

# CATEDRAL METROPOLITANA

## HUNDIMIENTO Y RESCATE







# CATEDRAL METROPOLITANA HUNDIMIENTO Y RESCATE



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

© Instituto de Ingeniería

Primera edición: 2013

Impreso y hecho en México

ISBN: 978-607-02-4647-0

Primera impresión, 500 ejemplares

*Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la portada, puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en manera alguna por ningún medio sin permiso previo del editor.*



Rector  
Dr. José Narro Robles

Secretario general  
Dr. Eduardo Bárzana García

Secretario administrativo  
Ing. Leopoldo Silva Gutiérrez

Secretario de Desarrollo Institucional  
Dr. Francisco José Trigo Tavera

Secretario de Servicios a la Comunidad  
Enrique Balp Díaz

Abogado general  
Lic. Luis Raúl González Pérez

Coordinador de la Investigación Científica  
Dr. Carlos Arámburo de la Hoz

Director general de Comunicación Social  
Renato Dávalos López



Director  
Dr. Adalberto Noyola Robles

Secretaria académica  
Dra. Rosa María Ramírez Zamora

Subdirector de Estructuras y Geotecnia  
Dr. Manuel Jesús Mendoza López

Subdirector de Hidráulica y Ambiental  
Mtro. Alejandro Sánchez Huerta

Subdirector de Electromecánica  
Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón

Secretario administrativo  
C. P. Alfredo Gómez Luna Maya

Secretario técnico  
Arq. Aurelio López Espíndola

Jefe de la Unidad de Promoción  
y Comunicación  
Lic. Guillermo Guerrero Arenas

Autora: Patricia Aguilera Jiménez

Edición y corrección de estilo: Elena Nieva Sánchez

Apoyo a la revisión: Israel García Castro

Diseño: Ruth Eunice Pérez Pérez

Apoyo al diseño: Sandra Lozano Bolaños



# ÍNDICE

---

PRÓLOGO.....	8
Reconocimientos y asesoría científica.....	13
<b>CAPÍTULO 1: A MÁS DE 200 AÑOS DEL TÉRMINO DE SU CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
La esfera.....	12
El contenido de la caja.....	13
<b>CAPÍTULO 2: EL HUNDIMIENTO DE LAS EDIFICACIONES EN EL VALLE DE MÉXICO.....</b>	<b>16</b>
México sobre una cuenca lacustre.....	19
Hundimiento diferencial.....	23
La búsqueda de una solución.....	33
<b>CAPÍTULO 3: INTERVENCIONES EN EL SUBSUELO.....</b>	<b>36</b>
El procedimiento de subexcavación.....	36
La aplicación de las técnicas de la Catedral a la Torre de Pisa.....	40
Mejoramiento del subsuelo con inyección de mortero.....	45
<b>CAPÍTULO 4: LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL EN EL PROYECTO DE REHABILITACIÓN.....</b>	<b>46</b>
Estudios sobre los materiales.....	47
Refuerzo de la cimentación.....	48
Modelos analíticos.....	50
Monitoreo.....	50
Soluciones estructurales para partes específicas del conjunto religioso.....	55
<b>CAPÍTULO 5: CONSIDERACIONES FINALES.....</b>	<b>58</b>
El presente y el futuro.....	59
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>62</b>
<b>RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS E IMÁGENES.....</b>	<b>63</b>

# PRÓLOGO

---

## RECONOCIMIENTOS Y ASESORÍA CIENTÍFICA

Este libro divulga el trabajo realizado por el personal del Instituto de Ingeniería para el rescate de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México. No pretendemos con este texto desconocer a otras personas o entidades que trabajaron afanosamente en este gran proyecto de Rectificación Geométrica de la Catedral Metropolitana, y que sin muchos de ellos sería imposible hablar siquiera de la idea inicial, la búsqueda de financiamiento y buena parte del desarrollo del proyecto.

El Instituto de Ingeniería intenta con este primer número de su colección de divulgación dar a conocer solo algunos aspectos técnicos de una obra de gran trascendencia. Existe mucha más información y bibliografía que muestra ampliamente los trabajos realizados por otras personas y dependencias, como las mencionadas a continuación, a quienes se les reconoce su labor y sus aportaciones fundamentales:

Los trabajos de la Corrección Geométrica de la Catedral y Sagrario Metropolitanos de la Ciudad de México estuvieron a cargo de la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural de CONACULTA.

Las obras realizadas para el rescate de la Catedral Metropolitana fueron encabezadas por el arquitecto Sergio Zaldívar Guerra, quien fue director del proyecto de 1989 a 2000, y por el Dr. Xavier Cortés Rocha después de este periodo. El arquitecto Raúl Delgado, actual director de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural, en colaboración con el arquitecto Julio Valencia, ha encabezado las obras más recientes del proyecto.

El proyecto geotécnico fue realizado por la empresa TGC Geotecnia y dirigido por el ingeniero Enrique Santoyo Villa y el Dr. Enrique Tamez, en colaboración con el Dr. Efraín Ovando Shelley.



La parte estructural corrió a cargo del Dr. Fernando López Carmona, de la Facultad de Arquitectura, el Dr. Roberto Meli y el Ing. Roberto Sánchez, ambos del Instituto de Ingeniería.

Se extienden los reconocimientos al Ing. Hilario Prieto Calderón† y al Dr. Jorge Díaz Padilla (secretario del Comité), así como a los ingenieros Enrique Santoyo Reyes, Víctor Takahashi, Gerardo Miranda y Arturo Ramírez Abraham.

Al comité de expertos mexicanos encabezados por el Dr. Emilio Rosenblueth y los doctores Daniel Reséndiz, Gabriel Auvinet, Miguel Romo, Luis Arnal y Jesús Aguirre. También a los ingenieros Neftalí Rodríguez, Óscar de Buen, Juan Manuel Orozco y Juan Schmitter.

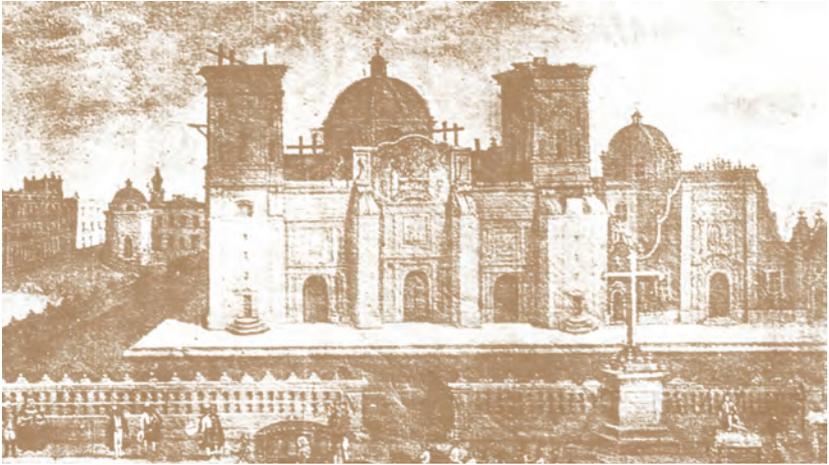
El proyecto de subexcavación de la Catedral resultó ser tan complejo que ameritó consultar a expertos de colegios y academias de ingenieros y arquitectos de otros países, por lo que se conformó en 1992 la Comisión Internacional de Consultores. Esta fue dirigida por el Dr. Michelle Jamiolkowsky, presidente del Comité para la Salvaguarda de la Torre de Pisa.

En este grupo también participaron los doctores John Burland, del Imperial College de Londres, y Giorgio Macchi, de la Universidad de Pavia, ambos pertenecientes al Comité de la Torre de Pisa. El grupo se complementó con las aportaciones de los doctores Gholamreza Mesri, de la Universidad de Illinois, y Pietro Porchelinis, de Cimentaciones Especiales Rodio, y Miha Tmavezic, del Instituto de Pruebas de Eslovenia.

El libro de divulgación que aquí presentamos fue documentado por los trabajos de investigación que se han llevado a cabo en esta obra del rescate de la Catedral por más de 20 años. ●

## CAPÍTULO 1

# A MÁS DE 200 AÑOS DEL TÉRMINO DE SU CONSTRUCCIÓN

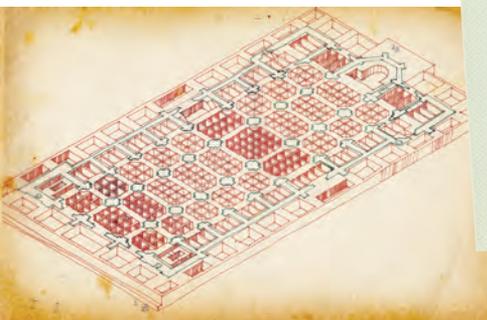


Litografía de la construcción de la Catedral Metropolitana aún sin concluir.

Corre el año de 1791; un hombre desliza sobre la superficie de una caja el lienzo de algodón que está sujeto a la palma de su mano con el cuidado que amerita un encargo de esta magnitud. Este hombre, del cual se desconoce su identidad, limpia cada una de las caras de una caja, que mide 15.5 por 8.2 cm y está hecha de lámina de zinc soldada con

plomo. Esta caja contiene algunos objetos que por años permanecerán ocultos en la Catedral de México. Su contenido es un secreto que se guarda sigilosamente.

Es día de fiesta en la capital de la Nueva España y la algarabía es incontrolable. La gente se detiene y mira hacia arriba. Es un hecho:



### LA TRAZA

El primer paso para construir obras de gran magnitud en la época de la Colonia consistía en hacer la traza, es decir, un plano que indicaba las características de la edificación: cimientos, orientación, muros, techos y estilo arquitectónico de la construcción. La traza de la Catedral Metropolitana le correspondió a Claudio de Arciniega.

Copia del plano original de la traza de la Catedral Metropolitana.

la obra se ha terminado casi en su totalidad. Al arquitecto José Damián Ortiz de Castro le ha correspondido la finalización de las torres, ya que su propuesta se escogió debido a la originalidad con la que diseñó el remate de las torres. Al final de cada una colocó una cruz de cantera que se encuentra afianzada en una esfera del mismo material. Doce años después otro célebre arquitecto, Manuel Tolsá, concluye la obra de la catedral más bella e imponente de América.

Los presentes se convierten en testigos del memorable hecho. El espacio es envuelto por un silencio que cubre todo el cuadro. Ortiz de Castro jamás podrá olvidar el momento cuando la historia se detuvo al escuchar el sonido de los cientos de campanas de las iglesias de alrededor. El estruendo de los repiques emociona hasta al más indiferente, la culminación de la obra se ha anunciado. La torre del lado oriente ha sido terminada.



Retrato por Rafael Jimeno y Planes (circa 1794).

### MANUEL TOLSÁ (1757-1816)

El afamado arquitecto valenciano fue el encargado de concluir la Catedral en 1813; armonizó los detalles de todo el edificio, embelleció la cúpula y colocó las linternillas sobre ella; en la parte alta de las torres instaló cuatro grandes esculturas; en el resto de las fachadas colocó las balaustradas y el reloj.

## LA ESFERA

Es un lunes de octubre de 2007 y el frío de la mañana le pega en la cara a uno de los hombres responsables del trabajo de rescate; todo parece que será un momento diferente. Han pasado casi 17 años de que se inició el proyecto; la Catedral Metropolitana ahora es más segura, ya que un grupo de expertos la rescató para preservarla por muchos años más.

Este hombre, ingeniero de profesión, camina por la parte trasera del edificio y por encima de la parte que recorre el Metro de la estación Zócalo a la estación Allende. Justo viene a su memoria el día que fue convocado a participar en este gran proyecto.

De pronto vuelve al pasado y llega a su pensamiento aquel profesor; lo recuerda hablando con mucho entusiasmo sobre las bondades de la ingeniería civil como profesión para el rescate de los edificios y monumentos históricos. En aquel momento creía, producto de su juventud e inexperiencia, que la formación académica que iba adquiriendo le mostraría otras alternativas de la disciplina posiblemente más vanguardistas. Nunca pensó que llegaría el momento de hacer lo propio al contagiar a sus estudiantes de esa gran pasión llamada Catedral. La emoción que siente al pertenecer al equipo de profesionales y expertos, que han sido reconocidos en todo el mundo por haber innovado con sus conocimientos y experiencia al salvar la construcción, lo hace pensar que aún queda mucho por aprender.

Con el mismo cuidado que de costumbre, comienza el ascenso de las más de 60 escaleras del andamio que conducen a la parte más alta de la torre oriente. Los escalones, de no más de 45 cm de huella cada uno, que van de 10 en 10, muestran en cada descanso la belleza



## EL REMATE DE LAS TORRES

*La Catedral Metropolitana de la ciudad de México está llena de sorpresas, una de ellas está en el remate de sus torres: se trata de una cruz sobre una esfera de cantera hueca dividida en dos partes, en cuyo interior se encontró la "caja del tiempo".*



del primer cuadro de la ciudad; ha tenido esta vista más de mil veces, pero cada vez es más hermosa. Piensa que algo será distinto a partir de ese momento, justo frente a la más antigua de las campanas, fundida en 1578, de nombre Santa María de la Asunción, conocida simplemente como "Doña María".

Todo está listo; el equipo de trabajo se encuentra reunido en la parte más alta, a 60 m de altura en una de las torres. Se abrirá por

primera vez la esfera que forma parte del remate. La empresa no será nada fácil, pues habrá que mover con todo el cuidado necesario la parte superior que se asemeja a un globo. Lo anterior es parte de los trabajos de investigación que continúa realizando el equipo de expertos del IIUNAM para conocer con más detalle cada una de las estructuras que forman el edificio.

