



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Departamento de Construcción y Estructuras

Tesis

**Análisis numérico de muros y marcos de concreto reforzado
bajo el efecto del pulldown producto de la subsidencia.**

Presenta

Ing. Yeriel Lázaro Chirino Suárez

Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil
en el área de Estructuras

Comité tutorial:

Tutor:

Dr. Ing. José Ángel Ortíz Lozano

Asesores:

Mtro. Ing. Jorge Eudave Muñoz

Dr. Ing. Luis Alfredo Hernández Castillo

Aguascalientes, México

julio de 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **YERIEL LÁZARO CHIRINO SUÁREZ** con ID 226104 quien realizó la tesis titulada: **Análisis numérico de muros y marcos de concreto reforzado bajo el efecto del pulldown producto de la subsidencia**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 30 de agosto de 2018.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis



Mtro. Jorge Eudave Muñoz
Asesor de tesis


Dr. Luis Alfredo Hernández Castillo
Asesor de tesis

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León- Secretario de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Ing. Yeriel Lázaro Chirino Suárez- Interesado
c.c.p.- Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez – Jefe del Depto. de Construcción y Estructuras
c.c.p.- Dr. José Ángel Ortiz Lozano-Consejero Académico
c.c.p.- Dr. Miguel Angel soto Zamora- Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil


Vo. Bo.

Oficio: CCDC-D-327-2018
Asunto: Conclusión de tesis

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

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ANÁLISIS NUMÉRICO DE MUROS Y MARCOS DE CONCRETO REFORZADO BAJO EL EFECTO DEL PULLDOWN PRODUCTO DE LA SUBSIDENCIA". Presentado por el sustentante: Yeriel Lázaro Chirino Suárez con ID: 226104, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 31 de agosto de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"


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

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de tesis.
c.c.p.- Ing. Yeriel Lázaro Chirino Suárez – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p.- Archivo

OVG/rbv

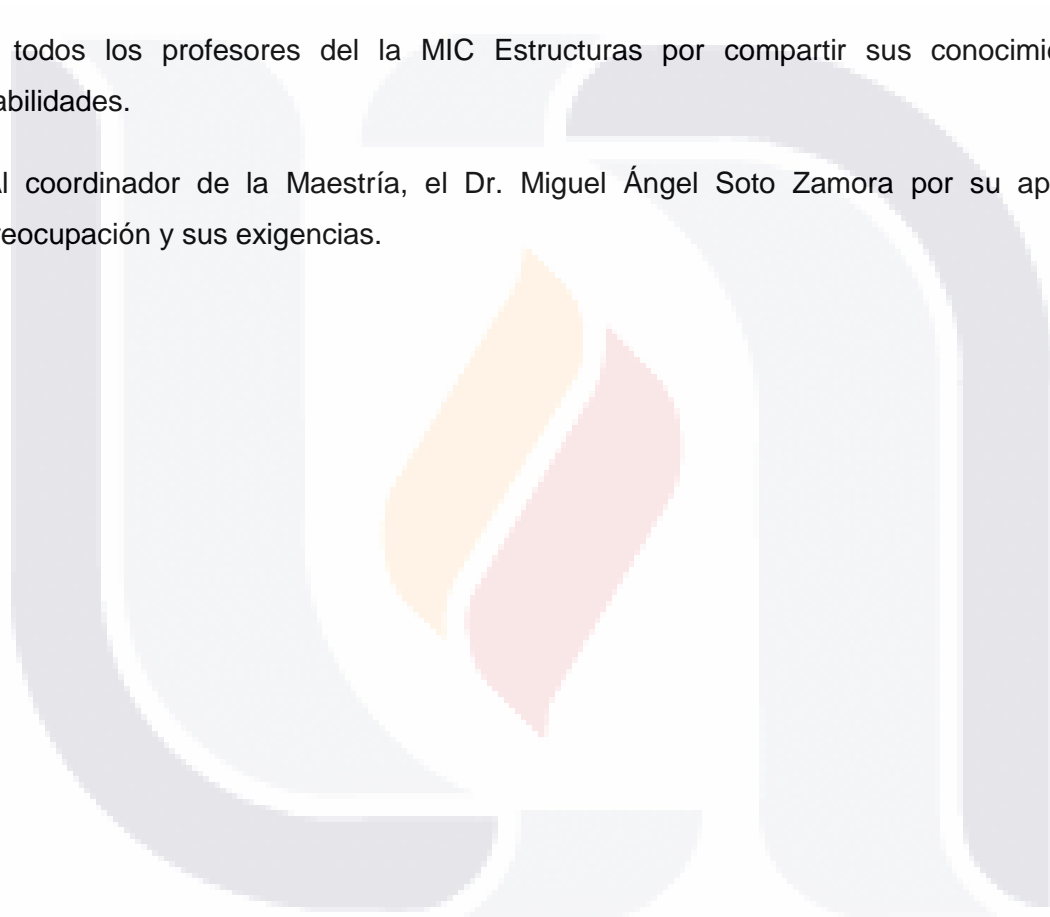
AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por la beca otorgada para cursar los estudios de Maestría.

Al Dr. José Ángel Ortiz Lozano, tutor principal del presente trabajo, por haberme permitido trabajar con él en este proyecto, así como por todas las ideas, correcciones y sugerencias para mejorar el desarrollo de esta tesis.

A todos los profesores de la MIC Estructuras por compartir sus conocimientos y habilidades.

Al coordinador de la Maestría, el Dr. Miguel Ángel Soto Zamora por su apoyo, su preocupación y sus exigencias.



DEDICATORIA



A mis padres por todo su apoyo y ayuda a lo largo de los años porque sin ellos no sería lo que soy.

A todos los que han hecho posible que me sienta como en casa aun estando lejos de mi país, muy especialmente a esa familia que me ha acogido como parte de ellos: Beto, Araceli, Brenda, David, gracias por hacerme sentir uno más, por ayudarme y por acompañarme en los momentos que más lo he necesitado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....4

ÍNDICE DE FIGURAS6

ÍNDICE DE GRÁFICOS9

RESUMEN11

ABSTRACT12

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN14

 1.1 ANTECEDENTES 14

 1.2 OBJETIVOS 15

 1.2.1 Objetivo general..... 15

 1.2.2 Objetivos particulares 15

 1.3 ALCANCES 15

 1.4 JUSTIFICACIÓN 16

 1.5 HIPÓTESIS 17

 1.6 METODOLOGÍA 17

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE20

 2.1 ESTUDIOS PREVIOS20

 2.1.1 Estudio experimental de Juan Carlos Vielma Pérez, Alex H. Barbat y Sergio Oller.....20

 2.1.2. Estudio experimental de Rosángel Moreno González y Jesús Miguel Bairán García23

 2.1.2 Estudio experimental de Celio José Marte Jiménez.....25

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	30
3.1 ASENTAMIENTO	30
3.1.1 Asientos diferenciales	30
3.1.2 Asientos diferenciales por consolidación diferencial del suelo.	31
3.2 EL FENÓMENO DE LA SUBSIDENCIA	33
3.3 TIPOS DE SUBSIDENCIA.....	35
3.3.1 Subsistencia por extracción de agua subterránea.	35
3.3.2 Subsistencia por extracción de petróleo y gas.....	35
3.3.3 Subsistencia por hidrocompactación.	36
3.3.4 Subsistencia por disolución.....	36
3.3.5 Subsistencia por actividad minera.	37
3.4 AGRIETAMIENTO EN AGUASCALIENTES.....	37
3.4.1 Estudios realizados en el valle.....	38
3.4.2 Afectaciones en el estado producto de la subsidencia.....	39
3.4.3 Efectos de los hundimientos en estructuras de concreto reforzado.	39
3.5 CURVAS DE FRAGILIDAD.....	41
3.5.1 Definición.....	41
3.5.2 Interpretación y aplicaciones de las curvas de fragilidad.....	43
CAPÍTULO IV: CAMPAÑAS EXPERIMENTALES.....	45
4.1 INTRODUCCIÓN.....	45
4.2 CONCEPTO GENERAL DE MODELACIÓN.....	45
4.3 EXPERIMENTO NUMÉRICO	45

4.3.1	Diseño del experimento numérico.....	46
4.3.2	Declaración de las variables	47
4.4	DEFINICIÓN DEL SOFTWARE A UTILIZAR.....	48
4.4.1	Procedimiento en la modelación con Abaqus/CAE	49
4.5	MODELACIÓN DEL PROBLEMA.....	50
4.5.1	Forma o geometría	50
4.5.2	Propiedades de los materiales.....	51
4.5.3	Ensamblaje.....	53
4.5.4	Pasos de cálculo.....	54
4.5.6	Cargas y condiciones de contorno.....	54
4.5.7	Mallado.....	55
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		57
5.1	INTRODUCCIÓN.....	57
5.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	57
5.2.1	Descripción de los elementos.....	57
5.2.2	Resultados obtenidos en el proceso de calibración.....	61
5.3	CURVAS DE CAPACIDAD DE CARGA Y DISTORSIÓN ANGULAR.....	62
5.4	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.....	74
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....		81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características en alzado de los edificios analizados en el estudio(Moreno González & Bairán García, 2010).....23

Tabla 2. Tabla resumen de pórticos25

Tabla 3. Dimensiones y valores de carga de los muros de concreto sometidos al análisis.46

Tabla 4. Dimensiones, cuantías de acero y valores de carga de los marcos de concreto reforzado sometidos al análisis.47

Tabla 5. Sistema de unidades consistente empleadas en la modelación.50

Tabla 6. Propiedades del concreto introducidas en los modelos52

Tabla 7. Propiedades del acero introducidas a los modelos.....52

Tabla 8. Tipos de elementos finitos lineales55

Tabla 9. Dimensiones de los elementos del pórtico 3.....58

Tabla 10. Dimensiones de los elementos del pórtico 8.....60

Tabla 11. Resumen de valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los muros.68

Tabla 12. Resumen de valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los marcos.....74

Tabla 13. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad del muro 1 y 2 sin considerar refuerzo.75

Tabla 14. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad del muro 1 y 2 considerando el refuerzo.....76

Tabla 15. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad de los marcos 1 y 2 sin considerar refuerzo.77

Tabla 16. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad de los marcos 1 y 2 considerando el refuerzo.78



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de fuerzas aplicada en el análisis no lineal. (Vielma Pérez, Barbart, & Oller, 2007)21

Figura 2. Curvas de fragilidad del edificio con forjados reticulares.(Vielma Pérez et al., 2007).....22

Figura 3. Curvas de fragilidad del edificio porticado con vigas planas.(Vielma Pérez et al., 2007).....22

Figura 4. Curvas de fragilidad del edificio porticado con vigas de canto.(Vielma Pérez et al., 2007)22

Figura 5. Curvas de fragilidad para los edificios tipo RCH y RCM respectivamente.(Moreno González & Bairán García, 2010).....24

Figura 6. Curvas de fragilidad para los edificios tipo RCL y CASA respectivamente.(Moreno González & Bairán García, 2010).....24

Figura 7. Curvas de capacidad para pórticos regulares 1 y 2.(Marte Jiménez, 2014).....27

Figura 8. Curvas de capacidad para pórticos regulares 6 y 14.(Marte Jiménez, 2014).....27

Figura 9. Configuración del lecho rocoso que puede generar hundimientos diferenciales. Adaptado de (Pacheco Martínez, 2007).32

Figura 10. Mecanismo de generación de fallas por variación de nivel piezométrico. Adaptado de (Alvarez, 1999).....32

Figura 11. Esquema de hundimiento de una estructura. Adoptado de (Lara Díaz de León, 2016).....40

Figura 12. Asentamientos totales y diferenciales en una estructura. Adoptado de (Lara Díaz de León, 2016).....41

Figura 13. Ejemplo de una curva de fragilidad. Adoptado de (Blondet, Muñoz, Tarque, & Mosqueira, 2005)43

Figura 14. Muro de concreto sin refuerzo y con refuerzo.....53

Figura 15. Marco de concreto con columnas y trabes sin refuerzos y con refuerzo.....53

Figura 16. Pórtico 3 para realizar la calibración numérica del software.57

Figura 17. Curva de capacidad de carga para el pórtico 3 obtenidas en SAP2000.58

Figura 18. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 3 en el proceso de calibración.....59

Figura 19. Pórtico 8 para realizar la calibración numérica del software.59

Figura 20. Curva de capacidad de carga para el pórtico 8 obtenidas en SAP2000.60

Figura 21. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 8 en el proceso de calibración.....61

Figura 22. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 1 sin considerar refuerzo.63

Figura 23. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 1 considerando refuerzo.64

Figura 24. Distorsiones angulares límites. Gráfico de Bejerrum (1963), basado en datos presentados por (Skempton & MacDonald, 1956).....65

Figura 25. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 2 sin considerar refuerzo.66

Figura 26. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 2 considerando refuerzo.67

Figura 27. Valores admisibles de asentamientos. Adoptado de (Alva Hurtado, 1995).....70

Figura 28. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 1 sin considerar refuerzo.....71

Figura 29. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 1 considerando refuerzo.....71

Figura 30. Valores de desplazamiento vertical (U_2) para el marco 2 sin considerar refuerzo.....72

Figura 31. Valores de desplazamiento vertical (U_2) para el marco 2 considerando refuerzo.....73



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva de capacidad de carga obtenidas en Abaqus y en SAP2000 para el pórtico 3 como parte del proceso de calibración.....62

Gráfico 2. Curva de capacidad de carga obtenidas en Abaqus y en SAP2000 para el pórtico 8 como parte del proceso de calibración.....62

Gráfico 3. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el muro 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....63

Gráfico 4. Curvas de distorsión angular obtenidas para el muro 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....65

Gráfico 5. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el muro 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....66

Gráfico 6. Curvas de distorsión angular obtenidas para el muro 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....67

Gráfico 7. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el marco 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....69

Gráfico 8. Curvas de distorsión angular obtenidas para el marco 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....70

Gráfico 9. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el marco 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....72

Gráfico 10. Curvas de distorsión angular obtenidas para el marco 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.....73

Gráfico 11. Curvas de fragilidad obtenidas para el muro 1 y 2 sin considerar refuerzo.....76

Gráfico 12. Curvas de fragilidad obtenidas para el muro 1 y 2 considerando el refuerzo..77

Gráfico 13. Curvas de fragilidad obtenidas para los marcos 1 y 2 sin considerar refuerzo.
.....78

Gráfico 14. Curvas de fragilidad obtenidas para los marcos 1 y 2 considerando el refuerzo.

.....79



RESUMEN

En los últimos años el crecimiento poblacional ha dado lugar a un aumento en el consumo de agua, siendo necesaria su extracción del manto freático, causando una sobreexplotación de los acuíferos y por ende niveles elevados de subsidencia.

El fenómeno de la subsidencia se ha presentado en toda la república mexicana por más de 30 años, manifestándose en hundimientos paulatinos de la superficie que se reflejan en las estructuras a modo de hundimientos diferenciales de la cimentación, que trata de ajustarse a las características del terreno, provocando cuantiosos daños estructurales, pérdidas económicas y en ocasiones pérdidas de vidas humanas.

En el presente trabajo se realizaron simulaciones numéricas mediante el software Abaqus/CAE a muros y marcos, ambos de concreto y se variaron las cuantías de acero para ver la influencia del armado en la capacidad de carga de cada elemento, aplicando cargas verticales en un punto del elemento (pulldown) para simular el efecto de un hundimiento diferencial y así obtener las curvas de capacidad de carga, las curvas de distorsión angular y las curvas de fragilidad frente al efecto de la subsidencia para cada modelo.

Una vez finalizado el proceso de simulación numérica y el análisis de los resultados pudimos cumplir satisfactoriamente los objetivos de la investigación, determinando los valores de distorsión angular para muros y marcos de concreto, tanto reforzados como sin refuerzo y obtener las curvas de fragilidad que caracterizan cada elemento en cada caso.

ABSTRACT

In the last years, population growth has led to an increase in water consumption, requiring its extraction from the water table, causing overexploitation of aquifers and therefore high levels of subsidence.

The phenomenon of subsidence has been presented throughout the Mexican Republic for more than 30 years, manifesting in gradual subsidence of the surface that are reflected in the structures as differential subsidence of the foundation, which tries to adjust to the characteristics of the land, causing considerable structural damage, economic losses and sometimes loss of human life.

In the present work, numerical simulations were performed using the Abaqus / CAE software on walls and frames, both of concrete, and the amounts of steel were varied to see the influence of the reinforcement on the load capacity of each element, applying vertical loads at a point of the element (pulldown) to simulate the effect of a differential subsidence and thus obtain load capacity curves, angular distortion curves and fragility curves against the effect of subsidence for each model.

Once the numerical simulation process and the analysis of the results were completed, we were able to satisfactorily meet the research objectives, determining the values of angular distortion for walls and concrete frames, both reinforced and without reinforcement, and obtaining the fragility curves that characterize each element in each case.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***CAPÍTULO I:
INTRODUCCIÓN***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La cimentación es elemento estructural responsable de la transmisión de las cargas de la superestructura al suelo circundante, de manera que no se produzca el fallo por estabilidad ni se superen los asentamientos permisibles.

Los asentamientos en una cimentación se deben fundamentalmente a la deformación del suelo en el que se apoya, causado por los esfuerzos inducidos en él por la propia cimentación, esto se debe en gran medida al tipo de suelo en el que se construye y en grandes rasgos al contenido de agua que conforma la masa de suelo. Los asentamientos se clasifican en uniformes cuando en el subsuelo las deformaciones son iguales en cualquier punto de la superficie construida y en diferenciales cuando en la estructura se evidencian diferentes asentamientos de un punto respecto a otro y cambia la magnitud y distribución de los esfuerzos con el que fue diseñado la estructura.

“Las fallas en el terreno asociadas a la subsidencia es un peligro presentado en varias ciudades del centro de México, las cuales causan enormes pérdidas económicas al dañar la infraestructura urbana. La subsidencia del terreno induce desplazamientos en las construcciones en forma de asentamientos diferenciales, los cuales causan daños estructurales”(Lara Díaz de León, 2016).

En el valle de Aguascalientes los asentamientos diferenciales en las estructuras están asociados fundamentalmente al fenómeno de la subsidencia debido a la extracción de agua del subsuelo manifestándose en hundimientos diferenciales y paulatinos de la superficie. También existen otras dos hipótesis planteadas por otros autores que tratan de explicar este fenómeno, una de ellas propone que las grietas sean el producto y reflejo del sistema de esfuerzos al que está sometida una amplia región del centro de México debido al tectonismo y la otra, trata de que existe la posibilidad de que el agrietamiento sea producto del flujo plástico del suelo (creep), impulsado por la gravedad. “En los últimos años se han presentado diferentes teorías y opiniones sobre el origen y las causas de los agrietamientos, demostrándose que la extracción del agua de los acuíferos y la disminución del nivel de aguas freáticas es el factor principal que provoca el problema de

las grietas en la superficie del Valle de Aguascalientes” (Arroyo Contreras, Zermeño de León Mario Eduardo, & Castañeda Alvarado Jorge Alberto, 2004).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento de muros y marcos de concreto reforzado sometidos a asentamientos diferenciales, provocados por el fenómeno de la subsidencia, mediante el efecto del pulldown y utilizando como herramienta computacional el software Abaqus/CAE.

1.2.2 Objetivos particulares

- A. Revisión del estado del arte sobre publicaciones referentes al problema a abordar.
- B. Realizar la calibración del software mediante estudios previos a elementos de concreto empleando el pushover y comparar los resultados obtenidos.
- C. Obtener un modelo numérico que defina el comportamiento de un muro y de un marco de concreto.
- D. Simular el comportamiento de un muro y de un marco de concreto reforzado frente a la subsidencia, apoyándose en el efecto del pulldown.
- E. Analizar el comportamiento del muro y del marco reforzado utilizando los resultados obtenidos.
- F. Elaborar las curvas de fragilidad que describan el comportamiento del muro y del marco.

1.3 ALCANCES

Nuestro trabajo se limitará al análisis numérico de dos muros de concreto aislados y de dimensiones variables, analizando, en cada caso, un muro sin refuerzo y otro con refuerzo mínimo y de dos marcos de concreto reforzado de una crujía, con dimensiones de columnas y trabes variables, analizando de igual manera un modelo sin armado en sus elementos y otro con refuerzo mínimo, mediante el software Abaqus/CAE, para ello se definirá un modelo que tenga en cuenta las características del material, el mismo será

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sometido a efectos de carga lateral monotónica (pushover) y comparado con resultados experimentales para este tipo de estructuras bajo los mismos niveles de carga, con el objetivo de obtener un modelo calibrado y ajustado a las características reales.

