

Deterioro estructural del patrimonio arquitectónico por efectos inducidos debido a la extracción del manto freático.

Carlos Alberto Torres Montes de Oca ^{a,*}

^a *Profesor Investigador de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Naucalpan, Estado de México.*

Resumen

En este trabajo se describen los hundimientos del suelo como un factor de importancia en el deterioro del patrimonio urbano arquitectónico, debido principalmente al bombeo de agua que se continúa realizando al subsuelo de la ciudad de México y de manera específica en suelos con arcillas de alta compresibilidad, lo que genera un fenómeno de consolidación en el subsuelo, con lo cual se originan hundimientos diferenciales en la base de los edificios desplantados en estas zonas. Algunos inmuebles presentan deterioro estructural debido a dicho fenómeno de hundimientos diferenciales, por lo que se vuelve imprescindible estudiar su comportamiento estructural bajo este fenómeno, con el fin de obtener resultados y parámetros que se puedan considerar en el análisis de este tipo de inmuebles en cualquier otra parte del mundo que cuenten con características similares. Se estudia un inmueble, de manera virtual, por medio de una simulación con sustento numérico, en particular se trata de un templo desplantado en el centro histórico de la Ciudad de México con propiedades mecánicas y constructivas de los materiales propios de la época colonial. Las conclusiones del caso de estudio deberán servir de apoyo, principalmente, a los involucrados en la práctica profesional y en el gremio, con el fin de que se tomen en cuenta las recomendaciones que se deriven del estudio y con ello crear conciencia de las afectaciones que puede tener a corto, mediano y largo plazo nuestro patrimonio construido.

Palabras Clave: Hundimientos diferenciales, edificios históricos, subsidencia del suelo, patrimonio construido, análisis estructural.

1. Introducción

En este trabajo se describen los hundimientos del suelo como un factor de importancia en el deterioro del patrimonio urbano arquitectónico, con especial atención al exagerado bombeo que se continúa realizando al subsuelo de la ciudad de México y de manera específica en arcillas de alta compresibilidad. Cabe mencionar que se han realizado un gran número de investigaciones en temas afines, tanto cualitativas como cuantitativas, por mencionar algunos: Marsal R.J., 1992, Santoyo E. et al., 1999 y 2008, Aguilera P., 2013, Tomás R. et al., 2009, Montejano M., 2016, entre otros, en las cuales se han estimado resultados importantes, que pudieran llegar a representar deterioros considerables en las edificaciones desplantadas sobre este tipo de suelos, por lo que al analizar dichos hundimientos y cruzar los datos con el patrimonio construido en esas zonas, se pueden intuir y explicar deterioros o daños estructurales de significancia para el patrimonio construido.

Es de vital importancia estudiar los fenómenos físicos de subsidencia del suelo que afectan al patrimonio histórico. Todo esto realizando un análisis desde un enfoque de cálculo estructural para mampostería no confinada y así estar en condiciones de establecer un parámetro en cuanto riegos presentes en la estructura y estabilidad futura del inmueble, mismos que sirven para definir acciones de conservación o restauración mediante un sustento matemático que brinde seguridad al ejercer medidas físicas que puedan modificar la integridad estructural del edificio.

Los hundimientos diferenciales del suelo pudieran afectar de manera directa a la estructura de un inmueble histórico, ya que obliga a la estructura a trabajar en condiciones distintas a las que fue concebido, ya que tanto los esfuerzos como los puntos de equilibrio pueden sobrepasar sus límites o, acercarse a un inminente riesgo de falla por sobreesfuerzo en elementos mecánicos de elementos estructurales, pero principalmente a la falla debida a desequilibrio, todo esto se puede analizar mediante modelos de análisis estructural virtuales que proporcionen resultados de acuerdo con las condiciones pasadas, presentes y futuras.

2. Materiales y métodos

Los materiales compositivos y estructurales de los inmuebles históricos contienen generalmente mamposterías irregulares no confinadas, este tipo de mamposterías puede ser de gran variedad, tal como: tezontles, canteras, y/o rocas volcánicas. Tales mamposterías pueden estar unidas o no con morteros o argamasas.

