



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA

“TESIS”

**“EVALUACIÓN DE PATOLOGÍAS Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EN
VIVIENDAS AFECTADAS POR EL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN
LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, MÉXICO”**

PRESENTA

Alejandro Ramírez Cortés

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS**

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL

**Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil**

Aguascalientes, Ags, a 12 de junio del 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



ANIVERSARIO
UAA

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
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 **ALEJANDRO RAMÍREZ CORTÉS**, con ID 158079, quién realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN DE PATOLOGÍAS Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EN VIVIENDAS AFECTADAS POR EL FENÓMENO DE SUBSIDIENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, MÉXICO**, 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 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 4 de junio de 2015

DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN
TUTOR DE TESIS DEL ALUMNO
Y PROFESOR-INVESTIGADOR DEL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA DEL CCDC, UAA

Vo. Bo.

DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO
COTUTOR

Vo. Bo.

DR. GERARDO ARAIZA GARAYGORDOBIL
COTUTOR

V.B.

c.c.p. M. I. ALEJANDRO RAMÍREZ CORTÉS, ALUMNO DEL DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS, CON ÉNFASIS EN ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y URBANISMO (DCAA) PNPC.
c.c.p. MTRA. MARIA GUADALUPE VALDÉS REYES, JEFA DEL DEPARTAMENTO DE APOYO AL POSGRADO.
c.c.p. DR. SERGIO IGNACIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ, CONSEJERO ACADÉMICO DEL ÁREA DE INGENIERÍA CIVIL DEL CA, DCAA PNPC.
c.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la sabiduría y perseverancia para culminar otra meta en mi vida y por todas las enseñanzas y aprendizajes que ha puesto en mi camino, que aunque han sido difíciles, me hacen un mejor ser humano

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes y en especial al Dr. Alejandro Acosta Collazo, por darme la oportunidad de formar parte del programa del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos

A mi tutor, el Dr. Martín Hernández Marín, por sus valiosas observaciones y consejos para la realización de este trabajo, y por su gran apoyo moral y amistad

A todos los profesores del doctorado por los acertados consejos que me dieron durante mis estudios y en la revisión de la tesis, en especial al Dr. José Ángel Ortiz Lozano, al Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil, al Dr. Alejandro Acosta Collazo y al Dr. José Guadalupe Elguera Rosas

A mis compañeros del doctorado por todo el apoyo emocional, y por sus aportaciones intelectuales durante los estudios y la elaboración de este trabajo

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de doctorado

A Agustín Torres y a Sergio Sánchez, por permitirnos instrumentar sus viviendas y durante las mediciones efectuadas para esta investigación

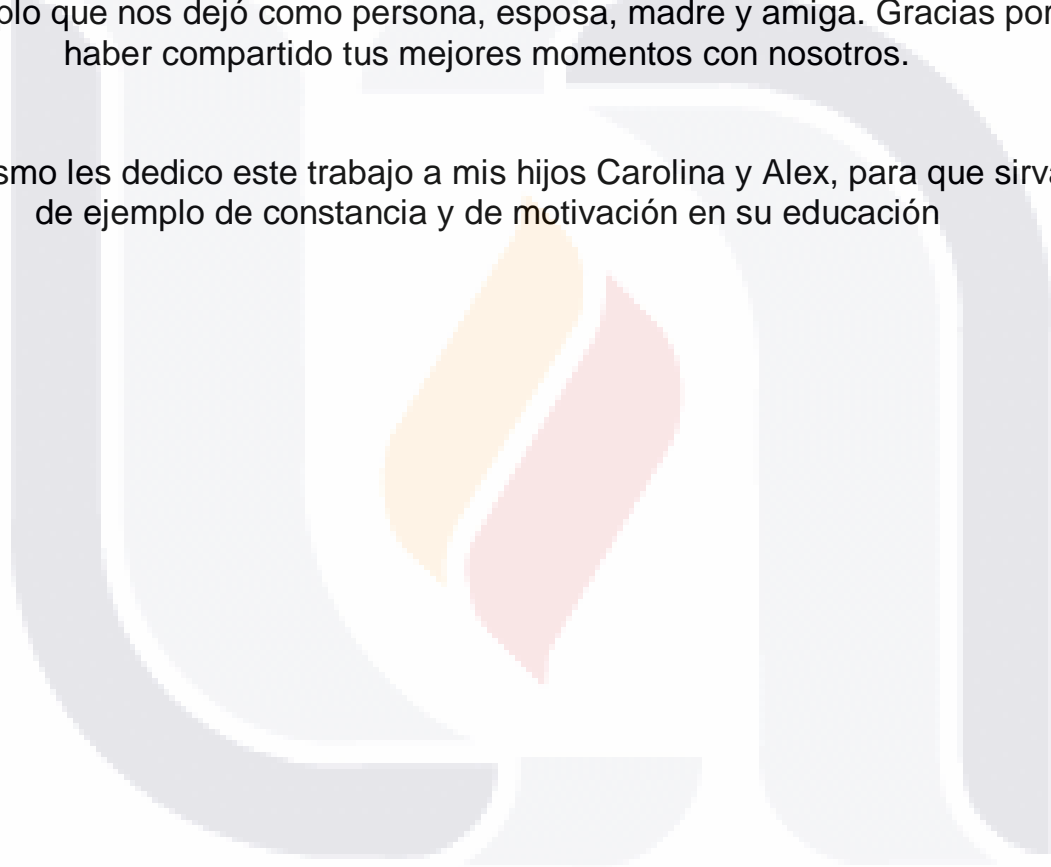
A mis padres, quien con su empeño y ejemplo han sembrado una semilla de perseverancia en mí

A toda mi familia y amigos, quienes han estado al pendiente de nosotros y nos ayudaron a cumplir otra meta más

DEDICATORIAS

De manera muy especial dedico este trabajo a la memoria de mi esposa Elvira Ortiz Jiménez, por todo el amor depositado en mí y en nuestros hijos, porque siempre me apoyó incondicionalmente durante toda mi formación profesional, por su gran paciencia durante mis estudios, y por el excelente ejemplo que nos dejó como persona, esposa, madre y amiga. Gracias por haber compartido tus mejores momentos con nosotros.

Asimismo les dedico este trabajo a mis hijos Carolina y Alex, para que sirva de ejemplo de constancia y de motivación en su educación



TEMA DE TESIS:

“EVALUACIÓN DE PATOLOGÍAS Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EN VIVIENDAS AFECTADAS POR EL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, MÉXICO”

DOCTORANTE:

ALEJANDRO RAMÍREZ CORTÉS

CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESÚMEN	11

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	15
---------------------------	-----------

- 1.1 Objetivos
- 1.2 Metodología empleada
- 1.3 Plan de trabajo desarrollado

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL POR SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO	23
--	-----------

- 2.1 Introducción
- 2.2 Tipos de subsidencia
 - 2.2.1. Genético o general
 - 2.2.2. Según el mecanismo desencadenante
- 2.3 Causas que generan la subsidencia
 - 2.3.1. Licuefacción
 - 2.3.2. Cimentación
 - 2.3.3. Colapsos
 - 2.3.4. Variaciones en el nivel freático o en líquidos subterráneos

- 2.3.5. Arcillas expansivas
- 2.3.6. Gasificación
- 2.3.7. Movimientos isostáticos sobre presión
- 2.4 Métodos para medir las velocidades y magnitudes de desplazamiento y los mecanismos generados por la subsidencia
 - 2.4.1. Métodos topográficos convencionales
 - 2.4.2. Métodos geodésicos
 - 2.4.3. Métodos fotogramétricos
 - 2.4.4. Métodos de teledetección
- 2.5 Subsidencia y fracturamiento en cuencas vulcano lacustres
 - 2.5.1. Mecanismos de fracturamiento en materiales arcillosos
 - 2.5.2. Factores geológicos que determinan la susceptibilidad al fracturamiento
 - 2.5.3. Factores disparadores de fracturas
 - 2.5.4. Tipos generales de fracturas en secuencias fluvio-lacustres
- 2.6 Medición de la subsidencia en la localidad de Jocotepec, Jalisco
 - 2.6.1. Introducción
 - 2.6.2. Localización y fisiografía
 - 2.6.3. Metodología para la evaluación de la deformación superficial
 - 2.6.4. Resultados obtenidos de la evaluación de la deformación superficial
 - 2.6.5. Alineamientos de fallas en la superficie
- 2.7 Conclusiones

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DE PATOLOGÍAS DE DAÑOS EN EDIFICACIONES EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, POR SUBSIDENCIA Y FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL.....53

- 3.1 Introducción
- 3.2 Objetivos
- 3.3 Clasificación empleada en la investigación sobre patologías de daños en edificaciones
- 3.4 Ubicación de zonas y de edificaciones dañadas por subsidencia en la localidad de Jocotepec
- 3.5 Censos de daños a edificaciones de la localidad de Jocotepec
- 3.6 Daños estructurales en las edificaciones
- 3.7 Análisis estadístico de resultados
- 3.8 Conclusiones

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR DESEMPEÑO EN EDIFICACIONES AFECTADAS POR SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, MÉX.....77

- 4.1 Introducción
- 4.2 Criterios de desempeño que se han aplicado en el análisis estático no lineal
- 4.3 Avances en la clasificación de los estados límite de daños
- 4.4 Determinación de los niveles de desempeño según normativa existente
- 4.5 Ventajas y desventajas del análisis Push-over
 - 4.5.1. Ventajas
 - 4.5.2. Desventajas
- 4.6 Metodologías de análisis Push-over y Pull-down en la edificación
 - 4.6.1 Metodología para elaborar los análisis Push-over y Pull-down
 - 4.6.2 Descripción de la edificación seleccionada para el estudio
 - 4.6.3 Modelos matemáticos de la edificación
 - 4.6.4 Propiedades no lineales de los materiales
 - 4.6.5 Demanda sísmica
 - 4.6.6 Selección de nudos de control
- 4.7 Resultados y verificación del desempeño con los análisis Push-over y Pull-down
 - 4.7.1 Resultados de la evaluación de la capacidad-deformación
 - 4.7.2 Resultados de la evaluación de los estados límite de daños
 - 4.7.3 Resultados de la comparativa de esfuerzos entre el procedimiento Push-over vs Pull-down
- 4.8 Limitaciones del método y trabajo futuro
- 4.9 Conclusiones

CAPÍTULO 5

MONITORIZACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICACIÓN PARA EVALUAR EL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA.....119

- 5.1 Introducción
- 5.2 Distribución arquitectónica e instrumentación de la edificación
- 5.3 Medición de magnitudes de desplazamiento del suelo respecto a la edificación
- 5.4 Monitorización de daños en la edificación
 - 5.4.1. Revisión de desplazamientos en los agrietamientos de los muros
 - 5.4.2. Evolución del daño en los muros en función de sus agrietamientos

- 5.5 Correlación de daños de la edificación monitorizada con su análisis Pull-down
- 5.6 Conclusiones

CAPÍTULO 6

IMPACTO EN LAS VIVIENDAS Y EN EL DESARROLLO ECONÓMICO DEL MUNICIPIO DE JOCOTEPEC, JALISCO, DEBIDO A UN USO NO SUSTENTABLE DEL AGUA.....143

- 6.1 Introducción
- 6.2 Actividades de desarrollo económico del municipio de Jocotepec
- 6.3 Características geográficas y demográficas
- 6.4 Hidrología del municipio de Jocotepec
- 6.5 Vulnerabilidad de acuíferos por sobreexplotación
- 6.6 Problemática antrópica derivada del uso del agua respecto a las edificaciones del municipio
- 6.7 La problemática ambiental del municipio por el uso del suelo
 - 6.7.1. La especulación inmobiliaria
 - 6.7.2. El cambio en los cultivos agrícolas y el ascenso de la agricultura protegida
 - 6.7.3. La modernización y desarrollo de nuevas vías de comunicación
- 6.8 Prospectivas

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....157

- 7.1 Conclusiones generales
- 7.2 Prospectivas

GLOSARIO.....165

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....171

ANEXO A. CENSOS DE EDIFICACIONES DAÑADAS.....177

- A.1 Obtención de los índices de estado de condición estructural de todas las edificaciones censadas

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Página
Tabla 2.1 Características de las técnicas topográficas clásicas (de Tomás R. et al, 2005)	35
Tabla 2.2 Características de los métodos geodésicos (de Tomás R. et al, 2005)	37
Tabla 2.3 Características de los métodos fotogramétricos (de Tomás R. et al, 2005)	38
Tabla 2.4 Características principales de los métodos de teledetección (de Tomás R. et al, 2005)	41
Tabla 3.1 Valores para el factor funcional	56
Tabla 3.2 Valores para el factor de mantenimiento	56
Tabla 3.3 Valores para el factor de daño en losas	58
Tabla 3.4 Valores para el factor de acción en losas	58
Tabla 3.5 Valores para el factor de urgencia en losas	58
Tabla 3.6 Valores para el factor de daño en muros	59
Tabla 3.7 Valores para el factor de acción en muros	59
Tabla 3.8 Valores para el factor de urgencia en muros	60
Tabla 3.9 Valores para el factor de daño en elementos de confinamiento	60
Tabla 3.10 Valores para el factor de acción en elementos de confinamiento	60
Tabla 3.11 Valores para el factor de urgencia en elementos de confinamiento	60
Tabla 3.12 Valores para el factor de daño en cimentación	61
Tabla 3.13 Valores para el factor de acción en cimentación	61
Tabla 3.14 Valores para el factor de urgencia en cimentación	61

TABLA	Página
Tabla 3.15 Descripción y magnitud del daño del IEC, Alonso (2010)	62
Tabla 3.16 Domicilios de edificaciones dañadas	63
Tabla 3.17 Índice de Estado de Condición de las edificaciones censadas	67
Tabla 3.18 Análisis de varianza para el IEC por alineaciones	71
Tabla 3.19 Análisis de rangos múltiples del IEC para las zonas norte, centro y sur	71
Tabla 3.20 Tabla de medias del IEC con límites y error estándar	73
Tabla 4.1 Valores límite de distorsión máxima de entrepiso y niveles de desempeño	88
Tabla 4.2 Valores de cortante basal-deformación para todas las combinaciones de análisis	103
Tabla 4.3 Valores de cortante basal-distorsión para las combinaciones de análisis	105
Tabla 5.1 Deformaciones verticales obtenidas en las tres etapas de monitorización	127
Tabla 5.2 Desplazamientos horizontales y verticales en los testigos de muros	129
Tabla 6.1 Índice de estado de condición estructural en edificaciones dañadas por subsidencia	149

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
Fig. 2.1 Seguimiento topográfico de un movimiento de ladera (de Tomás R. et al, 2005)	34
Fig. 2.2 Esquema de funcionamiento del sistema DORIS (de Tomás R. et al, 2005)	36
Fig. 2.3 Componente del <i>LIDAR</i> (de Tomás R. et al, 2005)	40

FIGURA	Página
Fig. 2.4 Esquema conceptual de sedimentación fluvio-lacustre en una cuenca derrada de origen volcánico, con actividad contemporánea a la sedimentación como es el caso de la Cuenca del Valle de México (Modificado de Carreón-Freyre <i>et al.</i> , 2005a)	42
Fig. 2.5 Ubicación de la localidad de Jocotepec, Jalisco, México (de Hernández-Marín <i>et al.</i> , 2014)	48
Fig. 2.6 Configuración de curvas de deformación vertical en dos periodos de monitorización (valores positivos=ascensos y valores negativos=descensos), con la ubicación de puntos de registro y su correspondiente deformación	50
Fig. 2.7 Correlación entre las discontinuidades del suelo y los patrones de deformación vertical acumulada	51
Figura 3.1 Detección y ubicación de edificaciones dañadas en las alineaciones norte, centro y sur	63
Figura 3.2 Obtención del IEC en edificación con condición estructural “mala”	65
Figura 3.3 Obtención del IEC en edificación con condición estructural “dañada”	65
Figura 3.4 Daños en viviendas y edificios públicos por la subsidencia	68
Figura 3.5 Diagramas de cajas del IEC para las zonas centro y sur	72
Figura 3.6 Gráfico de medias del IEC para las zonas centro, norte y sur	73
Figura 3.7. Histograma de frecuencias del IEC para las zonas norte, centro y sur	74
Figura 4.1 Gráficas de desempeño para materiales dúctiles y frágiles. a) Desempeño y deformación lateral para estructuras dúctiles. b) Desempeño y deformación lateral para estructuras frágiles	78
Fig. 4.2 Distorsiones de marco ante cargas laterales (Vielma-Pérez, 2008)	82
Fig. 4.3 Comportamiento trilineal experimental de muro de mampostería ante cargas pseudo-estáticas. a) Comportamiento histerético del muro. b) Degradación de rigidez del muro (Ramírez-Cortés, 2004)	85
Fig. 4.4 Patrón de agrietamiento de muro ensayado por cargas laterales (Ramírez-Cortés, 2004)	86
Fig. 4.5 Distribución arquitectónica y trayectoria de hundimiento de la edificación	93
Fig. 4.6 Daños en elementos estructurales de la edificación seleccionada	94

FIGURA	Página
Fig. 4.7 Curva de esfuerzo-deformación idealizada para compresión en la mampostería (Kaushik et al. 2007)	97
Fig. 4.8 Curva de esfuerzo-deformación para compresión, tensión y cortante en el concreto (Takeda et al. 1970)	97
Fig. 4.9 Espectro de diseño para viviendas de Jocotepec sobre suelo blando	98
Fig. 4.10 Nudos de control para análisis Push-over (PO) y Pull-down (PD). a) Nudos de control 1310 y 1260 para análisis Push-over. b) Nudos de control 528 y 505 para análisis Pull-down	99
Fig. 4.11 Comparativa de Push-over VS Pull-down en el sentido “X” de la edificación	101
Fig. 4.12 Comparativa de Push-over VS Pull-down en el sentido “Y” de la edificación	102
Fig. 4.13 Comparativa de procedimientos en los sentidos “X” y “Y” de la edificación	103
Fig. 4.14 Comparativa de distorsiones en ambos sentidos de la edificación	104
Fig. 4.15 Comparativa de distorsiones en el sentido transversal de la edificación. a) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 2.5 mm, b) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 25 mm	106
Fig. 4.16 Comparativa de distorsiones en el sentido longitudinal de la edificación. a) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 2.5 mm, b) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 25 mm	107
Fig. 4.17 Comparativa de distorsiones transversales para detección de pasos	109
Fig. 4.18 Esfuerzos cortantes para Push-over y Pull-down en la dirección de análisis transversal, a) PD-X1 paso 1, b) PD-X1 paso 2, c) PO-X1 paso 1, d) PO-X1 paso 2	110
Fig. 4.19 Comparativa de distorsiones longitudinales para detección de pasos	113
Fig. 4.20 Esfuerzos cortantes para Push-over y Pull-down en la dirección de análisis longitudinal, a) PD-Y1 paso 1, b) PD-Y1 paso 2, c) PO-Y1 paso 1, d) PO-Y1 paso 2	114
Fig. 5.1 Distribución arquitectónica e instrumentación de la edificación (plantas)	121
Fig. 5.2 Instrumentación de la edificación (isométrico)	122
Fig. 5.3 Cortes longitudinales y transversales de la edificación	122
Fig. 5.4 Colocación de testigos: a) y b) en muros, c) en pisos y d) en techos	123

FIGURA	Página
Fig. 5.5 Equipo GPS para monitorización de los desplazamientos: a) base fija y b) base móvil	124
Fig. 5.6 Ubicación de estaciones para monitorización de deformaciones verticales del suelo: a) en la localidad (Google Earth, 2015) y b) en la edificación instrumentada	125
Fig. 5.7 Medición de puntos de control para monitorización de deformaciones: a) Estación E1 (kiosco), b) Estación E2 (casa Juárez), c) Estación E3 (casa Juárez), d) Estación E4 (casa Hidalgo), e) Estación E5 (cerro), f) vista hacia la localidad desde el punto E5	126
Fig. 5.8 Registro de desplazamientos en los testigos 9 y 12, los valores en los ejes son centímetros	130
Fig. 5.9 Agrietamientos en muros de planta baja: a) Por flexión y cortante en muro de fachada, b) Desprendimiento de muro de fachada por asentamiento diferencial, c) Cortante en muro diagonal central, d) Asentamiento diferencial de muro de fachada, e) Cortante y flexión en muros de cochera, f) Desplazamientos de bóveda	132
Fig. 5.10 Agrietamientos en muros de planta alta: a) Por transmisión de cortante desde bóveda de entrepiso, b) Desprendimiento de muro longitudinal y cortante hacia la bóveda, c) Transmisibilidad del asentamiento diferencial desde la planta baja, d) Continuidad del cortante hacia los muros posteriores, e) Asentamiento diferencial de los muros de fachada de planta baja, f) Cortante en mochetas de muro hacia la zona de hundimiento, g) Cortante en muro colindante, h) Cortante en muros de fachada	133
Fig. 5.11 Progresión de esfuerzos cortantes en muros colindantes de acuerdo al análisis Pull-down: a) Paso 10 con asent=37.25 mm, b) Paso 11 con asent=42.0 mm, c) Paso 12 con asent=46.2 mm, d) Paso 13 con asent=50.5 mm, e) Paso 14 con asent=54.5 mm, f) Paso 15 con asent=58.5 mm, g) Paso 16 con asent=62.5 mm	136
Fig. 5.12 Superposición de agrietamientos respecto a esfuerzos cortantes de muros: Eje B, b) Eje C, c) Eje F, d) Eje H, e) Eje 3	139
Figura 6.1 Panorámica de la localidad de Jocotepec y sembradíos en la periferia urbana	145
Figura 6.2 Colapso de taludes en libramiento por desvío de cauces de agua	153



RESÚMEN

El agua es un recurso natural básico, de una importancia muy alta en el impacto a futuro en la sustentabilidad de las naciones, y que se utiliza en diversas actividades del desarrollo económico de las localidades, por lo tanto es necesario conocer a detalle un poco de la problemática ambiental, antrópica y económica que se ha derivado a consecuencia de su uso inmoderado. En Jocotepec, Jalisco, México, se está presentando una explotación indiscriminada del recurso hídrico para usos domésticos, agropecuarios e industriales, desde niveles profundos o someros del suelo, provocando una aceleración en la consolidación y compactación de los estratos, y que manifiestan a nivel superficial una deformación vertical o subsidencia que está generando daños en las edificaciones, en la infraestructura vial y en el equipamiento urbano. Los daños detectados actualmente se muestran como discontinuidades del suelo, tales como fallas, escarpes o fisuras, así también como daños en las edificaciones que se encuentran dentro y al margen de la zona de subsidencia, que van desde ligeros en algunos elementos estructurales, hasta severos en los que ha habido la necesidad de demoler parcial o totalmente las construcciones, debido a la alta vulnerabilidad estructural que manifiestan.

Algunos de los principales elementos de soporte de edificaciones, tales como muros o columnas, están incurriendo en rangos de comportamiento plástico con una notoria pérdida en resistencia, y mostrando daños muy fuertes en su integridad estructural. Aunado a lo anterior, existe una gran vulnerabilidad ante sismos que ocurren en la zona, que aunque han sido de baja magnitud presentan un riesgo potencial a la resistencia de las casas; además para el total de la población, ha sido evidente que aunque se han reparado las vialidades dañadas y algunas de las edificaciones, el problema está latente, lo cual afecta las formas de vida de sus habitantes.

Por lo descrito anteriormente, en este trabajo fue necesario identificar y estudiar primero la fenomenología que está ocurriendo en la localidad de Jocotepec respecto al uso y extracción del agua, se evaluaron las deformaciones del suelo en la zona urbana, se identificaron las zonas de daño más significativas tanto en vialidades como en edificaciones, y posteriormente se calificaron los daños estructurales en algunas viviendas

afectadas, desde un enfoque subjetivo al identificar las patologías de daños, con una metodología que evalúa a detalle el nivel de daño de cada elemento estructural, y que nos permite concluir sobre la condición estructural de cada edificación.

Para obtener una perspectiva más precisa de la resistencia, del comportamiento y del nivel de daño de cada edificación, se propuso una metodología de análisis estructural que permite evaluar por desempeño a las viviendas afectadas por fenómenos de subsidencia, denominándola como “Análisis Pull-down”, para posteriormente cotejar los resultados obtenidos con la evaluación de la progresión de daños de una edificación seleccionada con daños de este tipo, y que fue ubicada sobre uno de los escarpes más grandes generados por la subsidencia en Jocotepec. Se evaluó tanto el comportamiento local de cada elemento estructural, así como el comportamiento global de toda la estructura, llegando a la conclusión de validar la aplicación de la metodología de análisis propuesta.

Debido a que los daños observados en las edificaciones y en las vialidades solo son una muestra de la gran problemática que se vive en la localidad, y que probablemente ha empezado a detonar otros problemas al resto de la población, en este trabajo se incluyen una serie de afectaciones económicas, sociales, políticas y ecológicas que vale la pena conocer y tomar en cuenta, para minimizar los impactos negativos del “progreso”, por lo tanto también se presentan algunas prospectivas que pueden ayudar a mitigar dichas consecuencias.

ABSTRACT

Water is a basic natural resource, very important to the future impact on the sustainability of the nations, and is used in various economic development activities of the regions. Therefore, it is necessary to know in detail some of the environmental, anthropic and economic problems resulting from the excessive use of this resource, including that from aquifers systems. Jocotepec, Jalisco, Mexico, represents a case of excessive

exploitation of ground water for domestic, agricultural and industrial uses, from deep or shallow aquifer levels, causing an acceleration in the consolidation and compaction of the silty-clayey layers, and displaying vertical deformation or subsidence that is causing damage to buildings, roads and urban facilities. Damage is currently detected as soil discontinuities such as faults, scarps or cracks, as well as damage to buildings that are within and outside the area of subsidence, ranging from minor in some structural elements, to severe where there has been the need to partially or completely demolish buildings, due to the high manifested structural vulnerability.

Some of the main supporting elements of buildings, such as walls or columns, are reaching ranges of plastic behavior with a noticeable loss in strength, and showing severe damage to its structural integrity. In addition to this, there is high vulnerability to earthquakes occurring in the area, even though they generally occur in low magnitude present potential risk to the strength of the bulidings in particular those already affected by subsidence. Although damages in some of the constructions have been repairing , the problem is latent and affects the ways of life of its inhabitants.

As described above, in this work was first necessary to identify and study the occurring phenomenology in the town of Jocotepec regarding the extraction of ground water and surface deformation. Then, significative damages in both roads and buildings were identified, and finally, the structural damage to some affected buildings was evaluated by identifying pathologies of damage, with a methodology that subjectively evaluates the damage level of each structural element, and allows to obtain a conclusion about the approximated structural condition of every building.

For a more accurate perspective of resistance, behavior and the level of damage of each building, a structural analysis methodology called “Pull-down analysis was implemented to further complement the evaluation of the damage progress of a selected affected building. This method is based on evaluating the structural performance of buildings affected by the subsidence, and applied on one of the most affected buildings. The local behavior of each structural element as well as the overall performance of the whole structure, allowed to validate the application of this proposed analytical methodology.

Because the damage seen in the buildings and roads is just a sample of the critical problem affecting the locality, which can potentially trigger widespread damage in the rest of the population, in this investigation are included a number of economic, social, political and ecological effects that are worth knowing and take into account, in order to minimize the negative impact of "progress".



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El crecimiento tan acelerado de la población mundial y de las ciudades, demanda grandes cantidades de recursos donde uno de los principales es el agua, ya que debido al afán de acercar el progreso a las sociedades, se modifica o se genera una deforestación masiva de los hábitats naturales, provocando con esto un desequilibrio ecológico que impacta de forma directa al ciclo hidrológico de las regiones. El agua es un recurso natural básico que se utiliza en diversas actividades del desarrollo económico de una localidad, y que además hoy en día tiene una importancia muy alta en el impacto a futuro en la sustentabilidad de las naciones, por lo tanto es necesario conocer a detalle un poco de la problemática ambiental, antrópica y económica que se ha generado en consecuencia de su uso inmoderado.

En ocasiones la explotación indiscriminada del recurso hídrico para usos domésticos, agropecuarios e industriales, desde niveles profundos o someros del suelo, presenta una aceleración en la consolidación y compactación de los estratos, que manifiestan a nivel superficial una deformación vertical o subsidencia, la cual genera daños de los elementos de soporte de las edificaciones, debido a que pierden o modifican la transmisibilidad de esfuerzos de la estructura a la cimentación, y de esta última al suelo. Diversas zonas urbanas del centro de la República Mexicana han experimentado deformación sobre sus suelos conformados por depósitos arcillosos que rellenan cuencas lacustres, y de acuerdo a estudios realizados se han determinado diversos tipos de subsidencia que ocurre a diferentes escalas. Algunas de estas ciudades son: la Ciudad de México (Ortega-Guerrero et al. 1999), Querétaro (Pacheco-Martínez et al. 2006), Morelia, San Luis Potosí, Aguascalientes (Zermeño-M et al. 2006), Celaya (Huizar-Álvarez et al. 2010), Guadalajara (Suárez-Plascencia et al. 2005), Salamanca, Abasolo, León e Irapuato. Además en México se han documentado varios casos de subsidencia y problemas relacionados como fracturamientos superficiales en estructuras, siendo algunos de los casos más reconocidos: Ciudad de México, (Rudolph y Frind, 1991; Ortega et al. 1993). Querétaro (Carreon-Freyre et al. 2005; Rojas et al. 2002; Pacheco et al. 2006), Aguascalientes (Pacheco et al. 2013; Zermeño de León, 2004), entre otros. En

muchos casos reconocidos, la subsidencia favorece la aparición de fracturas superficiales, las cuales algunas de ellas evolucionan hasta formar escarpes superficiales como el caso de Querétaro (Rojas et al, 2002). Generalmente el fracturamiento y fallamiento urbano superficial están ligados a la subsidencia, sobre todo cuando las variaciones horizontales estratigráficas resultan en subsidencia diferencial, esto es que una zona se desplaza más que otra muy cercana.

A pesar de que el fenómeno de subsidencia ha sido ampliamente estudiado en diversas ciudades del mundo, llama la atención el caso de la localidad de Jocotepec, Jalisco, población ubicada en la ribera occidental del Lago de Chapala, donde es evidente la subsidencia debido a la existencia de estratos muy gruesos limo-arcillosos y limo-arenosos que cuando reducen su nivel de humedad sufren un proceso de consolidación. Dichas variaciones y pérdida de humedad son en parte resultado del alto consumo de agua que se suministra a la Zona Metropolitana de Guadalajara, por los cambios en la precipitación durante el temporal de lluvias, y por la gran demanda de dicho líquido para la agricultura en las zonas aledañas, la cual ha tenido desde hace 20 años aproximadamente un auge importante en la periferia del Lago de Chapala, por lo que no se logra un reabastecimiento rápido de los acuíferos y acuitardos del Lago.

De acuerdo a mediciones realizadas en la superficie de la localidad de Jocotepec (Hernandez-Marín et al, 2014), se asume que las fallas que han aparecido en el suelo tienen un origen hidrodinámico, por lo que es posible generar la hipótesis que la pérdida de la presión de poro del agua debido a la reducción acelerada del nivel piezométrico, está impactando directamente a las edificaciones desplantadas en dichos lugares, provocando entonces asentamientos diferenciales en sus principales elementos de soporte, tales como muros o columnas, algunos de los cuales están incursionando en rangos de comportamiento plástico con una notoria pérdida en resistencia y mostrando daños muy fuertes en su integridad estructural. Los daños detectados actualmente se muestran como discontinuidades del suelo, tales como fallas, escarpes o fisuras que afectan a la infraestructura urbana, así también como daños en las edificaciones que se encuentran dentro y al margen de la zona de subsidencia, que van desde ligeros en algunos elementos estructurales, hasta severos en los que ha habido la necesidad de demoler parcial o totalmente las construcciones, debido a la alta vulnerabilidad estructural

que manifiestan y a que serían muy costosas e inconvenientes sus reparaciones.

Por lo anterior parte de la población se siente insegura dentro de sus casas, porque con el paso del tiempo han aparecido grietas en muros, pisos y techos, aunado a la vulnerabilidad ante sismos que ocurren en la zona, que aunque han sido de baja magnitud presentan un riesgo potencial a la resistencia de las casas; además para el total de la población, ha sido evidente que aunque se han reparado las vialidades dañadas debido a escalonamientos del suelo, el problema está latente, lo cual afecta las formas de vida de los habitantes de la localidad. Por lo tanto es necesario identificar y estudiar si los daños estructurales en las viviendas de la localidad de Jocotepec, se deben a fenómenos antrópicos como lo podrían ser la extracción del agua subterránea, a la composición estratigráfica del suelo y sus heterogeneidades, a la mala calidad de los materiales utilizados en la construcción, a los procesos constructivos inadecuados, o al mal diseño de casas y vialidades. Esto con la finalidad también de elaborar una metodología que sirva para evaluar por desempeño estructural a las viviendas afectadas por fenómenos de subsidencia.

A consecuencia de que la problemática presentada en la localidad tiene una connotación de afectación social, perfectamente encaja en los objetivos del programa del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, y a través de la aportación técnica de las diversas áreas de la Ingeniería Civil, tales como la hidrología, hidráulica, topografía, mecánica de suelos, comportamiento y diseño estructural, entre otras más, se pueden observar, comprender, calificar y resolver desde un enfoque físico-matemático las causas y consecuencias de dichos fenómenos, y su impacto en la población afectada. Por lo tanto, el impacto económico, ambiental, político y social que se está generando en la localidad de Jocotepec, Jalisco, es trascendental para los habitantes de toda la ribera del lago de Chapala y también para los de la Zona Metropolitana de Guadalajara, por su cercanía al lugar y por su directa dependencia al abastecerse del agua potable del lago.

1.1. OBJETIVOS

Debido a los daños por subsidencia diferencial, a sus agrietamientos asociados, y a la incapacidad que pueden presentar algunas viviendas de la población de Jocotepec para soportar los asentamientos diferenciales generados, el objetivo general de este trabajo es evaluar las patologías y desempeño estructural de las edificaciones de esa localidad, a través de los siguientes objetivos particulares:

- Validar matemáticamente los diagnósticos de patologías estructurales en edificaciones.
- Proponer una metodología que permita conocer el desempeño estructural de edificaciones de mampostería y concreto afectadas por tal fenómeno.

Dichos objetivos se cumplieron de acuerdo a las siguientes actividades:

- Estudiar la génesis del fenómeno de subsidencia que está ocurriendo en dicha localidad.
- Medir y cuantificar los niveles de deformación del suelo.
- Detectar las zonas de fallas por subsidencia.
- Ubicar e identificar las edificaciones dañadas por tal fenómeno.
- Diagnosticar las patologías estructurales de sus principales elementos.
- Identificar las zonas donde se ubican las viviendas dañadas por subsidencia.
- Monitorizar una edificación dañada de Jocotepec para correlacionar su comportamiento de daños ante el fenómeno de subsidencia, con la metodología propuesta de análisis por desempeño estructural.
- Elaborar diversos análisis estructurales de la edificación seleccionada, con variantes en los materiales constituyentes de sus apoyos y proponiendo diversos asentamientos diferenciales en sus muros, para detectar su comportamiento y desempeño.
- Detectar el impacto en las viviendas y en el desarrollo económico del municipio de Jocotepec, debido a un uso no sustentable del agua.

1.2. METODOLOGÍA EMPLEADA

Como primer abordaje al tema de subsidencia y para comprender la fenomenología que comprende dicho tema, se enuncian sus tipos desde dos puntos de vista, el primero en función de su genética y el segundo en función de los mecanismos que las desencadenan, también se describen las causas que la generan, así como los métodos para medir las velocidades y magnitudes de desplazamientos; asimismo se muestran algunos ejemplos de subsidencia y fracturamiento en cuencas vulcano lacustres. Todo lo anterior a través de la recopilación y selección de información de investigaciones precedentes y en la literatura científica disponible en bibliotecas digitales.

Para medir y evaluar la subsidencia en la localidad de Jocotepec, se monitorizaron las deformaciones de la superficie a través de un método topográfico convencional de nivelación, teniendo como referencia una malla reticular de 15 puntos y haciendo tres mediciones diferentes durante 7 meses en el año 2012.

A través de la exploración directa en las vialidades y en las edificaciones de toda la localidad de Jocotepec, además de la información obtenida en dependencias gubernamentales, de Protección Civil, y de la Comisión Nacional del Agua, se pudo conocer el censo de pozos de agua y varios registros hidrológicos que sirvieron para elaborar el análisis de deformación superficial del suelo, así como conocer y ubicar las zonas de daño de las construcciones afectadas por la subsidencia.

Para cuantificar y conocer las patologías de daños en las edificaciones afectadas por subsidencia, se censaron 44 inmuebles seleccionados de forma aleatoria pero que permitieron delinear las alineaciones de daños a edificaciones en la localidad, con una metodología que califica su índice de Estado de Condición Estructural, y que a su vez nos permite conocer el nivel de daño de la construcción, así como para valorar la conveniencia o no de realizar trabajos de reforzamiento en función del costo y recuperación de la edificación; los resultados a esos índices fueron analizados estadísticamente para validar matemáticamente dicho estudio.

Para evaluar las edificaciones dañadas por subsidencia de forma analítica y matemática, y ya no de forma subjetiva como regularmente se han analizado con otros métodos de evaluación de patologías y daños estructurales, se propuso realizar algunas modificaciones a un método de análisis por desempeño estructural que actualmente se utiliza en países desarrollados y que se le conoce como Push-over, para implementar una metodología también de análisis estructural por desempeño, a la que le denominamos Pull-down, la cual solo presenta dos variantes respecto a la del método Push-over, la primera es la de asignar asentamientos diferenciales en algunos nudos de apoyo donde se esté presentando la deformación en la edificación, y la segunda en vez de monitorizar las deformaciones horizontales de azotea que se obtienen con el análisis Push-over, se monitorizarán las deformaciones verticales que se generen en los nudos de control en los apoyos de la estructura, también seleccionados anticipadamente para detectar la evolución de los asentamientos. Para llevar a cabo el análisis estructural por desempeño "Pull-down", se seleccionó una edificación que está ubicada al borde de uno de los alineamientos de daños encontrados en la localidad de Jocotepec, y que está sufriendo el fenómeno de subsidencia de forma muy notoria.

Con la finalidad de cotejar el análisis por desempeño propuesto para evaluar edificaciones dañadas por subsidencia, se instrumentó la vivienda seleccionada con la ubicación de testigos y puntos de control, y se midieron los desplazamientos de los agrietamientos de sus muros, así como los desplazamientos del suelo en dicha construcción durante 6 meses de monitorización, a través esto último del sistema GPS diferencial. Una vez obtenidas las mediciones, se cotejaron los daños en la edificación con el análisis por desempeño Pull-down para ver la practicidad de ese método.

A través de la recopilación de información proveniente de dependencias gubernamentales, así como de organismos reguladores del medio ambiente y de la información generada durante esta investigación, se realizó un análisis que permite conocer el impacto que se ha generado en las viviendas y en el desarrollo económico del municipio de Jocotepec, Jalisco, debido a un uso no sustentable del agua, como principal causante de los daños en infraestructura y equipamiento urbano, así como en algunas edificaciones de la población actual.

1.3. PLAN DE TRABAJO DESARROLLADO

El presente trabajo se desarrolló en las siguientes etapas:

1. RECOPILACIÓN:

- Organización y estudio de información relacionada con los temas (Estado del Arte y del Conocimiento).
- Adquisición, análisis y modelado de datos de deformaciones del suelo y de registros de pozos de agua en la localidad de Jocotepec.

2. TRABAJO DE CAMPO:

- Monitorización del fenómeno de subsidencia en toda la localidad de Jocotepec durante 7 meses.
- Exploración directa en campo de las fallas en la infraestructura urbana y de los daños en las edificaciones.
- Censos detallados a 44 edificaciones para detectar sus patologías de daños y para determinar sus índices de Estado de Condición Estructural.
- Elaboración de levantamientos arquitectónicos y estructurales a edificaciones dañadas por subsidencia y que sirvieron para analizarlas por desempeño.
- Instrumentación en dos edificaciones afectadas por subsidencia para evaluar sus daños en función de la ocurrencia del fenómeno.
- Medición de desplazamientos locales en agrietamientos de muros y de los desplazamientos globales de la edificación durante 6 meses.

3. TRABAJO DE LABORATORIO/CÓMPUTO/GABINETE:

- Elaboración de modelos conceptuales y sintéticos del fenómeno de subsidencia en Jocotepec.
- Elaboración de análisis estadísticos de los censos elaborados a edificaciones dañadas.
- Elaboración y simulación de modelos matemáticos en software especializado, para realizar los análisis estructurales por desempeño.
- Calibración de los modelos propuestos.

- Correlación matemática de los daños encontrados en la edificación, a través de la comparación con los modelos estructurales elaborados.



CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL POR SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO

2.1. INTRODUCCIÓN

Debido, en ocasiones, a la explotación indiscriminada del recurso hídrico para usos domésticos, agropecuarios e industriales, desde niveles profundos o someros del suelo, se presenta una aceleración en la consolidación y compactación de los estratos, que manifiestan a nivel superficial una deformación vertical o subsidencia, la cual se refleja en la ocurrencia de daños de los elementos de soporte de las edificaciones, debido a que pierden o modifican la transmisibilidad de esfuerzos de la estructura a la cimentación, y de esta última al suelo de soporte.

Diversas zonas urbanas del centro de la República Mexicana han experimentado fracturamiento sobre sus suelos conformados por depósitos arcillosos que rellenan cuencas lacustres, y de acuerdo a estudios realizados se han determinado diversos tipos de fracturamiento que ocurren a diferentes escalas. Algunas de estas ciudades son: la Ciudad de México (Ortega-Guerrero et al. 1999), Querétaro (Pacheco-Martínez et al. 2006), Morelia, San Luis Potosí, Aguascalientes (Zermeño-M et al. 2006), Celaya (Huizar-Álvarez et al. 2010), Guadalajara (Suárez-Plascencia et al. 2005), Salamanca, Abasco, León e Irapuato. La mayoría de estas ciudades se encuentran sobre planicies horizontales, que son el resultado de cuencas endorreicas (áreas en las que el agua no tiene salida fluvial hacia el mar) rellenas con materiales sedimentarios fluvio-lacustres altamente heterogéneos en composición y estructura; y en la mayoría de los casos también de materiales volcánicos (principalmente lavas y materiales piroclásticos).

Existen varios factores que contribuyen a la formación del fracturamiento superficial, nombrando entre ellos: la variación en la compresibilidad de los sedimentos por heterogeneidades en la secuencia estratigráfica, que provoca deformaciones diferenciales y la extracción del agua subterránea que subyace a las secuencias lacustres generando la disminución de la presión de poro, así como variaciones en la configuración

del basamento que resulta en espesores variables de los sedimentos consolidables. La compresibilidad depende de la consolidación, o sea a la expulsión de agua intersticial, dando por consecuencia la reducción de volumen y la subsidencia del terreno. Aunque la mayor reducción volumétrica se da en el sentido vertical, para los suelos limo-arcillosos encontrados en el lugar, se generan esfuerzos de tensiones verticales y horizontales.

En muchos casos reconocidos, la subsidencia favorece la aparición de fracturas superficiales, las cuales algunas de ellas evolucionan hasta formar escarpes superficiales como el caso de Querétaro (Rojas et al, 2002). Generalmente el fracturamiento y fallamiento urbano superficial están ligados a la subsidencia, sobre todo cuando las variaciones horizontales estratigráficas resultan en subsidencia diferencial, esto es, que una zona se desplaza más que otra muy cercana. En el país se han documentado varios casos de subsidencia y problemas relacionados como fracturamientos superficiales en estructuras, siendo algunos de los casos más reconocidos: Ciudad de México, (Rudolph y Frind, 1991; Ortega et al, 1993). Querétaro (Carreon-Freyre et al. 2005; Rojas et al. 2002; Pacheco et al. 2006), Aguascalientes (Zermeño de León, 2004), entre otros.

En estudios realizados se ha detectado que uno de los principales mecanismos activadores de la subsidencia es la extracción excesiva de agua subterránea (Poland, 1984; Rudolph y Frind, 1991; Ortega et al., 1999). De acuerdo a la teoría de consolidación desarrollada por Terzaghi (1925), el factor principal que propicia la consolidación de acuitardos es la reducción de la presión de poro, lo que trae como consecuencia un aumento del esfuerzo soportado por las partículas sólidas (esfuerzo efectivo), y una subsecuente reducción de volumen del acuitardo. Lambe y Whitman (1969) describieron al proceso de consolidación como una variación gradual en la forma de soportar una carga entre las fases sólida e intersticial de una masa de sedimentos (suelo), misma que conlleva a un proceso de expulsión gradual de agua de poro y reacomodo de partículas sólidas, resultando finalmente en una pérdida de volumen y en subsidencia. En particular, el trabajo de Poland (1984) ha sido fundamental para el establecimiento de la relación cuantitativa entre la subsidencia y el abatimiento piezométrico, a través de la medición de la compresibilidad de los materiales en campo y en laboratorio. En resumen, se puede asumir, que el conjunto de factores que van desde los esfuerzos propiciadores de subsidencia, como las características hidroestratigráficas, que probablemente incluyan

acuíferos de los que se extrae el agua subterránea, y acuitardos que son los que se deforman más, se conjugan para crear las condiciones ideales para que la subsidencia tenga lugar, provocando en ocasiones fallas en el suelo en forma de escarpes o grietas que pueden medir hasta varios cientos de metros de profundidad y de longitud.

En esencia, es posible asumir que las fisuras en la tierra tienen dos posibles orígenes: uno es de la componente del control tectónico y el otro del tipo de hidrodinámica. Es posible postular la hipótesis que la pérdida de la presión de poro del agua debido a la reducción acelerada del nivel potenciométrico se mueve a través de las zonas correspondientes a áreas de falla pre-existentes. Esto permite alcanzar zonas permeables (pseudocanales) donde el agua y los sedimentos (limos, arcillas) pueden descender. Donde el área de debilidad pre-existente corresponde a una zona de falla o a la fisura de la tierra, la resultante será un agrietamiento en la tierra.

2.2. TIPOS DE SUBSIDENCIA

La subsidencia o hundimiento se refiere al descenso vertical por deformación de la superficie del suelo. Este problema se ha agudizado en varias zonas urbanas del interior del país sobre todo en poblaciones localizadas sobre valles lacustres o por resultado de depósitos sedimentarios, y es sumamente reconocido dentro del país como una de las causas de fallas en estructuras, sobre todo de vivienda.

Actualmente se han identificado algunos de los principales factores que una vez combinados favorecen al desarrollo de la subsidencia (Burbey, 2002), siendo los principales:

- a) Estratigrafía compuesta alternada de acuíferos y acuitardos.
- b) Acuitardos con importante espesor agregado en la secuencia estratigráfica en comparación con el espesor agregado de acuíferos.
- c) Acuitardos compuestos principalmente por suelos de media a alta compresibilidad.
- d) Sobreexplotación diferenciada de acuíferos.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- e) No determinante pero si importante: la presencia de esfuerzos por deslizamiento de masa de suelo y de origen tectónico, que eventualmente acentúan el esfuerzo inducido por bombeo de agua subterránea.
 - f) Erosión subterránea.
 - g) Formación de oquedades por disolución de rocas carbonatadas.
 - h) Túneles preexistentes.

2.2.1. Genético o general (Prokopovich, 1979).

- a) Subsidencia exógena: se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos.
- b) Subsidencia endógena: hace referencia a aquellos movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc.

2.2.2. Según el mecanismo desencadenante (Scott, 1979).

- a) Por disolución subterránea en sal, yeso o rocas carbonáticas: debido a la gran solubilidad de estos materiales en agua, en determinadas condiciones pueden llegar a formar sistemas de huecos interconectados, y que en circunstancias extremas, provocan el hundimiento del terreno en determinadas zonas.
- b) Minera, por obras mineras o construcción de galerías subterráneas: consiste en el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de galerías, generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles, respectivamente cuando los terrenos colindantes intentan ocupar el suelo del vacío generado.
- c) Por erosión subterránea: también conocido como "tubificación" o "piping", se produce por un proceso mecánico de arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterránea. El agua, en su recorrido horizontal por el terreno, moviliza partículas de suelo generando una serie de canales que pueden desencadenar colapsos del terreno.
- d) Por flujo lateral: En torno a diversas formaciones evaporíticas se producen fenómenos de subsidencia asociados a la actividad diapírica. Este tipo de

fenómenos de flujo lateral se ha observado en materiales arcillosos intercalados entre materiales más competentes como pizarras.

e) Por compactación: Se divide a su vez según la causa de este proceso en:

Vibraciones: Las vibraciones producidas por los terremotos, explosiones u otras causas pueden causar la densificación de terrenos granulares sueltos por reajuste de partículas al alcanzar este una estructura más compacta.

Carga: La acumulación natural sucesiva de sedimentos o determinados tipos de cimentaciones pueden ocasionar la consolidación del terreno como consecuencia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones. Esta subsidencia se produce por una reducción gradual de los huecos del suelo.

Extracción de fluidos: Puede causar importantes valores de subsidencia como consecuencia del cierre gradual de los huecos rellenos por el fluido extraído. Este tipo de hundimiento afecta a grandes ciudades como México DF, Valle de san Joaquín (EEUU), Tokio (Japón), Pekín (China), etc...

Hidrocompactación: Este fenómeno consiste en el asentamiento que se produce en determinados tipos de suelos, con un bajo contenido de humedad y situados sobre el nivel freático, al ser saturados. La presencia de agua puede causar dos tipos de efectos en este tipo de suelos, la disolución de los enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares que en ambos casos sostienen las partículas de suelo para configurar su estructura.

Tectónica: Los descensos de la superficie terrestre producidos por las fallas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica. Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia.

Bombeo de pozos: Se da cuando se bombea de los pozos el agua a mayor velocidad de lo que pueden reemplazarla los procesos de recarga natural. Sobre todo en zonas con estratos potentes de sedimentos no consolidados, donde la presión del agua al extraerle disminuye, y el peso de la sobrecarga se trasmite al sedimento, compactando los granos y hundiendo el terreno.

2.3. CAUSAS QUE GENERAN LA SUBSIDENCIA

Existen diferentes causas que generan la subsidencia, que van desde causas naturales hasta causas antrópicas (González Vallejo et al., 2002). En el caso de las causas naturales la subsidencia se genera con la licuefacción y colapso de los suelos, con la variación de la presión de poro del agua al fluir o drenarse, por las variaciones volumétricas de los suelos donde predominan las arcillas expansivas, por la desgasificación de grandes depósitos subterráneos de gases o hidrocarburos, o por movimientos isostáticos de las placas tectónicas; y entre las causas antrópicas por la presión generada por cimentaciones de edificaciones diversas. A continuación se enuncian de forma detallada cada una de ellas.