Una vez obtenido nuestro modelo definitivo, se aplicarán cargas verticales monotónicas (pulldown) para simular el efecto de los asentamientos diferenciales que provoca sobre las estructuras el fenómeno de la subsidencia, analizando el comportamiento del muro y del marco y midiendo valores de distorsión angular para así obtener las curvas de fragilidad del material ante dicho fenómeno, mediante las cuales se realiza un análisis probabilístico del comportamiento del muro y del marco de concreto, estableciendo la probabilidad de que la respuesta estructural del mismo exceda un determinado estado límite, en función de un parámetro que define la intensidad de la carga o sollicitación, en este caso la distorsión angular.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos, de forma tal que estos puedan ser utilizados para establecer valores admisibles de distorsión angular, en el diseño y la revisión de muros y marcos de concreto reforzados, además de poder evaluar el estado de daño de una estructura, en función del valor de la distorsión angular al que esté sometido.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El fenómeno de la subsidencia es un hecho real y tangible que afecta el Valle de Aguascalientes, el mismo genera desplazamientos verticales en la masa de suelo que provocan cuantiosos daños a la infraestructura urbana, es por ello que se hace necesario el estudio de este fenómeno en las estructuras, fundamentalmente en los sistemas basados en muros y marcos de concreto reforzados, con el fin de obtener modelos numéricos que simulen su comportamiento real y comparar sus resultados con modelos experimentales para una correcta calibración de los mismos, brindando pruebas de su desempeño ante este fenómeno para en un futuro obtener metodologías de cálculo que tengan en cuenta este efecto y así garantizar la calidad de las construcciones y la seguridad de las vidas humanas. Por lo anterior expuesto es que surge como interrogante de investigación la siguiente problemática:

¿Cómo determinar el comportamiento de muros y marcos de concreto reforzado frente a la subsidencia, aplicando el software Abaqus/CAE y apoyándose en la técnica del pulldown?

1.5 HIPÓTESIS

Utilizando el software Abaqus/CAE en el análisis numérico de muros y marcos de concreto reforzado, es posible determinar su comportamiento frente a los asentamientos diferenciales provocados por la subsidencia y obtener los valores de distorsión angular que condicionan el comportamiento del muro y del marco.

1.6 METODOLOGÍA

- A. Análisis del estado del conocimiento sobre el comportamiento mecánico de muros y marcos de concreto reforzado, las propiedades de los elementos que lo componen, así como los principales trabajos realizados, tanto numéricos como experimentales, sobre el comportamiento de este material y de estos elementos frente a los esfuerzos generados por los asentamientos diferenciales.
- B. Utilizar la micro-modelación para la obtención y determinación de modelos físicos matemáticos que sean capaz de reproducir el comportamiento real de un muro y de un marco de concreto reforzado bajo el efecto del pushover (carga lateral monotónica), para luego compararlos con los resultados obtenidos en varios estudios experimentales, con el objetivo de obtener modelos calibrados que se ajusten al verdadero comportamiento de estos elementos estructurales.
- C. Luego y a partir de los modelos calibrados el muro y el marco serán sometidos al efecto del pulldown (carga vertical) con el objetivo de simular el efecto de los asentamientos diferenciales en la estructura y así analizar sus comportamientos y obtener los valores de distorsión angular para los diferentes valores de carga.
- D. Posteriormente se construirán las curvas de fragilidad del material mediante las cuales se realiza un análisis probabilístico del comportamiento del muro y del marco, estableciendo la probabilidad de que la respuesta estructural del mismo exceda un determinado estado límite, en función de la distorsión angular y luego

se analizan todos los resultados, de forma tal que estos puedan ser utilizados para establecer valores admisibles de distorsión angular, en el diseño y la revisión de muros y marcos de concreto reforzado, además de poder evaluar el estado de daño de una estructura, en función del valor de la distorsión angular al que esté sometido.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***CAPÍTULO II:
ESTADO DEL ARTE***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 ESTUDIOS PREVIOS

2.1.1 Estudio experimental de Juan Carlos Vielma Pérez, Alex H. Barbat y Sergio Oller.

En agosto de 2007, Juan Carlos Vielma Pérez, Alex H. Barbat y Sergio Oller de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) llevaron a cabo un estudio para determinar las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño en edificios de concreto armado con ductilidad limitada. Para el mismo se aplicó un procedimiento de análisis no lineal de estructuras de hormigón armado, con base en control de fuerzas en el que se aplica como criterio de convergencia un índice de daño calculado mediante elementos finitos. El procedimiento se aplica en el cálculo de la respuesta estática no lineal de tres edificios proyectados para diferentes niveles de ductilidad: un edificio con forjados reticulares, un edificio porticado con vigas planas y un edificio porticado con vigas de canto, siendo los dos primeros proyectados como edificios de ductilidad limitada y el último como edificio de ductilidad intermedia.

Del procedimiento de análisis estático no lineal se obtienen umbrales de daño, mediante el análisis de la evolución de la deriva relativa de piso respecto al desplazamiento del nivel de cubierta. Dichos umbrales de daño se utilizan en la determinación de las curvas de fragilidad de cada caso aplicando la distribución lognormal, para finalmente calcular las matrices de probabilidad de daño, para cinco estados de daño. Los resultados muestran que la respuesta no lineal de los edificios de ductilidad limitada presenta una alta probabilidad de colapso al ser sometidos a la demanda sísmica especificada en la norma sismorresistente española NCSE-02.

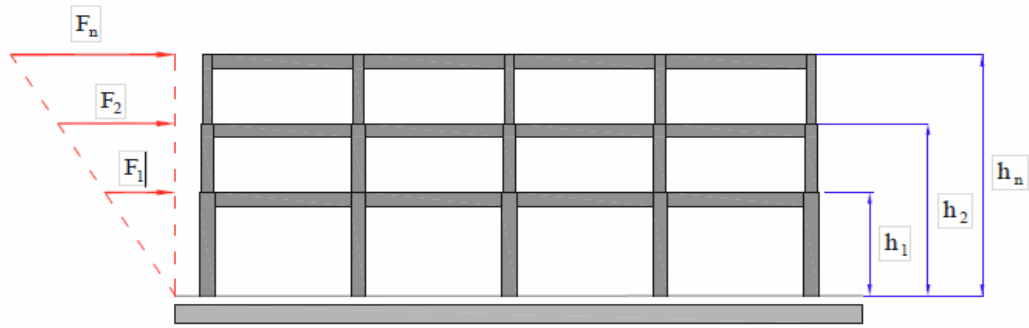


Figura 1. Distribución de fuerzas aplicada en el análisis no lineal. (Vielma Pérez, Barbart, & Oller, 2007)

Para la determinación de las curvas de fragilidad se utilizaron los desplazamientos determinados para los estados de daño transformados en desplazamientos espectrales. “Se aplica una función de densidad de probabilidad de los parámetros de demanda que definen los estados de daño que corresponden a la distribución lognormal” (Pinto, Giannini, & Franchin, 2007)

$$F(S_d) = \frac{1}{\beta_{ds} S_d \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \frac{S_d}{S_{d,ds}} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 1 (Vielma Pérez et al., 2007)}$$

Donde:

$S_{d,ds}$ es el valor medio de desplazamiento espectral en el cual el edificio alcanza el umbral del estado de daño d_s ,

β_{ds} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado de daño d_s .

En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran las curvas de fragilidad calculadas para los tres edificios que se analizaron. Nótese que las curvas de fragilidad se representan como función del desplazamiento espectral S_d .

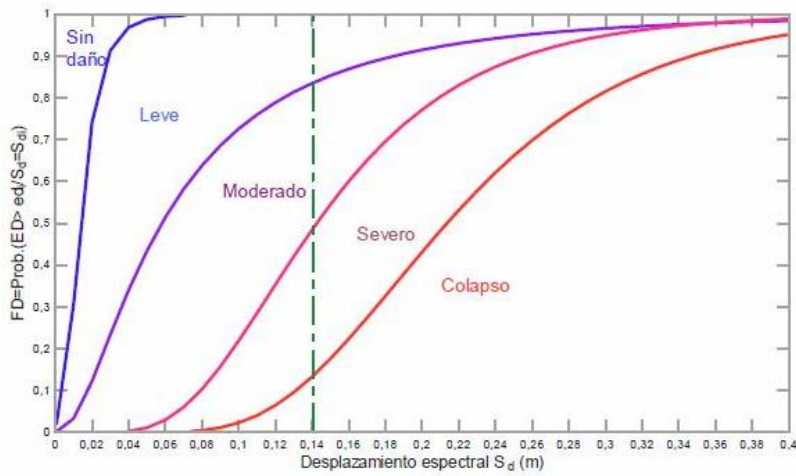


Figura 2. Curvas de fragilidad del edificio con forjados reticulares. (Vielma Pérez et al., 2007)

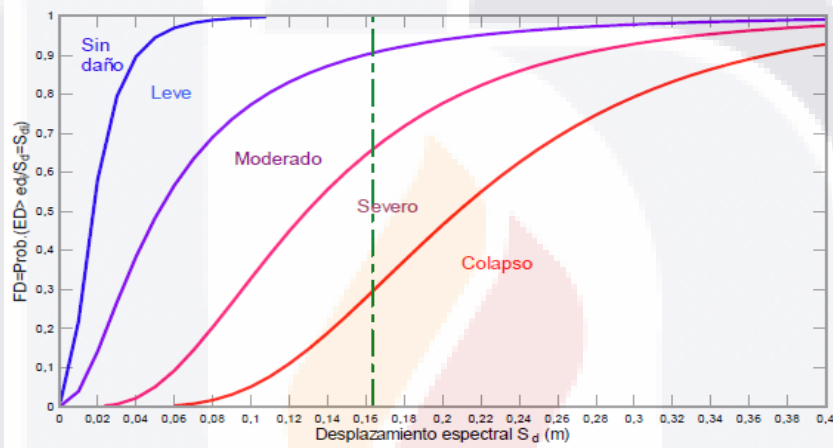


Figura 3. Curvas de fragilidad del edificio porticado con vigas planas. (Vielma Pérez et al., 2007)

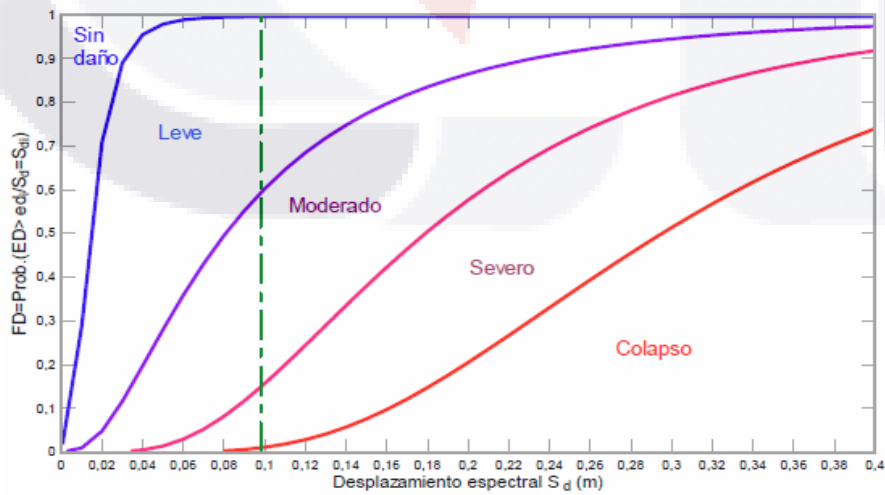


Figura 4. Curvas de fragilidad del edificio porticado con vigas de canto. (Vielma Pérez et al., 2007)

2.1.2. Estudio experimental de Rosángel Moreno González y Jesús Miguel Bairán García

En octubre de 2009, Rosángel Moreno González y Jesús Miguel Bairán García, de la Universidad Politécnica de Cataluña, en España, desarrollaron un estudio para determinar las curvas de fragilidad para evaluar daño sísmico en edificios de concreto reforzado con losas reticulares mediante una metodología basada en el método del espectro de capacidad. Los modelos estructurales que se utilizaron en el análisis fueron edificios de 8, 5,3 y 2 pisos, para cada uno de ellos se evaluaron sus capacidades y se determinó su fragilidad.

En el análisis de fragilidad se adoptó la metodología HAZUS, que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo lognormal, hipótesis que ha sido verificada por simulaciones realizadas mediante el método de Monte Carlo.

Tabla 1. Características en alzado de los edificios analizados en el estudio(Moreno González & Bairán García, 2010)

Clases edificios	No. de pisos	Altura Total (m)	Alturas Piso (m)		
			Planta baja	1er. piso	Resto pisos
RCH	8	24.0	2.85	2.85	3.05
RCM	5	15.8	3.80	3.00	3.00
RCL	3	9.8	3.80	3.00	3.00
CASA	2	5.2	2.60	2.60	-

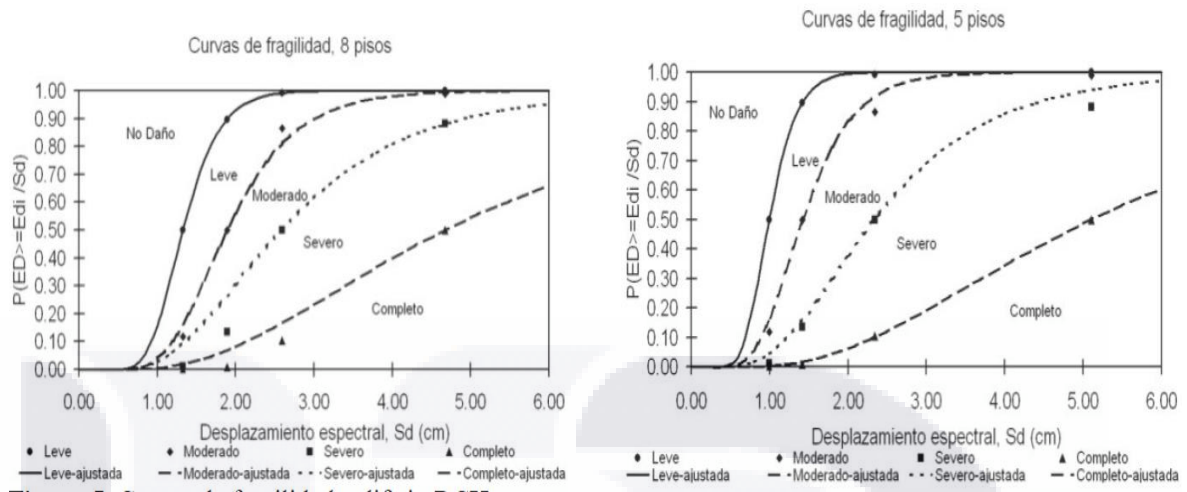


Figura 5. Curvas de fragilidad para los edificios tipo RCH y RCM respectivamente. (Moreno González & Bairán García, 2010)

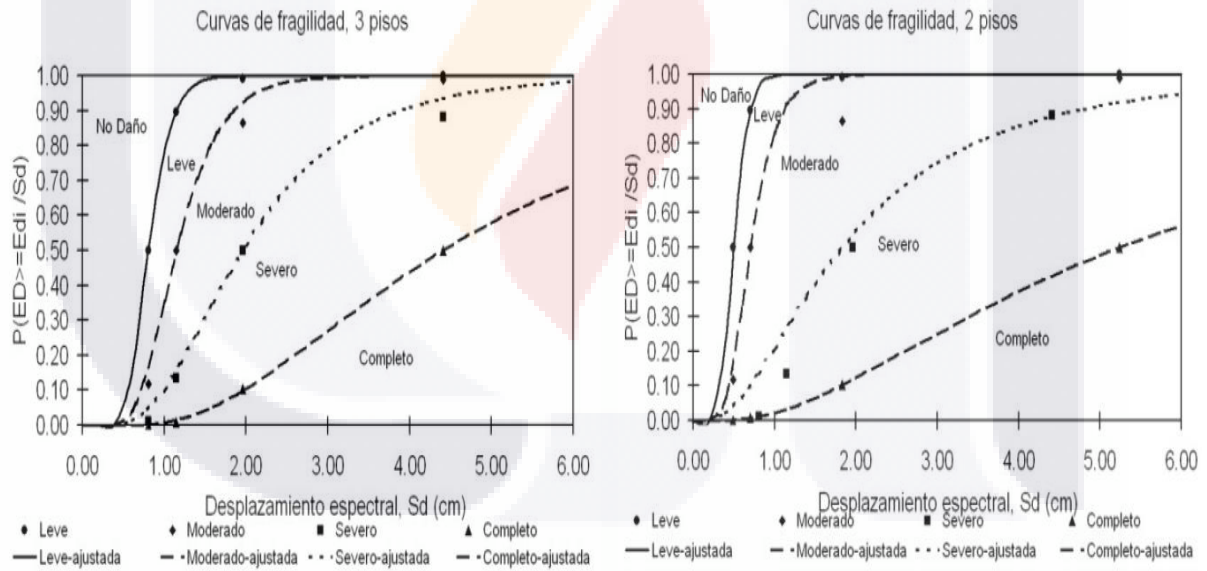


Figura 6. Curvas de fragilidad para los edificios tipo RCL y CASA respectivamente. (Moreno González & Bairán García, 2010)

2.1.2 Estudio experimental de Celio José Marte Jiménez.

En febrero de 2014 Celio José Marte Jiménez, como parte de su tesis de Maestría en Ingeniería Estructural y Construcción en la Universidad Politécnica de Catalunya propone como su trabajo final de investigación, la “Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal (“Push-Over”)”. En su análisis considera un total de 17 pórticos con distintas características geométricas (forma, número de vano, numero de piso, etc.) y estructurales (cuantías de armado en vigas, muros y columnas, ductilidades, rigideces, entre otros). Con esta variabilidad busca reproducir distintas curvas de capacidad. Previamente a ejecutar el análisis estático no lineal, definió las propiedades de las rótulas en las vigas, que no son más que aquellas curvaturas que definen cada uno de los umbrales de daños locales (leve, moderado, severo y completo), la ductilidad y el momento de plastificación.

A continuación, se muestra la Tabla 2, donde se resumen las características de los pórticos que fueron sometidos al análisis estático no lineal, y a los cuales se les obtuvieron sus curvas de capacidad y umbrales de estado de daño. Las celdas sombreadas en amarillo, representan aquellos pórticos de baja altura (2 hasta 6 pisos), mientras que las celdas en verde son aquellos que son de gran altura (7 hasta 10 pisos).

Tabla 2. Tabla resumen de pórticos

No. pórtico	No. pisos	No. Vanos	Altura 1er piso/ resto de pisos (m)	Altura total (m)	Ancho total (m)	Muro	Tipo
Pórtico 1	10	4	4.00 - 3.00	31.00	40	si	Regular
Pórtico 2	10	5	4.00 - 3.00	31.00	40	no	Regular
Pórtico 3	2	3	3.00 -3.00	6.00	9.9	no	Irregular
Pórtico 4	4	4	3.00 -3.00	12.00	14.3	no	Regular
Pórtico 5	7	5	4.75 - 4.75	33.25	16.44	no	Regular

Pórtico 6	6	3	4.00 - 3.20	20.00	18.21	no	Irregular
Pórtico 7	6	3	4.00 - 3.20	20.00	14.97	no	Regular
Pórtico 8	6	1	4.00 - 3.20	20.00	5.85	si	Regular
Pórtico 9	6	1	4.00 - 3.20	20.00	6.92	si	Regular
Pórtico 10	8	1	4.00 - 3.20	26.40	7.28	no	Regular
Pórtico 11	8	1	4.00 - 3.20	26.40	5.77	no	Regular
Pórtico 12	8	2	4.00 - 3.20	26.40	9.97	no	Regular
Pórtico 13	9	5	4.00 - 3.20	29.60	23.21	si	Irregular
Pórtico 14	8	2	4.00 - 3.20	26.40	13.6	si	Irregular
Pórtico 15	9	1	4.00 - 3.20	29.60	8.38	si	Regular
Pórtico 16	4	2	3.40 - 2.80	11.80	10.6	no	Regular
Pórtico 17	3	2	3.00 - 3.00	9.00	10.5	no	Regular

A continuación, se muestran las curvas de capacidad (Ver Figura 7 y Figura 8) y los parámetros que la definen para el grupo de dos edificios regulares y dos irregulares, respectivamente.

