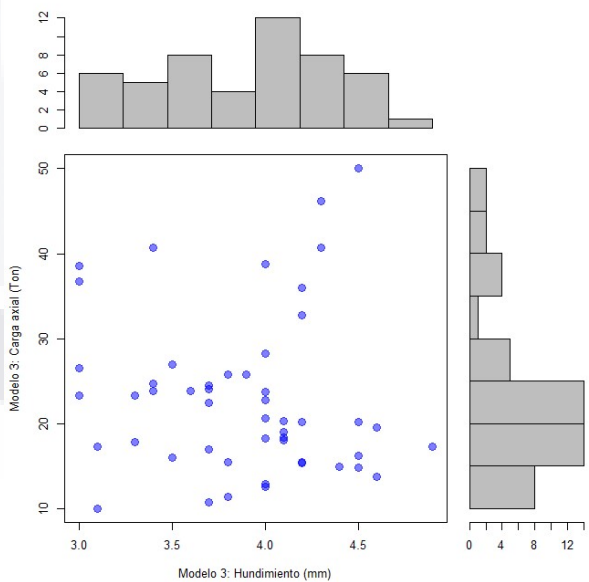
Fuente: Tomado de (Autor)

Gráfica 3: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 2.



Fuente: Tomado de (Autor)

Gráfica 4: Relación estadística entre hundimientos y cargas axiales en el modelo 3.



Fuente: Tomado de (Autor)

Después de haber revisado los histogramas y determinar que los datos, aparentemente, siguen una distribución gamma, se procedió a corroborar esta afirmación. Para ello, se obtuvieron las medidas descriptivas de los tres modelos (tabla 5) con las cuales, se calcularon los estimadores de la función gamma.

Tabla 5: Medidas descriptivas de los modelos analíticos

Medidas descriptivas	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Carga (Ton)	Hundimiento (mm)	Carga (Ton)	Hundimiento (mm)	Carga (Ton)	Hundimiento (mm)
Mínimo	5.753	3.000	5.404	3.000	10.04	3.000
1° Cuantil	12.077	3.525	8.581	3.500	16.42	3.525
Mediana	16.623	3.900	11.522	3.850	20.48	4.000
Media	17.368	3.814	12.872	3.843	23.10	3.878
3° Cuantil	22.311	4.000	17.661	4.100	25.83	4.200
Máximo	30.610	4.900	23.420	5.200	49.99	4.900
Desviación estándar	6.553	0.408	5.0929	0.418	9.373	0.479

Fuente: Tomada de (Autor)

De la tabla mostrada, se observó que el comportamiento de los valores de los tres modelos es casi idéntico desde el 1° cuantil hasta el 2° cuantil (mediana), sin embargo, a partir del 3° cuantil, los tres modelos comienzan a tener resultados diferentes. Por otro lado, mientras que los valores mínimos son idénticos para los 3 modelos, los valores máximos son idénticos solo para el modelo 1 y modelo 3, siendo el mayor de los tres el hundimiento máximo registrado en el modelo 2.

Con esta información y con la ayuda de un programa en el software R (ver anexo) se determinaron los parámetros de la función gamma, los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Estimación de parámetros de la función Gamma de los tres modelos

Parámetros de la función Gamma	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Parámetro de forma α	87.34874	84.41097	65.29491
Parámetro de escala λ	0.04366405	0.04552556	0.05939207

Fuente: Tomada de (Autor)

Con los parámetros estimados, se procedió a realizar una prueba de bondad de ajuste (prueba Kolmogórov-Smirnov) para comprobar si los datos siguen una distribución gamma, el p-valor de la prueba debe ser mayor a 0.05. Dado lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis:

- **H0: Los datos siguen una distribución de probabilidad gamma.**
- **H1: Los datos no siguen una distribución de probabilidad gamma.**

A continuación, se muestran los valores obtenidos:

Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste de los tres modelos

Parámetros de la prueba Kolmogórov-Smirnov	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Valor de significancia D	0.16	0.15429	0.2
P-valor	0.5441	0.4911	0.27

Fuente: Tomado de (Autor)

Al ser el p-valor mayor a 0.05 para los tres modelos, se concluyó que la hipótesis H0 no se rechaza, por lo tanto, los datos se ajustan a una distribución gamma.