2.3.1. Licuefacción

Consiste en la pérdida de consistencia del suelo, de manera temporal, debido a una redistribución de las partículas del terreno y del agua que contiene. Suele deberse a movimientos sísmicos y actividad antrópica. La licuefacción tiene lugar en los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua. El sedimento cae hacia abajo por su propio peso y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

Hay varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

- a) **Flujos de tierra:** los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.
- b) **Flujo lateral:** es el desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes de ríos.
- c) **Flotación:** objetos enterrados menos pesados que el suelo licuado desplazado, como tanques, buzones o tuberías de gravedad, ascienden a través del suelo y flotan en la superficie.
- d) **Pérdida de resistencia de soporte:** reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante que puede hacer que las estructuras se hundan.

Los factores que aumentan la probabilidad de que el terreno se comporte como un líquido son varios:

- a) **Distribución del tamaño de los granos:** La arena uniformemente graduada, con granos pocos finos o muy gruesos (arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo cargas muy severas.
- b) **Profundidad de las aguas subterráneas:** Puede ocurrir licuefacción si existe agua subterránea. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra densificación. Por lo tanto mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- c) **Densidad:** La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Se produce una acumulación gradual de la presión de poros dentro del depósito de suelo, en deterioro de los esfuerzos efectivos, tal que si el número de aplicaciones de carga resulta suficiente, los esfuerzos efectivos se anulan, quedando el suelo licuado y transformado en un pantano. Después del proceso y cuando las presiones de poros se han disipado el suelo volverá a su condición hidrostática sufriendo densificación por reacomodo de su estructura (el pantano se vuelve tierra firme y se asienta). Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.
- d) **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo:** Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 30 pies (9 metros); rara vez ocurre a profundidades mayores de 50 pies (15 metros).
- e) **Amplitud y duración de la vibración del terreno:** La capacidad del suelo para resistir una vibración sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir, ya sea cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- f) **Edad del depósito:** Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo).
 - g) **Origen del suelo:** El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. Similar a lo que sucede en los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común de décadas pasadas era la colocación de los rellenos hidráulicamente. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

Acciones ante la licuefacción:

- a) Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.
- b) Estabilizar el material licuable.
- c) Colocar los cimientos por debajo del material licuable.
- d) Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral.
- e) Usar material flexible al movimiento.

2.3.2. Cimentación

La acumulación natural sucesiva de sedimentos o determinados tipos de cimentaciones pueden ocasionar la consolidación del terreno como consecuencia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones. Esta subsidencia se produce por una reducción gradual de los huecos del suelo.

2.3.3. Colapsos

Se entiende por procesos de colapso o hundimiento la caída de las masas de rocas suprayacentes a una cavidad subterránea de origen natural o antrópico, con o sin resultados visibles en la superficie. Estos desprendimientos suelen deberse a la superación del límite de resistencia de las capas superiores, pero también pueden estar causados por reajustes isostáticos, por la pérdida de la humedad subterránea, ya que el

agua favorece la resistencia a la presión de los materiales; por movimientos tectónicos o por cambios en la superficie, como la construcción de estructuras (edificaciones, cimientos, etc.) o enterramientos repentinos por aluviones o coladas de barro. Las cavidades de origen natural suelen estar en formaciones carbonáticas de tipo kárstico en las cuales los colapsos se suelen producir por la disolución de las rocas hasta el punto de que éstas terminan por desprenderse relleno la cavidad. Si éstas se sitúan cerca de la superficie, se pueden formar dolinas. También son importantes las cavidades en formaciones evaporíticas, que al ser más solubles que el carbonato, crean hundimientos más lentos y no suelen producir colapsos en las cavidades por este motivo. Por último, cabe destacar las cavidades en formaciones volcánicas producidas por la solidificación diferencial de las lavas, que suelen tener formas tubulares. Estas pueden suponer un riesgo durante la construcción de edificios ya que los cimientos pueden abrir planos de rotura por los que colapse.

2.3.4. Variaciones en el nivel freático o en líquidos subterráneos

Durante la sedimentación, y durante el proceso de litificación el agua queda atrapada entre las partículas de las capas sólidas (poros), produciendo la cementación de algunos componentes o la disolución de otros. En ocasiones, esta agua puede llegar a ser tan abundante como para considerar a la capa como un sólido en suspensión. Lo normal es que a medida que la sedimentación de capas evoluciona, la presión en el interior, produzca la compresibilidad de la roca y la reducción de los poros, por lo que el líquido contenido aumenta drásticamente su presión y tiende a ser desalojado hacia zonas con menor presión. Pero si existe una capa impermeable al líquido, este se acumula produciendo una sobrerresistencia a la presión de las capas de materiales. Debido a esfuerzos tectónicos, planos de rotura o fallas, es posible que el líquido sea desalojado eliminando la resistencia de origen hídrico de la capa y produciendo su compresión, con lo que se reducirá su volumen y se producirá el fenómeno de la subsidencia. Otro caso es que la extracción de recursos hídricos o de hidrocarburos acelere enormemente este proceso o sea su detonante, lo cual causa graves riesgos a las construcciones superficiales en una zona más o menos extensa alrededor.

2.3.5. Arcillas expansivas

Algunas rocas de carácter limo-arcillosas sufren una importante variación de volumen al cambiar de un estado hidratado a uno deshidratado. Esta variación es claramente apreciable en las zonas húmedas que cuando se resecan producen un cuarteamiento de la capa arcillosa al disminuir dramáticamente su volumen. Este mismo principio es aplicable en las capas de arcillas que, al hidratarse, aumentan de volumen y producen una ascensión de todo el terreno que puede llegar a ser muy importante. Cuando el nivel freático baja o las arcillas se deshidratan reducen su volumen y el terreno desciende rápidamente. Por lo tanto, dichos terrenos suelen estar sujetos a ciclos de ascensión y depresión según el régimen de lluvias, lo que conlleva un importante riesgo para los cimientos de las construcciones superiores.

2.3.6. Desgasificación

En ocasiones grandes cantidades de metano quedan atrapadas en el interior de la tierra al no poder salir a la superficie debido a la existencia de capas muy compactas que actúan de trampa. Estos depósitos suelen provenir de formaciones de origen orgánico como petróleo o carbón. Este gas suele estar a una gran presión, lo que permite su salida de forma muy rápida y en ocasiones violenta a través de fallas o diaclasas. Otro tipo de salida de grandes depósitos de gas metano es aquella que se produce cuando el gas está atrapado debajo del permafrost de las tundras que, al fundirse este, sale produciendo la subsidencia del terreno y campos de dolinas. Por último, cabe destacar la importancia de los incendios de carbón subterráneo que se producen en las zonas de turba o pantanosas al deshidratarse. De este modo el oxígeno penetra y comienza a reaccionar de forma espontánea con el carbón produciéndose su gasificación en CO₂ que sale a la superficie formando dolinas o grietas.

2.3.7. Movimientos isostáticos sobre presión

La presencia de la astenósfera, una capa fluida y viscosa bajo la corteza, permite que la acumulación excesiva de material en determinadas zonas de la misma se vea compensada por un desalojo de material desde la astenósfera hacia las zonas de menor

presión. Esto da lugar al hundimiento de ciertas zonas de la corteza (subsistencia). Al mismo tiempo, cuando el material que ejercía el sobrepeso desaparece, la corteza tiende a recuperar su posición inicial, sufriendo una elevación continua y progresiva. Son los movimientos isostáticos. La subsistencia es la única explicación posible a la acumulación de kilómetros de espesores de sedimentos en las grandes cuencas sedimentarias que dieron lugar a las grandes cordilleras actuales. Por otra parte, la erosión de estas cordilleras, y, por tanto, la descarga de peso que ello representa, produce una elevación constante en estas cordilleras, que altera el balance de la erosión. Un ejemplo más claro de los reajustes isostáticos son las elevaciones actuales que sufren algunas regiones que estuvieron cubiertas por glaciares durante la última glaciación. Se produjo una subsistencia, debido al peso del hielo, y ahora, una vez desaparecido, están recuperando su posición.

2.4. MÉTODOS PARA MEDIR LAS VELOCIDADES Y MAGNITUDES DE DESPLAZAMIENTO Y LOS MECANISMOS GENERADOS POR LA SUBSISTENCIA

Los métodos para medir la subsistencia y los movimientos de ladera tienen por finalidad determinar la extensión de la zona afectada, las velocidades de desplazamiento o asentamiento, los mecanismos que rigen el fenómeno, los instantes críticos de rotura o aceleración, así como evaluar la efectividad de las medidas de corrección que se hayan adoptado. Dichos métodos también pueden servir para estimar los desplazamientos relativos entre dos cuerpos, los movimientos absolutos, las inclinaciones, los desplazamientos en una dirección, los movimientos en profundidad, etc. (Tomás R. et al, 2005). Utilizando la Ingeniería Cartográfica, se pueden diferenciar cuatro métodos de medida de las deformaciones de la superficie terrestre: métodos topográficos convencionales, métodos geodésicos, métodos fotogramétricos y métodos de teledetección, que a continuación se describen detalladamente.

2.4.1. Métodos topográficos convencionales

Bajo este término se engloban todas aquellas técnicas propias de la Cartografía clásica terrestre. Hasta hace relativamente poco tiempo constituían el único sistema válido

y eficaz para llevar a cabo la medida de deformaciones de la superficie terrestre sin cometer grandes errores. Se fundamenta en la medida de las variaciones de las coordenadas de una serie de puntos durante un determinado intervalo de tiempo. Para ello se repiten varias veces y en diferentes instantes las medidas de las coordenadas (-X, -Y, -Z) de los puntos de control, para entonces determinar si se ha producido o no alguna variación en cualquiera de las tres direcciones del sistema de referencia. Las lecturas de estos puntos de control suelen realizarse desde unos puntos de coordenadas conocidas denominadas bases topográficas y que permanecen fijas durante todo el periodo de la monitorización. Los métodos topográficos pueden clasificarse en dos grandes grupos: altimétricos y planimétricos. Otro método utilizado en el estudio de fenómenos de inestabilidad de laderas es el de medición de distancias reales, cuya finalidad es determinar la variación de la distancia existente entre el punto de control y la base de referencia (Fig. 2.1). Las principales características de cada una de estas técnicas se resumen en la Tabla 2.1.

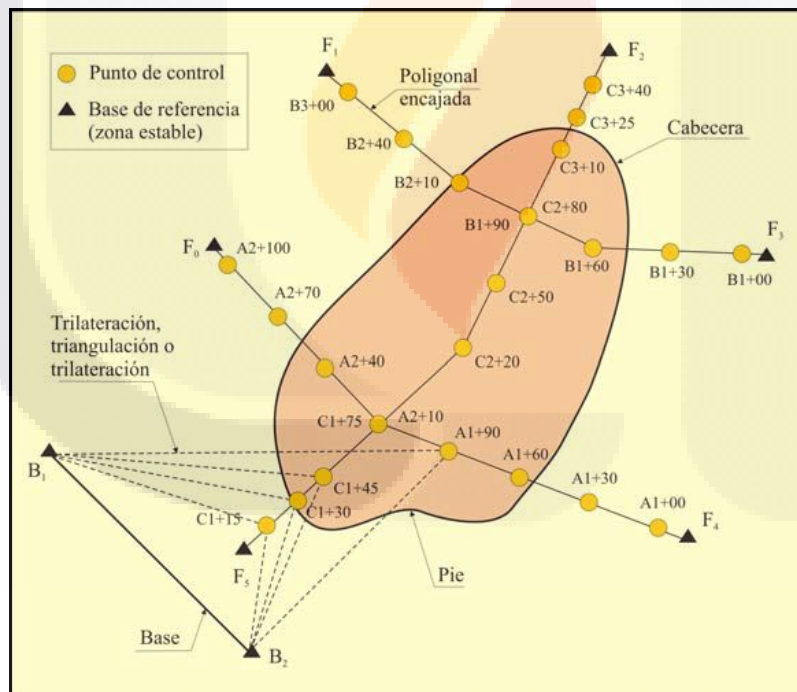


Fig. 2.1 Seguimiento topográfico de un movimiento de ladera (de Tomás R. et al, 2005)

Tabla 2.1 Características de las técnicas topográficas clásicas (de Tomás R. et al, 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Nivelación trigonométrica o por pendientes	Variación de la altitud	dZ	Variable	20 mm
Nivelación geométrica o por alturas	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 1 mm/Km
Nivelación geométrica de precisión	Variación de la altitud	dZ	Variable	± 0.1 mm/Km
Triangulación topográfica	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	< 300-1000 m	5-10 mm
Itinerario topográfico (Poligonal)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	5-10 mm
Distanciómetro electroóptico (MED)	Desplazamiento de blancos móviles	dD	1-10 Km	7 mm ± 1-5 ppm

2.4.2. Métodos geodésicos

La Geodesia permite determinar las coordenadas de la proyección de los puntos sobre la superficie terrestre, así como la altura sobre el nivel del mar (geoide) o de forma más precisa una superficie arbitraria que sirve de fundamento para el cálculo de los puntos geodésicos, que recibe el nombre de elipsoide de referencia. Las principales técnicas geodésicas empleadas en el estudio de las deformaciones de la superficie terrestre son: los Sistemas de Posicionamiento Global (*Global Positioning Systems, GPS*), la Determinación de Órbitas y Radioposicionamiento Integrado por Satélite (*Determination d'Orbites et Radio-Positionnement Intégrés par Satellite, DORIS*) y la Telemetría de Láser por Scanner (*Scanner Laser Ranging SLR*).

El sistema de posicionamiento global por satélite convencional (**GPS, Global Positioning System**) configura un sistema de radiolocalización desde el espacio con una constelación de satélites. Los satélites que conforman el sistema suministran información tridimensional de la posición durante las 24 horas del día en cualquier parte de la superficie terrestre. El número y posición orbital de los satélites asegura la coexistencia de cuatro satélites, como mínimo, que nos proporcionan la posición del receptor (longitud, latitud y altitud) y el tiempo. El sistema *GPS* diferencial (**DGPS, Differential Global Positioning System**) permite incrementar la precisión conseguida con el *GPS* convencional. Éste sistema hace uso de una estación de referencia situada en tierra y de posición conocida para calcular y corregir los errores sistemáticos que suelen producirse en la determinación del movimiento del punto de control. Los sistemas *GPS* han sido utilizados en numerosas ocasiones con éxito en la monitorización de fenómenos de subsidencia y movimientos de ladera.

El sistema **DORIS** (*Determination d'Orbites et Radio-Positionnement Intégrés par Satellite*) ha sido desarrollado por el *Centre National d'Études Spatiales*, el *Institut Géographique Nationale* y el *Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*. El sistema está constituido por un conjunto de instrumentos situados en los satélites (Fig. 2.2), una red terrestre de radiobalizas (puntos geodésicos de control) y un centro de control y tratamiento de datos capaz de restituir con gran precisión la órbita de los satélites así como la posición de las balizas terrestres. El sistema se basa en la medida a bordo de los satélites del efecto Doppler producido sobre las señales de radio emitidas por las balizas en tierra. Las radiobalizas conforman una densa malla a nivel mundial, instalándose para atender las diferentes necesidades de los usuarios. El sistema permite localizar con gran precisión la posición de las radiobalizas situada sobre el punto cuya deformación se pretende evaluar. Este sistema ha sido utilizado en la medida de deformaciones de la corteza terrestre y la evaluación de variaciones verticales estacionales del suelo.

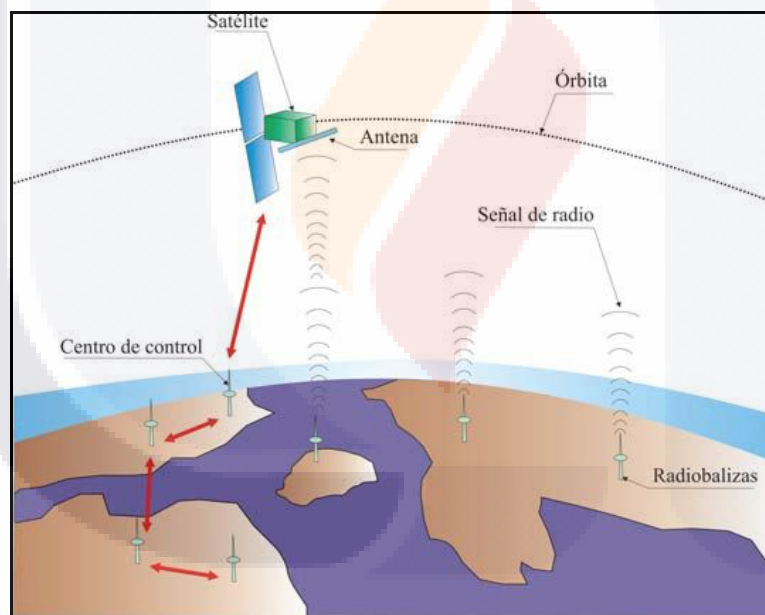


Fig. 2.2 Esquema de funcionamiento del sistema DORIS (de Tomás R. et al, 2005)

La Telemetría de Láser por Scanner (SLR, Scanner Laser Ranging) es una técnica geodésica utilizada en la medición de la distancia existente entre una estación de rayos láser situada en tierra y un satélite en órbita equipado con retroreflectores. La existencia de un gran número de estaciones láser terrestre distribuidas por todo el mundo permite determinar la posición precisa de la órbita del satélite. El rastreo de satélites durante

periodos de tiempo de varios años proporciona la distancia entre estaciones láser con precisión milimétrica. Ésta técnica ha sido utilizada satisfactoriamente en el estudio de deformaciones de la corteza terrestre y la detección y vigilancia de la recuperación y asentamiento posglacial del suelo entre otros. En la Tabla 2.2 se resumen las características principales de los métodos geodésicos de medida de la deformación de la superficie terrestre.

Tabla 2.2 Características de los métodos geodésicos (de Tomás R. et al, 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Convencional Global Positioning System (CGPS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ		1-2 mm
Differential Global Positioning System (DGPS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Baseline < 20 Km	1 mm
Determination d'Orbites et Radio-Positionnement Intégrés par Satellite (DORIS)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	2 mm
Telemetría de láser por satélite (SRL)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	<1 cm

2.4.3. Métodos fotogramétricos

La fotogrametría es una técnica donde se obtienen las tres dimensiones de una escena a partir de pares de fotografías de la misma, denominados fotogramas, tomadas bajo diferentes ángulos. Existen tres métodos fotogramétricos. El primero de ellos es la fotogrametría terrestre, en la que, como su nombre indica, los pares de fotogramas se obtienen desde tierra estacionando el instrumental a distancias inferiores a 200 metros de la zona a restituir, proporcionando una precisión de hasta 40 mm. Este sistema es más apropiado para el estudio de fenómenos de pequeña envergadura que ocupan áreas reducidas. La fotogrametría aérea constituye el segundo método fotogramétrico. A diferencia del anterior, la cámara se sitúa sobre una plataforma aérea (avión o helicóptero), siendo la altura de vuelo inferior a 500 metros. La precisión obtenida con la fotogrametría aérea es de unos 100 mm, barriendo amplias áreas. El procesado de las imágenes permite construir un modelo digital del terreno (MDT) de la zona de interés. La comparación de los MDTs obtenidos en diferentes intervalos de tiempo a través de la fotogrametría, permite comparar los cambios superficiales que se han producido en la zona. La principal ventaja de la fotogrametría es que permite obtener una visión global de la zona deformada y no sólo de algunos puntos de la misma, tal y como ocurre con otros métodos de control de deformaciones. La fotogrametría satelital se basa en los mismos principios que la aérea. La diferencia radica en que las imágenes estereoscópicas son

adquiridas desde una plataforma espacial. Hasta el momento las precisiones conseguidas son bajas. No obstante, la mejora de las imágenes de satélite introducida por una nueva generación de satélites en el mercado como el SPOT V y el ASTER, capaces de adquirir dos imágenes en una misma órbita, ha hecho que la fotogrametría de satélite pueda llegar a competir con la fotogrametría aérea, permitiendo la fotointerpretación manual o la correlación automática de los pares. Las principales características de estos métodos se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características de los métodos fotogramétricos (de Tomás R. et al, 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Fotogrametría terrestre	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	<200 m	±40 mm
Fotogrametría aérea	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Hvuelo < 500 m	±100 mm
Fotogrametría satelital	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ		±15 m

2.4.4. Métodos de teledetección

La teledetección, traducción castellana del término anglosajón “remote sensing”, surge para designar cualquier medio de observación remota en el que no existe contacto físico entre el medio a estudiar y el sistema sensor. La fotogrametría queda englobada dentro de esta amplia definición, sin embargo, su uso y tratamiento para la determinación de movimientos superficiales se conoce comúnmente bajo el término de fotogrametría, habiendo constituido por sí sola una disciplina independiente. En este caso se ha optado por englobar dentro del término amplio de teledetección a aquellas técnicas no fotogramétricas que permiten estudiar el medio sin establecer contacto físico con él. Estos métodos se han dividido en dos grupos, métodos láser y radar. El primer grupo engloba el Scanner Láser, montado sobre plataforma terrestre (Terrestrial Laser Scanner) o aérea (LIDAR, ALS o ALTM). El segundo grupo se subdivide, de forma similar, según el tipo de plataforma empleada para la adquisición de las imágenes SAR en: terrestre (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR), aerotransportado (Airborne Radar) y satélite (Spaceborne Radar).

A su vez, las técnicas interferométricas basadas en los datos radar pueden dividirse según el algoritmo de procesado de las imágenes en: técnicas de Interferometría SAR diferencial convencionales (conventional DInSAR) como avanzadas (Dispersores Permanentes o Permanent Scatterers o la técnica de los Píxeles Estables Coherentes o

Stable Coherent Pixels). Los sistemas SAR registran tanto la amplitud como las fases de los ecos radar de la escena para generar una imagen de una magnitud compleja que es la reflectividad electromagnética. La fase correspondiente a cada píxel de esta imagen SAR es la suma de tres contribuciones: el camino de ida y vuelta, la interacción de la onda incidente con los blancos dispersores existentes dentro de la celda de resolución y el desplazamiento de la fase introducido por el sistema de procesado de señal empleado para la generación de la imagen. La fase de una sola imagen SAR no tiene ningún uso práctico por sí sola. En cambio, si consideramos dos imágenes obtenidas con ángulos de incidencia ligeramente diferentes, la diferencia de fase aporta información sobre la morfología del terreno y los cambios que en él se hayan podido producir. Éste es, a grandes rasgos, el fundamento de la Interferometría diferencial convencional (DiffSAR o DInSAR), muy utilizada durante los últimos años para la monitorización de fenómenos de subsidencia minera y subsidencia por descenso del nivel freático y movimientos de ladera.

La técnica de los Dispersores Permanentes (Permanent Scatterers, PS) constituye una variante avanzada de la Interferometría SAR Diferencial en la que sólo se estudian los blancos puntuales de la imagen cuya amplitud se mantiene estable en el tiempo. Éstos blancos reciben el nombre de Reflectores Permanentes o Permanent Scatterers (PS) y se localizan a través de un análisis estadístico de las amplitudes de los ecos de la imagen electromagnética de la escena. Una variante de los PS es la conocida como Análisis de Blancos Puntuales o Point Target Analysis -IPTA- que se diferencia del primero en algunos pasos del procesado. Las técnicas de Permanent Scatterers y de Point Target Analysis han sido utilizadas para el seguimiento de subsidencia y movimientos de ladera, alcanzando precisiones del orden del milímetro. La técnica de Píxeles Estables Coherentes (Stable coherent Pixel, SCP) constituye una técnica interferométrica en la que se seleccionan sólo aquellos puntos de una serie de interferogramas en los que la coherencia se conserva en el tiempo por encima de un determinado umbral. Posteriormente se establece un tratamiento particular de los puntos que cumplen esta condición para obtener así mapas de deformación del terreno. El Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) no constituye una técnica interferométrica propiamente dicha, sino un sistema para obtener imágenes radar desde tierra. Su fundamento es el mismo que el de los sistemas SAR espaciales con la diferencia que los sensores se encuentran

situados en tierra. Este sistema se ha empleado para el control de movimientos de ladera con resultados muy satisfactorios.

El equipo del Láser Scanner está constituido por una fuente láser y dos espejos inclinados. La distancia existente entre el equipo y el escenario se determina midiendo el tiempo que tarda el pulso láser en alcanzar el escenario y volver de nuevo al equipo. La posición relativa del punto del escenario radiado se determina a partir de la medida de la desviación de los espejos. A su vez la fuerza de la señal de retorno es almacenada en el equipo como un atributo de intensidad de cada punto radiado, ya que se trata de la reflectividad del objeto y por consiguiente, aporta información sobre las características espectrales del mismo. El número de puntos obtenidos en una sola sesión alcanza fácilmente el millón de puntos precisando a posteriori un tratamiento de filtrado y modelado que permita obtener una visión tridimensional del escenario a través de un MDT. Las diferencias observadas entre varias reconstrucciones tridimensionales del escenario permiten obtener la distribución de cambios y, por lo tanto, de deformaciones producidas en el propio escenario. Este método ha sido empleado en el estudio de movimientos de ladera en diversas ocasiones y fenómenos de subsidencia. El Airborne Laser Scanner (ALS), también conocido como Light Detection and Ranging (LIDAR) o Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM), es un sistema activo cuyo funcionamiento consiste en la emisión de un pulso láser y su posterior recepción a bordo. El tiempo que tarda el pulso emitido en retornar al receptor junto con los datos de posición del avión permiten referenciar el punto medido en el terreno (Fig. 2.3). Esta técnica se ha utilizado en el estudio de fenómenos de subsidencia y movimientos de ladera.

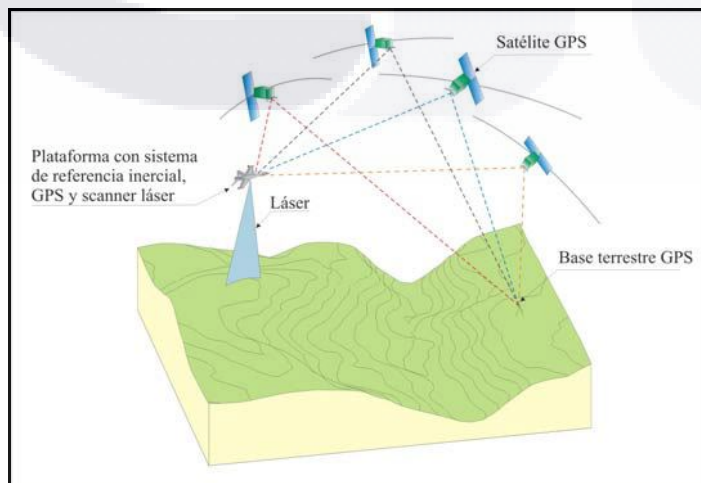


Fig. 2.3 Componente del LIDAR (de Tomás R. et al, 2005)

En la Tabla 2.4 se resumen las principales características de los métodos de teledetección empleados en la medida de deformaciones de la superficie terrestre.

Tabla 2.4 Características principales de los métodos de teledetección (de Tomás R. et al, 2005)

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Interferometría diferencial SAR convencional (DInSAR)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Baseline < 200 m Coherencia > 0.3 en varios puntos adyacentes	3-5 mm
Permanent Scatterers (PS)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia > 0.7 en un solo punto N° de imágenes > 30	1 mm
Stable Coherent Pixels (SCP)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	Coherencia > 0.4 en un solo punto	1 mm
Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)	Desplazamientos en la Línea de Vista (Line of Sight)	dX, dY, dZ	< 1.5 Km	<1 mm
Terrestrial Laser Scanner (TLS) o Ground-based Laser Scanner (GB-LS)	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	<400 m	±1.5 mm (hasta 50 m, para distancias superiores menor precisión)
Airborne Laser Scanner (ALS), Light Detection and Ranging (LIDAR) o Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM)	Superposición de MDT	dX, dY, dZ	200<Hvuelo<6000 m Distancia base < 50 Km	150-200 mm

2.5. SUBSIDENCIA Y FRACTURAMIENTO EN CUENCAS VULCANO LACUSTRES

2.5.1. Mecanismos de fracturamiento en materiales arcillosos

Orozco y Figueroa (1991) realizan un análisis de la literatura existente hasta entonces, y señalan que las fracturas aparecen en zonas de fuertes hundimientos (donde la mayoría se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie) y de transiciones estratigráficas laterales.

De acuerdo a la figura 2.4 se muestra la alta heterogeneidad de la secuencia estratigráfica en una cuenca fluvio-lacustre en zonas volcánicas relativamente recientes. La variabilidad lateral y en profundidad de la granulometría y permeabilidad del medio en este tipo de cuencas condiciona el comportamiento mecánico diferencial de los materiales y determina la distribución de gradientes hidráulicos críticos. Por lo tanto se establece que el fracturamiento de sedimentos está influenciado por la interacción entre los factores geológicos que condicionan sus propiedades y los factores disparadores que rompen el equilibrio mecánico del sistema.

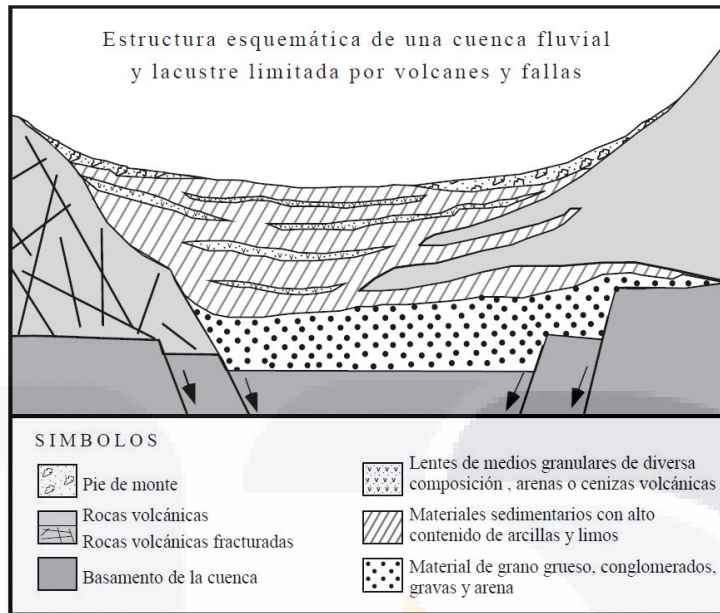


Fig. 2.4 Esquema conceptual de sedimentación fluvio-lacustre en una cuenca derrada de origen volcánico, con actividad contemporánea a la sedimentación como es el caso de la Cuenca del Valle de México (Modificado de Carreón-Freyre *et al.*, 2005a)

2.5.2. Factores geológicos que determinan la susceptibilidad al fracturamiento

Algunas heterogeneidades que determinan la formación y propagación de fracturas se deben al ambiente de depósito y estructuras pre-existentes en el basamento. La historia de cargas y variaciones de humedad durante la deposición de estos materiales determina la geometría de las primeras fracturas (p. ej. agrietamiento por desecación) que pueden modificar el estado local de esfuerzos y controlar la evolución de las fracturas alrededor de ellas (Tuckwell *et al.*, 2003). Asimismo, la variación de la mineralogía del material arcilloso y de la permeabilidad de sedimentos y rocas se puede traducir en variaciones de compresibilidad y llevar al fracturamiento por deformación diferencial.

a) Variaciones mineralógicas en una secuencia lacustre

Los minerales arcillosos se forman por intemperismo, deposición o sedimentación, y en zonas volcánicas activas por alteración hidrotermal. Durante la alteración de rocas básicas, el sílice y el magnesio son lixiviados (líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido), mientras que el Fe³⁺ y el Al se concentran en los horizontes superiores dando origen a la formación de

suelos arcillosos residuales (Righi y Meunier, en Velde 1995). El material transportado continúa su evolución al ser depositado en un ambiente húmedo, parte del agua migra a través del suelo como drenaje interno, algunos minerales son disueltos y la solución se desplaza hacia las partes inferiores del perfil de suelo. El movimiento de elementos en el suelo está directamente relacionado con la estructura del suelo ya que las arcillas se acumulan en los horizontes medios del perfil reduciendo la permeabilidad de la parte superior en donde se pueden establecer condiciones de oxidación-reducción (Gama et al., 1998). En estas condiciones también se pueden formar algunos óxidos e hidróxidos de hierro que actúan como agregantes de las partículas del suelo. La neo-formación o formación autigénica de arcillas y otros minerales secundarios en la secuencia sedimentaria depende entonces de las concentraciones iónicas en el sistema del suelo, condiciones de Eh (oxidación-reducción) y pH (acidez-alcalinidad) y la cinética de las reacciones (Velde, 1995). A su vez, la cinética de las reacciones se relaciona directamente con las variaciones climáticas durante la historia de depósito de los materiales. Por ejemplo, en zonas con alternancia fuerte de climas y de estaciones secas-húmedas, en donde el lavado de cationes básicos Ca y Mg es mínimo, se forman arcillas esmectíticas (montmorillonita-beidellita-nontronita). También se favorece la formación de esmectitas en zonas de lago con drenaje restringido bajo condiciones salino-alcálinas (Hillier, en Velde, 1995).

b) Propiedades hidráulicas y mecánicas de los materiales arcillosos

Existen numerosos trabajos de investigación sobre el estudio de la relación entre la mineralogía de los materiales arcillosos y sus propiedades mecánicas, las cuales dependen principalmente del contenido de agua y están directamente relacionadas con su baja permeabilidad. Por ejemplo, Ohstubo et al. (1983) correlacionan los límites de consistencia (plasticidad) con la variación de la capacidad de retención de agua de las partículas de suelo en función de las características químicas de las arcillas y del agua intersticial. La relación entre la mineralogía de suelos arcillosos y el desplazamiento de agua durante el proceso de consolidación ha sido ampliamente discutida (Wesley, 2001; Saarenketo, 1998; Warren y Rudolph, 1997). Se pueden diferenciar tres tipos básicos de agua de poro en los materiales arcillosos: el agua intermolecular que forma parte de la

estructura del alofano, el agua adsorbida fuertemente adherida a las partículas arcillosas principalmente esmectíticas y el agua libre que se desplaza más fácilmente entre los agregados, contactos intergranulares y/o microfracturas en la matriz arcillosa y que está relacionada con la consolidación primaria de estos materiales. Actualmente se reconoce que, así como la mineralogía obedece a variaciones en las condiciones climáticas y depósito, la variación del comportamiento mecánico en una secuencia arcillosa obedece además a la búsqueda de equilibrio del sistema ante la influencia antropogénica.

2.5.3. Factores disparadores de fracturas

El principal factor disparador de fracturas en sedimentos fluvio-lacustres es el desequilibrio mecánico, ya que las propiedades de estos sistemas pueden variar en tiempos muy cortos. Existen fenómenos naturales que actúan como mecanismos disparadores de fracturas, como son la actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales; sin embargo, los mecanismos más importantes son de origen antropogénico. El desequilibrio mecánico inducido por sobrecarga estática (capacidad de carga para construcción) y dinámica (fatiga de los materiales en vías terrestres) y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo, ya sea agua, petróleo o gas, son los factores disparadores más importantes del fracturamiento en zonas urbanas. Específicamente para el caso de la extracción de agua subterránea de acuíferos granulares, el decaimiento de la presión de poro propicia la compactación creando importantes esfuerzos de tensión verticales y horizontales (Carrillo, 1947; Holzer and Davis, 1976; Holzer, 1984; Figueroa Vega, 1989). Es importante remarcar que las variaciones espaciales y temporales en el descenso piezométrico dentro de una cuenca fluvio-lacustre pueden ser causadas por heterogeneidades a diferentes escalas: mineralógicas, estratigráficas o estructurales y las asociaciones de los diferentes factores determina la formación, el tipo y la propagación de las fracturas.

2.5.4. Tipos generales de fracturas en secuencias fluvio-lacustres

Los sistemas de fracturamiento se pueden estudiar de acuerdo a su tamaño y a la asociación de factores que les dan origen. Como los conceptos regional y local son

relativos ya que dependen de la escala y del tipo de estudio, debido a que en ocasiones el fenómeno apenas se ha detectado, por lo que se asumen los siguientes criterios:

- a) Las estructuras regionales son de dimensiones mayores que la zona urbana afectada. La irregularidad del basamento fracturado que subyace a las secuencias sedimentarias determina en gran medida la ubicación del fracturamiento que se propaga desde profundidad hacia las secuencias sedimentarias someras retomando planos de debilidad preexistentes, como es el caso de Morelia o de Querétaro (Rojas González et al., 2002, Carreón-Freyre et al., 2005a). En zonas urbanas afectadas por sistemas de falla regionales se debe considerar la asociación espacial de las mismas con variaciones estratigráficas, de manera que una falla puede actuar como canal preferencial o como barrera de flujo formando gradientes piezométricos importantes (Kreitler, 1977, Carreón-Freyre et al., 2005b).
- b) Como escala intermedia se considera a los sistemas de fracturamiento que afectan principalmente la parte superior de la secuencia sedimentaria fluvio-lacustre frecuentemente interestratificada con materiales piroclásticos y volcánicos. En las cuencas del centro del país los espesores totales de estas secuencias pueden alcanzar más de 500 metros, pero se considera solamente la parte superior (los primeros 200 m) porque es la profundidad actual promedio de los niveles de extracción de agua subterránea. En ésta escala uno de los principales mecanismos de fracturamiento es la deformación diferencial, ya que los materiales presentan una distribución heterogénea de propiedades hidráulicas y mecánicas (Zeevaert, 1953; Ellstein A, 1978; Orozco y Figueroa, 1991, Carreón-Freyre et al., 2003). Considerar que el fracturamiento es sólo debido al abatimiento de los niveles piezométricos del agua subterránea implica una simplificación del fenómeno, ya que los abatimientos mayores no se relacionan de manera directa con los desplazamientos verticales en las zonas de fracturamiento. Por ejemplo, en la Ciudad de Querétaro algunas zonas de mayor descenso piezométrico se localizan en el techo de la falla central que atraviesa la ciudad (Carreón-Freyre et al., 2006; Carreón-Freyre et al., 2005b). Para una adecuada evaluación de las condiciones de propagación del fracturamiento en ésta escala, se debe estudiar

las variaciones verticales de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero y las variaciones laterales de la compresibilidad de los materiales (Figuroa Vega, 1989; Carreón-Freyre et al., 2005a).

c) La escala local se refiere al fracturamiento en zonas restringidas y puede variar de unos cuantos a algunas decenas de metros (todavía se puede medir de manera directa las propiedades de los materiales); ésta es la escala en la que se lleva a cabo la mayor parte de los estudios de mecánica de suelos. Como ejemplos de fracturamiento local se tiene:

- I. las fracturas anulares de tensión que se generan en las zonas transicionales de los piedemontes de lomeríos (Lugo Hubp et al., 1991) y que se relacionan con deslizamientos gravitacionales;
- II. las grietas superficiales generadas por evaporación-deseccación en extensiones planas arcillosas, generadas por los cambios en las condiciones climáticas y en la presión de poro de las capas sedimentarias inferiores; y
- III. las fracturas por tensión que se generan por las fuerzas de filtración ocasionadas por el bombeo localizado (Juárez- Badillo, 1962; Alberro y Hernández, 1990).

2.6. MEDICIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO

2.6.1. Introducción

Uno de los casos de subsidencia más representativos en el mundo es el que ocurre en la ciudad de México, con 300 mm de subsidencia de la superficie al año (Osmanoglu et al. 2011), debido al tipo de suelo y a la intensa y abundante extracción de agua subterránea. En Jocotepec, Jalisco, se ha manifestado la subsidencia del terreno a través de grandes escarpes que acusan una deformación vertical diferencial en el suelo de la localidad, principalmente al centro de la población. En ocasiones la subsidencia se manifiesta también como grandes aberturas del terreno, debido a los esfuerzos horizontales de tensión del suelo, en el caso de Jocotepec han predominado los esfuerzos

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cortantes y de tensión en la superficie, debido a la existencia de estratos de suelos limo-arenosos y limo-arcillosos. Debido a que existe subsidencia en el terreno y a que se han generado discontinuidades del suelo, tales como fallas, escarpes o fisuras, se ha ocasionado un daño a la infraestructura y equipamiento urbano, así como también a diversas edificaciones que se encuentran dentro y al margen de la zona de subsidencia. Los daños en las edificaciones han sido desde ligeros en algunos elementos estructurales, tales como agrietamientos en muros y losas, hasta severos en los que ha habido la necesidad de demoler parcial o totalmente las construcciones, debido a la alta vulnerabilidad estructural que manifiestan.

Por lo tanto, para identificar el nivel de deformaciones verticales que ha tenido la localidad de Jocotepec, se realizaron mediciones en puntos estratégicos de su traza urbana durante un periodo de ocho meses de duración a partir del mes de abril del 2012. Para evaluar la subsidencia en esta localidad se generaron diversas etapas (Hernandez-Marin et al, 2014): a) la primera fue obtener y delinear las discontinuidades del suelo a través del área de estudio, b) en la segunda se determinó la relación entre la subsidencia del terreno y las discontinuidades del suelo, c) se elaboró un análisis de las variaciones de los niveles del agua subterránea y su potencial asociación con la deformación de la superficie, y d) se realizó una descripción general de los tipos de suelo desde el punto de vista geológico. Para el caso que nos compete y debido a que el enfoque de esta investigación es respecto a daños estructurales en edificaciones, se presentará la metodología y resultados de la evaluación de la deformación superficial en Jocotepec, ya que es lo que afecta la estabilidad y desplante de sus construcciones.

2.6.2. Localización y fisiografía

La localidad de Jocotepec se encuentra al poniente de la ribera del lago de Chapala y a 45 km del sur de la ciudad de Guadalajara, capital del estado de Jalisco, México (fig. 2.5), se ubica geográficamente en las coordenadas 20°10'00" y 20°25'00" de latitud norte y a los 103°17'30" y 103°33'10" de longitud oeste, con una altura promedio del municipio de 2,100 metros y su localidad principal a 1550 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 384.36 km², y tiene 29 kilómetros de costa con el Lago de Chapala (INEGI 2010). Fisiográficamente el área de estudio se ubica en el extremo

occidental del graben de Chapala y está delimitada al norte y oeste por una cordillera de montañas con una elevación de hasta 500 m con respecto al nivel de la zona urbana. Geológicamente el suelo de la zona de estudio, está compuesto principalmente por un sistema de multicapas de depósitos fluvio-aluviales de materiales granulares, tales como arenas, limos y arcillas con una alta compresibilidad variable, lo cual indica que esos suelos son muy susceptibles a deformaciones generadas por el peso de las edificaciones, o por la reducción de la presión de poro al extraer el agua de los acuíferos o acuitardos existentes. Se ha registrado actividad tectónica reciente en los flancos del graben de Chapala, y ésto en conjunción con la extracción del agua subterránea y con las características de sus suelos, son factores que han propiciado las deformaciones de su superficie.

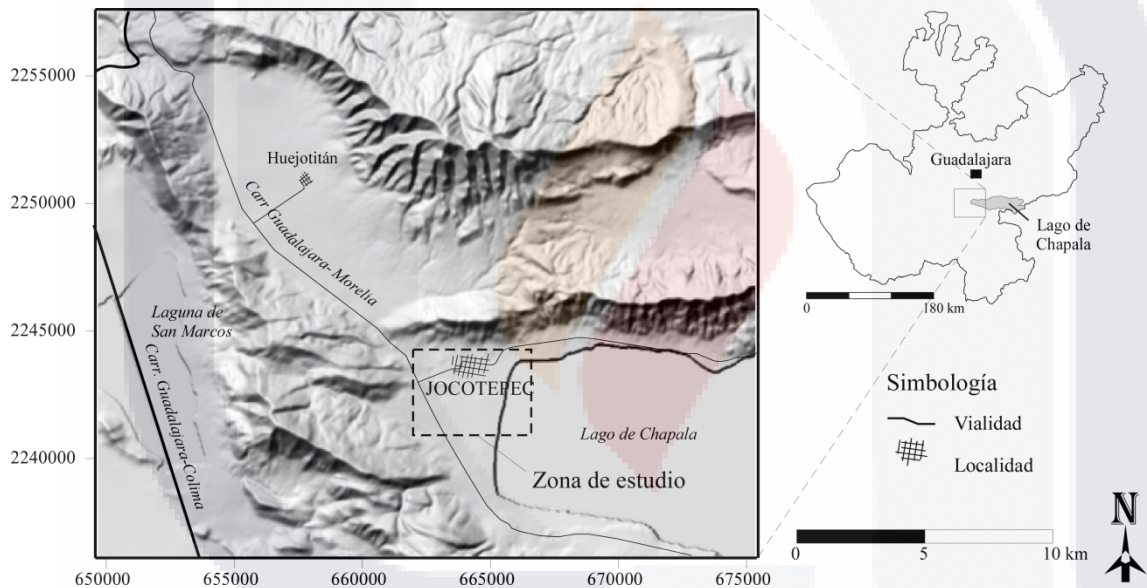


Fig. 2.5 Ubicación de la localidad de Jocotepec, Jalisco, México (de Hernández-Marín et al, 2014)

2.6.3. Metodología para la evaluación de la deformación superficial

Para monitorizar las deformaciones de la superficie de la localidad de Jocotepec, se utilizó un método topográfico convencional para obtener los niveles de 15 puntos que se ubicaron en su traza urbana, generando una cuadrícula o malla de referencia; 14 puntos se ubicaron en banquetas y vialidades que sirvieron para registrar las deformaciones de los suelos, y otro punto se colocó sobre un basamento rocoso ubicado

en las faldas del cerro al norte de la localidad y fuera de la zona urbana, por considerarse éste último un punto inamovible por el efecto de subsidencia. Se utilizó un equipo topográfico para obtención de niveles marca Sokkia B20 de alta precisión para medir las deformaciones milimétricas durante el periodo de investigación, que comprendió ocho meses de duración; la primera medición se realizó en el mes de abril del 2012 para registrar las medidas base, y las otras dos en septiembre y noviembre del mismo año.

Se eligió esta metodología de análisis, debido a la practicidad del método, a que se contaba con el equipo y personal capacitado, y a que el área de estudio era muy pequeña en comparación con otros lugares donde el fenómeno de subsidencia ha sido más fuerte o lleva más tiempo de ocurrencia, pues prácticamente en el caso de Jocotepec apenas es reciente el fenómeno. Los errores vinculados a esta metodología tienen que ver con errores humanos en la adquisición de datos, o por adquirir una mala postura de quien realiza las mediciones. Los errores se generaron por nivelar en ambas direcciones entre dos puntos, entonces la diferencia del nivel medido en ambas direcciones fue tomada como el error numérico y considerado para el análisis comparativo de los resultados de la deformación vertical. Por lo tanto, el promedio en los niveles de cada dirección fue tomado como el valor final de la deformación y usado en el análisis. Las observaciones de la deformación superficial fueron completadas en campo con la determinación de los alineamientos de los escarpes, con las grietas y daños a vialidades y edificaciones, para entonces adquirir la geometría principal de cada discontinuidad del suelo, tal como su elongación, anchura y deformación vertical diferencial.

2.6.4. Resultados obtenidos de la evaluación de la deformación superficial

Los datos de nivelación obtenidos en esta investigación revelan un patrón complejo de deformación vertical, debido a que las áreas afectadas por subsidencia se están deformando rápidamente. Se detectaron ascensos en algunos puntos de referencia (zona en azul de la fig. 2.6) y descensos al centro de la localidad (zonas en amarillo y rojo de la fig. 2.6) con magnitudes de deformación vertical variables con respecto a cada periodo de tiempo, pero conservando su posición espacial.

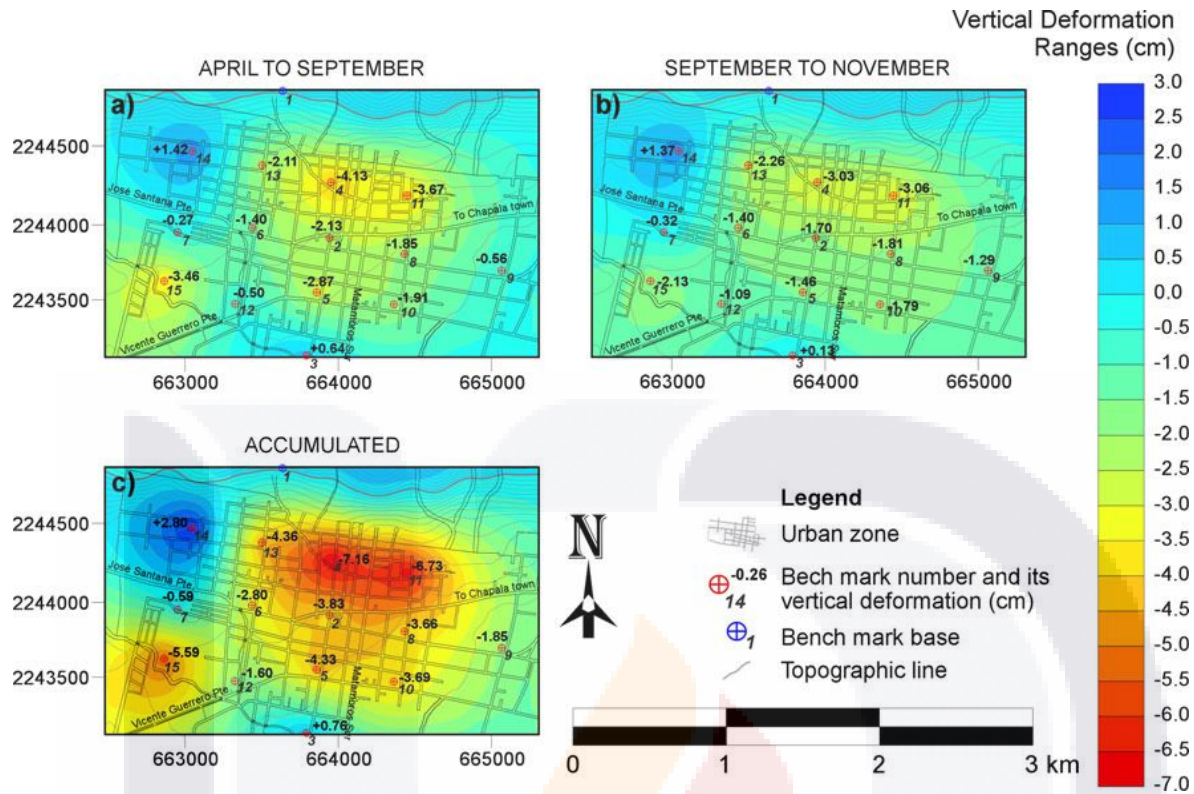


Fig. 2.6 Configuración de curvas de deformación vertical en dos periodos de monitorización (valores positivos=ascensos y valores negativos=descensos), con la ubicación de puntos de registro y su correspondiente deformación

La deformación máxima acumulada por subsidencia obtenida en el periodo de 8 meses fue de 7.16 cm de descenso al centro de la localidad, le sigue otra deformación de 6.73 cm en el punto de registro 11 al noreste de la zona urbana y una tercera medición crítica se obtuvo al suroeste de la localidad con 5.59 cm de deformación en el punto de registro 15. Debido a que los dos puntos de máxima deformación se encuentran muy cercanos entre sí, se infiere que delimitan parte del borde de un gran cono de abatimiento por subsidencia.