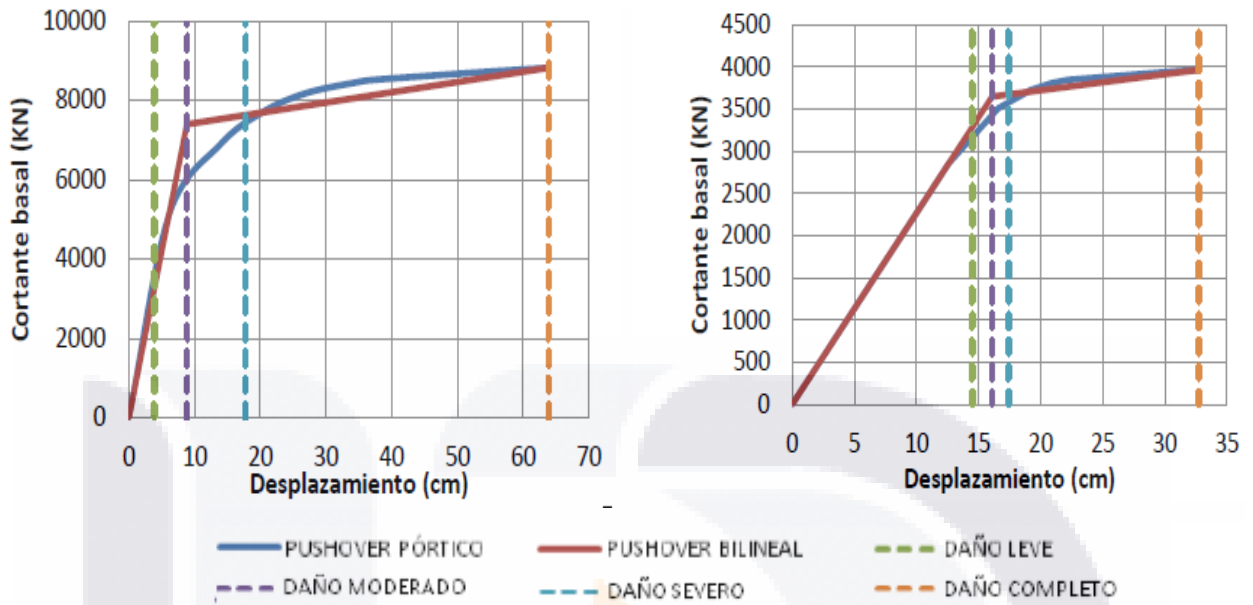


Figura 7. Curvas de capacidad para pórticos regulares 1 y 2.(Marte Jiménez, 2014)

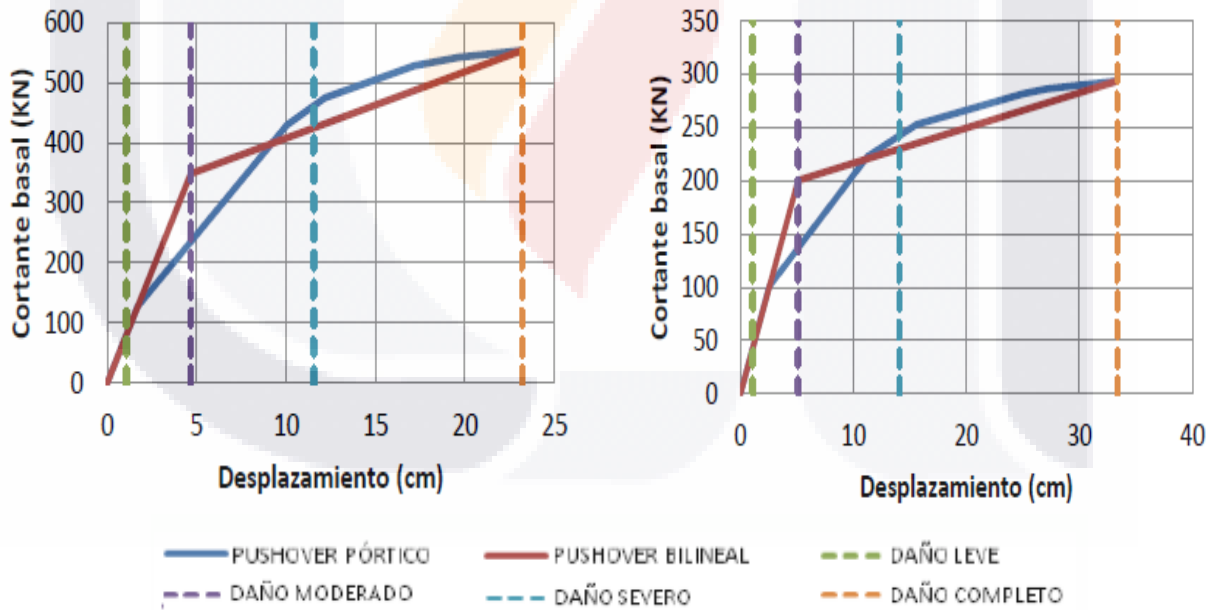
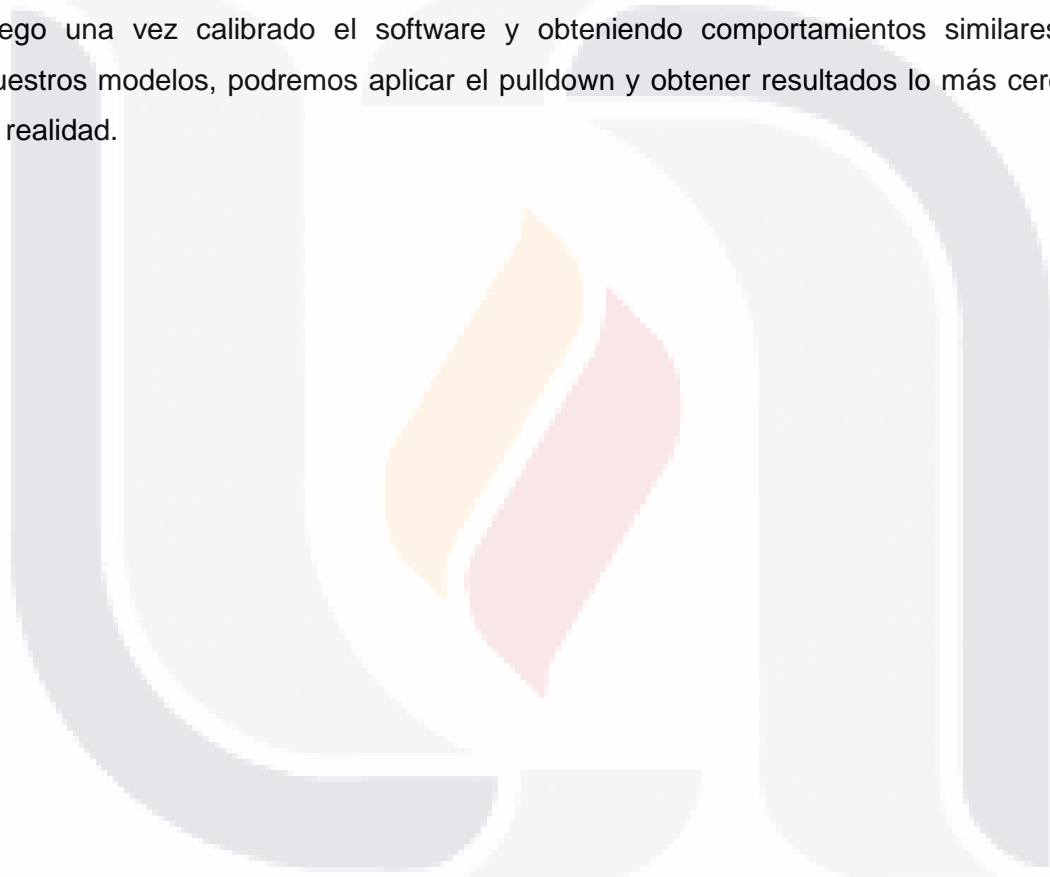


Figura 8. Curvas de capacidad para pórticos regulares 6 y 14.(Marte Jiménez, 2014)

El estudio del pulldown en estructuras de concreto reforzado y la obtención de curvas de fragilidad debido a asentamientos diferenciales, que provoca el fenómeno de la subsidencia del terreno, es un tema que aún no ha sido estudiado a profundidad y con el que no se encuentran antecedentes previos de estudios, por lo que la bibliografía consultada se centra fundamentalmente en el estudio de la obtención de las curvas de fragilidad por daño sísmico aplicando la técnica del Push-over, por lo que se realizará una calibración numérica del software con algunos de los pórticos del estudio numérico llevado a cabo por Celio José Marte Jiménez, empleando esta técnica del pushover, y ya luego una vez calibrado el software y obteniendo comportamientos similares al de nuestros modelos, podremos aplicar el pulldown y obtener resultados lo más cercanos a la realidad.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***CAPÍTULO III:
MARCO TEÓRICO***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 ASENTAMIENTO

Se conoce como asentamiento o hundimiento el movimiento vertical de la superficie terrestre, predominando el sentido vertical descendente y que tiene lugar en áreas de distintas características y pendientes. Se diferencia del término subsidencia por sus escalas temporal y espacial, ya que son mucho más reducidas. Este movimiento puede ser inducido por distintas causas como la presencia de estructuras geológicas, arcillas expansivas, flujo plástico acelerado del suelo o la existencia de oquedades en el terreno, las cuales al aumentarse el nivel de carga en el terreno comienzan a ceder produciendo efectos de hundimientos diferenciales en el suelo que yace sobre ellos.

3.1.1 Asientos diferenciales

Los asientos diferenciales se producen en zonas localizadas de la estructura, y resultan los asentamientos más problemáticos, ya que, al quedar parte de los cimientos sin el apoyo suficiente, la estructura debe deformarse y acoplarse a la nueva forma de sustentación. Generalmente la estructura no tolerará esta deformación y se producirá la rotura, manifestada en grietas y fisuras.

Los hundimientos provocan fuerzas internas en una estructura, sólo si ésta es hiperestática y sus apoyos tienen movimientos distintos (hundimientos diferenciales). Sin embargo, los hundimientos excesivos deben evitarse aun cuando sean uniformes, ya que, si bien no afectan a la estructura, interfieren con el correcto funcionamiento de la construcción. La magnitud de los hundimientos de los apoyos de una estructura debido a las cargas que en ella actúan, depende de las características del subsuelo y de las rigideces relativas entre estructura, cimentación y suelo. Su cálculo requiere consideraciones conjuntas de la teoría de las estructuras y de mecánica de suelos.

Conociendo los hundimientos que van a sufrir los apoyos, la cuantificación de los efectos en la estructura es un problema estándar en el análisis, si podemos suponer un comportamiento elástico de la misma. Sin embargo, debido a que generalmente los hundimientos ocurren muy lentamente en la escala tiempo, se producen efectos no lineales que modifican totalmente los resultados que se pueden obtener en un análisis elástico empleando iguales propiedades de rigidez de la estructura usadas en análisis por cargas gravitatorias.

Al estudiar estos problemas hay que tener bien claro que a diferencia de lo que sucede para las cargas impuestas, los efectos de las deformaciones impuestas tienden a dispersarse a medida que la estructura se deforma, fenómenos como el agrietamiento, en estructuras de concreto, pueden liberarla de los efectos de los movimientos diferenciales en sus apoyos.

Por todo lo anterior, generalmente nunca se revisa una estructura para los efectos de los asentamientos diferenciales, solo se diseña su cimentación de manera que los hundimientos se mantengan dentro de límites permisibles, de forma tal que sus esfuerzos puedan ser disipados por deformaciones inelásticas de la estructura.

3.1.2 Asientos diferenciales por consolidación diferencial del suelo.

“Todos los materiales que son sometidos a un cambio en sus condiciones de esfuerzos experimentan una deformación, específicamente en los suelos, esta deformación no ocurre simultáneamente a la aplicación de las cargas, sino que se desarrolla con el transcurso del tiempo” (Biot, 1941).

Juárez & Rico (2005) denominan el proceso de la consolidación como una disminución de volumen que tiene lugar en un lapso de tiempo determinado debido al aumento de cargas sobre el suelo. Frecuentemente ocurre que durante este proceso la posición de las partículas sólidas contenidas en un mismo plano horizontal permanece sin alteraciones, así, el movimiento de las partículas de suelo puede ocurrir solo en dirección vertical, ocurriendo así la consolidación unidimensional o unidireccional propuesta por Terzagui en 1943.

La consolidación de un estrato compuesto por material granular consiste en un acoplamiento del agua con el material sólido, generándose así una transferencia de la presión del agua intersticial al esqueleto del material granular en donde la disminución del volumen de la masa del relleno granular es igual al volumen de agua que es drenada del medio.

En su trabajo, (Pacheco Martínez, 2007), menciona dos razones por las que puede ocurrir una consolidación diferencial: la primera está basada en las irregularidades en la topografía del lecho rocoso y el espesor de sedimentos. En zonas menos profundas del acuífero, el espesor de sedimentos presenta una menor deformación vertical, mientras

que en zonas de mayor profundidad desarrollan una mayor deformación vertical. Esto trae consigo que las zonas donde hay mayor deformación jalen a las zonas donde hay menor deformación causando deformaciones de extensión y en consecuencia agrietamientos en la masa superficial del suelo.

Por otro lado, y como parte de un escenario diferente, (Alvarez, 1999), reconoce que la variación en la profundidad del nivel piezométrico, dada por la configuración de los conos de abatimiento, es motivo suficiente para producir asentamientos o hundimientos diferenciales e inducir además fallas en la superficie.

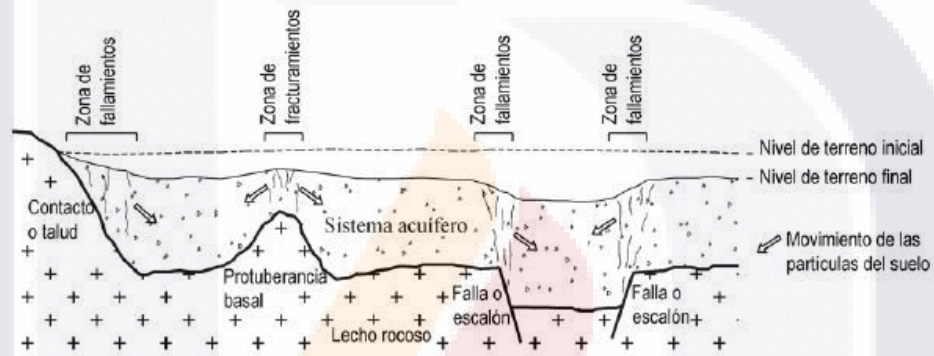


Figura 9. Configuración del lecho rocoso que puede generar hundimientos diferenciales. Adaptado de (Pacheco Martínez, 2007).

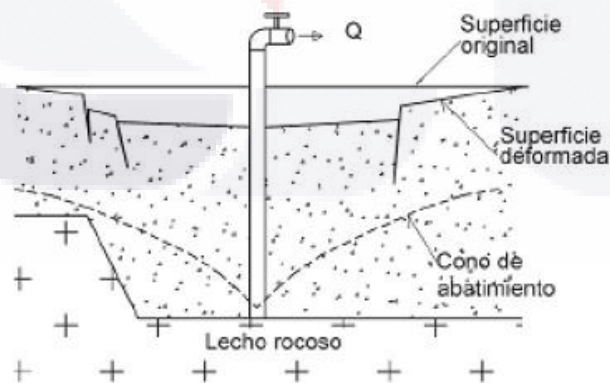


Figura 10. Mecanismo de generación de fallas por variación de nivel piezométrico. Adaptado de (Alvarez, 1999).

3.2 EL FENÓMENO DE LA SUBSIDENCIA

La subsidencia es descrita por la Real Academia de la Lengua Española como “el hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras”. Pacheco (2007) plantea una definición con fines más técnicos y particularmente para el desarrollo de esta investigación se considera más preciso decir que es “el fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor, agua) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de agrietamientos en la masa del relleno granular.”

“La intensa explotación de acuíferos que subyacen diversas áreas urbanas de México ha resultado en altas tasas de subsidencia, consecuentemente incrementando los riesgos de origen geológico. En la Ciudad de México, la velocidad de subsidencia máxima registrada excede los -370 mm/año, resultando en un continuo daño estructural a casas habitación e infraestructura urbana. En otras ciudades del centro de México, el proceso de subsidencia se presenta en niveles relativamente menores, pero aún lo suficientemente altos (-40 a -90 mm/año) para causar fallamiento superficial significativo. Estas altas velocidades de subsidencia son inducidas por el incremento de la demanda de agua debido al crecimiento de la población, así como el mejoramiento de la calidad de vida, que conlleva la caída del nivel del agua subterránea y la consolidación de sedimentos. El crecimiento de la economía mexicana, especialmente en la zona más industrializada del centro y norte de México, sugiere que la demanda de agua seguirá creciendo, lo que magnificará el proceso de subsidencia y el riesgo asociado en diversas áreas urbanas del país.” (UNAM, 2017).

Las zonas con mayor potencial para la explotación del agua del subsuelo, y por tal razón las que presentan un mayor desarrollo y crecimiento, son los valles formados en cuencas que en un proceso de millones de años han sido cubiertas por materiales granulares, usualmente de origen aluvial y lacustre, los cuales son un excelente medio para la formación de depósitos de agua susceptibles de ser aprovechados.

Cuando la cantidad de agua extraída del subsuelo es más grande que la cantidad de agua que entra al acuífero por infiltración, se dice que el acuífero está siendo sobreexplotado. La sobreexplotación del acuífero de una cuenca que contiene rellenos granulares,

aluviales y lacustres con potencial de ser consolidado, tiene como consecuencia la generación de hundimientos, asentamientos y acomodamientos graduales de los rellenos, y la generación de grietas en la superficie del terreno. (Pacheco, 2007)

La subsidencia y el hundimiento de la superficie del terreno es considerado como un verdadero peligro geológico, debido a que existe un componente natural en su ocurrencia, es un proceso generalmente lento que es causa directa de cuantiosas pérdidas materiales ocurridas en distintos sitios del mundo.

Este fenómeno se ve generalmente acelerado por las actividades humanas inapropiadas, entre ellas se destacan:

- Extracción de agua subterránea, petróleo y gas de reservorios subterráneos.
- Disolución de rocas calizas y sales.
- Colapso de minas subterráneas.
- Drenaje de suelos orgánicos.
- Humedecimiento inicial de suelos áridos.
- Desarrollo de tuberías subterráneas en materiales geológicamente susceptibles

Según la profundidad de ocurrencia del mecanismo causativo la subsidencia se puede clasificar en:

- Subsidencia profunda: ocurre a una profundidad variable entre varios centenares de metros hasta unos pocos kilómetros, está asociada fundamentalmente a la extracción de petróleo y gas.
- Subsidencia Superficial: tiene lugar cerca de la superficie del terreno, generalmente unos pocos cientos de metros de profundidad. Está relacionada a diversos mecanismos de generación como son la extracción de agua subterránea, la hidrocompactación, la disolución de rocas o sales, la oxidación de materia orgánica y la actividad humana.

En regiones sísmicas, por otro lado, la licuefacción de suelos constituye otra forma de subsidencia. Esta ocurre súbitamente gatillada por el sacudimiento sísmico del terreno, en condiciones geológicas e hidrogeológicas muy particulares.

3.3 TIPOS DE SUBSIDENCIA

La subsidencia, desde el punto de vista del mecanismo que la causa, se puede dividir en los siguientes tipos:

- Subsidencia por extracción de agua subterránea
- Subsidencia por extracción de petróleo o gas
- Subsidencia por hidrocompactación
- Subsidencia por disolución de rocas o sales
- Subsidencia por actividad minera.

3.3.1 Subsidencia por extracción de agua subterránea.

La subsidencia por extracción de agua subterránea es, sin dudas, el mecanismo más extendido, severo y costoso a escala mundial. El bombeo de agua desde una profundidad determinada hacia el exterior reduce la presión de poros que ayuda a soportar los depósitos sobre yacentes. El material sedimentario se reacomodará compactándose en un volumen menor como respuesta al incremento de esfuerzos, esto provocará un efecto irreversible. Es, por tanto, la compactación de sedimentos de grano fino (fundamentalmente arcillas), la causa principal de subsidencia en el sistema acuífero sometido a una severa extracción de fluido, en donde el ritmo de extracción excede al de recarga por infiltración.

3.3.2 Subsidencia por extracción de petróleo y gas.

Este proceso de subsidencia ocurre casi de la misma manera que aquel relacionado a la extracción de agua. La presión de poros es reducida por extracción de fluidos, mientras que la carga de la roca sobre yacente es gradualmente transferida a las rocas del reservorio (principalmente estratos de arcillas y pizarras), produciendo su compactación.

El hundimiento diferencial es el efecto superficial más común relacionado a este proceso, el cual tiene origen prácticamente en el centro del Área de Producción, adquiriendo una forma similar a una cubeta poco profunda. El agrietamiento de la superficie del terreno, en respuesta al hundimiento diferencial, es un efecto superficial poco observado en el mundo, siendo el más conocido aquel ocurrido en 1963 en California, el cual causó (indirectamente) la destrucción de la presa de tierra del reservorio de agua Baldwin Hills.

El ejemplo más dramático de subsidencia relacionada a la extracción de petróleo ha tenido lugar en Wilmington, en las cercanías de Long Beach, en donde se alcanzó el máximo registro mundial (8.7m) para el período 1928-1972. Valores más comunes de subsidencia, para un período de tiempo aproximadamente similar al anterior, son comparables al registrado en Baldwin Hills (California) el cual alcanzó un máximo de 1.5 m entre 1911 y 1964.

La subsidencia relacionada exclusivamente a la extracción de gas, aparentemente no alcanza magnitudes comparables a aquella asociada a la extracción de petróleo. Esta podría ser la razón por la cual dicho proceso de subsidencia no es ampliamente conocido.

3.3.3 Subsidencia por hidrocompactación.

La subsidencia por hidrocompactación es causada por la saturación rápida de depósitos finos y pobremente compactados en un estado inicial no saturado. La incorporación de agua facilita una reorientación de las partículas del suelo provocando una reducción en volumen. En este proceso, los suelos pierden su capacidad de soporte y se consolidan bajo su propio peso.

Este proceso, que ocurre por encima de la zona de saturación, es generalmente común en zonas con ambientes desérticos, aunque también existen registros en regiones semiáridas. Los materiales más susceptibles a la hidrocompactación son los limos arenosos (entre 0.0039 a 0.0625 mm en diámetro) depositados por acción del viento (Loess) y los depósitos algo arcillosos distales de abanicos aluviales.

La actividad humana, como la irrigación, construcción de carreteras y desarrollo de pequeños reservorios superficiales de agua, provocan la saturación de este tipo de depósitos sedimentarios y ha contribuido enormemente a la inducción del peligro geológico referido.