Para la modelación virtual de la geometría se adoptó lo mencionado por Lourenço (1996), quien clasificó el tipo de modelación de elementos finitos dependiendo del nivel de detalle:

Micro Modelado: Es cuando el detalle tanto para la mampostería como para el mortero se representan con distintos elementos, mientras que la interacción mampostería – mortero es representada por elementos de interfaz. Estos modelos son ideales cuando se quiere un mejor

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: ctorresmo@ipn.mx , ktcate2@hotmail.com (Carlos Alberto Torres Montes de Oca)

comportamiento local pero se necesita de un elevado detalle y costo computacional.

Micro Modelado Simplificado: Es cuando el modelado de mampostería y mortero se representa con un material homogéneo, el comportamiento de la junta de mortero es representado mediante modelos de interfaz.

Macro Modelado: En este modelo tanto el tabique como el mortero son sustituidos por un material homogéneo equivalente. La distribución de esfuerzos dentro del muro representa un valor promedio del esfuerzo entre los materiales.

Para el análisis estructural del caso de estudio en este trabajo, se recurrió a la utilización de un Macro Modelado de la geometría (Modelo completo en 3D) por medio de “shells”, de un software de cálculo estructural de elementos finitos, al cual se le asignaron las propiedades mecánicas de la mampostería en cuestión y se analizó tanto para cargas estáticas así como para una combinación de carga estática y hundimientos diferenciales presentes en la base del inmueble.

En el modelo estructural se utilizaron las propiedades mecánicas obtenidas de pruebas experimentales por Chávez M., 2010. En la base del modelo se introdujeron los desplazamientos verticales (asentamientos totales) que actualmente tiene el inmueble, con la finalidad de reproducir de manera virtual los hundimientos que ha sufrido el edificio hasta el momento. Es importante mencionar que la asignación de asentamientos diferenciales se modeló de una manera lineal, dado que las diferencias consecutivas entre asentamientos son relativamente pequeñas en comparación con las dimensiones del inmueble, describiendo así prácticamente una línea recta.

Los hundimientos del suelo tienden a provocar que las edificaciones modifiquen su configuración vertical original, conduciéndolos a desplazarse de manera diferencial en distintos puntos de su configuración espacial, lo cual a su vez produce movimientos desiguales entre los diferentes elementos estructurales.

Con la finalidad de contar con datos comparativos de las propiedades de las mamposterías que se utilizarían en el modelo estructural, se consultó la bibliografía de Meli R., 1993.

El análisis estructural realizado por medio del modelo virtual, se basó en un análisis numérico elasto- plástico, lo cual se traduce en una deformación del material hasta alcanzar su punto de resistencia máximo. Es importante mencionar que este tipo de modelación es considerada como básica, ya que no puede determinar redistribuciones avanzadas de esfuerzos por que siempre estará unida en sus nodos, lo cual en la realidad no sucede, ya que las mamposterías llegan a separarse en bloques al momento de rebasar los límites de equilibrio o de esfuerzos en sus juntas. Sin embargo no significa que los resultados sean completamente erróneos, ya que proporcionará información general para interpretar concentraciones de esfuerzos donde posiblemente existan dichas separaciones o agrietamientos. Además para representar las descargas en la base, este tipo de modelación se considera muy aceptable. Se aclara que aunque la mampostería en muchas ocasiones sólo se supone para soportar cargas a compresión, también pudiera desarrollar resistencias a la tracción (aunque mucho menores que a compresión), dependiendo de la configuración de las rocas y de las argamasas de las juntas entre las mismas, por lo que se considera que el límite del esfuerzo a compresión será

de 13 kg/cm² de acuerdo con Chávez M., 2010 (ver tablas 2 y 3), el cual se encuentra dentro del rango reportado por Meli R., 1993 (ver tabla 1).