2.6.5. Alineamientos de fallas en la superficie

Con observaciones en el lugar se han identificado hasta el momento tres alineaciones o discontinuidades superficiales del suelo de hasta 2 km de longitud, debido a que muestran un daño evidente en vialidades con escarpes de hasta 60 cm de descenso, daños en equipamiento urbano por inclinación de postes de electricidad, de alumbrado y de telefonía, ruptura de pavimentos y de instalaciones hidro-sanitarias que

han sido reparados en diversas ocasiones. Asimismo se han detectado durante el desarrollo de esta investigación hasta 126 edificaciones dañadas entre las que existen viviendas, escuelas, iglesia, locales comerciales, y asilo de ancianos entre otros, con asentamientos diferenciales en sus muros de apoyo como uno de los daños más evidentes por subsidencia. A dichas discontinuidades se les ha nombrado como occidental, central y sur y se muestran en la fig. 2.7, junto con las deformaciones registradas por subsidencia durante el periodo de medición de abril a noviembre del 2012 (Hernandez-Marin et al, 2014).

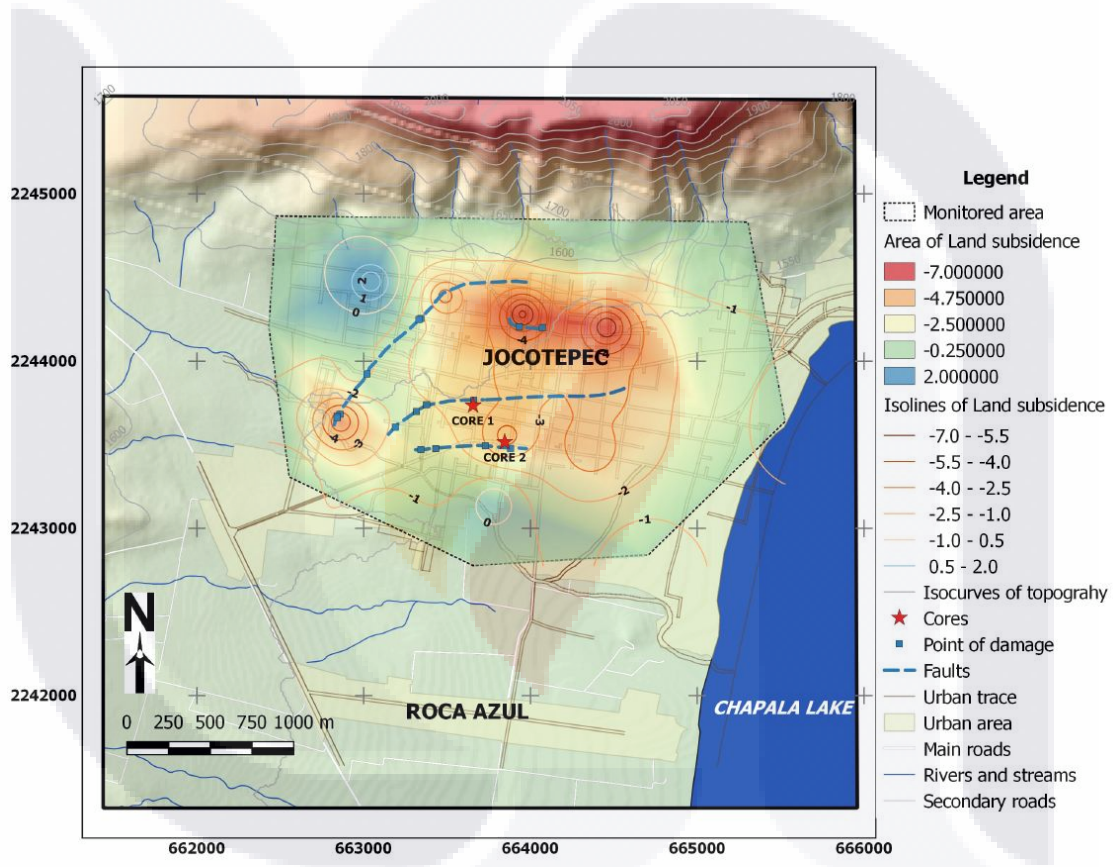


Fig. 2.7 Correlación entre las discontinuidades del suelo y los patrones de deformación vertical acumulada

Al delinear las discontinuidades occidental y central, se puede observar que su trayectoria es muy similar al borde de conos de abatimiento donde el descenso del suelo se manifiesta hacia el sureste de la localidad, o sea hacia la parte central del lago de Chapala, y en el caso de la discontinuidad sur el escarpe muestra un descenso hacia el norte; por lo tanto se infiere que la superficie que está delimitada entre las discontinuidades central y sur está presentando un descenso constante, por lo que las

edificaciones que se encuentran en los bordes de esas discontinuidades son las que están presentando más daños por asentamientos diferenciales de sus muros, y las que se encuentran dentro de esa área de afectación aún no evidencian daños estructurales significativos.

2.7. CONCLUSIONES

En base a 14 puntos de referencia para monitorizar las deformaciones dentro de la zona urbana de Jocotepec, y a un punto fijo sobre un manto rocoso ubicado fuera de la zona urbana desde donde se referenciaron todos los desplazamientos, se realizaron dos mediciones a los 5 y a los 8 meses durante el periodo del mes de abril a noviembre del 2012, donde se obtuvieron deformaciones verticales por subsidencia de 7.16 cm de descenso al centro de la localidad, de 6.73 cm en el punto de registro 11 al noreste de la zona urbana y de 5.59 cm en el punto de registro 15 al suroeste de la localidad.

Se han identificado hasta el momento tres alineaciones o discontinuidades superficiales del suelo de hasta 2 km de longitud, a las que se les ha nombrado occidental, central y sur, con escarpes muy notorios de hasta 60 cm de descenso que han generado daños significativos en las vialidades, en el equipamiento urbano y en edificaciones.

Con la ocurrencia del fenómeno de subsidencia se generó desde el 2009 un cono de abatimiento delineado por las discontinuidades occidental y central, donde hasta el momento las edificaciones y vialidades han presentado daños muy severos.

Debido a que existe una correlación y coincidencia entre los alineamientos de discontinuidad del suelo y los alineamientos de daños en edificaciones y vialidades, se puede especular que se mostrará una tendencia de deformación del suelo, por lo que será conveniente continuar en otra etapa de investigación para determinar el comportamiento del flujo del agua subterránea y saber cómo esos patrones pueden afectar la génesis y dirección de las discontinuidades del suelo.

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DE PATOLOGÍAS DE DAÑOS EN EDIFICACIONES EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, POR SUBSIDENCIA Y FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL

3.1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de subsidencia ha sido ampliamente estudiado en diversas ciudades del mundo, llegando en muchas ocasiones a conclusiones que tienen que ver con el abuso en la extracción del agua subterránea y con el comportamiento del suelo del lugar, que para el caso de Jocotepec, como es una localidad ubicada en la ribera del Lago de Chapala, es evidente que se ha manifestado la subsidencia debido a la existencia de estratos muy gruesos limo-arcillosos y limo-arenosos depositados en su subsuelo, y que cuando se reduce su nivel de humedad sufren un proceso de consolidación. Dichas variaciones y pérdida de humedad son en parte resultado del alto consumo de agua que se suministra a la Zona Metropolitana de Guadalajara, y a la gran demanda de dicho líquido para la agricultura en las zonas aledañas, la cual ha tenido desde hace 20 años aproximadamente un auge importante en la región occidental del Lago de Chapala, por lo que no se logra un reabastecimiento rápido de los acuíferos y acuitardos del Lago, provocándose el fenómeno de subsidencia que a su vez se ve reflejado en los daños a nivel superficial tanto en la infraestructura urbana como en las edificaciones de la localidad de Jocotepec.

Para entender un poco la complejidad que abarca el estudio de daños en viviendas por subsidencia en Jocotepec, que la mayoría están elaboradas con sistemas de autoconstrucción con materiales típicos de la región, se debe partir inicialmente con la descripción de los sistemas estructurales que se han utilizado en dicho lugar, ya que se tiene una múltiple gama de combinaciones en sus elementos verticales, sean columnas o muros, así como diversos sistemas de techo, que pueden ser con losas de concreto reforzado (llenas o aligeradas), de bóvedas de ladrillo o techumbres aligeradas (con lámina, de madera o teja), así como estructuras principales formadas por marcos de traveses y columnas de concreto o de acero en algunos casos. En lo que corresponde a las

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cimentaciones de las edificaciones, también se ha observado que se ha utilizado la mampostería de piedra braza o de blocks de jalcreto, así como zapatas y losas de cimentación de concreto reforzado que en general son usadas para soportar las cargas gravitacionales y sísmicas que hayan sido analizadas durante el proyecto inicial de cada edificación (para aquellas construcciones en las que se haya desarrollado un proyecto estructural), aunque en muchos casos tales cimentaciones no están preparadas para soportar las deformaciones generadas por el fenómeno de subsidencia que sufre el suelo de la localidad, ya que no fueron diseñadas para tal fin.

Aunado a lo anterior, cabe mencionar que para que toda estructura sea resistente a las cargas o solicitaciones a las que va a estar sometida durante su vida útil, no solamente se deben de emplear sistemas estructurales y materiales de buena calidad, sino que interviene un factor muy importante que corresponde a la distribución de los espacios; esto es, también es de suma importancia que para tener una buena respuesta estructural, debe existir una densidad balanceada de muros o apoyos en ambas direcciones de los ejes principales de la edificación, para poder contrarrestar las fuerzas horizontales en caso de sismo o los desplazamientos y asentamientos diferenciales que se propagan a la edificación durante un fenómeno de subsidencia. Por lo anterior se han observado varias edificaciones dañadas donde no se cumplen dichas condiciones, lo cual pone en desventaja a las viviendas para responder ante tales deformaciones.

En Jocotepec, la mayor parte de las edificaciones inspeccionadas hasta el momento, presentan uno o dos niveles y están construidas en sus muros con el sistema tradicional de mampostería de ladrillo de barro recocido o block de jalcreto. Dicha mampostería se encuentra confinada perimetralmente con dalas y castillos para las construcciones más recientes, y sin confinamiento para las más antiguas, representando un sistema estructural muy rígido que ante pequeñas deformaciones falla frágilmente. De entre estas últimas, se observó también el uso de muros de adobe debido a su empleo en la antigüedad.

Para el desarrollo de este capítulo, sólo se explicará el comportamiento de las construcciones a partir de los daños que se muestran en la actualidad, relacionados tanto al fenómeno de subsidencia, como a la ocurrencia de eventos sísmicos o quizá hasta por

deficiencias en sus procesos constructivos o mala calidad de sus materiales, para posteriormente en otro capítulo mostrar la instrumentación de edificaciones seleccionadas donde se conozca su historial o patrón de agrietamientos y deformaciones de sus principales elementos estructurales.

3.2. OBJETIVOS

Los objetivos para este capítulo fueron:

- a) Conocer la metodología más adecuada para evaluar los daños en edificaciones debido al fenómeno de subsidencia.
- b) La detección y ubicación de las edificaciones y zonas dañadas por subsidencia en la localidad de Jocotepec, Jalisco.
- c) La elaboración de censos de daños de forma detallada en cada una de las edificaciones seleccionadas en el estudio, con la obtención de su Índice de Estado de condición (IEC), de acuerdo a la suma del Índice Funcional (IF) y del Índice Estructural (IE), los cuales a su vez resultaron de la aplicación de diversos factores de daño, acción y urgencia en cimentación, muros, elementos de confinamiento y losas, obtenidos por la observación y medición de daños en los elementos estructurales de los inmuebles.
- d) La elaboración de un análisis estadístico para validar matemáticamente los resultados obtenidos de las exploraciones de daños estructurales en viviendas.

3.3. CLASIFICACIÓN EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN SOBRE PATOLOGÍAS DE DAÑOS EN EDIFICACIONES

Respecto a la metodología empleada para elaborar los censos de patologías de daños en viviendas de Jocotepec, se utilizó un modelo de revisión para cada vivienda realizado por Alonso, (2010), que toma como base el uso de dos índices estructurales que se aplican a los elementos estructurales de la edificación, cuyo deterioro puede afectar de manera directa a la estructura al momento de evaluar su estado de condición mediante el índice I_{EC} , el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_{EC} = I_F + I_E \tag{1}$$

Donde: I_{EC} = Índice de Estado de Condición

I_F = Índice Funcional

I_E = Índice Estructural

Los índices estructurales mencionados anteriormente con los que se evaluará el estado de condición de la estructura y que se determinan para cada elemento estructural se refieren a:

1. El porcentaje de daño que las observaciones de deterioro presenten al elemento al momento de la inspección, evaluadas con respecto a la estabilidad de la estructura, y,
2. El factor de importancia del daño que tiene el elemento estructural con respecto al daño en los otros elementos estructurales en que se divide el edificio.

El índice funcional, se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_F = F_F * F_M \tag{2}$$

Donde: F_F = Factor funcional

F_M = Factor de mantenimiento

Los factores anteriores se presentan en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1 Valores para el factor funcional

F_F	Descripción
0	La estructura esta en perfecto estado
1	Presencia de suciedad en muros, losas y pisos
2	Presencia de pintura descamada, puertas y ventanas con defectos menores, desprendimiento de recubrimiento
3	Pequeñas manchas de humedad con filtraciones mínimas, desperfectos eléctricos e hidráulicos, falta de azulejos y losetas, cristales rotos
4	Desprendimientos en muros, losas y pisos, filtraciones mayores, puertas y ventanas en mal estado, faltan cristales
5	Filtraciones excesivas, puertas y ventanas dañadas
6	La estructura es inhabitable

Tabla 3.2 Valores para el factor de mantenimiento

F_M	Descripción
0	La estructura no requiere de ningún mantenimiento
1	Mantenimiento menor, limpieza general de la estructura
2	Mantenimiento medio, resanes, reposición de cristales, azulejos, losetas, reparación menor hidráulica y eléctrica, pintura general, aplicación de sellador en losa
3	Mantenimiento mayor, reparación de recubrimientos, ventanas, puertas, impermeabilizante general

Para obtener el índice estructural, se suman los efectos de daño generados en los principales elementos estructurales, tales como los deterioros en losa, muros, elementos de confinamiento y en cimentación, con la siguiente expresión:

$$I_E = D_L + D_M + D_{EC} + D_C$$

- Donde: D_L = Deterioro en losa
 D_M = Deterioro en muros
 D_{EC} = Deterioro en elementos de confinamiento
 D_C = Deterioro en cimentación

Para cada uno de los valores anteriores, se utilizan diferentes ecuaciones multifactores, como:

$$D_L = FD_L * FA_L * FU_L \qquad D_M = FD_M * FA_M * FU_M$$

$$D_{EC} = FD_{EC} * FA_{EC} * FU_{EC} \qquad D_C = FD_C * FA_C * FU_C$$

- Donde: FD_L = Factor de daño en losas
 FA_L = Factor de acción en losas
 FU_L = Factor de urgencia en losas
 FD_M = Factor de daño en muros
 FA_M = Factor de acción en muros
 FU_M = Factor de urgencia en muros
 FD_{EC} = Factor de daño en elementos de confinamiento
 FA_{EC} = Factor de acción en elementos de confinamiento
 FU_{EC} = Factor de urgencia en elementos de confinamiento
 FD_C = Factor de daño en cimentación
 FA_C = Factor de acción en cimentación
 FU_C = Factor de urgencia en cimentación

Para una interpretación más clara de los factores de daño, acción y urgencia en losas, muros, elementos de confinamiento y cimentación, se pueden observar las tablas 3.3 a 3.14.

Tabla 3.3 Valores para el factor de daño en losas

FD_L	Descripción
0 - 0	· No se presenta ninguna patología
0.01 - 0.05	· Pequeñas fisuras provocadas por contracción menores a 5 cm de longitud · Descamado de pintura provocado por humedad. · Manchas de suciedad
0.05 - 0.10	· Fisuras provocadas por contracción entre 5 y 10 cms de longitud · Pequeñas fisuras provocadas por flexión menores a 5 cm de longitud · Descamado de recubrimiento en menos del 10% del área
0.10 - 0.25	· Bloques de fisuras entre 5 y 20 cms por flexión o contracción. · Descamados de recubrimiento del 10 – 20 % · Pequeñas manchas provocadas por Humedad · Pequeñas filtraciones con goteo en la losa
0.25 - 0.50	· Grietas menores a 5 mm de espesor con longitudes menores a 10 cms · Vibración notable de la losa · Descamados de recubrimiento del 30 – 50 % · Manchas de humedad con presencia de óxido o eflorescencia · Desprendimiento de concreto en menos del 10 %
0.5 - 0.75	· Grietas de más de 5 mm de espesor con longitud variable · Manchas de humedad con desprendimiento del recubrimiento y presencia de óxido o excesiva eflorescencia · Desprendimiento del concreto con acero de refuerzo visible en un 20 % · Vibraciones excesivas
0.75 - 1.00	· Filtraciones excesivas con manchas de óxido y desprendimiento del concreto · Grietas de más de 5 mm de espesor con longitud variable y con manchas de oxidación · Acero de refuerzo visible y corroído · Desprendimientos de recubrimiento con acero expuesto en más de 20 %

Tabla 3.4 Valores para el factor de acción en losas

FA_L	Descripción
0	No requiere ninguna reparación
1	Reparaciones menores que consisten en limpieza de pequeños escamados, sello de fisuras
2	Reparaciones menores que consisten en resane de grietas o pequeños desprendimientos
3	Reparaciones mayores que consisten en reparación de desprendimientos y limpieza o reposición de acero corroído
4	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento de la losa

Tabla 3.5 Valores para el factor de urgencia en losas

FU_L	Descripción
1	Acción a largo plazo
2	Acción a mediano plazo
3	Acción a corto plazo

Tabla 3.6 Valores para el factor de daño en muros

FD _M	Descripción
0 - 0	· No se presenta ninguna patología
0.01 - 0.03	· Pequeñas fisuras por contracción en el recubrimiento. · Descamado de pintura.
0.03 - 0.10	· Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior al muro · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en forma vertical. · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento. · Desprendimiento de recubrimiento hasta en 10% de la superficie del muro.
0.10 - 0.20	· Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en forma vertical. · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento. · Desprendimiento de recubrimiento hasta en 10% de la superficie del muro.
0.20 - 0.30	· Fisuras entre 10 y 15 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Fisuras entre 10 y 15 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Fisuras entre 10 y 15 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Fisuras entre 10 y 15 cm de longitud en forma vertical. · Fisuras entre 10 y 15 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento. · Desprendimiento de recubrimiento entre 10 y 20% de la superficie del muro.
0.30 - 0.40	· Grietas hasta de 10 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Grietas hasta de 10 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Grietas hasta de 10 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Grietas hasta de 10 cm de longitud en forma vertical. · Grietas hasta de 10 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento. · Desprendimiento de recubrimiento más del 20% de la superficie del muro.
0.40 - 0.50	· Grietas entre 10 y 20 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Grietas entre 10 y 20 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Grietas entre 10 y 20 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Grietas entre 10 y 20 cm de longitud en forma vertical. · Grietas entre 10 y 20 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento. · Desprendimiento de recubrimiento más del 20% de la superficie del muro.
0.50 - 0.60	· Grietas entre 20 y 40 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Grietas entre 20 y 40 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Grietas entre 20 y 40 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Grietas entre 20 y 40 cm de longitud en forma vertical. · Grietas entre 20 y 40 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento.
0.60 - 0.80	· Grietas entre 40 y 80 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Grietas entre 40 y 80 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Grietas entre 40 y 80 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Grietas entre 40 y 80 cm de longitud en forma vertical. · Grietas entre 40 y 80 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento.
0.80 - 1.00	· Grietas de más de 80 cm de longitud de forma diagonal en la parte superior del muro. · Grietas de más de 80 cm de longitud de forma diagonal en la parte inferior del muro. · Grietas de más de 80 cm de longitud en forma horizontal en la parte superior del muro. · Grietas de más de 80 cm de longitud en forma vertical. · Grietas de más de 80 cm de longitud en la unión con los elementos de confinamiento

Tabla 3.7 Valores para el factor de acción en muros

FA _M	Descripción
0	No requiere ninguna reparación
1	Reparaciones menores que consisten en limpieza de pequeños escamados, sello de fisuras
2	Reparaciones menores que consisten en resane de grietas o pequeños desprendimientos
3	Reparaciones mayores que consisten en reparación de parte del muro dañado
4	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento o cambio del muro

Tabla 3.8 Valores para el factor de urgencia en muros

FU _M	Descripción
1	Acción a largo plazo
2	Acción a mediano plazo
3	Acción a corto plazo

Tabla 3.9 Valores para el factor de daño en elementos de confinamiento

FD _{EC}	Descripción
0 - 0	· No se presenta ninguna patología
0.01 - 0.03	· Pequeñas fisuras por contracción en el recubrimiento · Descamado de pintura
0.03 - 0.10	· Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en la cara inferior del elemento de confinamiento. · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en forma diagonal con dirección al apoyo · Pequeñas fisuras menores de 5 cm de longitud en forma diagonal con dirección contraria al apoyo
0.10 - 0.20	· Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en la cara inferior del elemento del confinamiento. · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en forma diagonal con dirección al apoyo · Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en forma diagonal con dirección contraria al apoyo · Desprendimiento del recubrimiento hasta de 3% de la superficie del confinamiento. · Manchas de corrosión o eflorescencia hasta de un 10 % de la superficie del confinamiento.
0.20 - 0.40	· Grietas hasta de 10 cm de longitud en la cara inferior del confinamiento. · Grietas hasta de 10 cm de longitud en forma diagonal con dirección al apoyo · Grietas hasta 10 cm de longitud en forma diagonal con dirección contraria al apoyo · Desprendimiento de recubrimiento entre el 3 y el 5% de la superficie del confinamiento.
0.40 - 0.50	· Grietas de entre 10 y 15 cm de longitud en la cara inferior del confinamiento. · Grietas de entre 10 y 15 cm de longitud en forma diagonal con dirección al apoyo · Grietas entre 10 y 15 cm en forma diagonal con dirección contraria al apoyo · Desprendimiento del concreto con acero de refuerzo visible en un 5 % de la superficie del confinamiento.
0.50 - 0.70	· Grietas de entre 15 y 20 cm de longitud en la cara inferior del confinamiento. · Grietas de entre 15 y 20 cm de longitud en forma diagonal con dirección al apoyo. · Grietas entre 15 y 20 cm en forma diagonal con dirección contraria al apoyo. · Desprendimiento del concreto con acero de refuerzo corroído visible en un 5 % de la superficie del confinamiento.
0.70 - 1.00	· Grietas con longitudes mayores a 20 cm en la cara inferior del confinamiento. · Grietas con longitudes mayores a 20 cm en forma diagonal con dirección al apoyo · Grietas con longitudes mayores a 20 cm en forma diagonal con dirección contraria al apoyo · Desprendimiento del concreto con acero de refuerzo corroído visible en más del 5 % de la superficie del confinamiento.

Tabla 3.10 Valores para el factor de acción en elementos de confinamiento

FA _{EC}	Descripción
0	No requiere ninguna reparación
1	Reparaciones menores que consisten en limpieza de pequeños escamados, sello de fisuras
2	Reparaciones menores que consisten en resane de grietas o pequeños desprendimientos
3	Reparaciones mayores que consisten en reparación de parte del confinamiento dañado
4	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento o cambio del confinamiento
5	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento total del confinamiento usando elementos nuevo y apuntalamientos

Tabla 3.11 Valores para el factor de urgencia en elementos de confinamiento

FU _{EC}	Descripción
1	Acción a largo plazo
2	Acción a mediano plazo
3	Acción a corto plazo

Tabla 3.12 Valores para el factor de daño en cimentación

Porcentaje FDc	Descripción
0 - 0	No se presenta ninguna patología
0.01 - 0.05	Pequeñas fisuras de no más de 5 cm de longitud en la cimentación.
0.05 - 0.10	Fisuras entre 5 y 10 cm de longitud en la cimentación. Desprendimiento del concreto en menos del 5% de la superficie.
0.10 - 0.20	Grietas de hasta 10 cm de longitud en la cimentación. Desprendimiento del concreto 5 y el 10% de la superficie.
0.20 - 0.40	Grietas de entre 10 y 15 cm de longitud en la cimentación. Desprendimiento del concreto 10 y el 15% de la superficie. Asentamientos o levantamiento por cambio volumétrico provocando fisuras de hasta 5 cm al pie de columna o muro de carga.
0.40 - 0.70	Grietas entre 15 y 20 cm de longitud en la cimentación. Desprendimiento de concreto con acero visible entre el 15 y el 20% Asentamientos o levantamiento por cambio volumétrico provocando fisuras de hasta 10 cm de longitud.
0.70 - 1.00	Grietas de más 20 cm de longitud en la cimentación. Desprendimiento del concreto con acero de refuerzo corroído visible en más del 20%. Asentamientos o levantamiento por cambio volumétrico provocando grietas de hasta 10 cm de longitud, provocando mal funcionamiento en puertas y ventanas.

FA _c	Descripción
0	No se requiere ninguna reparación
1	Reparaciones menores que consisten en limpieza de pequeños escamados, sello de fisuras
2	Reparaciones menores que consisten en resane de grietas o pequeños desprendimientos
3	Reparaciones mayores que consisten en reparación de parte de la cimentación
4	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento o cambio de los elementos de la cimentación
5	Reparaciones mayores que consisten en reforzamiento total de la cimentación usando elementos nuevo y apuntalamientos

Tabla 3.13 Valores para el factor de acción en cimentación

Tabla 3.14 Valores para el factor de urgencia en cimentación

FU _c	Descripción
1	Acción a largo plazo
2	Acción a mediano plazo
3	Acción a corto plazo
4	Acción Inmediata

Una vez que se evalúa cada edificación y se aplican todos los factores de las tablas mencionadas, se obtiene el Índice de Estado de Condición, el cual según se observa en la tabla 3.15, muestra los niveles de condición estructural, así como la descripción y magnitud de daños para cada clasificación, donde el cero representa a las edificaciones con máxima calidad tanto funcional como estructural y 68 el máximo daño en la edificación, haciéndola inhabitable e irreparable.

Tabla 3.15 Descripción y magnitud del daño del IEC, Alonso (2010)

IEC	Condición estructural	Descripción	Magnitud del Daño
0	Excelente	La estructura no presenta ningún daño.	Ninguno
1 a 5	Bueno	La estructura presenta daños menores que se pueden solucionar con mantenimientos mínimos.	Insignificante, que no afecta de manera relevante la capacidad estructural (resistente y de deformación). La reparación será de tipo superficial.
5.1 a 10	Aceptable	La estructura presenta daños menores de urgencia de reparación a largo plazo y mantenimientos menores.	Ligero, cuando afecta ligeramente la capacidad estructural. Se requieren medidas de reparación sencillas para la mayor parte de elementos y de modos de comportamiento.
10.1 a 15	Regular	La estructura presenta daños mayores que pueden poner en peligro la estabilidad de la estructura y requiere acciones de mantenimiento a mediano plazo.	Moderado, cuando afecta medianamente la capacidad estructural. La rehabilitación de los elementos dañados depende del tipo de elemento y modo de comportamiento.
15.1 a 20	Malo	La estructura presenta daños mayores que necesitan acciones de reforzamiento a corto plazo.	Severo, cuando el daño afecta significativamente la capacidad estructural. La rehabilitación implica una intervención amplia, con reemplazo o refuerzo de algunos elementos.
20.1 a 59	Dañado	La estructura presenta daños mayores con acciones de reforzamiento inmediatas.	Muy grave, cuando el daño ha deteriorado a la estructura al punto que su desempeño no es confiable. Abarca el colapso total o parcial. La rehabilitación involucra el reemplazo o refuerzo de la mayoría de los elementos, o incluso la demolición total o parcial.
59.1 a 68	Muy dañado	La estructura presenta daños permanentes sin posibilidad de acciones de reforzamiento.	Extremadamente grave, el daño deterioró a la estructura al punto del colapso total e inminente. No se recomienda la rehabilitación estructural, pero sí la demolición total.

3.4. UBICACIÓN DE ZONAS Y DE EDIFICACIONES DAÑADAS POR SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC

Al explorar la zona urbana de la localidad de Jocotepec y sus alrededores, se localizaron 126 edificaciones dañadas sobre la traza urbana, y al unir los puntos de ubicación entre ellas, se delinearón las tres fallas por subsidencia que actualmente son las más significativas en la localidad; dichas fallas se presentan como escarpes superficiales en las vialidades y cruzan varias manzanas donde existe una alta densidad de construcciones; los daños en las vialidades fueron el indicio inicial para detectar las zonas de daño en la localidad. Se puede observar en la figura 3.1, la ubicación de los alineamientos de fallas para la zona norte, centro y sur respectivamente, donde se localizan las 44 edificaciones dañadas que se utilizaron para la evaluación de daños estructurales, cuyos domicilios aparecen en la tabla 3.16, mismas que permitieron delimitar y generar un trazo más preciso de dichos alineamientos. Las coordenadas geográficas donde se encuentran las alineaciones son entre 103°26'12.75" y 103°25'40" de longitud oeste y entre 20°16'55" y 20°17'20" de latitud norte.



Figura 3.1 Detección y ubicación de edificaciones dañadas en las alineaciones norte, centro y sur

Tabla 3.16 Domicilios de edificaciones dañadas

ALINEACIÓN NORTE				ALINEACIÓN SUR	
Censo	Domicilio	Censo	Domicilio	Censo	Domicilio
23	Allende # 53	30	Hidalgo # 65	1	Asilo Jocotepec
24	Allende # 69	31	Hidalgo # 80	5	Independencia # 175
25	Allende # 71	32	Hidalgo # 82	6	Independencia # 180
26	Allende # 77	33	Hidalgo # 73	14	Churubusco # 14
27	Hidalgo # 97 Y 99	34	Guadalupe Victoria # 93	15	Vicente Guerrero # 227
28	Hidalgo # 68	35	Guadalupe Victoria # 82	16	Vicente Guerrero # 185
29	Hidalgo # 89			36	Hidalgo # 213
ALINEACIÓN CENTRO				37	Hidalgo # 219
Censo	Domicilio	Censo	Domicilio	38	Josefa Ortiz de Dominguez #
2	Juárez # 78	12	Miguel Arana # 76	39	Josefa Ortiz de Dominguez #
3	Independencia # 93	13	Miguel Arana # 112	40	Churubusco # 15-A
4	Juárez # 86	17	Niños Héroes # 117-A	41	Churubusco # 16
7	Hidalgo # 66	18	Niños Héroes # 122-A, B y C	42	Churubusco # 11
8	Hidalgo # 70	19	Juárez # 186-A	43	Independencia # 179
9	Hidalgo # 73	20	Juárez # 186-B	44	Independencia # 181
10	Hidalgo # 71	21	Juárez # 174-A		
11	Hidalgo # 68	22	Juárez # 174		

Los daños encontrados en las construcciones van desde ligeros en algunas de ellas hasta severos con demoliciones parciales y totales en otras. En la mayoría de los casos se presentaron agrietamientos en muros de carga principales, provocados por asentamientos diferenciales que denotan el hundimiento hacia el sur y sur-este en la

alineación de la zona centro y hacia el norte en la alineación de la zona sur. Respecto a la alineación de la zona norte, se ha observado que las edificaciones se están desplazando hacia el sur, ya que también los agrietamientos de los muros alineados en la dirección norte-sur muestran asentamientos diferenciales hacia dicho sentido.

Debido a que las cimentaciones de algunas edificaciones no forman losas rígidas que permitan un asentamiento uniforme a través de toda la superficie de la zona de hundimiento, se generan asentamientos locales o parciales en algunos muros de las viviendas, esto es, que la construcción en su totalidad no se hunde como cuerpo rígido, y en función de la rigidez, resistencia y acomodo de muros de planta baja, y de su cimentación de mampostería, se generan dichos asentamientos diferenciales y fallas locales en sus elementos, trayendo por consecuencia una cantidad muy alta de daños que no solamente se muestran en los elementos estructurales inferiores, tales como el piso, la cimentación y los muros, sino que hasta en las bóvedas o losas que forman los techos superiores de la construcción, y en los siguientes niveles para construcciones de dos o más pisos.

3.5. CENSOS DE DAÑOS A EDIFICACIONES DE LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran ejemplos de aplicación de la metodología seleccionada para evaluar los daños estructurales en dos de las edificaciones censadas, donde en la fig 3.2 se obtuvo una condición estructural “mala” y en la fig. 3.3 se obtuvo una condición estructural “dañada”.



Figura 3.2 Obtención del IEC en edificación con condición estructural “mala”

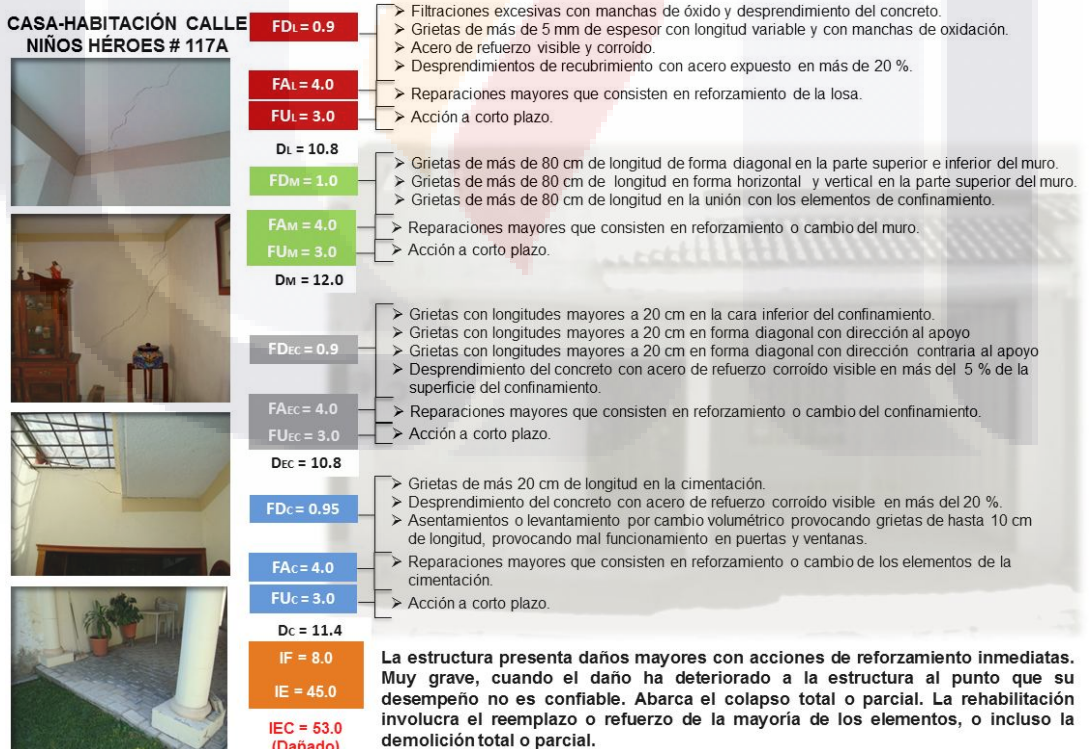


Figura 3.3 Obtención del IEC en edificación con condición estructural “dañada”

En la tabla 3.17 se muestran los valores obtenidos de los índices funcionales y estructurales, así como el índice de estado de condición para 44 edificaciones censadas, las cuales no solamente fueron viviendas, sino también lugares públicos como iglesia, asilo de ancianos, escuela, locales comerciales y restaurante, observándose daños leves en algunas construcciones pero severos y a punto del colapso en otras, asimismo se encontraron 2 viviendas demolidas completamente debido al alto daño generado por la subsidencia, y otras más que han sido reparadas constantemente a pesar de que los daños se siguen presentando en sus elementos. Las condiciones estructurales obtenidas en las edificaciones variaron sus calificativos desde buena, regular, mala, dañada y muy dañada, siendo las primeras tres condiciones muy factibles de reparación, la cuarta con posibilidad de reparación muy costosa, pero la última a punto del colapso o representando un alto riesgo para sus habitantes por los daños irreparables en la edificación.

En el anexo A se muestran de forma detallada los factores obtenidos durante la elaboración de los censos de cada una de las edificaciones seleccionadas para el presente estudio.

Tabla 3.17 Índice de Estado de Condición de las edificaciones censadas

Censo	Domicilio	Alineación de Daño	Índice Funcional (IF)	Índice Estructural (IE)	Índice de Estado de Condición (IEC)	Condición Estructural
1	Asilo Jocotepec	Sur	7.00	37.80	44.80	Dañado
2	Juárez # 78	Centro	8.00	23.40	31.40	Dañado
3	Independencia # 93	Centro	7.00	33.00	40.00	Dañado
4	Juárez # 86	Centro	4.00	13.85	17.85	Malo
5	Independencia # 175	Sur	8.00	59.00	67.00	Muy dañado
6	Independencia # 180	Sur	9.00	57.80	66.80	Muy dañado
7	Hidalgo # 66	Centro	4.00	8.00	12.00	Regular
8	Hidalgo # 70	Centro	7.00	20.76	27.76	Dañado
9	Hidalgo # 73	Centro	6.00	15.30	21.30	Dañado
10	Hidalgo # 71	Centro	5.00	9.30	14.30	Regular
11	Hidalgo # 68	Centro	7.00	28.30	35.30	Dañado
12	Miguel Arana # 76	Centro	5.00	23.00	28.00	Dañado
13	Miguel Arana # 112	Centro	6.00	19.30	25.30	Dañado
14	Churubusco # 14	Sur	7.00	28.55	35.55	Dañado
15	Vicente Guerrero # 227	Sur	6.00	19.51	25.51	Dañado
16	Vicente Guerrero # 185	Sur	4.00	10.90	14.90	Regular
17	Niños Héroe # 117-A	Centro	8.00	45.00	53.00	Dañado
18	Niños Héroe # 122-A, B y C	Centro	9.00	59.00	68.00	Muy dañado
19	Juárez # 186-A	Centro	8.00	41.25	49.25	Dañado
20	Juárez # 186-B	Centro	7.00	35.60	42.60	Dañado
21	Juárez # 174-A	Centro	7.00	40.35	47.35	Dañado
22	Juárez # 174	Centro	9.00	56.60	65.60	Muy dañado
23	Allende # 53	Norte	4.00	8.85	12.85	Regular
24	Allende # 69	Norte	4.00	15.50	19.50	Malo
25	Allende # 71	Norte	4.00	7.40	11.40	Regular
26	Allende # 77	Norte	5.00	11.40	16.40	Malo
27	Hidalgo # 97 Y 99	Norte	7.00	17.65	24.65	Dañado
28	Hidalgo # 68	Norte	6.00	18.40	24.40	Dañado
29	Hidalgo # 89	Norte	5.00	12.60	17.60	Malo
30	Hidalgo # 65	Norte	7.00	10.80	17.80	Malo
31	Hidalgo # 80	Norte	7.00	33.60	40.60	Dañado
32	Hidalgo # 82	Norte	3.00	9.40	12.40	Regular
33	Hidalgo # 73	Norte	6.00	17.70	23.70	Dañado
34	Guadalupe Victoria # 93	Norte	8.00	39.90	47.90	Dañado
35	Guadalupe Victoria # 82	Norte	6.00	20.85	26.85	Dañado
36	Hidalgo # 213	Sur	3.00	1.65	4.65	Bueno
37	Hidalgo # 219	Sur	9.00	38.10	47.10	Dañado
38	Josefa Ortiz de Dominguez # 264	Sur	7.00	33.90	40.90	Dañado
39	Josefa Ortiz de Dominguez # 262	Sur	3.00	3.45	6.45	Aceptable
40	Churubusco # 15-A	Sur	7.00	30.00	37.00	Dañado
41	Churubusco # 16	Sur	6.00	4.80	10.80	Regular
42	Churubusco # 11	Sur	7.00	8.10	15.10	Malo
43	Independencia # 179	Sur	8.00	43.65	51.65	Dañado
44	Independencia # 181	Sur	7.00	27.90	34.90	Dañado

3.6. DAÑOS ESTRUCTURALES EN LAS EDIFICACIONES

En las figuras 3.4a hasta 3.4 j, se muestran los múltiples daños que se han detectado en viviendas y edificios públicos afectados por la subsidencia, los cuales reducen la estabilidad de las construcciones y se encuentran ubicados en todo tipo de elementos estructurales principales.



a) Daños en vialidades y fachadas



b) Asentamientos diferenciales



c) Desnivel en planta alta



d) Daños en muros de lindero



e) Daños en planta alta



f) Daños en pisos



g) Demolición parcial de vivienda

h) Daños en edificios públicos



i) Daños en techos de viviendas

j) Daños en escuelas

Figura 3.4 Daños en viviendas y edificios públicos por la subsidencia

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Para el análisis estadístico de resultados de los censos de patologías de daños en las edificaciones, se empleó el programa de análisis estadístico “Statgraphics”, de acuerdo a los siguientes procedimientos básicos:

- Se analizaron los Índices de Estado de Condición obtenidos a través de un análisis de varianza (anova), el cual ofrece la posibilidad de determinar diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de uno o más factores de un experimento o exploración, definiéndose de esta manera la posible influencia en la variable de respuesta estudiada. En el análisis de varianza existe un parámetro inicial que es un nivel de significancia *P-Value*, el cual representa lo que en una

prueba de hipótesis se conoce como probabilidad de cometer un error tipo I (Probabilidad de rechazo de H_0 cuando es verdadera, donde H_0 se conoce como hipótesis nula). Este valor se establece generalmente en 0.05. A fin de determinar un nivel de significancia de cada factor estudiado, se aplica un estadístico de prueba basado en el análisis de varianza. Cuando dicho nivel resulta mayor que *P-Value*, se determina que ese factor no tiene una influencia estadísticamente significativa sobre la variable de respuesta. Caso contrario, cuando el factor presenta un nivel de significancia menor que *P-Value*, se establece que tal factor sí tiene influencia estadísticamente significativa sobre la variable de respuesta. De entre todos los factores, aquél que presenta el valor de nivel de significancia más bajo, representa la mayor influencia en la variable de respuesta.

- Para cuantificar la homogeneidad de los factores en la variable de respuesta estudiada se realiza un análisis de rangos múltiples, el cual permite definir qué niveles de los factores en estudio son estadísticamente diferentes entre sí, y cuáles de estos niveles optimizan la respuesta. De acuerdo al formato de salida de dicho análisis, la columna de grupos homogéneos permite visualizar qué niveles de los factores son estadísticamente similares entre sí. Esto se hace por medio de letras "X". Si dos niveles de un factor son estadísticamente diferentes, las correspondientes letras X aparecen desfasadas entre sí, y cuando dichos niveles son estadísticamente iguales, las correspondientes letras X aparecen alineadas una bajo la otra. Por lo tanto con este método se puede definir qué factor y qué nivel de tal factor realmente influye y optimiza la variable de respuesta analizada.
- Para conocer el comportamiento con el cual los datos se distribuyen alrededor de la media, es necesario realizar una representación visual simple de la distribución, denominado como Histograma de Frecuencia, que se construye ordenando los datos en intervalos. Los intervalos se grafican sobre el eje de las abscisas y la frecuencia de ocurrencia de estos se grafica en el eje de las ordenadas. Si se tiene un conjunto grande de datos, a menudo el histograma se transforma de un diagrama de barras a una curva suave. La curva simétrica y homogénea sobrepuesta a la gráfica de barras, indica una distribución normal de los datos.

A través de inspecciones realizadas en la localidad de Jocotepec, se han detectado por el momento tres zonas de alineamientos de daños en edificaciones, clasificadas como norte, centro y sur. De momento se tienen 13 censos en la zona norte, 16 censos en la zona centro y 15 en la zona sur, habiéndose aleatorizado previamente las muestras para su evaluación. De los análisis de varianza realizados por cada zona se obtuvo la tabla 3.18, en la cual se puede observar que el valor $P\text{-Value}=0.1047$ es mayor a 0.05, por lo tanto se determina que no existen diferencias estadísticamente significativas de sus Índices de Estado de Condición entre las zonas norte, centro y sur, para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3.18 Análisis de varianza para el IEC por alineaciones

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Media al cuadrado</i>	<i>P-Value</i>
Entre los grupos	1355.24	2	677.621	0.1047
Dentro de los grupos	11645.6	41	284.039	
Total (Corr.)	13000.9	43		

En la tabla 3.19, se presentan los resultados del análisis de rangos múltiples, realizado con el método LSD (Fisher's least significant difference) para un 95% de confianza, que para el caso de las tres zonas fueron homogéneas, por lo tanto no hay una diferencia estadísticamente significativa para el índice de Estado de Condición entre las alineaciones norte, centro y sur.

Tabla 3.19 Análisis de rangos múltiples del IEC para las zonas norte, centro y sur

<i>ALINEACIÓN</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos homogéneos</i>
NORTE	13	22.7731	X
SUR	15	34.4267	X
CENTRO	16	35.3575	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
CENTRO - NORTE		12.5844	12.709
CENTRO - SUR		0.930833	12.2326
NORTE - SUR		-11.6536	12.8975

En la figura 3.5, se muestran los diagramas de cajas correspondientes a las tres alineaciones de estudio. Para la alineación centro se detecta que no hay mucha variabilidad con respecto a la media de $IEC=35.36$. En el 50% de los datos estudiados el IEC se encuentra entre 24 y 48 (con poca dispersión) cayendo en una condición

estructural dañada, el primer 25% de los datos el IEC se encuentra entre 12 y 24 con una condición estructural de las edificaciones entre regular, mala y con poco daño; y el 25% restante de los datos el IEC se encuentra entre 48 y 68 con una condición estructural en las edificaciones de mucho daño. Para la alineación norte se detecta que no hay mucha variabilidad con respecto a la media de $IEC=22.77$; en el 50% de los datos estudiados el IEC se encuentra entre 16 y 25 (con poca dispersión) cayendo en una condición estructural de mala a poco daño, el primer 25% de los datos el IEC se encuentra entre 12 y 16 con una condición estructural de las edificaciones entre regular y mala; y el 25% restante de los datos el IEC se encuentra entre 25 y 48 con una condición estructural en las edificaciones de daño. Para la alineación sur se detecta que sí hay mucha variabilidad con respecto a la media de $IEC=34.43$; en el 50% de los datos estudiados el IEC se encuentra entre 15 y 47 (con mucha dispersión) cayendo en una condición estructural desde mala hasta dañada, el primer 25% de los datos el IEC se encuentra entre 4 y 15 con una condición estructural de las edificaciones entre bueno, aceptable y regular; y el 25% restante de los datos el IEC se encuentra entre 47 y 68 con una condición estructural en las edificaciones de daño y muy dañadas.

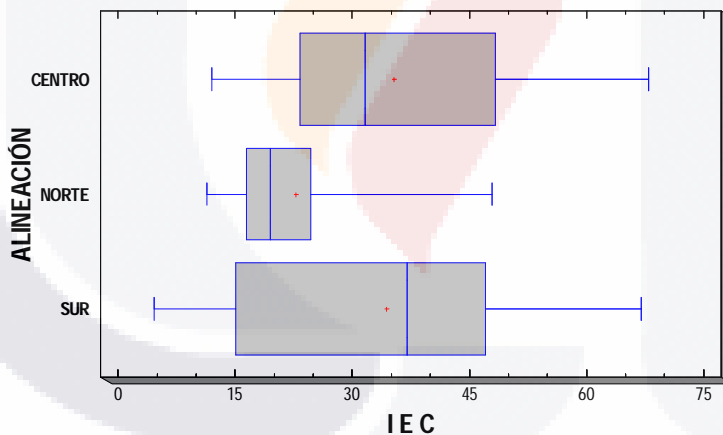


Figura 3.5 Diagramas de cajas del IEC para las zonas centro y sur

En la figura 3.6, se muestra el gráfico de medias del IEC para un intervalo de confianza del 95%, y en la tabla 3.20 sus correspondientes valores numéricos con sus límites inferiores y superiores, además de su error estándar. Para la alineación centro la media del IEC fue de 35.36, los valores mínimo y máximo de 29.34 y 41.37 respectivamente con un error estándar de 4.21; para la alineación norte la media del IEC fue de 22.77, los valores mínimo y máximo de 16.10 y 29.45 respectivamente con un error

estándar de 4.67; y para la alineación sur la media del IEC fue de 34.43, los valores mínimo y máximo de 28.21 y 40.64 respectivamente con un error estándar de 4.35. Debido a que los errores en las tres alineaciones fueron menores a 5.00, se concluye que los muestreos seleccionados fueron suficientes para lograr un 95% de confianza en el análisis estadístico.

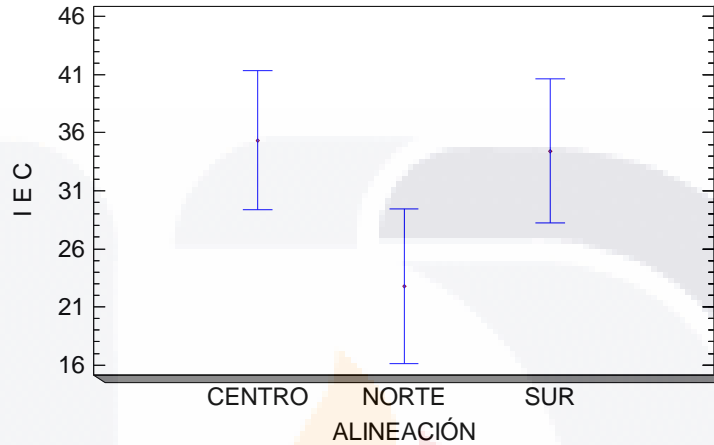


Figura 3.6 Gráfico de medias del IEC para las zonas centro, norte y sur

Tabla 3.20 Tabla de medias del IEC con límites y error estándar

<i>ALINEACIÓN</i>	<i>Cantida d</i>	<i>Media</i>	<i>Error estándar (agrupado)</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
CENTRO	16	35.3575	4.21337	29.3407	41.3743
NORTE	13	22.7731	4.67431	16.098	29.4482
SUR	15	34.4267	4.35155	28.2125	40.6408
Total	44	31.322			

En la figura 3.7, se muestra el histograma de frecuencias del Índice de Estado de Condición, en el cual se observa la ubicación de la media para los 44 censos en 31.32, denotando la gráfica de barras una curvatura de campana con una distribución normal y un tanto simétrica.

