

## ESTUDIOS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL PARA LA PROTECCIÓN Y MONITOREO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS CERCANOS A LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL PARA LA LÍNEA 3 DEL TREN LIGERO DE GUADALAJARA

ABRAHAM R. SÁNCHEZ RAMÍREZ,  
MIGUEL RODRÍGUEZ Y ROBERTO MELI

La excavación de túneles de gran diámetro es una opción que se vuelve cada vez más común para resolver problemas de tráfico y de drenaje urbanos. Al extraer grandes volúmenes de suelo se producen reacomodos que dan lugar a asentamientos del terreno, los que pueden afectar las redes subterráneas de servicios, así como de los edificios aledaños. Los efectos pueden ser particularmente severos en los edificios históricos, que son típicamente de mampostería de piedras naturales, por tanto, están demasiado expuestos a agrietamientos y desplomes que los hacen más vulnerables a los eventos sísmicos. Por ello, los proyectos de construcción de túneles urbanos deben incluir medidas para reducir al mínimo las alteraciones del subsuelo en la vecindad de esos edificios. En Guadalajara se ha estado desarrollando un sistema de transporte urbano denominado Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara, del cual actualmente está en construcción la línea 3, la que une los municipios de Zapopan, Guadalajara y Tlaquepaque e incluye un tramo subterráneo de casi 5 km de longitud que implica la excavación de un túnel de 10.6 m de diámetro, con cinco estaciones subterráneas con profundidad media de 25 m. El túnel se ha excavado con una máquina tuneladora de escudo que mide alrededor 110 metros de largo y pesa 2300 t. El equipo excava, remueve el escombros y coloca el revestimiento de túnel constituido de dovelas prefabricadas de concreto.

La parte más crítica del tramo subterráneo es aquella en la que la clave del túnel, atraviesa el centro histórico de la ciudad, siguiendo el trazo de la calle de Alcalde, a pocos metros de las fachadas de los tres principales templos de la ciudad: el de San José de Gracia, el de San Francisco y la Iglesia Catedral. En total, en las cuadras que costean esa calle, el Instituto Nacional de Arqueología e Historia (INAH) identificó 20 edificios

antiguos y el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA), 30 de valor patrimonial. Ambas autoridades, exigieron a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que contara con el apoyo del Instituto de Ingeniería para el diagnóstico de la integridad de los edificios históricos que podrían verse afectados por la excavación del túnel y para definir las acciones preventivas y correctivas que redujeran la vulnerabilidad de los edificios históricos, particularmente de los tres templos principales ante los asentamientos que pudieran producirse en el suelo. Para ello, se realizaron los estudios de ingeniería estructural que se describen en este artículo de manera coordinada con los estudios de carácter geotécnico que se resumen en el trabajo de Ovando y Botero, 2016.

Se realizaron levantamientos topográficos, así como mediciones de desplomes de los elementos de soporte y del estado de agrietamiento y de daños de todos los elementos estructurales. Se concluyó que los tres templos habían sufrido, en distintas épocas, daños debidos a los asentamientos del subsuelo y a los sismos. En los tres había evidencias de reparaciones previas de los daños y de reposición de algunos elementos dañados, pero sin que se hubiese logrado una reducción significativa de la vulnerabilidad sísmica.

En la Catedral, los asentamientos diferenciales estaban inclinados hacia afuera por el coceo ejercido por los arcos y bóvedas de la cubierta, lo que produjo un incremento del claro de la cubierta, con los consiguientes agrietamientos en la clave de los arcos. Además, los campanarios de ambas torres mostraban fuertes agrietamientos, por ello, se consideró necesario que se consolidara la mampostería de sus torres y que se les colocaran zunchos horizontales de acero. En el templo de San José de Gracia, las columnas centrales del nártex presentaban grietas verticales en sus sillares, al igual que las columnas del tambor de la cúpula. Se requirió la consolidación de la mampostería de sillares, lo mismo para las columnas del tambor; además, de la colocación de un anillo de confinamiento en su base de la cúpula. En el templo de San Francisco, los daños más importantes son consecuencia de los asentamientos diferenciales y de los desplomes de los muros. Entre las medidas preventivas que se recomendaron, destacan la consolidación de la mampostería de los muros y de las columnas de las torres con su confinamiento mediante zunchos de placa de acero.