A la cuenta de tres, poco a poco aplican la fuerza necesaria para deslizar la tapa de la esfera y desmontarla de su sitio original; la expectativa es muy alta. Son más de diez hombres los que esperan atentos y, aunque el frío a esas alturas se siente más fuerte, es tanta la adrenalina que corre por la sangre de cada uno, que lo único que importa es ver lo que hay dentro de la esfera. El viento hace que se perciba un extraño silencio. Han logrado quitar la tapa; se trata de una caja que ha permanecido intacta desde hace más de 200 años.

### EL CONTENIDO DE LA CAJA

Han pasado más de dos siglos desde que se escribió la fecha dentro de la parte interior de la esfera en color escarlata: mayo 14 de 1791. Se alcanza a ver una pequeña caja en perfectas condiciones que está debajo de una cruceta de madera, la cual se encuentra apollillada, y es lo único que el paso del tiempo no ha respetado. Ahora corresponde a este

### LAS "CAJAS DEL TIEMPO"

*Fueron un recurso muy común en el mundo y se utilizaron en México desde la época de la Colonia, con el propósito de guardar la memoria del contexto histórico en el que se inició o se terminó la construcción de grandes edificios. De hecho, esta costumbre sobrevive cuando se coloca la primera piedra en algunas construcciones.*



siglo saber un poco más de los secretos de la Catedral. Con extremo cuidado es retirada del sitio y es llevada a un laboratorio para ser sometida a estudios de FRX (fluorescencia de rayos X), técnica que consiste en realizar análisis cualitativos y cuantitativos de los elementos de minerales y rocas.

Con esta prueba no destructiva y de estudios de rayos X convencionales se conocerá su contenido antes de abrirla. Las imágenes de las pruebas son asombrosas: en su interior se encuentran 55 piezas.

Ahora sí, con más emoción que antes, la caja puede abrirse. El hallazgo es sorprendente, ya que todos los objetos se encuentran en un excelente estado de conservación, especialmente las monedas, que mantienen su brillo, como si acabaran de ser acuñadas. También se rehabilitó la torre poniente, pero en su esfera no se encontró ninguna caja, al contrario a lo que muchos suponían.

En esa época era común colocar "cajas del tiempo" en las construcciones que se concluían; lo inesperado en este caso fue el lugar elegido



### UNA HISTORIA QUE CONTAR

*El contenido del la "caja del tiempo" era de 55 piezas: 11 medallas doradas conmemorativas, 28 monedas de curso corriente (5 de plata) acuñadas en diferentes casas de moneda que provenían de diversas entidades del país. Además, un pergamino con el inventario de las piezas, reliquias de San Antonio de Padua y San Juan Nepomuceno, 5 grabados con oraciones e imágenes de santos y santas, como la virgen de Guadalupe, San Miguel Arcángel y Santa Bárbara, patrona de rayos y centellas (posiblemente con el fin de proteger la edificación); un dibujo de gran calidad con motivo religiosos y 5 cruces de palma pequeñas.*



para ponerlas, que es el remate de las torres, la parte más alta de la Catedral Metropolitana.

Lo platicado hasta ahora es tan solo una pequeña prueba de lo que representa la Catedral de la ciudad de México y las historias que la rodean. Haber encontrado la "caja del

tiempo" en pleno siglo XXI es por demás trascendente. Pero no es sino un pretexto de lo que se quiere contar: el rescate del hundimiento de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México, obra monumental que resguarda y representa una parte importante de la historia de nuestro país. ●

## CAPÍTULO 2

---

# EL HUNDIMIENTO DE LAS EDIFICACIONES EN EL VALLE DE MÉXICO

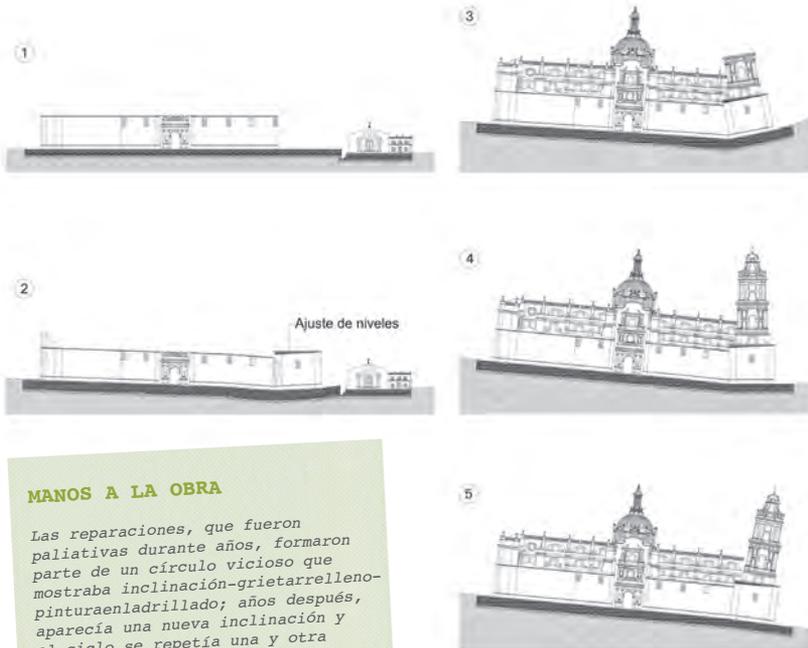
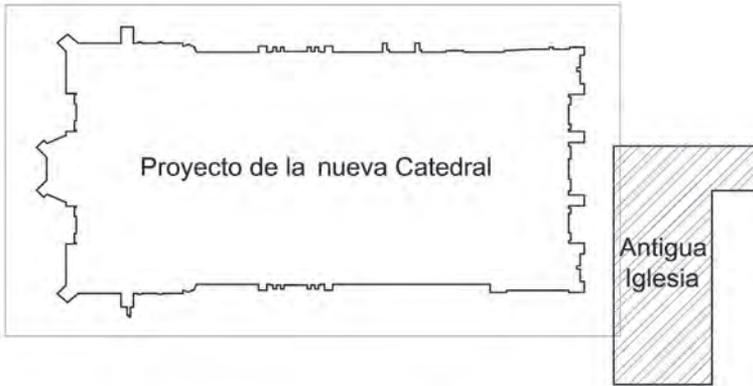
El 11 de abril de 1989 el primer cuadro de la capital era sorprendido por un aguacero mientras se dictaba una conferencia muy cerca del presbiterio de la Catedral Metropolitana. En aquella tarde la lluvia había ocasionado que el agua se filtrara a través de las bóvedas de las cinco naves que forman toda la estructura, ocasionando desperfectos importantes en las obras y los objetos de arte. El daño observado era severo, por lo que el edificio necesitaba una valoración urgente del estado en el que se encontraba.

Las goteras se asomaban por muchas partes de la Catedral, pero no era de extrañarse, ya que se trataba de una construcción con más de 400 años de existencia, y no era la primera ocasión que se presentaba este tipo de problema. Lo más preocupante vendría después, al encontrarse una grieta de tamaño considerable que no se había observado sino hasta ese momento, y que podía repercutir en la estabilidad de toda la estructura. Todo

apuntaba a que esta había aparecido desde la penúltima temporada de lluvias; lo anterior hizo buscar las causas.

En lo primero que se pensó fue el acontecimiento de algún sismo, pero al no tener registro de ninguno reciente de proporciones considerables, se descartó la hipótesis. Entonces, se planteó una segunda causa: el asentamiento significativo del inmueble, es decir, algún hundimiento, problema recurrente desde el siglo XVI por la inestabilidad del suelo en el que se encuentra. Por lo anterior, se convocó a un grupo de especialistas de diversas disciplinas e instituciones para elaborar un diagnóstico y evaluar la verdadera magnitud del problema.

Se formó entonces un comité de expertos que encontraron en la Catedral Metropolitana una veta de nuevos conocimientos y técnicas de punta para su rescate. El equipo multidisciplinario que tomó la batuta no solo



### MANOS A LA OBRA

Las reparaciones, que fueron paliativas durante años, formaron parte de un círculo vicioso que mostraba inclinación-grietarrelleno-pintura en ladrillado; años después, aparecía una nueva inclinación y el ciclo se repetía una y otra vez, ya que no había ninguna solución al problema de fondo.

Representación esquemática de la evolución de los hundimientos de la fachada poniente durante la construcción de la Catedral, con posible influencia de la cimentación de la primera basílica.

tuvo que corroborar la segunda hipótesis del problema del hundimiento, sino también entender muy bien qué le sucedía al edificio, así como predecir las consecuencias que esto tendría a largo plazo. Al mismo tiempo plantear una solución que pudiera revertir o detener el deterioro en el que se encontraba el inmueble.

El equipo estuvo conformado por especialistas de reconocido prestigio en geotecnia, por investigadores del área de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería, por arquitectos de la Facultad de Arquitectura, y por otros expertos en el rescate de edificios con importancia histórica, dirigidos por el arquitecto Sergio Zaldívar.

#### ESTRUCTURA PARA UNA CATEDRAL

*La Catedral Metropolitana es parte de una serie de edificios religiosos construidos en toda América por encargo de la Corona española. La primera idea fue diseñar iglesias a semejanza de las existentes en España. Para el caso de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México se pensó en la Catedral de Sevilla, que cuenta con siete naves, pero debido a los problemas del suelo, se decidió construirla solo de cinco.*



Vista del interior de la Catedral en la que se aprecian los principales elementos estructurales.

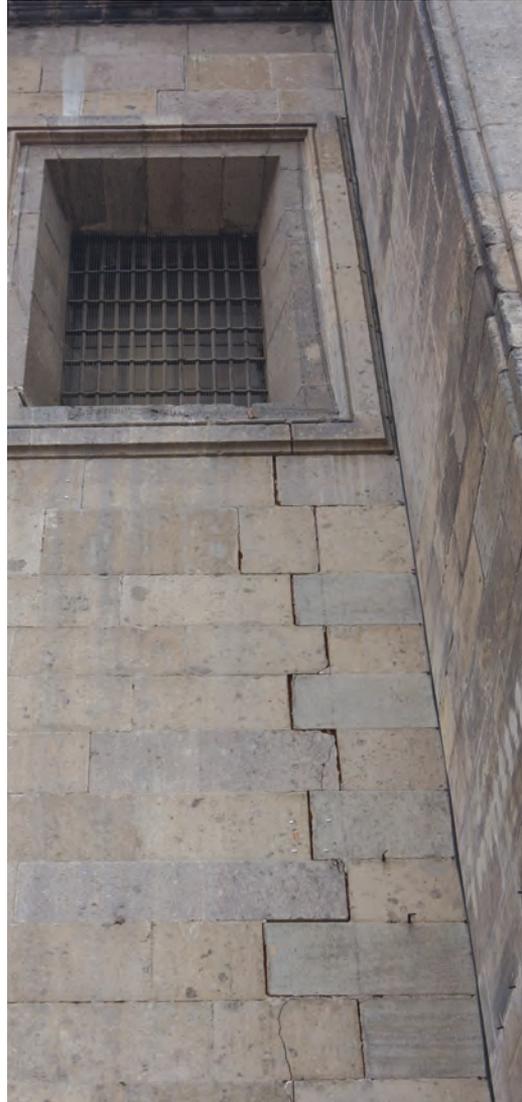
## MÉXICO SOBRE UNA CUENCA LACUSTRE

Para comenzar los trabajos de intervención, lo primero que se hizo fue indagar de manera minuciosa los antecedentes geológicos, geotécnicos, estratigráficos e históricos del área donde fue construida la Catedral. De esa investigación se obtuvieron los datos necesarios para conocer las características del terreno y los cimientos de la propia construcción, que resultaron ser únicos en cuanto a la constitución de los materiales del subsuelo. Con una exploración geotécnica exhaustiva se realizaron sondeos del suelo; la estrategia consistió en extraer muestras de este para conocer sus propiedades mecánicas y, con ello, verificar las características de cada estrato que se encuentra por debajo del edificio.

La ciudad de México y la zona metropolitana se asentaron una cuenca lacustre, formada por cinco lagos que se unían en época de lluvias. Todavía es posible encontrar algunos vestigios visibles de ellos en Xochimilco (DF) y Texcoco (estado de México).

A la llegada de los colonizadores españoles, aunque los lagos cubrían una gran superficie, ya se encontraba en proceso de desecación, el cual se acentuó artificialmente durante la época colonial y buena parte del siglo XIX.

El hecho de que la ciudad de México se haya fundado sobre un lago da idea del tipo de



Los daños físicos más visibles de la Catedral debido a los hundimientos diferenciales han sido las grietas en muros y el levantamiento del piso de mármol en las naves procesionales.