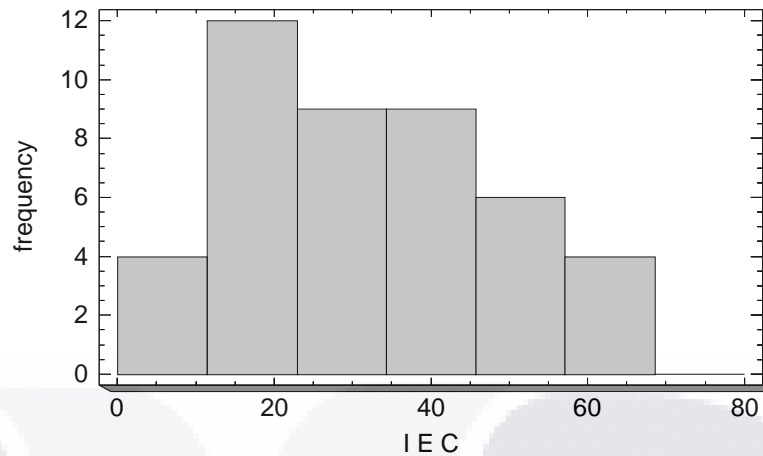


Figura 3.7. Histograma de frecuencias del IEC para las zonas norte, centro y sur

Cabe mencionar que se revisaron los supuestos de varianza, independencia y normalidad de los Índices de Estado de Condición, y los gráficos indicaron que el estudio se realizó adecuadamente. De momento se puede inferir que las viviendas de la zona sur están más dañadas que las de la zona centro, lo cual puede ser un indicio de que en esa zona se está deformando más el suelo, o tiene más tiempo de ocurrencia de daño en las viviendas.

3.8. CONCLUSIONES

De acuerdo a exploraciones realizadas en toda la zona urbana de Jocotepec y sus alrededores, se localizaron hasta 126 edificaciones dañadas, y al unir los puntos de ubicación entre ellas, se delinearon las tres fallas por subsidencia que actualmente son las más significativas en la localidad. Las fallas delineadas se presentan como escarpes superficiales en las vialidades y cruzan varias manzanas donde existe una alta densidad de construcciones. Se obtuvo el Índice de Estado de Condición (IEC) de acuerdo a la metodología propuesta por Alonso (2010), de 44 edificaciones ubicadas en las alineaciones de daños norte, centro y sur de la localidad, donde se realizaron diversos análisis estadísticos y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- A través de un análisis estadístico con un intervalo de confianza del 95% se obtuvo una media de $IEC=31.32$, quedando en una condición estructural dañada.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Para la alineación norte la media del IEC fue de 22.77, con un error estándar de 4.67; para la alineación centro la media del IEC fue de 35.36, con un error estándar de 4.21; y para la alineación sur la media del IEC fue de 34.43, con un error estándar de 4.35.
 - De acuerdo al análisis de rangos múltiples (LSD, 95% de confianza), las tres zonas (norte, centro y sur) fueron homogéneas, por lo tanto no hay una diferencia estadísticamente significativa para el índice de Estado de Condición entre ellas.
 - En la mayoría de los casos se presentaron agrietamientos en muros de carga principales, provocados por asentamientos diferenciales que denotan el hundimiento hacia el sur en la alineación de la zona centro y hacia el norte en la alineación de la zona sur. En menor magnitud se observaron diversos daños en pisos y losas y en 2 ocasiones la demolición total de los inmuebles por su excesivo daño e inestabilidad.
 - De momento se infiere que las viviendas de las zonas centro y sur están más dañadas que las de la zona norte, debido a que en esa zona se está deformando más el suelo, o tiene más tiempo de ocurrencia de daño debido a la subsidencia.
 - La mayoría de las edificaciones dañadas, no cumplen con un diseño estructural ni construcción adecuados, ya que los sistemas constructivos empleados son de autoconstrucción con una calidad baja a media.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR DESEMPEÑO EN EDIFICACIONES AFECTADAS POR SUBSIDENCIA EN LA LOCALIDAD DE JOCOTEPEC, JALISCO, MÉXICO

4.1. INTRODUCCIÓN

La localidad de Jocotepec se ubica al poniente de la ribera del lago de Chapala y a 45 km del sur de la ciudad de Guadalajara, capital del estado de Jalisco, México (fig. 2.5), en donde se han detectado deformaciones verticales en el suelo por el fenómeno de subsidencia por extracción de agua del subsuelo y por la consolidación de estratos, principalmente limo-arcillosos y limo-arenosos. Debido al reacomodo del suelo se han detectado hundimientos de hasta 71.6 mm cerca del centro de la población durante un periodo continuo de medición de ocho meses en el año 2012 (Hernandez-Marin et al, 2014), y se han generado escarpes en algunas vialidades que han afectado a la infraestructura urbana y a algunas edificaciones.

Durante los últimos veinte años se han presentado múltiples daños a más de cien edificaciones en la población de Jocotepec, y que a través de censos y análisis estadísticos a 44 de ellas, se han clasificado sus condiciones estructurales desde regulares hasta muy dañadas (Ramírez-Cortés y Hernández-Marín, 2013), donde han predominado los asentamientos diferenciales en los principales muros de carga de las construcciones, cuyos agrietamientos y deformaciones se han transmitido a los techos o muros de los niveles superiores (figs. 3.4a-3.4c), provocando esto que se propongan reforzamientos de todos tipos, o en ocasiones se presenten hasta demoliciones parciales o totales de algunas edificaciones debidas a su inestabilidad estructural (fig. 3.4g).

La mayor parte de las edificaciones de la localidad de Jocotepec están elaboradas con mampostería de ladrillos de barro recocido o con blocks de jalcreto, por lo que sus muros tienen un comportamiento frágil; debido a lo anterior se les diferencia de las estructuras dúctiles, porque las limita a un umbral de daños más corto, aunque inicialmente ofrecen mucha rigidez elástica pero también con deformaciones laterales muy pequeñas.

Para distinguir un poco la diferencia entre los comportamientos de los dos tipos de materiales, dúctiles y frágiles, se presentan en la fig. 4.1 las gráficas que relacionan el cortante basal contra la deformación lateral para cualquier tipo de estructura, así como sus niveles de desempeño ante el procedimiento Push-over, por lo que se definirán a continuación dichos niveles y que servirán para acotar el comportamiento en las estructuras de mampostería y de concreto de este estudio:

1. Ocupación inmediata: los daños son relativamente pequeños y la estructura retiene la mayor parte de su rigidez inicial y casi toda su resistencia.
2. Seguridad de vida: han ocurrido daños significativos a la estructura, y ha habido una pérdida grande de su rigidez inicial, pero se han acumulado deformaciones laterales antes de que ocurra el colapso de la estructura.
3. Prevención de colapso: le ha ocurrido un daño extremo a la edificación. Si se sigue deformando la estructura, puede manifestar inestabilidad y el colapso.

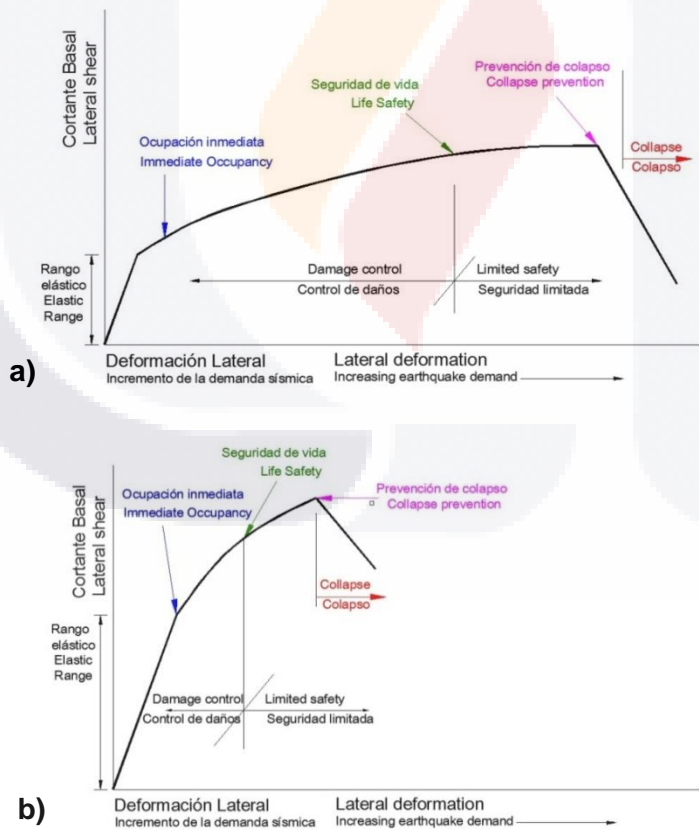


Figura 4.1 Gráficas de desempeño para materiales dúctiles y frágiles. a) Desempeño y deformación lateral para estructuras dúctiles. b) Desempeño y deformación lateral para estructuras frágiles

La necesidad de realizar métodos de análisis de edificaciones más eficientes que no solo consideren el concepto de resistencia física sino el desempeño estructural, ha permitido que el análisis Push-over sea más ampliamente utilizado en todo el mundo, ya que a partir de la década de los noventa del siglo pasado, se ha ido modificando la filosofía de diseño de estructuras sismo-resistentes, considerando que no necesariamente un incremento en la resistencia global de una estructura puede garantizar la seguridad y, por consiguiente, reducir su daño. Park y Paulay (1975) fueron los precursores de introducir en Nueva Zelanda el diseño por capacidad y Priestley (2000) aportó bases para controlar y predecir el comportamiento de la estructura y su potencial de daño. En Estados Unidos se han desarrollado trabajos de la ingeniería basada en el desempeño tanto en el ATC-40, en el FEMA 356 y en el comité VISION 2000. En Europa múltiples investigadores de Italia, Albania y Turquía, entre otros países, han utilizado esta metodología para el diseño y reforzamiento de estructuras dañadas. En México destacan los trabajos realizados por Terán (2002) donde presenta los antecedentes, conceptos generales y perspectivas del diseño por desempeño, para posteriormente en otros trabajos desarrollar otras opciones de modelado con la analogía de la “Columna Ancha” en edificaciones de concreto y de mampostería.

Un análisis por desempeño “Push-over” es la implementación de un procedimiento de análisis no lineal estático utilizado para determinar la relación entre el cortante basal y la capacidad de deformación de una estructura, ante la aplicación de cargas laterales en cada uno de sus niveles, simulando el efecto de las fuerzas inerciales que afectan a la estructura durante un sismo, lo que también permite conocer su umbral de comportamiento elasto-plástico y su capacidad o resistencia máxima. Por lo tanto el empleo de la metodología de análisis Push-over cada vez logra más aceptación para el diseño de estructuras sismo-resistentes, debido a que en la actualidad existen programas de cómputo para desarrollarlo de forma más precisa y detallada, donde se conoce con ello el comportamiento y desempeño estructural, así como la evolución de daños que son a corto plazo, más sin embargo igual de severos a los que producen los asentamientos diferenciales en una edificación, con la diferencia de que estos últimos son a largo plazo.

Debido a que actualmente el método de análisis por desempeño “Push-over” tiene su aplicación para conocer el comportamiento y resistencia de las estructuras ante

sismos, así como para realizar diversas propuestas de reforzamiento, en el presente capítulo se propone su aplicación y adaptación como análisis “Pull-down”, para evaluar el comportamiento y daño en edificaciones afectadas por subsidencia, que si bien es un fenómeno muy lento en su ocurrencia a comparación de los eventos sísmicos, puede ocasionar daños mayores debido al constante y a veces imparable desplazamiento del suelo, ya que le resta sustentabilidad a las estructuras, provocando con esto que sus elementos de apoyo rebasen sus resistencias máximas y llegando en ocasiones al colapso. Por lo tanto, el análisis estructural propuesto en esta investigación y denominado “Pull-down”, tendrá como objetivo conocer la resistencia de las edificaciones ante diferentes niveles de distorsión que se van generando durante la ocurrencia de asentamientos diferenciales por subsidencia en los muros de apoyo, de acuerdo a la asignación de estados límite de daño que relacionan los niveles de desempeño con las distorsiones generadas en puntos estratégicos de las edificaciones, así como también conocer el nivel de esfuerzos que tenga cada elemento de la estructura.

Para llevar a cabo el análisis “Pull-down”, se simularán los asentamientos diferenciales en una edificación, agregando deformaciones verticales en los apoyos, y se adaptará el procedimiento de Análisis No Lineal Estático de empujar lateralmente la estructura hasta un nivel de desempeño deseado, bien sea por control de desplazamientos o por control de carga; además se revisará el desempeño de las estructuras ante espectros de diseño locales de acuerdo a la normativa vigente en la localidad de estudio. La aplicación del método Pull-down es apenas reciente, y entre algunos trabajos destaca el desarrollado por Hernández-Castillo et al. (2014), quienes emplearon el método estático no lineal (Pull-down) para evaluar el desempeño de edificaciones elaboradas con muros ligeros armados con secciones de acero de pared delgada formadas en frío, obteniendo sus curvas de fragilidad. Pero a pesar de lo anterior, cabe resaltar que actualmente se han encontrado muy pocas investigaciones enfocadas a estos tópicos, por lo que el procedimiento de análisis “Pull-down”, servirá de precursor para evaluar edificaciones afectadas por subsidencia, ante cualquier tipo de estructuración o dimensionamiento o con cualquier tipo de material, sea concreto, mampostería, e incluso muros de paneles hechos con bastidores de acero rolado en frío.

4.2. CRITERIOS DE DESEMPEÑO QUE SE HAN APLICADO EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL

Para entender el enfoque de un análisis estático no lineal en una estructura es necesario conocer su umbral de desempeño y con ello poder determinar su resistencia cuando el sistema estructural falle. Un ejemplo común se puede observar cuando se aplican fuerzas laterales simulando el sismo a cada nivel de entrepiso de un marco bidimensional, donde se considera que cada entrepiso es infinitamente rígido en su plano, por lo tanto los nudos de cada nivel se desplazan simultáneamente con la misma magnitud, debido a que el análisis se hace en la dirección del plano del marco, y los desplomes generados se registran con un nudo de control, que regularmente corresponde al del nivel más alto de la estructura, para conocer sus máximos desplazamientos.

De acuerdo a Vielma-Pérez (2008) existen dos criterios para evaluar el desempeño en una estructura, uno está en función de los índices de daño que se pueden obtener a nivel global de la estructura, pero con la desventaja de que no se obtiene una magnitud física real, y el otro se basa en cantidades relacionadas con el daño por los desplomes máximos ocurridos en ciertos puntos de la estructura, a los cuales se les denomina como puntos de control. Cuando una estructura es regular tanto en planta como en elevación, es decir que exista cierta simetría y ortogonalidad en la ubicación de los apoyos y que no hayan diferencias significativas entre las alturas de los diferentes niveles (mezanines o dobles alturas), los desplazamientos obtenidos Δ_i son fácilmente asimilables con la respuesta del primer modo de vibración, pero para edificios tanto regulares como irregulares, es más conveniente obtener la distorsión relativa entre los desplazamientos de dos niveles adyacentes δ_i (fig. 4.2), donde se cuantifica de manera más precisa el daño tanto en elementos estructurales como no estructurales; la distorsión relativa se calcula al dividir las diferencias máximas de los desplazamientos horizontales de piso en una dirección determinada, entre la altura promedio del entrepiso, por lo que se obtiene un valor adimensional:

$$\delta_{nivel_i} = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h_i - h_{i-1}}$$

N_i =Número de piso

$N_{i-1,2,3,etc}$ =Número de piso anterior a N_i

Δ_i =Desplome del nivel de cubierta en estudio

$\Delta_{i-1,2,3,etc}$ =Desplome del nivel de cubierta anterior a Δ_i

h_i =Altura total del edificio

$h_{i-1,2,3,etc}$ =Altura del edificio anterior a h_i

Δ_i/h_i =Desplome normalizado del nivel de cubierta

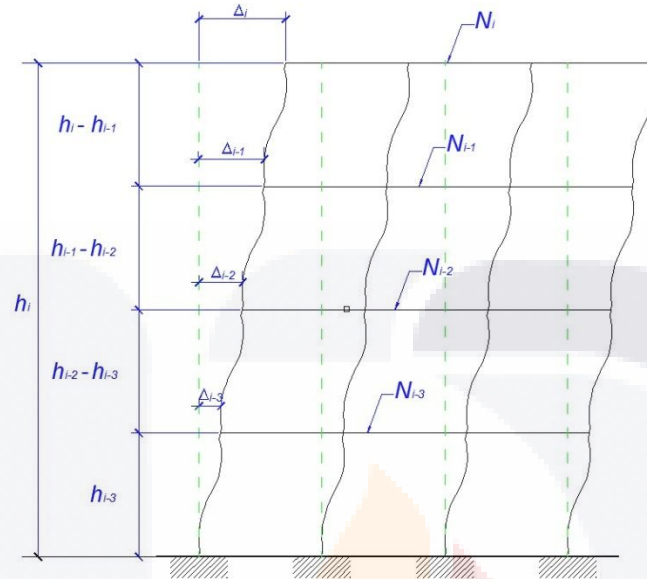


Fig. 4.2 Distorsiones de marco ante cargas laterales (Vielma-Pérez, 2008)

4.3. AVANCES EN LA CLASIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE DAÑOS

Conforme una estructura presenta deformaciones debido a la ocurrencia de algún sismo, vientos, empuje hidrostático, cargas externas, o por asentamientos diferenciales en sus elementos de apoyo, se pueden sobrepasar los esfuerzos elásticos de sus materiales constituyentes y llegar a un comportamiento inelástico, por lo que pueden surgir daños o deformaciones permanentes que conduzcan a la estructura a un deterioro mayor o incluso al colapso, así como a la incomodidad, inseguridad o mortandad de sus ocupantes; por lo tanto ha sido necesario establecer “Estados Límite de Daños” que son una relación de los niveles de desempeño estructural con cierto tipo de daño permisible en los elementos estructurales o en los no estructurales, o algún otro parámetro geométrico (curvatura) o de resistencia nominal de los materiales. Algunos investigadores han relacionado las deformaciones o distorsiones relativas de piso de las edificaciones con diferentes estados límite de daños para estructuras de concreto o de mampostería, cuyos avances se presentan resumidos a continuación:

Jain y Navin (1995) determinaron que el comportamiento plástico idealizado de una estructura, se alcanzaba para el 2.5% de la altura del edificio como la deformación máxima del último nivel, a fin de no incursionar en efectos de segundo orden (efecto $P-\Delta$). Kiremidjian y Singhal (1995) estudiaron el daño sísmico en edificios de concreto reforzado, y sugirieron rangos de valores para limitar los daños tanto a nivel local como global, basándose en el espesor estimado de grietas para daños leves, y en la distorsión relativa para estados más elevados de daño.

Calvi (1999) relacionó los valores de las distorsiones relativas de entrepiso con los estados límite de los edificios de mampostería, de acuerdo a:

1. *Estado límite 1.* No ocurre ningún tipo de daño ni en los elementos estructurales ni en los no estructurales. Las distorsiones relativas son demasiado pequeñas y son elásticas, por lo cual no existen deformaciones acumulativas.
2. *Estado límite 2.* Se alcanzan daños menores en los elementos estructurales y moderados en los elementos no estructurales, permitiendo la ocupación inmediata del edificio, sin necesidad de reparar o reforzar la estructura. Las distorsiones relativas llegan hasta 0.1%.
3. *Estado límite 3.* Hay un significativo daño estructural y grandes daños de elementos no estructurales. El edificio requerirá reparación o reforzamiento, pero no llega al colapso, por lo que se pueden preservar todavía vidas. La reparación no solo debe ser factible sino también económica. Las distorsiones relativas van del 0.1% al 0.3%.
4. La estructura llega a colapso y debe ser demolida, ya que su reparación no es conveniente ni posible. Las distorsiones relativas exceden o van del 0.3% al 0.5%.

Kappos y Manafpour (2001) revisaron edificios de concreto y sugirieron la revisión del procedimiento de acuerdo a dos estados límite: el estado de servicio y el estado límite último. Para el estado de servicio limitaron la máxima distorsión de entrepiso de 0.02% al 0.05%, donde se asume que el valor más bajo corresponde a materiales muy frágiles como la mampostería, y los valores más altos a materiales más flexibles en los cerramientos. Para el estado límite último limita los valores de las rotaciones de las rótulas en las vigas de acuerdo al FEMA 273, con valores de 0.005 radianes para las vigas.

Mwafi y Elnashai (2002) combinaron criterios de fallas locales y globales, basados en la curvatura de secciones de concreto reforzado y en no exceder la resistencia nominal a cortante. Los criterios globales comparan el desplome máximo del edificio a un 3% de la altura total del edificio, aún los desplomes relativos.

Lu (2002) demostró mediante ensayos por carga cíclica de edificios de concreto reforzado a escala y con diferentes configuraciones, que para edificios hechos a base de marcos, la respuesta histerética se mantiene estable para desplomes relativos del nivel máximo inferiores al 2.4% de la altura máxima del edificio, y que se genera una rápida degradación de rigidez y resistencia para valores de deformaciones relativas mayores al 3% de la altura del edificio.

Balandra y Huang (2003) aplicaron el análisis inelástico a edificios de acero de acuerdo a los siguientes criterios: la deformación relativa se limita al 2% máximo, falla por capacidad de rotación para un elemento específico de la estructura; mecanismo de colapso de acuerdo a un número mínimo de rótulas plásticas que deben formarse y coincidir en un instante determinado para que la estructura se transforme en un mecanismo inestable bajo la acción de cargas horizontales. Y control de resistencia a cortante, donde se controlan los fallos indeseables (poco dúctiles) que ocurren bajo la acción de cortante, y su parámetro de control consiste en el coeficiente demanda/capacidad.

En México durante la última década del siglo pasado y la primera del siglo 21, Meli, Tena, Padilla, Urzua, Ramírez y otros, realizaron diversas pruebas a muros de mampostería para determinar su comportamiento dinámico ante cargas laterales de diferentes tipos, sean pseudoestáticas o dinámicas en base a acelerogramas sintéticos, o de historiales de sismos que han ocurrido en diversas partes del mundo, para calibrar sus Normas Técnicas de Diseño por Sismo y de Diseño de Estructuras de Mampostería. En la fig. 4.3a se muestra el comportamiento histerético de carga-descarga de un muro de mampostería de ladrillo de barro recocido, sometido a 13 ciclos de cargas pseudoestáticas, donde en cada ciclo se aplicaba la fuerza necesaria para alcanzar 2.5 mm de deformación horizontal en su extremo superior, simulando lo que teóricamente sería un análisis Push-over. En dicho gráfico se observa cómo va variando la rigidez en cada ciclo de carga que se aplicó al muro, y cómo se va incrementando la distorsión hasta valores

de resistencia última; además se indican los niveles de agrietamiento diagonal e inclinado y su resistencia máxima, que fungen como indicadores del comportamiento elasto-plástico que tuvo el muro durante la etapa de prueba (Ramírez-Cortés, 2004). En la figura 4.3b se observa la degradación de rigidez que alcanzó el muro durante todo el ensaye, mostrando su rigidez inicial elástica y cómo posteriormente incurrió en la etapa inelástica, para ir reduciendo paulatinamente su rigidez ante valores de distorsión muy altos de hasta 0.6%.

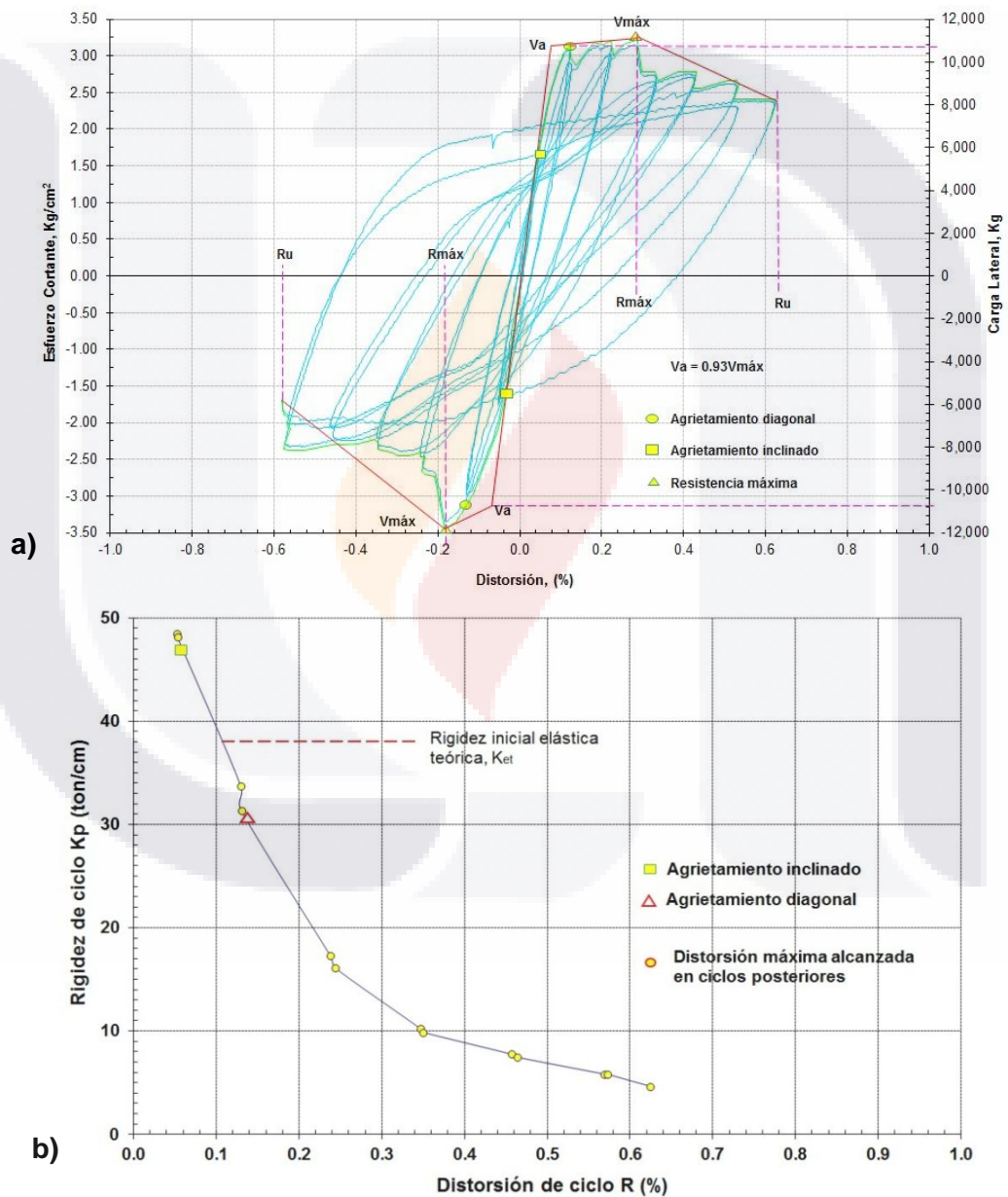


Fig. 4.3 Comportamiento trilineal experimental de muro de mampostería ante cargas pseudo-estáticas. a) Comportamiento histerético del muro. b) Degradación de rigidez del muro (Ramírez-Cortés, 2004)

Por lo tanto, de esta filosofía de análisis, se desprende el hecho de que sí es factible realizar un análisis Pull-down porque se podrían obtener resultados que ayuden a conocer el comportamiento, desempeño y resistencia de las estructuras que se analizan ante el fenómeno de subsidencia.

En la fig. 4.4 se muestra el daño final del muro ensayado cuya respuesta a la prueba fue regida por un comportamiento de tipo cortante, y donde se localizan las posiciones, tamaño y amplitud de los agrietamientos, datos que son muy útiles para establecer los niveles de daño para los límites designados en metodologías que evalúan las patologías de daño en edificaciones. Tal es el caso del método desarrollado por Alonso F. (2010), en el que en función de la localización, tamaño y amplitud de las grietas a cuatro elementos principales de una edificación (muros, techos, elementos de confinamiento y cimentación) asigna factores de daño que también son afectados por otros dos factores, uno de acción para saber si se requerirá algún tipo de reparación en el elemento estructural y otro factor que nos indica la urgencia en su reparación.

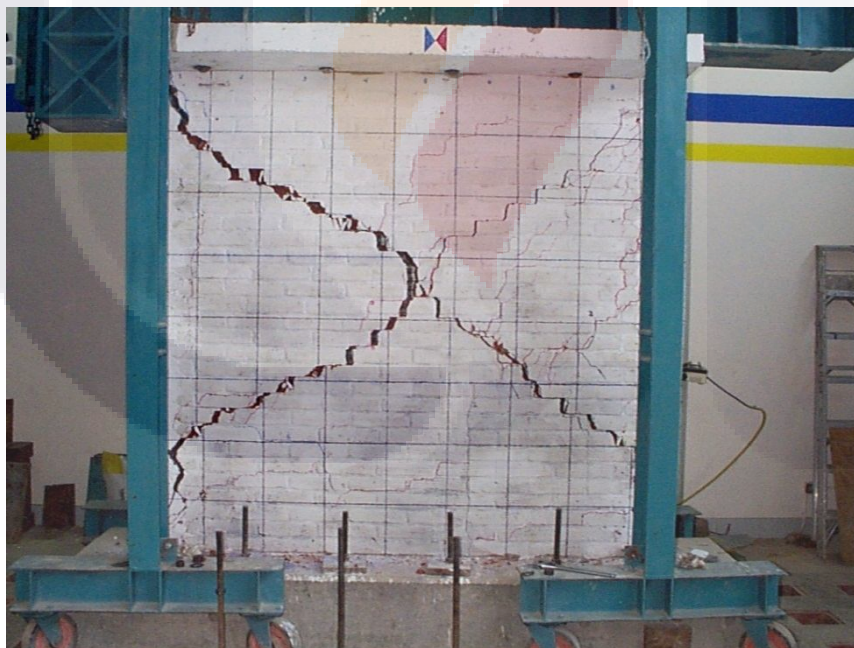


Fig. 4.4 Patrón de agrietamiento de muro ensayado por cargas laterales (Ramírez-Cortés, 2004)

Los tres factores multiplicados entre sí nos dan por resultado un factor de daño en cada elemento estructural afectado, y la suma de esos daños es igual a un índice

estructural (I_e). Posteriormente se evalúa el estado de mantenimiento y funcionalidad de la edificación con dos factores que al multiplicarse dan por resultado el Índice funcional (I_f). La suma de ambos índices ($I_e + I_f$) da por resultado el “Índice de Estado de Condición”, en el cual se muestra la condición de daño estructural de la edificación, que puede ir desde: excelente, bueno, aceptable, regular, malo, dañado y muy dañado. Los daños que se identifican más comunmente en esta metodología son: ruptura de cimentaciones por asentamientos diferenciales, agrietamientos diagonales en muros y columnas de apoyo desde su arranque hasta su extremo superior, ruptura y desprendimiento de elementos de confinamiento, agrietamientos en losas o bóvedas y colapsos parciales o totales de las edificaciones.

4.4. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE DESEMPEÑO SEGÚN NORMATIVA EXISTENTE

El análisis estático no lineal es completamente especificado en los documentos FEMA-356 y ATC-40 de los Estados Unidos, y dichos documentos son una alternativa al método de historial de tiempo como un medio de desarrollar una completa evaluación al edificio. Este procedimiento usa técnicas simplificadas no lineales para estimar las deformaciones estructurales sísmicas, por lo tanto se utilizará en nuestro caso para estudiar el desempeño de las edificaciones ante deformaciones generadas por asentamientos diferenciales del suelo por subsidencia del lugar.

Para determinar si una estructura alcanza un nivel esperado de desempeño, se compara la respuesta obtenida a partir del análisis estático no lineal con los límites para los niveles de desempeño apropiados. En la actualidad no existe un consenso general a nivel mundial que establezca una relación entre algún parámetro que represente la respuesta estructural, como por ejemplo la distorsión de entrepiso, y los estados de daño discreto o niveles de desempeño, más sin embargo el ATC-40, y el FEMA 273, entre otros, han propuesto algunos límites. En la tabla 4.1 se muestran las relaciones entre los niveles de desempeño y la distorsión de entrepiso de acuerdo al ATC-40 para cualquier tipo de estructura a base de marcos, aunque no es aplicable a estructuras de mampostería, por lo que solo es a nivel comparativo.

La sección 2.9.2.1. del FEMA 273 y la sección 2.4.2.1 del FEMA 356 estipulan que el análisis estático no lineal, no deberá ser usado para estructuras en las cuales los efectos de los modos más altos son significativos (usualmente para edificios con una altura mayor a los 30 metros). Para determinar si los modos más altos son significativos, deberá realizarse un análisis modal espectral para la estructura usando suficientes modos para capturar el 90 % de participación de la masa. Deberá realizarse también un segundo análisis de espectro de respuesta, considerando solo la participación del primer modo. Los efectos de los modos más altos deberán ser considerados significativos si el cortante en cualquier piso resultante del análisis modal considerando modos requeridos para obtener el 90% de participación de la masa excede el 130% del cortante de piso correspondiente considerando solo el primer modo de respuesta.

La Norma Mexicana de Construcciones de Mampostería Confinada (NTCM-2004) determina el valor de la distorsión permisible de 0.25% ante condiciones de servicio, y un valor de 0.4% para garantizar la seguridad contra el colapso. En la tabla 4.1 también se presentan los valores recomendados por Astroza y Schmidt (2004) como adecuación a la Norma Chilena de Diseño Sísmico de Edificios, quienes utilizaron información de ensayos realizados a 52 muros de mampostería confinada sometidos a cargas laterales en tres países latinoamericanos: Chile, México y Venezuela, cuyo comportamiento estuvo controlado por la falla de corte y que determinaron niveles de distorsión ante los diferentes estados límite. Por lo tanto en el presente estudio se utilizarán tales valores debido a que la mampostería es el material empleado en la construcción de edificaciones de la localidad de Jocotepec, Jalisco, México, para realizar el comparativo en los análisis Pull-down.

Tabla 4.1 Valores límite de distorsión máxima de entrepiso y niveles de desempeño.
a) según ATC-40, b) Según Astroza y Schmidt (2004)

Nivel de desempeño	Distorsión de entrepiso δ_i (% altura entrepiso)	Nivel de desempeño	Distorsión de entrepiso δ_i (%)
Ocupación inmediata	0.01	ELS a ELO	0.04 - 0.18
Seguridad	0.02	ELDC	0.19 - 0.62
Estabilidad estructural	$0.33 \frac{V_i}{P_i}$	ELR	0.61 - 1.00
		ELU	< 2.50

a)

ELS: Estado límite de servicio
 ELO: Estado límite operacional
 ELDC: Estado límite de daño controlado
 ELR: Estado límite de resistencia
 ELU: Estado límite último

b)

4.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ANÁLISIS PUSHOVER

A continuación se analizan las ventajas y desventajas del método Push-over de acuerdo a Vielma-Pérez (2008):

4.5.1. Ventajas:

1. Permite al diseñador evaluar los comportamientos estructurales y las características de desempeño.
2. Permite al diseñador investigar la formación secuencial de articulaciones plásticas en los elementos estructurales individuales que forman parte de la estructura entera y para determinar cómo trabajan los edificios por la identificación de los modos de falla y el potencial para el colapso progresivo.
3. Cuando una estructura va a ser reforzada a través de un proceso de rehabilitación, el procedimiento permite al diseñador seleccionar el refuerzo solo en los miembros requeridos, maximizando de esta manera la eficiencia del costo.

4.5.2. Desventajas:

1. Que en el procedimiento del análisis seudo estático, o análisis incremental de fuerzas, se postulaba inicialmente la ubicación de las rótulas plásticas y se establecía una ley de comportamiento de las mismas, simplificando el procedimiento, pero lo condicionaba a que el analista postulaba el mecanismo global de falla del edificio. Lo que no siempre es correcto debido a las diferentes respuestas, materiales y estructuraciones de los edificios.
2. Que la respuesta de la estructura en el rango plástico, muestra grandes desplazamientos para incrementos muy pequeños de las fuerzas aplicadas, generando la no convergencia de códigos de diseño: a) que para la fuerza cortante aplicada no se alcance el fallo, b) que para la fuerza cortante aplicada se haya sobrepasado el fallo.
3. Para la condición "a" se puede resolver aplicando un incremento al valor de la fuerza cortante hasta que se alcance el fallo, pero si el incremento es mayor la

fuerza puede sobrepasar al cortante último, por lo que es conveniente entonces aplicar el análisis no lineal por control de desplazamientos.

4. Con el procedimiento de control de desplazamientos, se aplican incrementos de desplazamientos a los nudos de la estructura, pero los inconvenientes son de que no existe una clara correlación entre los desplazamientos aplicados y el patrón de fuerzas equivalentes aplicados que los originan, teniendo que aplicar en ocasiones métodos alternativos donde se adicionan nuevos elementos estructurales.
5. Entonces debido a que la ley de comportamiento de los materiales no permite incorporar aspectos como el daño, pero sí el comportamiento plástico, se es muy difícil determinar el punto de desplome último, o punto de colapso.

4.6. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS PUSH-OVER Y PULL-DOWN EN LA EDIFICACIÓN

Para simular los efectos no lineales locales en estructuras con elementos de geometría unifilar (vigas y columnas), se asignan articulaciones a flexión en los extremos de conexión de algunos o de todos los elementos, y un incremento de carga lateral empuja a la estructura mientras se va definiendo un estado límite de capacidad, donde se puede rebasar el comportamiento elástico de los materiales empleados en dichas articulaciones, y con ello registrar a su vez las deformaciones generadas que servirán para determinar los niveles de desempeño de la estructura. Para el caso de estructuras con elementos en forma de placas o membranas (muros) se supone la ubicación de la rótula plástica en función de su altura y longitud, o bien se realizan análisis no lineales por elemento finito donde se considera el comportamiento plástico de los materiales que los conforman y la resistencia al cortante de los muros.

Una vez elaborado el análisis por desempeño de cualquier tipo de estructura, se comparan las deformaciones de piso o distorsiones generadas con algunos parámetros de deformación establecidos por metodologías de análisis de daños en estructuras que han sido a su vez reglamentadas en algunos códigos de construcción locales e internacionales, entre ellos la FEMA (Federal Emergency Management Agency) y el ATC (Applied Technology Council), que aunque rigen en los Estados Unidos, son de útil

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

aplicación en las localidades de la República Mexicana, donde también se cotejan varios niveles de desempeño estructural en función de esas deformaciones: operacional, ocupación inmediata, seguridad de vida, prevención de colapso y colapso.

4.6.1. Metodologías para elaborar los análisis Push-over y Pull-down

Para realizar el análisis Push-over se llevan a cabo los siguientes tres pasos:

1. Se modela el edificio incorporando la respuesta inelástica de los materiales en los nudos de los miembros.
2. Se aplica monótonamente (en intervalos y con una misma magnitud de fuerza o desplazamiento) un incremento de fuerzas laterales o desplazamientos a un modelo matemático no lineal de un edificio, hasta que el desplazamiento del nodo de control (en la azotea), exceda un desplazamiento determinado (el cual representa el máximo desplazamiento probable esperado durante el sismo de diseño) o el colapso del edificio.
3. Se utiliza la gráfica de la curva de fuerza contra deformación para evaluar el desempeño de los miembros individuales una vez que es confirmado que el desplazamiento de la estructura total existe dentro del rango del punto de desempeño.

La metodología Pull-down que se está proponiendo para evaluar el desempeño de edificaciones dañadas por subsidencia, solo presenta dos variantes respecto a la del método Push-over, la primera es la de asignar asentamientos diferenciales en algunos nudos de apoyo donde se esté presentando la deformación en la edificación, y la segunda en vez de monitorizar las deformaciones horizontales de azotea que se obtienen con el análisis Push-over, se monitorizarán las deformaciones verticales que se generen en los nudos de control en los apoyos de la estructura, también seleccionados anticipadamente para detectar la evolución de los asentamientos.

4.6.2. Descripción de la edificación seleccionada para el estudio

La mampostería es un sistema constructivo ampliamente utilizado en las edificaciones de vivienda en toda la República Mexicana desde hace más de cuatro

siglos, y en el caso de la localidad de Jocotepec ha sido muy empleada debido a la existencia de arcilla en la ribera del Lago de Chapala, que es la principal materia prima para la fabricación de ladrillo de barro recocido, usando además blocks de jalcreto que han sido suministrados desde la Zona Metropolitana de Guadalajara; ambos materiales funcionan como piezas sólidas de la mampostería. La edificación seleccionada para la elaboración del presente estudio, está construida con mampostería confinada, esto es, con dalas y castillos perimetrales de concreto en todos los extremos e intersecciones de muros, a una separación horizontal no mayor de 4 mt y de 3 mt en la vertical, para el adecuado apoyo de la vigería de techo hacia los muros.

De acuerdo al estudio elaborado por Ramírez y Hernández (2013), de 44 edificaciones censadas se seleccionó la que está ubicada sobre una de las principales fallas por hundimientos diferenciales registradas en la localidad de Jocotepec, y que representa el patrón de deformación más común entre las edificaciones afectadas por subsidencia en esta localidad. La edificación se localiza muy cerca del centro de la población, y denota un hundimiento mayor en su extremo sur que coincide con el frente de la fachada, por lo que se observa que toda la casa se está hundiendo longitudinalmente hacia la calle. Es una edificación de dos niveles con coincidencia de muros de planta alta sobre los de planta baja y con irregularidad y asimetría estructural en planta, la fig. 4.5 muestra la distribución arquitectónica de esa vivienda afectada. En la actualidad la edificación ya presenta daños por asentamientos diferenciales en sus muros, con grietas que llegan hasta 3 mm de abertura, y que acusan perfectamente las trayectorias de desplazamiento del suelo donde están apoyados (fig. 4.6).

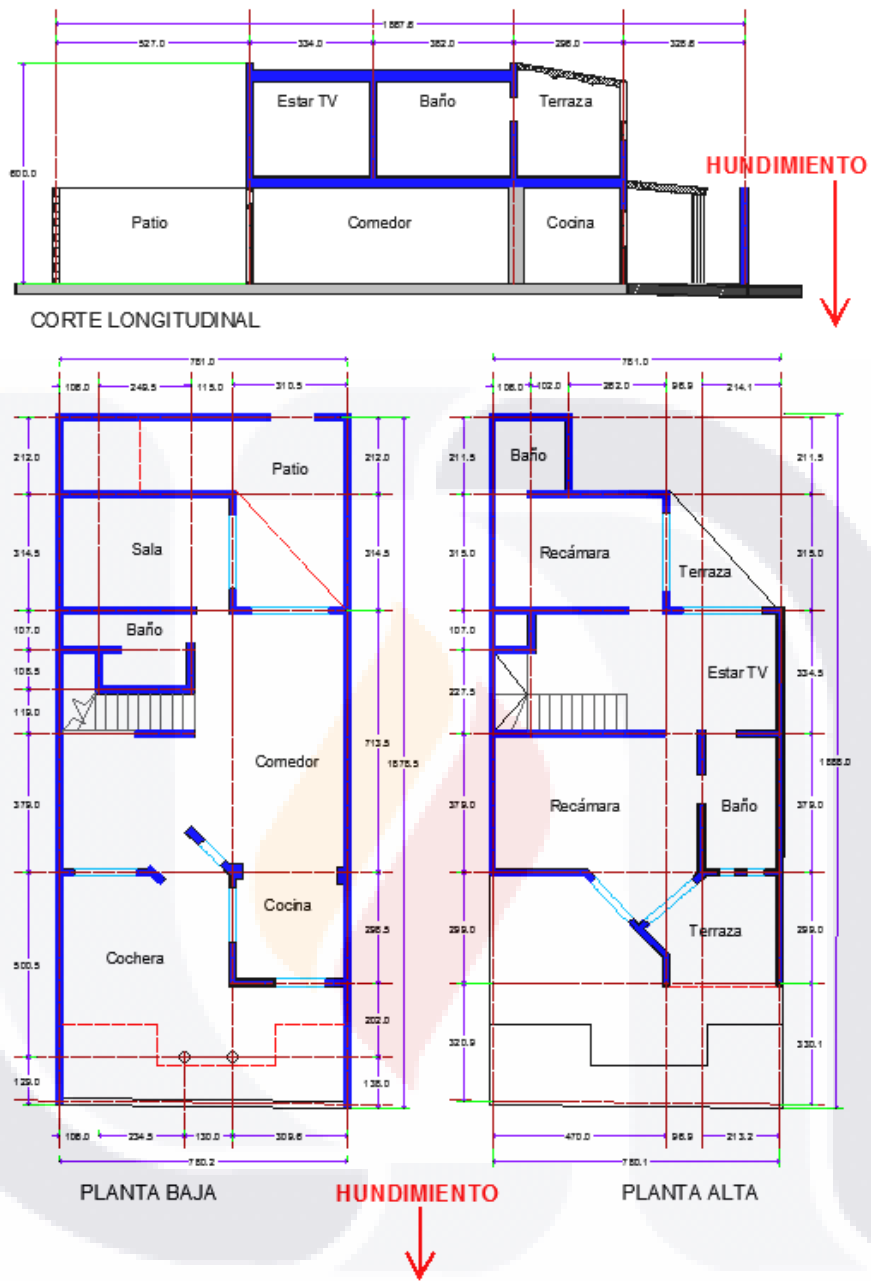


Fig. 4.5 Distribución arquitectónica y trayectoria de hundimiento de la edificación



Fig. 4.6 Daños en elementos estructurales de la edificación seleccionada

4.6.3. Modelos matemáticos de la edificación

Se utilizó un programa para el análisis tridimensional de estructuras denominado SAP 2000 (CSI, 2010), en el que se realizaron análisis estáticos no lineales (Push-over y Pull-down), ingresando las propiedades elasto-plásticas de los materiales, dimensiones y secciones de todos los elementos estructurales que conforman a la edificación. Se determinaron las fuerzas de empuje o cortantes de acuerdo a la definición de las cargas verticales del edificio y al coeficiente sísmico que determina el reglamento de construcción local. Estas fuerzas se repartieron a través de la losa hacia los muros de carga principales que colaboran en cada dirección de análisis realizados, que para cada caso fueron en el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sentido transversal y longitudinal. En esta investigación no se considera la respuesta a la flexión local de las losas ni el comportamiento fuera del plano de los muros (Magenes, 2010), solamente se considera el empuje a través de los muros que participan para cada dirección de los respectivos análisis Push-over y Pull-down.

El modelado tridimensional de las construcciones de mampostería parte de las hipótesis de su comportamiento sísmico ante ciertas reglas de comportamiento histerético y propiedades mecánicas, debido a que es un sistema de construcción compuesto a base de piezas sólidas unidas por mortero. Regularmente se utilizan ladrillos, bloques o piedras naturales, y el mortero es utilizado para conectar dichas piezas. La resistencia de la mampostería ante cargas verticales y horizontales está en función de la capacidad ante cargas de compresión, esfuerzos a flexión y por cortante, durabilidad, absorción de agua y expansión térmica. Para modelar la anisotropía de este sistema estructural existen dos enfoques, el “micro modelado” y el “macro modelado”, donde cada técnica requiere la adopción de diferentes modelos constitutivos (Bilgin, Korini, 2012). Debido a dicha anisotropía, hasta el momento sigue siendo un reto para trabajos de modelación numérica.

Como un primer enfoque se ha utilizado el método por elemento finito considerando los elementos constitutivos de la mampostería, mortero y piezas sólidas, y que a través de pruebas en laboratorio y de forma analítica se han podido obtener leyes de comportamiento no lineal del sistema en conjunto. El segundo enfoque está basado en el comportamiento de “marcos equivalentes” o también llamado método de “columna ancha”, donde los muros funcionan como puntales verticales (columnas con propiedades mecánicas equivalentes a los muros) conectados por vigas con rigidez infinita, además ambos tipos de elementos tienen características no lineales en sus conexiones para formar articulaciones plásticas (Dolce, 1989). Han habido varios investigadores que han utilizado el macro modelado no lineal (Lagomarsino et al., 2007; Penelis, 2006; Belmouden, 2009), que han reproducido el daño sísmico a estructuras de mampostería y han observado los modos de falla durante pruebas experimentales. Tales investigaciones han permitido establecer algunas reglas de comportamiento estructural de los materiales empleados, que han sido utilizadas para calibrar los modelos analíticos en programas de

análisis estructural actuales, logrando una alta precisión al comparar lo analítico con lo real.

4.6.4. Propiedades no lineales de los materiales

Las propiedades mecánicas de los materiales empleados en los muros de los modelos estructurales fueron de dos tipos: de concreto o de mampostería, para generar un comparativo en sus comportamientos y para mostrar una alternativa de reforzamiento o mejora respecto al desempeño de la estructura, cambiando en un segundo modelo todos los muros de mampostería por concreto. En un modelo se consideró que todos los muros están contruidos con concreto reforzado de 9,806.65 kPa de resistencia a la compresión y armados con varillas corrugadas de acero con $F_y=411,879.3$ kPa. Para el modelo de muros de mampostería, se consideró que las piezas sólidas tienen una resistencia a la compresión $f^*p=3,922.66$ kPa, una resistencia a la compresión del mortero $f^*j=7,355$ kPa y una resistencia a la compresión de la mampostería $f^*m=1,961.33$ kPa. Las losas fueron asignadas como sistemas de diafragma infinitamente rígidos con una distribución uniforme de sus masas, para transmitir las cargas hacia los muros. Las cargas permanentes correspondieron a los pesos volumétricos de sus elementos estructurales sean losas y muros, y las cargas vivas fueron de 1.96 kPa para entrepisos y de 0.981 kPa para azoteas.

Debido a que se modelaron las edificaciones con la técnica de elemento finito, la medida de los elementos de área tuvo una relación de aspecto muy cercana a la unidad para realizar el análisis no lineal y tener una conectividad adecuada. Por lo tanto se desarrolló en la edificación un modelo tridimensional con todos los elementos de muros y losas. Los muros están modelados como elementos de cascarón en capas no lineales. La anisotropía de la mampostería está modelada por dos curvas diferentes de esfuerzo-deformación. Cada una de ellas representa respectivamente los esfuerzos verticales S11, esfuerzos horizontales S22 y el esfuerzo cortante S12. Las curvas esfuerzo-deformación para la mampostería (fig. 4.7) son determinadas usando la relación propuesta por Kaushik et al. (2007); y respecto a las curvas esfuerzo-deformación a compresión, tensión y cortante en el concreto se utilizaron las propuestas en la fig. 4.8 por Takeda et al. (1970).