Una vez que se tiene la certeza que los datos siguen una distribución gamma, se determinaron las funciones de distribución acumulada de cada uno de los modelos, quedando como sigue:

$$F_{\text{modelo } 1}(x) = \int_0^x \frac{0.0437(0.0437y)^{86.349} e^{-0.043}}{\Gamma(87.349)} dy$$

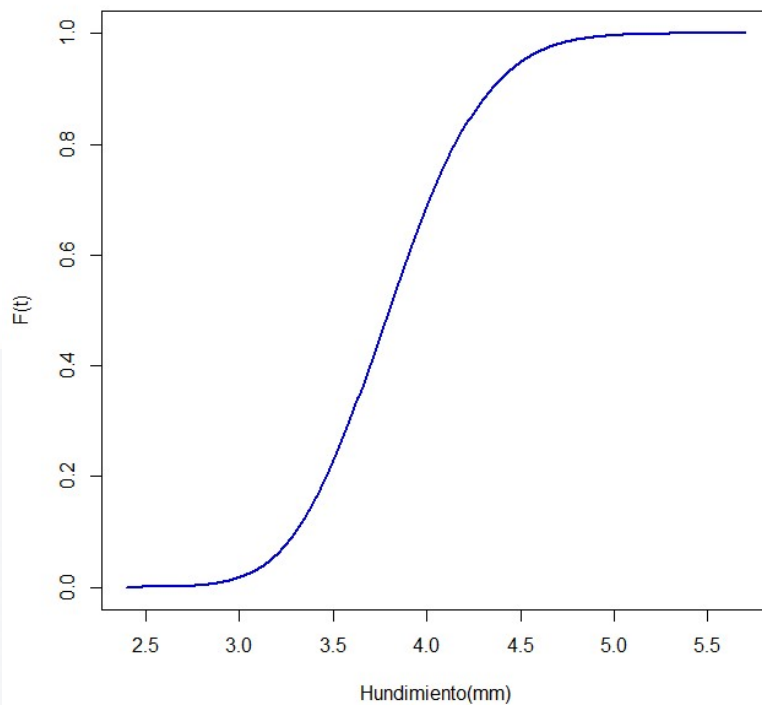
$$F_{\text{modelo } 2}(x) = \int_0^x \frac{0.0455(0.0455y)^{83.411} e^{-0.0455}}{\Gamma(84.411)} dy$$

$$F_{\text{modelo } 3}(x) = \int_0^x \frac{0.0594(0.0594y)^{64.295} e^{-0.0594y}}{\Gamma(65.295)} dy$$

Estas funciones distribución acumulada son las funciones de vulnerabilidad de los muros de mampostería analizados. Para resolver las integrales y graficar estas funciones se utilizó el programa R, los resultados se muestran en las gráficas 5, 6 y 7.

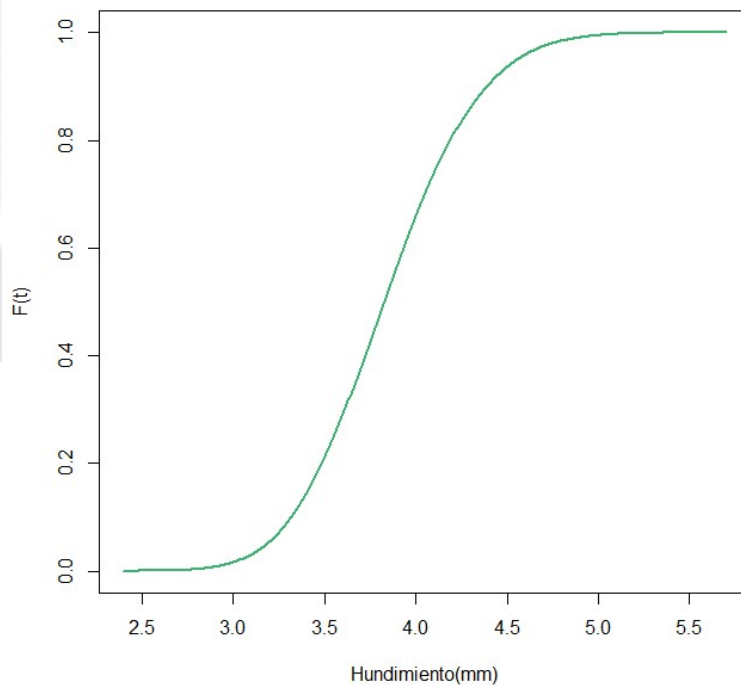
Estas gráficas muestran la probabilidad de que un muro de mampostería colapse debido a un hundimiento dado. Se observó que para hundimiento menores a 3.0mm, la probabilidad de que el muro colapse es prácticamente nula, mientras que para un hundimiento de 5.5mm, es seguro que el muro llegue al colapso.