3.3.4 Subsidencia por disolución.

La presencia de rocas sólidas solubles (subsuperficiales), las cuales son disueltas lentamente por el agua natural circulante en la superficie o bajo ella es un escenario propicio para la ocurrencia de este fenómeno.

El agua de lluvia en combinación con el CO_2 que se encuentra en la atmósfera constituye un medio ácido que tiene la propiedad de disolver algunos tipos de rocas, fundamentalmente las compuestas por carbonatos. Principalmente encontramos calizas (CO_3Ca) y dolomías (CO_3)₂ CaMg, las cuáles desarrollan un paisaje característico de disolución denominado karst.

Los problemas ambientales en los relieves kársticos se pueden agrupar en dos categorías:

- la polución del agua subterránea
- los problemas ingenieriles de cimentación.

Entre los últimos, se destacan: asentamiento diferencial, piping (un tipo de erosión subsuperficial) y colapso de la superficie del terreno dentro de las cavidades subterráneas, el cual se conoce como Sumidero de Colapso.

3.3.5 Subsistencia por actividad minera.

Este peligro geológico representa al colapso de materiales rocosos consolidados y/o no consolidados, dentro de las galerías subterráneas. La subsidencia minera es controlada por numerosos factores, entre los que se destacan: espesor del material sobre yacente a la excavación minera, ancho del techo minero no estabilizado con soportes, hidrología, dimensión de los pilares, densidad y dimensión de fracturas y tiempo.

“La componente vertical de la subsidencia minera es proporcional a la altura del área de extracción. Este proceso es frecuentemente afectado por la circulación de agua o por la fluctuación de su nivel en la mina. De hecho, el agua circulante en una mina subterránea puede deteriorar los soportes del techo o a la roca que lo constituye. De la misma manera, la probabilidad de ocurrencia de subsidencia minera se ve incrementada donde las fracturas intersectan al techo de la mina, ya que estas forman verdaderos planos de debilidad que controlarán la ocurrencia del colapso.”(Ruiz Flores, 2013)

3.4 AGRIETAMIENTO EN AGUASCALIENTES.

El agrietamiento y fallamiento de suelos es un problema que se agrava cada vez más en nuestro país, ya que muchas ciudades de tamaño medio a grande, que experimentan un acelerado crecimiento urbano, han sido afectadas por éste fenómeno, entre ellas están el Valle de la Ciudad de México, Celaya, Apaseo el Grande, Irapuato, Silao, Morelia, y Querétaro.

Estas ciudades se localizan en el sector central de la República Mexicana, donde se desarrollaron estructuras tipo Graben, que fueron rellenas con materiales granulares, produciendo valles fértiles, y por ende asentamientos humanos, donde se desarrollaron centros urbanos.

La ciudad de Aguascalientes es la más grande del estado del mismo nombre y se encuentra emplazada en la región centro-norte del país.

Hasta mediados de la década del 70 era una ciudad pequeña, pero se dio una gran explosión demográfica impulsada por la inmigración interna de vecinos del estado de Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí y Durango, así también como miles de familia de la Ciudad de México que, huyendo del sismo de 1985, decidieron buscar la tranquilidad y seguridad del valle.

Mientras que el hundimiento máximo en puntos críticos de algunas ciudades del centro del país es del orden de 4 cm por año, en Aguascalientes en la última década es del orden de los 12 cm por año. Si bien en los últimos años se han presentado diferentes teorías y opiniones sobre el origen y las causas de los agrietamientos se ha demostrado que la extracción del agua de los acuíferos y la disminución del nivel de aguas freáticas es el factor principal que provoca el problema de las grietas en la superficie del Valle de Aguascalientes.

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

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

3.4.1 Estudios realizados en el valle.

A mediados de la década del 80, el Ing. José Manuel Aranda Gómez, propuso el establecimiento de un sistema de monumentos testigos mediante el cual, por medio de nivelaciones, permitiría caracterizar el movimiento de las grietas que, a inicios de 1980, se empezaron a registrar en el estado de Aguascalientes y sus alrededores.

Con el objetivo de obtener una relación entre los hundimientos y la extracción del agua del subsuelo Castañeda Alvarado, Zermeño de León, & Arroyo Contreras, realizaron en el 2004 una recopilación de información de ambos temas. De los hundimientos registrados en cada uno de los monumentos monitoreados, realizaron un mapa de subsidencia donde traza, mediante interpolación de valores, las curvas de igual hundimiento, posteriormente con los datos de extracción de agua obtuvieron mapas que mostraban las cotas de nivel estático del acuífero, observando con esto una gran similitud entre ambas curvas.

Con la información estratigráfica obtenida de los pozos ubicados en la zona urbana obtuvieron un modelo en 3D del basamento rocoso en el área, encontrando importantes irregularidades, siendo este un factor importante en el desarrollo de hundimientos diferenciales y de la aparición de grietas.

3.4.2 Afectaciones en el estado producto de la subsidencia.

El primer reporte de aparición de grieta en Aguascalientes se originó debido al daño causado en construcciones a finales de los años 70 y ya para el 2009 se tenían un registro aproximado de 216 grietas y fallas superficiales las cuales suman un total de 324 Km, ocasionando daños en casi 1900 inmuebles (SIFAGG, 2009).

Además del daño que estas provocan a las viviendas, también se ha observado que las fallas superficiales han afectado a la infraestructura urbana y a edificios con valor histórico como iglesias y museos.

3.4.3 Efectos de los hundimientos en estructuras de concreto reforzado.

Las acciones en una estructura no son más que las solicitaciones a las que puede estar sometidas, ya sea su peso propio, las cargas vivas, las presiones por viento, las aceleraciones por sismo y los asentamientos o las combinaciones de varias de ellas. La respuesta de la estructura o de un elemento estructural es su comportamiento bajo una determinada acción, pudiéndose expresar como una deformación, agrietamiento o vibración, desde luego, la respuesta estará en función de las características de la estructura y de los materiales constituyentes.

"Las lesiones por asentamientos o por acomodaciones del terreno no sólo pueden presentarse al poco tiempo de construido el edificio, como consecuencia de su estado de carga cuando ésta es superior a la admisible, sino en cualquier momento de su vida útil. El

cedimiento afecta tanto a muros de carga como a estructuras porticadas, siendo independiente el descenso del plano de apoyo de la altura en que se ocasione". (Broto, 2006).

Anteriormente habíamos mencionado que los asentamientos en los apoyos producen fuerzas internas en la estructura, cuando esta es hiperestática. Los daños en las estructuras por hundimientos de terreno dependen de la configuración de los asentamientos diferenciales. (Ver Figura 12)

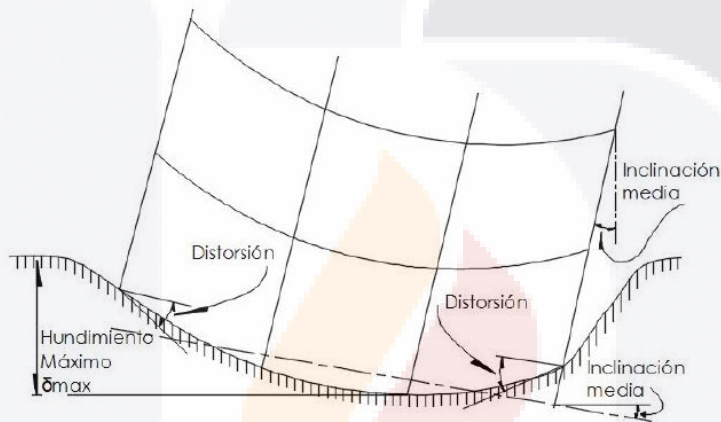


Figura 11. Esquema de hundimiento de una estructura. Adoptado de (Lara Díaz de León, 2016)

La curva de asentamientos puede considerarse formada por tres componentes:

- un asentamiento uniforme de toda la estructura
- un giro de la estructura como cuerpo rígido lo cual da origen a una inclinación o desplome de la misma
- asentamientos diferenciales entre los apoyos.

Los índices de asentamientos en que se basan los requisitos reglamentarios son:

- el hundimiento máximo
- la inclinación media

- la distorsión angular.

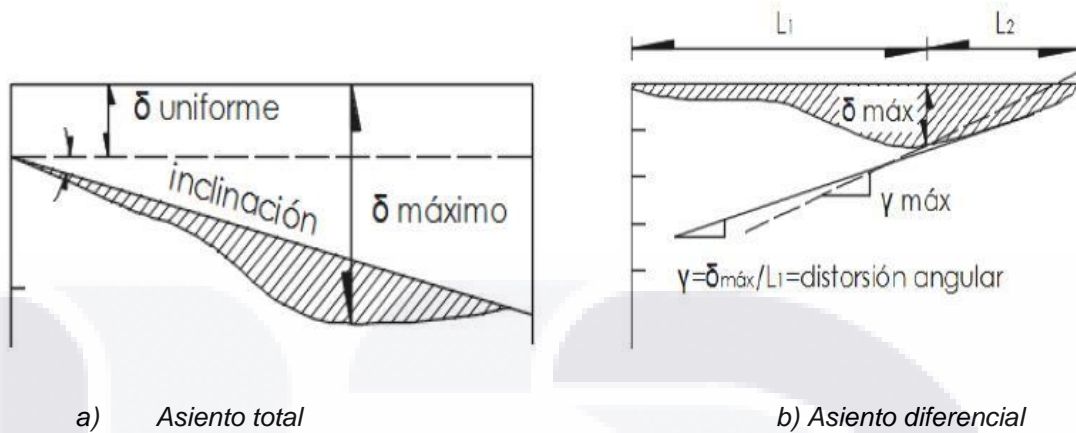


Figura 12. Asentamientos totales y diferenciales en una estructura. Adoptado de (Lara Díaz de León, 2016).

Más importante que la magnitud del asentamiento diferencial, lo que se correlaciona con los efectos en la estructura es la distorsión angular, es decir, la relación del asentamiento diferencial entre dos puntos entre la distancia entre ellos. La velocidad con que ocurren los asentamientos influye en la gravedad de sus efectos sobre la estructura. Para mismas magnitudes de hundimientos pueden ocurrir mayores o menores daños, dependiendo de la velocidad de desarrollo.

3.5 CURVAS DE FRAGILIDAD.

3.5.1 Definición

“En la ingeniería civil contemporánea las curvas de fragilidad o curvas de vulnerabilidad, como también se les llama, son de mayor uso para efectuar las valoraciones cuantitativas de los grados de daño posibles en las construcciones expuestas a fenómenos naturales o a actividades humanas, así como también las pérdidas esperadas bajo diferentes escenarios de riesgos y para decidir sobre estrategias de adecuación estructural” (Gutiérrez, 2015).

El concepto de riesgo en ingeniería ha evolucionado a las llamadas curvas de fragilidad que permiten manejar simultáneamente la amenaza y la capacidad de la obra o componente que se analiza. En la construcción de las curvas de fragilidad se incorporan

las incertidumbres en los parámetros que caracterizan la capacidad y la demanda estructural en la estimación de daños, y manejando los resultados, obtener también los costos de daños o pérdidas esperadas, es decir, todas las componentes del concepto Riesgo.

En el procedimiento ordenado para la construcción de las curvas de fragilidad resultan productos intermedios útiles para el proyecto estructural. Al combinar los resultados de un análisis no lineal por empuje progresivo (análisis por pushover o del empujón) con el enfoque de los espectros de capacidad el ingeniero estructural puede evaluar las ventajas y desventajas de las diferentes opciones en un proyecto nuevo o en las estrategias de adecuación de las estructuras existentes.

En la construcción de las curvas de fragilidad el efecto de la variabilidad de las propiedades mecánicas de sus materiales y del movimiento sísmico sobre el comportamiento sismorresistente de las estructuras se incorpora en el análisis estructural utilizando el Método de los Estimadores Puntuales. “Este método propuesto por Rosenblueth (1975), considera que la función que representa una variable aleatoria puede ser concentrada en dos puntos, lo cual supone que se conocen previamente las distribuciones probabilísticas”. (Marinilli, 2009)

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de excedencia de un estado límite de daño en función de un parámetro representativo de la severidad del movimiento u otro asociado a la respuesta estructural. Generalmente las curvas de fragilidad se expresan como la probabilidad acumulada de alcanzar o superar un determinado estado de daño para una tipología estructural dada expuesta a diferentes niveles de severidad del movimiento sísmico.

Para construir las curvas de fragilidad existen tres metodologías bien consolidadas:

- Las observaciones de campo (Dong Y.K, 2015).
- La opinión de expertos (Astorga y Aguilar, 2006).
- Los métodos analíticos.

Este último método se emplea en las zonas donde no se disponen de observaciones de daños debidos a sismos ni suficientes resultados de ensayos de laboratorio, o cuando se trate de estructuras muy particulares (se incluyen los modelos de simulación)

3.5.2 Interpretación y aplicaciones de las curvas de fragilidad.

Interpretación

Las curvas de fragilidad sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial

La Figura 13 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La aceleración pico del suelo (PGA por sus siglas en inglés) se ha definido como el parámetro sísmico. Entonces, para una aceleración de 0.30g, la probabilidad de que las edificaciones presenten un daño completo será de 37%. El 35 % de las edificaciones de este tipo sufrirían daño severo, el 20 % daño moderado y solo el 8% daño leve para el mismo valor de PGA.

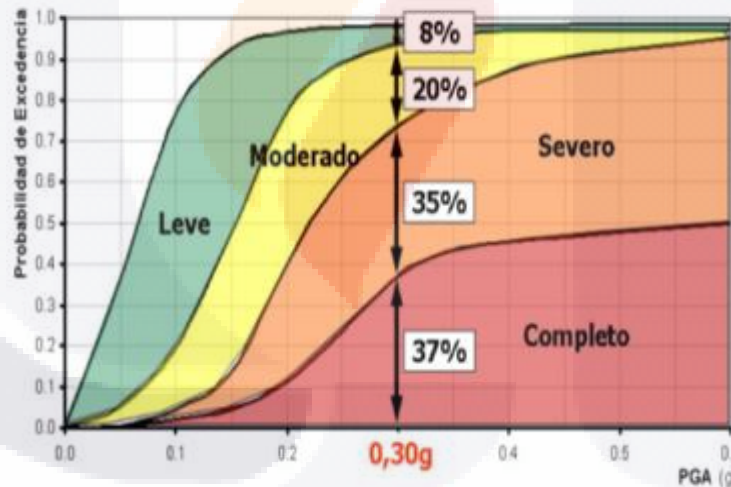


Figura 13. Ejemplo de una curva de fragilidad. Adoptado de (Blondet, Muñoz, Tarque, & Mosqueira, 2005)

Aplicaciones

Además de los ejemplos para estructuras de edificaciones y de puentes el uso de las curvas de fragilidad se extiende a servicios, líneas vitales, componentes de construcciones, comparación de normas y evaluación de tipologías en proyectos estructurales, instalaciones, etc.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***CAPÍTULO IV:
CAMPAÑAS EXPERIMENTALES***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO IV: CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

4.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la comprensión de situaciones complejas que no pudieran ser manejadas en un medio natural con la magnitud requerida, ha dado paso a la necesidad de reducirlas a situaciones más pequeñas, el desarrollo de métodos numéricos mediante el empleo de programas de cálculo ha dado solución a dichos problemas, obteniéndose resultados cercanos a la realidad. El desarrollo computacional alcanzado abarca diversas esferas de la sociedad y la Ingeniería no está ajena a ello, notándose un incremento en los softwares para su análisis y diseño. En este capítulo se describe el experimento numérico empleado y se declaran las variables involucradas, se definen los materiales y sus características, así como una descripción del software utilizado y las ventajas que llevaron a la selección del mismo.

4.2 CONCEPTO GENERAL DE MODELACIÓN

La modelación no es más que un método teórico de la ciencia para darle solución a una situación planteada, basado en la representación de un objeto a una escala menor llamado modelo, el esbozo de un modelo físico incluye la definición de la geometría, el material, las condiciones de frontera y las cargas a las que estará sometido.

Para autores como Recarey (2000), Ibáñez (2001) y Bonilla (2008) la modelación no es más que un método de trabajo práctico o teórico de un sistema mediante el cual se estudiará este por medio de un sistema auxiliar, que puede ser natural o artificial, el cual concuerda con el sistema real que se estudia.

En la Ingeniería Civil se prefiere el empleo de alternativas numéricas para dar solución a determinadas situaciones que requieren metodologías muy engorrosas, dentro de los métodos que se utilizan para solucionar dichos problemas se encuentran el Método de Elementos Finitos (MEF), el de las Diferencias Finitas (MDF) y el de los Elementos de Contorno o Frontera (MEC), por solo citar algunos.

4.3 EXPERIMENTO NUMÉRICO

El experimento numérico consiste en analizar el comportamiento de muros y de marcos de concreto reforzado sometidos al efecto del pulldown producto de la subsidencia, y

determinar las curvas de fragilidad que respondan al comportamiento del material ante este fenómeno.

4.3.1 Diseño del experimento numérico

El objeto de estudio de esta investigación son dos muros y dos marcos de concreto reforzados bajo el efecto de la subsidencia, para simular este efecto los elementos serán sometidos a una carga vertical o pulldown. En todos los elementos se tendrán en cuenta variaciones tanto en dimensiones como en refuerzo, analizando así, en cada caso, un elemento sin refuerzo, un elemento con refuerzo mínimo y uno con refuerzo mayor que el mínimo. Para una descripción más detallada a continuación se muestran las Tablas 3 y 4 con las características de los modelos.

Tabla 3. Dimensiones y valores de carga de los muros de concreto sometidos al análisis.

Dimensiones (mm)	Cuantías de acero a considerar	Carga a aplicar (Pulldown) (kN)
1500x1500x2000	Sin refuerzo	1200
	19 ϕ 12.7mm@80mm	
2000x2000x2500	Sin refuerzo	1200
	14 ϕ 15.9mm@150mm	

Tabla 4. Dimensiones, cuantías de acero y valores de carga de los marcos de concreto reforzado sometidos al análisis.

Dimensiones (mm)					Carga a aplicar (Pulldown) (kN)
Columnas	Cuantía de acero	Trabes	Cuantía de acero	Luz libre entre columnas	
300x300x3000	Sin refuerzo	300x300x3300	Sin refuerzo	3000	4500
	4 ϕ 12.7mm@257mm		2 ϕ 12.7mm@129mm 2 ϕ 12.7mm@258mm		
350x350x3500	Sin refuerzo	350x350x3900	Sin refuerzo	3500	4500
	4 ϕ 15.9mm@287mm		2 ϕ 15.9mm@144mm 2 ϕ 15.9mm@287mm		

4.3.2 Declaración de las variables

A. Variables independientes

Son las variables sobre las que el usuario puede tener control, y de manera típica representan las condiciones de entrada al sistema, en este caso son:

- Dimensiones de los elementos
- Cargas aplicadas
- Armado de los elementos
- Condiciones de borde o frontera

B. Variable dependiente

La variable dependiente, es el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente, en este estudio es:

- Distorsión angular

4.4 DEFINICIÓN DEL SOFTWARE A UTILIZAR

En las últimas décadas las ciencias informáticas han experimentado un amplio crecimiento y desarrollo, en la actualidad se cuenta con una gran variedad de programas computacionales o software empleados en la simulación y el análisis de problemas de ingeniería, con múltiples prestaciones y niveles de especialización que facilitan su selección una vez definida la naturaleza del problema que se desea estudiar. Sin embargo, una limitante en su utilización es el aspecto económico, ya que puede demandar equipos de alta velocidad y capacidad de procesamiento.

Muchos son los softwares relacionados con el análisis y diseño de elementos estructurales, específicamente para esta investigación se decidió utilizar el Abaqus/CAE v 6.9-3 por la posibilidad de modelar el problema en 3D.

El software Abaqus ha venido desarrollándose en las últimas décadas con gran auge debido a la solución que brinda, a diferentes problemas tanto de ingeniería como de otras especialidades, el mismo demanda equipos de alta velocidad y capacidad de procesamiento, pero presenta innumerables ventajas dentro de las cuales se pueden citar:

- Amplia librería de materiales que permite la simulación de modelos con características lineales, no lineales, materiales isotrópicos y anisotrópicos.
- Emplea el módulo “Interaction” como herramienta que modela el contacto entre superficies.
- Posee un generador automático de mallas estructuradas y no estructuradas en los elementos del modelo, para la aplicación del MEF.
- Tiene una salida de datos que da magnitudes físicas (deformaciones, tensiones, giros, fuerzas, reacciones) que pueden ser analizadas en el módulo “Visualization”.
- Posibilidad de apreciar de forma visual a través de los tonos policromáticos la propagación de los estados tensionales que tienen lugar en el interior de las estructuras.

4.4.1 Procedimiento en la modelación con Abaqus/CAE

El Abaqus es una herramienta computacional que emplea el Método de Elementos Finitos (MEF), que es hoy en día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras con carácter uni, bi o tridimensional. El MEF permite obtener una solución numérica aproximada de un cuerpo sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema objeto de estudio, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos

El Abaqus/CAE posee un conjunto de módulos que permiten caracterizar un modelo físico, a continuación, son descritos dichos módulos:

Módulo Part: Se crean las diferentes partes geométricas que conforman el modelo.