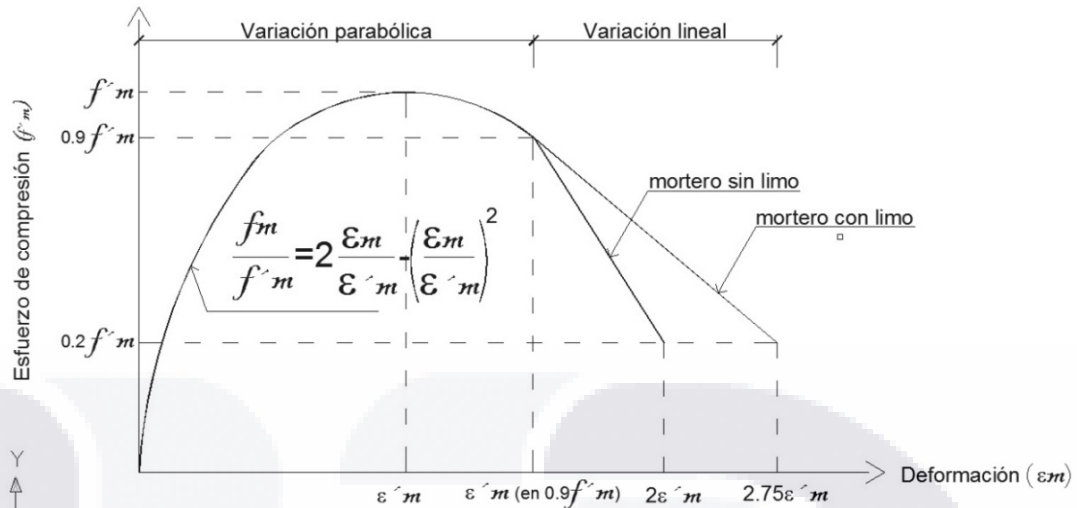


Fig. 4.7 Curva de esfuerzo-deformación idealizada para compresión en la mampostería (Kaushik et al. 2007)

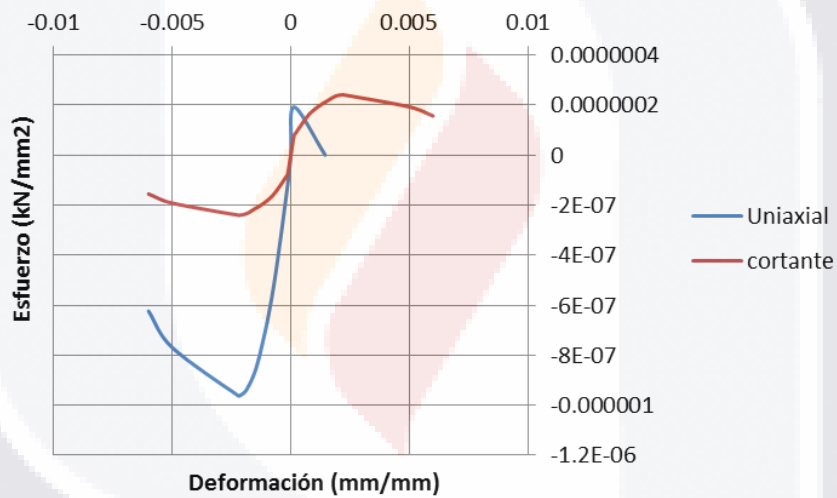


Fig. 4.8 Curva de esfuerzo-deformación para compresión, tensión y cortante en el concreto (Takeda et al. 1970)

4.6.5. Demanda sísmica

Las cargas sísmicas son comúnmente representadas por espectros de respuesta que fueron derivados de registros de historial de tiempo o acelerogramas sísmicos de cada región en estudio. La localidad de Jocotepec se ubica en la zona sísmica “C” de acuerdo a la clasificación del Manual de Diseño por sismo de la C.F.E. de México, donde le corresponde un coeficiente sísmico $c=0.64$, y por ser estructura de concreto o de mampostería se le asignó un factor de ductilidad $Q=2$; además debido a la importancia de

la estructura seleccionada, por ser vivienda le corresponde el grupo “B” con una estructuración tipo “1”. Las clasificaciones de la zona y el significado de sus parámetros pueden ser revisados en el manual mencionado.

De acuerdo a exploraciones del suelo al exterior de la casa, se encontraron limos arcillosos y limos arenosos cuya clasificación de acuerdo al mismo manual de C.F.E. es de tipo “III” que es considerado como suelo blando. En la fig. 4.9 se observa el espectro de diseño por sismo empleado en los análisis Push-over, que sirve como referencia de la demanda sísmica para compararla con la capacidad o desempeño de la edificación estudiada.

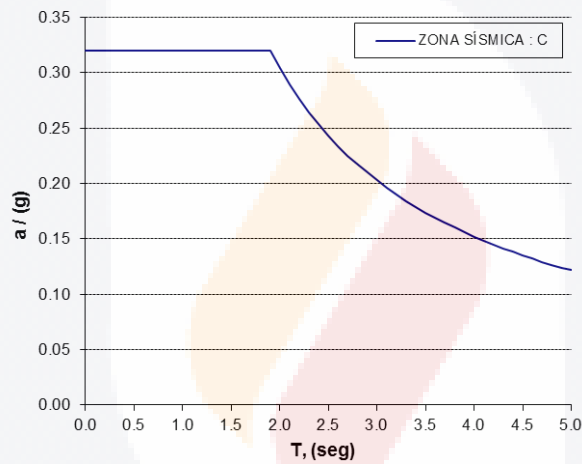


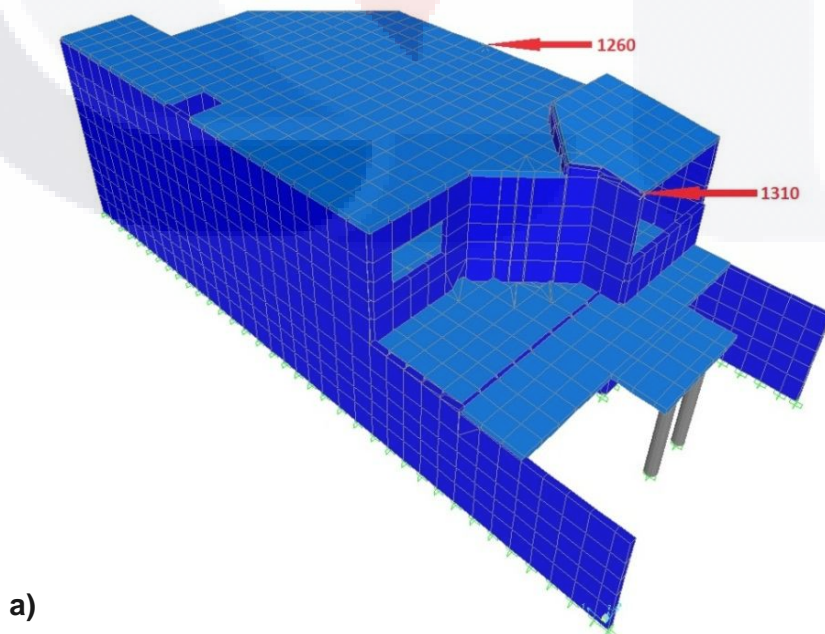
Fig. 4.9 Espectro de diseño para viviendas de Jocotepec sobre suelo blando

4.6.6. Selección de nudos de control

De acuerdo a los análisis por desempeño realizados en la edificación se identificaron los materiales de los muros empleados en los modelos, para la mampostería de ladrillo de barro recocido se asignó el número 1 y para el concreto el número 2. En el análisis Push-over (PO) se seleccionaron dos nudos de control en la azotea del modelo para evaluar la distorsión de la edificación, en el sentido longitudinal (eje Y global) el nudo 1310 al frente de la casa, y en el sentido transversal (eje X global) el nudo 1260 al costado derecho de la casa (fig. 4.10a). Para el análisis Pull-down (PD) se seleccionaron también dos nudos de control pero ahora en el piso de la edificación para evaluar los asentamientos, en el sentido longitudinal (eje Y global) el nudo 528 al frente de la casa, y

en el sentido transversal (eje X global) el nudo 505 al costado derecho de la casa (fig. 4.10b).

Se hizo tal distinción debido a que el procedimiento de análisis Push-over determina la relación de deformación horizontal del nudo de control asignado, con respecto al cortante basal generado por la aplicación de fuerzas horizontales en la edificación para evaluar su desempeño estructural, y para el caso del fenómeno de subsidencia, el análisis Pull-down que se está proponiendo servirá para evaluar tal desempeño en función de los asentamientos diferenciales que van ocurriendo en cualquier parte de la edificación de acuerdo a dos vertientes: a) imponiendo en el modelo solamente las deformaciones verticales descendentes en los apoyos afectados, cuya variación es lineal y que va de 0 a 25 mm en una longitud de 12.7 mt, donde la máxima deformación de 25 mm se localizó al frente de la edificación (hacia donde actualmente se está hundiendo la construcción), y b) asignando esas mismas deformaciones verticales, más la inclusión de las fuerzas horizontales en cada nivel del edificio, para con éste último generar un cortante basal de referencia y así comparar ambos métodos Pull-down vs Push-over. En la fig. 4.10 se muestran las ubicaciones de los nudos de control referidos anteriormente.



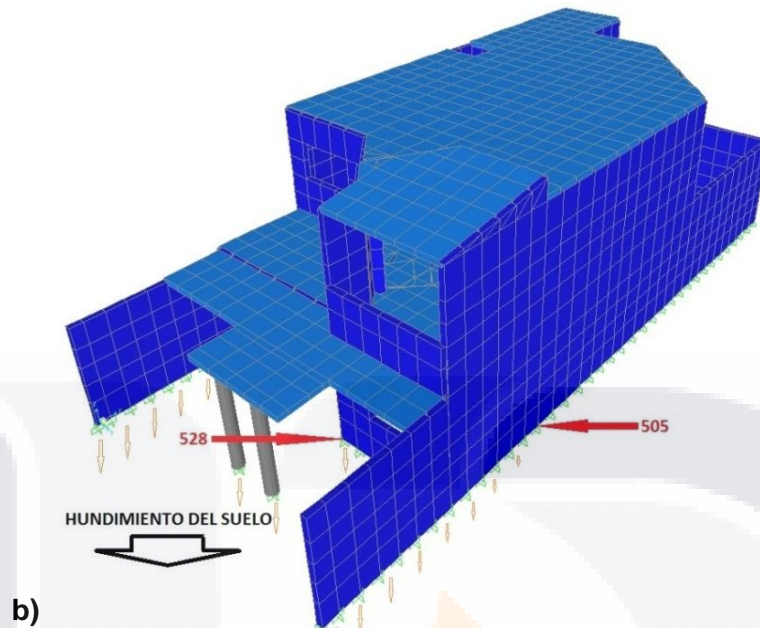


Fig. 4.10 Nudos de control para análisis Push-over (PO) y Pull-down (PD). a) Nudos de control 1310 y 1260 para análisis Push-over. b) Nudos de control 528 y 505 para análisis Pull-down

4.7. RESULTADOS Y VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO CON LOS ANÁLISIS PUSH-OVER Y PULL-DOWN

4.7.1. Resultados de la evaluación de la capacidad-deformación

Al comparar los procedimientos de análisis “Push-over vs Pull-down” en el sentido transversal “X” de la edificación con ambos tipos de materiales en los muros (1:mampostería y 2:concreto), se observa que para Push-over se genera una curvatura en la relación desplazamiento-cortante basal desde el inicio del proceso de carga, donde la rigidez es mayor en el concreto que en la mampostería. El valor de cortante basal máximo obtenido es para el procedimiento con muros de concreto “PO-X2” de 12,654.08 kN con una deformación de 19.26 mm, respecto al máximo con muros de mampostería “PO-X1” de 3,421.18 kN con una deformación de 13.48 mm. Estos valores máximos no representan la resistencia máxima de diseño de la edificación, ya que a esa magnitud le correspondería un daño y sobreesfuerzo muy alto en los muros, además de un desempeño muy cercano al colapso, por lo que es necesario fijar un nivel de deformación

que permita a la estructura conservarse en un nivel de desempeño de “ocupación inmediata” de preferencia en un rango elástico de comportamiento, independientemente de que sea de concreto o de mampostería.

Lo anterior sirve de referencia para generar un comparativo con respecto al procedimiento “Pull-down” en el sentido transversal “X”, que según se observa en la fig. 4.11, el trazo de la relación desplazamiento-cortante basal se conserva lineal desde el inicio hasta el final del proceso de carga. Esto se debe a que el programa asigna una progresión lineal en intervalos del desplazamiento a monitorizar en el nudo de control, cuya partición se realiza en función de la cantidad de pasos a calcular que se seleccionaron previamente y hasta llegar al valor solicitado de desplazamiento. Aunque la mampostería y el concreto tienen un comportamiento frágil, cuando se le aplican los asentamientos a la edificación, pareciera por dicho trazo lineal que las magnitudes de cortante basal no incursionan en el rango plástico, pero las deformaciones son muy altas con respecto a las del procedimiento Push-over, por lo tanto no se considera confiable obtener el cortante basal del edificio a través de ese medio, y será mejor recurrir a las gráficas de isovalores de esfuerzo cortante en los muros que resultan de los análisis por control de carga o por control de desplazamientos, para identificar el momento en que los asentamientos provoquen plasticidad en los muros.

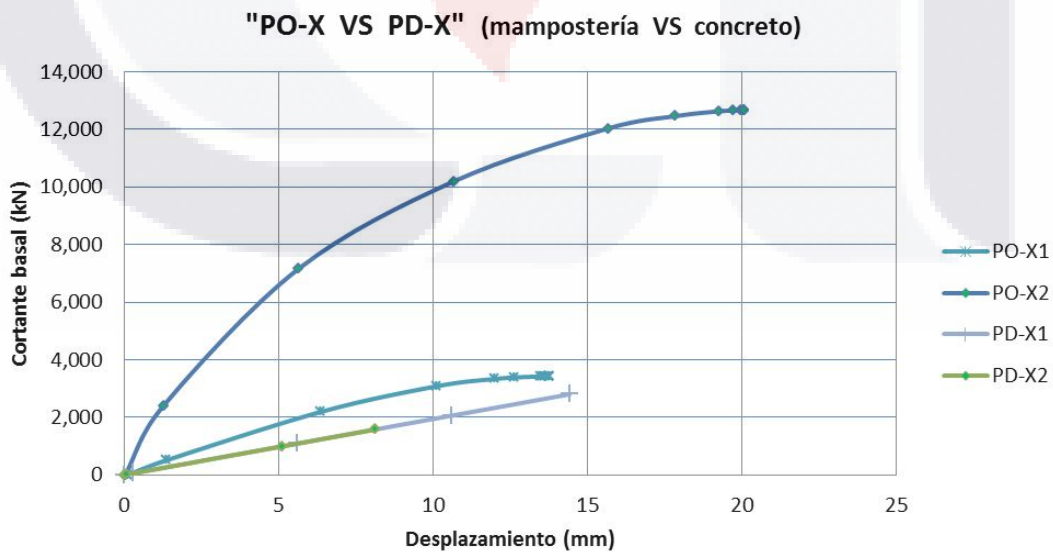


Fig. 4.11 Comparativa de Push-over VS Pull-down en el sentido “X” de la edificación

En la fig. 4.12 se observa también la comparativa entre los procedimientos de análisis “Push-over vs Pull-down” en el sentido longitudinal “Y” de la edificación con ambos tipos de materiales en los muros (1:mampostería y 2:concreto). El valor máximo obtenido es para el procedimiento con muros de concreto “PO-Y2” de 20,335.36 kN con una deformación de 12.0 mm, respecto al máximo con muros de mampostería “PO-Y1” de 5,805.97 kN con una deformación de 11.26 mm; al igual que en la fig. 4.11, los trazos de las relaciones desplazamiento-cortante basal se generaron curvos en la cúspide de los procedimientos Push-over, con una rigidez muy cercana a la lineal, además por el hecho de existir una densidad más alta de muros en el sentido longitudinal de la edificación, los valores del cortante basal fueron mayores en el sentido “Y” que en el “X” (fig. 4.13). Para el procedimiento “Pull-down” en el sentido longitudinal “Y” (fig. 4.12), el trazo de la relación desplazamiento-cortante basal se conserva también lineal desde el inicio hasta el final del proceso de carga, por las mismas causas ya explicadas para el procedimiento Pull-down en el sentido transversal “X”.

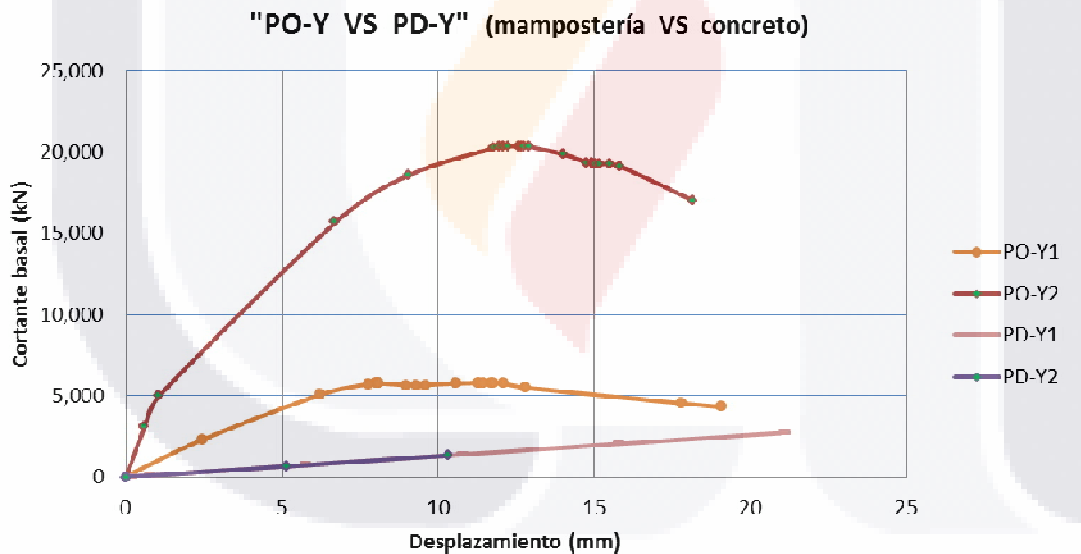


Fig. 4.12 Comparativa de Push-over VS Pull-down en el sentido “Y” de la edificación

En la fig. 4.13 y en la tabla 4.2 se observan todos los trazos de los procedimientos Push-over y Pull-down para muros de mampostería y de concreto en ambas direcciones de análisis, y según se observa para PD-Y1 (mampostería) las deformaciones que se alcanzan son mucho mayores que las de PD-Y2 (concreto), debido a que en el software se obtuvieron más pasos de análisis para conocer las deformaciones en la mampostería y por consiguiente poder evaluar con más detenimiento sus niveles de daño.

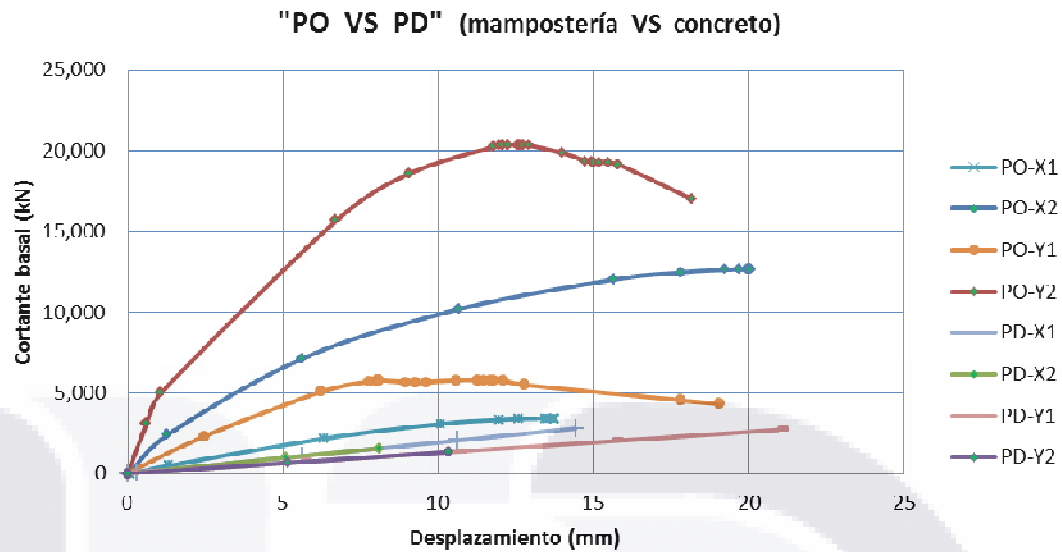


Fig. 4.13 Comparativa de procedimientos en los sentidos “X” y “Y” de la edificación

Tabla 4.2 Valores de cortante basal-deformación para todas las combinaciones de análisis

COMBINACIÓN	CORTANTE BASAL (kN)	DEFORMACIÓN (mm)
PO-X1	3421.18	13.48
PO-X2	12654.08	19.26
PO-Y1	5805.97	11.26
PO-Y2	20335.36	12.00
PD-X1	2809.02	14.38
PD-X2	1578.31	8.12
PD-Y1	5337.15	41.13
PD-Y2	1874.24	14.46

PO: Push-over X: Dirección de análisis "X" 1: Mampostería
 PD: Pull-down Y: Dirección de análisis "Y" 2: Concreto

4.7.2. Resultados de la evaluación de los estados límite de daños

Para definir con mayor precisión el nivel de desempeño que se le permitirá a la estructura ante los procedimientos de análisis Push-over y Pull-down, se recurrió a la comparación de la distorsión-cortante basal, a fin de cotejar la distorsión actuante en la estructura con la recomendada por “Astroza y Schmidt” de 0.04 a 0.18, entre un estado límite de servicio (ELS) y un estado límite de operación (ELO). Se revisó la estructura en cada dirección de análisis, para el sentido transversal “X” (fig. 4.15) y para el sentido longitudinal “Y” (fig. 4.16). Para los análisis Pull-down se aplicaron los asentamientos en

los apoyos y se agregaron los cortantes en cada nivel del edificio, con el objetivo de obtener valores de cortante que pudieran ser comparados con los resultantes por los análisis Push-over. Los nudos de control donde se monitorizó el asentamiento al efectuar el análisis Pull-down se seleccionaron en la base de La edificación, y para los análisis Push-over para detectar la deformación horizontal en la azotea. Ya en la etapa de revisión de deformaciones, se seleccionaron dos nudos en la fachada frontal y otros dos en el costado lateral de la edificación para detectar las distorsiones longitudinales y transversales respectivamente para ambos procedimientos de análisis, por lo que se obtuvieron las figuras 4.14 a la 4.16.

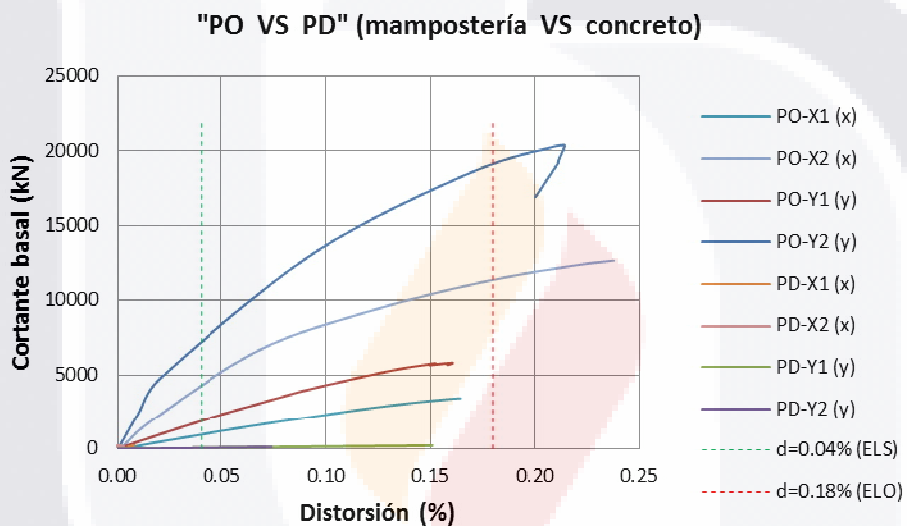


Fig. 4.14 Comparativa de distorsiones en ambos sentidos de la edificación

En la fig. 4.14 se muestra el comparativo de distorsiones-cortante basal para ambas direcciones de análisis de la edificación tanto transversal como longitudinal, y para los dos tipos de materiales en los muros, mamostería y concreto, además se colocaron las referencias de las distorsiones de 0.04% para ELS y de 0.18% para ELO. Se observa que seis de los análisis incurrieron en un rango plástico de comportamiento, al haber rebasado el “Estado Límite de Servicio”, solamente los análisis Pull-down en la dirección “X” no alcanzaron a llegar al ELS, y dos análisis Push-over que corresponden a ambas direcciones de análisis en muros de concreto rebasaron el “Estado Límite de Operación”, por lo que se infiere que existiría un margen de ductilidad bajo en la estructura antes de alcanzar su deterioro y posible colapso, debido a que ambos materiales son frágiles y sus

deformaciones excesivas. Para una mejor observación y análisis de los gráficos se separaron los sentidos de revisión en las figuras 4.15 y 4.16.

En la tabla 4.3 se muestran los resultados del cortante basal para cada combinación de análisis Push-over y también para dos magnitudes de asentamientos en los apoyos en los análisis Pull-down, de 2.5 y de 25 mm respectivamente.

Tabla 4.3 Valores de cortante basal-distorsión para las combinaciones de análisis

COMBINACIÓN	CORTANTE BASAL (kN)	
	ELS (d=0.04)	ELO (d=0.18)
PO-X1 (x)	1024.00	2783.20
PO-X2 (x)	4233.60	11319.00
PO-Y1 (y)	2316.00	-----
PO-Y2 (y)	8036.00	20580.00
Asentamiento máximo de 2.5 mm		
PD-X1 (x)	1029.00	2786.04
PD-X2 (x)	-----	-----
PD-Y1 (y)	539.00	-----
PD-Y2 (y)	606.50	-----
Asentamiento máximo de 25 mm		
PD-X1 (x)	-----	-----
PD-X2 (x)	-----	-----
PD-Y1 (y)	61.20	-----
PD-Y2 (y)	61.72	-----

PO: Push-over

PD: Pull-down

d: Distorsión

X: Dirección de análisis "X"

Y: Dirección de análisis "Y"

x: Desplazamiento en "x"

y: Desplazamiento en "y"

1: Mampostería

2: Concreto

ELS: Estado límite de servicio

ELO: Estado límite de operación

En la fig. 4.15 se observa la comparativa de distorsiones en el sentido transversal (X) de la edificación para ambos procedimientos de análisis "Push-over y Pull-down" y para muros de mampostería (1) y de concreto (2), donde se colocaron como referencias los límites "ELS" y "ELO", por lo que el procedimiento "PO-X2 (x)" es el que refiere una mayor magnitud de cortante basal de 4,233.60 kN para el "ELS" y 11,319.00 kN para el "ELO", con las distorsiones de 0.04 y 0.18 respectivamente. El procedimiento "PD-X1 (x)" para un asentamiento máximo de 2.5 mm en los apoyos, refiere las magnitudes de cortante basal de 1,029.00 kN para el "ELS" y de 2,786.04 kN para el "ELO", con las distorsiones de 0.04 y 0.18 respectivamente, mientras que el procedimiento "PD-X1 (x)"

para un asentamiento máximo de 25 mm en los apoyos, no alcanza a llegar al “ELS”. Todos los análisis Pull-down para un asentamiento máximo de 25 mm no incursionaron en el “ELO”, y sus resistencias alcanzan cuando mucho el “ELS”. El concreto es un material más resistente que la mampostería, que para este caso de análisis transversal incrementa su resistencia hasta por cuatro veces la del otro material, ante los mismos niveles de distorsión presentados. Si se comparan los trazos de los análisis Pull-down “X” para ambos asentamientos máximos de 2.5 y de 25 mm, se observa que entre mayor sea el asentamiento en la edificación, la capacidad del cortante basal se reduce, e incluso en algunos casos el programa detiene el proceso de análisis debido a que la estructura rebasó la capacidad inelástica del material.

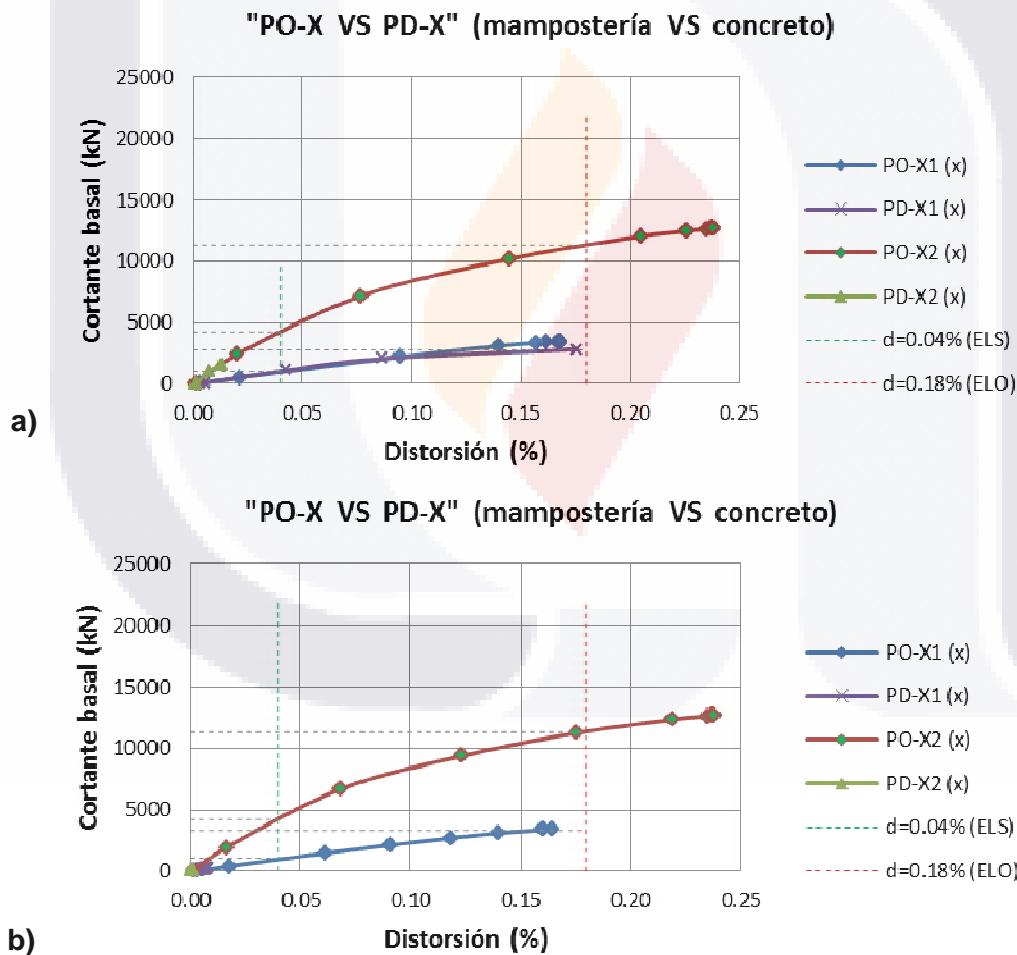
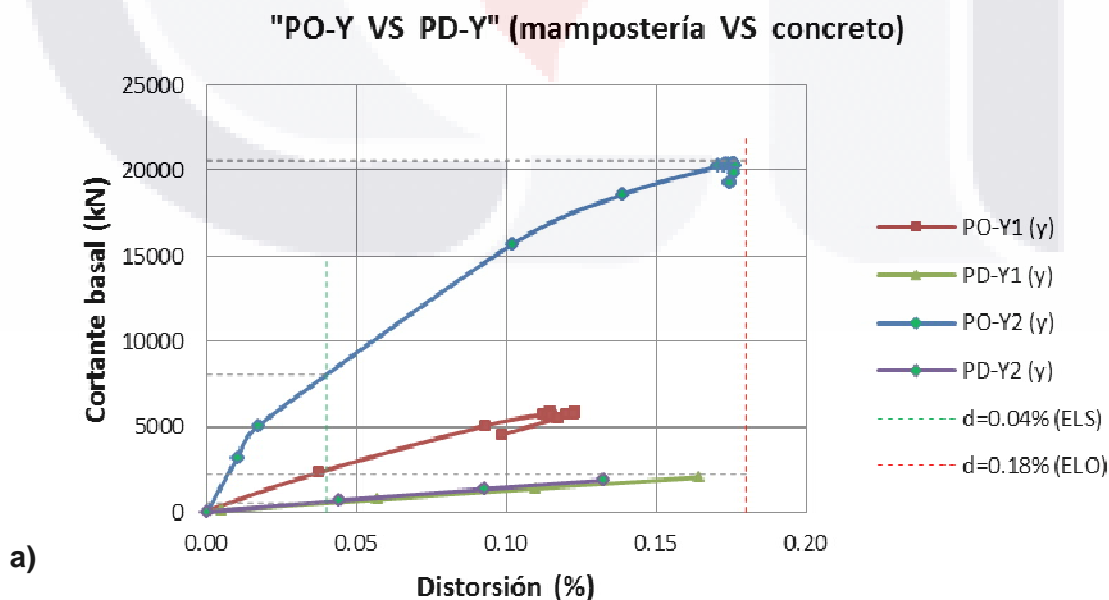
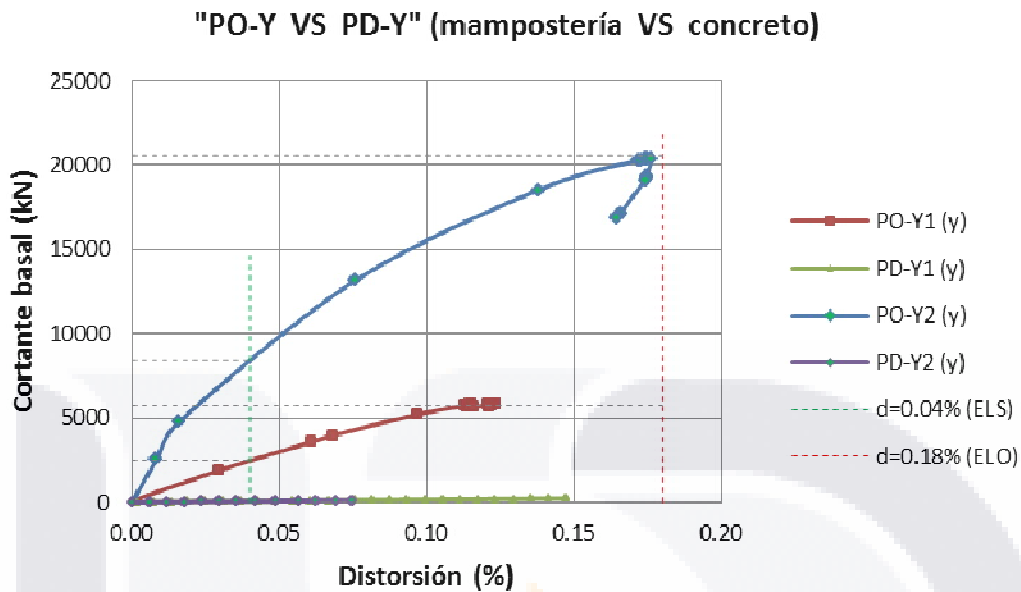


Fig. 4.15 Comparativa de distorsiones en el sentido transversal de la edificación. a) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 2.5 mm, b) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 25 mm

En la fig. 4.16 se observa la comparativa de distorsiones en el sentido longitudinal (Y) de la edificación para ambos procedimientos de análisis “Push-over y Pull-down” y para muros de mampostería (1) y de concreto (2), donde se colocaron como referencias los límites “ELS” y “ELO”, por lo que el procedimiento “PO-Y2 (y)” es el que refiere una mayor magnitud de cortante basal de 8,036.00 kN para el “ELS” y de 20,580.00 kN para el “ELO”, con las distorsiones de 0.04 y 0.173 respectivamente. El procedimiento “PD-Y1 (y)” para un asentamiento máximo de 2.5 mm en los apoyos, refiere las magnitudes de cortante basal de 539 kN para el “ELS” y 2,024.50 kN cercano al “ELO”, con las distorsiones de 0.04 y 0.164 respectivamente, mientras que el procedimiento “PD-Y1 (y)” para un asentamiento máximo de 25 mm en los apoyos, es el que refiere la menor magnitud de cortante basal de 61.20 kN para el “ELS” con una distorsión de 0.04. Para este caso de análisis longitudinal el concreto resiste hasta diez veces más que la mampostería, ante los mismos niveles de distorsión presentados. Si se comparan los trazos de los análisis Pull-down “Y” para ambos asentamientos máximos de 2.5 y de 25 mm, se observa que entre mayor sea el asentamiento en la edificación, la capacidad del cortante basal se reduce, e incluso en algunos casos el programa detiene el proceso de análisis debido a que la estructura rebasó la capacidad inelástica del material sin haber llegado al Estado Límite de Operación, lo cual indica una alta vulnerabilidad en la edificación.





b)
Fig. 4.16 Comparativa de distorsiones en el sentido longitudinal de la edificación. a) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 2.5 mm, b) Para un asentamiento máximo en los apoyos de 25 mm

4.7.3. Resultados de la comparativa de esfuerzos entre el procedimiento Push-over vs Pull-down

Para revisar de forma detallada cada muro que conforma a la edificación, y más porque es análisis por elemento finito, donde a diferencia de modelos estructurales armados con elementos unifilares, no se generaron articulaciones plásticas para detectar los niveles de desempeño en la estructura, sino que nos basamos en niveles de distorsión definidos previamente por Astroza y Schmidt (2004), y se recurrirá a la selección de gráficos de esfuerzos generados por el software, de acuerdo a los pasos de análisis que se desarrollaron en el modelo para cada procedimiento Push-over y Pull-down, mismos que aparecen con marcadores en cada trazo de las figuras 4.17 y 4.19.

El programa permite seleccionar dos tipos de aplicación de control de cargas para efectuar el análisis estático no lineal, por “carga completa” y por “control de desplazamientos” siendo este último el más preciso; una vez realizados los análisis se obtienen las gráficas de isovalores de esfuerzos cortantes para cada combinación de cargas, que para el caso de los análisis Pull-down se realizaron dos tipos, la primera combinación habiendo asignado solamente asentamientos en los apoyos y la segunda

combinación sumando los asentamientos con las cargas horizontales en los techos para generar un empuje lateral en la edificación, adicional al asentamiento diferencial. Al comparar los análisis Pull-down con ambas combinaciones de cargas, se detectó que no difieren mucho en magnitud, por lo tanto se utilizarán los que resultan de combinar los asentamientos con las cargas horizontales en los techos, por ser los de mayor intensidad, y los que fueron generados al imponer un asentamiento máximo de 2.5 mm en la edificación. Asimismo si se desea, se pueden seleccionar los diagramas resultantes de los análisis Push-over para compararlos con los Pull-down.

Para esquematizar de forma general la metodología de selección de gráficas, se eligió el procedimiento PO-X1 (x) y el PD-X1 (x). En el caso del PD-X1 (x) se observa que se generaron 3 pasos de análisis (fig. 4.17), y que el paso 1 se encuentra muy cercano al nivel de distorsión de 0.04% del Estado Límite de Servicio, por lo que se muestran los gráficos de los pasos 1 y 2 donde se podrán revisar los diagramas de isovalores de esfuerzos a los que está sometida la estructura para ese nivel de desempeño (figuras 4.18a y 4.18b). Para el procedimiento PO-X1 (x) se observa que se generaron 6 pasos de análisis (fig. 4.17), y que los pasos 1 y 2 se encuentran a ambos lados del nivel de distorsión de 0.04% del Estado límite de Servicio, por lo que en esos diagramas de isovalores se podrán revisar los esfuerzos a los que está sometida la estructura para ese nivel de desempeño (figuras 4.18c y 4.18d).

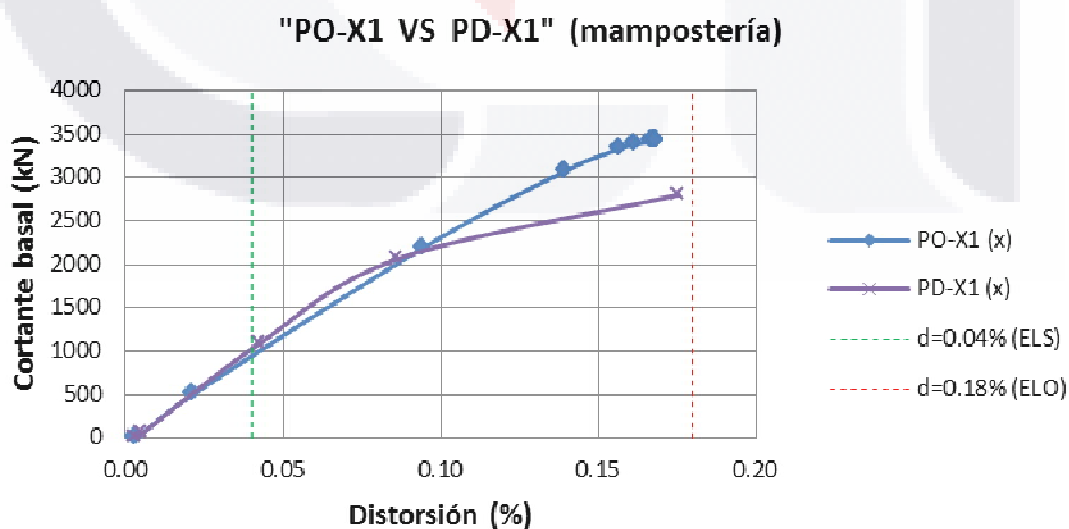
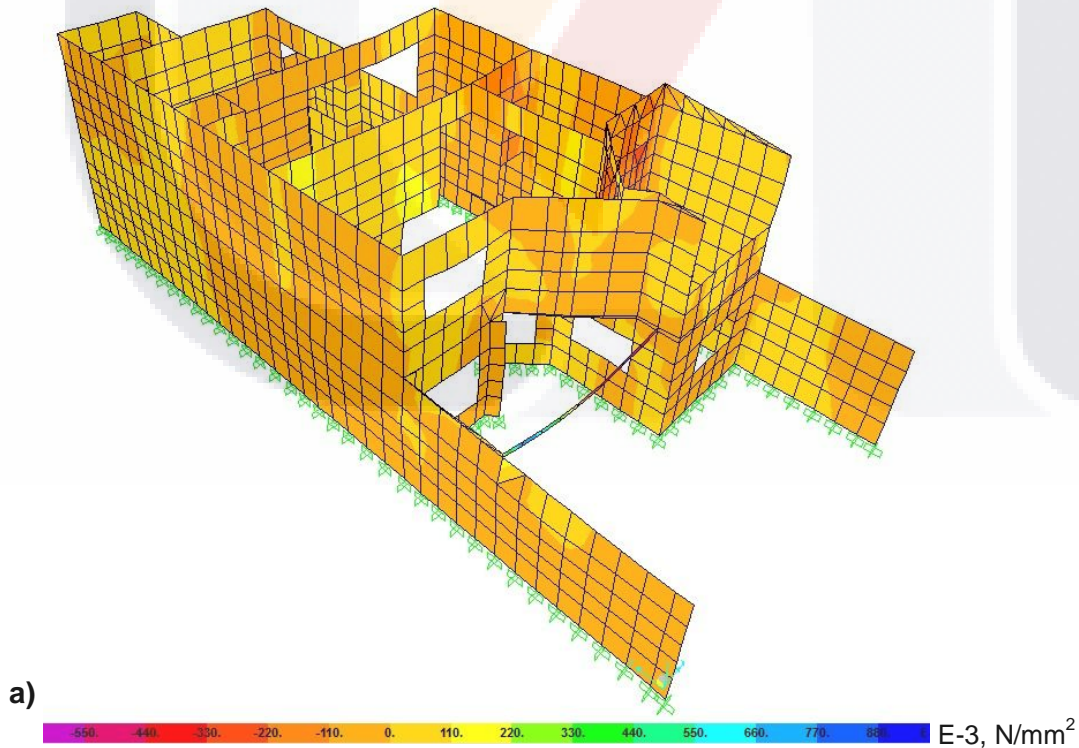
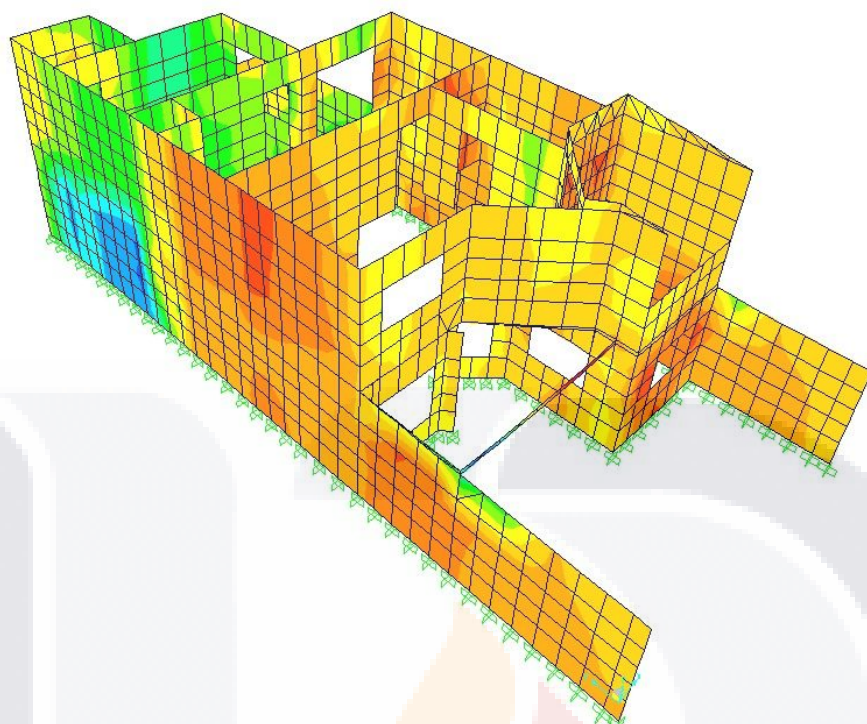


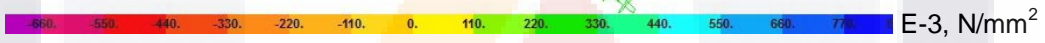
Fig. 4.17 Comparativa de distorsiones transversales para detección de pasos

Por lo tanto en los gráficos de la fig. 4.18 se muestran los esfuerzos cortantes, que para el paso 1 el diagrama de isovalores no ha variado mucho, más sin embargo para el paso 2 se observa un cambio significativo entre tensiones y compresiones debido a que ya existe un asentamiento diferencial al frente de la edificación, donde además el esfuerzo cortante ha rebasado al permisible incursionando ya en la etapa plástica del material, que para el caso de la mampostería es mayor a 0.294 N/mm^2 , notándose en los diagramas el cambio de coloración del verde al azul para las tensiones y del naranja al rojo en las compresiones. Si se quisieran revisar los esfuerzos de la estructura ante el nivel de Estado Límite de Ocupación, se deberán seleccionar los pasos más cercanos al nivel de distorsión de 0.18%, y para conocer las magnitudes de los asentamientos diferenciales generados para cada paso de análisis, se puede recurrir a los gráficos de deformaciones de acuerdo al procedimiento seleccionado. Además si se requiere más precisión en la selección y conocimiento del comportamiento de la edificación, se pueden realizar más análisis con intervalos más pequeños de deformaciones, para cualquier dirección de análisis o para cualquier combinación de cargas.