Tabla 1: Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería de edificios históricos en kg/cm² (Meli, R., 1993)

Material	Peso volumétrico t/m ³	Resistencia a la compresión	Resistencia a cortante	Módulo de elasticidad
Adobe	1.8	2 a 5	0.5	3000
Bloques de tepetate con mortero con cal	1.8	5 a 10	0.5	5000
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5 a 10	1	5000
Ladrillo con mortero cal	1.6	15 a 20	2	1000
Mampostería con piedra irregular con mortero de cal	2	10 a 15	0.5	5000
Mampostería de piedra de Buena calidad	2	30	2	20000

Tabla 2: Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería de edificios históricos (Chávez, M., 2010)

Contenido de piedra y mortero	Piedra		Mortero		Mampostería		Módulo de elasticidad MPa
	Densidad	Resistencia a compresión	Densidad	Resistencia a compresión	Densidad	Resistencia a compresión	
	kg/m ³	MPa	kg/m ³	MPa	kg/m ³	MPa	
44% mortero; 56% piedra	1900	6.5	1656	0.98	1664	1.3	240
35% mortero; 65 % piedra			1598	0.79	1627	1.3	265

*Valores obtenidos en especímenes ensayados a la edad de 56 días

Tabla 3. Propiedades mecánicas utilizadas en un modelo a escala en mesa vibradora (Chávez, M., 2010)

Tipo de mampostería	Elementos estructurales	Peso volumétrico [kg/m ³]	Módulo de elasticidad [MPa]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la tensión [MPa]	Relación de Poisson
Piedra	Nave	1800	442	1.28	0.089	0.3
Ladrillo	Bóveda y campanarios	1550	540	3.93	0.28	0.3

Como se puede observar en la figura 1, el comportamiento mecánico a compresión de la mampostería tiene un rango elástico lineal ($\sigma = \epsilon$), a partir de este punto, se considera que el material entraría en un rango de trabajo no lineal o inelástico, en estas condiciones el material puede presentar fisuras si la carga axial aplicada sigue aumentando, y finalmente llegar al punto máximo de resistencia (Fm). Como se mencionó anteriormente este estudio se enfoca en un análisis lineal del material para saber a qué capacidad de esfuerzo se encuentran trabajando los elementos estructurales del inmueble. Así mismo, se considera que al rebasar los valores de resistencia máxima ese punto o zona analizada estructuralmente, estaría fallando, aunque el equilibrio estructural del sistema continúe en pie pero ahora de forma redistribuido.

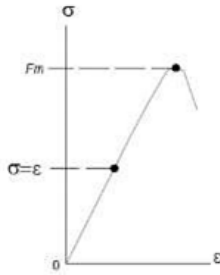


Figura 1: Gráfica Esfuerzo – Deformación idealizada para mampostería

Es importante mencionar que el material sufre degradación en el tiempo, tanto las piedras como el mortero o argamasa sufren un deterioro con el paso de los años, esto debido a la erosión, y también a la contracción y expansión por temperatura así como a la absorción y pérdida de humedad a lo largo del tiempo.

Teniendo esto en consideración se estima un parámetro de degradación de resistencia del material, el cual debe ser estimado para establecer un módulo de elasticidad y resistencia acordes con el estado de los materiales, una vez que se tiene definido el módulo de elasticidad pertinente del material, se procede a realizar el modelado geométrico y la asignación de las propiedades mecánicas a la interfaz del software para que reconozca el tipo de análisis que deseamos realizar y los resultados que queremos obtener del mismo. Es importante señalar que los resultados dependerán de las consideraciones periciales introducidas por el analista estructural, por tal motivo, entre mayores estudios cuantitativos e inspecciones visuales se realicen al inmueble, así como su correcta utilización, equivaldrá a mayor certeza en los resultados.

Es de suma importancia aclarar que para poder obtener resultados más acertados de manera local, se requiere de análisis no lineales y análisis límite, por lo que el análisis presentado es únicamente para obtener un acercamiento inicial del fenómeno que afecta de manera general al inmueble y sus posibles puntos desfavorables de concentración de esfuerzos, agrietamientos o zonas probables a sufrir separación de la estructura en macroelementos.