Módulo Property: Se definen las secciones y el material y se asignan a las partes correspondientes.

Módulo Assembly: Se ubican las partes en su lugar correspondiente del modelo. Aunque el modelo se componga de una parte debe ser llevada al módulo Assembly.

Módulo Step: Se definen los diferentes pasos de análisis y variables de salida.

Módulo Interaction: Se define el contacto, la interacción entre los cuerpos y en qué pasos de análisis se ponen de manifiesto, este paso es de carácter opcional.

Módulo Load: Se aplican a los cuerpos las condiciones de contorno, las cargas y en qué pasos se manifiestan.

Módulo Mesh: Se realiza la discretización del modelo y se definen los tipos de elementos finitos y sus familias.

Módulo Job: Se configura la tarea de análisis y se somete el modelo al análisis y se monitorea dicho proceso.

Módulo Visualization: Se visualizan y examinan los resultados.

El software no trabaja con unidades fijas, pero si tiene un sistema de unidades consistentes. El empleado en esta investigación fue el siguiente:

Tabla 5. Sistema de unidades consistente empleadas en la modelación.

Longitud	Fuerza	Presión	Masa	Densidad	Gravedad	Tiempo
m	N	Pa	Kg	Kg/m ³	9.806 Kg/m ³	s

4.5 MODELACIÓN DEL PROBLEMA

El Abaqus/CAE presenta una serie de módulos que permite que el usuario introduzca las variables del problema de manera ascendente en complejidad:

- Forma o geometría
- Propiedades
- Ensamblaje
- Pasos de cálculo
- Interacciones
- Cargas
- Mallado

A continuación, se especifican las características introducidas en cada una de las variables antes mencionadas para la modelación del problema.

4.5.1 Forma o geometría

Para la concepción del diseño de cualquier proyecto mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), la base del problema comienza con la creación de un modelo geométrico que represente las principales características geométricas de los elementos que se desean estudiar. En el caso de los muros existe la presencia de dos elementos estructurales, el muro de concreto y las barras de acero que conforman el armado. En los marcos existen también dos elementos, un elemento conformado por las columnas y la trabe y otro por las barras de acero del armado. Dichos elementos deberán ser modelados de manera que el resultado represente el comportamiento del sistema a escala real, para ello se utilizó un modelo tridimensional.

4.5.2 Propiedades de los materiales

Tanto en el análisis de los muros como de los marcos se asignaron dos materiales, el concreto y el acero, a continuación, se expondrán las propiedades necesarias que fueron introducidas en el proceso de modelación para cada uno de estos materiales.

4.5.2.1 Concreto

Para la modelación del concreto se consideró un comportamiento elasto-plástico, obtenido mediante el empleo del modelo de daño plástico Drucker Prager, así mismo se definieron otros parámetros como el Módulo de Young (**E**), relación de Poisson (**μ**) y la densidad (**Y**) para el comportamiento elástico del material. El módulo Drucker Prager exige la presencia de otros cinco parámetros básicos para su funcionamiento, a continuación, se definen dichos parámetros:

- **Ángulo de fricción interno del concreto (Φ):** se define como una variable interna a partir de una ley de evolución que dependa del proceso elasto-plástico.
- **Ángulo de dilatancia del concreto (Ψ):** al igual que el ángulo de fricción, podría definirse como una variable interna, también en este caso es suficiente expresarlo como una función de la variable de daño plástico

De manera general (Oller, 2001) recomienda como valores orientativos para concretos que no presenten daño $\Phi^{max}=36^0$ y $\Psi^{max}=15^0$ y para concretos dañados: $\Phi^{max}=0^0$ y $\Psi^{max}=0^0$.

- **Tensión de fluencia plástica:** se determina por la siguiente expresión:

$$\xi_c^{pl} = \xi_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0}$$

Ecuación 2 (P. Kmiecik, 2011)

Donde:

d_c : tensión de fluencia plástica.

ξ_c^{pl} : deformación plástica del concreto.

ξ_c^{in} : deformación inelástica del concreto.

E_c : módulo de elasticidad del concreto.

σ_c : tensión de compresión del concreto.

- **Deformación plástica absoluta:** al no tenerse en cuenta la influencia de la temperatura este parámetro se considerará nulo, lo que significa que el valor de plasticidad será constante.
- **Rango de esfuerzos que origina deformación plástica (k_p):** este parámetro está tratado como una magnitud adimensional, normalizada a la unidad, que varía entre $0 \leq k_p \leq 1$, para $k_p= 0$ no hay daño plástico y para $k_p= 1$ se define el límite de daño total del punto del sólido.

En la Tabla 6 se muestran las propiedades del concreto, definidas en el software Abaqus, que definen su comportamiento elasto-plástico.

Tabla 6. Propiedades del concreto introducidas en los modelos

f'_c (MPa)	E (MPa)	γ (kN/m ³)	μ	Φ (°)	Ψ (°)	k_p	d_c (MPa)
25	24000	24	0.17	0	0	0	18

4.5.2.2 Acero

Para la modelación del acero se consideró un comportamiento elasto-plástico, así mismo se definieron parámetros como la densidad (γ) y el Módulo de Young (E) y la relación de Poisson (μ) para el comportamiento elástico del material y el esfuerzo de cedencia (Ω) y la deformación plástica (ϑ) para el comportamiento plástico del mismo.

El esfuerzo de cedencia (Ω), se define como el “valor de esfuerzos en el que ocurrirá una deformación plástica en el material, es una propiedad importante para conocer si existen esfuerzos residuales, debido a los bruscos cambios de temperatura, variando sus valores entre 110 y 120 MPa”. (Sermeño Zetino, 2014).

La Tabla 7 muestra a modo de resumen las propiedades del acero, antes mencionadas, introducidas en el software.

Tabla 7. Propiedades del acero introducidas a los modelos.

E (MPa)	γ (kN/m ³)	μ	Ω (MPa)	ϑ
205000	76	0.3	115	0

4.5.3 Ensamblaje

En este módulo son colocadas las piezas, en la posición definitiva para la ejecución del análisis, de manera que la separación entre las superficies componentes, sea la mínima posible para que se considere correctamente el contacto entre las caras de los elementos. En este módulo también se define un eje global de referencia para las piezas ensambladas. Las Figuras 14 y 15 muestran los modelos definitivos una vez ensambladas las partes.

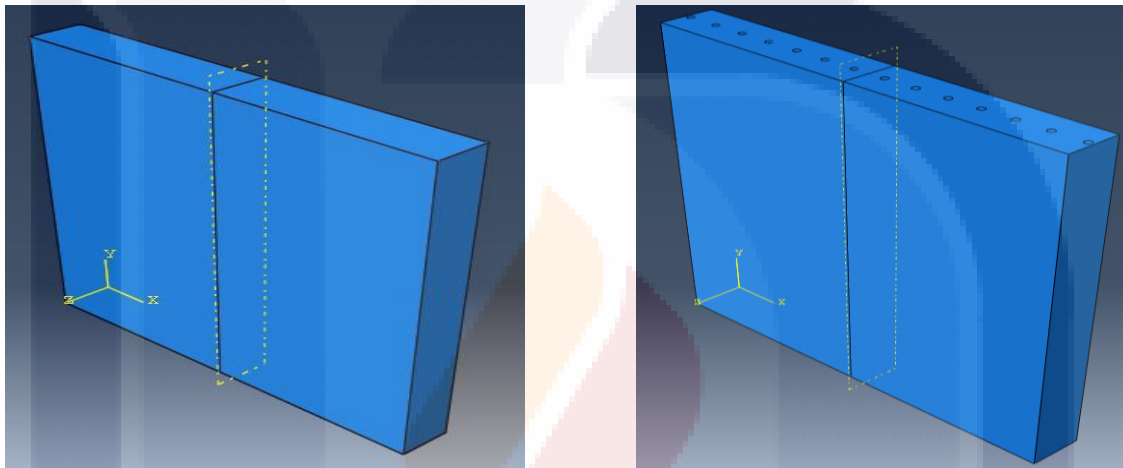


Figura 14. Muro de concreto sin refuerzo y con refuerzo.

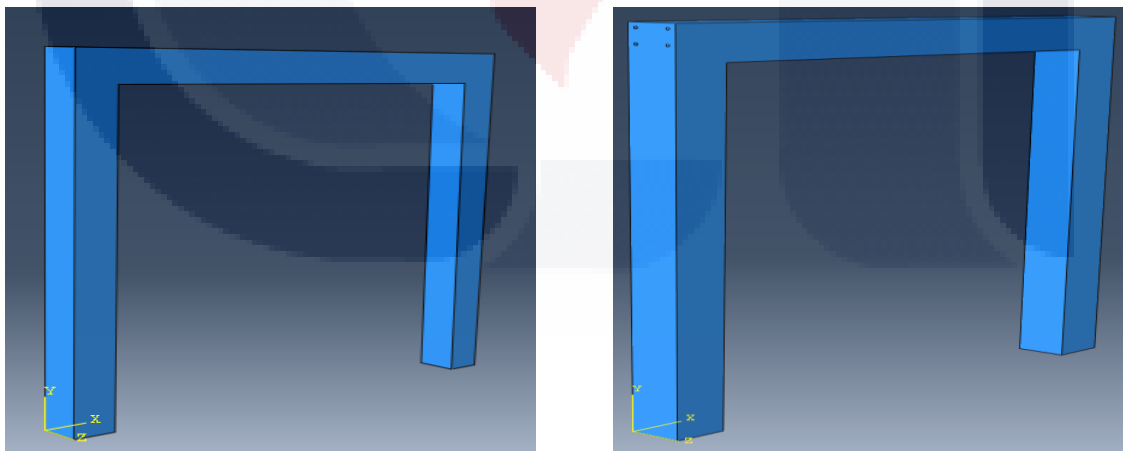


Figura 15. Marco de concreto con columnas y traveses sin refuerzos y con refuerzo.

4.5.4 Pasos de cálculo

Para determinar el momento en que actuarán las cargas, las condiciones de borde y las interacciones entre los diferentes elementos, Abaqus/CAE permite dividir el proceso de análisis en pasos de cálculo (*Step*). En esta modelación se tuvieron en cuenta tres pasos de cálculo:

1. Inicial; donde el programa aplica todas las propiedades de contacto a las caras en interacción y las condiciones de bordes.
2. Peso propio de los elementos
3. Carga vertical.

4.5.5 Interacciones

En este paso es definido el contacto entre los materiales de cada elemento del modelo, en nuestro caso solamente tenemos la interacción existente entre el concreto y el acero

- *Interacción concreto-acero*: se estableció como un contacto entre superficies y se le asignó un comportamiento friccional normal y tangencial. El coeficiente de fricción a emplear fue de 0.3, sugiriéndose valores entre 0,2 y 0,4 según un proyecto de investigación de la Cátedra de construcción de la universidad de Karlsruhe realizado en 1977 y se estableció como la superficie máster las barras de acero y como superficie esclava el concreto en contacto con las barras de acero.

4.5.6 Cargas y condiciones de contorno

En este paso son definidas las condiciones de contorno o de frontera del modelo, en nuestro caso, para los marcos, se consideró articulado en su parte superior y en sus laterales para simular el confinamiento que estos tienen dentro de una estructura y empotrado en una longitud igual a $L/2$, siendo L el ancho del muro.

Las cargas que se le aplicaron al sistema fueron dos, en un primer *step*, o paso, se aplicó una carga de peso propio, con una magnitud igual a -9.806 Kg/m^3 , equivalente a la aceleración de la gravedad y en un segundo paso de cálculo fueron aplicadas las cargas descritas anteriormente en las Tablas 3 y 4, las cuales fueron diferentes para cada modelo.

4.5.7 Mallado

Como se había definido anteriormente el Abaqus es un programa que utiliza el MEF y para ello, es necesario dividir la geometría en mallas. Dentro de este módulo se define tanto la densidad de la malla como la forma del elemento finito utilizado en el mallado (Ver Tabla 8). Existen elementos de orden lineal y cuadrático, en los modelos estudiados se utilizaron los elementos lineales.

Tabla 8. Tipos de elementos finitos lineales

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

Un análisis matemático basado en elementos finitos de interpolación cuadrática requiere equipos de cómputo de alta velocidad y capacidad de procesamiento, por lo tanto, en la siguiente investigación se utilizarán los elementos finitos de primer orden, del tipo Hexaedro C3D8, con una densidad de malla de 0.08 mm.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***CAPÍTULO V:
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN
DE RESULTADOS***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez concluida la etapa experimental se procede con el procesamiento de los datos obtenidos, con el objetivo de analizar los resultados y darle respuesta a nuestro problema de investigación para aceptar o no la hipótesis planteada.

5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO.

Antes de proceder a obtener resultados numéricos es necesario realizar una calibración numérica del software que emplearemos, realizando una reproducción de ensayos experimentales y/o numéricos, de situaciones similares a las que deseamos investigar. En la presente investigación, y como se había dicho anteriormente, esta calibración en el Abaqus/CAE, se llevará a cabo mediante los resultados que obtuvo el Ing. Celio José Marte Jiménez en su tesis de Maestría, para ello se reproducirán las curvas de *Cortante basal vs Desplazamiento* obtenidas para el pórtico 3 y el pórtico 8.

5.2.1 Descripción de los elementos.

Pórtico 3

Como se puede apreciar en la Figura 16, existen dos secciones de columna diferentes y dos secciones de trabes a tener en cuenta en el proceso de calibración, las mismas se muestran resumidas en la Tabla 9, además de estas secciones sabemos que se consideró un concreto reforzado con resistencia a compresión de 30 MPa y que el valor de cortante basal resistente no supera los 300 kN (Ver Figura 17).

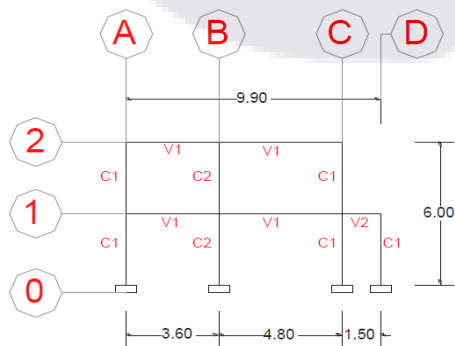


Figura 16. Pórtico 3 para realizar la calibración numérica del software.

Tabla 9. Dimensiones de los elementos del pórtico 3.

Elemento	Dimensiones (mm)
Columna C1	250x400
Columna C2	300x400
Viga V1	250x480
Viga V2	250x480

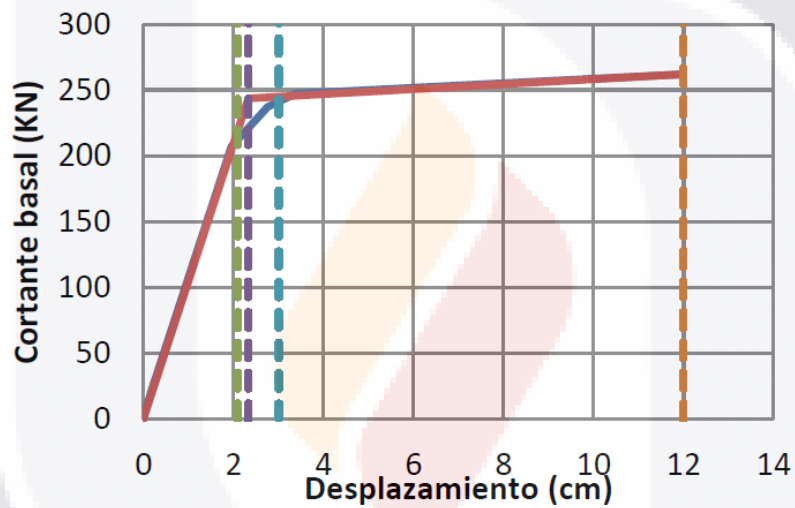


Figura 17. Curva de capacidad de carga para el pórtico 3 obtenidas en SAP2000.

En la Figura 18 se puede apreciar los valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 3 luego del proceso de calibración con escala de colores y valores orientativos para una mejor interpretación de los resultados.

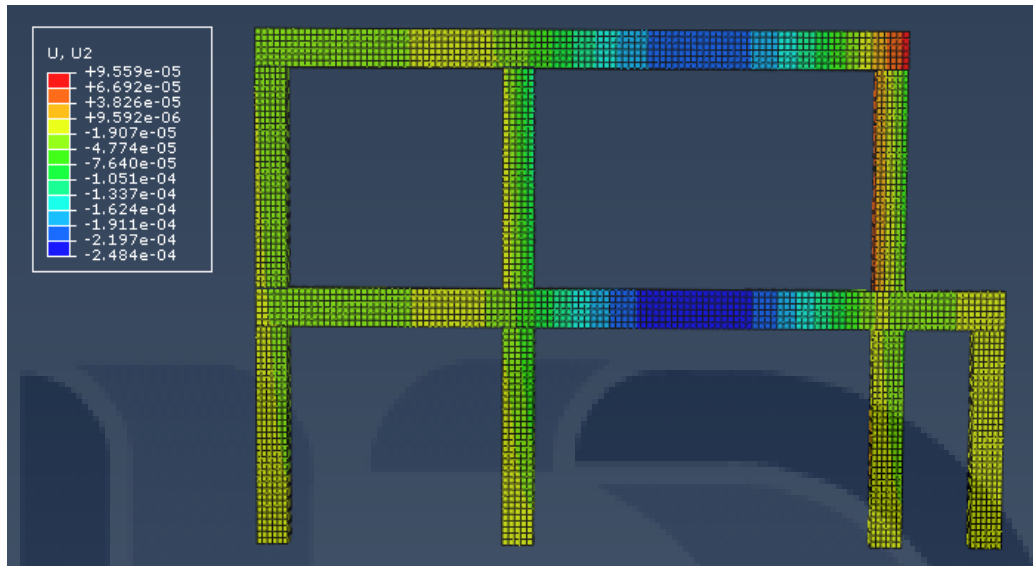


Figura 18. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 3 en el proceso de calibración.

Pórtico 8

Como se puede apreciar en la Figura 19, existe una sola sección de columnas y tres secciones de traveses a tener en cuenta en el proceso de calibración, las mismas se muestran resumidas en la Tabla 10, además de estas secciones sabemos que se consideró un concreto reforzado con resistencia a compresión de 30 MPa y que el valor de cortante basal resistente no supera los 300 kN (Ver Figura 20).

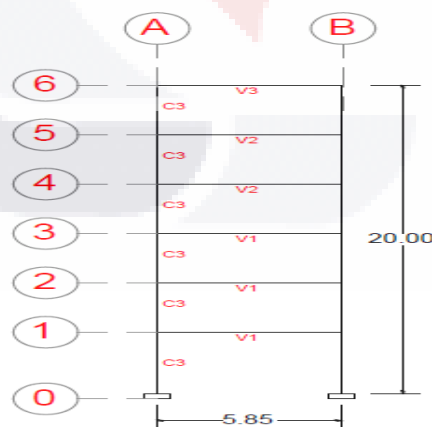


Figura 19. Pórtico 8 para realizar la calibración numérica del software.

Tabla 10. Dimensiones de los elementos del pórtico 8.

Elemento	Dimensiones m(m)
Columna C3	400x400
Viga V1	300x700
Viga V2	300x700
Viga V3	300x500

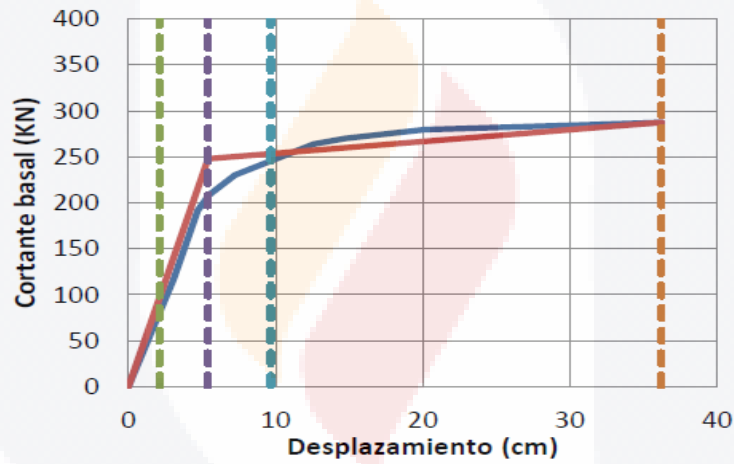


Figura 20. Curva de capacidad de carga para el pórtico 8 obtenidas en SAP2000.

En la Figura 21 se puede apreciar los valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 8 luego del proceso de calibración con escala de colores y valores orientativos.



Figura 21. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el pórtico 8 en el proceso de calibración.

5.2.2 Resultados obtenidos en el proceso de calibración.

Luego del análisis de varios modelos del pórtico 3 y 8, en el software Abaqus, se pudieron obtener buenos resultados (Ver Gráficos 1 y 2), lográndose obtener curvas de capacidad de carga semejante a la obtenida con el software SAP2000 para ambos pórticos, el análisis del pórtico 3 presenta un error de 15.15 % respecto a los resultados con el SAP2000 y la del pórtico 8 tienen un error de 16.67 %, demostrándose así que mediante el empleo del Abaqus se pueden obtener resultados que simulan el comportamiento real de los elementos analizados, pudiéndose proceder al análisis de los muros y los marcos de concreto definidos en esta investigación.