### LA CIUDAD DE LOS LAGOS

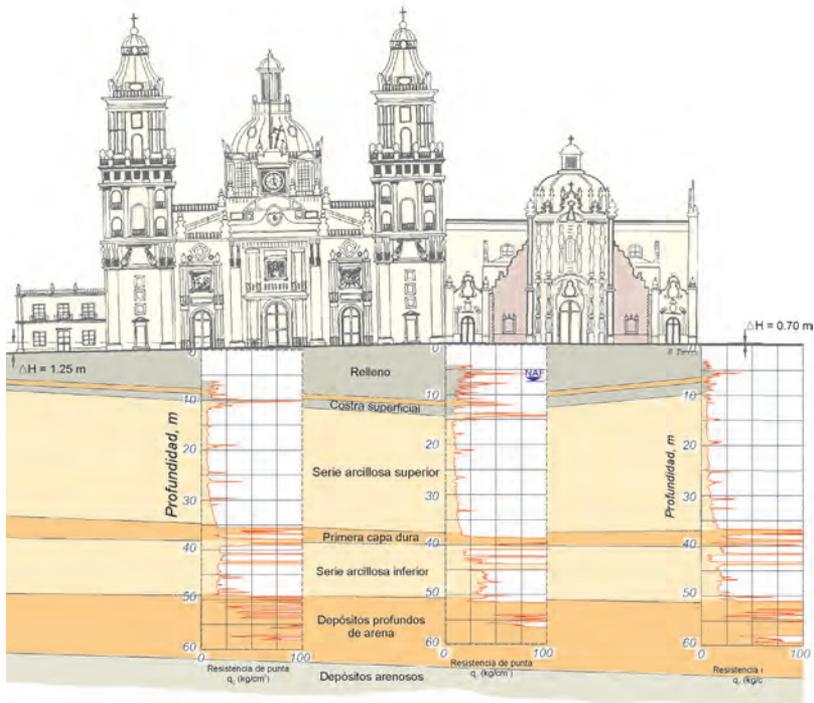
*La ciudad de México es una de las ciudades más antiguas en América. Fue asentada por los mexicas en el centro de un lago. El subsuelo tiene propiedades únicas, como ser altamente deformable, lo que ha dado lugar desde la época prehispánica a graves problemas de cimentación para la construcción de edificios elevados y de gran peso.*



Imagen de la representación de Tenochtitlan.

subsuelo que se encuentra debajo de ella, es decir, blando y con grandes mantos acuíferos. Ambas condiciones han propiciado históricamente que las construcciones se hundan, ya sea por el reblandecimiento del suelo o por la extracción del agua para consumo. No solo las construcciones de la Colonia y las actuales presentan estos problemas, sino también las grandes construcciones prehispánicas.

Para la construcción de Tenochtitlan se acondicionó la zona de los islotes, y se necesitó mucha tierra para hacer terraplenes y las sucesivas edificaciones, todo sobre arcillas lacustres. Debajo de estos estratos es posible que haya cañadas y barrancos a diferentes profundidades, que causan que los rellenos sean de diferente espesor en varios puntos del subsuelo. Los estratos de ocupación



Estratigrafía del subsuelo y desniveles de la superficie.

### ¿QUÉ HAY DEBAJO?

Para conocer cómo eran las características del subsuelo se realizaron sondeos profundos de exploración a través de un cono eléctrico, que es un instrumento que se hince a cierta velocidad constante dentro del terreno que se quiere penetrar. El objetivo es medir a través de su punta cónica (que tiene una celda electrónica) la resistencia que opone el terreno a la penetración. Al interpretar los resultados se logró descubrir edificios prehispánicos enterrados bajo la Catedral antes desconocidos para los arqueólogos, y precisar la ubicación de otros que ya se conocían, como la pirámide de Tonatiuh, cuyos restos yacen bajo el Sagrario Metropolitano.

humana sobre la costra natural son de más de 15 m y tienen estructuras prehispánicas de más de 11 m de profundidad.

Los materiales que habían sido colocados para el establecimiento de la ciudad de Tenochtitlan se removieron casi treinta años

después de la Conquista, lo que ocasionó parte del hundimiento diferencial que sufriría posteriormente la Catedral; es decir, la presión de las cargas aplicadas al subsuelo debidas primeramente al propio peso de la construcción, y posteriormente a la edificación del Sagrario, no es uniforme.

Un hundimiento diferencial indica, a grandes rasgos, que cada parte de un inmueble se hunde de diferente manera, no al mismo ritmo, lo que causa en la mayoría de los casos mayor inestabilidad.

El proceso histórico muestra por qué se originaron las irregularidades del suelo. Los

terrenos que fueron cargados comprimieron los estratos arcillosos, y los convirtieron en puntos más resistentes o menos deformables que los que no soportaron construcciones anteriores a la Catedral.

Algunas de estas construcciones fueron demolidas después para reutilizar el material



Vista actual de Templo Mayor y la Catedral, construida al extremo surponiente de este.

pétreo, aunque el suelo que las soportaba ya estaba comprimido y dio lugar a puntos o zonas “duras”.

Cuando hay amplios intervalos de tiempo entre las diferentes construcciones que fatigan el terreno, este se consolida y tiene mayor resistencia que los lugares que no fueron sometidos al proceso de compresión. Entonces, en suelos blandos (no consolidados), las zonas que han sido menos cargadas en el pasado se convierten en las más deformables y son las que se hundén más rápidamente.

### LA PRIMERA INTERVENCIÓN

*Hacia 1929 se encomendó a los arquitectos Manuel Ortiz Monasterio y Manuel Cortina García hacer una evaluación estructural de la Catedral, debido a los serios y alarmantes daños que el edificio tenía causados por los hundimientos acumulados durante décadas. Esta fue una de las primeras ocasiones en que expertos se preocuparon por la estabilidad de esta gran edificación.*

### HUNDIMIENTO DIFERENCIAL

El primer diagnóstico mostró que la Catedral se había construido sobre el extremo surponiente del Templo Mayor de la ciudad mexicana. Además, se alertaba del creciente problema de hundimiento diferencial del edificio, resultado de la gran deformabilidad de las arcillas. Este problema fue central en todo el proyecto del rescate de la Catedral.

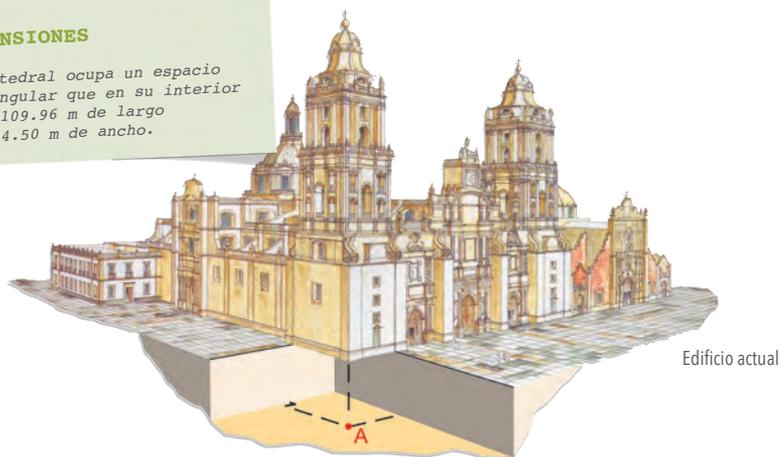
Uno de los principales problemas por atacar es que el hundimiento no uniforme hace que cada parte se mueva de manera diferente, es decir, unos lados de la construcción se desplazan, se deslizan o giran más que otros, lo que ocasiona que el edificio comience a agrietarse y a fracturarse, o incluso que algunas de sus partes se caigan, poniendo en riesgo su estabilidad e integridad. Eso sucedió con la primera Basílica de Guadalupe, al norte de la ciudad, cuyo suelo no solo descendió a través de los años ocasionándole girar hacia el sur, sino que además toda su estructura se deslizó hacia esa dirección.



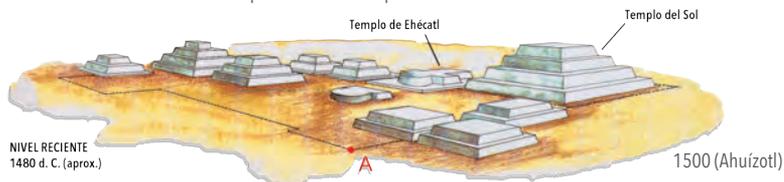
El hundimiento de la Catedral llegó a ser de 2.4 m desde el altar mayor hasta la torre de lado derecho.

**DIMENSIONES**

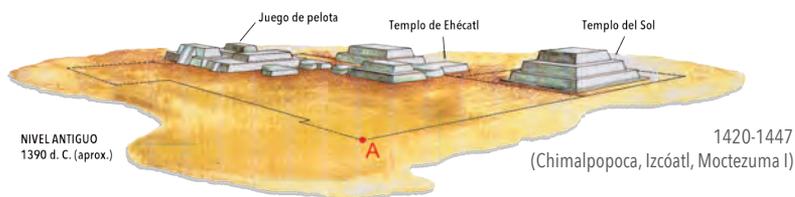
La Catedral ocupa un espacio rectangular que en su interior mide 109.96 m de largo por 54.50 m de ancho.



La letra A representa el mismo punto en fechas diferentes



NIVEL RECIENTE  
1480 d. C. (aprox.)

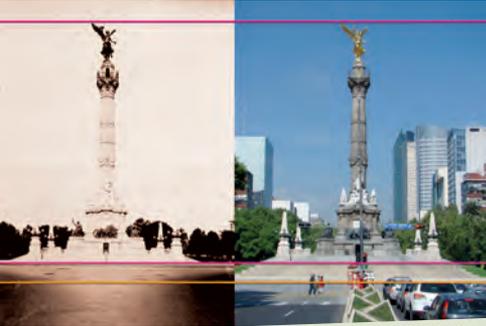


NIVEL ANTIGUO  
1390 d. C. (aprox.)

Representación de los templos aztecas que subyacen a la catedral.

Existen referencias de algunos templos, monumentos y construcciones que muestran que el fenómeno del hundimiento es una constante en la cuenca de México, resultado

de las características propias del subsuelo; además, como ya se mencionó, se extrae del subsuelo más del 70 % del agua que se consume en la ciudad de México.



### EL PROBLEMA DE HUNDIMIENTO DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

*Existen algunos monumentos históricos que parecen emerger, como la columna de la Independencia, pero al contrario, el suelo es el que se hunde.*

Un hecho palpable del hundimiento de la ciudad se puede apreciar en el monumento del Ángel de la Independencia. Se sabe que la columna fue cimentada por un conjunto de pilotes semejantes a unas patas. A través del tiempo el suelo ha descendido, pero los pilotes no, debido a que sus puntas están apoyadas sobre un estrato duro que se encuentra a 30 m de profundidad, y donde el efecto del hundimiento es menos perceptible. Tal ha sido el problema, que se han tenido que aumentar escalones para alcanzar la rotonda que se encuentra en la base de la columna y que en 1910 no existían.

### EDIFICIOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

*Muchos de ellos presentan hundimientos en mayor o menor medida. Un ejemplo es el extemplo jesuita de San Pedro y San Pablo, perteneciente a la UNAM. Su piso original se encuentra 4m por debajo de lo que vemos hoy, y sobre lo que ahora caminamos es un relleno.*



Otro ejemplo es el templo de la Santísima Trinidad de la calle de Moneda, en la ciudad de México. Al iniciar la edificación del templo, su base se hundió a tal profundidad que sus constructores se vieron en la necesidad de

hacer una nueva base sobre la inicial; más tardaron en hacerlo que el piso en hundirse nuevamente. Hoy se sabe que el problema de origen es el hundimiento diferencial. De haberse conocido antes, se habrían rescatado otros edificios de suma importancia que ya presentan daños irreversibles.



Fachada del templo de la Santísima Trinidad, ubicado en el Centro Histórico de la ciudad de México.

El caso de la Catedral Metropolitana no fue una excepción. Antes de encontrar una solución permanente para el problema, el ingeniero mexicano Manuel González Flores trató de corregir los hundimientos diferenciales colocando un sistema de pilotes de control en 1972; pero con esta técnica no se consiguieron los resultados esperados.

Sin embargo, estos intentos fallidos que se habían realizado para detener el problema de la Catedral contribuyeron a que los ingenieros y los arquitectos encargados de la obra comprendieran la magnitud y la complejidad de toda la estructura. Una evidencia contundente para dar el diagnóstico



#### TICA

*Uno de los efectos del hundimiento regional de la Catedral se puede corroborar con la referencia de la Tangente Inferior del Calendario Azteca, que estuvo adosada a la torre poniente de la Catedral, hasta su traslado al Museo Nacional de Antropología.*

## PILOTES

*En la intervención que se hizo a la Catedral y al Sagrario metropolitanos hacia 1970, se planteó colocar 1500 pilotes de punta con control por debajo de los edificios para intentar uniformar los hundimientos, pero las dificultades técnicas para colocarlos obligaron a instalar solo 390 en la Catedral y 129 en el Sagrario. En 1975 se creía que los pilotes permitirían detener los hundimientos diferenciales. Pero no funcionaron como se esperaba, debido a la insuficiente información sobre las condiciones geotécnicas del subsuelo.*



Pilotes de control colocados debajo del Sagrario Metropolitano.

final fue demostrar que los asentamientos que presentaba tenían acumulados más de 400 años, y que databan desde el inicio de su construcción, lo que ocasionó hacer constantes correcciones de la obra a medida que iba creciendo la estructura. Para corroborar lo anterior, se contaba con la referencia más antigua y confiable: la Tangente Inferior del Calendario Azteca (TICA).

La TICA era el punto donde se colocó durante muchos años la piedra del calendario azteca, apoyado en la torre poniente de la Catedral Metropolitana (en la actualidad solo se encuentra indicado con una línea marcada sobre una placa de aluminio), y se tenía la hipótesis de que ese punto era el único que no se hundía desde antes de 1525 (fecha documentada de la Conquista).

Las interrupciones de la obra por falta de recursos económicos implicaron que tuvieran que hacerse "renivelaciones" más de una vez, puesto que los hundimientos comenzaban a ser un gran problema.

Como ejemplo tenemos el momento de poner las bóvedas, ya que las columnas del lado sur no estaban niveladas con respecto a las del lado norte, por lo que tuvieron que corregirse con casi 90 cm más de material.