El análisis con elementos finitos pueden darnos resultados generales bastante aceptables para los casos de análisis preliminares de hundimientos en inmuebles modelados completos, dentro del rango elástico de un material (ver figura 3a), la complicación de este método es cuando los valores del análisis lineal no llegan a corresponder con la realidad física, ya que el programa de cómputo está diseñado para responder matemáticamente a las solicitaciones dadas por el usuario, y de este depende la interpretación de dicho análisis matemático y la aplicación física en la realidad, debido a que el software pudiera responder a deformaciones muy grandes y continuar deformándose sin límite, lo cual sería irreal.

2.1 Caso de estudio: Reproducción virtual de los hundimientos en la base de la iglesia de la Santa Veracruz por medio de la modelación estructural en 3D con elementos finitos.

La Iglesia de Santa Veracruz, situada en el centro histórico de la Ciudad de México, es una de las instituciones religiosas

más antiguas. Esta iglesia fue construida en 1568, sin embargo este inmueble se sustituyó en el siglo XVIII. Cabe mencionar que el cuerpo norte de inmueble fue integrado en el siglo XIX. Los ejes de los muros longitudinales (marcados en color verde) y transversales (en color azul) fueron identificados con números y letras (ver figura 2) con la finalidad de identificar los desplazamientos verticales diferenciales in situ e introducirlos numéricamente en el modelo virtual.

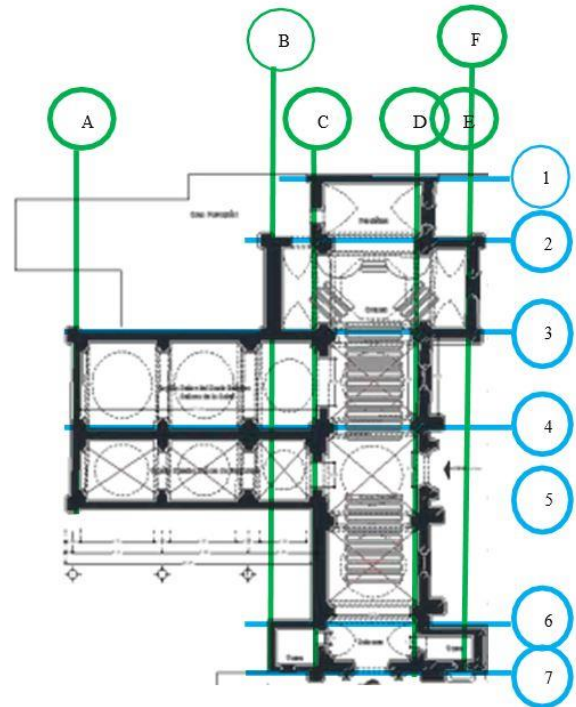


Figura 2: Planta arquitectónica de la Iglesia. Retomada de archivos electrónicos del levantamiento realizado por los alumnos de la Especialidad en Restauración Arquitectónica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional.



Figura 3ª: Modelo estructural. Concentración de esfuerzos en las torres campanarios

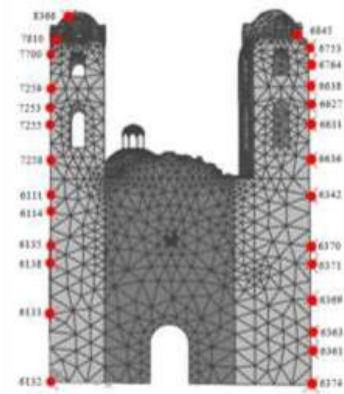


Figura 3b: Nodos seleccionados para medir deformaciones y esfuerzos en las torres campanario