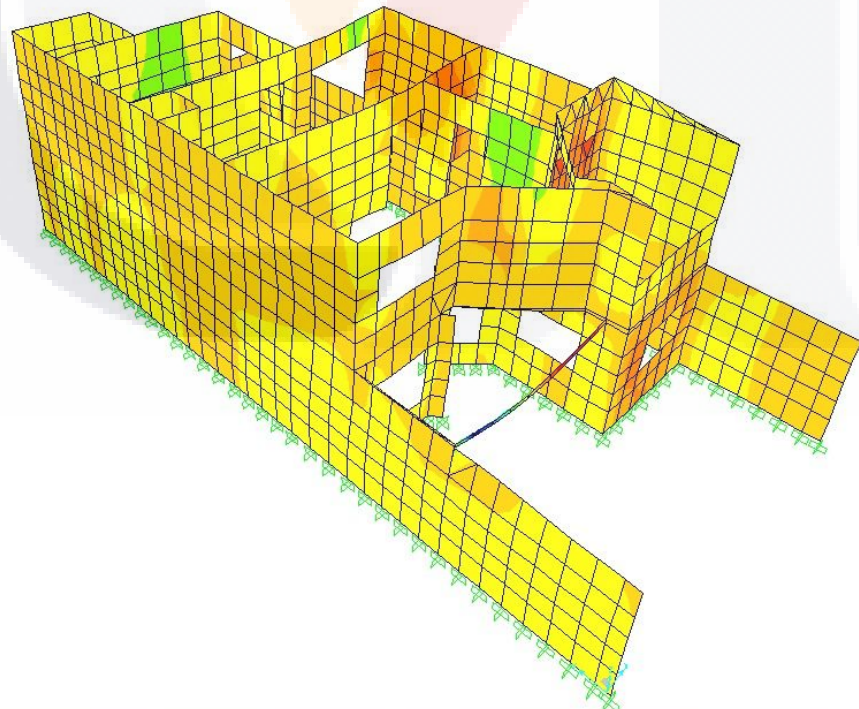




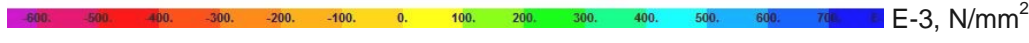
b)



E-3, N/mm²



c)



E-3, N/mm²

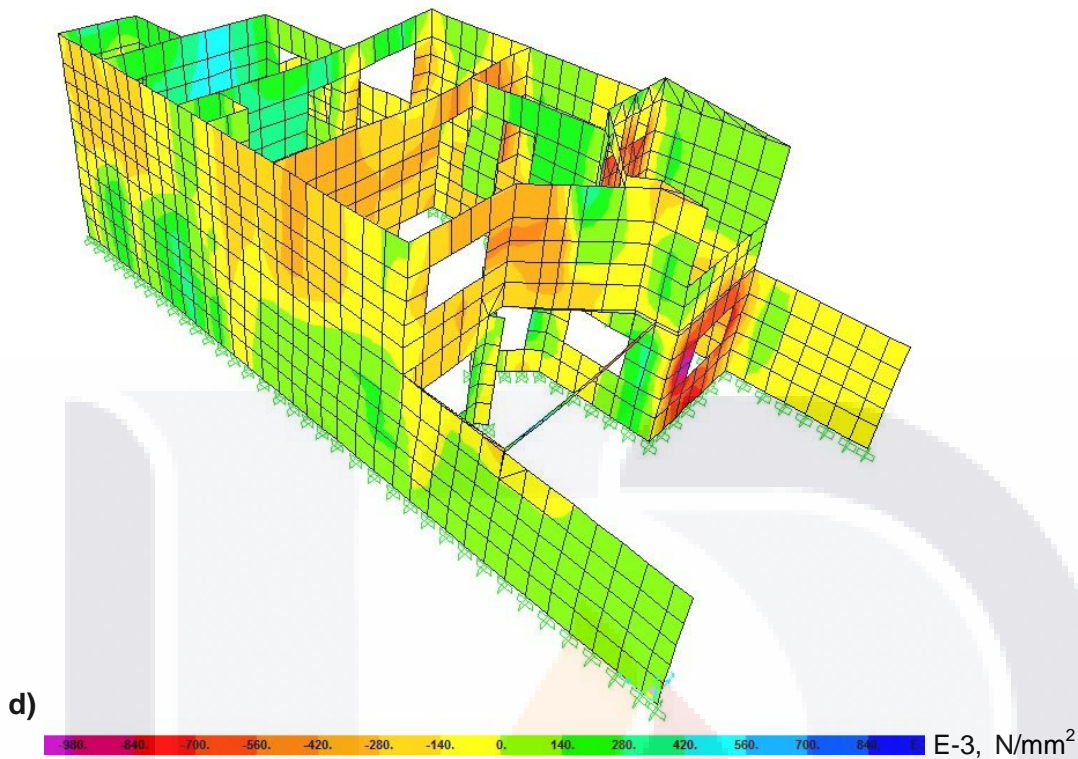


Fig. 4.18 Esfuerzos cortantes para Push-over y Pull-down en la dirección de análisis transversal, a) PD-X1 paso 1, b) PD-X1 paso 2, c) PO-X1 paso 1, d) PO-X1 paso 2

Para el procedimiento PD-Y1 (y) se observa que se generaron 5 pasos de análisis (fig. 4.19), y que el nivel de distorsión de 0.04% del Estado límite de Servicio se encuentra entre los pasos 1 y 2, por lo que se muestran los gráficos 1 y 2 donde se podrán revisar los esfuerzos a los que está sometida la estructura para ese nivel de desempeño (figuras 4.20a y 4.20b). Para el procedimiento PO-Y1 (y) se observa que se generaron 19 pasos de análisis (fig. 4.19), y que el nivel de distorsión de 0.04% del Estado límite de Servicio se encuentra entre los pasos 1 y 2, por lo que esos gráficos son donde se podrán revisar los esfuerzos a los que está sometida la estructura para ese nivel de desempeño (figuras 4.20c y 4.20d). Por lo tanto en los gráficos de la fig. 4.20 se muestran los esfuerzos cortantes, que para el paso 1 el diagrama de isovalores no ha variado mucho, más sin embargo para el paso 2 se observa un cambio significativo entre tensiones y compresiones debido a que ya existe un asentamiento diferencial al frente de la edificación, donde además el esfuerzo cortante ha rebasado al permisible incursionando ya en la etapa plástica del material, que para el caso de la mampostería es mayor a 0.294 N/mm², notándose en los diagramas el cambio de coloración del verde al azul para las tensiones y del naranja al rojo en las compresiones. Si se quisieran revisar los esfuerzos

de la estructura ante el nivel de Estado Límite de Ocupación, se deberán seleccionar los pasos más cercanos al nivel de distorsión de 0.18%, y para conocer las magnitudes de los asentamientos diferenciales generados para cada paso de análisis, se puede recurrir a los gráficos de deformaciones de acuerdo al procedimiento seleccionado.

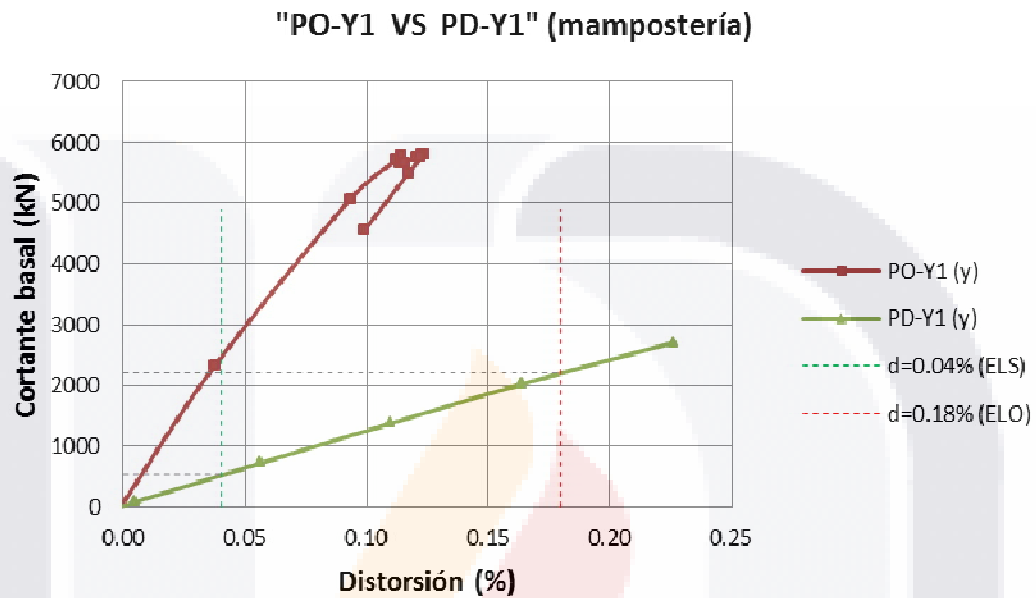
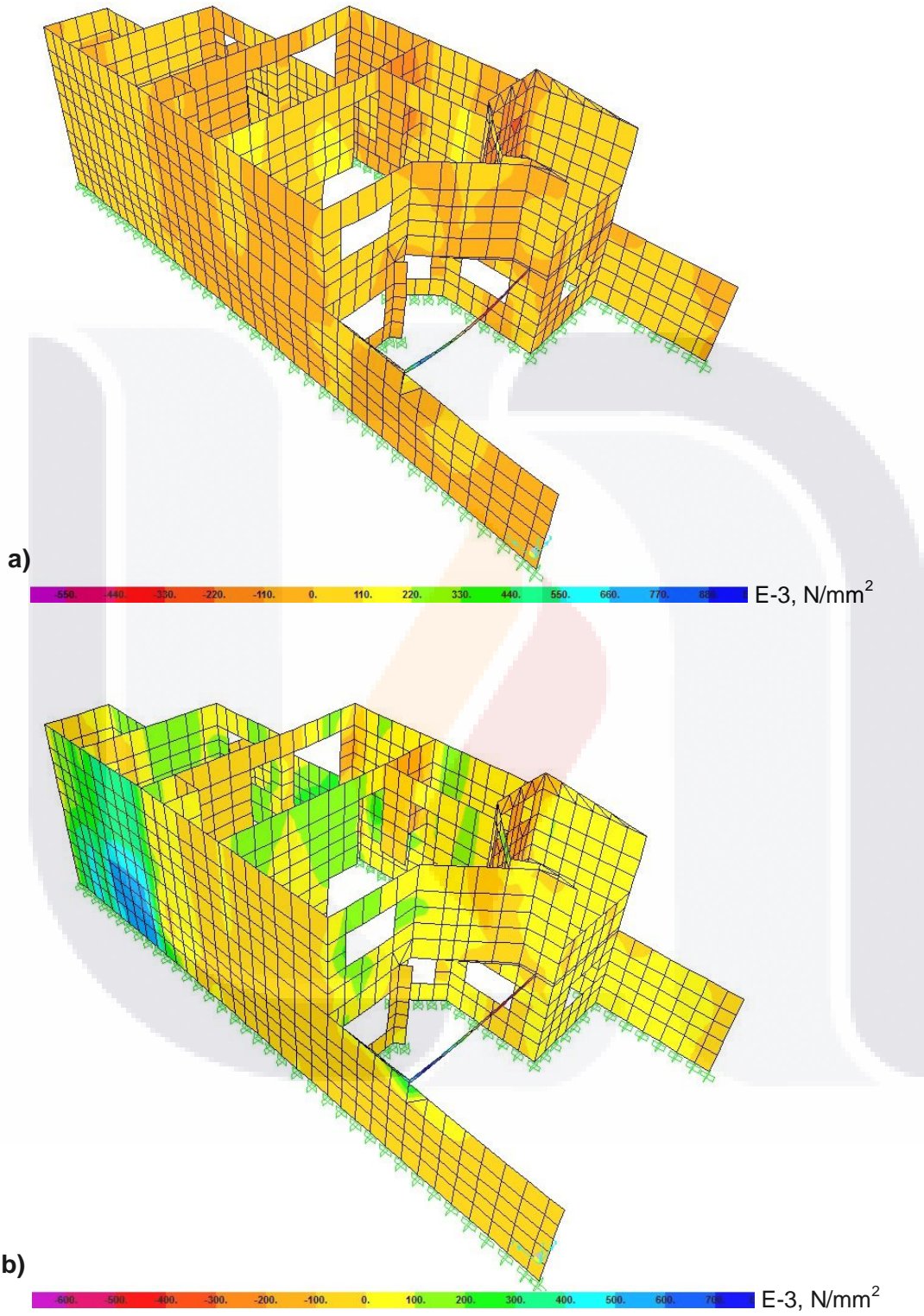


Fig. 4.19 Comparativa de distorsiones longitudinales para detección de pasos



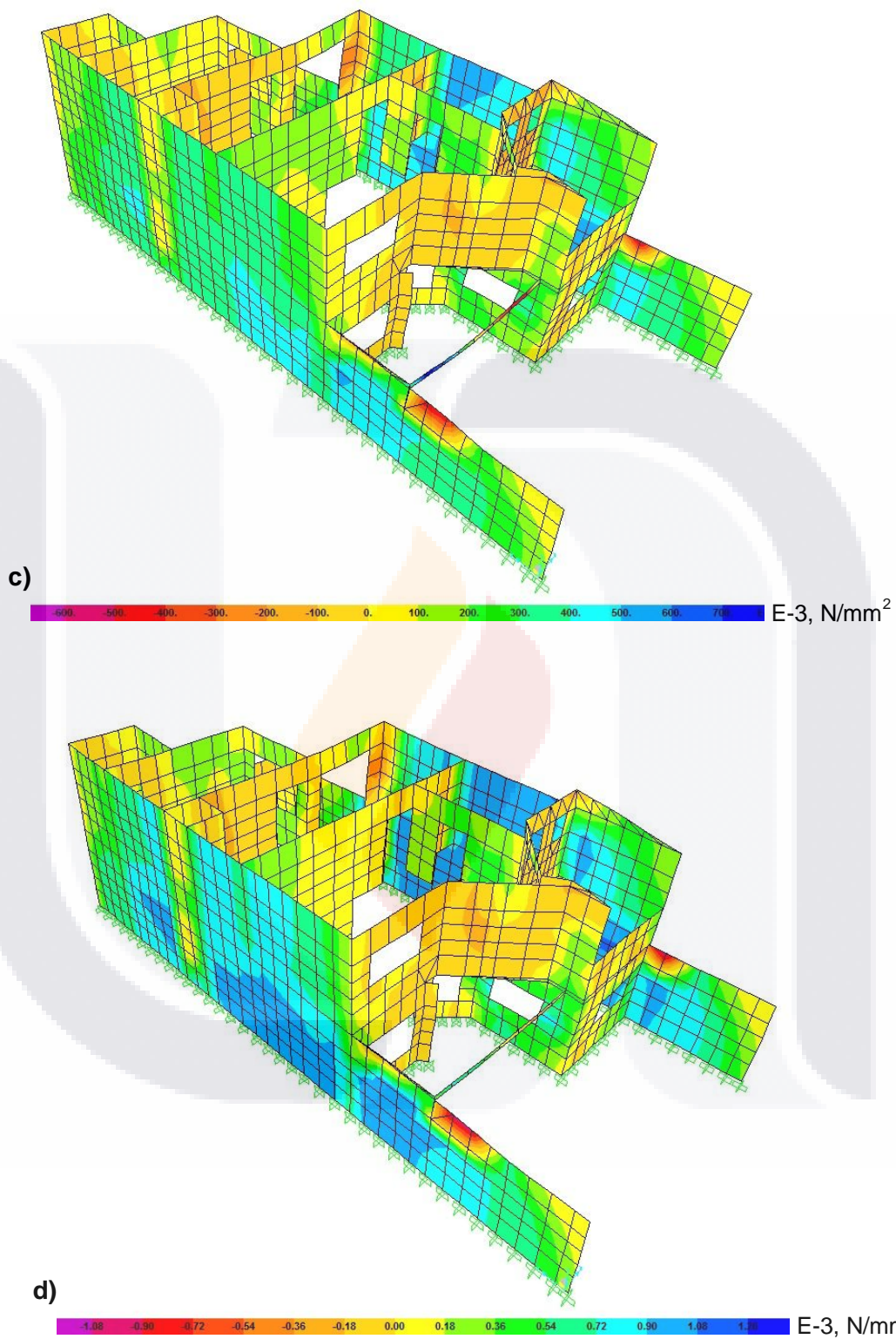


Fig. 4.20 Esfuerzos cortantes para Push-over y Pull-down en la dirección de análisis longitudinal, a) PD-Y1 paso 1, b) PD-Y1 paso 2, c) PO-Y1 paso 1, d) PO-Y1 paso 2

4.8. LIMITACIONES DEL MÉTODO Y TRABAJO FUTURO

- Los procedimientos de análisis Push-over y Pull-down asumen que el daño depende sólo de la deformación lateral de la estructura, despreciando los efectos de duración de la carga y disipación de la energía acumulada; por lo tanto la aplicabilidad del daño no permite una alta precisión, sobre todo para estructuras frágiles, cuyos ciclos histeréticos inelásticos se estrechan mucho y además son muy erráticos.
- Estos análisis se basan en la energía de deformación de la estructura, por lo que desprecian la energía asociada a las componentes dinámicas de las fuerzas, también conocidas como la energía cinética y la energía de amortiguamiento viscoso.
- Debido a que los análisis Push-over y Pull-down son en dos dimensiones, no se pueden considerar los efectos de torsión producidos por las variaciones de resistencia y rigidez.
- No se consideran tampoco las variaciones en las propiedades modales de la estructura cuando experimenta cedencia no lineal cíclica durante un sismo, lo cual no afecta al procedimiento Pull-down, debido a que las cargas ocurren a través de mucho tiempo y no impacta de forma dinámica a la estructura.
- El análisis por desempeño no considera el efecto de cargas sísmicas verticales, por lo tanto se infiere que dicha ausencia de cargas tampoco afecta al procedimiento Pull-down.
- Se deben seleccionar adecuadamente los nudos de control para realizar los análisis Push-over y Pull-down, porque de ellos dependerá la precisión de la interpretación de los resultados posteriores en los gráficos de desplazamientos, distorsiones y cortantes basales.
- Los procedimientos de análisis Push-over y Pull-down permiten identificar la secuencia de agrietamiento, cedencia y fallo de los componentes (para estructuras modeladas con elementos unifilares), los estados límites de servicio y la historia de deformaciones y cortantes en la estructura que corresponde a la curva de capacidad.
- Para estructuras modeladas con elementos de área en sus muros, su desempeño se muestra de forma generalizada, por lo tanto se propone realizar los análisis Push-over o Pull-down a través de la metodología de “columna-ancha”, para

evaluar de forma mas detallada el desempeño para cada uno de los elementos del sistema estructural y conocer su progresión de daños o mecanismos de colapso al menos de forma analítica.

- El modelado se hizo considerando rígido el sistema de techo, aún existiendo bóvedas de mampostería.
- El procedimiento de análisis Pull-down aquí propuesto, permite evaluar el desempeño estructural en condiciones inelásticas en edificaciones construidas a base de mampostería o de concreto, en cualquier ubicación de los asentamientos diferenciales, con la condición de que se hagan en la dirección paralela a la aplicación de los empujes, y conocer sus estados límite ante diferentes niveles de distorsión.

4.9. CONCLUSIONES

El método Pull-down aquí propuesto para analizar el desempeño estructural en edificaciones afectadas por subsidencia, permitirá evaluar el nivel de daño en el que se encuentran de forma analítica y ya no bajo un criterio subjetivo de observación, de registro o de medición de daños, en edificaciones construidas con muros de mampostería o de concreto. Se realizó un comparativo con ambos materiales y con la metodología Push-over para detectar cómo la baja magnitud de los asentamientos diferenciales afecta significativamente la resistencia y estabilidad de las construcciones, y también se detectaron algunas conclusiones inherentes al comportamiento de sus materiales, y que se enuncian a continuación:

- De acuerdo a los procedimientos Push-over y Pull-down realizados para mampostería y concreto en ambas direcciones de análisis, y según se observa para PD-Y1 (mampostería) las deformaciones que se alcanzan son mucho mayores que las de PD-Y2 (concreto), debido a que la mampostería presenta daños más severos y por lo tanto un desempeño muy cercano al colapso.
- Según el comparativo de distorsiones-cortante basal para ambas direcciones de análisis de la edificación, tanto transversal como longitudinal, y para los dos tipos de materiales, mampostería y concreto, se observó que la mayoría de los análisis realizados pudieron incursionar en un rango plástico de comportamiento, al haber

rebasado las distorsiones el “Estado Límite de Servicio” ($d=0.04\%$), y solamente dos rebasaron el “Estado Límite de Operación” ($d=0.18\%$).

- Debido a que la mayoría de los análisis presentaron un descenso en su curva de cortante basal-desplazamiento, antes de alcanzar una distorsión de $d=0.18\%$, se deduce que la estructura presenta una ductilidad baja antes de alcanzar su deterioro y posible colapso, debido a que ambos materiales son frágiles y con deformaciones excesivas.
- A causa de que el modelo estructural se realizó por elemento finito en base a elementos de área, se considera más confiable recurrir a las gráficas de isovalores de esfuerzos en los muros que resultan de los análisis por control de carga o por control de desplazamientos, para identificar el momento en que los asentamientos provoquen plasticidad en los muros.
- Para revisar de forma detallada el nivel de esfuerzos cortantes o por compresión de cada muro de la edificación durante su historial de desempeño, se recurrió a las gráficas de isovalores de esfuerzos generadas por el software, seleccionando los pasos trazados con marcadores para cada análisis Push-over o Pull-down requeridos, y que se encontraron entre los límites de distorsión permisible definidos por Astroza y Schmidt de 0.04% a 0.18% .
- Una vez elegidas las gráficas, también se podrá revisar la magnitud y progresión de los asentamientos diferenciales y de las distorsiones para cualquier parte de la estructura, según los pasos seleccionados.
- El procedimiento “PO-Y2 (y)” es el que refirió la mayor magnitud de cortante basal por tener sus muros de concreto, de $8,036.00$ kN para el “ELS” y de $20,580.00$ kN para el “ELO”, con distorsiones de 0.04 y 0.18 respectivamente, mientras que el procedimiento “PD-Y1 (y)” es el que presentó la menor magnitud de cortante basal por tener sus muros de mampostería de 539.00 kN para el “ELS”, con una distorsión de 0.04 ante un asentamiento máximo de 25 mm en la edificación.
- Al revisar los esfuerzos cortantes en los diagramas de isovalores, se observó que varias porciones de muros incursionaron en el rango inelástico sobre todo en el paso 2 de aplicación del procedimiento Pull-down, rebasando el esfuerzo cortante permisible de la mampostería de 0.294 N/mm², y coincidiendo los esfuerzos rebasados con los daños que tienen en la actualidad tales muros, donde se observa que ya tienen agrietamientos por cortante o por tensiones acumuladas.

CAPÍTULO 5

MONITORIZACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICACIÓN PARA EVALUAR EL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA

5.1. INTRODUCCIÓN

En ocasiones los asentamientos urbanos se realizan sin tener planes de ordenamiento que prevengan la ocurrencia de riesgos o accidentes naturales, bien sea porque el conocimiento de la historia natural del lugar es muy breve debido a que no han estudiado a detalle y profundidad los fenómenos de las poblaciones allí asentadas, porque quizás las edificaciones son muy antiguas y fueron construidas sin el uso de reglamentos de construcción actualizados, por desconocimiento o falta de técnicas e instrumentos de medición para precisar los eventos ocurridos o por venir en el futuro, o porque quizás la presencia de eventos catastróficos tienen un periodo de retorno muy grande que no ha permitido que los pobladores se dieran cuenta de la cercanía de dichos fenómenos. En nuestro caso de estudio que es la subsidencia, se tiene una génesis del problema tanto natural como antrópica, ya que algunos de los factores naturales que la provocan se potencializan al intensificar la extracción del agua del subsuelo para el consumo humano, lo que deteriora de forma progresiva a las edificaciones, generándose en ellas diversas patologías que ponen en riesgo su estabilidad estructural y la seguridad de sus ocupantes.

Para determinar las patologías de daños de una edificación, se tiene una relación directa con el comportamiento del sistema estructural y con sus mecanismos de colapso en función de diversos aspectos, mencionándose entre ellos los siguientes:

- a) Las cargas a las que está sometida la estructura a partir de su elaboración y a las que estará sujeta durante su vida útil.
- b) Los asentamientos diferenciales impuestos por la subsidencia o por algún otro evento natural que afecte a la edificación, como los sismos, huracanes, presiones hidrostáticas, viento, nieve, etc.
- c) La estructuración y conectividad de sus principales elementos estructurales.
- d) La solución en la integración de todo el sistema estructural, desde su cimentación,

subestructura y superestructura, para disipar, atenuar o resistir las cargas a las que estará sometida la edificación.

- e) La calidad de los materiales empleados en su construcción y a su respuesta inelástica ante la aplicación de cargas repetitivas, repentinas o accidentales.
- f) La calidad de los procesos constructivos empleados en la elaboración de la edificación.
- g) El tipo de suelo donde esté desplantada la edificación, para obtener una respuesta estructural adecuada de todo el sistema que asegure la efectiva transmisión de esfuerzos a la estructura del suelo.
- h) La cercanía con las fallas o agrietamientos en la superficie donde estén desplantadas las edificaciones.

Este último aspecto es uno de los más relevantes en la ocurrencia y progresión del daño en las edificaciones desplantadas en zonas de subsidencia, porque este fenómeno es muy lento en su desarrollo; y para identificar las trayectorias o zonas precisas de hundimientos, se debe de estudiar a detalle la hidrodinámica y comportamiento mecánico de los suelos, así como la tectónica y geología del lugar, por lo que en ocasiones la predicción en la ubicación de fallas es muy subjetiva, salvo que ya existan indicios superficiales que muestren la localización de grietas, fracturamientos, escarpes o conos de abatimiento.

Para dar seguimiento a nuestra investigación, se propuso en el capítulo anterior una metodología de análisis estructural por desempeño en edificaciones afectadas por subsidencia, por lo que se seleccionó una de ellas, misma que está al borde de uno de los escarpes más significativos de la localidad de Jocotepec, y que hasta el momento ha manifestado un movimiento descendente mayor desde su fachada hasta su parte posterior. Por lo tanto en este capítulo se correlacionarán los daños encontrados en la edificación con los niveles de esfuerzos de sus principales elementos estructurales obtenidos en el análisis Pull-down, tomando en cuenta las deformaciones que están teniendo actualmente por la subsidencia. Para ello se instrumentó la vivienda para registrar sus deformaciones y agrietamientos en los muros, así como para conocer el movimiento global de la edificación respecto a la localidad.

5.2. DISTRIBUCIÓN ARQUITECTÓNICA E INSTRUMENTACIÓN DE LA EDIFICACIÓN

En el inciso 4.6.2 se describió la edificación seleccionada para el presente estudio, por lo que en la figura 5.1 se muestra en planta baja y en planta alta la ubicación de los testigos empleados para medir los agrietamientos de los muros por la subsidencia, y en la figura 5.2 se presenta un detalle isométrico de la edificación con la ubicación de dichos elementos de control. Asimismo en la fig. 5.3 se presentan los cortes transversales y longitudinales que permiten conocer a mayor detalle la distribución arquitectónica de la edificación.

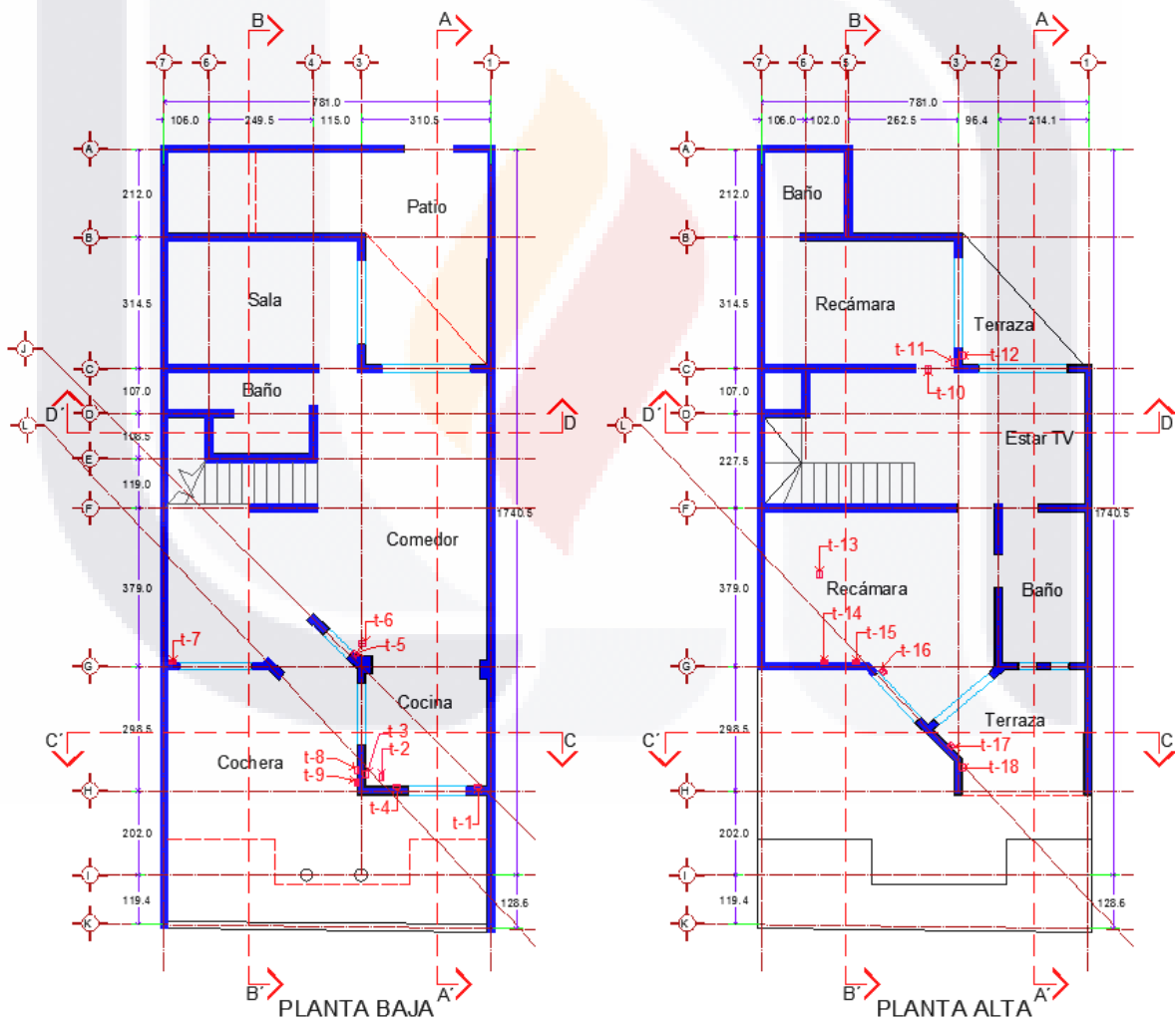


Fig. 5.1 Distribución arquitectónica e instrumentación de la edificación (plantas)

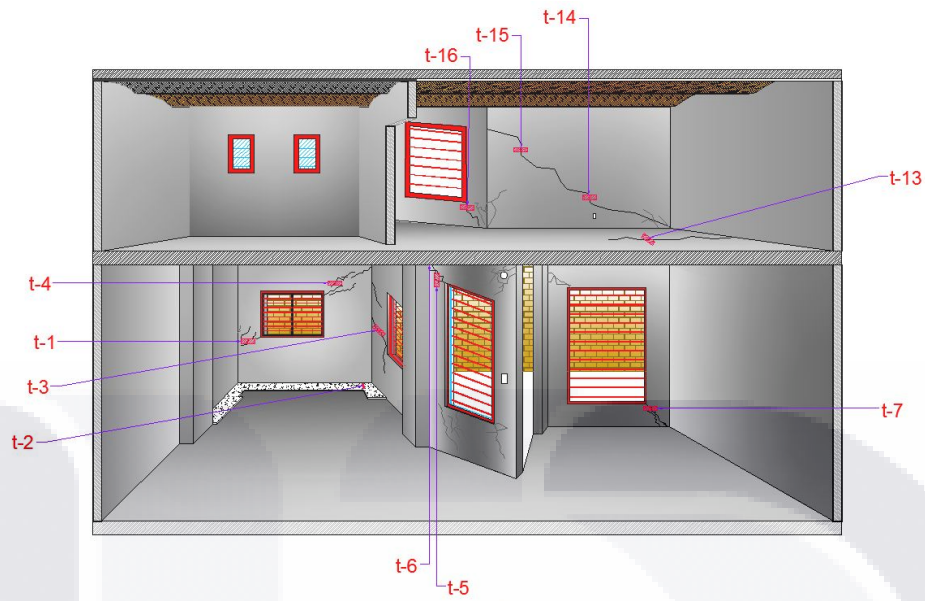


Fig. 5.2 Instrumentación de la edificación (isométrico)

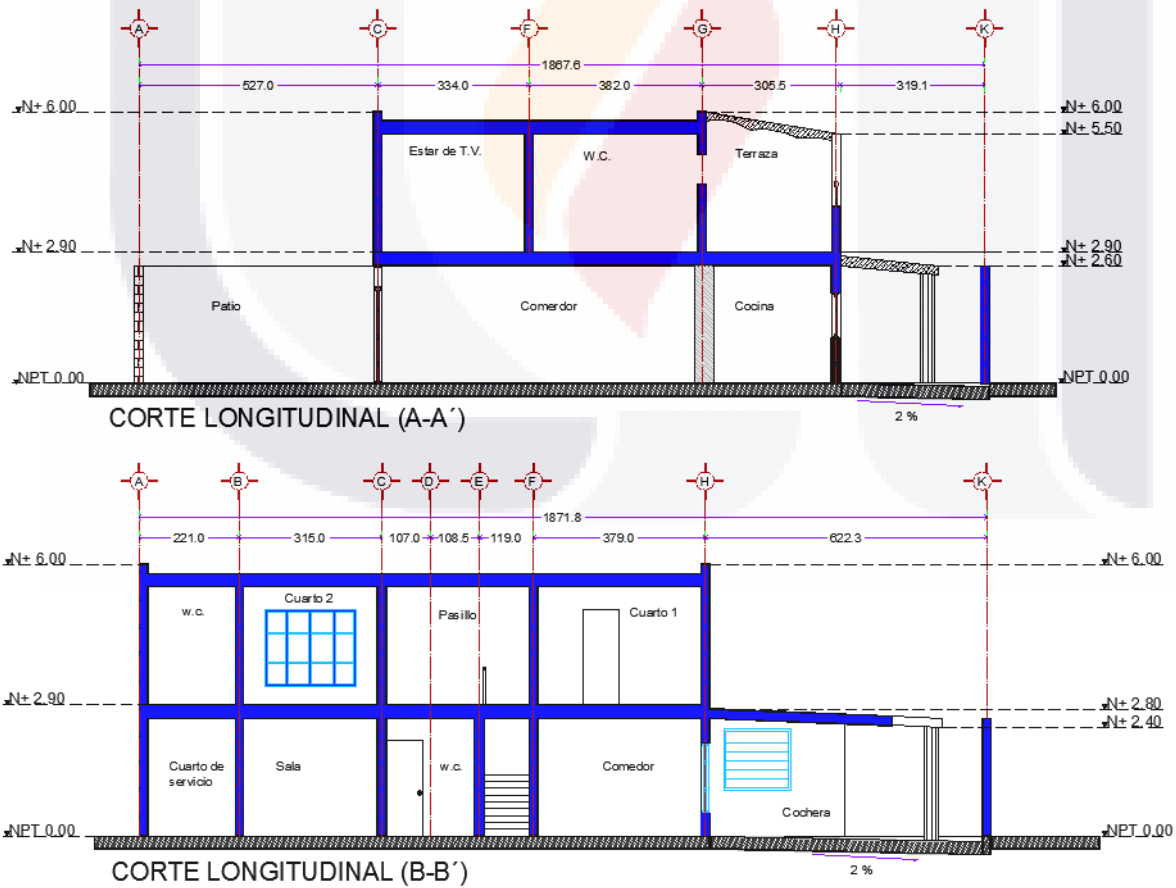


Fig. 5.3 Cortes longitudinales y transversales de la edificación

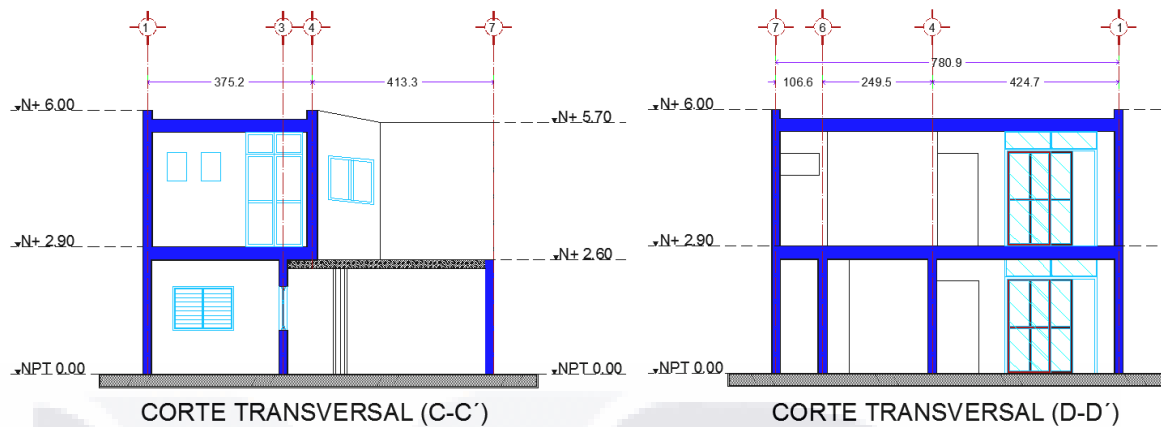


Fig. 5.3 Cortes longitudinales y transversales de la edificación (continuación)

Se colocaron en total 18 testigos para monitorizar las deformaciones de la vivienda (fig. 5.4a a 5.4d), 14 testigos en los muros, uno en el piso de la planta baja, uno en el techo de entrepiso y dos en el piso de la planta alta.

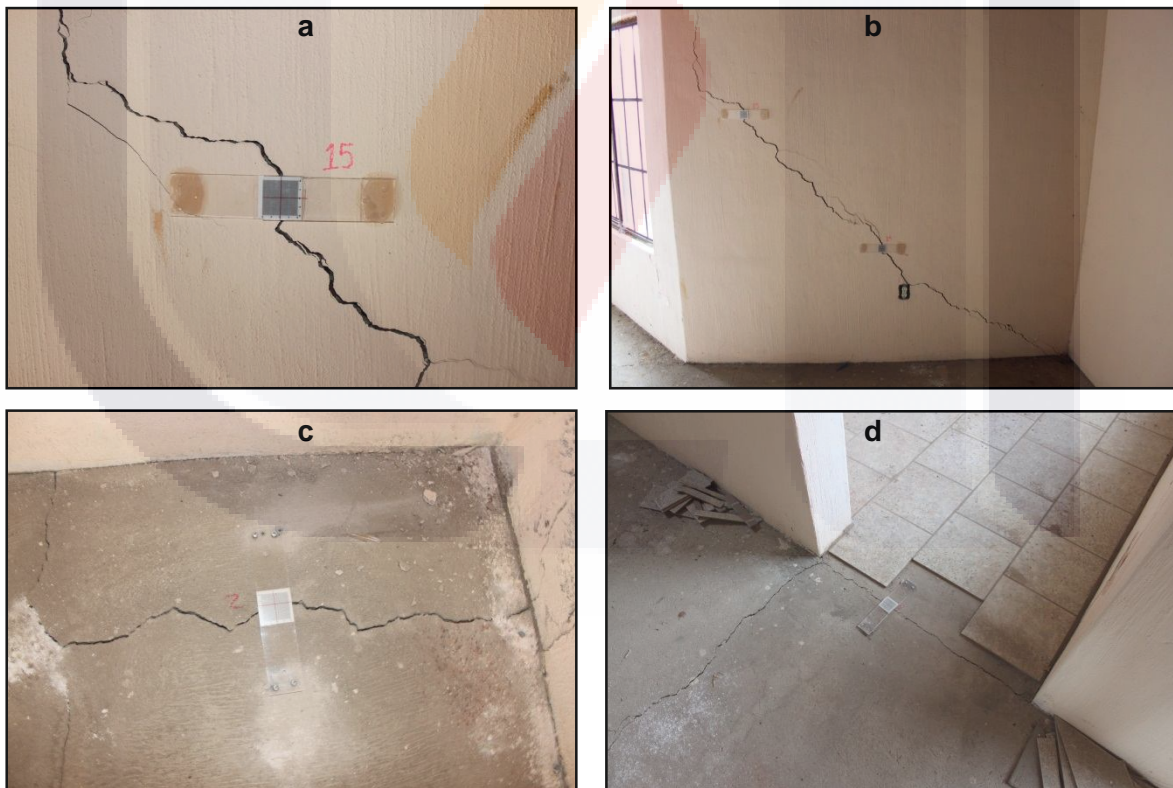


Fig. 5.4 Colocación de testigos: a) y b) en muros, c) en pisos y d) en techos

Los testigos utilizados para monitorizar los agrietamientos en los muros están hechos a base de dos placas rectangulares de acrílico transparente de 15 x 5 cm, cuya fijación a los muros fue en uno de sus extremos con tornillos, taquetes y silicón. En la placa de fondo se colocó una cuadrícula con separación milimétrica y en la placa frontal una cruz que permite observar los desplazamientos que ocurren hacia cualquier sentido de los cuadrantes.

5.3. MEDICIÓN DE MAGNITUDES DE DESPLAZAMIENTO DEL SUELO RESPECTO A LA EDIFICACIÓN

Para monitorizar los desplazamientos del suelo generados bajo la edificación seleccionada para esta investigación y debido a que eran pocos puntos a registrar en una superficie relativamente pequeña, se seleccionó el método de medición del sistema GPS diferencial (DGPS, Differential Global Positioning System), el cual consiste en la radiolocalización de los puntos de control a través de una constelación de al menos 4 satélites, que nos proporcionan sus longitudes, latitudes, altitudes y el tiempo de cada medición. Además para incrementar la precisión, se ubica una estación de referencia en tierra con posición conocida para calcular y corregir los errores sistemáticos que suelen producirse en la determinación del movimiento del punto de control. Esta metodología con los sistemas GPS, ha sido utilizada con mucho éxito para la monitorización de fenómenos de subsidencia y movimientos de ladera (Tomás R. *et al*, 2005, Guerrero J. *et al*, 2004).



Fig. 5.5 Equipo GPS para monitorización de los desplazamientos: a) base fija y b) base móvil

Para las mediciones se utilizó un equipo de precisión estático (RTK) GNSS (GPS + Glonass + Galileo) multi-frecuencia marca Trimble modelo R8 con base y móvil, con una precisión de 10 mm en el desplazamiento vertical y de 5 mm en el desplazamiento horizontal (fig. 5.5).

Para la obtención de los desplazamientos en la edificación, se determinaron cinco puntos de control: el primero “E1” se localizó al costado del kiosco en la plaza principal de la localidad, el segundo “E2” y tercero “E3” sobre la azotea de la edificación a monitorizar, ubicada en la calle Juárez # 86, el cuarto “E4” sobre la azotea de otra edificación localizada sobre la calle Hidalgo # 213, que sirvió de referencia para colocar la estación fija y que además nos proporcionó también datos de hundimiento en la zona sur de la localidad; y el quinto punto de control “E5” se ubicó sobre un manto rocoso localizado en el cerro que delimita el norte de la localidad de Jocotepec, mismo que se consideró fijo e inamovible, y a partir del cual todas las mediciones se referenciaron para determinar los desplazamientos de los otros cuatro puntos de control. En la fig. 5.6 se muestra la ubicación de los puntos de control respecto a la localidad y la edificación de estudio, y en la fig. 5.7 se muestra de forma detallada la medición de cada punto de control.

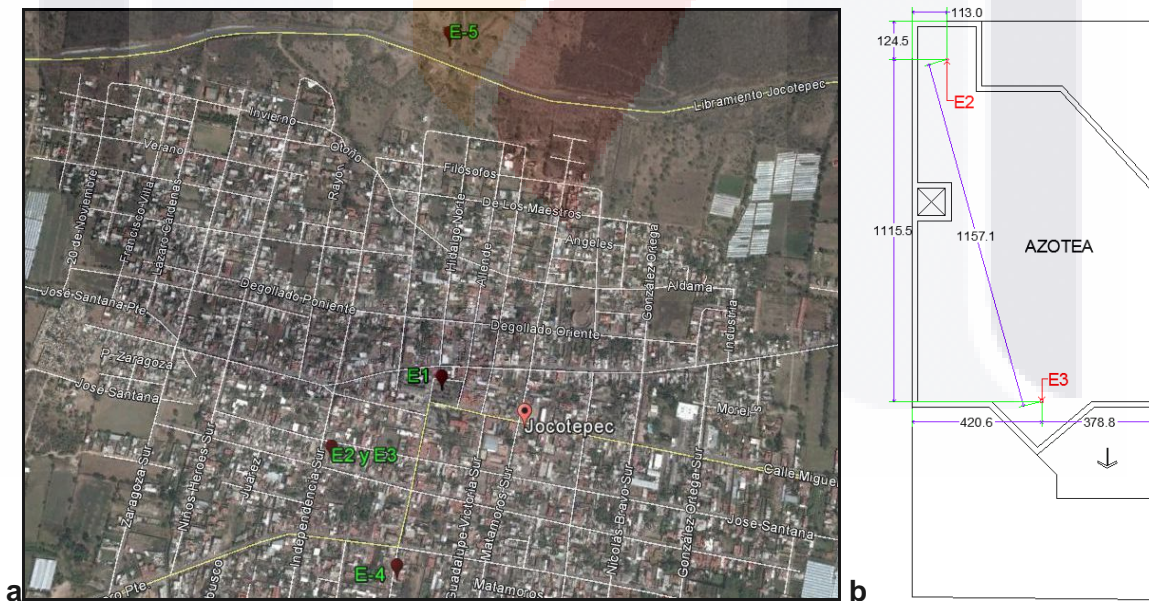


Fig. 5.6 Ubicación de estaciones para monitorización de deformaciones verticales del suelo: a) en la localidad (Google Earth, 2015) y b) en la edificación instrumentada



Fig. 5.7 Medición de puntos de control para monitorización de deformaciones: a) Estación E1 (kiosco), b) Estación E2 (casa Juárez), c) Estación E3 (casa Juárez), d) Estación E4 (casa Hidalgo), e) Estación E5 (cerro), f) vista hacia la localidad desde el punto E5

Se realizaron tres mediciones para cada punto de control en diferentes épocas, la primera fue el 27 de noviembre del 2014, la segunda el 10 de marzo del 2015 y la tercera el 26 de mayo de ese mismo año, con intervalos de 3.5 y 2.5 meses respectivamente, donde se obtuvieron las deformaciones verticales que se muestran en la tabla 5.1. Según se aprecia en dicha tabla, las estaciones E1 y E2 tienen una tasa de deformación vertical promedio de 8 y 9 mm/mes, y según el inciso 3.4 ambos puntos coinciden con la

alineación de daños de edificaciones centro. La estación E3 es la que tiene la máxima deformación vertical de hasta 162 mm de hundimiento en los seis meses de medición, con una tasa promedio de 27 mm/mes, ubicada sobre esa misma alineación de daños, pero donde se observa que la edificación está teniendo un asentamiento diferencial significativo que se traduce en giro d toda la vivienda como cuerpo rígido, más sin embargo como se verá en el inciso 5.4, ya se observan daños muy fuertes en algunos de sus principales elementos estructurales. En la estación E4 se registró una tasa de deformación vertical promedio de 6 mm/mes, menor a las de las estaciones E1 y E2, coincidiendo con la traza de la alineación de daños de edificaciones sur. Cabe mencionar que las deformaciones obtenidas traen intrínseco un margen de error por la precisión del equipo utilizado cuya tolerancia varió desde los ± 3 hasta los ± 14 mm durante las tres mediciones, con un promedio de ± 6.6 mm, por lo tanto para la deformación vertical registrada en la estación E3 le corresponden los valores de 155.4 y 168.6 mm, con una tasa de deformación vertical mínima y máxima de 25.9 y 28.1 mm/mes respectivamente.

Tabla 5.1 Deformaciones verticales obtenidas en las tres etapas de monitorización

Estación	Ubicación	Elevación UTM (mt)			Deformación vertical (mm)						Tasa de deformación (mm/mes)
		1er medn.	2da medn.	3era medn.	1er a 2da	(+,-)	2da a 3era	(+,-)	1er a 3era	(+,-)	
E1	KIOSCO	1541.958	1541.924	1541.909	34		15	5	49	6	8
E2	CASA JUÁREZ	1547.048	1546.995	1546.996	53	8	-1	3	52		9
E3	CASA JUÁREZ	1546.708	1546.599	1546.546	109	9	53	5	162	3	27
E4	CASA HIDALGO	1539.536	1539.505	1539.502	31	7	3		34	4	6
E5	CERRO	1640.535	1640.535	1640.535	0	14	0	7	0	8	0

También es conveniente mencionar que las mediciones realizadas en las azoteas de las edificaciones, no toman en cuenta la deformación local acumulada en cada uno de los elementos estructurales por efectos de compresión, flexión, pandeo local o cortante, ya que se está considerando que las edificaciones siguen teniendo estabilidad e integridad estructural y que su geometría no ha cambiado significativamente aún por el efecto de los asentamientos diferenciales, por lo tanto los valores mencionados en la tabla 5.1 deben ser tomados con cautela y solo para conocer el impacto de la subsidencia sobre las edificaciones, mas no para cuantificar su nivel de daño, que será un tema que se tratará a detalle en el siguiente punto. Según se observa en esa misma tabla, la diferencia de deformación vertical entre las estaciones E3 y E2 para los seis meses de monitorización es de 110 mm, con una tasa de deformación vertical promedio de 18.33 mm/mes. Asimismo se observa que la estación E2 no tuvo ningún descenso vertical, por

el contrario presentó un ascenso de 1 mm, lo que hace creer que la edificación se está pivotando desde su parte posterior, y se está hundiendo en su totalidad hacia el frente de la calle como cuerpo rígido. Cabe señalar que el periodo de monitorización se consideró durante la temporada de estiaje, por lo que sería conveniente a futuro realizar otras mediciones pero durante el temporal de lluvias, para detectar si existe alguna variación significativa en las deformaciones verticales entre ambas temporadas.

5.4. MONITORIZACIÓN DE DAÑOS EN LA EDIFICACIÓN

Para cuantificar y comprender el comportamiento de deformación al que está sometida la edificación durante el fenómeno de subsidencia, se mostrará el registro de los desplazamientos horizontales y verticales de los agrietamientos de los muros de la edificación, el vínculo entre las deformaciones del suelo y del inmueble, así como también la influencia y relevancia de sus magnitudes y trayectorias de daños.

5.4.1. Revisión de desplazamientos en los agrietamientos de los muros

Se realizaron tres mediciones de los agrietamientos en los muros simultáneamente a la monitorización de los desplazamientos del suelo, donde se registraron para cada testigo los desplazamientos en las coordenadas "X" y "Y", según se muestra en la tabla 5.2 y cuyos valores fueron graficados para cada punto de control. El valor de máximo desplazamiento horizontal "X" fue de 1.859 mm y se obtuvo en el testigo 12, que está ubicado en el muro central de la planta alta, reflejando con ello que la casa se está desplazando hacia el frente, o sea hacia la calle; y el valor de máximo desplazamiento vertical "Y" fue de 2.572 mm en el testigo 9, que está localizado en el muro central de la fachada de la casa, que es hacia donde se refleja un mayor hundimiento de la casa. La tasa de deformación promedio para los 6 meses de monitorización fue de 0.310 y 0.429 mm/mes para las direcciones "X" y "Y" respectivamente. Debido a que solamente se han realizado tres monitorizaciones de desplazamientos en los testigos de los muros únicamente se presentaron sus máximos absolutos y la tasa de deformación a 6 meses, y por el momento no es conveniente representar la tendencia del comportamiento de deformación para cada testigo respecto a un tiempo mayor a través de análisis estadísticos, ya que se han obtenido muy pocos datos y se obtendrían errores grandes,

por lo que se recomienda seguir monitorizando las deformaciones en todos los puntos de control.

Tabla 5.2 Desplazamientos horizontales y verticales en los testigos de muros

TESTIGO	Fecha de medición	Desplazamientos (mm)		TESTIGO	Fecha de medición	Desplazamientos (mm)	
		X	Y			X	Y
1	27-nov-14	0.000	0.000	12	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	0.000	-0.500		10-mar-15	1.408	-0.308
	26-may-15	0.000	-0.500		26-may-15	1.859	-0.295
2	27-nov-14	0.000	0.000	13	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	-0.098	-0.271		10-mar-15	1.151	1.142
	26-may-15	0.106	-0.468		26-may-15	1.151	1.195
3	27-nov-14	0.000	0.000	14	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	0.556	0.240		10-mar-15	0.505	0.307
	26-may-15	1.000	0.555		26-may-15	0.608	0.257
4	27-nov-14	0.000	0.000	15	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	-1.300	-1.000		10-mar-15	0.550	0.000
	26-may-15	-0.700	-1.100		26-may-15	0.451	0.100
5	27-nov-14	0.000	0.000	16	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	-0.200	0.000		10-mar-15	0.047	-0.255
	26-may-15	0.000	0.100		26-may-15	0.045	-0.055
7	27-nov-14	0.000	0.000	17	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	0.010	1.150		10-mar-15	-0.001	0.146
	26-may-15	0.012	1.050		26-may-15	0.199	0.146
8	27-nov-14	0.000	0.000	18	27-nov-14	0.000	0.000
	10-mar-15	0.805	-0.548		10-mar-15	0.302	-0.148
	26-may-15	1.510	-1.253		26-may-15	-0.001	-0.151
9	27-nov-14	0.000	0.000	Máximos absolutos:		1.859	2.572
	10-mar-15	0.524	-1.589	Tasas de deformación en 6 meses:			
	26-may-15	1.148	-2.572	máximos:	0.310	0.429	
10	27-nov-14	0.000	0.000				
	10-mar-15	-1.000	-0.300				
	26-may-15	0.711	-1.200				
11	27-nov-14	0.000	0.000				
	10-mar-15	1.040	1.119				
	26-may-15	1.381	1.525				

En la fig. 5.8 se presentan los gráficos de los testigos 9 y 12, con los máximos desplazamientos en el sentido vertical y horizontal respectivamente.