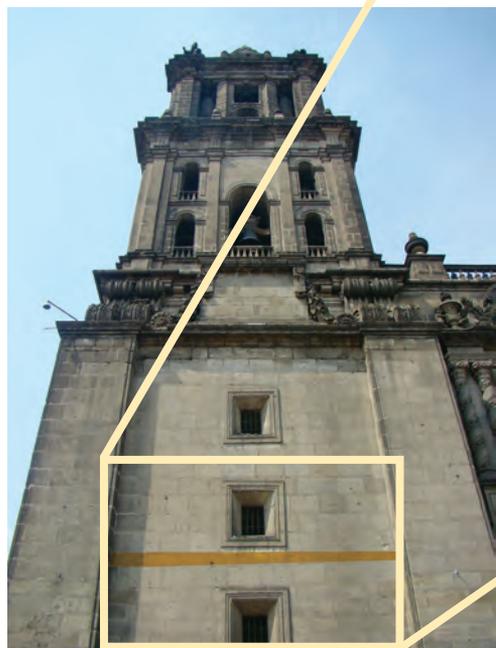
Las torres mismas fueron corregidas varias veces porque el edificio se inclinaba mientras se construía, y después de cada uno de los largos periodos de interrupción que sufrió la obra, tenía que buscarse otra vez la vertical. Cuando los muros y las columnas estaban a la altura necesaria, se observaba que se habían hundido y se tenía que aumentar su dimensión. Esto se puede apreciar en la actualidad si se ve de frente la fachada de la Catedral.

Durante la etapa inicial de construcción de la Catedral Metropolitana, hacia 1573, los hundimientos comenzaron a ser notorios cuando

#### UN SIGLO PROBLEMÁTICO

*El problema del hundimiento se hizo crítico a finales del siglo XX; se estima que en ese siglo el centro de la ciudad de México se hundió más de 7m.*

se colocó el pedraplén (plataforma de piedra sobre la que se desplantó la construcción). El terreno fue preparado con un estacado a manera prehispánica, sobre el cual se colocó una capa delgada de carbón (tal vez como ritual o para disminuir la humedad), y sobre ella, a manera de plantilla, se hizo una gran plataforma o terraplén. La carga de esta plataforma originó deformaciones, por lo que su espesor se incrementó buscando nivelarla de manera irregular.



Hilada de ajuste de la torre poniente. Para compensar el hundimiento se colocaron tabiques más grandes del lado izquierdo.



Rectificación de plomos con hilada de ajuste en la torre poniente. Se aprecia la diferencia de espesor de esa hilada para absorber los desniveles que se estaban produciendo en la estructura a causa de los hundimientos diferenciales.

### EL PROYECTO DE REHABILITACIÓN EN SU FASE INICIAL CONSISTIÓ EN

- *Tratar de corregir una parte importante de los enormes hundimientos diferenciales que se habían acumulado desde los inicios de la construcción.*
- *Mejorar las características del subsuelo para atenuar la velocidad con la que se producen los hundimientos diferenciales, con lo que trataría de evitarse que los movimientos producidos con las intervenciones realizadas en la Catedral pudieran llegar a ocasionar daños en toda la estructura.*
- *Realizar diversas obras de refuerzo para mejorar la seguridad y las condiciones de estabilidad del edificio ante futuros sismos y hundimientos.*

Entre los años 1672 y 1907 el asentamiento diferencial entre el presbiterio y la torre poniente fue de 1.53 m, lo que corresponde a una velocidad de 0.25 mm/mes. Entre 1907 y 1927 la velocidad del hundimiento diferencial se incrementó a 0.4 mm/mes; debido a que en el siglo XX se incrementó la perforación de pozos para la extracción de agua.

Entre 1938 y 1956 aumentó el hundimiento regional en la zona centro de la ciudad a una velocidad de deformación de hasta 33.3 mm/mes. Cabe destacar que el

hundimiento regional se manifiesta por el descenso de la superficie del terreno en una determinada área o región y no de un solo edificio. Entre 1956 y 1967 se redujo la velocidad del hundimiento regional, porque se estableció detener la extracción de agua de los pozos del subsuelo.

Pero entre 1967 y 1978, el bombeo profundo más el bombeo para construir la línea 2 del Metro aceleraron el hundimiento diferencial de la Catedral de 0.8 mm/mes a 2.6 mm/mes para algunas de sus partes. Lo más grave y alarmante se presentó en diciembre de 1989, cuando la velocidad de deformación diferencial alcanzó hasta 2.7 mm/mes. Las consecuencias estructurales más evidentes fueron

el agrietamiento y las fisuras de los pisos, y el desplome de columnas y pilastras.

La evaluación de las condiciones estructurales de la Catedral dejó en claro la necesidad de emprender acciones inmediatas para corregir la situación de inseguridad de la estructura y para mejorar el funcionamiento del templo.

Para medir el hundimiento de las estructuras se realizaron nivelaciones topográficas de precisión tanto en la Catedral como en el Sagrario. Las nivelaciones de referencia se llevaron a cabo al inicio del proyecto con datos que se obtuvieron entre el 7 de enero y el 2 de septiembre de 1991. Con esta evaluación se conocieron las velocidades del hundimiento



Pilotes de madera colocados al inicio de la construcción en la esquina oriente del Sagrario Metropolitano. Se puede observar que la punta se incrusta en una pared de la pirámide mexicana.



### EL METRO

*La propuesta de construir un sistema de transporte subterráneo como el Metro, en 1958, fue rechazada por considerar arriesgado excavar el subsuelo en el centro de la ciudad, debido al sismo de 7 grados que ocasionó severos daños en varios edificios en el año de 1957. Sin embargo, a finales de la década de los 60 se inició su construcción.*

anual, que ayudaron a realizar la interpretación de por qué se presentaban deformaciones geométricas que se habían acumulado en ambas construcciones a lo largo del tiempo. A partir de este estudio se destacaron tres puntos de referencia para diagnosticar el daño.

Con base en la interpretación de estas mediciones, los estudios geotécnicos concluyeron que el hundimiento diferencial se había

debido a una combinación de distintos factores: la extracción de agua del subsuelo para abastecer a la población, la presencia de obras prehispánicas que subyacen a los cimientos del templo, y las obras del Metro y del colector del drenaje, cuya trayectoria va sobre la calle Cinco de Mayo, pasa frente al conjunto religioso y continúa hacia el oriente por la calle de Moneda.

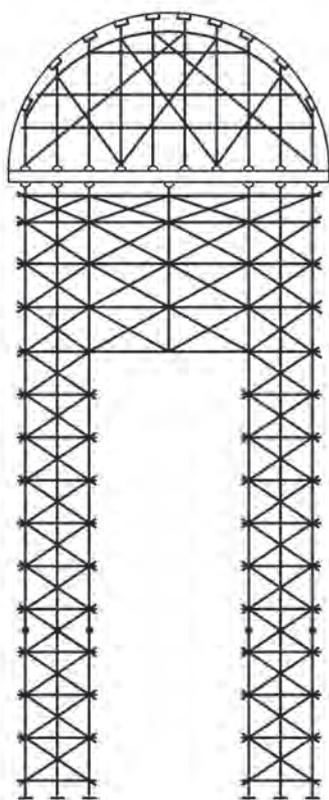
Esta situación resultaba particularmente delicada al considerar la tasa con la que estaban avanzando los hundimientos, ya que de continuar así, era de esperarse que en un futuro se generaran severos esfuerzos y deformaciones suficientes para poner en riesgo la estabilidad de los templos en menos de 25 años.

### COLUMNAS

*Algunas columnas de la Catedral, las que se localizan al sur, miden hasta 85 cm más de altura que las que se encuentran cercanas a la parte norte, prueba del hundimiento diferencial.*

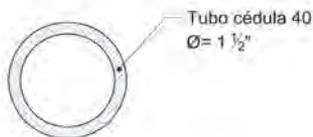
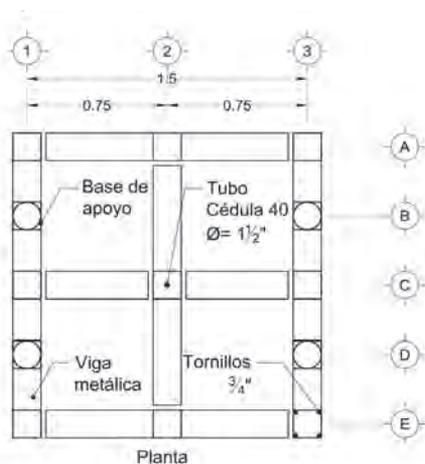
### PARA RECOLECTAR INFORMACIÓN

En un proyecto como el del rescate de la Catedral Metropolitana resultó indispensable llevar a cabo una investigación documental exhaustiva con el objetivo de tomar las mejores decisiones; para ello, se requirió no solo buscar en la literatura especializada investigaciones similares, sino también la aplicación de modelos teóricos para resolver el problema del hundimiento.



Elevación

Torre típica de apuntalamiento y su instrumentación.



### EL APUNTALAMIENTO

Para poder realizar la subexcavación tuvo que apuntalarse (colocar "muletas" temporales) el templo, porque se temía que un movimiento brusco pudiera causarle daños a su estructura, especialmente a sus grandes columnas, varias de las cuales presentaban severas fracturas. El diseño y la implementación del robusto apuntalamiento estuvieron a cargo del Ing. Hilario Prieto.

*La geotecnia se encuentra íntimamente relacionada con otras disciplinas de la ingeniería, como la mecánica de suelos y la mecánica de rocas; ambas son fundamentales para saber el comportamiento del subsuelo.*

## LA BÚSQUEDA DE UNA SOLUCIÓN

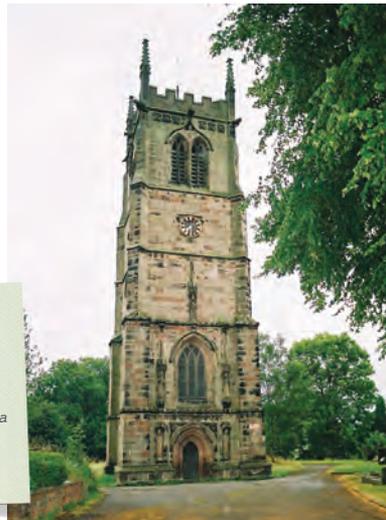
El tratamiento fue intentar corregir el daño causado por las deformaciones acumuladas en el pasado y detener las deformaciones futuras para evitar más deterioro, para lo cual se consideraron cinco posibles soluciones: colocar pilotes apoyados en la capa dura, poner pilas apoyadas en los depósitos profundos, subexcavar las arcillas blandas, restituir la presión del agua intersticial o recimentar con micropilotes.

Estas cinco soluciones fueron expuestas a los colegios de ingenieros y arquitectos, así como a especialistas en conservación de monumentos, estructuras y mecánica de suelos. Se procedió a evaluarlas y calificarlas haciendo



### LA PIONERA

*La técnica de subexcavación fue puesta en práctica por primera vez para nivelar la torre de la iglesia de Wybunbury en Inglaterra. Años más tarde fue perfeccionada por ingenieros mexicanos para realizar las correcciones del hundimiento diferencial en la Catedral Metropolitana.*



Torre de la iglesia de St. Chad, en Wybunbury, Chesire, Inglaterra.

referencia a varios factores, como los objetivos estructurales, la seguridad de cada una, la certidumbre de éxito, la no interferencia en las actividades de los templos, el tiempo para realizarlas y, desde luego, el costo para ejecutar los trabajos.

La subexcavación de arcillas resultó ser la propuesta más adecuada para reducir los hundimientos diferenciales acumulados hasta 1991, y con ello conseguir detenerlos o hacerlos tolerables.

A grandes rasgos, la subexcavación es un proceso que consiste en hacer descender de manera controlada las partes más altas con respecto a las más bajas de la construcción, por medio de la extracción lenta del subsuelo. El objetivo principal es retirar cuidadosamente volúmenes de la arcilla de cimentación en las zonas de menor deformación, con el fin de igualar la velocidad de hundimiento en diferentes zonas de la estructura. En resumen, se intenta conseguir que la edificación se hunda selectivamente induciendo hundimientos diferenciales correctivos.

En la práctica, consiste en realizar tres tareas específicas:

1. Construir lumbreras de acceso.
2. Abatir de forma puntual el nivel freático con el objeto de permitir el trabajo en la base de los pozos o lumbreras.

### EL EXPERIMENTO

*En la iglesia de San Antonio Abad se realizaron los primeros ensayos de la subexcavación para inducir en el edificio asentamientos correctivos. El objetivo consistió en evaluar el comportamiento de la estructura respecto a los movimientos ocasionados por la intervención de extraer el subsuelo.*

3. Subexcavar o extraer de manera controlada pequeñas porciones de suelo hasta alcanzar el volumen preestablecido.

Las primeras dos acciones son preparatorias, mientras que la tercera se nombra "procedimiento geotécnico de corrección".

Si bien con los datos obtenidos se podía comenzar el trabajo de rehabilitación de la Catedral, fue necesario probar antes la efectividad y la viabilidad de la técnica, así como observar lo planeado por los ingenieros. Se decidió hacer una prueba con alguna estructura más pequeña pero con características similares a las de la catedral, y conseguir cierto grado de certidumbre para corroborar la técnica de subexcavación.

Para tal propósito, se escogió la pequeña iglesia de San Antonio Abad, ubicada sobre la calzada de Tlalpan de la ciudad de México, muy cerca del Centro Histórico.