Gráfica 5: Función de vulnerabilidad del modelo 1



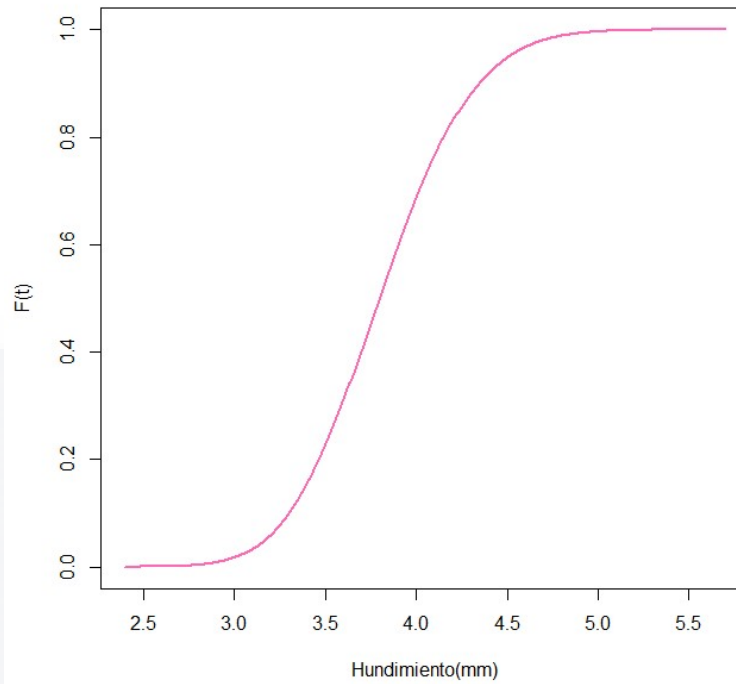
Fuente: Tomado de (Autor)

Gráfica 6: Función de vulnerabilidad del modelo 2



Fuente: Tomado de (Autor)

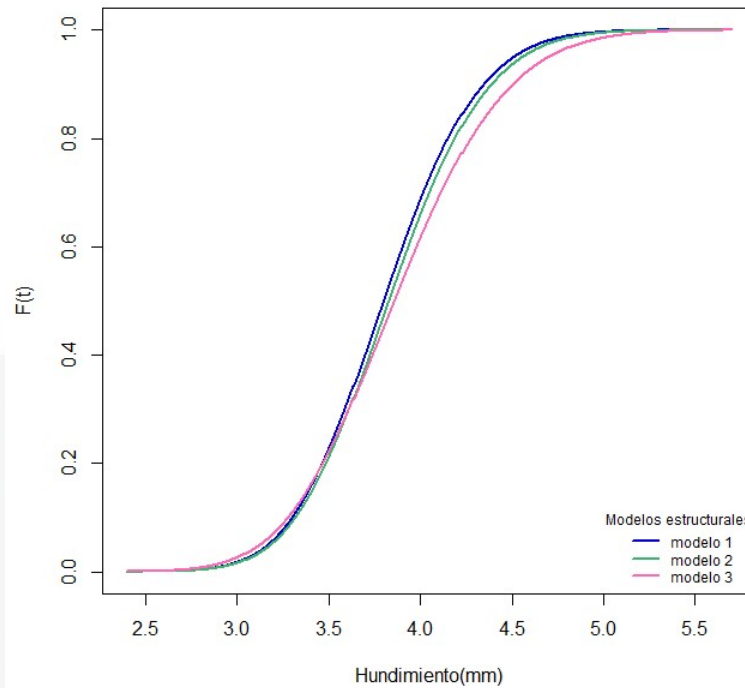
Gráfica 7: Función de vulnerabilidad del modelo 3



Fuente: Tomado de (Autor)

En la gráfica 8 se incluyeron las funciones de vulnerabilidad de los tres modelos. En esta, se observó que para niveles de hundimientos menores a 3.5mm, los tres modelos tienen comportamiento similar. Sin embargo, entre los 3.5mm y los 5.0mm, el modelo 3 resultó menos vulnerable que los modelos 1 y 2. Por último, para los tres modelos, en rangos superiores a 5.0mm, la probabilidad de que el muro falle es prácticamente del 100%.

Gráfica 8: Funciones de vulnerabilidad de los tres modelos



Fuente: Tomado de (Autor)

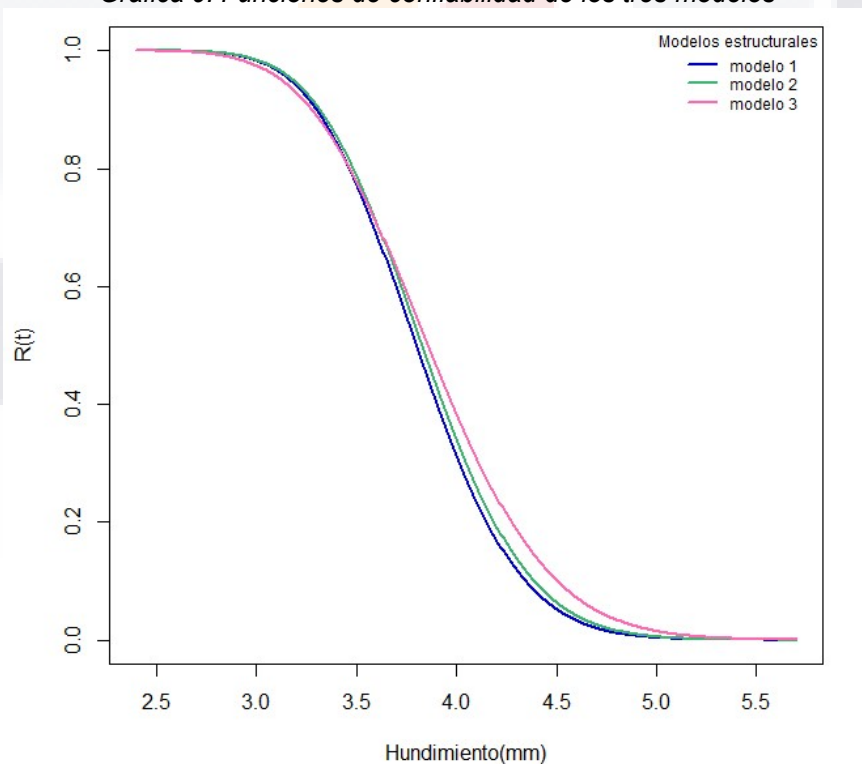
Como punto final se obtuvieron también las funciones de confiabilidad; estas funciones nos muestran qué tan confiable es el sistema estructural que se propone y, como se mencionó en párrafos anteriores, estas se construyen con el complemento de la función de distribución acumulada, o, dicho en otras palabras, con el complemento de la función de vulnerabilidad.