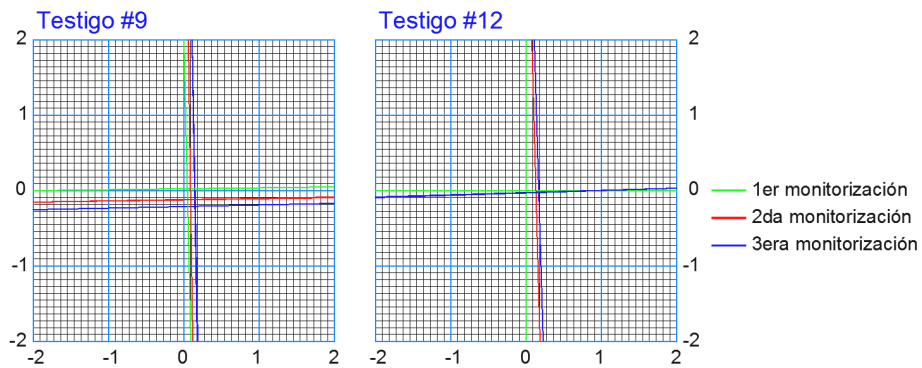


Fig. 5.8 Registro de desplazamientos en los testigos 9 y 12. Los valores en los ejes son centímetros

Al comparar las deformaciones del suelo obtenidas en el inciso 5.3 con las aquí obtenidas para la edificación, se observa que los desplazamientos en los testigos reflejan el comportamiento de las aberturas en los agrietamientos de los muros, debido a que solo se registran los desplazamientos locales de los testigos, por lo tanto se detecta que las magnitudes del desplazamiento global de toda la edificación son muy superiores a los de cada muro, esto quiere decir que la tasa de deformación del suelo es muy alta y que la edificación se está desplazando como cuerpo rígido hacia la zona de hundimiento, y que los muros están resistiendo el cambio de posición a través de su rigidez y lugar que ocupan respecto al sistema estructural, por lo que también se observa que los muros de fachada son los que más se han dañado debido a que ahí es donde se está concentrando gran parte de la masa debido al asentamiento diferencial.

5.4.2. Evolución del daño en los muros en función de sus agrietamientos

Al observar el patrón de agrietamiento final de un muro sujeto a cargas laterales por sismo o por asentamientos diferenciales generados por subsidencia, se pueden conocer los mecanismos de resistencia que se desarrollan internamente para soportar las cargas aplicadas. Conforme se avanza en la duración del sismo o subsidencia, se suceden agrietamientos progresivos donde su aparición depende de la velocidad de dichos fenómenos, y que se manifiestan como líneas de compresión en el tablero de mampostería, debido a que la magnitud de los esfuerzos principales de tensión perpendiculares a las grietas rebasa la resistencia de la mampostería.

Regularmente cuando el muro está sometido a esfuerzos por cortante, aparecen grietas en diagonal con una inclinación de aproximadamente 45° al centro del tablero, y la dirección del agrietamiento depende de la ubicación del asentamiento en el extremo del muro o de la dirección de aplicación de dicho cortante. Si el muro está reforzado perimetralmente por dalas y castillos, las grietas mencionadas pueden penetrar los extremos de los castillos, que es cuando se genera la flexión del tablero, y entonces el mecanismo de resistencia del muro ahora es influenciado por los esfuerzos por cortante (por fuerzas laterales resultantes de sismos o asentamientos diferenciales), más los esfuerzos de flexión (por desplazamientos de los niveles superiores), más los esfuerzos generados por las cargas gravitacionales que son aplicadas desde la construcción del muro y del resto del sistema estructural (desplazamientos verticales descendentes hacia los apoyos).

En términos generales, la aparición de nuevos agrietamientos origina una disminución en la magnitud de la rigidez del sistema. Esto resulta lógico, puesto que físicamente una grieta contribuye a la progresiva pérdida de integridad del muro de mampostería. Por lo tanto, después de alcanzarse la resistencia máxima del sistema, cuando se aplican mayores distorsiones, que para el caso que estamos estudiando son generadas por la subsidencia, se origina la propagación del daño hacia áreas aún no agrietadas del tablero de mampostería, debido a la acción de confinamiento proporcionada por los castillos y dalas y por la presencia de carga vertical. Por lo que el confinamiento permite mantener a la mampostería dañada en conjunto dentro del marco exterior y esto evita en ocasiones el colapso del sistema estructural.

Para el caso de la edificación afectada por subsidencia en Jocotepec que fue seleccionada para este estudio, las posiciones, longitudes, inclinaciones y amplitudes de los agrietamientos iniciales dependen del lugar donde se encuentran los asentamientos diferenciales, que coinciden al frente de la edificación, mientras que el patrón posterior de agrietamiento depende tanto de la resistencia de los tableros de muros como de la posición que ocupan respecto al sistema estructural. Desde la figura 5.9a hasta la 5.9f, se pueden observar los múltiples daños generados en los principales muros de la edificación para la planta baja.



Fig. 5.9 Agrietamientos en muros de planta baja: a) Por flexión y cortante en muro de fachada, b) Desprendimiento de muro de fachada por asentamiento diferencial, c) Cortante en muro diagonal central, d) Asentamiento diferencial de muro de fachada, e) Cortante y flexión en muros de cochera, f) Desplazamientos de bóveda

Debido a la transmisibilidad de esfuerzos de tensión generados en los muros de planta baja hacia los muros de planta alta por efecto de los asentamientos diferenciales, se generaron agrietamientos por cortante en los muros de planta alta muy cercanos al nivel del entrepiso, y donde se intersectan los muros longitudinales con los transversales se produjo un desprendimiento vertical en los primeros, debido a los desplazamientos de todos los muros hacia la zona de hundimiento. Desde la figura 5.10a hasta la 5.9h, se

pueden observar los múltiples daños generados en los principales muros de la edificación para la planta alta.



Fig. 5.10 Agrietamientos en muros planta alta: a) Transmisión de cortante desde bóveda de entresuelo, b) Desprendimiento de muro longitudinal y cortante hacia la bóveda, c) Asentamiento diferencial de los muros de fachada planta baja, d) Cortante en mochetas hacia la zona de hundimiento



Fig. 5.10 Agrietamientos en muros planta alta (continuación): e) Transmisibilidad del asentamiento diferencial desde la planta baja, f) Continuidad del cortante hacia los muros posteriores, g) Cortante en muro colindante, h) Cortante en muros de fachada

Para evaluar la degradación de rigidez y la pérdida de resistencia de los muros, los patrones de agrietamiento solo nos pueden indicar los mecanismos de falla que están gobernando a cada muro, más no las magnitudes de las fuerzas que provocan los daños, por lo que se propone hacer una correlación con algún tipo de análisis estructural donde se considere el comportamiento inelástico de los materiales constituyentes de los muros, en función de la subsidencia. Entre mayor sea la abertura y longitud de los agrietamientos, quiere decir que los esfuerzos que deterioran a los muros se están retransmitiendo de las zonas dañadas hacia las porciones de muro que quedan sanas, por lo que el patrón de agrietamiento puede cambiar de forma imprecisa e indefinida debido a que la mampostería es anisotrópica; se necesitarían pruebas de laboratorio para cotejar los distintos tipos de fallas en los muros, y que se correlacionen con algunas reglas de comportamiento histerético de carga-descarga contra deformación o distorsión, para tener datos más precisos de sus resistencias y comportamiento estructural.

5.5. CORRELACIÓN DE DAÑOS DE LA EDIFICACIÓN MONITORIZADA CON SU ANÁLISIS PULL-DOWN

De acuerdo a la deformación del suelo donde está ubicada la edificación seleccionada para el análisis Pull-down, cuyos valores de deformaciones verticales descendentes se reflejaron en la tabla 5.1, donde para 6 meses de monitorización se obtuvieron 52 mm en la estación E2 (en la parte posterior de la azotea) contra 162 mm en la estación E3 (en la parte frontal de la azotea), se deduce que entonces hubo un asentamiento diferencial de 110 mm de la estación E3 con respecto a la E2. Al comparar tal asentamiento con la deformación máxima obtenida en el extremo frontal de la fachada de 62.5 mm (para un paso de análisis 16 según el análisis Pull-down realizado), se puede notar que de acuerdo al modelo estructural utilizado en el capítulo anterior para simular el fenómeno de subsidencia, y que corresponde a la casa en estudio, el programa interrumpió el análisis mucho antes de alcanzar la deformación de los 110 mm, debido a que el sistema ya era muy inestable, ya que para esos niveles de deformación y según lo observado en el sitio de estudio, las amplitudes y longitudes de los agrietamientos son tan grandes y la edificación se encuentra tan desplomada, que ya se puede considerar que la construcción empieza a mostrar signos de colapsos parciales a corto plazo en los muros frontales de la fachada, que son los más dañados actualmente.

Debido a que los muros longitudinales colindantes aún se mantienen con pocos daños, estos están haciendo la principal función de carga gravitacional y de resistencia al cortante para evitar el colapso de la zona frontal de la casa, más sin embargo también están teniendo un asentamiento diferencial proporcional y lineal respecto a toda su longitud, logrando con ello una redistribución de esfuerzos adecuada en todo el sistema estructural, pero con abundantes progresiones de daños y agrietamientos tanto en los muros transversales de planta baja como en los de planta alta y en la bóveda de entrepiso.

Para interpretar de manera gráfica el proceso del análisis Pull-down, desde la fig 5.11a hasta la 5.11g se muestra la progresión de los esfuerzos cortantes en los muros desde el paso 10 hasta el paso 16, donde se aplicaron los asentamientos de 37.25, 42.0, 46.2, 50.5, 54.5, 58.5 y 62.5 mm para esos 7 pasos respectivamente en el extremo de la fachada, y que fueron variando uniformemente hacia atrás de la edificación hasta llegar a

cero (distribución triangular de los asentamientos), por lo que se puede observar que los colores verdes y azules representan las tensiones y los amarillos, naranjas y rojos las compresiones, además se observa claramente el descenso del extremo izquierdo de la edificación provocado por los asentamientos diferenciales impuestos en el modelo de análisis estructural. Por lo tanto se observa que la mayor parte de los muros del extremo izquierdo están siendo comprimidos, que es hacia donde se dirige el asentamiento.

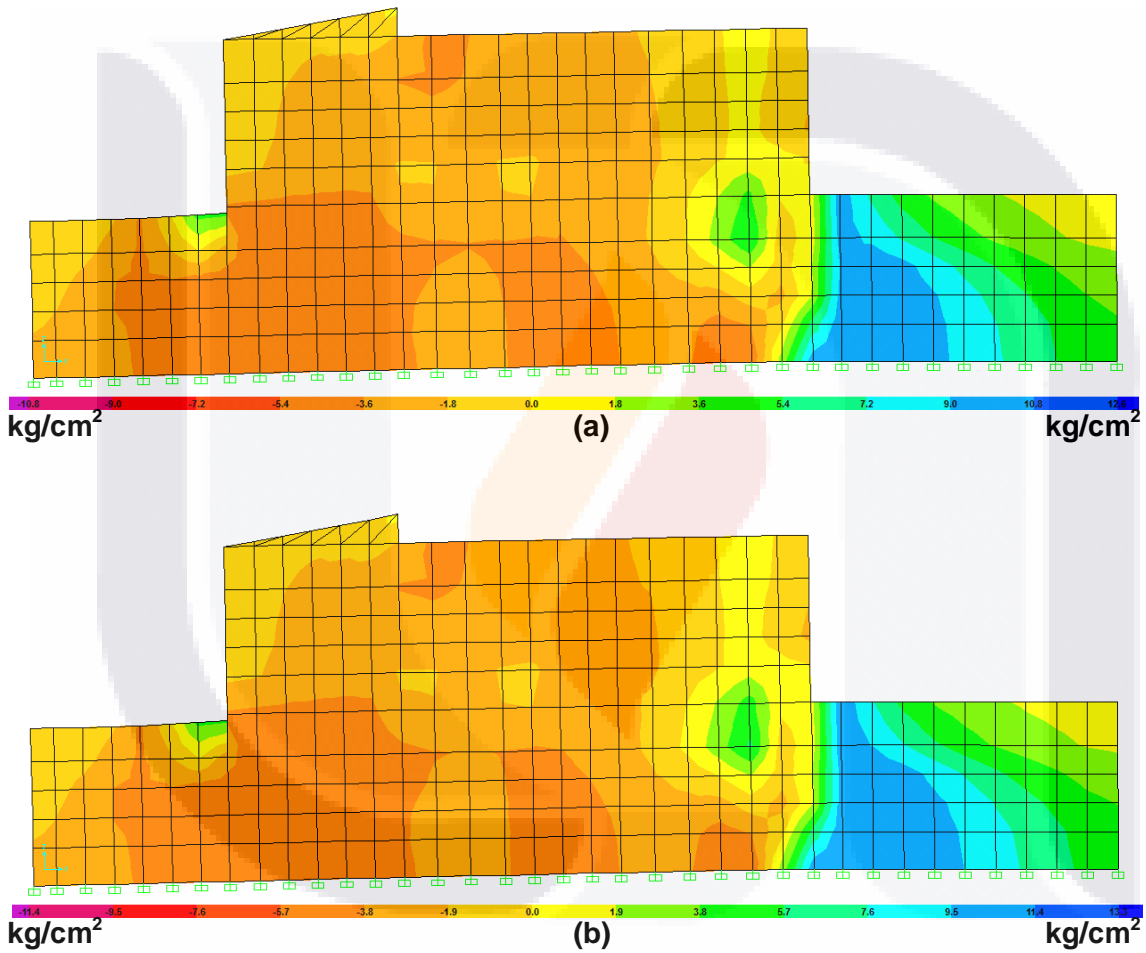


Fig. 5.11 Progresión de esfuerzos cortantes en muros colindantes de acuerdo al análisis Pull-down: a) Paso 10 con asent=37.25 mm, b) Paso 11 con asent=42.0 mm

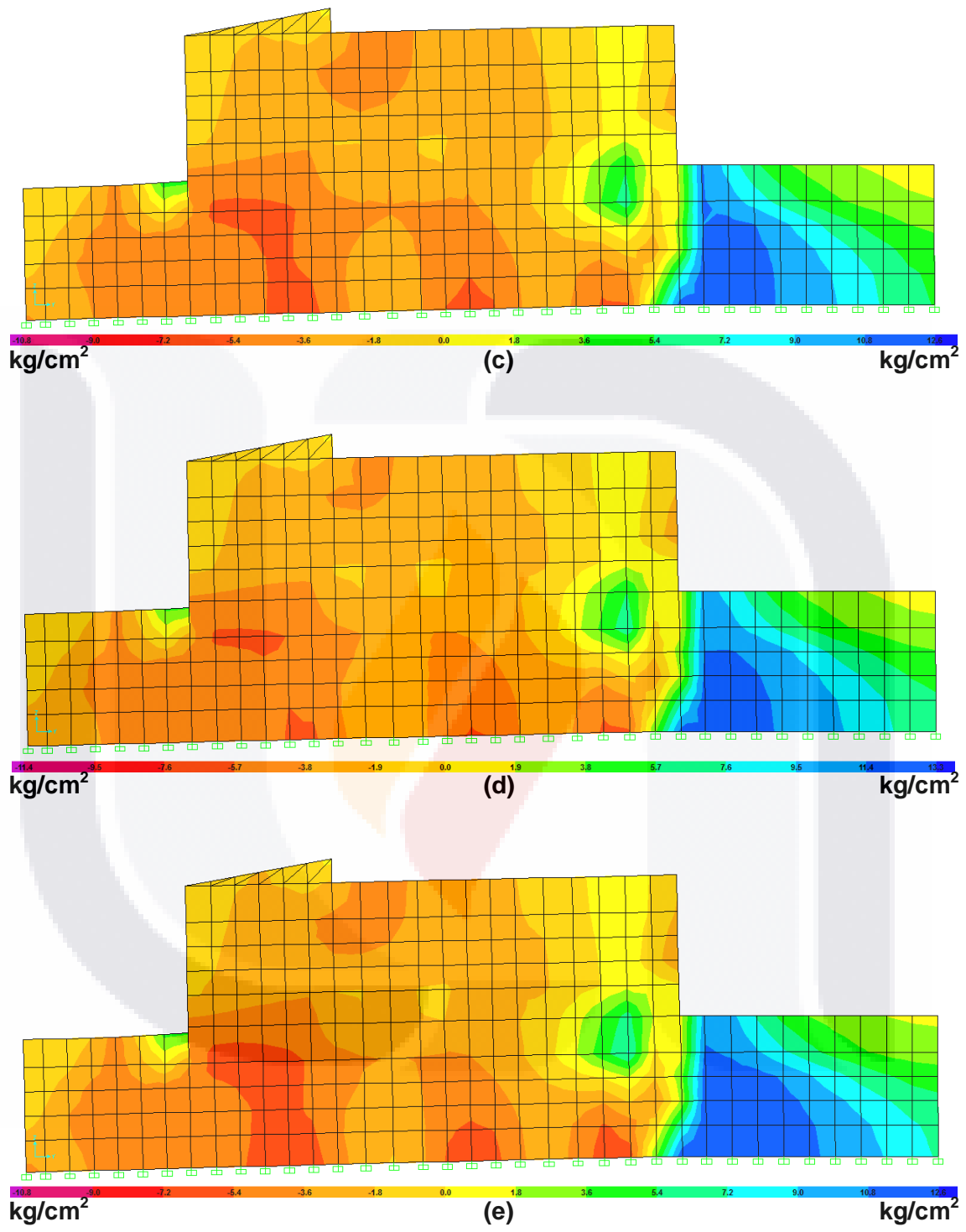


Fig. 5.11 Progresión de esfuerzos cortantes en muros colindantes de acuerdo al análisis Pull-down (continuación): c) Paso 12 con $\text{asent} = 46.2 \text{ mm}$, d) Paso 13 con $\text{asent} = 50.5 \text{ mm}$, e) Paso 14 con $\text{asent} = 54.5 \text{ mm}$

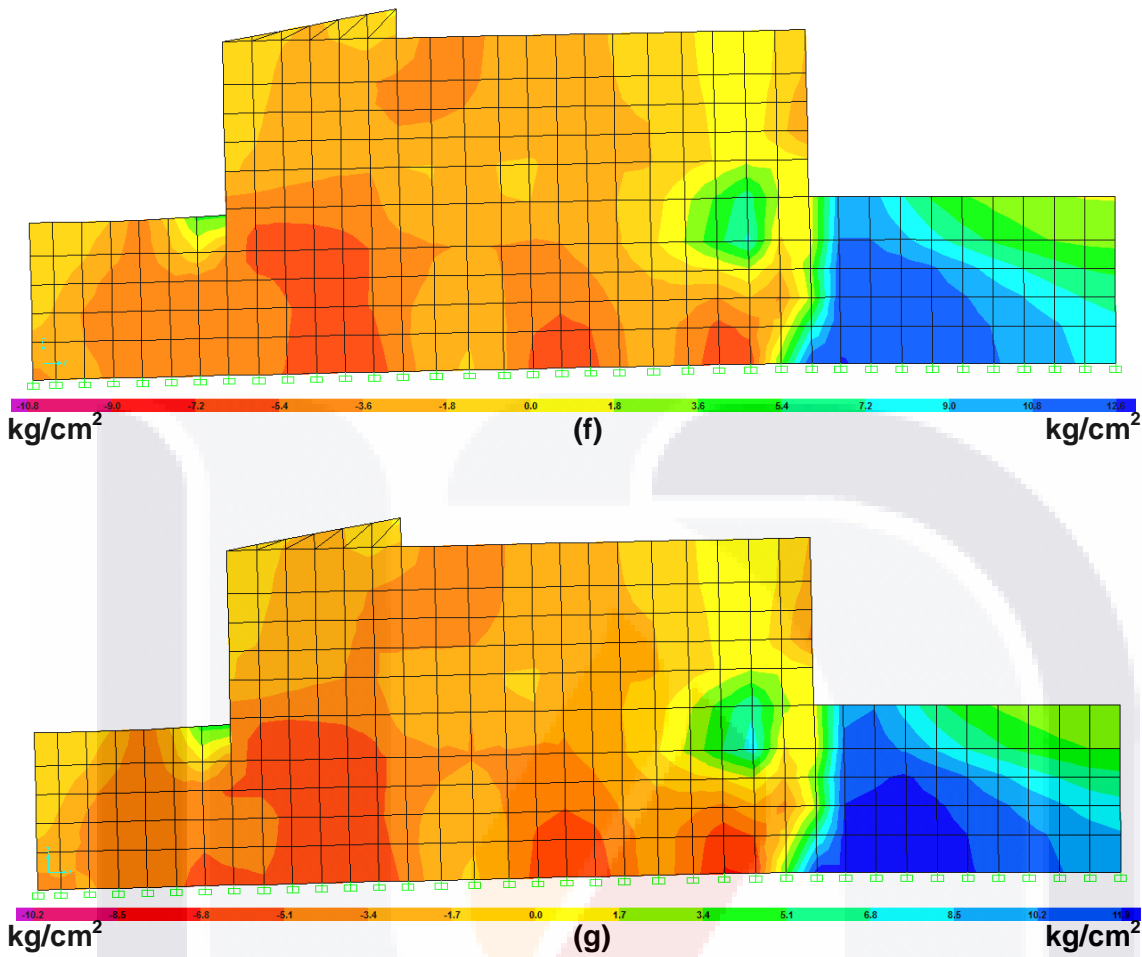


Fig. 5.11 Progresión de esfuerzos cortantes en muros colindantes de acuerdo al análisis Pull-down (continuación): f) Paso 15 con asent=58.5 mm, g) Paso 16 con asent=62.5 mm

Debido a que el valor más alto de asentamiento fue para el paso 16 con 62.5 mm en el extremo frontal de la edificación, se mostrará un comparativo de los diagramas de isovalores de esfuerzos agregando los agrietamientos que hasta el momento se han registrado, muchos de los cuales ya habían aparecido algunos años antes de realizar la exploración de la vivienda, y que muestran aberturas muy amplias y longitudes muy extensas, más sin embargo servirán para cotejar los diferentes daños encontrados en la actualidad con los esfuerzos.

Desde la figura 5.12a hasta la 5.12e, se muestra la superposición de agrietamientos respecto a los esfuerzos cortantes en los muros más relevantes de la edificación por el nivel de daño mostrado actualmente, y se observan sobre todo grietas

diagonales con una inclinación muy cercana a los 45° , ubicadas principalmente en los vértices de muros con las bóvedas y en los huecos de puertas y ventanas, ya que el desplazamiento de los techos genera puntales de compresión diagonales, presentándose los daños en las zonas más vulnerables de la mampostería en función de su mecanismo de colapso; además la orientación de la mayoría de las grietas coinciden hacia donde se está presentando el máximo asentamiento diferencial, esto es, hacia el frente de la fachada.

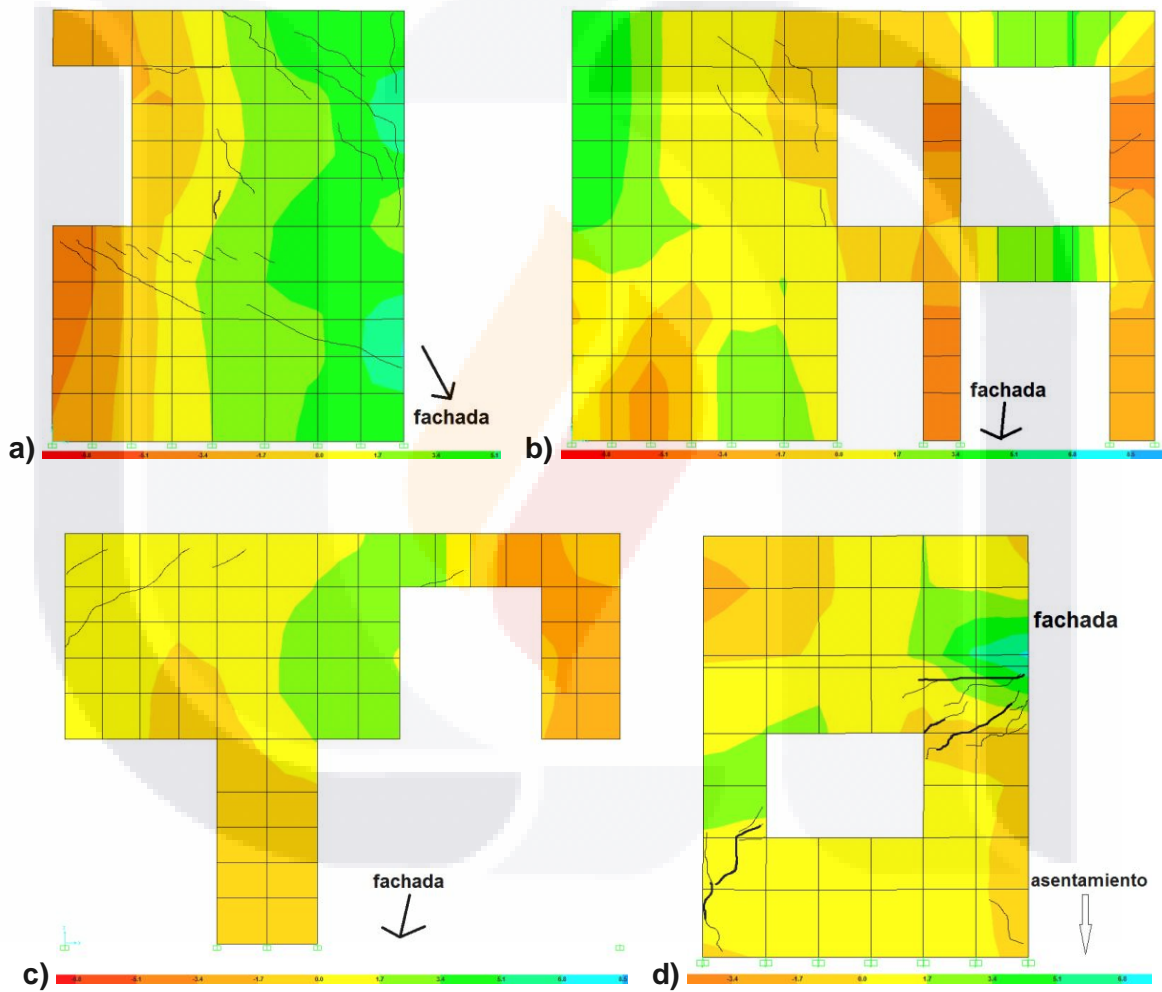


Fig. 5.12 Superposición de agrietamientos respecto a esfuerzos cortantes de muros: a) Eje B, b) Eje C, c) Eje F, d) Eje H

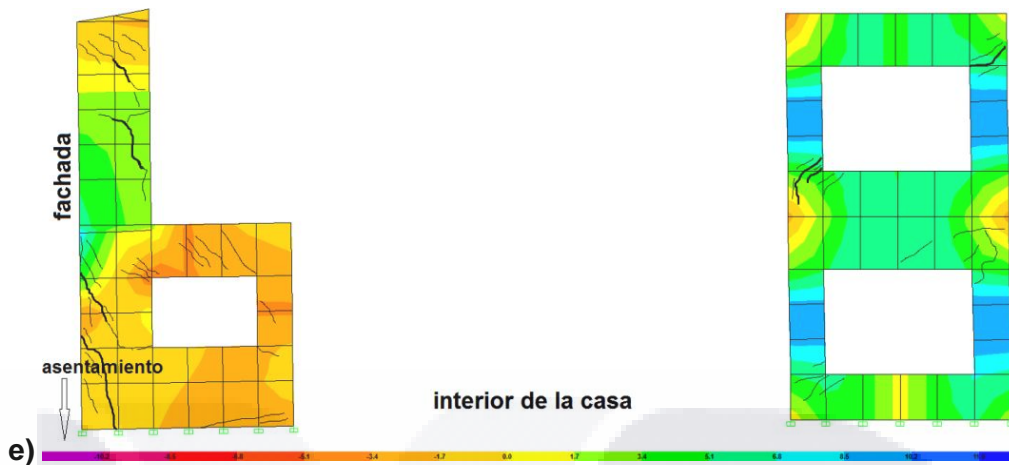


Fig. 5.12 Superposición de agrietamientos respecto a esfuerzos cortantes de muros (continuación): e) Eje 3

Debido a que no existía un registro de la ocurrencia de las deformaciones y agrietamientos en los muros desde que iniciaron sus asentamientos diferenciales por la subsidencia, no es conveniente correlacionar numéricamente las dimensiones de los daños ocurridos, esto es las amplitudes y longitudes de los agrietamientos, con los niveles de esfuerzo que se presentan en los muros durante el análisis Pull-down, ya que para tener precisión en la interpretación de los resultados, sería conveniente instrumentar completamente la edificación antes de que se presenten los asentamientos diferenciales por subsidencia y registrar todas sus deformaciones y daños, lo cual implica un reto al seleccionar la edificación que vaya a estar afectada por tal fenómeno, pero en ocasiones se encuentra que existen personas que a pesar de que se les avisa que donde pretenden construir es zona de riesgo por subsidencia, se empeñan en hacerlo; la otra opción sería hacer edificaciones a escala para inducirles deformaciones por asentamientos en laboratorio, donde se podría conocer de forma controlada y a detalle la fenomenología, comportamiento, resistencia y desempeño de la edificación.

En conclusión, por el momento el análisis Pull-down permitirá conocer de forma descriptiva el comportamiento de cada componente de cualquier edificación afectada por subsidencia, en función de la resistencia de sus materiales y de la ubicación de sus asentamientos diferenciales, más no de sus mecanismos de colapso, por lo que sí se podrá evaluar el nivel de deformaciones y distorsiones en función de niveles de desempeño estructural que se regulen o exijan a la construcción.

5.6. CONCLUSIONES

En este capítulo se propuso una metodología que permite la monitorización de daños en una edificación afectada por el fenómeno de subsidencia en la localidad de Jocotepec, para correlacionarlos con una metodología de análisis por desempeño estructural, llegando a las siguientes conclusiones:

- Con el método de medición del sistema GPS diferencial (DGPS, Differential Global Positioning System), se obtuvo una tasa de deformación de 27 mm/mes en la fachada de la edificación por subsidencia, y un asentamiento diferencial de 110 mm en un periodo de seis meses de medición en temporada de estiaje, entre dos puntos de control de la casa (frontal y posterior), lo que indica que toda la edificación se está hundiendo uniformemente hacia la calle.
- Los desplazamientos máximos absolutos se registraron en el muro de la fachada del eje 3 en planta baja y del muro posterior del mismo eje en planta alta; dicho eje está localizado longitudinalmente y al centro de la edificación, con un desplazamiento en "X" de 1.859 mm y de 2.572 mm en "Y" para seis meses de monitorización.
- Los desplazamientos globales en la edificación son mucho mayores a los locales en los agrietamientos de los muros, por lo que la edificación está teniendo una redistribución de esfuerzos en función de la tasa de deformación del suelo, y por el cambio de posición espacial de la estructura respecto a sus asentamientos diferenciales.
- Entre mayor sea la cantidad de monitorizaciones efectuadas para medir los desplazamientos de los agrietamientos en los muros y de los desplazamientos globales en los puntos de control topográficos, más precisión estadística habrá en la interpretación de las deformaciones locales y globales que esté teniendo la edificación, permitiendo esto que se puedan hacer proyecciones a largo plazo del comportamiento de los desplazamientos en el lugar de estudio.
- De acuerdo a la exploración de daños realizada hasta el momento a la edificación, los muros más afectados son los que se encuentran transversalmente en la fachada principal, que es hacia donde se manifiesta el máximo asentamiento diferencial de toda la casa, con agrietamientos que llegan a los 140 mm de

abertura, donde el muro rebasó su capacidad plástica y ya se formó un mecanismo de colapso; dicho muro se mantiene estable debido a la conectividad que tiene con respecto a los muros longitudinales y a la bóveda.

- De momento y en función de la magnitud de daños observados actualmente, la orientación de la mayoría de las grietas coinciden hacia donde se está presentando el máximo asentamiento diferencial, además no se considera viable el reforzamiento de la edificación por su costo y complejidad en la solución estructural, ya que sus daños seguirán progresando debido a que la subsidencia es constante en el lugar, además de que los muros presentan distorsiones muy elevadas y los asentamientos diferenciales son mayores a 100 mm.
- Para lograr una mayor precisión en la correlación de los daños con los esfuerzos obtenidos en los análisis Pull-down, será conveniente instrumentar la edificación desde el inicio de la ocurrencia de los daños por subsidencia, para registrar todas sus deformaciones y progresión de daños.

CAPÍTULO 6

IMPACTO EN LAS VIVIENDAS Y EN EL DESARROLLO ECONÓMICO DEL MUNICIPIO DE JOCOTEPEC, JALISCO, DEBIDO A UN USO NO SUSTENTABLE DEL AGUA

6.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el agua potable representa uno de los recursos más importantes para el desarrollo, progreso y estabilidad de las sociedades, por lo que se ha convertido en tema de atención de los gobiernos de todos los países, ya que se han provocado efectos negativos del cambio climático a mediano y a corto plazo, en algunas áreas que son más susceptibles a riesgos y desastres naturales. A pesar de que el 70% de la superficie terrestre está ocupada por agua, apenas un pequeño porcentaje de ella el 3% es dulce, y se encuentra depositada en los casquetes polares, en los glaciares, depósitos subterráneos, ríos, lagos, lagunas, embalses, humedad del suelo, en la atmósfera y en los seres vivos. Debido a la escasez del agua o a los altos costos para purificarla y acercarla a las poblaciones, se le categoriza como un recurso de alto valor, pues en la actualidad ya se le conoce como el “oro azul”.

El crecimiento tan rápido de la población mundial y de las ciudades, demanda grandes cantidades de recursos donde uno de los principales es el agua, por lo tanto debido al afán de acercar el progreso a las sociedades, se modifica o se genera una deforestación masiva de los hábitats naturales, provocando con esto un desequilibrio ecológico que impacta de forma directa al ciclo hidrológico de las regiones. Por consecuencia al modificar el balance hidrológico, diversas zonas que antes conducían, captaban o regulaban el vital líquido, se erosionan o desertifican, generando en ocasiones éxodos masivos de poblaciones enteras hacia lugares con dichos recursos, o también que se tenga que transportar el agua desde lugares muy lejanos, volviéndola entonces un recurso muy costoso de adquirir.

Debido a que el agua es un recurso natural básico que se utiliza en diversas actividades del desarrollo económico de una localidad, y que además hoy en día tiene una

importancia muy alta en el impacto a futuro en la sustentabilidad de las sociedades, será conveniente mostrar su importancia en los diversos sectores de desarrollo del municipio de Jocotepec, para conocer a detalle un poco de la problemática ambiental, antrópica y económica que se ha generado en consecuencia de su uso inmoderado. Por lo que también será conveniente explicar la hidrología y la vulnerabilidad de sus acuíferos, ya que el impacto que generaría puede ser trascendental para los habitantes de toda la ribera del lago de Chapala y para los de la Zona Metropolitana de Guadalajara, por su cercanía al lugar y por su directa dependencia al abastecerse del agua potable del lago.

Adicional a la problemática mencionada, en la localidad de Jocotepec se está generando el fenómeno de subsidencia debido al abuso en la extracción del agua subterránea, como resultado del alto consumo de agua que se surte a la Zona Metropolitana de Guadalajara, y a la gran demanda de dicho líquido para la agricultura en las zonas aledañas para la siembra de moras, provocando un reabastecimiento lento de los acuíferos y acuitardos del lago. Debido a que el suelo del lugar está compuesto por estratos muy gruesos limo-arcillosos y limo-arenosos, cuando se reduce su nivel de humedad sufren un proceso de consolidación, por lo tanto se han provocado deformaciones superficiales del suelo de hasta 7.14 cm (Hernández-Marín, et al, 2014) donde están cimentadas muchas de las edificaciones de la localidad, ocasionando con esto daños en sus principales elementos de soporte y afectando su integridad estructural. En ocasiones los daños han sido leves, pero en casos más críticos, se ha llegado incluso a la demolición parcial o total de algunas edificaciones, debido al alto nivel de daño que presentan o a la completa inhabilitación que pone en riesgo la vida de sus ocupantes.

6.2. ACTIVIDADES DE DESARROLLO ECONÓMICO DEL MUNICIPIO DE JOCOTEPEC

Aunado al efecto negativo que provoca la extracción del agua del subsuelo en las edificaciones, es conveniente conocer las principales actividades de desarrollo que emanan o dependen del uso del vital líquido, y que pueden o están afectando el equilibrio ecológico del municipio de Jocotepec. En el caso del sector primario se genera la actividad agrícola, donde el cultivo más importante es el de maíz pero también la siembra de pasto para la alimentación del ganado y el cultivo de las hortalizas. Durante los últimos

16 años se ha registrado un ascenso en la expansión de cultivos protegidos como la siembra de fresa, zarzamora y frambuesa (figura 6.1), lo cual colocó al municipio de Jocotepec en el 2010, como uno de los principales productores en todo el Estado de Jalisco (INEGI 2010). Respecto al sector secundario y terciario, la principal actividad es la construcción, industrias manufactureras, el comercio y otros servicios. Le siguen en orden descendente los servicios de hoteles y restaurantes, los educativos, las actividades de gobierno, transportes, correos y almacenamientos y los servicios de esparcimiento y culturales. Aunque Jocotepec no ocupa el primer lugar en la actividad turística de la ribera del lago de Chapala, en el municipio se han generado inversiones estatales enfocadas al mejoramiento de la imagen urbana, la construcción de malecones en los poblados de Jocotepec, San Juan Cosalá y San Cristóbal y la modernización de las vías de comunicación.



Figura 6.1 Panorámica de la localidad de Jocotepec y sembradíos en la periferia urbana

6.3. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y DEMOGRÁFICAS

El Municipio de Jocotepec se localiza en la región Ciénega (04) del Estado de Jalisco, al poniente de la ribera del lago de Chapala (figura 2.5). Se ubica geográficamente en las coordenadas 20°10'00" y 20°25'00" de latitud norte y a los 103°17'30" y 103°33'10" de longitud oeste, con una altura promedio del municipio de 2,100 metros y su localidad principal a 1550 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 384.36 km², y tiene 29 kilómetros de costa con el Lago de Chapala. Dicho municipio se destaca por una gran riqueza ecosistémica mayor que otros municipios del país, por ello se considera a nivel nacional como un área prioritaria para la conservación de la biodiversidad. El municipio tiene un total de 82 localidades, 79 rurales y 3 urbanas (Jocotepec, San Juan Cosalá y Zapotitán de Hidalgo). El 71% de la población se localiza en las poblaciones urbanas. Cuenta con 9,202 familias y 7,954 viviendas habitadas. La población total del municipio al 1 de enero de 2009, estaba conformada por 39,229 habitantes, de los cuales 19,416 son hombres y 19,813 mujeres.

6.4. HIDROLOGÍA DEL MUNICIPIO DE JOCOTEPEC

La hidrología en el municipio de Jocotepec está representada por un conjunto de depósitos de agua existentes, así como por las estructuras de transferencia entre ellos. Tal comportamiento tiene su origen en el ciclo hidrológico, de acuerdo a transferencias atmosféricas de evaporación y transpiración y de transferencias a la tierra por precipitación (INEGI, 2008). En el territorio municipal se encuentran tres tipos de depósitos: a) el agua superficial confinada en el lago de Chapala; b) los cauces del río Santiago (de régimen controlado), por suministrarse de almacenamientos en presas y bordos de escurrimientos superficiales de pequeñas microcuencas, y de los arroyos que captan los excedentes y escorrentías de casi todo el territorio municipal, que en la mayoría de los casos son de carácter intermitente y de temporal; y, c) las aguas subterráneas confinadas en el subsuelo formando unidades geohidrológicas definidas como acuíferos y acuitardos.

Existe una gran cantidad de manantiales distribuidos en su superficie, tanto de régimen perenne como intermitente, de buena calidad para uso potable y también no

potables, de grandes y pequeños caudales. La mayoría de los manantiales se aprovechan para satisfacer de agua potable a numerosas poblaciones con fines domésticos y agropecuarios, sin embargo, muchos de ellos carecen de uso y sólo alimentan corrientes superficiales que llegan al lago. A pesar de las abundantes precipitaciones pluviales que ocurren en la cuenca hidrológica cuya agua abastece y se escurre hacia el lago de Chapala, no se cuenta con suficiente infraestructura hidráulica para aprovecharla, por lo tanto el agua subterránea es la que más se emplea en actividades agropecuarias y urbanas de la entidad.

6.5. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS POR SOBREEXPLOTACIÓN

Las poblaciones que se encuentran en el radio de influencia de la zona urbana de Jocotepec, han abusado en la cantidad de perforaciones autorizadas y clandestinas, generando un abatimiento anual promedio de -0.30 m en los niveles estáticos del agua durante los últimos 16 años, detectándose el mayor caso en el valle, pero a pesar de ello se cree que esta zona geohidrológica aún se encuentra subexplotada. Las zonas más adecuadas para la recarga natural se localizan en la parte central del Valle de Huejotitán, al oeste y norte del Valle de Jocotepec y en la parte central del Valle de Potrerillos, por consiguiente, la principal área de extracción de agua subterránea con base en los pozos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se localiza en la región central de los valles del municipio (zona semiplana), donde la concentración de pozos de extracción es notoria debido a que la principal actividad económica que tradicionalmente se ha desarrollado en la zona es la agricultura. Debido al crecimiento de las zonas urbanas y agrícolas, se ha generado un incremento de extracción de agua en las partes planas o de ligera pendiente, provocándose entonces una sobreexplotación de los acuíferos.

En las zonas geohidrológicas de Jocotepec, existe una variabilidad de densidades de obras subterráneas (pozos y norias). En el municipio predomina la condición de densidad media (entre 0.10 y 0.49 pozos/km²), el promedio se localiza en la ribera del Lago de Chapala y en el resto de las zonas geohidrológicas la densidad es baja (entre 0.00 y 0.09 pozos/km²). La mayor densidad de obras se encuentra en el radio de influencia de la zona urbana de Jocotepec. Los caudales promedio que se obtienen en las

zonas geohidrológicas son de 1 a 9.9 litros/seg. En la zona de la ribera del Lago de Chapala y del resto de las zonas se obtienen gastos entre 0.1 y 0.9 litros/seg.

Debido a que actualmente se continúa extendiendo la superficie agrícola en el municipio de Jocotepec, será conveniente actualizar los censos de los pozos de extracción de agua al menos en toda la zona urbana y en su radio de influencia, así como determinar el abatimiento de los niveles estáticos durante diferentes épocas del año, ya que se ha detectado que en tiempo de estiaje los niveles decaen rápidamente, más sin embargo durante el temporal de lluvias, a pesar de que se da un reabastecimiento en los acuíferos, es cuando se presenta más el fenómeno de subsidencia, por el posible colapso de cavernas o por el arrastre de agregados en ríos subterráneos que existan en el subsuelo del municipio, manifestándose lo anterior en deformaciones de la superficie, sobre todo en la zona urbana; por lo tanto se podrá conocer un poco más del comportamiento hidráulico del agua subterránea de la zona, para prever entonces su capacidad de captación y de recuperación.

6.6. PROBLEMÁTICA ANTRÓPICA DERIVADA DEL USO DEL AGUA RESPECTO A LAS EDIFICACIONES DEL MUNICIPIO

En la localidad de Jocotepec se han encontrado hasta 126 edificaciones dañadas estructuralmente, que se localizan sobre la traza de las tres fallas por subsidencia más significativas de la localidad y a las que se les denominó y agrupó de acuerdo a su ubicación como norte, centro y sur (figura 3.1). A fin de representar la magnitud de daño que se está generando en dichas edificaciones, se seleccionaron de forma estratégica 44 de ellas, las cuales no solamente fueron viviendas, sino también lugares públicos como iglesia, asilo de ancianos, escuela, locales comerciales y restaurante, cuya información de los censos se muestra en la tabla 6.1, donde se obtuvo el índice de condición estructural (IEC) para cada una de ellas. Por el momento se han detectado daños leves en algunas construcciones pero severos y a punto del colapso en otras, asimismo se encontraron dos viviendas demolidas completamente debido al alto daño generado por la subsidencia, y otras más que han sido reparadas constantemente a pesar de que los daños se siguen presentando en sus elementos.

Tabla 6.1 Índice de estado de condición estructural en edificaciones dañadas por subsidencia

Censo	Alineación de Daño	Índice de Estado de Condición (IEC)	Condición Estructural	Censo	Alineación de Daño	Índice de Estado de Condición (IEC)	Condición Estructural
1	Sur	44.80	Dañado	23	Norte	12.85	Regular
2	Centro	31.40	Dañado	24	Norte	19.50	Malo
3	Centro	40.00	Dañado	25	Norte	11.40	Regular
4	Centro	17.85	Malo	26	Norte	16.40	Malo
5	Sur	67.00	Muy dañado	27	Norte	24.65	Dañado
6	Sur	66.80	Muy dañado	28	Norte	24.40	Dañado
7	Centro	12.00	Regular	29	Norte	17.60	Malo
8	Centro	27.76	Dañado	30	Norte	17.80	Malo
9	Centro	21.30	Dañado	31	Norte	40.60	Dañado
10	Centro	14.30	Regular	32	Norte	12.40	Regular
11	Centro	35.30	Dañado	33	Norte	23.70	Dañado
12	Centro	28.00	Dañado	34	Norte	47.90	Dañado
13	Centro	25.30	Dañado	35	Norte	26.85	Dañado
14	Sur	35.55	Dañado	36	Sur	4.65	Bueno
15	Sur	25.51	Dañado	37	Sur	47.10	Dañado
16	Sur	14.90	Regular	38	Sur	40.90	Dañado
17	Centro	53.00	Dañado	39	Sur	6.45	Aceptable
18	Centro	68.00	Muy dañado	40	Sur	37.00	Dañado
19	Centro	49.25	Dañado	41	Sur	10.80	Regular
20	Centro	42.60	Dañado	42	Sur	15.10	Malo
21	Centro	47.35	Dañado	43	Sur	51.65	Dañado
22	Centro	65.60	Muy dañado	44	Sur	34.90	Dañado

El índice mostrado en la tabla 6.1, varía su calificación desde aceptable, buena, regular, mala, dañada y muy dañada, donde las primeras cuatro son muy factibles de reparar a bajos costos, la condición dañada con posibilidad de reparación muy costosa y la última condición muy dañada muestra una situación a punto del colapso o representando un alto riesgo para sus habitantes por los daños irreparables en la edificación. Realizando un análisis estadístico para las cuarenta y cuatro edificaciones se obtuvo una media general del IEC=31.32, quedando en una condición estructural dañada, por lo que se puede inferir que las estructuras presentan daños mayores con acciones de reforzamiento inmediatas; respecto a su magnitud de daño se considera muy grave, ya que se ha deteriorado la estructura al punto que su desempeño no es confiable, y la rehabilitación involucra el reemplazo o refuerzo de la mayoría de los elementos, o incluso la demolición total o parcial. Se detectó que las viviendas más dañadas se localizan en las zonas centro y sur, debido a mayores deformaciones en el suelo, o a un mayor tiempo de

ocurrencia de daño por subsidencia en el lugar donde se ubican. Por lo tanto, es conveniente mencionar que debido al continuo consumo de agua y a una inminente y progresiva subsidencia del lugar, se podrá potencializar el fenómeno en las zonas centro y sur de Jocotepec, las cuales al estar densamente pobladas pueden tener afectaciones significativas en el desarrollo económico de la localidad y en la seguridad de sus pobladores.

6.7. LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL MUNICIPIO POR EL USO DEL SUELO

Debido a que el municipio de Jocotepec se localiza en una posición estratégica a 65 km de la ciudad de Guadalajara, a que forma parte de la ribera del lago de Chapala, y por su cercanía al aeropuerto internacional Miguel Hidalgo, se encuentra en una situación vulnerable por la expansión de los cultivos de exportación y por la construcción de infraestructura para el desarrollo turístico, lo cual es consecuencia de dar abasto al crecimiento de la mancha urbana de la zona conurbada de Guadalajara. Por lo tanto se han generado cuando menos tres fenómenos ambientales que están marcando el uso actual y futuro del suelo: a) La especulación inmobiliaria, b) El cambio en los cultivos agrícolas y el ascenso de la agricultura protegida, y c) La modernización y desarrollo de nuevas vías de comunicación. Para tener una idea más objetiva de las actividades de desarrollo que se generan en la localidad de Jocotepec, se recomienda consultar el mapa o modelo de ordenamiento ecológico territorial del estado de Jalisco en el municipio de Jocotepec., donde se podrán comparar las ventajas y desventajas que conllevan a los fenómenos ambientales y que a continuación se mencionan.

6.7.1. La especulación inmobiliaria

La localidad de Jocotepec se encuentra en un punto estratégico del Lago de Chapala, ya que está en la intersección de dos carreteras: la primera que conduce hacia el estado vecino de Michoacán y la segunda que conduce hacia la localidad de Chapala, por lo que representa un paso obligado de tránsito de vacacionistas o de personas que trabajan en el comercio, en la industria o en la agricultura de la región. La población está relativamente muy cerca de la Zona Metropolitana de Guadalajara, lo cual la hace

attractiva para la migración de personas a ese lugar, y además el clima se conserva templado durante gran parte del año, por lo que se han construido hasta el momento algunos desarrollos inmobiliarios de viviendas de interés medio, que han provocado la expansión de la localidad, con sus respectivas consecuencias favorables y desfavorables, entre las que se enuncian las siguientes:

Ventajas:

- Generación de vivienda.
- Ampliación de servicios e infraestructura urbana.

Desventajas:

- Sustitución de las cadenas productivas agrícolas por la construcción de viviendas.
- Falta de infraestructura para abastecer el servicio de agua potable.
- Sobreexplotación de mantos acuíferos.
- Insuficiente capacidad de la planta tratadora de aguas residuales y contaminación del agua.
- Contaminación por los desechos.
- Pérdida del valor del paisaje.
- Riesgos de aludes en la zona por el desvío de cauces de arroyos.
- Falta de reglamentación de control del crecimiento urbano.
- Cambios de uso del suelo y crecimiento desordenado de los nuevos asentamientos humanos.