Fachada de la iglesia de San Antonio Abad.

Esta iglesia fue construida en el siglo XVI. Su diseño es de una nave de cañón corrido y una torre de 19 m de altura; podría decirse que es como un modelo a escala de la Catedral, porque tiene características similares, como su mampostería, pero, además, por haber sido construida sobre el mismo suelo del primer cuadro de la ciudad.

El procedimiento para hacer la subexcavación en San Antonio Abad consistió en:

- Frenar el movimiento de la estructura por medio de la aplicación de lodo bentónico (mezcla de agua con una arcilla muy densa) en las perforaciones.
  - Mover indirectamente los elementos de la estructura, como las bóvedas, y observar su respuesta.
  - Determinar el tiempo en el que la estructura por sí sola podría detener los movimientos inducidos y naturales, después de concluir con la subexcavación. ◉
- Extraer tierra debajo del templo y observar el comportamiento del edificio.

## CAPÍTULO 3

# INTERVENCIONES EN EL SUBSUELO

Los trabajos realizados en la iglesia de San Antonio Abad fueron un éxito; cuando se comprobó que la subexcavación funcionaba como se esperaba, el siguiente paso fue trabajar en la Catedral cuanto antes.

Así dio inicio un largo proceso que lleva más de 20 años y en el que de manera casi ininterrumpida se han desarrollado diversas actividades: las principales fueron las enfocadas a mejorar las condiciones de estabilidad del inmueble, otras tuvieron el fin de restaurar su estructura, y otras más estuvieron dedicadas a la restauración de los bienes muebles contenidos en su interior.

### EL PROCEDIMIENTO DE SUBEXCAVACIÓN

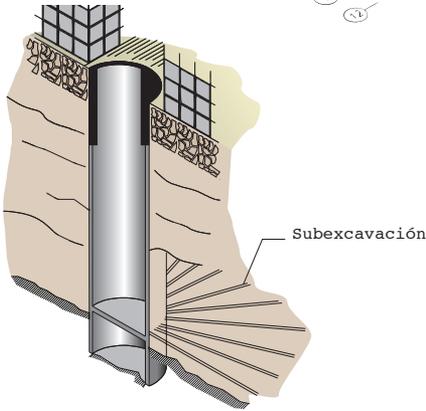
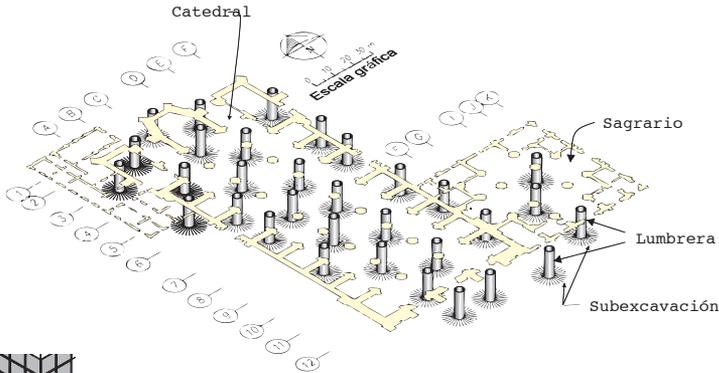
La primera etapa de este ambicioso y delicado programa de rehabilitación tuvo como objetivo corregir parcialmente las diferencias de nivel entre distintos puntos de la base de la Catedral mediante la técnica de subexcavación.

A esta parte del proyecto se le denominó Corrección Geométrica de la Catedral.

El procedimiento para comenzar con la subexcavación consistió en hacer también perforaciones o lumbreras en el suelo. Algunas de las lumbreras se hicieron por debajo del nivel de las criptas, y otras en torno a la Catedral y al Sagrario, con el fin de alcanzar las arcillas de la costra natural. La lumbrera más profunda se realizó debajo del crucero del Sagrario, desde donde fue necesario perforar la pirámide que se encuentra por debajo de este para extraer desde allí parte del suelo deformado, con todo el cuidado de sacar solo cierta cantidad de suelo en cada posición.

#### SE ACEPTA LA TÉCNICA

*Después de examinar de manera minuciosa los informes técnicos del proyecto e inspeccionar los trabajos realizados en la iglesia de San Antonio Abad, el equipo de expertos asesores aceptó la subexcavación como técnica para hacer los trabajos de corrección en la Catedral.*



Profundidad media: 20 m

Esquema que muestra la distribución de las lumbreras y el corte de una de ellas.

**EXTRACCIÓN DE MATERIAL**

Fue necesario extraer material térreo debajo de la Catedral, incluso de las antiguas pirámides mexicas.

De esta forma, fue posible generar asentamientos pequeños y precisos para los sitios previamente escogidos. Las lumbreras se revistieron de concreto y en el fondo fueron colocadas boquillas de 15 cm de diámetro.

La subexcavación se hizo con una máquina rotatoria que tiene un compresor

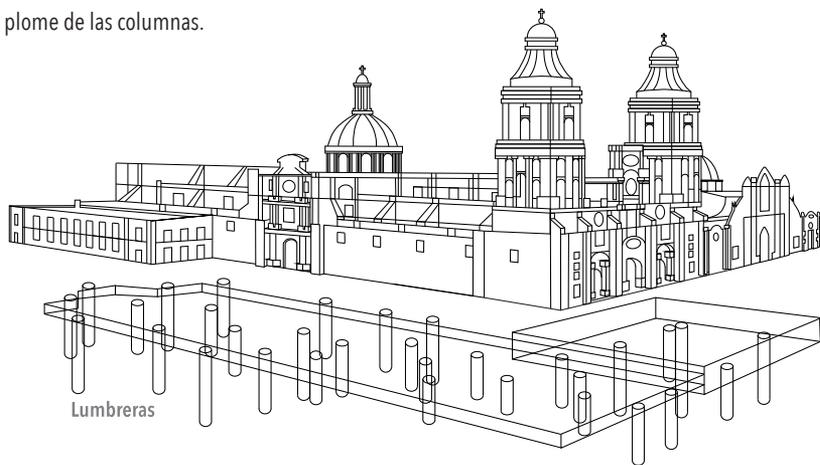
hidroneumático y un émbolo, similar al de una jeringa común. La máquina introduce por las boquillas un tubo delgado de 1.20 m de largo por 10 cm de diámetro. Después se retrae el émbolo y se acopla otro tramo de tubo hasta penetrar a una profundidad de 6 o 7 m. Posteriormente, los tubos llenos de arcilla se retiran, consiguiendo con esto pequeños

túneles. A esas profundidades la presión ocasiona que se rompa la cohesión de la arcilla, y así el túnel se colapsa.

Esta operación se hace sucesivamente y en forma radial para que, al ser comprimido el material, puedan provocarse los hundimientos en la superficie.

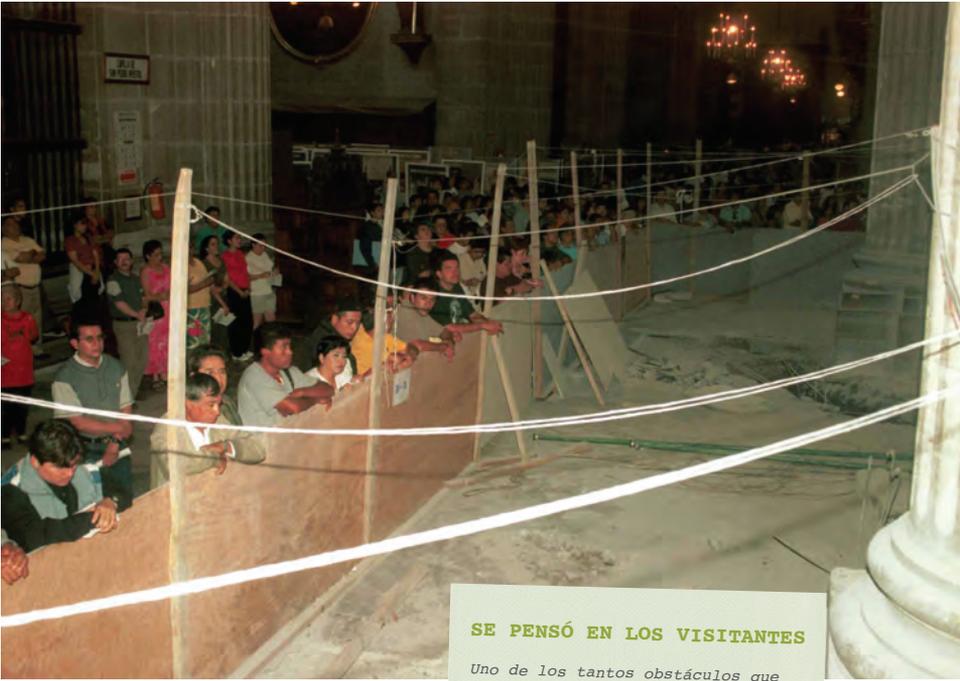
La subexcavación condujo a una importante corrección de los asentamientos diferenciales y de las distorsiones que había tenido la estructura; sin embargo, solo se lograron reducciones moderadas en algunos parámetros que afectaban a su seguridad, como el desplome de las columnas.

Los daños detectados eran desde severas distorsiones y agrietamientos, hasta inclinaciones en muros y columnas. El proyecto, complejo y delicado al aplicar el método de subexcavación, pretendía demostrar que, al llevar a la práctica la técnica, se lograría la corrección geométrica de los edificios. Una de las evidencias fue que hacia finales del mes de junio de 1998 se logró eliminar los hundimientos acumulados de los últimos 65 años, y con ello se consiguió obtener una corrección máxima inducida entre la torre poniente y el ábside, que alcanzó los 92 cm al término del tratamiento.



### LA TÉCNICA DE LA SUBEXCAVACIÓN EN LA CATEDRAL

*La primera parte del programa tuvo como objetivo la corrección parcial de las diferencias de nivel en distintos puntos de la base del edificio. Se inició con la extracción de suelo de la capa arcillosa superior, desde donde se realizaron 50 perforaciones radiales que penetraron en el suelo de 6 a 22 m en cada lumbrera. El propósito no solo fue eliminar parte de los hundimientos diferenciales, sino también producir movimientos que favorecieran la estabilidad estructural del edificio.*



#### SE PENSÓ EN LOS VISITANTES

*Uno de los tantos obstáculos que tuvieron que enfrentarse durante los trabajos del rescate de la Catedral tenía que ver con la gente que asistía a este recinto, ya que se determinó que durante los casi 15 años en los que se han realizado los trabajos de rehabilitación y rescate, las obras no detendrían las visitas de los feligreses, por lo que nunca serían cerradas las puertas de la Catedral.*

Lo anterior muestra la complejidad que implicó el proyecto para el rescate de la Catedral, ya que durante los trabajos de intervención fue indispensable tomar en cuenta cada una de las partes que conforman la edificación: el subsuelo y todas las estructuras de ambos edificios, entre columnas, naves y torres. Al final de cuentas, se trata de entender cómo cada uno de estos elementos solos, o en conjunto, hacen del edificio un objeto de estudio a través del cual pueden generarse nuevos conocimientos, aprendizajes y métodos, y técnicas de la ingeniería civil y la arquitectura.

Una de las evaluaciones para realizar la subcavación fue calcular la cantidad de material que debería extraerse, así como la ubicación de los sitios para efectuar esta operación. El volumen total extraído de las lumbreras fue de 4220m<sup>3</sup>, equivalente al contenido de agua de dos albercas olímpicas.

## LA APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE LA CATEDRAL A LA TORRE DE PISA

Las investigaciones realizadas en este campo y su aplicación práctica inmediata han tenido un gran impacto en la ingeniería de cimentaciones de la ciudad de México y han llamado la atención en el extranjero. El ejemplo más destacado de lo anterior es la subexcavación

de la Torre de Pisa, que no habría sido posible sin la experiencia de los trabajos de ese mismo tipo que se llevaron a cabo exitosamente en la Catedral.

Pisa se ubica en la región de la Toscana, Italia, y fue fundada por los etruscos. Su catedral, ubicada en la plaza de los Milagros, se destaca por un edificio que no pasa desapercibido para

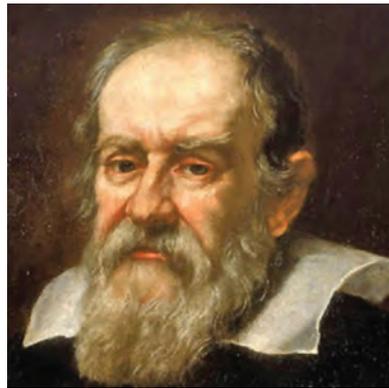


Plaza de los Milagros, Pisa, Italia.

nadie: el campanario, fundado en 1174, con poco más de 55 metros de altura, casi 15 000 toneladas de peso y 294 escalones, más conocido en todo el mundo como la Torre de Pisa o la torre inclinada de Pisa, declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO en 1987.

Su inclinación es un defecto que desde el inicio de su construcción ha sido una constante

preocupación para los expertos, casi es de no creerse lo que a simple vista se observa; pero es precisamente esta la razón de la fama de la torre. Mientras uno se acerca a la plaza, parece que la inclinación aumenta, y con esto surge la pregunta obligada: ¿cómo resiste la estructura sin caerse? Cuenta la leyenda que esta imperfección fue la que aprovechó Galileo Galilei para experimentar sobre la caída de los cuerpos.



Galileo Galilei, por Justus Sustermans (1636). La historia de sus contribuciones a la ciencia están ligadas con la Torre de Pisa.