En la gráfica 9 se observó que para hundimientos menores a 3.5mm, la probabilidad de que ninguno de los tres muros colapse es casi del 100%. Sin embargo, para el rango de los 3.5mm a 5.0mm, la confiabilidad de los muros se reduce, siendo casi idénticos los muros de los modelos 1 y 2; en el caso del modelo 3, se tiene que es ligeramente más confiable al ser capaz de resistir mayores

hundimientos. Finalmente, para hundimientos mayores a 5.0mm, la probabilidad de que alguno de los tres muros no sufra el colapso es prácticamente nula

En la gráfica 9 se observó que para hundimientos menores a 3.5mm, es muy probable que cualquiera de los tres muros no alcance el colapso. Sin embargo, para el rango de los 3.5mm a 5.0mm, tenemos que la probabilidad de que el muro no alcance el colapso es similar para los modelos 1 y 2; para el modelo 3, el muro es capaz de resistir mayores hundimientos antes de alcanzar el colapso para el mismo rango de hundimientos. Finalmente, para hundimientos mayores a 5.0mm, la probabilidad de que alguno de los tres muros no colapse es prácticamente nula.

Gráfica 9: Funciones de confiabilidad de los tres modelos



Fuente: Tomado de (Autor)

6. Discusiones

Al observar la gráfica 8 se puede afirmar que en un tramo inicial (antes de los 3.5mm) los tres muros presentan una resistencia al hundimiento similar. Sin embargo, esto cambia para el caso del muro más grueso a partir de los 3.5mm de hundimiento, el cual muestra una mayor resistencia y, por lo tanto, presenta una menor vulnerabilidad. Por último, se observa que tanto el muro del modelo 1 y modelo 3 resisten un hundimiento máximo de 4.1 mm, mientras que el modelo 2 resiste hasta 5.2mm; estos resultados fueron totalmente inesperados, ya que se esperaba que el muro más grueso fuese el que resistiera más hundimientos. El motivo por el cual el muro del modelo 2 resistió más hundimientos puede deberse a que es más flexible que los otros dos, y, por tanto, resiste mayores hundimientos; esta última afirmación puede continuarse estudiando en posteriores trabajos de investigación y determinar si es cierta o falsa.

Por otro lado, los muros de mampostería observados en la realidad no suelen colapsar a los 5.0mm de hundimiento como los que se observaron en los modelos analíticos. Esto resulta contradictorio a lo estudiado en este trabajo, ya que en un inicio se corroboró que el modelo analítico de prueba se comportó de manera similar a un muro real. Lo anterior pudo deberse a la forma en que el software realiza el análisis de elementos finitos,

Puede llegar a pensarse que los resultados no son correctos o válidos, sin embargo, el modelo fue calibrado y los resultados que se obtuvieron fueron similares

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a los que Meli y Hernández (1975) obtuvieron. Esto se puede deber a la sobre simplificación que en ambos experimentos se hicieron. Además, en una construcción real, están involucrados más elementos, tales como el recubrimiento de los muros, el acero de refuerzo de los castillos y dalas e inclusive el sistema de piso (losa nervada, losa de vigueta y bovedilla, etc.) mismos que no se consideraron en el modelo analítico y que pueden llegar a influir significativamente en los resultados.

Cabe mencionar que el sistema de dalas y castillos propuestos en el modelo analítico falla en el instante en que se presentan tensiones en los elementos, lo que hasta cierto punto no es válido, ya que si éstas tienen acero de refuerzo (como sucede en la realidad) los esfuerzos en tensión que se presentan son absorbidos por el acero. Dado lo anterior, es posible que el sistema haya llegado antes a su falla de lo que realmente puede llegar a ocurrir.

Puede llegar a ser que el mismo sistema de resolución de ecuaciones de equilibrio de los elementos finitos del programa RFEM 6 puede influir en los resultados. Se tiene la percepción general que un mayor número de elementos finitos significaría un mejor resultado, sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que se ha demostrado que a mayor número de elementos finitos se converge a una solución errónea, es por ello por lo que las Normas Técnicas de Mampostería sugieren usar una relación de aspecto de elementos finitos de un máximo de 2 para obtener resultados confiables (NTC Mampostería, 2017). Dado lo anterior, se recomienda que, al usar la metodología propuesta, se tenga en consideración la

forma en que los programas comerciales de análisis y diseño estructural utilizan los elementos finitos.