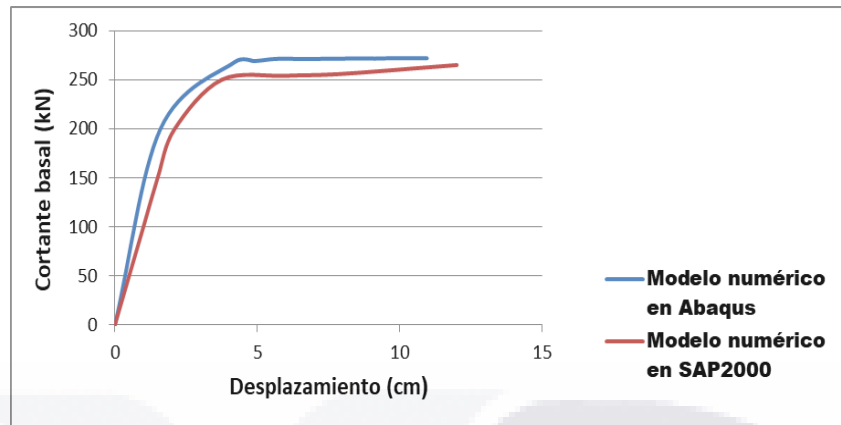


Gráfico 1. Curva de capacidad de carga obtenidas en Abaqus y en SAP2000 para el pórtico 3 como parte del proceso de calibración.

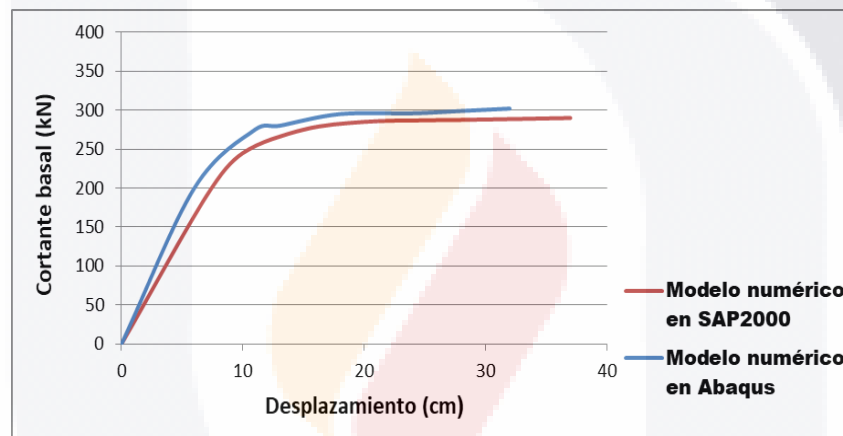


Gráfico 2. Curva de capacidad de carga obtenidas en Abaqus y en SAP2000 para el pórtico 8 como parte del proceso de calibración.

5.3 CURVAS DE CAPACIDAD DE CARGA Y DISTORSIÓN ANGULAR.

A continuación, se presentan las curvas de Carga vs Asentamiento (ver Gráfico 3) y las curvas de distorsión angular (ver Gráfico 4), correspondientes al muro 1 y muro 2, en las mismas es apreciable el aumento en la capacidad de carga y la disminución en los valores de asentamiento al considerar el refuerzo con barras de acero en el muro, ambos fueron sometidos a las mismas condiciones de análisis, iguales condiciones de apoyo, mismas cargas e iguales propiedades del concreto.

Al considerar refuerzo con barras de acero, en muros de concreto, se puede esperar, de forma general, un aumento de aproximadamente el 23% en la capacidad de carga y una reducción en el índice de los asentamientos del orden del 30% respecto al muro sin armar.

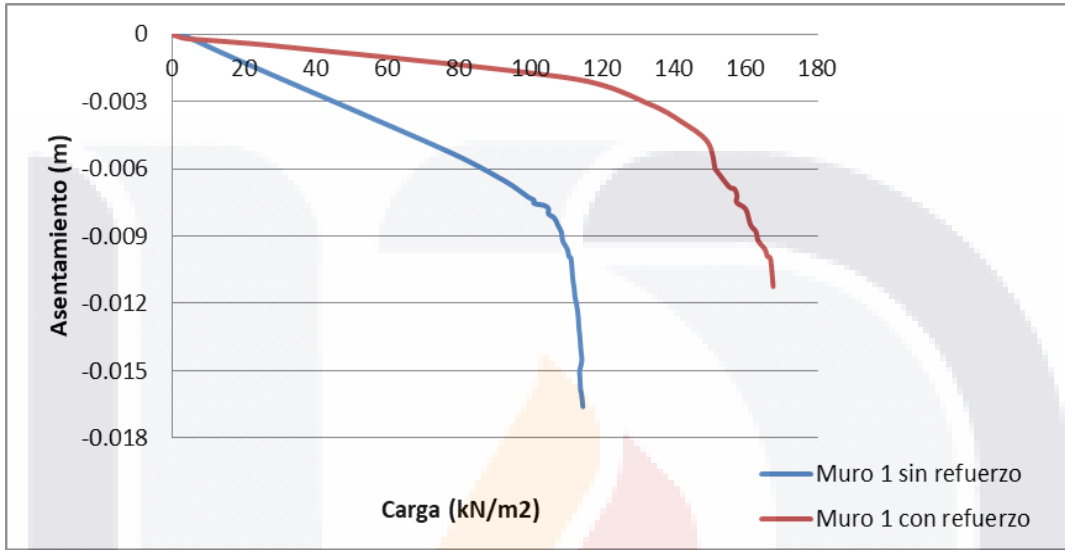


Gráfico 3. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el muro 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

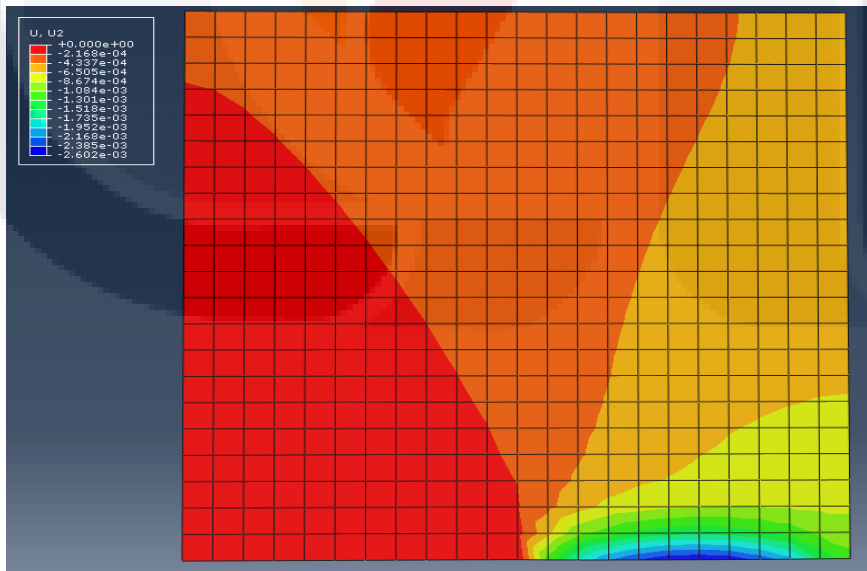


Figura 22. Valores de desplazamiento vertical (U₂) para el muro 1 sin considerar refuerzo.

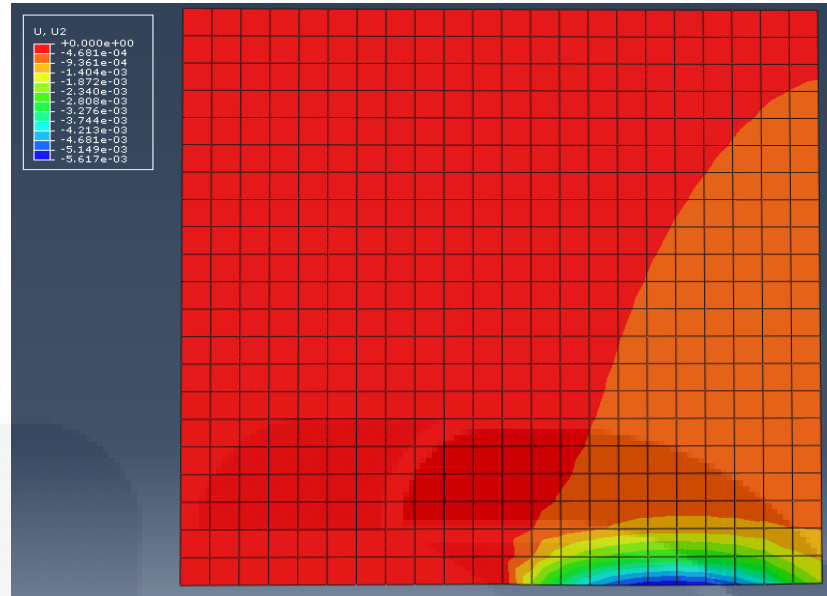


Figura 23. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 1 considerando refuerzo.

En las curvas de distorsión angular se permite ver como existe una gran variación en los valores de distorsión angular, valga la redundancia, al considerar el refuerzo y cuando no. En el elemento sin refuerzo los valores al iniciar la etapa plástica son del orden de 0.01 y en los muros reforzados es inferior a 0.005. Según estudios presentados por (Skempton & MacDonald, 1956) y Bejerrum (1963), en la Figura 24, se muestran valores de daños estructurales en relación con valores de distorsión angular límites, en la misma propone una considerable fisuración en muros de concreto para valores de distorsión angular iguales o superiores a 1/250, lo que nos lleva a afirmar que para estos rangos los muro sin refuerzos sobrepasan dicho límite, por lo que se consideraría altamente fisurado, sin embargo en los muros reforzados se presentan valores inferiores a 0.005 y cercanos a 0.004, por lo que presentan una mejor respuesta a la fisuración que podría causar el fenómeno de la subsidencia.

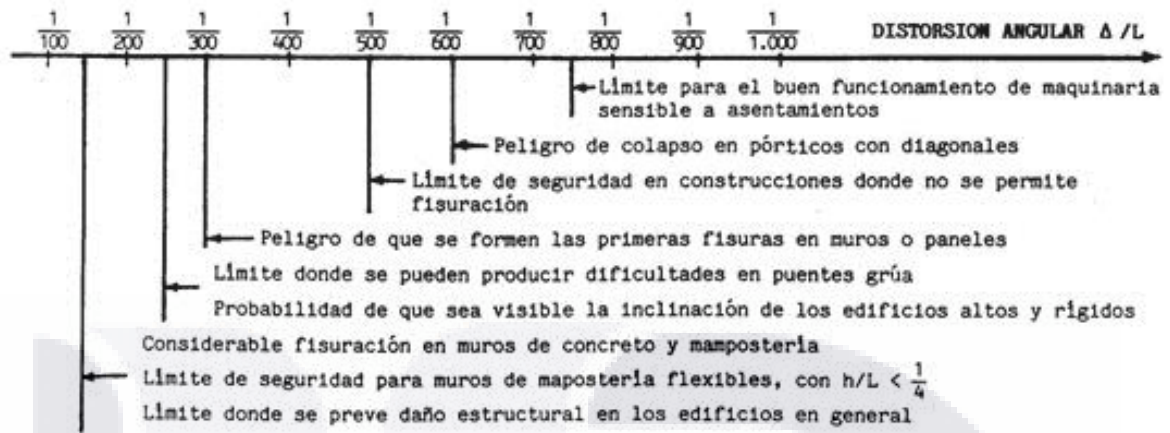


Figura 24. Distorsiones angulares límites. Gráfico de Bejerrum (1963), basado en datos presentados por (Skempton & MacDonald, 1956).

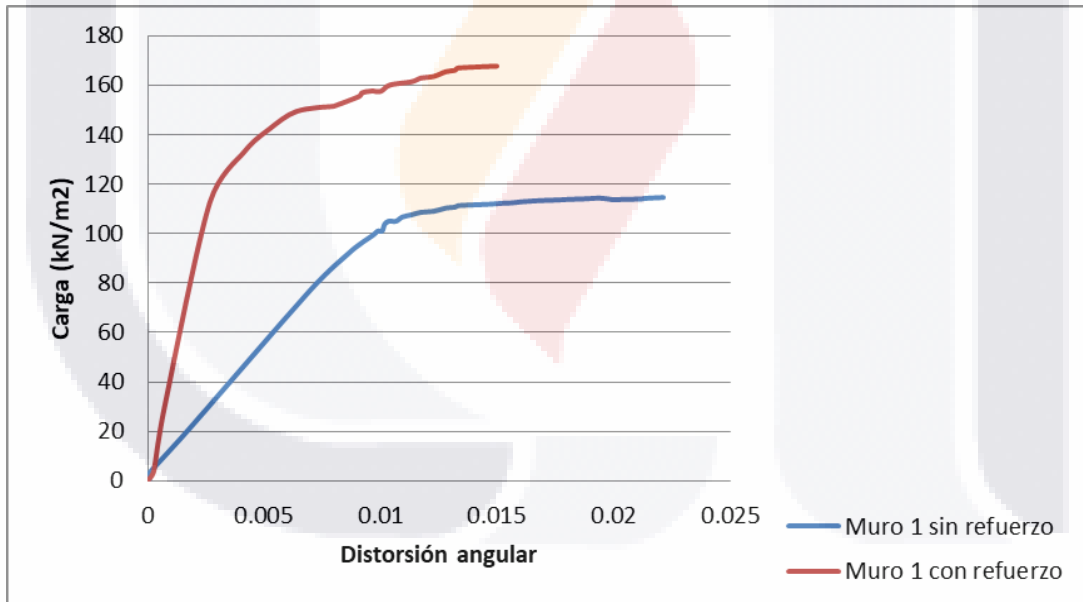


Gráfico 4. Curvas de distorsión angular obtenidas para el muro 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

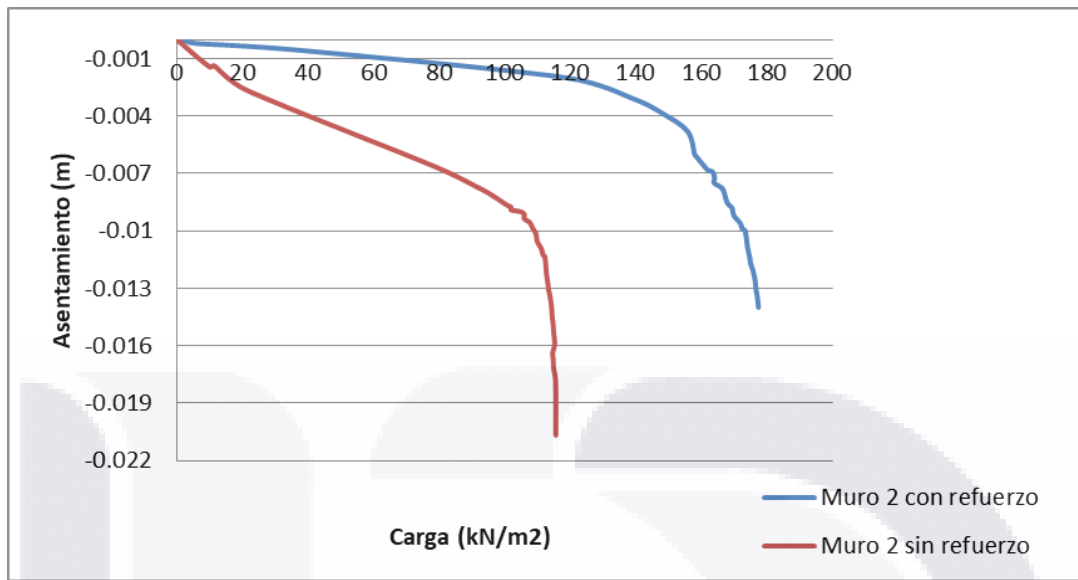


Gráfico 5. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el muro 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

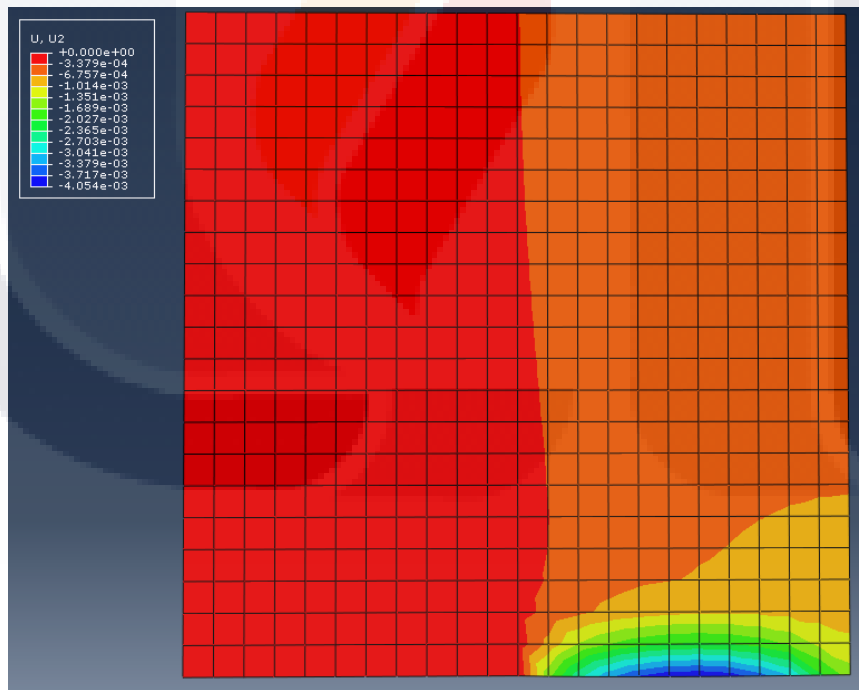


Figura 25. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 2 sin considerar refuerzo.

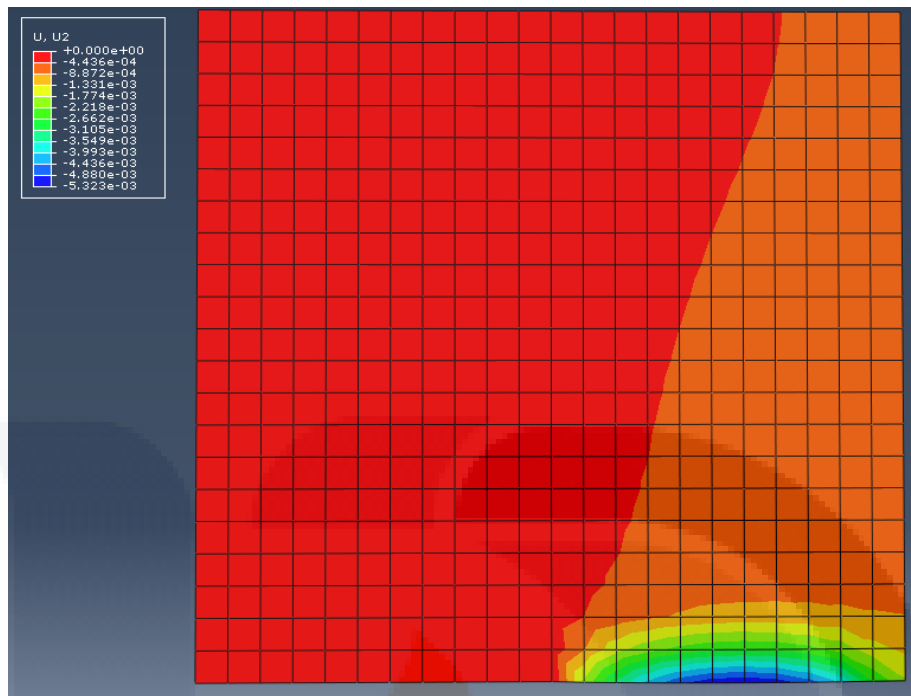


Figura 26. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el muro 2 considerando refuerzo.

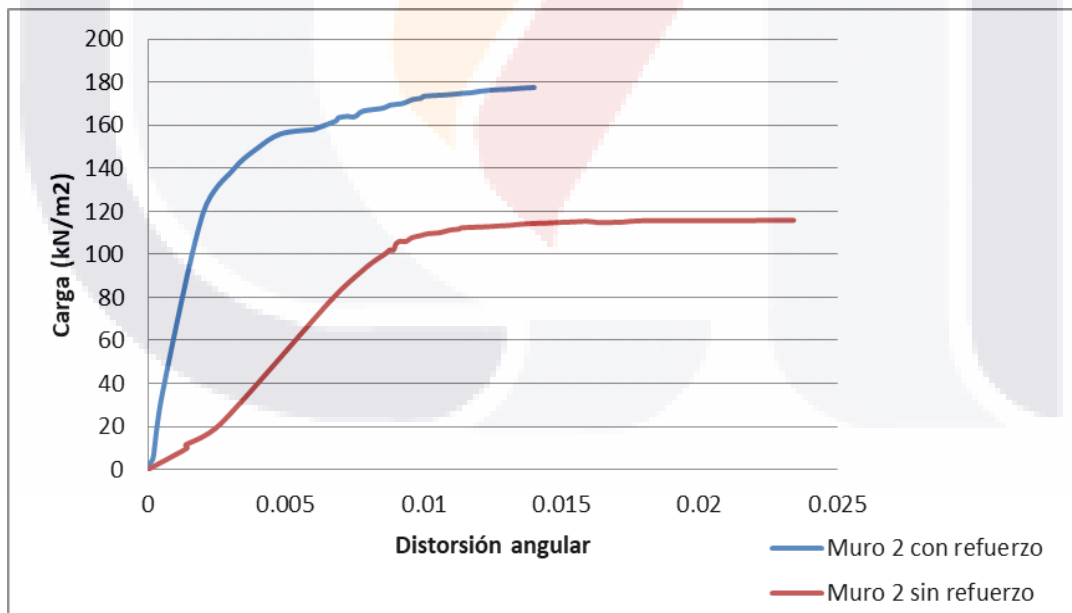


Gráfico 6. Curvas de distorsión angular obtenidas para el muro 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

En la siguiente tabla se muestra a modo de resumen los valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los muros analizados (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Resumen de valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los muros.