### LA INCLINACIÓN DE LA TORRE DE PISA

*En el año de 1990 la Torre de Pisa se había inclinado más de 4 m. Diez años después del proyecto de salvamento se corrigieron 40 cm. La piedra que se dice que arrojaba Galileo desde lo alto se habría acercado a la base de la Torre esa misma distancia. Un medio grado fue el que redujo su inclinación, suficiente para devolverla a la condición que tenía a comienzos de 1800.*

El arquitecto Bonnano Pisano comenzó a construir el campanario de Pisa en 1173, y bastó que se hiciera la elevación del primer piso para empezar a inclinarse por un defecto en los cimientos. Entonces se detuvo la obra, que se reinició en 1272. Tras siglos de problemas, originados por la deformabilidad del subsuelo de Pisa que es heterogéneo, la Torre se había inclinado 4.5 m desde la parte más alta respecto a su eje.

Fue hasta 1990 cuando se anunció el diagnóstico: hundimiento diferencial, similar al de la Catedral Metropolitana de la ciudad de

México. Y se advertía que de continuar así, para 2010 las columnas estarían inclinadas y habría grandes amenazas de colapso, de alto riesgo por causas sísmicas.

La Torre de Pisa se había convertido en un asunto de atención mundial y de gravedad absoluta, ya que de continuar aumentando la inclinación, se corría el riesgo de que se viniera totalmente abajo y, con ello, la pérdida de una de las construcciones más emblemáticas en la historia de la humanidad.

Así, en noviembre de 1993 los miembros del Comité para la Salvaguarda de la Torre de Pisa evaluaron el proyecto de la Catedral. Las semejanzas de los problemas de estos monumentos despertaron interés, lo que motivó la comunicación técnica y la comparación de ambos casos.

En ambos el origen del problema se encuentra en el subsuelo, y también ahí mismo se encontraron sus soluciones. Los dos edificios difieren en la magnitud del daño acumulado y en la velocidad con la que se han ido deteriorando. Para la Catedral, los diferenciales de hundimiento se acumulaban a razón de 1.7 cm/año, mientras que para la torre de Pisa, la velocidad de hundimiento diferencial era de 0.05 cm/año, 34 veces más lenta que en la Catedral. Al principio desecharon la subcavación como una opción para la Torre, pero



Puerta de bronce de la Catedral de Pisa, por Bonnano Pisano.

### EL ORIGEN DE UNA SOLUCIÓN

*En 1962 el ingeniero italiano Fernando Terracina sugirió practicar horadaciones para corregir la inclinación de la Torre de Pisa, con el objetivo de igualar la velocidad con la que los diferentes espacios de la construcción se iban asentando. Pero no vio culminado su objetivo, aunque años después su propuesta se desarrolló y se aplicó exitosamente en los mencionados edificios de la ciudad de México, e incluso se acuñó el tecnicismo de "subexcavación".*

las pruebas de campo los llevaron a evaluar su aplicación; para ello invitaron a las reuniones de ese Comité en 1995 y 1999 al arquitecto Sergio Zaldívar y al ingeniero Enrique Santoyo. En 1997, en el Ministerio de Cultura se aprobó el proyecto de subexcavación.

Desde 1999, la torre fue protegida y cerrada, y fue hasta 2002 que volvió a abrirse al público. Se logró enderezarla hasta 40 cm gracias a la técnica de subexcavación, que consistió en extraer toneladas de tierra que se encontraban por debajo del campanario en la parte opuesta a la inclinación, para que cediera en ese lado y conseguir igualar la velocidad con la que los diferentes espacios de la construcción se iban asentando. Con este trabajo se alcanzó la posición que tenía en 1838, y si mantiene su tendencia a inclinarse hacia el sur a la velocidad que lo hacía en 1999, pasarán 300 años antes de que se necesite una nueva intervención.



Cúpula de la Catedral Metropolitana.



Inyección de la mezcla de mortero en el lago de Texcoco.



### MEJORAMIENTO DEL SUBSUELO CON INYECCIÓN DE MORTERO

Después del proceso de subexcavación se realizó la inyección de mortero al subsuelo, que fue otra de las grandes aportaciones que se hicieron durante la intervención de la Catedral y del Sagrario. Tuvo como objetivo específico lograr que ambos templos se hundieran uniformemente, y así detener totalmente los hundimientos diferenciales o, al menos, conseguir que no fueran significativos, ya que de lo contrario la técnica de subexcavación resultaría ser solo un procedimiento correctivo al que se tendría que recurrir periódicamente. La inyección de mortero como procedimiento de prevención fue la técnica que evitó posibles hundimientos significativos futuros.

La decisión de inyectar mortero partió del proceso que se llevó a cabo en el Palacio de Bellas Artes, en el que desde 1906 se observaron severos problemas de hundimiento diferencial en el suelo sobre el que se colocaban las cimentaciones.

Con las primeras inyecciones de mortero al subsuelo del Palacio de Bellas Artes no se logró detectar ninguna evidencia para corroborar que la técnica funcionaba. Sin embargo, al pasar los años, los expertos lograron darse cuenta de que se había conseguido uniformar los hundimientos, como lo demuestra

el buen estado en el que se encuentran la fachada y los elementos estructurales de la construcción. Lo anterior permitió tener una prueba clara y contundente para replantear la hipótesis que más tarde se tomaría en cuenta para el caso de la Catedral.

Para corroborar la suposición de que la inyección podría solucionar los hundimientos diferenciales y probar la efectividad del mortero, se realizaron estudios teóricos y experimentales a mediados de 1997. Estos consistieron en inyectar esa mezcla en el lago de Texcoco, un sitio con un suelo cuyas características son parecidas a las del Centro Histórico. Con ello se comprobó que podría lograrse la reducción de la compresibilidad del subsuelo y, por ende, detener los hundimientos.

Las pruebas afinaron la técnica para saber exactamente la composición del material que se utilizaría en la Catedral; entonces, en 1997, se realizó la primera inyección. El sitio fue el lado oriente del atrio, y con ello la posibilidad de hacerlo en todo el edificio. ●

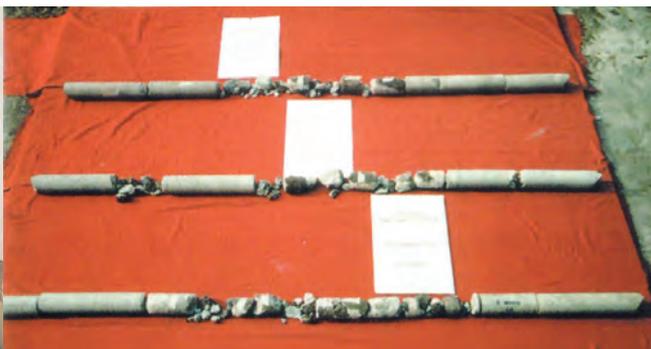
## CAPÍTULO 4

# LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL EN EL PROYECTO DE REHABILITACIÓN

La subexcavación comenzó en agosto de 1993 y terminó en junio de 1998. No solo corrigió parte de los hundimientos diferenciales de la Catedral, sino también produjo movimientos que favorecieron su estabilidad estructural y la del Sagrario. Los movimientos que fueron manipulados hicieron que hubiera una reducción en el desplome, tanto de las columnas de la nave central como de las torres de la fachada sur. Además, se logró corregir la nave central y

algunas torceduras, así como cerrar algunas grietas en el edificio.

Desde el punto de vista estructural se atendieron diversos frentes para el proceso de subexcavación; se definió la manera en la que debía moverse la base del conjunto religioso para mejorar sus condiciones de estabilidad; y se vigiló el desempeño de la estructura mediante sistemas de monitoreo y recorridos periódicos por toda la estructura para detectar



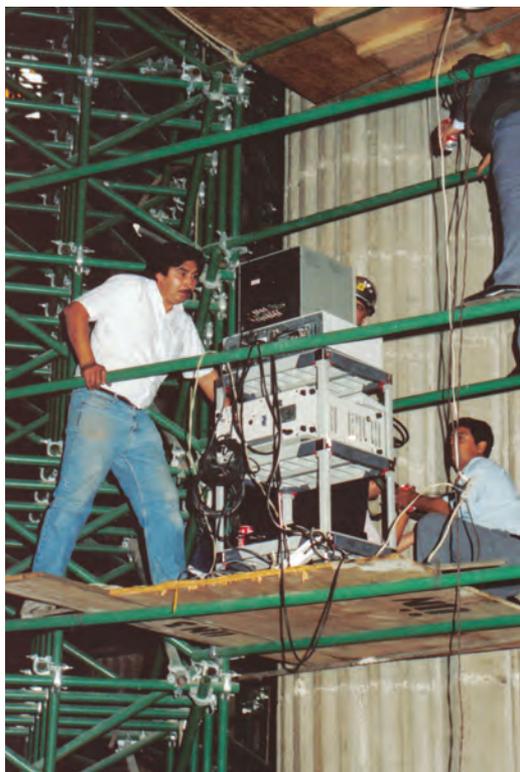
Toma de muestras de una columna de la Catedral para analizar el desgaste del material.

posibles síntomas de comportamiento inadecuado. Como apoyo al proyecto de rehabilitación, la Coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM tuvo importantes aportaciones para conocer a detalle la estructura de la Catedral.

### ESTUDIOS SOBRE LOS MATERIALES

Durante los trabajos de corrección también se llevó a cabo una serie de estudios sobre las propiedades de los materiales que forman la estructura principal. Se estudió la mampostería de los muros y las bóvedas, y se obtuvieron las muestras directamente de columnas y del pedraplén. En el caso de los muros, para no dañarlos se extrajeron muestras de materiales de otros edificios con una constitución similar; así pudieron realizarse ensayos y determinar tanto la resistencia como su deformación ante efectos de compresión. Los resultados dieron a conocer las propiedades mecánicas de la piedra con la que fueron construidas y labradas las columnas de la nave central y del Sagrario.

Lo anterior se llevó a cabo un año antes de comenzar con el proceso de subexcavación. En el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería se realizaron los análisis para determinar la calidad del material de las columnas; para ello se obtuvieron



Personal del Instituto de Ingeniería verificando las columnas de la Catedral.

muestras de los corazones o núcleos, de 5 cm de diámetro, de dos columnas de la Catedral y una del Sagrario, a tres alturas distintas.

Los resultados de las pruebas mostraron que los materiales usados en la base de las columnas eran de alta calidad y tenían gran resistencia, mientras que en la parte del remate las piedras eran más porosas y ligeras.

Se encontró que en el centro de las columnas se empleó mampostería considerada "pobre", por ser de un material más frágil que del resto de los usados para la construcción.

También se solicitó el apoyo de un equipo de médicos de la Facultad de Medicina para realizar un examen muy peculiar, que consistió en introducir un endoscopio a través de los agujeros realizados a lo largo de una de las columnas de la nave central para verificar las condiciones en las que se encontraba. Lo que se observó fue que el relleno de la columna era de buena calidad en su constitución pero de baja resistencia, por lo que tenían la cualidad de ser más ligeras, lo que indicaba una estrategia constructiva del siglo XVI. Al parecer ese era el criterio de las construcciones en los templos de la Nueva España, ya que se han encontrado datos similares en otros edificios de esa época.

### REHABILITACIÓN DE LAS COLUMNAS

*Se estudiaron a detalle diversos tipos de intervención para mejorar la seguridad de las columnas estaban en un estado más crítico, y la solución adoptada fue procurar una distribución más uniforme de esfuerzos en las juntas mediante la eliminación de cuñas y la colocación de una capa de mortero en toda la superficie de la junta.*

### REFUERZO DE LA CIMENTACIÓN

A su vez, el Comité Técnico Asesor del proyecto consideró necesaria una corrección (rigidización) de la cimentación actual y definió tres actividades básicas a realizar.

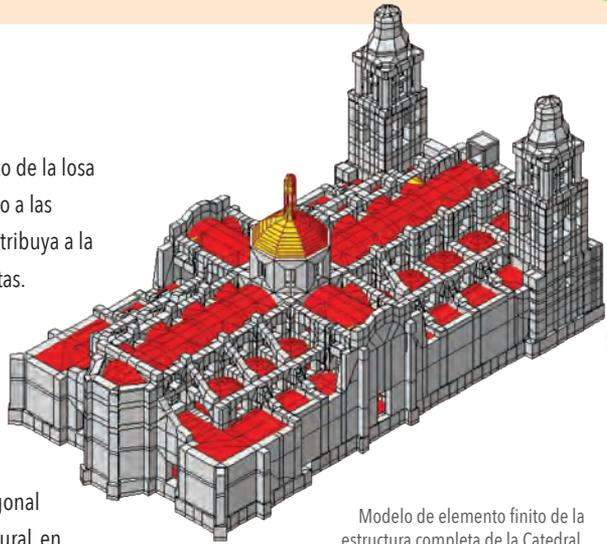
- a) Colocar anillos perimetrales en los cruces de las contratraves principales y en su parte superior, rodeando los dados de las columnas. El propósito principal es ligar el refuerzo de las contratraves y darle continuidad, además de proporcionar confinamiento a la base de las columnas.
- b) Colocar un refuerzo longitudinal adicional en el lecho superior de las contratraves, para aumentar la resistencia a flexión de éstas.