Figura 4d: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 60%



Figura 4a: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 0%



Figura 4e: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 80%



Figura 4b: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 20%

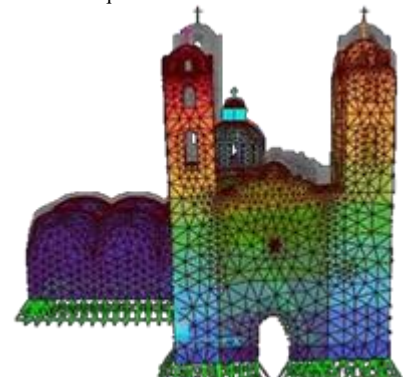


Figura 4f: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 100%

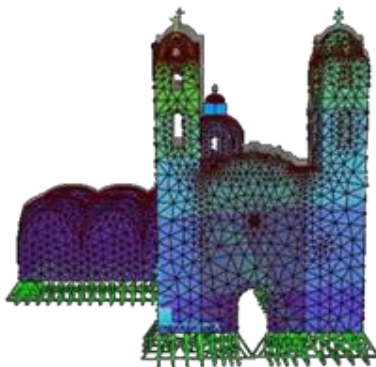


Figura 4c: Fachada Arquitectónica con efectos de hundimiento al 40%

Las figuras 4a - 4f muestran el Modelo Estructural del caso de estudio, donde se perciben las deformaciones presentes en la estructura: 4a) 0% de hundimiento, 4b) 20% de hundimiento, 4c) 40% de hundimiento, 4d) 60% de hundimiento, 4e) 80% de hundimiento, 4f) 100% de hundimiento.

3. Resultados y discusión

Los resultados muestran que al introducir los hundimientos diferenciales en la base, el inmueble presenta distintos niveles de deformación en la superestructura (ver figura 4). Asimismo se obtuvo que al reproducir de forma virtual los hundimientos en la base, se presentan concentraciones de esfuerzos en algunas zonas de la superestructura del edificio (ver figura 3), de las cuales en determinados puntos se rebasan las resistencias tanto a compresión como a tracción consideradas

como máximas permisibles de acuerdo con las tablas 1, 2 y 3, lo cual en este trabajo significaría la aparición de agrietamientos en algunas zonas de la edificación, como un ejemplo de ello ver la figura 7.

En la figura 5a – 5f se pueden ver los distintos desplazamientos a diferentes alturas que sufren las torres campanario, respecto a los ejes “X”, “Y” y “Z”, al estar bajo las acciones de diferentes porcentajes de hundimientos diferenciales del suelo. Los puntos graficados son los referenciados en los nodos mostrados en la figura 3b.

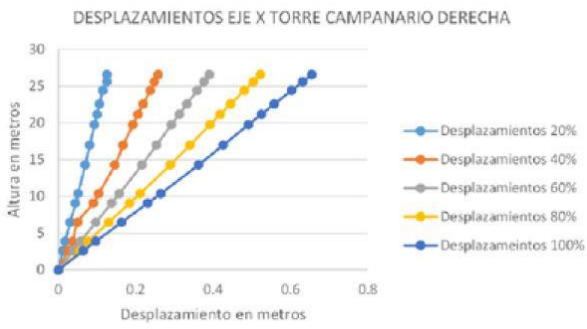


Figura 5a: Desplazamientos en el eje “X” de la torre campanario derecha considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo.

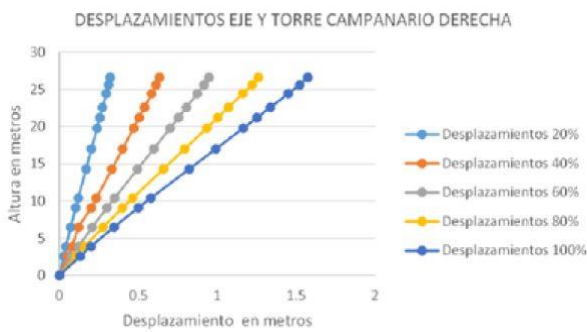


Figura 5b: Desplazamientos en el eje “Y” de la torre campanario derecha considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo

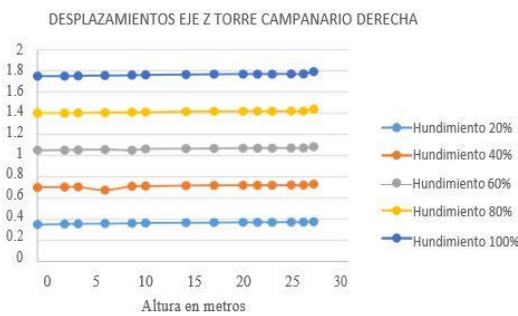


Figura 5c: Desplazamientos en el eje “Z” de la torre campanario derecha considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo.