Dimensiones del elemento (m)	Refuerzo		Parámetros		
	Si	No	Capacidad de carga (kN/m ²)	Asentamiento Máximo (m)	Distorsión angular
1.5x1.5x2.0		x	110	0.017	0.011
1.5x1.5x2.0	x		140	0.010	0.003
2.0x2.0x2.5		x	115	0.021	0.01
2.0x2.0x2.5	x		160	0.014	0.0035

En las curvas de Carga vs Asentamiento y las curvas de distorsión angular, correspondientes a los marcos 1 y 2, es notable nuevamente, al igual que en el caso de los muros, el aumento en la capacidad de carga y la disminución en los valores de asentamiento al considerar los elementos reforzados, es importante mencionar que ambos elementos fueron sometidos a las mismas condiciones de análisis, iguales condiciones de apoyo, mismas cargas e iguales propiedades del concreto y de las barras de acero del refuerzo.

Al considerar refuerzo con barras de acero, tanto en las columnas como en las trabes de concreto del marco, se puede esperar, de forma general, un aumento de aproximadamente el 26.3% en la capacidad de carga y una reducción en el índice de los asentamientos del orden del 21.5% respecto al marco con los elementos sin armar.

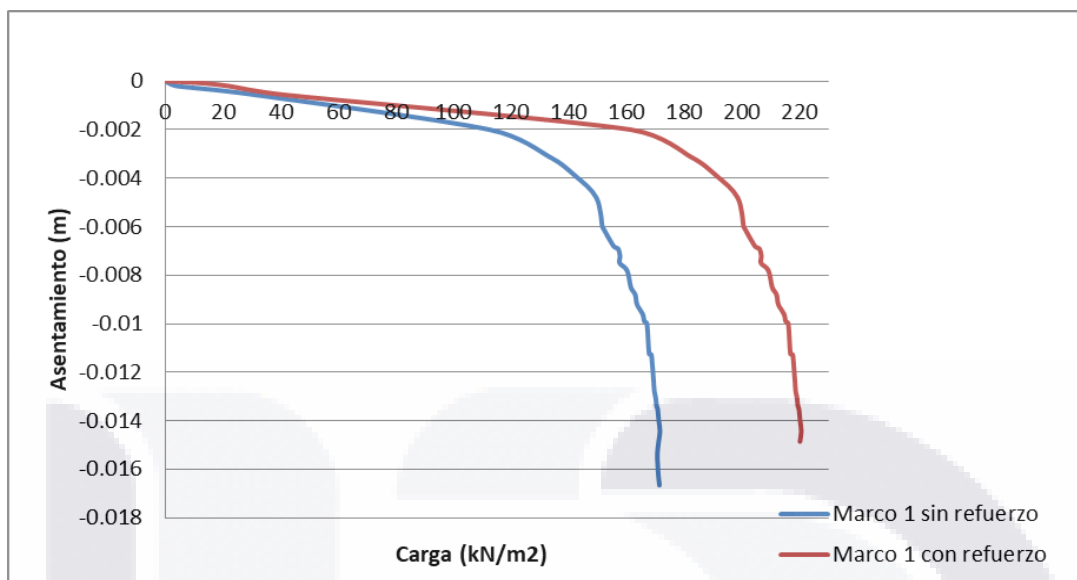


Gráfico 7. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el marco 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

En las curvas de distorsión angular se permite ver que existe una ligera variación en los valores de distorsión angular, valga la redundancia, al considerar el refuerzo y cuando no. En el elemento sin refuerzo los valores al iniciar la etapa plástica son del orden de 0.002 y en los marcos reforzados son inferiores a dicho valor. Estudios de (Alva Hurtado, 1995), como se presume en la Figura 27, muestra una tabla con valores de asentamientos admisibles para asentamientos diferenciales en función de “l”, que no es más que la distancia entre columnas adyacentes con asentamientos diferentes o entre dos puntos cualesquiera con asentamiento diferencial, dicho esto podemos usar los valores para medir la distorsión angular, en base a que la distorsión angular se define como la diferencia de asentamientos entre dos puntos dividido entre la longitud que los separa.

Como se aprecia en la Figura 27, para un asentamiento diferencial en pórticos de concreto armado el valor límite admisible oscila entre 0.0025 a 0.004l, según lo explicado anteriormente en términos de la distorsión angular este límite permisible para pórticos de concreto armado quedaría entre 0.0025 y 0.004.

Según nuestros resultados, tanto para los marcos con elementos sin armar y para los marcos reforzados, los valores de distorsión angular son en todos los casos menores que

este rango, por lo que no existe ningún problema en este tipo de estructuras frente al fenómeno de la subsidencia

Tipo de Movimiento	Factor limitativo	Asentamiento máximo
Asentamiento total	Drenaje	6-12 plg.
	Acceso	12-24 plg.
Inclinación o giro	Probabilidad de asentamiento no uniforme	1-2 plg.
	Estructuras con muros de mampostería	2-4 plg.
	Estructuras reticulares	3-12 plg.
	Chimeneas, silos, placas	
	Estabilidad frente al vuelco	Depende de la altura y el ancho
Asentamiento diferencial	Inclinación de chimeneas, torres	0.004 ℓ
	Rodadura de camiones, etc.	0.01 ℓ
	Almacenamiento de mercancías	0.01 ℓ
	Funcionamiento de máquinas-telares de algodón	0.003 ℓ
	Funcionamiento de máquinas-turbogeneradores	0.0002 ℓ
	Carriles de grúas	0.003 ℓ
	Drenaje de soleras	0.01-0.02 ℓ
	Muros de ladrillo continuos y elevados	0.0005-0.001 ℓ
	Factoría de una planta, fisuración de muros de ladrillo	0.001-0.002 ℓ
	Fisuración de revocos (yeso)	0.001 ℓ
Pórticos de concreto armado	0.0025-0.004 ℓ	
Pantallas de concreto armado	0.003 ℓ	
Pórticos metálicos continuos	0.002 ℓ	
Pórticos metálicos sencillos	0.005 ℓ	

Figura 27. Valores admisibles de asentamientos. Adoptado de (Alva Hurtado, 1995).

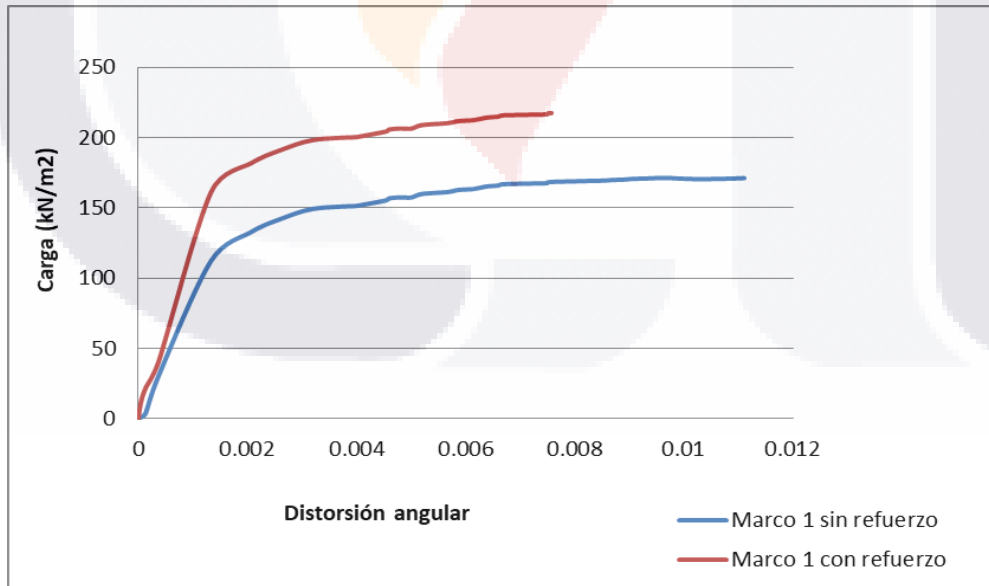


Gráfico 8. Curvas de distorsión angular obtenidas para el marco 1, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

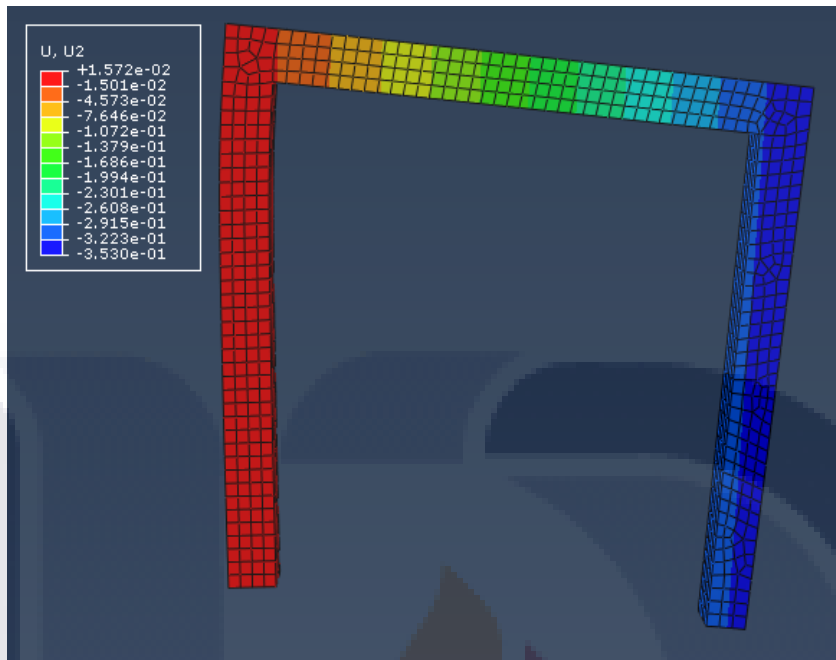


Figura 28. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 1 sin considerar refuerzo.

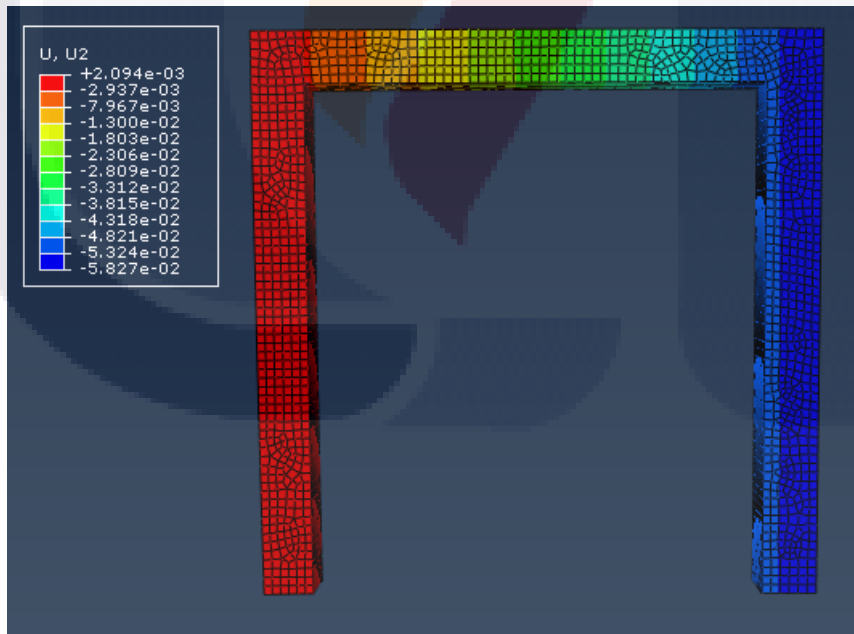


Figura 29. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 1 considerando refuerzo.

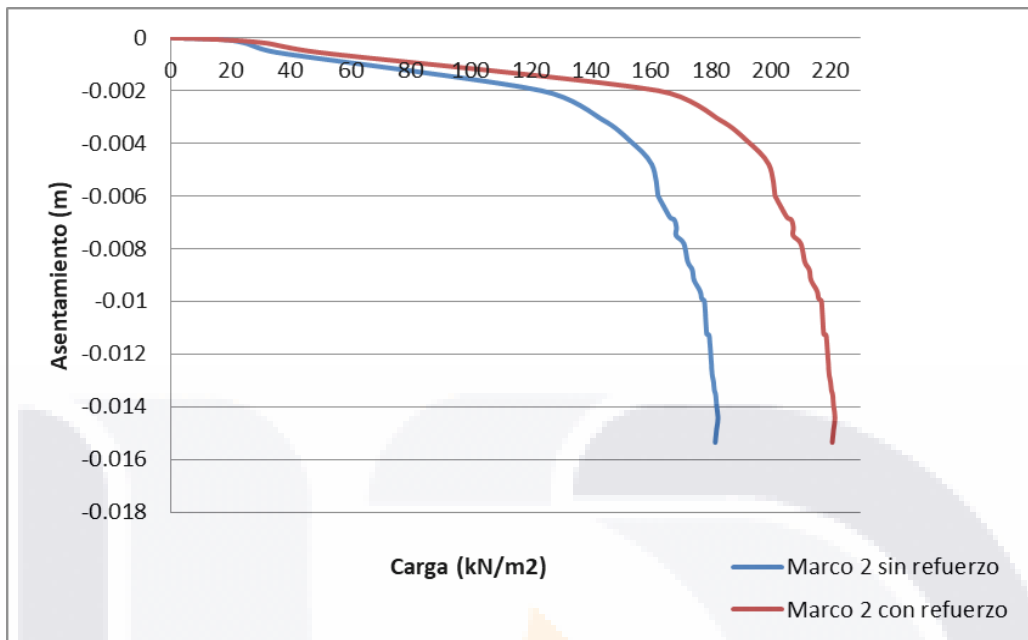


Gráfico 9. Curvas de capacidad de carga obtenidas para el marco 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

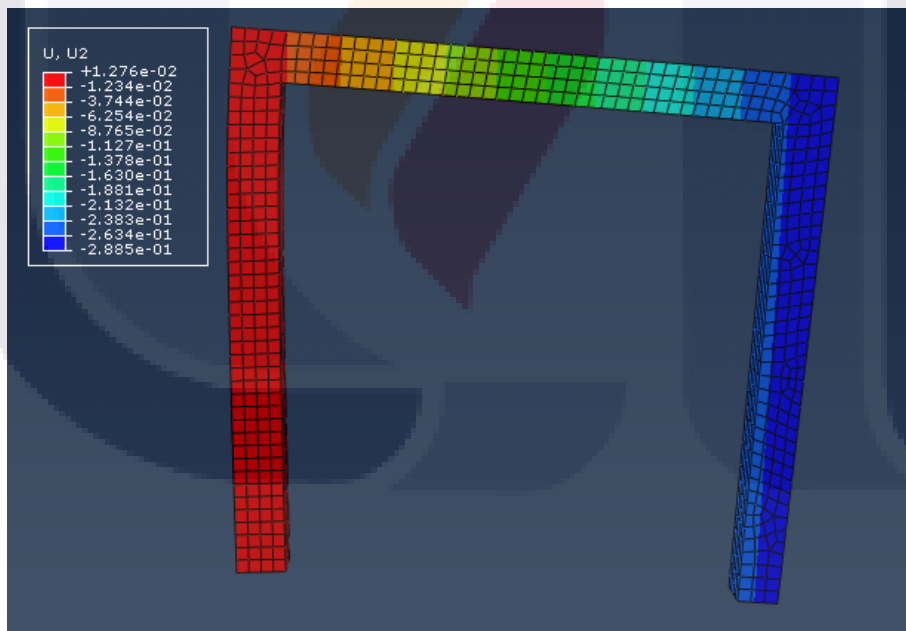


Figura 30. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 2 sin considerar refuerzo.

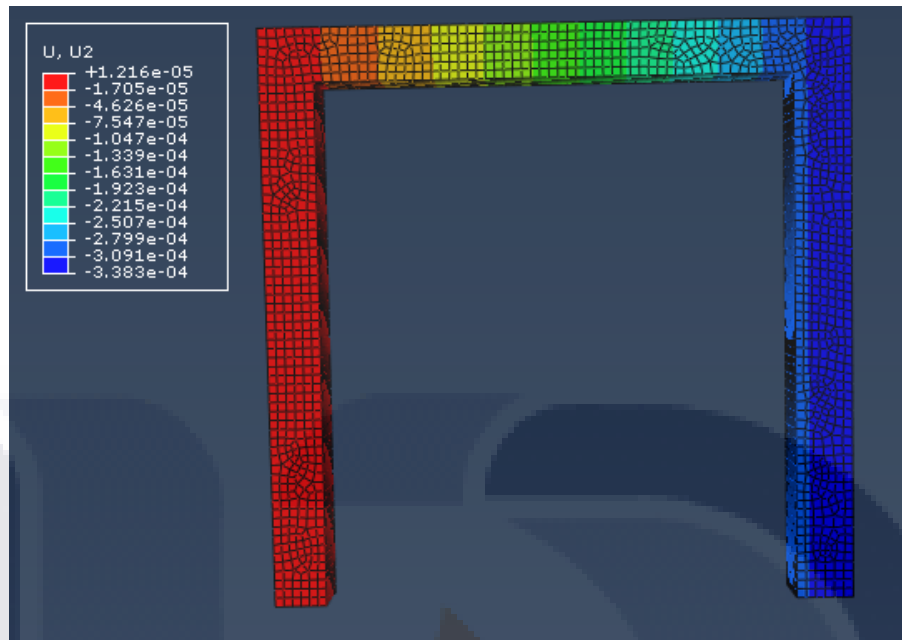


Figura 31. Valores de desplazamiento vertical (U2) para el marco 2 considerando refuerzo.

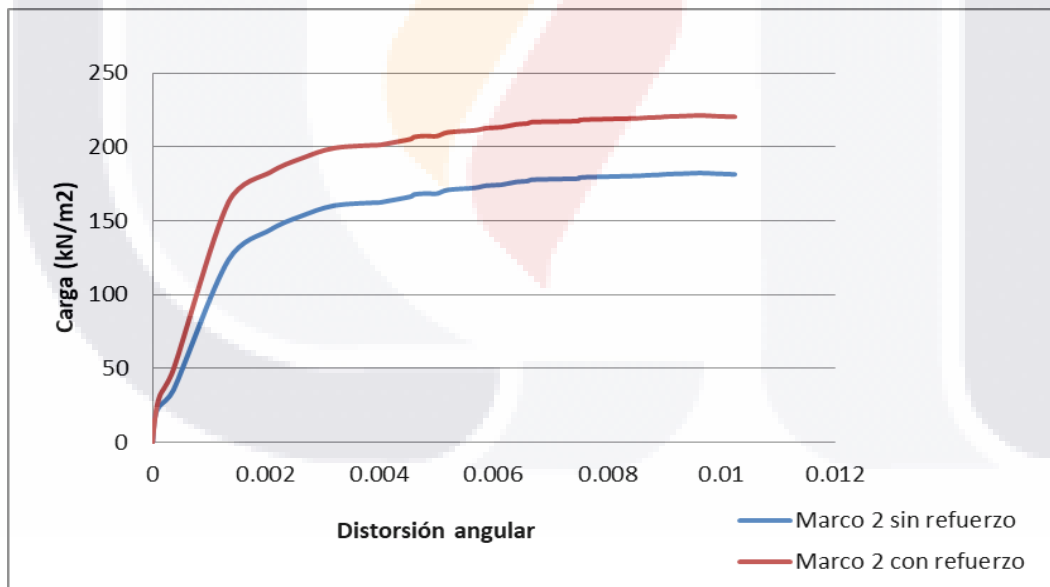


Gráfico 10. Curvas de distorsión angular obtenidas para el marco 2, considerándolo sin refuerzo y cuando se refuerza con barras de acero.

En la siguiente tabla se muestra a modo de resumen los valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los marcos (Ver Tabla 12).

Tabla 12. Resumen de valores de capacidad de carga, asentamientos y distorsión angular para los marcos.

Dimensiones del elemento (m)	Refuerzo		Parámetros		
	Si	No	Capacidad de carga (kN/m ²)	Asentamiento Máximo (m)	Distorsión angular
0.3x0.3x3.0		x	130	0.017	0.0019
0.3x0.3x3.0	x		180	0.015	0.001
0.35x0.35x3.05		x	140	0.015	0.0019
0.35x0.35x3.05	x		190	0.015	0.0015

5.4 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.