Cabe hacer mención que las funciones de vulnerabilidad que se obtuvieron son representativas solamente de los muros estudiados con sus características propias. Para determinar la vulnerabilidad de una estructura de mampostería completa, se recomienda estimar las funciones de vulnerabilidad de cada uno de los muros de forma individual y después realizar un promedio de todas. Este método propuesto no tendría en consideración la posible contribución de otros elementos estructurales como la cimentación y el sistema de piso (losa).

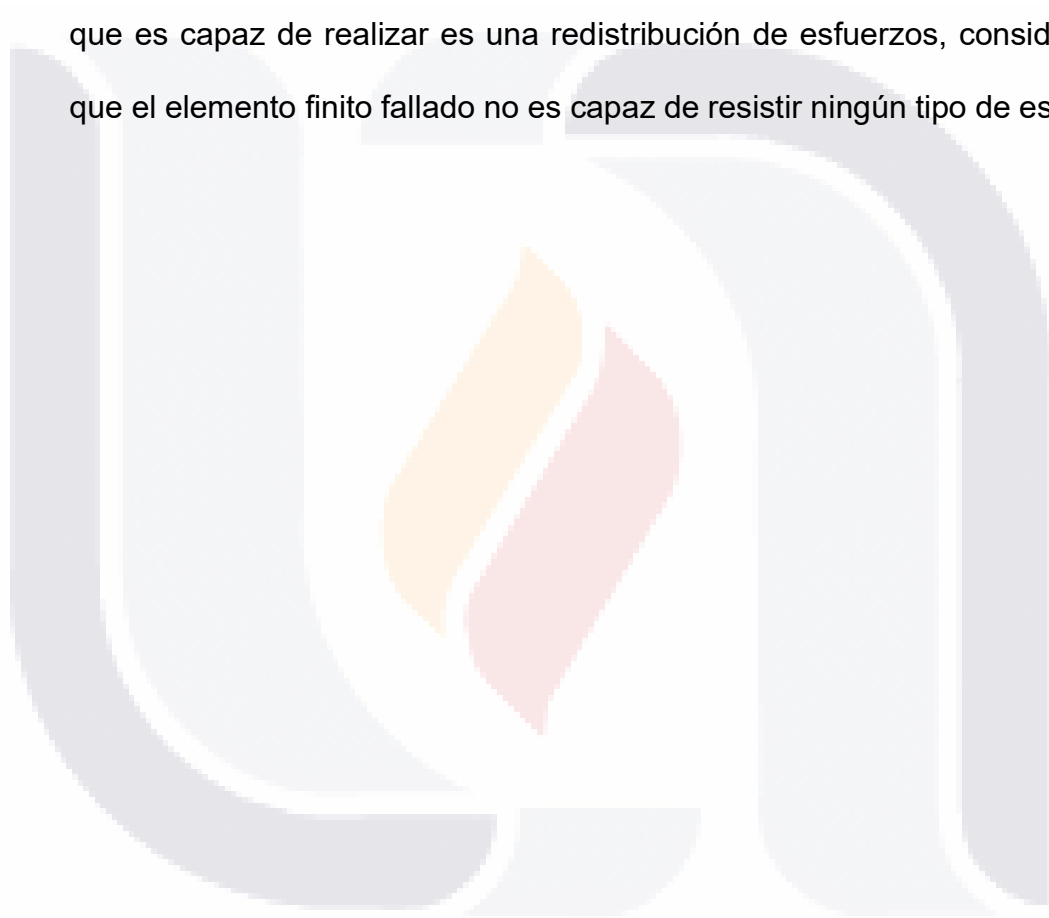
Por último, se reconoce que la metodología propuesta puede complementarse y afinarse con una mayor cantidad modelos analíticos, cambiando propiedades mecánicas, observando el comportamiento en conjunto con otros elementos estructurales, posición del hundimiento y similares. La propuesta en este trabajo sirve como punto de partida para lograr determinar la vulnerabilidad de una estructura de mampostería completa.

7. Conclusiones

Del trabajo realizado se concluyen los siguientes puntos:

- Es posible determinar la vulnerabilidad de un muro estructural de mampostería que ha sido afectado por subsidencia.
- Es posible determinar la confiabilidad de un muro estructural de mampostería,
- Es posible modelar un muro de mampostería en el programa RFEM 6 y emular el comportamiento que tiene en la realidad.
- Para determinar una función de vulnerabilidad, es necesario realizar un análisis estadístico, por lo que es altamente recomendable realizar la mayor cantidad de experimentos analíticos para que las funciones sean más confiables y puedan utilizarse para un caso de estudio de una construcción real.
- La sobre simplificación de los modelos analíticos puede llevar a obtener resultados erróneos o poco confiables, por lo que es recomendable modelar los muros lo más realista y practico posible.
- El sistema estructural en conjunto (muros, trabes, columna, losa, etc.) de una construcción real influye significativamente en el comportamiento global de una estructura, por lo que, si se quiere realizar el estudio de la vulnerabilidad de una estructura real, habría que realizar el procedimiento descrito en este trabajo para todos y cada uno de los elementos y observar su comportamiento.