*En una construcción tan importante como la Catedral, las columnas juegan un papel determinante para el soporte de toda la estructura. Dentro de las características más sobresalientes podemos mencionar los fustes hechos de una mampostería ligera en la parte superior.*



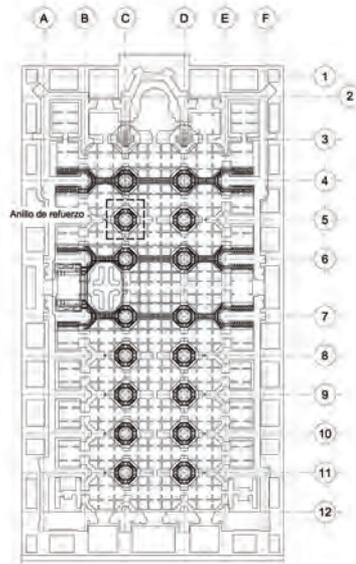
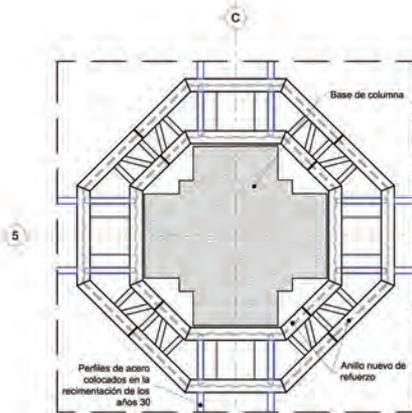
c) Dar continuidad al refuerzo de la losa de la feligresía y conectarlo a las contratraves para que contribuya a la resistencia a flexión de estas.

En resumen, se previno la colocación, alrededor de cada columna principal y arriba de las contratraves, de un anillo octagonal de perfiles de acero estructural en forma de armadura, así como de refuerzos del mismo tipo sobre las contratraves transversales y longitudinales, para conseguir la adecuada conexión entre el refuerzo nuevo y el existente.



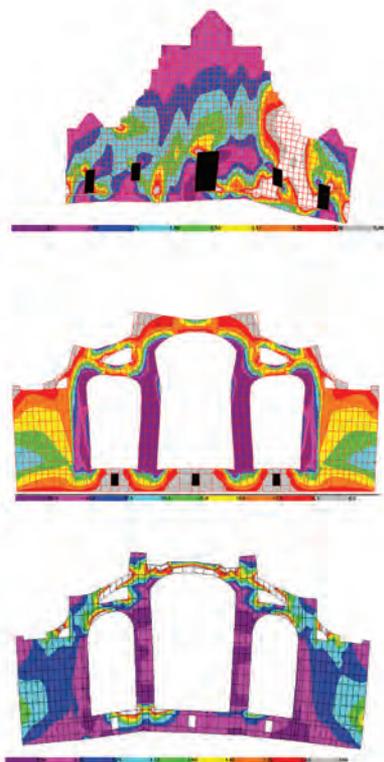
Modelo de elemento finito de la estructura completa de la Catedral.

El proyecto detallado de refuerzo fue realizado por HP Ingenieros.



### RESPUESTA ESTRUCTURAL

*Una actividad esencial para la rehabilitación de la Catedral fue el seguimiento detallado de sus respuestas y comportamientos durante la fase de subexcavación, con mediciones de nivelación de la cubierta y el interior de las bóvedas, la cubierta de fachadas y torres, arcos y columnas, la variación de desplomes e inclinación de fustes de columnas, y las aberturas de grietas principales.*



Modelos bidimensionales de elemento finito para estudiar el efecto de los hundimientos diferenciales en la estructura de la Catedral. Las franjas identifican zonas con diferentes niveles de esfuerzos en el material.

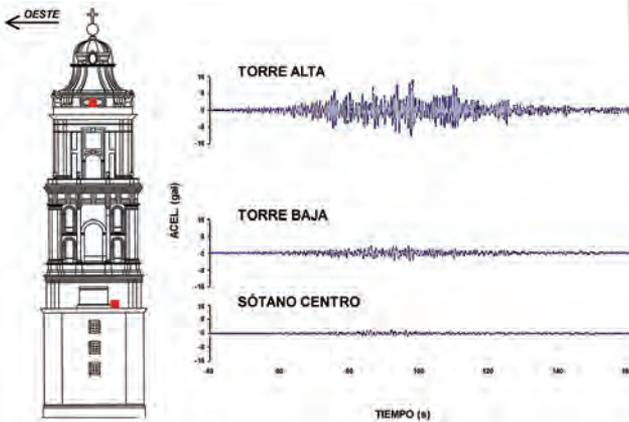
### MODELOS ANALÍTICOS

Por medio de modelos matemáticos se realizaron algunas estimaciones y predicciones del comportamiento de la Catedral. Se analizó un modelo de elementos finitos, que permite visualizar la distribución de esfuerzos bajo diferentes condiciones de carga y de hundimientos diferenciales, y se concluyó que la atención debía centrarse en las columnas, por ser las que sustentan toda la estructura.

### MONITOREO

Aunque podían obtenerse estimaciones de los efectos inducidos, no se sabía muy bien cuál sería la precisión de los procedimientos de cálculo ni la efectividad de las correcciones que se estaban realizando. Por ello, se decidió aplicar a todo el procedimiento de corrección el método observacional, que consistió en comprobar la efectividad de las acciones que se hacían mediante la medición continua y detallada del comportamiento de toda la estructura, y así realizar ajustes y medidas de intervención de acuerdo con la respuesta obtenida. Con la aplicación de este método se pretendía eliminar cualquier respuesta no controlada que pudiera influir en la rehabilitación de la Catedral.

El sistema de monitoreo continuo registra algunos índices particularmente importantes de la respuesta estructural, como el desplomo



### MONITOREO

*Es un sistema de medición que permite la recolección y la captura de información que se utiliza para analizar e interpretar datos, con el fin de tomar decisiones para el conocimiento de fenómenos.*

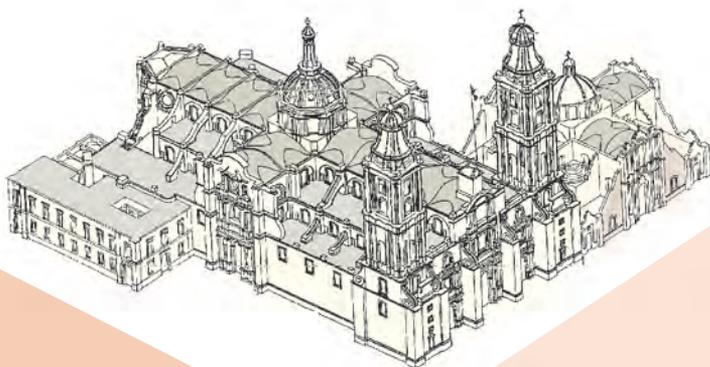
Historia de aceleraciones registradas en un evento sísmico.

de las columnas, la apertura o cierre de los claros de la nave central y los movimientos de la estructura derivados de cambios de la temperatura y la radiación solar. Detecta los cambios de la inclinación de las columnas y los muros con plomadas, utilizando un marco metálico de referencia o un inclinómetro manual.

Otro tipo de mediciones son las de convergencia, para dar seguimiento a los cambios de distancia entre columnas a distintas alturas, utilizando una cinta de acero y un distanciómetro electrónico. La aparición de grietas y la evolución de su longitud y abertura se detectaron con inspecciones semanales.

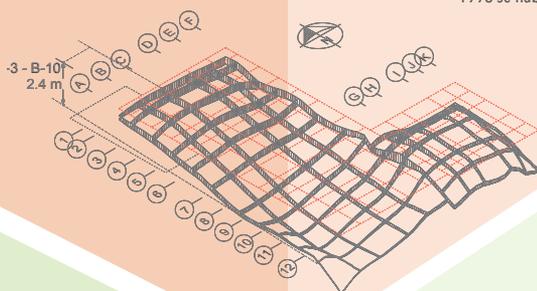
El monitoreo automático se llevó a cabo al pensar en las ventajas que se tendría al disponer

de un sistema de medición, para proporcionar de forma continua y sistematizada la información necesaria para detectar señales de alarma en la respuesta estructural. Por ello, a partir de 1994 se pudo contar con un sistema diseñado, construido e instalado en Italia, en colaboración con el Instituto de Ingeniería, el cual se hizo cargo de su operación y mantenimiento. Este sistema es similar a los que se han instalado en algunos templos de gran importancia en Italia y otros países. Consta de 19 sensores, cuatro telecoordinómetros para medir el cambio de inclinación de las columnas del crucero, diez extensómetros de hilo que miden la variación de la longitud de los claros de los arcos, un radiómetro para medir la radiación solar y cuatro medidores de temperatura exterior e interior.



## CORRECCIÓN EN AGOSTO DE 2000

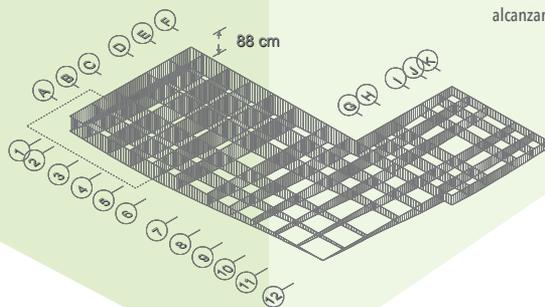
a) Red isométrica de hundimientos diferenciales y correcciones inducidas



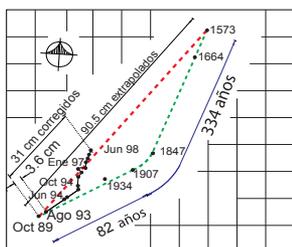
La malla en la figura representa los hundimientos corregidos. El punto B-11, C-3, muestra el hundimiento diferencial a través del tiempo. En 1989 era de 242 cm. y hacia 1998 se había logrado corregir a 174 cm.

## GEOMETRÍA DE HUNDIMIENTOS CORREGIDOS

b) Red isométrica de correcciones referidas a un plano horizontal



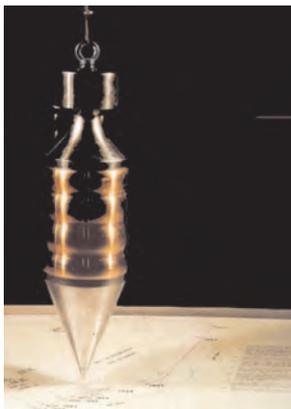
La figura de la parte inferior representa la misma malla pero un plano horizontal. Se pueden observar la forma y distribución de los hundimientos correctivos que alcanzaron un máximo de 88 cm.



Reconstrucción ilustrativa de la trayectoria del desplome de la cúpula central, que fue de 31 cm.



Caseta de la plomada digital (instrumento que verifica los cambios de la verticalidad de torres y columnas) localizada en el interior de la Catedral.



#### PLOMADA

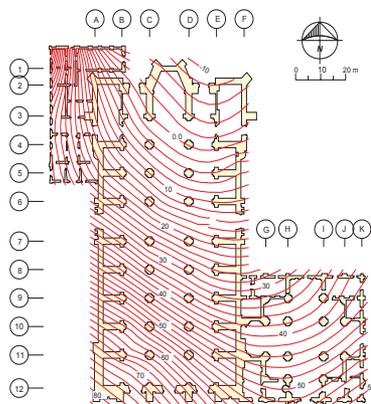
*Al ver que eran casi imperceptibles las correcciones que se habían logrado después de los trabajos de la corrección geométrica se necesitó instalar una plomada que fue colocada desde la cúpula de la nave central, y que tenía como objetivo señalar la trayectoria de los movimientos correctivos inducidos que se iban logrando.*



Extensómetro de hilo.

### UN DATO CURIOSO

Durante los trabajos de subexcavación y de corrección geométrica se colocó una malla de cuadrícula de acero a la altura de las ventanas, con el fin de prevenir caídas de trabajadores y de los materiales de la estructura hacia la parte en la que se encontraban los feligreses. De forma permanente los especialistas, que se encontraban casi pegados al techo, tenían que cruzar un tramo de la nave principal sobre un par de cables para seguir con los trabajos de monitoreo.



Esquema de metas de corrección que debían alcanzarse con la subexcavación (propuesta del IUNAM).

### LA ESTRUCTURA DE LA CATEDRAL

Ha soportado los fuertes sismos que han ocurrido desde su construcción. Una prueba de ello son los evidentes agrietamientos en la cubierta, ocurridos en los sismos de 1985. El equipo de ingenieros afirma que los efectos sísmicos no constituyen una amenaza grave para la estructura, a menos que esta se encontrara en condiciones cercanas al colapso, por el efecto de la acción de su peso y de los hundimientos diferenciales.

Los instrumentos están conectados a una central de recolección automática de datos que se encuentra en la parte poniente de la Catedral. Fue por eso que, durante los trabajos de subexcavación, la Catedral y el Sagrario se convirtieron en unos de los edificios más monitoreados del mundo.

### SOLUCIONES ESTRUCTURALES PARA PARTES ESPECÍFICAS DEL CONJUNTO RELIGIOSO

Desde el inicio del proceso de subexcavación y hasta la fecha, también se ha venido dando solución a diversos problemas de carácter estructural que afectan a la estabilidad, no solo del conjunto religioso, sino también de sus elementos ornamentales y de los bienes muebles que resguarda su interior. Entre las principales acciones de este tipo destaca el desarrollo del proyecto para el refuerzo de las portadas laterales de la Catedral. Estas portadas están forjadas sobre muros de más de 25 m de altura que se habían separado del cuerpo principal del templo. El proyecto consistió en implementar una solución que lograra afianzar dichas portadas a los muros del crucero.

Como efecto secundario de este proceso la capilla de las Ánimas, ubicada en la esquina norponiente del mismo predio que ocupa la Catedral, giró de manera excesiva hacia el

sur, motivo por el cual el IIUNAM se encargó de desarrollar el procedimiento para revertir dicho giro.