Como habíamos mencionado en capítulos anteriores, las curvas de fragilidad se utilizan para establecer una medida en base a la vulnerabilidad, en términos probabilísticos, del comportamiento de un determinado sistema.

Aunque su uso mayormente se ha dado en medir dicha vulnerabilidad en términos de daños sísmicos, en la presente investigación se usarán para determinar la probabilidad de que sistemas compuestos tanto por muros de concretos como por marcos de igual material, alcancen cierto grado de daño, cuando estos han sido sometidos a valores de distorsión angular producto de hundimientos diferenciales en el terreno a causa de la subsidencia.

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

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

Ecuación 3 Adoptado de (Ruiz Flores, 2013)

Donde:

μ : media poblacional de una variable X.

σ : desviación estándar del logaritmo natural de la variable X.

Para la elaboración de las curvas de fragilidad se trabaja con los valores de tensiones máximas, que se obtienen de la modelación mediante el pulldown, que corresponde al valor de distorsión angular donde empieza a ocurrir la plastificación del material, este valor de tensión corresponderá a un nivel de daño severo, el 50% del valor de la tensión para un daño leve y el 65% para un daño moderado, a cada uno de estos valores se le determina su logaritmo natural, ya que como habíamos mencionado anteriormente estas curvas siguen una distribución probabilística del tipo lognormal, la media y la desviación estándar.

La presente tabla (Ver Tabla 13), muestra los valores antes descritos que se utilizaron para obtener las curvas de fragilidad (Ver Gráfico 11), del muro 1 y 2 sin refuerzo.

Tabla 13. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad del muro 1 y 2 sin considerar refuerzo.

Elemento	Distorsión angular			Ln de la distorsión angular		
	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima
1.5mx1.5m P=1200kN	0.005	0.007	0.0115	-5.2983	-4.9618	-4.4654
2.0mx2.0m P=1200kN	0.0046	0.00656	0.0095	-5.3817	-5.0268	-4.6565
Media				-5.3400	-4.9943	-4.5610
Desviación estándar				0.417	0.325	0.0956

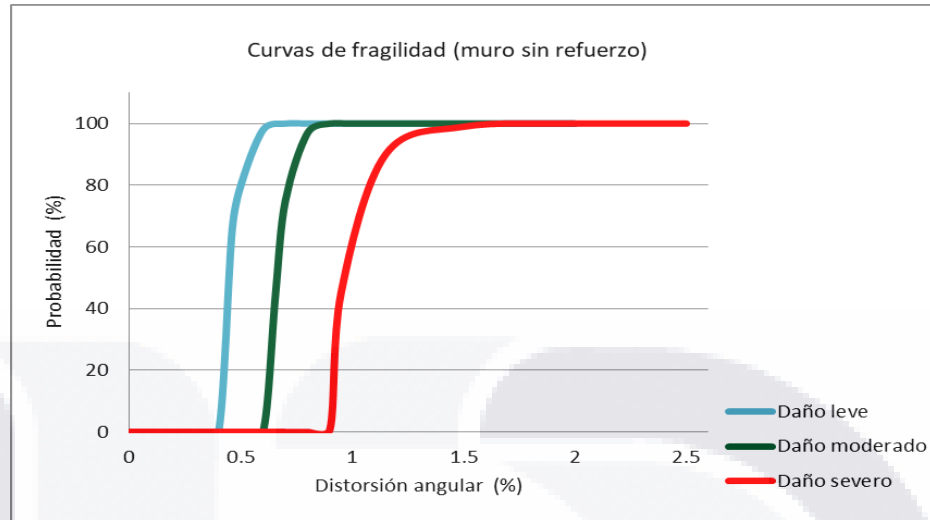


Gráfico 11. Curvas de fragilidad obtenidas para el muro 1 y 2 sin considerar refuerzo.

El mismo procedimiento fue utilizado para para obtener las curvas de fragilidad de los muros 1 y 2, pero esta vez considerando el refuerzo (Ver Tabla 14 y Gráfico 12).

Tabla 14. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad del muro 1 y 2 considerando el refuerzo.

Elemento	Distorsión angular			Ln de la distorsión angular		
	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima
1.5mx1.5m P=1200kN	0.002	0.0026	0.0123	-6.2146	-5.9522	-4.3982
2.0mx2.0m P=1200kN	0.0017	0.0028	0.0114	-6.3771	-5.8781	-4.4741
Media				-6.2959	-5.9152	-4.4362
Desviación estándar				0.0812	0.0371	0.0379

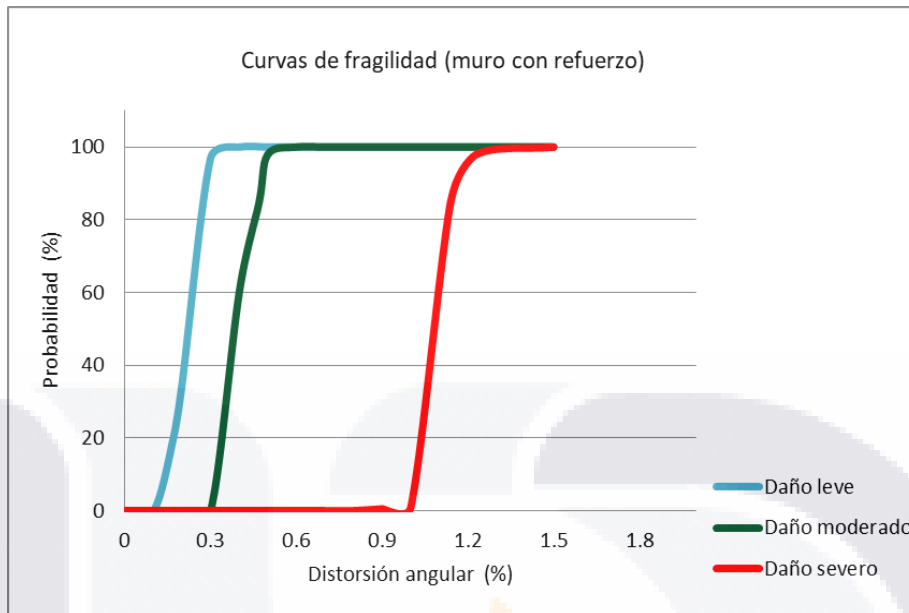


Gráfico 12. Curvas de fragilidad obtenidas para el muro 1 y 2 considerando el refuerzo.

A continuación, se muestran los valores obtenidos para elaborar las curvas de fragilidad de los marcos sin refuerzo, el procedimiento utilizado fue el mismo que se empleó para obtener las curvas de fragilidad de los muros. (Ver Tabla 15 y Gráfico 13).

Tabla 15. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad de los marcos 1 y 2 sin considerar refuerzo.

Elemento	Distorsión angular			Ln de la distorsión angular		
	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima
Luz libre de 3m P=4500kN (Marco 1)	0.0015	0.0018	0.0078	-6.5023	-6.3199	-4.8536
Luz libre de 3.5m P=4500kN (Marco 2)	0.0013	0.00175	0.0072	-6.6454	-6.3481	-4.9337
Media				-6.5739	-6.3340	-4.8937
Desviación estándar				0.717	0.141	0.0401

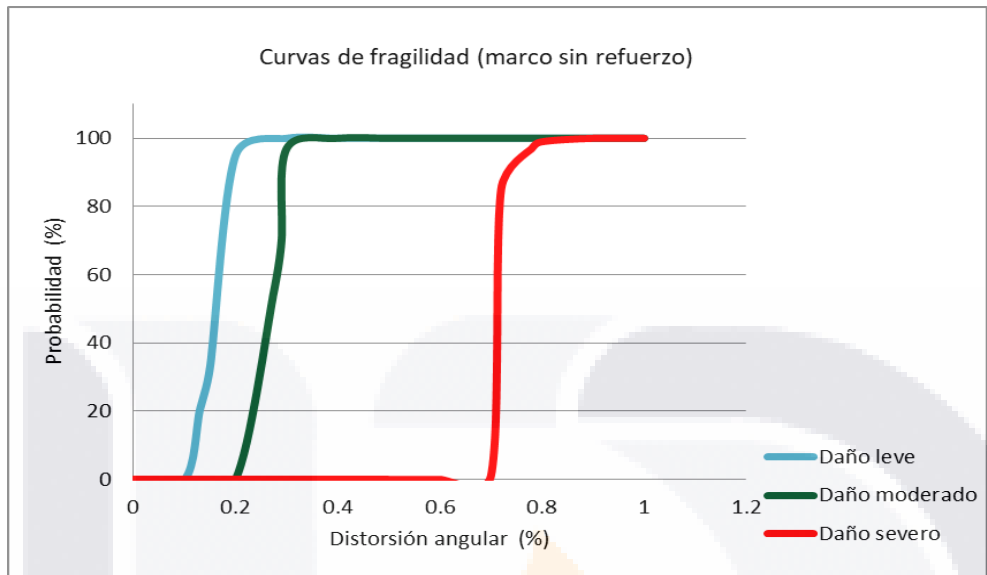


Gráfico 13. Curvas de fragilidad obtenidas para los marcos 1 y 2 sin considerar refuerzo.

Las curvas correspondientes a los marcos 1 y 2 con refuerzo se muestran en el Gráfico 14 y los valores que se emplearon para su obtención se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores empelados para obtener las curvas de fragilidad de los marcos 1 y 2 considerando el refuerzo.

Elemento	Distorsión angular			Ln de la distorsión angular		
	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima	50% Tensión máxima	65% Tensión máxima	Tensión máxima
Luz libre de 3m P=4500kN (Marco 1)	0.0012	0.00165	0.0077	-6.7254	-6.407	-4.8665
Luz libre de 3.5m P=4500kN (Marco 2)	0.00165	0.0018	0.008	-6.407	-6.3199	-4.8283
Media				-6.5662	-6.3635	-4.8474
Desviación estándar				0.1592	0.0436	0.0191

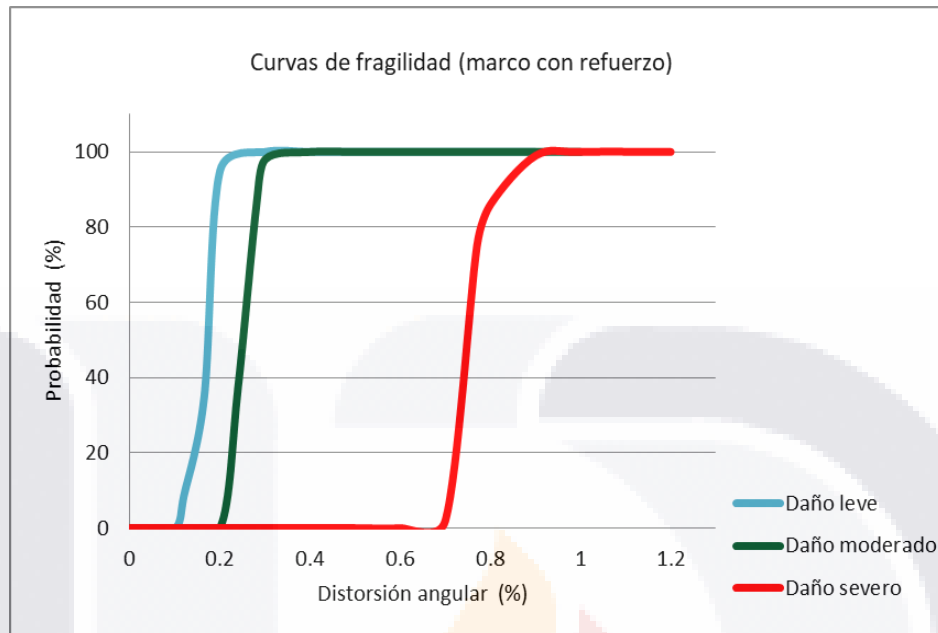
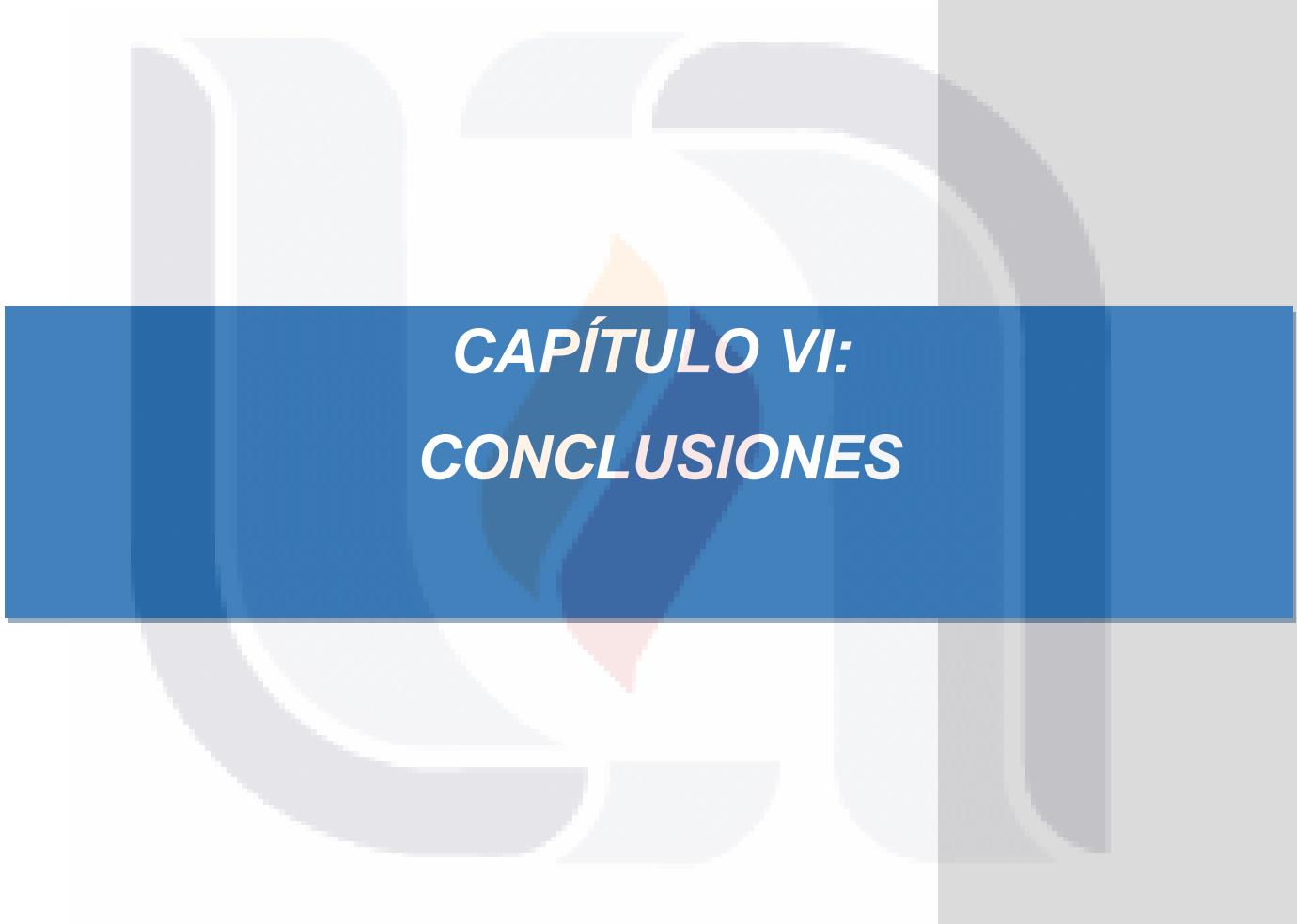


Gráfico 14. Curvas de fragilidad obtenidas para los marcos 1 y 2 considerando el refuerzo.



***CAPÍTULO VI:
CONCLUSIONES***

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

La subsidencia es un fenómeno geológico que se presenta en varios estados de la República Mexicana, el mismo genera hundimientos paulatinos de la superficie en forma de asentamientos diferenciales en las construcciones.

En el estado de Aguascalientes no estamos exentos de estos hundimientos y de la formación de grietas en el suelo, causadas fundamentalmente, por la subsidencia producto de la extracción de agua de los acuíferos. Las estructuras de concreto, tanto muros como marcos, son susceptibles a este fenómeno, presentándose fisuras, grietas y en ocasiones el colapso de uno o varios de los elementos que conforman el sistema, es por eso que el objetivo de esta investigación se centró en la determinación del comportamiento de muros y marcos de concreto reforzado sometidos a asentamientos diferenciales, provocados por el fenómeno de la subsidencia, mediante el efecto del pulldown.

Para ello nos apoyamos en el software Abaqus/CAE con el cual realizamos todo el proceso numérico, y con el cual se obtuvieron los resultados esperados, una vez analizados los datos arrojados llegamos a las siguientes conclusiones:

- A. La simulación numérica empleando el software Abaqus/CAE, basado en el Método de Elementos Finitos, constituye una herramienta precisa y confiable para el análisis de muros de concreto, frente a la subsidencia. Lo que permitió obtener modelos numéricos calibrados, los valores de distorsión angular para muros y marcos y la obtención de curvas de fragilidad para ambos elementos.
- B. En las distorsiones angulares para los muros sin refuerzo se observa que al alcanzar valores entre 0.01 y 0.015, el material comienza a tener un comportamiento plástico, llegando a la falla del mismo, mientras que para los muros con refuerzo estos valores oscilan entre 0.003 y 0.0035, que al compararlos con los valores propuestos por Skempton & MacDonald reflejan un peligro de que se formen las primeras fisuras para los muros reforzados y un alto grado de fisuración para los muros sin refuerzo.

C. En las distorsiones angulares para los marcos sin refuerzo los valores de distorsión angular donde el material empieza a plastificarse son de aproximadamente 0.0019, mientras que para los marcos con refuerzo estos valores oscilan entre 0.001 y 0.0015, al compararlos con valores propuestos por Alva Hurtado podemos percatarnos que tanto los marcos sin elementos reforzados como los marcos reforzados presentan un buen comportamiento frente al efecto de la subsidencia en valores de carga que no excedan de su capacidad de carga.

D. El refuerzo estructural con barras de acero en muros de concreto es fundamental para mejorar el comportamiento el mismo frente a los efectos de los hundimientos diferenciales, brindando un mejor desempeño y aumentando la capacidad de carga respecto a un elemento sin armar.

E. Las curvas de fragilidad constituyen una herramienta muy útil para evaluar el estado de daño de una estructura, fundamentalmente de concreto, frente al efecto de los hundimientos diferenciales.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



***REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS***

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva Hurtado. (1995). *Diseño de cimentaciones*. Perú.
- Alvarez, A. (1999). *Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro*. (Máster), Universidad autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Biot, M. A. (1941). General Theory of Three Dimensional Consolidation. . *Journal of Applied Physics*, 2.
- Blondet, M., Muñoz, A., Tarque, N., & Mosqueira, M. (2005). *Estimación de pérdidas en edificaciones educativas peruanas*. Paper presented at the IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile.
- Broto, X. (2006). *Patología de los elementos constructivos*.
- Castañeda Alvarado, J. A., Zermeño de León, M. E., & Arroyo Contreras, G. M. (2004). *El agrietamiento en Aguascalientes: causas y efectos*. (U. A. d. Aguascalientes Ed.). Aguascalientes, México.
- Gutiérrez, A. (2015). *Cambios de paradigmas en ingeniería civil*. Paper presented at the Seminario Técnico SIVENSA-PAG Marketing, Caracas.
- Lara Díaz de León, D. (2016). *Análisis numérico de muros de mampostería afectados por el fenómeno de subsidencia*. (Maestría), Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Marinilli, A. (2009). Análisis probabilístico simplificado de pórticos de concreto reforzado ante acciones sísmicas. *Boletín Técnico IMME*, 47 No. 2.
- Marte Jiménez, J. C. (2014). *Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal ("push-over")*. (Master), Politécnica de Catalunya, España.

- Moreno González, R., & Bairán García, J. M. (2010). Curvas de fragilidad para evaluar el daño sísmico en edificios de concreto armado con losas reticulares. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V*, 25.
- Oller, S. (2001). *Fractura mecánica. Un enfoque global*. Barcelona, España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- P. Kmiecik, M. K. (2011). *Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration*. Wrocław, Poland.
- Pacheco Martínez, J. (2007). *Modelo de Subsistencia del Valle De Querétaro y Predicción de Agrietamientos Superficiales* Querétaro.
- Pinto, P. E., Giannini, R., & Franchin, P. (2007). Seismic reliability analysis of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13).
- Ruiz Flores, J. R. (2013). *Simulación numérica y experimental de estructuras de acero rolado en frío por hundimientos diferenciales asociados al fenómeno de subsidencia*. (Mestría), Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Sermeño Zetino, J. A. (2014). *Simulación de los esfuerzos residuales resultantes de un tratamiento térmico de temple en piezas cilíndricas de acero*. Universidad de El Salvador, El Salvador.
- SIFAGG. (2009). Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas. México: Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Aguascalientes.
- Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (Vol. 5, pp. 727-768).
- UNAM, G. (2017). Subsistencia urbana.
- Vielma Pérez, J. C., Barbart, A. H., & Oller, S. (2007). Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño de edificios de concreto armado con ductilidad limitada. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7.