Figura 5d: Desplazamientos en el eje “X” de la torre campanario izquierda considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo



Figura 5e: Desplazamientos en el eje “Y” de la torre campanario izquierda considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo

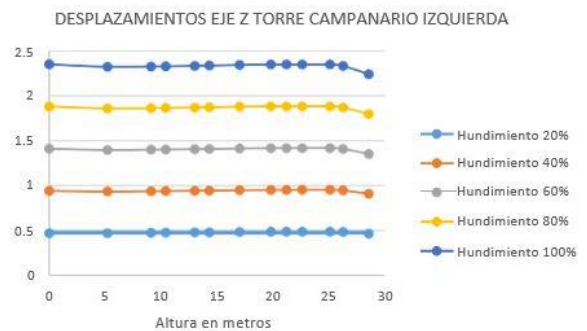


Figura 5f: Desplazamientos en el eje “Z” de la torre campanario izquierda considerando diferentes porcentajes de hundimiento del suelo

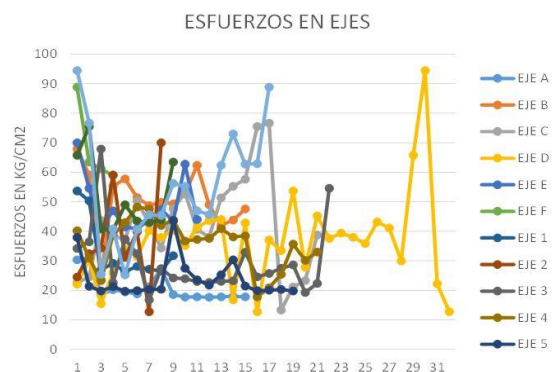


Figura 6: Esfuerzos en ejes de la base de la estructura debido al peso estático de la edificación.



Figura 7a: Foto de fachada principal resaltando las fisuras más visibles en las fronteras de las torres campanario y la portada

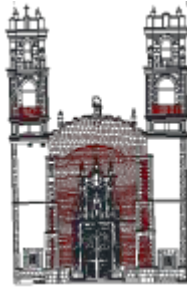


Figura 7b: Levantamiento de portada principal con hundimiento (Levantada por alumnos de la ESIA UT IPN en 2006)



Figura 7c: Captura de portada principal del Modelo estructural en 3D considerando el asentamiento actual en la base al 100%.

Los resultados muestran que, al introducir los hundimientos diferenciales en la base, el inmueble presenta distintos niveles de deformación en la superestructura, siendo la parte más deformada y esforzada la zona de las torres campanarios (ver figuras 3 y 4). Asimismo, se obtuvo que al reproducir de forma virtual los hundimientos en la base, se presentan concentraciones de esfuerzos en las zonas con cambio brusco de espesor o con intersección de muros perpendiculares al plano esforzado, asimismo en la fachada se encontraron concentraciones de esfuerzos en las fronteras de las torres campanarios y la portada.

4. Conclusiones

De acuerdo con el análisis realizado se asevera que algunas zonas de la estructura del inmueble se encuentran trabajando por encima de la capacidad de resistencia del material, principalmente en la torre campanario izquierda (viendo la fachada de frente) y parte del transepto, presentando variación de esfuerzos en general, debido a los hundimientos

diferenciales del suelo. Cabe señalar que en sitio se observan grietas resanadas en las mismas zonas identificadas con sobre esfuerzo en el modelo estructural, lo cual, al estar inyectadas, hace posible que las rocas vuelvan a tener contacto entre sí y ahora se modifiquen las propiedades mecánicas en las zonas “reparadas” o intervenidas, lo cual conllevaría a cambiar dichas propiedades en el modelo virtual y continuar realizando análisis para detectar nuevos comportamientos estructurales en el futuro, lo cual no se tiene como alcance en esta investigación.