- Existe una limitante en la mayoría de los programas comerciales de análisis estructural para el cálculo de plastificaciones en los materiales. En el caso del programa RFEM 6, los elementos finitos para los muros de mampostería fallan en el instante en que se presentan tensiones. Sin embargo, el programa no es capaz de interpretar un agrietamiento en el modelo, lo único que es capaz de realizar es una redistribución de esfuerzos, considerando que el elemento finito fallado no es capaz de resistir ningún tipo de esfuerzo.



Referencias

Aranda Gomez, J. M., & Aranda Gomez, J. J. (1985). *Estudio sobre Agrietamientos en la Ciudad de Aguascalientes, Ags.* Reporte tecnico, Universidad Autonoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Astroza I., M., & Schmidt A., A. (2004). *Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño.* Revista de Ingeniería Sísmica, 70, 59. <https://doi.org/10.18867/ris.70.51>

ATC-58-1 (2011). *Seismic Performance Assesment of Builideng Volume 1 Methodology.* Redwood City. California, E.U.A: Applied Technology Council. U.S. Department of Homeland Security (DHS).

Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years.* ISET Journal of Earthquake Technology, 43(3), 30.

Cázares Adame, J. U. (2013). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica para estructuras de mampostería considerando la calidad de la supervisión.* Universidad Nacional Autónoma de México.

Chávez Pérez, Yaimara. (2018). *Análisis numérico del comportamiento de muros de mampostería frente a la subsidencia, aplicando la técnica pulldown*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

De Alba, H. R., & Lewenstein, B. P. (2007). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en zonas urbanas*. *Ingeniería*, 11(1), 13–26.

De Lira Gómez, P. (2016). *Estudio de vulnerabilidad estructural de las construcciones ante fracturamientos por subsidencia*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Delgado Espinosa, A. A. (2014). *Evaluación, Diagnóstico estructural y propuesta de intervención edificio de vivienda Prado y Santa Elena*. UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS.

Flores Corona, L. (2006). *Guía básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. Secretaría de Gobernación: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Gaceta oficial de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de estructuras de mampostería*.

Gaceta oficial de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto*.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Ganzerli, S., Pantelides, C. P., & Reaveley, L. D. (2000). Performance-based desing using structural optimization. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(11), 1677-1690. Obtenido de [https://doi.org/10.1002/1096-9845\(200011\)29:11<1677::AID-EQE986>30.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1096-9845(200011)29:11<1677::AID-EQE986>30.CO;2-N)

Giardina, G., Hendriks, M. A. N., & Rots, J. G. (2009). *Assessment of the settlement vulnerability of masonry buildings*. 33–1, 15.

Gutiérrez González, E., & Vladimirovna Panteleeva, O. (2014). *Probabilidad y estadística: Apliaciones a la ingeniería y las ciencias* (Primera ed.). México.

Hibbeler, R. C. (2017). *Mécanica de Materiales*. México: Pearson.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales.pdf* (1a ed.).

Julio-Miranda, P., Ortiz-Rodríguez, A. J., Palacio-Aponte, A. G., López-Doncel, R., & Barboza-Gudiño, R. (2012). *Damage assessment associated with land subsidence in the San Luis Potosi-Soledad de Graciano Sanchez metropolitan area, Mexico, elements for risk management*. *Natural Hazards*, 64(1), 751–765. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0269-3>

Leal Rubio, O. (2017). *Evaluación de vulnerabilidad de viviendas afectadas por hundimientos en función de los tipos de materiales empleados en el pueblo*

de Jocotepec, Jalisco. INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE.

Liu, J., Wang, H., & Yan, X. (2015). *Risk evaluation of land subsidence and its application to metro safety operation in Shanghai*. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 372, 543–553. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-543-2015>

Nicasio Colque Huayhua, K. E., & Oquendo Baez, A. (2017). *Elaboración de curvas de fragilidad y consecuencia de muros de albañilería confinada construida con blocker II*. Universidad Privada de Tacna.

Nicodemo, G., Peduto, D., & Ferlisi, S. (2020). *Building damage assessment and settlement monitoring in subsidence-affected urban areas: Case study in the Netherlands*. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 382, 651–656. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-651-2020>

Peduto, D., Korff, M., Nicodemo, G., Marchese, A., & Ferlisi, S. (2019). *Empirical fragility curves for settlement-affected buildings: Analysis of different intensity parameters for seven hundred masonry buildings in The Netherlands*. Soils and Foundations, 59(2), 380–397. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.12.009>

Pérez Gavilán Escalante, J. J., Brzev, S., Espinoza Cazarin, E. F., Ganzerli, S., Quiun, D., & Reiter, T. M. (2023). Experimental Research Studies on Seismica

Behaviour of Confined Masonry Structures: Current Status and Future Needs.
Buildings.