6.7.2. El cambio en los cultivos agrícolas y el ascenso de la agricultura protegida

Antes de 1980 la principal producción agrícola en el municipio de Jocotepec era de maíz, y a mediados de esa década se cambió la producción a sorgo, pero en 1992 tras la eliminación del precio de garantía del sorgo y la introducción al país de sorgo de los Estados Unidos de América, muchos agricultores quebraron económicamente, lo que los condicionó a seguir sembrando maíz, pero muchos fracasaron sin poderse recuperar. En 1994 llegan al municipio representantes de una empresa norteamericana (hoy Berrimex), quienes encontraron tierras de primera para arrendar, con altos contenidos de materia orgánica, con sistemas de riego, agua de calidad y demás infraestructura para la siembra de frambuesa, fresa, zarzamora y arándano. Debido a la instalación de dicha empresa en

el municipio, la actividad agrícola se desarrolla por contrato, con riego por goteo, acolchado plástico y macro túneles, dando lugar a que el agricultor se convierta en “socio” al cuál se le proporciona desde la plántula, asesoría técnica y el paquete tecnológico completo. Debido a lo anterior, se han detectado algunas ventajas y desventajas respecto a la actividad agrícola de la región.

Ventajas:

- Elaboración de agricultura de contrato, con riego por goteo, acolchado plástico y macro túneles.
- Comercialización con cultivos de exportación.
- Alta rentabilidad de la tierra por unidad de superficie.
- Extensión del conocimiento para la elaboración de cultivos tecnificados.
- Diversificación en los cultivos controlados, desde moras hasta jitomates.
- Generación de empleo y riqueza en la población.

Desventajas:

- Contaminación de suelos y agua por el uso de agroquímicos para generar altas producciones.
- Contaminación por desechos agroquímicos y acolchados plásticos.
- Aparición de enfermedades en algunos habitantes.
- Sobreexplotación de mantos acuíferos superficiales y subterráneos.
- Disminución de áreas de agostadero en los terrenos planos.
- Disminución de la recarga de los acuíferos por compactación del suelo por tránsito del ganado.

6.7.3. La modernización y desarrollo de nuevas vías de comunicación

Debido a que la localidad de Jocotepec ha tenido un gran auge durante los últimos años en la producción agrícola, y un poco menor pero no menos importante en la industria turística, su ubicación es esencial para el tránsito de productos de la región, y de paseantes a centros turísticos cercanos, por lo que ha sido necesario ampliar las carreteras que llevan a esos destinos, detectando por ello algunas ventajas y desventajas, tanto durante la construcción, como durante la operación de esas vías de comunicación, nombrando a continuación algunas de ellas:

Ventajas:

- Ampliación y modernización de vías de comunicación.
- Tránsito de servicios de energía.
- Facilita los accesos a zonas turísticas.

Desventajas:

- Cambio en la geomorfología y topografía del lugar.
- Afectación de la flora y fauna local.
- Inestabilidad de taludes en la zona por el desvío de cauces de arroyos o insuficiencia de obras de drenaje (figura 6.2).



Figura 6.2 Colapso de taludes en libramiento por desvío de cauces de agua

6.8. PROSPECTIVAS

Respetar los planes de ordenamiento urbano de la localidad de Jocotepec, para evitar un crecimiento descontrolado de las poblaciones y ordenar las zonas de desarrollo, habitacionales y de servicios desde un enfoque ecológico.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Que tanto la localidad de Jocotepec como los ejes de urbanización San Juan Cosalá-Nextipac, San Cristóbal-San Pedro Tesistán y Huejotitán-Zapotitán sirvan de base para asegurar que en vez de tener un crecimiento disperso y espaciado o fragmentado el cual hace más costosa y complicada la prestación de servicios, tienda hacia un crecimiento centrado en nodos de servicios.

Moderar y estudiar más a profundidad el impacto socioeconómico y ambiental que generan los sembradíos en la región, para tecnificar aún más los sistemas de producción, así como controlar el uso de agroquímicos para evitar la contaminación del ambiente y de los mantos freáticos, con un uso racional del agua.

Actualizar los estudios de “Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero (1428) Chapala, estado de Jalisco”, realizados por la Comisión Nacional del Agua, en base a nuevos censos de los pozos de extracción de agua en el acuífero mencionado, debido a la perforación clandestina de muchos de ellos, para conocer un poco más del comportamiento hidráulico del agua subterránea de la zona y para prever entonces su capacidad de captación y de recuperación; así como analizar el abastecimiento del lago de Chapala desde sus aportes, revisando las obras y desvíos que reducen su recuperación, lo cual ha mermado mucho los niveles estáticos de los acuíferos.

Estudiar más a detalle el subsuelo de la zona urbana de Jocotepec, para conocer el comportamiento y sistema de fallas por subsidencia y fracturamiento, y así generar un atlas de riesgo de la localidad, bien sea para la reubicación de las construcciones afectadas, para minimizar los daños a edificaciones, o para determinar las zonas de peligro por tal fenómeno.

Analizar la suficiencia y eficiencia de las plantas de tratamiento que vierten sus aguas al lago, así como su nivel de contaminación y las medidas para remediarlo.

Que exista algún consejo metropolitano que le dé continuidad a los planes de ordenamiento urbano, sin importar los cambios administrativos de gobiernos, así como

promover las asociaciones público privadas para incentivar las inversiones y desarrollo de la región, contemplando siempre un balance socioeconómico y ambiental.

Incentivar el ecoturismo en la región, como fuente de ingresos y de trabajo para locatarios, con actividades de protección al medio ambiente.





CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

7.1. CONCLUSIONES GENERALES

En la localidad de Jocotepec, Jalisco, se está presentando el fenómeno de subsidencia desde hace 20 años aproximadamente, y a través de mediciones realizadas directamente en la zona urbana, se optó por implementar una metodología de nivelación topográfica simple para medir las deformaciones del suelo, se asignó un punto fijo sobre un manto rocoso ubicado fuera de la zona urbana desde donde se referenciaron todos los 14 puntos que sirvieron para delinear la malla de deformación de la localidad; se realizaron dos mediciones a los 5 y a los 8 meses durante el periodo del mes de abril a noviembre del 2012, donde se obtuvieron deformaciones verticales por subsidencia de 7.16 cm de descenso al centro de la localidad, de 6.73 cm en el punto de registro 11 al noreste de la zona urbana y de 5.59 cm en el punto de registro 15 al suroeste de la localidad.

Durante exploraciones directas en las vialidades y terrenos de la localidad, se identificaron hasta el momento tres alineaciones o discontinuidades superficiales del suelo de hasta 2 km de longitud, a las que se les ha nombrado occidental, central y sur, con escarpes muy notorios de hasta 60 cm de descenso que han generado daños significativos en las vialidades, en el equipamiento urbano y en algunas edificaciones. Con la ocurrencia del fenómeno de subsidencia se generó desde el 2009 un cono de abatimiento delineado por las discontinuidades occidental y central, donde hasta el momento las edificaciones y vialidades han presentado daños muy severos.

Se localizaron durante el año 2012 hasta 126 edificaciones dañadas en toda la zona urbana de Jocotepec y sus alrededores, entre viviendas, comercios, escuelas, iglesia y asilo de ancianos entre otros, y al ligar las ubicaciones entre ellas, se delinearon tres fallas por subsidencia que actualmente son las más significativas en la localidad. Las fallas delineadas se presentan como escarpes superficiales en las vialidades y cruzan varias manzanas donde existe una alta densidad de construcciones. Se realizó una selección aleatoria para censar 44 edificaciones dañadas por la subsidencia, y se les

calculó su Índice de Estado de Condición (IEC) de acuerdo a la metodología propuesta por Alonso (2010), el cual nos refiere el nivel de daño de la edificación, así como nos menciona también la practicidad y economía del reforzamiento o reparación del inmueble; dichas edificaciones se ubicaron en las alineaciones de daños norte, centro y sur de la localidad, y para darle una validez matemática a los censos elaborados, se realizaron posteriormente algunos análisis estadísticos donde se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para un intervalo de confianza del 95% se obtuvo una media de todos los censos del $IEC=31.32$, quedando en una condición estructural dañada.
- Para la alineación norte la media del IEC fue de 22.77, con un error estándar de 4.67; para la alineación centro la media del IEC fue de 35.36, con un error estándar de 4.21; y para la alineación sur la media del IEC fue de 34.43, con un error estándar de 4.35.
- De acuerdo al análisis de rangos múltiples (LSD, 95% de confianza), las tres zonas (norte, centro y sur) fueron homogéneas, por lo tanto no hay una diferencia estadísticamente significativa para el índice de Estado de Condición entre ellas.
- En la mayoría de los casos se presentaron agrietamientos en muros de carga principales, provocados por asentamientos diferenciales que denotan el hundimiento hacia el sur en la alineación de la zona centro y hacia el norte en la alineación de la zona sur. En menor magnitud se observaron diversos daños en pisos y losas y en 2 ocasiones la demolición total de los inmuebles por su excesivo daño e inestabilidad.
- De momento se infiere que las viviendas de las zonas centro y sur están más dañadas que las de la zona norte, debido a que en esa zona se está deformando más el suelo, o tiene más tiempo de ocurrencia de daño debido a la subsidencia.
- La mayoría de las edificaciones dañadas, no cumplen con un diseño estructural ni construcción adecuados, ya que los sistemas constructivos empleados son de autoconstrucción con una calidad baja a media.

A fin de que no solamente se hiciera una valoración subjetiva de daños en edificaciones afectadas por el fenómeno de subsidencia, que tiene que ver más con la experiencia y capacidad del inspector que realiza las evaluaciones que con la demostración matemática y analítica del fenómeno, se adaptó y calibró un método de

análisis que actualmente se utiliza para evaluar el desempeño estructural de edificaciones afectadas por sismo, y que se nombra “Push-over”, para analizar ahora el desempeño estructural en edificaciones afectadas por subsidencia, cambiándosele el nombre a “Pull-down”, y tomando en cuenta la incursión de sus materiales en rangos inelásticos de comportamiento. Dicha metodología permitió evaluar el desempeño en el que se encuentra una de las edificaciones afectadas en la localidad, en base a las distorsiones de piso y en función de su cortante basal, y se elaboró su modelo estructural con dos opciones de materiales en sus muros, con mampostería y con concreto. Se realizó un comparativo con ambos materiales y también con la metodología Push-over para detectar cómo la baja magnitud de los asentamientos diferenciales afecta significativamente la resistencia y estabilidad de las construcciones, y también se detectaron algunas conclusiones inherentes al comportamiento de sus materiales, y que se enuncian a continuación:

- De acuerdo a los procedimientos Push-over y Pull-down realizados para mampostería y concreto en ambas direcciones de análisis, y según se observa para PD-Y1 (mampostería) las deformaciones que se alcanzan son mucho mayores que las de PD-Y2 (concreto), debido a que la mampostería presenta daños más severos y por lo tanto un desempeño muy cercano al colapso.
- Se realizaron análisis en ambas direcciones de la edificación, tanto transversal como longitudinal, para los materiales de mampostería y concreto; se observó que la mayoría de los análisis realizados pudieron incursionar en un rango plástico de comportamiento, al haber rebasado las distorsiones el “Estado Límite de Servicio” ($d=0.04\%$), y solamente dos rebasaron el “Estado Límite de Operación” ($d=0.18\%$).
- Para revisar de forma detallada el nivel de esfuerzos cortantes o por compresión de cada muro de la edificación durante su historial de desempeño, se recurrió a las gráficas de isovalores de esfuerzos generadas por el software, seleccionando los pasos trazados con marcadores para cada análisis Push-over o Pull-down requeridos, y que se encontraron entre los límites de distorsión permisible definidos por Astroza y Schmidt de 0.04% a 0.18% . Con lo que se demostró que cualquier modelo estructural de muros de concreto o de mampostería, podrá evaluarse en base a estos límites de distorsión.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Una vez elegidas las gráficas, también se pudo revisar la magnitud y progresión de los asentamientos diferenciales y de las distorsiones para cualquier parte de la estructura, según los pasos seleccionados.
 - Al revisar los esfuerzos cortantes en los diagramas de isovalores, se observó que varias porciones de muros incursionaron en el rango inelástico sobre todo en el paso 2 de aplicación del procedimiento Pull-down, rebasando el esfuerzo cortante permisible de la mampostería de 0.294 N/mm^2 , y coincidiendo los esfuerzos rebasados con los daños que tienen en la actualidad tales muros, donde se observa que ya tienen agrietamientos por cortante o por tensiones acumuladas.

Por lo tanto se puede concluir que sí es factible aplicar el método de análisis por desempeño estructural "Pull-down", para evaluar el comportamiento y progresión de esfuerzos debido a la aplicación de cualquier asentamiento diferencial en cualquier parte de la cimentación y para cualquier edificación construida a base de muros de mampostería o de concreto.

A fin de cotejar la metodología "Pull-down" (donde se obtienen resultados de esfuerzos, fuerzas, distorsiones y deformaciones en las edificaciones en función de su desempeño estructural), con metodologías de evaluación de patologías de daños en edificaciones (donde se analizan la magnitud y ubicación de los agrietamientos en sus muros), y poder hacer entonces una correlación entre ellas, se seleccionó la misma casa que sirvió para hacer el modelo de análisis "Pull-down", y se instrumentó para obtener su historial de daños y deformaciones tanto del suelo como de los agrietamientos en sus muros, llegando a las siguientes conclusiones:

- Con el método de medición del sistema GPS diferencial (DGPS, Differential Global Positioning System), se obtuvo una tasa de deformación de 27 mm/mes en la fachada de la edificación por subsidencia, y un asentamiento diferencial de 110 mm en un periodo de seis meses de medición en temporada de estiaje, entre dos puntos de control de la casa (frontal y posterior), lo que indica que toda la edificación se está hundiendo uniformemente hacia la calle.
- De acuerdo a la exploración de daños realizada hasta el momento a la edificación, los muros más afectados son los que se encuentran transversalmente en la fachada principal, que es hacia donde se manifiesta el máximo asentamiento

diferencial de toda la casa, con agrietamientos que llegan a los 140 mm de abertura, donde el muro rebasó su capacidad plástica y ya se formó un mecanismo de colapso; dicho muro se mantiene estable debido a la conectividad que tiene con respecto a los muros longitudinales y a la bóveda.

- Al comparar las deformaciones del suelo con las obtenidas en la edificación, se observa que los desplazamientos en los testigos reflejan el comportamiento de las aberturas en los agrietamientos de los muros, debido a que solo se registran los desplazamientos locales de los testigos, por lo tanto se detecta que las magnitudes del desplazamiento global de toda la edificación son muy superiores a los de cada muro, esto quiere decir que la tasa de deformación del suelo es muy alta y que la edificación se está desplazando como cuerpo rígido hacia la zona de hundimiento, y que los muros están resistiendo el cambio de posición a través de su rigidez y lugar que ocupan respecto al sistema estructural.
- Entre mayor sea la cantidad de monitorizaciones efectuadas para medir los desplazamientos de los agrietamientos en los muros y de los desplazamientos globales en los puntos de control topográficos, más precisión estadística habrá en la interpretación de las deformaciones locales y globales que esté teniendo la edificación, permitiendo esto que se puedan hacer proyecciones a largo plazo del comportamiento de los desplazamientos en el lugar de estudio.
- De momento y en función de la magnitud de daños observados actualmente, la orientación de la mayoría de las grietas coinciden hacia donde se está presentando el máximo asentamiento diferencial, además no se considera viable el reforzamiento de la edificación por su costo y complejidad en la solución estructural, ya que sus daños seguirán progresando debido a que la subsidencia es constante en el lugar, además de que los muros presentan distorsiones muy elevadas y los asentamientos diferenciales son mayores a 100 mm.

Debido a que existe cierta ambigüedad en la progresión, medición e historial de los daños en las edificaciones, se considera que para lograr una mayor precisión en la correlación de los daños generados por subsidencia con los esfuerzos obtenidos en los análisis Pull-down, será conveniente instrumentar la edificación desde el inicio de la ocurrencia de los daños, y registrar todas sus deformaciones en los principales elementos estructurales para hacer revisiones locales de esfuerzos, y también revisar puntos de

control estratégicos para la detección de los desplazamientos globales de toda la estructura. Por lo tanto, de momento el análisis Pull-down permitirá conocer de forma descriptiva el comportamiento de cada componente de cualquier edificación afectada por subsidencia, en función de la resistencia de sus materiales y de la ubicación de sus asentamientos diferenciales, más no de sus mecanismos de colapso, por lo que sí se podrá evaluar el nivel de deformaciones y distorsiones en función de niveles de desempeño estructural que se regulen o exijan a la construcción.

7.2. PROSPECTIVAS

Debido a que esta investigación presentó un enfoque técnico-antrópico, ya que la mayor parte de los daños generados a las edificaciones son provocados por el abuso en la extracción de agua del subsuelo, se detectó un impacto negativo en el desarrollo económico y ambiental del municipio de Jocotepec, que también acarrea consecuencias a la Zona Metropolitana de Guadalajara, por lo que se señalan a continuación algunas propuestas:

- Implementar y respetar los planes de ordenamiento urbano de la localidad de Jocotepec, para evitar un crecimiento descontrolado de las poblaciones y ordenar las zonas de desarrollo, habitacionales y de servicios desde un enfoque ecológico.
- Que tanto la localidad de Jocotepec como los ejes de urbanización San Juan Cosalá-Nextipac, San Cristóbal-San Pedro Tesistán y Huejotitán-Zapotitán sirvan de base para asegurar que en vez de tener un crecimiento disperso y espaciado o fragmentado el cual hace más costosa y complicada la prestación de servicios, tienda hacia un crecimiento centrado en nodos de servicios.
- Moderar y estudiar más a profundidad el impacto socioeconómico y ambiental que generan los sembradíos en la región, para tecnificar aún más los sistemas de producción, así como controlar el uso de agroquímicos para evitar la contaminación del ambiente y de los mantos freáticos, con un uso racional del agua.
- Actualizar los estudios de “Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero (1428) Chapala, estado de Jalisco”, realizados por la Comisión Nacional

del Agua, en base a nuevos censos de los pozos de extracción de agua en el acuífero mencionado, debido a la perforación clandestina de muchos de ellos, para conocer un poco más del comportamiento hidráulico del agua subterránea de la zona y para prever entonces su capacidad de captación y de recuperación; así como analizar el abastecimiento del lago de Chapala desde sus aportes, revisando las obras y desvíos que reducen su recuperación, lo cual ha mermado mucho los niveles estáticos de los acuíferos.

- Estudiar más a detalle el subsuelo de la zona urbana de Jocotepec, para conocer el comportamiento y sistema de fallas por subsidencia y fracturamiento, y así generar un atlas de riesgo de la localidad, bien sea para la reubicación de las construcciones afectadas, para minimizar los daños a edificaciones, o para determinar las zonas de peligro por tal fenómeno.
- Analizar la suficiencia y eficiencia de las plantas de tratamiento que vierten sus aguas al lago, así como su nivel de contaminación y las medidas para remediarlo.
- Que exista algún consejo metropolitano que le dé continuidad a los planes de ordenamiento urbano, sin importar los cambios administrativos de gobiernos, así como promover las asociaciones público privadas para incentivar las inversiones y desarrollo de la región, contemplando siempre un balance socioeconómico y ambiental.
- Incentivar el ecoturismo en la región, como fuente de ingresos y de trabajo para locatarios, con actividades de protección al medio ambiente.



GLOSARIO

Acuicludo: (Del latín *cludo*, encerrar). Es una formación geológica que contiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, pero no la transmite. Un ejemplo de esta formación la encontramos en capas de limos y arcillas, que aunque el agua esté atrapada en la arcilla, no puede salir por gravedad, y por tanto no podrá circular en el subsuelo ni en condiciones naturales ni hacia un pozo que esté bombeando.

Acuífero: (Del latín *fero*, llevar). Es un depósito subterráneo de agua que puede ser explotada de forma racional para atender diversas necesidades humanas, que circula y se almacena en los poros y grietas de los estratos o formaciones geológicas permeables. Dichas capas están formadas por materiales diversos como gravas de río, limos, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla. El agua de lluvia o que escurre superficialmente, es absorbida por el suelo, llenando los espacios vacíos entre las piedras, arenas, gravas y suelos más finos, y por efecto de la gravedad continúa se descenso hasta llegar a capas de suelo impermeables o a otras masas de agua localizadas subterráneamente.

Acuíferos colgados: Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.

Acuíferos confinados: También llamados cautivos, a presión o en carga. El agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. No existe zona no saturada. Si perforamos, el nivel de agua asciende hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga. Si la topografía es tal que la boca del pozo está por debajo del nivel del agua, el pozo es surgente o artesiano; si no es así el nivel del agua ascenderá hasta el nivel correspondiente, pero no será surgente. La superficie piezométrica es una superficie ideal resultante de unir todos los niveles en diferentes perforaciones que capten el acuífero. En estos acuíferos la

extracción del agua procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida del suelo. Si esa compresión del acuífero es notoria e irreversible, se producirán asentamientos y subsidencia en el terreno.

Acuíferos de fisura o grietas: Donde la porosidad es secundaria y resulta de procesos de fracturación y meteorización de rocas impermeables. Las grietas, fracturas y diaclasas son los tipos de vacíos principales e importantes en todas las rocas consolidadas (rocas sedimentarias como arenisca; rocas magmáticas o metamórficas como granito, andesita, pizarra etc.) No obstante, las rocas sedimentarias (como conglomerados y areniscas, por ejemplo) cuentan a veces con una porosidad muy elevada. Algunas rocas volcánicas también pueden tener un espacio poroso notable.

Acuíferos detríticos: Son aquellos en los que el agua circula a través de los poros (huecos) que existen entre los granos de un volumen de arena y grava. Este tipo de acuíferos son característicos en zonas cercanas a montañas compuestas por granitos y rocas similares.

Acuíferos libres: También llamados no confinados o freáticos. El agua se encuentra relleno los poros o fisuras por gravedad. En ellos existe una superficie libre y real del agua encerrada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas. Si perforamos total o parcialmente la formación acuífera, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real: superficie freática o piezométrica, que coinciden.

Acuíferos multicapa: Son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad.

Acuíferos porosos: Donde la porosidad es primaria y resulta de los huecos que quedan al sedimentar las rocas detríticas. Los poros representan el único tipo de vacíos que poseen las rocas no-consolidadas (suelos y sedimentos sueltos como arena, grava etc.).

Como poros se entiende los espacios libres entre las partículas del suelo o de rocas sedimentarias clásticas.

Acuíferos semiconfinados: El muro y/o techo no son totalmente impermeables sino que son acuitados y permiten la filtración vertical del agua y, por tanto, puede recibir recarga o perder agua a través del techo o de la base. Este flujo vertical sólo es posible si existe una diferencia de potencial entre ambos niveles.

Acuífugo: (del latín *fugo*, rechazar, ahuyentar). Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella; por lo tanto no posee capacidad de retención de agua. Un ejemplo de esta formación es el granito o esquisto inalterados y no fracturados.

Acuitardo: (Del latín *tardo*, retardar, impedir). Es una formación geológica semipermeable, que aunque contenga grandes cantidades de agua la transmiten muy lentamente, siendo por lo tanto inadecuados para el emplazamiento de bombeo y captación de aguas subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos. Ejemplos de estas formaciones se encuentran en las capas de arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas.

Curva histerética: es el perfil gráfico del cociente entre la carga lateral y la deformación asociada durante el ensaye de un espécimen. Es común que en éstas curvas, la deformación se enuncie en términos de distorsión. El fenómeno por el que los tramos de carga y descarga no se superponen se denomina histéresis. En estos casos no se restablece todo el trabajo invertido en la deformación del muro y por lo tanto se origina una disipación de energía.

Distorsión: Se define como la relación que existe entre el desplazamiento horizontal medido al nivel de aplicación de la carga lateral y la altura a la que se aplica esta carga; es una medida adimensional y por ello usualmente se le indica en porcentaje.

Ductilidad: Es la capacidad de deformación que posee una estructura cuando es capaz de responder en forma inelástica ante la exigencia de cargas sísmicas sin degradación significativa de resistencia, con un grado de daño aceptable, evitando en lo posible la aparición de fallas de tipo frágil.

Estado límite de falla: Es cualquier situación que corresponda al agotamiento de la capacidad de carga de la estructura o de cualquiera de sus componentes, incluyendo la cimentación, o al hecho de que ocurran daños irreversibles que afecten significativamente su resistencia ante nuevas aplicaciones de carga.

Permeabilidad: es la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso por el agua. En hidrogeología es también conocida como *conductividad hidráulica*, K . Es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. Sus unidades en el sistema internacional son m/seg, y en geotecnia se usan cm/seg.

Porosidad efectiva: es el volumen de huecos que permite la circulación del agua a través de ellos, respecto del volumen total.

Porosidad eficaz: $m_e = \text{Volumen de agua drenada por gravedad} / \text{volumen total}$
Representa el volumen de los poros que se ha vaciado. Se expresa igual que la porosidad total (% o en tanto por 1).

Porosidad intergranular y por fisuración: No solamente la encontramos en las arenas, sino también en el interior de rocas compactas que pueden contener agua en sus fisuras. Regularmente se producen fracturamientos en las rocas por esfuerzos tectónicos, por enfriamiento de rocas volcánicas, por planos de descompresión o por discontinuidades sedimentarias. Una vez formadas, las fisuras pueden ocluirse por minerales arcillosos resultantes de la alteración, y en ocasiones la disolución aumenta la abertura, hasta formar amplios conductos, como es el caso en las rocas calizas. Otros sinónimos de estas porosidades son la *primaria* y *secundaria*. La *porosidad primaria* resulta durante la formación geológica; y la *porosidad secundaria* será cualquier abertura producida posteriormente a la formación geológica.

Porosidad por fracturación: Está determinada por la historia tectónica de la zona y por la litología; o sea en función de la respuesta de la roca a los esfuerzos. En este tipo de porosidad es determinante la posible disolución de la fractura, o por el contrario, por el progresivo relleno de los poros existentes entre sus partículas, con materiales finos transportados en suspensión por el agua que se va infiltrando, minerales arcillosos o precipitación de otros minerales, en las etapas iniciales del proceso.

Rendimiento específico: Es el volumen de agua que podemos obtener vaciando un medio poroso saturado, respecto del volumen total.

Retención específica: Es la diferencia entre la porosidad total y la porosidad eficaz. O en otros términos, es el volumen de huecos disponible para el flujo respecto del volumen total.

Transmisividad: Es el parámetro que nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica, y es una combinación de la conductividad hidráulica y del espesor. Sus unidades son $m^2/día$, o cm^2/seg .

Subsidencia: La subsidencia o hundimiento se refiere al descenso vertical por deformación de la superficie del suelo. Este problema se ha agudizado en varias zonas urbanas del interior del país sobre todo en poblaciones localizadas sobre valles lacustres o por resultado de depósitos sedimentarios, y es sumamente reconocido dentro del país como una de las causas de fallas en estructuras, sobre todo de vivienda.

Unidad hidrogeológica: Es un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico se analiza de manera integral. La unidad puede estar contenida por uno o varios acuíferos, o quizá también acuitardos y acuicludos entre ellos. Su integración se debe a que están conectados entre sí por su funcionamiento (entradas, salidas y balance).



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Alonso, F. (2010). Desarrollo de un modelo para la evaluación del estado de condición de viviendas de interés social en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Investigación postdoctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Porto.

Araiza G. (2008). Consideraciones en torno a la supresión y control de daño estructural originado por subsidencia del suelo en edificios patrimoniales, Memorias del I Congreso Iberoamericano sobre Construcciones Históricas y Estructuras de Mampostería, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Disco Compacto ISBN 978-958-44-3809-6.

Arangio S., et al. (2013), "Pushover seismic analysis of masonry buildings with different comercial codes", Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management, Sapienza University of Rome, Department of Structural and Geotechnical Engineering, Rome, Italy.

Astroza-I. Maximiliano, Schmidt-A. Andrés, (2004), "Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño", Revista de Ingeniería Sísmica No. 70 59-75.

ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, California Seismic Safety Commission, Sacramento, California. Developed by the Applied Technology Council. 1-334 (Report no. SSC 96-01).

Belmouden, Y. and Lestuzzi, P.: An equivalent frame model for seismic analysis of masonry and reinforced concrete buildings, Construct. Build. Material., 23, 40–53, 2009.

Burbey, J. T. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. Hydrogeology Journal, 10(5), 525-538.

Calvi, G. M., "A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings", J. Earthquake Eng., 3, 411-438, 1999.

Carreón-Freyre D., Cerca M., Luna-González L. y Gámez-González F. J., 2005; Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: Revista Mexicana de ciencias Geológicas, v. 22, núm 1, p. 1-18.

Carreón-Freyre D., Hidalgo-Moreno C., Hernández-Marín M., 2006; Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, núm. 2, 2006, p. 237-250.

Chávez-Alegría O., 2008. Modelación física experimental del fenómeno de subsidencia. Tesis de Maestría en Mecánica de Suelos, Universidad Autónoma de Querétaro.

Comisión Nacional del Agua (2010), "Diversa información geológica y geohidrológica, estudios preliminares y expedientes técnicos de pozos, Gerencia Regional en Jalisco. Residencia General de Aguas Subterráneas".

Comisión Nacional del Agua (2009), "Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero (1428) Chapala, estado de Jalisco", documento público del Gobierno del Estado de Jalisco.

CSI, SAP2000 V-15: Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual, Berkeley, California (USA), Computer and Structures Inc, 2011.

Dolce, M.: Models for in-plane loading of masonry walls, Course for the consolidation of masonry buildings in seismic zones, Ordine degli Ingegneri, Potenza, Italy, 1989.

FEMA 273. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Prepared by: Applied Technology Council (ATC-33 Project), for: Building Seismic Safety Council, 1-435 (1997).

FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency; 2000; 65-352.

FEMA 440. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Prepared by: Applied Technology Council (ATC-55 Project) and Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency, 1-392 (2005).

Galloway D.L., Burbey T.J., 2011, Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, Hydrogeology Journal.

Guerrero J., Gutiérrez F., Lucha P., 2004, "Peligrosidad, daños y mitigación de inundaciones, subsidencia por disolución y movimientos de ladera en la localidad de Cadrete (Depresión del Ebro, Zaragoza)", Revista C & G, 19 (1-2), 63-82.

H. Bilgin, O. Korini, 2012, "Seismic capacity evaluation of unreinforced masonry residential buildings in Albania", Natural Hazards and Earth System Sciences, doi:10.5194/nhess-12-3753-2012.

Hernández-Castillo L. A., et al (2014), "Fragility curves for thin-walled cold-formed Steel Wall frames affected by ground settlements due to and subsidence", Thin-Walled Structures 87 (2015) 66-75.

Hernández Marín, M. y Carreón-Freyre., D., 2002. Análisis de variación de la presión de poro durante pruebas de consolidación incrementales en suelos Vulcano lacustres. Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. 1: 3-12. ISBN 968-5350-09-4.

Hernández-Marín M., et al (2014), "Evaluation and analysis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico", Environmental Earth Sciences journal, DOI 10.1007/s12665-014-3054-7.

Huizar-Álvarez R., Mitre-Salazar L.M., Marín-Córdova S., Trujillo-Candelaria J. and Martínez-Reyes J., 2010, Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime, *Geofísica Internacional* (2011) 50-3: 255-270.

INEGI (2010) Censo de población y vivienda, México.

Kappos A., Manafpour A., (2001), "Seismic design of R/C buildings with the aid of advanced analytical techniques. *Engineering Structures* 23 (2001) 319-332.

Kaushik, H.B., Rai, D. C., and Jain, S.K.: Stress-Strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression, *J. Material. Civil Eng.*, 19, 728-739, 2007.

Kiremidjian A., Singhal A., (1996), "A method for earthquake motion-damage relationships with application to reinforced concrete frames", Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University. PhD thesis, 186 p.

Lagomarsino, S., Galasco, A., and Penna, A.: Nonlinear macro element dynamic analysis of masonry buildings, in: *Proceedings of the ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering*, Rethymno, Crete, 2007.

Lee C.F., Zhang J.M. and Zhang Y.X., Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China, *Engineering Geology* 43 (1996) 45-55.

Li Y., Yang J., Hu X., Origin of ground fissures in the Shanxi Graben System, Northern China, Department of Geography, Peking University, Beijing 100871, People's Republic of China, *Engineering Geology* 55 (2000) 267–275.

Magenes, G.: Earthquake resistant design of masonry structures: rules, backgrounds, latest findings, Keynote Speech, in: *Proceedings of the 8th international masonry conference*, Dresden, Germany, 2010.

Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, Comisión Federal de Electricidad, 2008.

Montgomery D.C., "Diseño y análisis de experimentos", Grupo Editorial Iberoamérica, México D.F., 1991.

Muñoz M. (1994). *Diagnosis y causas en patología de la edificación*, M. Muñoz, Sevilla, España.

Ortiz-L J., et al (2010). *Estudio de Patologías Estructurales y Determinación del Estado de Condición de Viviendas Afectadas por Agrietamientos Asociados al Fenómeno de Subsistencia en la Ciudad de Aguascalientes*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta oficial del Distrito Federal, México, 284 p.

Ochoa-González G. H., 2003; Análisis de la subsidencia en valles lacustres por medio de la teoría de pérdida volumétrica: Tesis de Maestría en Mecánica de Suelos, Universidad Autónoma de Querétaro.

Ortiz-Lozano J., et al (2010), “Estudio de Patologías Estructurales y Determinación del Estado de Condición de Viviendas Afectadas por Agrietamientos Asociados al Fenómeno de Subsidencia en la Ciudad de Aguascalientes”. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Pacheco-Martínez J., *et. al*, 2006, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology* 84 (2006) 143–160.

Pacheco-Martínez, J., 2007; Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales: Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis doctoral, 232 p.

Pacheco-Martínez J., Arzate-Flores J. Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, núm. 3, 2007, p. 389-402.

Park R., Paulay T., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zeland, John Wiley & Sons, Inc., 1992, 744 p.

Penelis, Gr. G.: An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry structures, *J. Earthq. Eng.*, 10, 359–379, 2006.

Poland J. F. ., 1984; *Mechanics of land subsidence due to fluid withdrawal: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, p. 37-54.

Priestly, M. J. N.: Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings, *J. Earthq. Eng.*, 1, 157–192, 1997.

Prokopovich N. P., Some geologic factors determining land subsidence. U.S. Bureau of Reclamation, Sacramento, CA, U.S.A. Bulletin #14, 75-81.

Prokopovich, N.P. (1979). Genetic classification on land subsidence. En: Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 389-399.

Ramírez-Cortés, A., 2004; Propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo de barro recocido de la zona metropolitana de Guadalajara, Universidad de Guadalajara, Instituto de Ingeniería Sísmica, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería Civil, Tesis de maestría, 141 p.

Ramírez-Cortés A., Hernández-Marín M. (2013), “Impacto urbano por subsidencia y fracturamiento superficial, en edificaciones e infraestructura de la localidad de Jocotepec, Jalisco, México”, *Memorias del Seminario Internacional Representaciones de la Ciudad en*

el mundo de habla Portuguesa e Hispana, Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil. Disco compacto ISBN 978-85-88341-57-9.

Sánchez-San Roman F. J., Conceptos fundamentales de hidrogeología, Universidad de Salamanca, España; <http://hidrologia.usual.es>

Scott, R.F. (1979). Subsidence – A review. En: Saxena, S.K. (ed.). Evaluation and prediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 1-25.

Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (2010), “Programa de Ordenamiento Ecológico del Municipio de Jocotepec, Jalisco”, documento público del Gobierno del Estado de Jalisco.

Suarez-Plascencia C, Escalona-Alcazar JF, Diaz-Torres JJ (2005), Desarrollo de grietas en el fraccionamiento Prados de Nextipac, Municipio de Zapopan, Jalisco [Development of cracks in the “Prados de Nextipac” community, Municipality of Zapopan, Jalisco]. GEOS 25(2):1–11.

Takeda, T., M.A. Sozen, N.N. Nielsen, "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes," J. Struct. Engrg. Div., ASCE, V. 96, No. 12, 1970, pp. 2257-2573.

Terán Gilmore Amador, (2002): Diseño por desempeño: antecedentes, conceptos generales y perspectivas, Memorias VII Congreso Nacional SNIS.

Terzaghi K., 1956; Theoretical soil mechanics; John Wiley and Sons Inc. New York.

Tomás R., Delgado J., López-Sánchez J.M., (2005), Técnicas de ingeniería cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y movimientos de ladera: principales características y análisis comparativo, Universidad de Alicante, España.

Vielma-Pérez (2008), “Caracterización del comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado mediante la respuesta no lineal”. Tesis doctoral. Escuela Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, p. 1-256.

Zermeño M., Pacheco J., Mendoza E., Arzate J., Arroyo M., 2006; Fracturamiento y fallamiento de suelos, experiencias en la cd. de Aguascalientes, Ags. y Santiago de Querétaro, Qro. en memorias del XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico. ISBN 968-5350-18-3 p. 793-801.



ANEXO “A”. CENSOS DE EDIFICACIONES DAÑADAS

A.1 Obtención de los índices de estado de condición estructural de todas las edificaciones censadas

Censo	Domicilio	Alineación de Daño
1	Asilo Jocotepec	Sur
2	Juárez # 78	Centro
3	Independencia # 93	Centro
4	Juárez # 86	Centro
5	Independencia # 175	Sur
6	Independencia # 180	Sur
7	Hidalgo # 66	Centro
8	Hidalgo # 70	Centro
9	Hidalgo # 73	Centro
10	Hidalgo # 71	Centro
11	Hidalgo # 68	Centro
12	Miguel Arana # 76	Centro
13	Miguel Arana # 112	Centro
14	Churubusco # 14	Sur
15	Vicente Guerrero # 227	Sur
16	Vicente Guerrero # 185	Sur
17	Niños Héroes # 117-A	Centro
18	Niños Héroes # 122-A, B y C	Centro
19	Juárez # 186-A	Centro
20	Juárez # 186-B	Centro
21	Juárez # 174-A	Centro
22	Juárez # 174	Centro
23	Allende # 53	Norte
24	Allende # 69	Norte
25	Allende # 71	Norte
26	Allende # 77	Norte
27	Hidalgo # 97 Y 99	Norte
28	Hidalgo # 68	Norte
29	Hidalgo # 89	Norte
30	Hidalgo # 65	Norte
31	Hidalgo # 80	Norte
32	Hidalgo # 82	Norte
33	Hidalgo # 73	Norte
34	Guadalupe Victoria # 93	Norte
35	Guadalupe Victoria # 82	Norte
36	Hidalgo # 213	Sur
37	Hidalgo # 219	Sur
38	Josefa Ortiz de Dominguez # 264	Sur
39	Josefa Ortiz de Dominguez # 262	Sur
40	Churubusco # 15-A	Sur
41	Churubusco # 16	Sur
42	Churubusco # 11	Sur
43	Independencia # 179	Sur
44	Independencia # 181	Sur

Censo	Deterioro en Losas				Deterioro en Muros			
	Factor de daño (FDL)	Factor de acción (FAL)	Factor urgencia (FUL)	Deterioro en Losa (DL)	Factor de daño (FDM)	Factor de acción (FAM)	Factor de urgencia (FUM)	Deterioro en Muros (DM)
1	0.60	3.00	2.00	3.60	1.00	4.00	3.00	12.00
2	0.50	3.00	2.00	3.00	0.90	3.00	2.00	5.40
3	0.00	0.00	1.00	0.00	0.95	4.00	3.00	11.40
4	0.05	1.00	1.00	0.05	0.70	3.00	2.00	4.20
5	1.00	4.00	3.00	12.00	1.00	4.00	3.00	12.00
6	0.90	4.00	3.00	10.80	1.00	4.00	3.00	12.00
7	0.30	2.00	1.00	0.60	0.70	3.00	2.00	4.20
8	0.93	4.00	2.00	7.40	0.92	4.00	2.00	7.36
9	0.35	3.00	2.00	2.10	0.90	4.00	2.00	7.20
10	0.80	3.00	1.00	2.40	0.90	3.00	2.00	5.40
11	0.70	4.00	2.00	5.60	0.95	4.00	3.00	11.40
12	1.00	4.00	3.00	12.00	0.90	3.00	2.00	5.40
13	0.60	4.00	3.00	7.20	0.90	3.00	3.00	8.10
14	0.05	1.00	1.00	0.05	0.90	4.00	3.00	10.80
15	0.01	1.00	1.00	0.01	0.90	3.00	3.00	8.10
16	0.30	1.00	1.00	0.30	0.85	4.00	2.00	6.80
17	0.90	4.00	3.00	10.80	1.00	4.00	3.00	12.00
18	1.00	4.00	3.00	12.00	1.00	4.00	3.00	12.00
19	0.75	4.00	2.00	6.00	0.95	4.00	3.00	11.40
20	0.20	2.00	2.00	0.80	0.90	4.00	3.00	10.80
21	0.75	4.00	2.00	6.00	0.90	4.00	3.00	10.80
22	0.80	4.00	3.00	9.60	1.00	4.00	3.00	12.00
23	0.15	1.00	1.00	0.15	0.60	3.00	2.00	3.60
24	0.25	2.00	1.00	0.50	0.85	4.00	3.00	10.20
25	0.35	2.00	1.00	0.70	0.65	3.00	2.00	3.90
26	0.20	2.00	2.00	0.80	0.70	3.00	2.00	4.20
27	0.40	2.00	2.00	1.60	0.95	3.00	3.00	8.55
28	0.35	2.00	2.00	1.40	0.95	4.00	3.00	11.40
29	0.40	3.00	2.00	2.40	0.90	3.00	2.00	5.40
30	0.45	2.00	2.00	1.80	0.70	3.00	2.00	4.20
31	0.70	4.00	3.00	8.40	1.00	4.00	3.00	12.00
32	0.60	2.00	1.00	1.20	0.70	3.00	2.00	4.20
33	0.25	3.00	2.00	1.50	0.80	4.00	3.00	9.60
34	0.50	3.00	3.00	4.50	1.00	4.00	3.00	12.00
35	0.45	3.00	3.00	4.05	0.75	4.00	3.00	9.00
36	0.15	1.00	1.00	0.15	0.40	1.00	1.00	0.40
37	0.60	3.00	3.00	5.40	1.00	4.00	3.00	12.00
38	0.70	3.00	3.00	6.30	0.90	4.00	3.00	10.80
39	0.20	2.00	1.00	0.40	0.50	2.00	2.00	2.00
40	0.45	2.00	2.00	1.80	0.95	4.00	3.00	11.40
41	0.15	2.00	2.00	0.60	0.60	3.00	2.00	3.60
42	0.35	2.00	2.00	1.40	0.65	3.00	2.00	3.90
43	0.25	3.00	3.00	2.25	0.95	4.00	3.00	11.40
44	0.40	4.00	3.00	4.80	0.95	4.00	3.00	11.40

Censo	Deterioro en Elementos de Confinamiento				Deterioro en Cimentación			
	Factor de daño (FDEC)	Factor de acción (FAEC)	Factor de urgencia (FU _{EC})	Det. en Elementos de confinamiento (DEC)	Factor de daño (FDC)	Factor de acción (FAC)	Factor de urgencia (FU _C)	Deterioro en Cimentación (DC)
1	0.80	3.00	3.00	7.20	1.00	5.00	3.00	15.00
2	0.50	3.00	2.00	3.00	1.00	4.00	3.00	12.00
3	0.95	4.00	3.00	11.40	0.85	4.00	3.00	10.20
4	0.60	3.00	2.00	3.60	0.50	4.00	3.00	6.00
5	1.00	5.00	3.00	15.00	1.00	5.00	4.00	20.00
6	1.00	5.00	3.00	15.00	1.00	5.00	4.00	20.00
7	0.40	3.00	2.00	2.40	0.20	2.00	2.00	0.80
8	0.40	3.00	2.00	2.40	0.60	3.00	2.00	3.60
9	0.60	3.00	2.00	3.60	0.40	3.00	2.00	2.40
10	0.50	2.00	1.00	1.00	0.25	2.00	1.00	0.50
11	0.65	5.00	2.00	6.50	0.40	4.00	3.00	4.80
12	0.80	3.00	2.00	4.80	0.40	2.00	1.00	0.80
13	0.60	3.00	2.00	3.60	0.20	2.00	1.00	0.40
14	0.80	4.00	3.00	9.60	0.90	3.00	3.00	8.10
15	0.70	3.00	2.00	4.20	0.80	3.00	3.00	7.20
16	0.50	3.00	2.00	3.00	0.20	2.00	2.00	0.80
17	0.90	4.00	3.00	10.80	0.95	4.00	3.00	11.40
18	1.00	5.00	3.00	15.00	1.00	5.00	4.00	20.00
19	0.95	5.00	3.00	14.25	0.80	3.00	4.00	9.60
20	0.80	5.00	3.00	12.00	0.80	5.00	3.00	12.00
21	0.85	5.00	3.00	12.75	0.90	4.00	3.00	10.80
22	1.00	5.00	3.00	15.00	1.00	5.00	4.00	20.00
23	0.55	3.00	2.00	3.30	0.45	2.00	2.00	1.80
24	0.60	3.00	2.00	3.60	0.30	2.00	2.00	1.20
25	0.50	2.00	2.00	2.00	0.20	2.00	2.00	0.80
26	0.70	4.00	2.00	5.60	0.20	2.00	2.00	0.80
27	0.60	4.00	2.00	4.80	0.30	3.00	3.00	2.70
28	0.60	4.00	2.00	4.80	0.40	2.00	1.00	0.80
29	0.60	3.00	2.00	3.60	0.30	2.00	2.00	1.20
30	0.60	3.00	2.00	3.60	0.30	2.00	2.00	1.20
31	0.80	4.00	3.00	9.60	0.40	3.00	3.00	3.60
32	0.60	3.00	2.00	3.60	0.10	2.00	2.00	0.40
33	0.70	3.00	2.00	4.20	0.40	3.00	2.00	2.40
34	0.95	4.00	3.00	11.40	1.00	4.00	3.00	12.00
35	0.60	3.00	3.00	5.40	0.40	3.00	2.00	2.40
36	0.45	2.00	1.00	0.90	0.10	2.00	1.00	0.20
37	0.90	5.00	3.00	13.50	0.60	3.00	4.00	7.20
38	0.70	4.00	3.00	8.40	0.70	4.00	3.00	8.40
39	0.40	2.00	1.00	0.80	0.25	1.00	1.00	0.25
40	0.60	4.00	3.00	7.20	0.80	4.00	3.00	9.60
41	0.10	2.00	1.00	0.20	0.20	2.00	1.00	0.40
42	0.40	3.00	2.00	2.40	0.20	2.00	1.00	0.40
43	0.80	5.00	3.00	12.00	0.90	5.00	4.00	18.00
44	0.90	3.00	2.00	5.40	0.70	3.00	3.00	6.30

Censo	Índice Funcional (IF)			Estado de Condición		
	Factor funcional (FF)	Factor de mantenimiento (FM)	Índice Funcional (IF)	Índice Estructural (IE)	Índice de Estado de Condición (IEC)	Condición Estructural
1	4.00	3.00	7.00	37.80	44.80	Dañado
2	5.00	3.00	8.00	23.40	31.40	Dañado
3	4.00	3.00	7.00	33.00	40.00	Dañado
4	2.00	2.00	4.00	13.85	17.85	Malo
5	5.00	3.00	8.00	59.00	67.00	Muy dañado
6	6.00	3.00	9.00	57.80	66.80	Muy dañado
7	2.00	2.00	4.00	8.00	12.00	Regular
8	4.00	3.00	7.00	20.76	27.76	Dañado
9	4.00	2.00	6.00	15.30	21.30	Dañado
10	3.00	2.00	5.00	9.30	14.30	Regular
11	4.00	3.00	7.00	28.30	35.30	Dañado
12	3.00	2.00	5.00	23.00	28.00	Dañado
13	3.00	3.00	6.00	19.30	25.30	Dañado
14	4.00	3.00	7.00	28.55	35.55	Dañado
15	4.00	2.00	6.00	19.51	25.51	Dañado
16	2.00	2.00	4.00	10.90	14.90	Regular
17	5.00	3.00	8.00	45.00	53.00	Dañado
18	6.00	3.00	9.00	59.00	68.00	Muy dañado
19	5.00	3.00	8.00	41.25	49.25	Dañado
20	4.00	3.00	7.00	35.60	42.60	Dañado
21	4.00	3.00	7.00	40.35	47.35	Dañado
22	6.00	3.00	9.00	56.60	65.60	Muy dañado
23	2.00	2.00	4.00	8.85	12.85	Regular
24	3.00	1.00	4.00	15.50	19.50	Malo
25	2.00	2.00	4.00	7.40	11.40	Regular
26	3.00	2.00	5.00	11.40	16.40	Malo
27	4.00	3.00	7.00	17.65	24.65	Dañado
28	4.00	2.00	6.00	18.40	24.40	Dañado
29	3.00	2.00	5.00	12.60	17.60	Malo
30	4.00	3.00	7.00	10.80	17.80	Malo
31	4.00	3.00	7.00	33.60	40.60	Dañado
32	2.00	1.00	3.00	9.40	12.40	Regular
33	3.00	3.00	6.00	17.70	23.70	Dañado
34	5.00	3.00	8.00	39.90	47.90	Dañado
35	3.00	3.00	6.00	20.85	26.85	Dañado
36	2.00	1.00	3.00	1.65	4.65	Bueno
37	6.00	3.00	9.00	38.10	47.10	Dañado
38	4.00	3.00	7.00	33.90	40.90	Dañado
39	2.00	1.00	3.00	3.45	6.45	Aceptable
40	4.00	3.00	7.00	30.00	37.00	Dañado
41	3.00	3.00	6.00	4.80	10.80	Regular
42	4.00	3.00	7.00	8.10	15.10	Malo
43	5.00	3.00	8.00	43.65	51.65	Dañado
44	4.00	3.00	7.00	27.90	34.90	Dañado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES


Alejandro Ramírez Cortés:

Por medio de la presente se hace constar que el libro digital: *Convergencias del Diseño y de la Construcción Vol. IV; Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo. Sociedad, patrimonio urbano y sustentabilidad*, que coordina el Dr. Alejandro Acosta Collazo, en el cual usted es autor principal del capítulo titulado *"Impacto en las viviendas y en el desarrollo económico del Municipio de Jocotepec, Jalisco, debido a un uso no sustentable del agua"*, se encuentra actualmente en su etapa final de publicación en el Departamento Editorial de esta Institución. El año de publicación es 2014 e incluirá ISBN.

Para los fines legales que el interesado solicite, se extiende la presente constancia de aceptación para publicación.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, a 02 de junio de 2015.
"Se Lumen Proferre"


M.E. Martha Esparza Ramírez
Jefa del Depto. Editorial

c.c.p. Archivo.