Las herramientas actuales, tanto matemáticas como software de análisis estructural, aunadas a buenos criterios periciales de entendimiento del comportamiento estructural en los edificios históricos nos permiten anticipar las posibles afectaciones estructurales en áreas específicas que sufrirá un inmueble en caso de existir eventos accidentales o inducidos, tal como los provocados por hundimientos del suelo debido a extracción del manto freático o una variación de condiciones físicas que conlleven a una sobre carga de la estructural. Un buen diagnóstico del comportamiento estructural dependerá del tipo de modelación efectuado, y la interpretación de los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que los esfuerzos obtenidos en la base del inmueble debido a las descargas estáticas (figura 6) no serían congruentes con los asentamientos por consolidación secundaria, por lo que se concluye que es muy probable que las obras subterráneas del transporte colectivo metro o vestigios enterrados en el subsuelo estén incidiendo en la forma de los hundimientos de la base. Cabe aclarar que estos resultados emanan de un caso de estudio con limitantes, por lo cual no se pueden considerar como absolutos para éste y otros inmuebles históricos, sin embargo la edificación estudiada en este trabajo tiene características generales estructurales que si se pueden considerar como parámetros en análisis estructurales de otros inmuebles con composición arquitectónica similar.

Actualmente las torres campanario presentan afectación estructural de consideración debido a los efectos del sismo del pasado 19 de septiembre de 2017, se recomienda realizar trabajos futuros para combinar los efectos por hundimiento y sismo con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad ante estos fenómenos naturales conjugados. Así mismo se recomienda realizar análisis no lineales para considerar el acumulamiento de esfuerzos residuales en el tiempo, e incluso tomar en cuenta las intervenciones físicas que ha tenido dicho inmueble.

English Summary

Structural deterioration of the architectural heritage owed to induced effects due to the extraction of the water table.

Abstract

In this work, soil subsidence will be described as an important factor in the deterioration of the architectural urban heritage, mainly due to the water pumping that is continued to the subsoil of Mexico City and specifically in soils with high

compressibility clays, which generates a phenomenon of consolidation in the subsoil, with which differential subsidence originates in the base of the buildings displaced in these zones. Some buildings have structural deterioration due to this phenomenon of differential subsidence, so it becomes essential to study their structural behavior under this phenomenon, in order to obtain results and parameters that can be considered in the analysis of this type of property anywhere of the world with similar characteristics. A building is studied in a virtual way, through simulation with numerical support, in particular it is a temple located in the historic center of Mexico City with the mechanical and constructive properties of the materials typical of the colonial era. The conclusions of the case study should support, mainly, those involved in professional practice and the guild, in order to take into account the recommendations arising from the study and thereby raise awareness of the effects that I could have our built heritage in the short, medium and long term.

Keywords:

Differential sinkholes, Historical buildings, Land subsidence, Heritage buildings, Structural Analysis.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIA unidad Tecamachalco perteneciente al Instituto Politécnico Nacional. Un especial agradecimiento al estudiante de licenciatura de la ESIA-UT

Roberto Prado González quien participó en el análisis estructural del caso de estudio. Al CONACYT por su valioso apoyo y aceptación al Sistema Nacional de Investigadores. A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su invitación a este evento de investigación.

Referencias

- Aguilera P., (2013). Catedral Metropolitana, hundimiento y rescate. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Chávez, M. (2010). Validación experimental de métodos analíticos para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras históricas. Tesis de doctorado, UNAM.
- Meli, R. (1993). Respuesta estructural a la subexcavación, Catedral Metropolitana: Corrección geométrica. Informe Técnico, Espejo de Obsidiana, México.
- Laurenço, P. (1996). Computational Strategies For Masonry Structures.
- Marsal R. J., (1992). Hundimiento de la Ciudad de México (Primera edición). México, D.F.: El Colegio Nacional.
- Montejano M., Moreno M., Pastrana T., Cruz L., Torres C., Jiménez A. (2016). Huellas, vestigios y desastres. Capítulo 5. El hundimiento del suelo y el Patrimonio Urbano-Arquitectónico en la Ciudad de México: una relectura de los principios subyacentes.
- Santoyo E. y Segovia J. A. (1999). Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos TGC Geotecnia S.A. México
- Santoyo E. y Ovando E. (2008). Catedral y Sagrario de la Ciudad de México. Corrección Geométrica y Endurecimiento del Subsuelo.
- Tomás R., Herrera G., Delgado J., Peña F. (2009). Subsistencia del terreno, Ground Subsidences.
- Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra (17.3), pp. 295-302.