Porter, K. (2021). *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. En M. Beer, I. A. Kougoumtzoglou, E. Patelli, & I. S.-K. Au (Eds.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 1–29). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_256-1

Preciado, A., Rodríguez, O., Caro, J. L., & Lujan, R. (2015). *Vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería no reforzada en el pueblo de Tlajomulco, Jalisco*. 16.

Rojas, J. J. E., & Botia, M. A. M. (2021). *Aplicación del método de índice de vulnerabilidad (Benedetti & Petrini) para evaluación de edificaciones de mampostería no reforzada en el barrio Surinama*. Universidad Santo Tomás.

Romero-Navarro, M. A., Pacheco-Martínez, J., Ortiz-Lozano, J. A., León, M. E. Z.-D., Araiza-Garaygordobil, G., & Mendoza-Otero, E. (2010). *Land subsidence of the Aguascalientes Valley, México: Historical review and present situation*. 339, 4.

Rondón, E. M., Cho, G. C., & Araujo, I. G. (2007). *Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos*. 21.

Rota, M., Pena, A., & Magenes, G. (2008). *A procedure for deriving analytical fragility curves for masonry buildings.*

Saeidi, A., Deck, O., & Verdel, T. (2009). *Development of building vulnerability functions in subsidence regions from empirical methods. Engineering Structures, 31(10), 2275–2286.*
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.04.010>

Secretaria de Obras Públicas del Estado de Aguascalientes. (2021). *Introducción “SIFAGG”.*

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. (2019). *Edificaciones de mampostería.* México: LIMUSA.

Walpole, R., Myers, R., Myers, S., & Kying, Y. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena ed.). México: Pearson educación.

Anexos

```

#----- PROGRAMA TESIS VÍCTOR -----
# install.packages("psych")
library("psych")
# Posiciones de la leyenda; uso gráfico
ley<- c( "bottom","bottomleft", "left","topleft","top",
        "topright", "right","bottomright", "center")
datos<- read.table("F:/Tesis/HC.txt",header=T)
Hundimiento.mod1<-datos[1:50,1]
Carga.mod1<-datos[1:50,2]
Hundimiento.mod2<-datos[,3]
Carga.mod2<-datos[,4]
Hundimiento.mod3<-datos[1:50,7]
Carga.mod3<-datos[1:50,8]

summary(Hundimiento.mod1)
var(Hundimiento.mod1)
summary(Carga.mod1)
var(Carga.mod1)

summary(Hundimiento.mod2)
var(Hundimiento.mod2)
summary(Carga.mod2)
var(Carga.mod2)

summary(Hundimiento.mod3)
var(Hundimiento.mod3)
summary(Carga.mod3)
var(Carga.mod3)

#----- GRÁFICAS
x11()
scatterHist(Hundimiento.mod1,Carga.mod1,smooth=FALSE,ab=FALSE,
correl=FALSE,data=NULL, density=FALSE,means=TRUE,
            ellipse=FALSE,cex.cor=1, cex.point=1.5, xlab="Modelo 1:
Hundimiento",ylab="Modelo 1: Carga axial",

smoother=FALSE,nrpoints=10,grid=FALSE,x.breaks=8,y.breaks=8,x.space=0,
y.space=0,

freq=TRUE,x.axes=TRUE,y.axes=TRUE,col=c("magenta"),alpha=.5,pch=18)
x11()