El proyecto ejecutivo de las intervenciones de reforzamiento de los tres templos, así como la supervisión de las mismas, fueron realizados por el Instituto de Ingeniería; paralelamente, la compañía constructora del túnel llevó a cabo

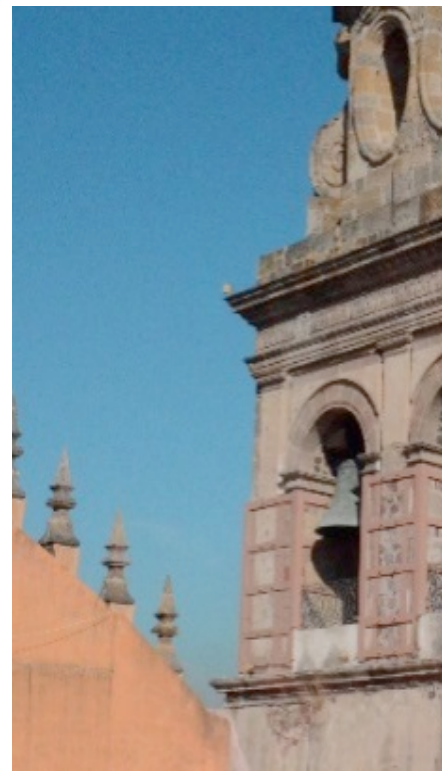


Figura 1. Iglesia Catedral Reforzamiento con zunchos de acero de columnas del Templo de San Francisco

una serie de acciones preventivas para limitar los efectos de la excavación del túnel sobre los tres templos y sobre otros edificios catalogados, limítrofes.

Para dar seguimiento al comportamiento estructural de los edificios durante las obras de protección y las de excavación del túnel, se instaló y operó un sistema de monitoreo a base de una red integrada por un conjunto de sensores de alta precisión, así como por un equipo automático de topografía, con los que se registran los movimientos verticales y horizontales de más de un centenar de puntos de referencia instalados sobre cada estructura. Las vibraciones producidas durante las demoliciones de los pavimentos, y para hincado de columnas y muros de protección originaron agrietamientos en algunas construcciones aledañas de muros de adobe o de mampostería de piedras naturales. En todos los casos las construcciones afectadas mostraban huellas de daños previos debidos a asentamientos del terreno y que habían sido reparados. En los tres templos que se habían reforzado, los efectos de las obras preliminares y del paso de la tuneladora se limitaron

a la reapertura de algunas fisuras y los asentamientos diferenciales. El monitoreo de los asentamientos y desplomes dio las bases para definir algunas precauciones adicionales durante la excavación del tramo aledaño a los templos.

En el templo de San Francisco, cuando la tuneladora abandonaba el sitio, comenzaron a fluir grandes cantidades de agua subterránea por debajo de la esquina noreste del templo, lo que impidió durante casi tres meses el avance de la excavación. Para resolver estos problemas, se llevaron a cabo inyecciones de lodos de cemento, y se construyeron barreras de pilotes y muros de Milán. Al alejarse la tuneladora los asentamientos se detuvieron.

Dada la situación de vulnerabilidad de los tres templos ante sismos intensos, se realizaron mediciones de la vibración ambiental en diversos sitios cercanos a cada templo para obtener las propiedades dinámicas de los estratos del subsuelo en las inmediaciones de cada templo y así determinar las características de los movimientos del terreno durante sismos y las posibles modificaciones que pueden tener debido a la interacción



Figura 2. Escudo de la tuneladora. Instrumentación automatizada utilizada para el monitoreo del desempeño de la Catedral durante la obra

con las tres estructuras. Además, se hicieron mediciones de vibración ambiental en distintos puntos de la azotea de los templos, para obtener las frecuencias naturales de vibración de la estructura y averiguar si el agrietamiento que presentan los muros y las bóvedas, llega a alterar la transmisión de las ondas entre las distintas partes de la estructura. Los estudios muestran que las estructuras no han tenido modificaciones por las obras del túnel, que pudiesen incrementar la amplitud de las vibraciones inducidas por los sismos.

Se considera que los trabajos de reparación y rehabilitación ayudaron a limitar los efectos de los asentamientos producidos por los trabajos de tratamiento del suelo y la posterior excavación del túnel. Sin embargo, en cada uno de los tres templos se requiere una rehabilitación integral para que alcancen los niveles de seguridad sísmica requeridos para este tipo de edificación. Es esencial continuar el monitoreo por lo menos un año más para evaluar el efecto del tráfico de los trenes sobre los tres templos y sobre el resto de las construcciones históricas de la zona.