En la última parte de la subexcavación se estudió el comportamiento dinámico del inmueble mediante una red de acelerómetros que se instalaron en la Catedral, lo que enriqueció el conocimiento sobre el desempeño que este tipo de construcciones tiene ante los sismos. Esta red ha estado en operación desde 1997 a la fecha.

También se implementaron soluciones innovadoras para la consolidación de la estructura, pero especialmente para la rehabilitación de la cúpula y de los campanarios, dada la complejidad de la estructura, su altura y, sobre todo, el avanzado estado de degradación que presentaban varios elementos que soportan sus pesados ornamentos, así como las esferas y la campana principal.

Un reto especial resultó la consolidación de las columnas y el desarrollo del procedimiento de la intervención para reemplazar varios sillares de piedra con los que se encuentran construidas las columnas, que se encontraban severamente fracturados afectando a la integridad del inmueble.

Muchos de los tesoros artísticos que la Catedral posee debieron salvaguardarse durante

los trabajos de intervención. Un ejemplo de lo anterior es el caso de uno de los órganos de la Catedral, de 14 m de alto, que fue instalado en 1735 y se encuentra a más de 6 m de

altura sobre el nivel del piso. En el año 2010 volvió a ser restaurado, y fue la segunda intervención a lo largo de su historia; la primera se realizó después de los graves daños que sufrió cuando se incendió en 1967.

Otra obra a la que el IUNAM también le prestó atención especial fue el retablo de los Reyes.

En los años posteriores al 2000 se siguieron realizando obras de rehabilitación con los correspondientes estudios y proyectos estructurales. Entre las acciones que incluyeron aspectos estructurales están:

- El levantamiento detallado de la estructura de madera que soporta el retablo del Altar de los Reyes, el más grande construido en América durante la época virreinal, y el diseño de los refuerzos para la concha, los cuales aprovechan



Parte posterior del órgano del Evangelio, también llamado "el mexicano", de la Catedral Metropolitana.

#### LOS ÓRGANOS DE LA CATEDRAL

*El primer órgano llegó de España en 1693 enviado por Felipe IV. Cuarenta años más tarde se instaló el segundo, considerado uno de los más grandes del mundo, fabricado por el mexicano José Nazarre, y tocado por primera vez en 1736. Este órgano es conocido como del Evangelio. Actualmente es posible disfrutar su sonido original y admirar el esplendor que tuvo durante la Colonia.*

la estructura del ábside y los refuerzos metálicos que habían sido colocados en intervenciones anteriores. El retablo está totalmente construido en madera, y fue necesario estudiar su funcionamiento estructural y definir las acciones de refuerzo necesarias para su preservación.

- Reponer las piezas dañadas del órgano del Evangelio y agregar nuevos elementos resistentes de madera.
- Después de terminadas las obras de rehabilitación en la cimentación y el subsuelo, se realizó una revisión de los pilotes de control instalados en el conjunto religioso. Se detectaron pilotes de control que no habían llegado a apoyarse en los estratos resistentes del subsuelo y que solo estaban colgados de la estructura, por lo que no aportaban ningún beneficio. Tomando como base el patrón de hundimientos actual del los edificios, se desconectaron aquellos pilotes que se encuentran en zonas donde el descenso de la estructura era ya muy lento, y solo se dejaron en operación aquellos que se ubican en donde se registran las mayores velocidades de hundimiento.
- Para la rehabilitación de los campanarios de las torres que flanquean la fachada principal de la Catedral, en el IIUNAM se estudiaron las propiedades mecánicas de sus materiales constitutivos, así como su



Retablo del Altar de los Reyes.

estado de conservación. La intervención se dividió en tres partes: rehabilitación de la esfera junto con su base, tratamiento del diafragma y rehabilitación del casquete de la bóveda. ◉

## CAPÍTULO 5

---

# CONSIDERACIONES FINALES

El objetivo principal del proyecto de rescate de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México no era mejorar este patrimonio, sino intervenirlo urgentemente debido a su estado, para evitar un desastre en un tiempo corto. Este problema era técnico y no tenía comparación dentro de lo que se ha descrito en la ingeniería y la restauración, ya que era un problema único del suelo de la ciudad, sin nada parecido en otros lugares. Tuvo que desarrollarse una metodología que implicó el diseño de máquinas e instalaciones, y la verificación experimental de las acciones, paralelas a la aplicación de medidas preventivas porque el problema ya estaba presente.

El éxito de este gran proyecto es que fue ejecutado por un equipo multidisciplinario que siempre tuvo el control científico-técnico de los resultados que se consiguieron por medio del método observacional y los monitoreos desarrollados por los miembros del grupo. En cuanto al éxito de las medidas adoptadas, se han logrado mejoras significativas en la geometría del monumento y en su seguridad estructural. Y en cuanto a los hundimientos de la cimentación, ahora se conocen mejor los patrones de este tipo de estructuras únicas en el mundo.

Esta figura representa toda la estructura de la Catedral. Si la comparamos con la torre de Pisa, esta solo correspondería en tamaño a una de las torres.



La Catedral se convirtió en un laboratorio viviente para aprender. Se estudió la respuesta de las estructuras cuando se les aplicaba una técnica de corrección, al mismo tiempo que se realizaban las evaluaciones con instrumentos de precisión, como las plomadas digitales. Cada respuesta permitió determinar cómo eran los cambios y las respuestas de las estructuras en el tiempo.

Los trabajos que se hicieron desde la ingeniería estructural permitieron estudiar las características de los materiales y elementos estructurales, así como localizar y medir la cantidad de daño acumulado en la estructura de la Catedral, con el objetivo de evaluar la condición del edificio. Luego, ya con el diagnóstico preciso, se aplicaron las técnicas apropiadas y se trató de mantenerla en las mejores condiciones al menor costo posible. Gracias a esto se

hicieron grandes innovaciones en los métodos y las técnicas de evaluación, supervisión, desarrollo y monitoreo. La intención fue poner en práctica toda la teoría y los conocimientos que se estaban generando en el Instituto de Ingeniería, en otras dependencias universitarias y en empresas vinculadas con el proyecto.

El programa de rehabilitación de la Catedral ha sido innovador en muchos aspectos, por el aporte de conocimientos de ingeniería civil para nuestro país y para el mundo entero.

## EL PRESENTE Y EL FUTURO

Ya avanzado el trabajo de corrección de la estructura de la Catedral surgió una nueva línea de investigación dentro de la ingeniería mexicana, cobijada por la experiencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM: el rescate, la conservación, la preservación y la rehabilitación de monumentos, edificios y sitios históricos observados e intervenidos desde las ingenierías estructural y geotécnica.

De manera particular, se busca desarrollar y aplicar tecnologías novedosas para resolver problemas estructurales y geotécnicos relacionados con los bienes inmuebles patrimoniales, teniendo como referencia la teoría de la conservación según ha sido aceptada por las instancias y los organismos nacionales e internacionales.

### EL IIUNAM

*Ofreció una visión de conjunto de los problemas estructurales del templo, de los estudios realizados y de las condiciones actuales de seguridad, así como de las acciones de refuerzo ejecutadas. En un principio dichos estudios se orientaron hacia la determinación de la seguridad estructural del monumento y a garantizar que esta no se viera afectada durante el proceso de intervención del subsuelo. Además, se realizó el proyecto de diversas acciones de refuerzo y reparación de los elementos que constituyen la estructura resistente del edificio.*

Desde el punto de vista de la ingeniería, el marco teórico de referencia específico es la geotecnia, en particular la mecánica de suelos y la ingeniería de cimentaciones. La importancia radica en que durante todo este tiempo de trabajo han surgido técnicas de ingeniería sumamente desarrolladas, que permitieron corregir el comportamiento de los edificios y la cimentación.

Actualmente se han reducido las velocidades con las que avanzaban los hundimientos diferenciales de los monumentos aquí presentados, pero definitivamente se espera que las nuevas generaciones de ingenieros en estructuras y en geotecnia y en materiales, así como profesionales de otras disciplinas, sigan en la búsqueda de nuevas técnicas y conocimientos para detener completamente el proceso de los hundimientos. Más importante aún es buscar alguna alternativa o solución definitiva ante los problemas que ocasiona la extracción de agua de los mantos acuíferos, y que siguen afectando al patrimonio cultural

de nuestros monumentos y edificios de importancia histórica.

En lo relativo a los aspectos estructurales, se ha logrado una mejora significativa de la seguridad, tanto por la corrección de la geometría como por las distintas medidas de reparación y refuerzo que se han realizado. Por otra parte, los numerosos estudios experimentales y analíticos han permitido tener una apreciación más clara de las condiciones de seguridad y de los aspectos que son más críticos para la estructura, en particular los que atañen la seguridad de las columnas. La red de instrumentos sísmicos ha contribuido a comprender las características básicas de la respuesta del edificio en su conjunto y de sus partes específicas. Se han determinado las razones por las que los efectos sísmicos son relativamente moderados para este caso y que, a menos que lleguen a aumentar significativamente los daños y los desplomos de la estructura, no son de esperarse problemas graves por estos fenómenos en el futuro.

#### ¿QUÉ SIGUE?

*Los trabajos de mantenimiento para la Catedral y Sagrario continúan; estos consisten en el monitoreo diario de algunos de sus elementos que son claves en su estabilidad. Si surgiera algún problema, advertirían de un cambio drástico en el comportamiento de algunas estructuras.*

*Es necesario continuar haciendo un seguimiento estrecho del comportamiento del edificio, basado en un monitoreo continuo de los hundimientos y del comportamiento de la estructura. Un cuidadoso programa de la edificación, y en particular de su estructura, es un requisito esencial para evitar que se vuelva a llegar a situaciones críticas de riesgo.*



Hoy en día los ingenieros expertos del Instituto de Ingeniería se encuentran iniciando muchos otros proyectos de gran importancia que, como el de la Catedral, tienen como principal objetivo continuar con la búsqueda de conocimientos y preservar edificios históricos

no solo de nuestro país. Diariamente se desarrollan nuevas técnicas alternativas para mejorar el subsuelo de monumentos de interés artístico e histórico, y para reglamentarlos. Destacan las intervenciones en la Casa de los Azulejos, el Palacio de la Antigua Escuela de Medicina, el Monumento a la Revolución, el Monumento a Cuauhtémoc y la iglesia de la Conchita, en la ciudad de México, y en el templo de San Agustín, en Zacatecas; y el rescate de los murales de Siqueiros, en Chile.



Libro de oraciones, uno de los objetos encontrados en la "caja del tiempo".

Es así como termina el relato de esta experiencia que permitió conservar uno de los edificios más bellos y al mismo tiempo más complejos de nuestra ciudad, y que celebra más de 200 años del término de su construcción: la Catedral Metropolitana. ◉

## AGRADECIMIENTOS

---

De manera muy especial reconocemos la asesoría científica de los expertos en el tema, los cuales forman parte de la Subdirección de Estructuras y Geotecnia del Instituto de Ingeniería.

Al ingeniero Roberto Sánchez Ramírez, al doctor Roberto Meli Piralla y al doctor Efraín Ovando Shelley por su asesoría y apoyo en la precisión de conceptos, así como por el préstamo de varias de las imágenes que aquí aparecen. Sin su colaboración no se habría podido culminar este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- **Meli, R. y R. Sánchez (2001).** La rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México, *Revista Digital Universitaria*, 2 (2). Consultado en mayo de 2008 en <http://www.revista.unam.mx/vol.2/num2/proyec1/index.html>.
- **Santoyo, E. y E. Ovando (2008).** "Catedral y Sagrario de la Ciudad de México. Corrección Geométrica y Endurecimiento del Subsuelo 1989-2002", TGC Geotecnia, TGC Ingeniería, CONACULTA, México.
- **Santoyo, E. y E. Ovando et al. (2005).** "Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México", TGC Geotecnia, TGC Ingeniería, México.
- **Tamez, E., E. Santoyo et al. (1995).** *Catedral Metropolitana: corrección geométrica*, Espejo de Obsidiana Ediciones, México.
- **Toussaint, M. (1992).** *La catedral de México y el sagrario metropolitano. Su historia, su tesoro, su arte*, Editorial Porrúa, México.
- **Zaldívar, S. (1994).** Catedral Metropolitana de la ciudad de México. México en el tiempo, INAH, pp. 43-53.

## RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS E IMÁGENES

---

### ARCHIVO IUNAM

Pp. 9, 10, 11, 12, 13, 14 (baúl), 19, 21, 22, 23, 24, 25 (extemplo), 26, 27, 28-29, 30, 31, 33, 37, 38, 41, 43, 48, 53 (caseta), 56, 57, 58 y 61 (libro).

### ROBERTO SÁNCHEZ Y ROBERTO MELI

Pp. 17, 18, 32, 35, 46, 47, 49, 50, 51 y 54 (extensómetro).

### CORTESÍA DE TGC GEOTECNIA

Pp. 44, 52, 53 (reconstrucción y plomadas) y 54 (esquema).

### TRAZA DE LA CATEDRAL

Pp. 25 (Ángel de la Independencia).

### MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA

P. 20.

### AGENCIA CUARTOSCURO

Pp. 6, 14, 15, 39 y 61 (remate).

### DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN DE FLORIDA

P. 42.

### STOCK XCHNG

P. 40.

Esta obra se terminó de imprimir en  
el mes de noviembre de 2013, bajo la  
supervisión de Tiempo Extra Impresores  
Club Pachuca no. 22, Col. Villa Lázaro Cárdenas,  
CP 14370, México DF.

La edición, impresa en papel Bond  
de 114 gramos, consta de 500 ejemplares.