```

```
scatterHist(Hundimiento.mod2,Carga.mod2,smooth=FALSE,ab=FALSE,
correl=FALSE,data=NULL, density=FALSE,means=TRUE,
          ellipse=FALSE,cex.cor=1,      cex.point=1.5,      xlab="Modelo      2:
Hundimiento",ylab="Modelo 2: Carga axial",
```

```
smoother=FALSE,nrpoints=10,grid=FALSE,x.breaks=8,y.breaks=8,x.space=0,
```

```
x11()
```

```
scatterHist(Hundimiento.mod3,Carga.mod3,smooth=FALSE,ab=FALSE,
correl=FALSE,data=NULL, density=FALSE,means=TRUE,
          ellipse=FALSE,cex.cor=1,      cex.point=1.5,      xlab="Modelo      3:
Hundimiento",ylab="Modelo 3: Carga axial",
```

```
smoother=FALSE,nrpoints=10,grid=FALSE,x.breaks=8,y.breaks=8,x.space=0,
```

```
y.space=0,freq=TRUE,x.axes=TRUE,y.axes=TRUE,col=c("magenta"),alpha=.5,pch
=18)
```

```
#----- Pruebas
```

```
# Modelo 1
```

```
#Estimaci?n por el m?todo de par?mtros de la distribuci?n Gamma
```

```
alpha1 <- mean(Hundimiento.mod1)^2/var(Hundimiento.mod1) # Par?metro de
escala
```

```
beta1 <- var(Hundimiento.mod1)/mean(Hundimiento.mod1) # Par?metro de forma
```

```
# Dos pruebas de bondad de ajuste
```

```
n<-500
```

```
y<-rgamma(n,shape=alpha1,scale=beta1)
```

```
# 1. Do x and y come from the same distribution?
```

```
ks.test(Hundimiento.mod1, y)
```

```
# 2. Does x come from a shifted gamma distribution with shape=alpha and
beta=scale?
```

```
ks.test(Hundimiento.mod1,"pgamma", shape=alpha1, scale=beta1) # two-sided,
exact
```

```
# Modelo 2
```

```
alpha2 <- mean(Hundimiento.mod2)^2/var(Hundimiento.mod2) # Par?metro de
escala
```

```
beta2 <- var(Hundimiento.mod2)/mean(Hundimiento.mod2) # Par?metro de forma
```

```
y<-rgamma(n,shape=alpha2,scale=beta2)
```

```
ks.test(Hundimiento.mod2, y)
```

```
ks.test(Hundimiento.mod2,"pgamma", shape=alpha2, scale=beta2) # two-sided,
exact
```



```
# Modelo 3
alpha3 <- mean(Hundimiento.mod3)^2/var(Hundimiento.mod3) # Parámetro de
escala
beta3 <- var(Hundimiento.mod3)/mean(Hundimiento.mod3) # Parámetro de forma
y<-rgamma(n,shape=alpha3,scale=beta3)
ks.test(Hundimiento.mod3, y)
ks.test(Hundimiento.mod3,"pgamma", shape=alpha3, scale=beta3) # two-sided,
exact
```

```
#----- Funciones de vulnerabilidad separadas
X11()
main<-"Función de vulnerabilidad, modelo 1"
ylab="F(t)"
xlab="Hundimiento(mts)"
ylim<-c(0,1.01)
xlim<-c(2.4,5.7)
x<-seq(2.4,5.7,length.out=n)
y1<-pgamma(x,shape=alpha1,scale=beta1)
matplot(x,y1,col=c("mediumblue"), type="l", main=main, xlab=xlab,
ylab=ylab,lwd=2, lty=c(1,1,1))
```

```
X11()
main<-"Función de vulnerabilidad, modelo 2"
ylab="F(t)"
xlab="Hundimiento(mts)"
ylim<-c(0,1.01)
xlim<-c(2.4,5.7)
x<-seq(2.4,5.7,length.out=n)
y2<-pgamma(x,shape=alpha2,scale=beta2)
matplot(x,y2,col=c("mediumseagreen"), type="l", main=main, xlab=xlab,
ylab=ylab,lwd=2, lty=c(1,1,1))
```

```
X11()
main<-"Función de vulnerabilidad, modelo 3"
ylab="F(t)"
xlab="Hundimiento(mts)"
ylim<-c(0,1.01)
xlim<-c(2.4,5.7)
x<-seq(2.4,5.7,length.out=n)
y3<-pgamma(x,shape=alpha3,scale=beta3)
matplot(x,y3,col=c("hotpink"), type="l", main=main, xlab=xlab, ylab=ylab,lwd=2,
lty=c(1,1,1))
```

```

#----- Funciones de vulnerabilidad juntas
X11()
main<-"Funciones de vulnerabilidad de hundimiento"
ylab="F(t)"
xlab="Hundimiento(mts)"
ylim<-c(0,1.01)
xlim<-c(2.4,5.7)
x<-seq(2.4,5.7,length.out=n)
y1<-pgamma(x,shape=alpha1,scale=beta1)
y2<-pgamma(x,shape=alpha2,scale=beta2)
y3<-pgamma(x,shape=alpha3,scale=beta3)
matplot(x,cbind(y1,y2,y3),col=c("mediumblue","mediumseagreen","hotpink"),
type="l", main=main, xlab=xlab, ylab=ylab,lwd=2, lty=c(1,1,1))
titulo<- "Modelos estructurales"
leyenda<- c("modelo 1","modelo 2", "modelo 3")
legend(ley[8],legend=leyenda,title=titulo,lwd=2,col=c("mediumblue","mediumseagr
een","hotpink"),cex=0.75, lty=c(1,1,1,1),bty="n")

#----- Funciones de confiabilidad
X11()
main<-"Funciones de Confiabilidad"
ylab="R(t)"
R1<-1-y1
R2<-1-y2
R3<-1-y3
matplot(x,cbind(R1,R2,R3),col=c("mediumblue","mediumseagreen","hotpink"),
type="l", main=main, xlab=xlab, ylab=ylab,lwd=2, lty=c(1,1,1))
titulo<- "Modelos estructurales"
leyenda<- c("modelo 1","modelo 2", "modelo 3")
legend(ley[6],legend=leyenda,title=titulo,lwd=2,col=c("mediumblue","mediumseagr
een","hotpink"),cex=0.75, lty=c(1,1,1,1),bty="n")

```