

# Evaluación de la interacción dinámica suelo-túnel-estructura de la Línea 3 del Tren Eléctrico urbano y la Catedral de Guadalajara, Jalisco, México

Luis OSORIO<sup>a,1</sup>, Miguel Ángel DÍAZ<sup>a</sup>, Efraín OVANDO<sup>a</sup> y Eduardo BOTERO<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México*

**Resumen.** En este artículo se presentan los resultados de los análisis de interacción dinámica suelo-túnel-estructura realizados para evaluar el comportamiento de la Catedral de Guadalajara. Para cumplir con este propósito se determinó la respuesta antes y después de la construcción de las estructuras del túnel de la nueva Línea 3 del Tren Eléctrico Urbano. Los análisis se efectuaron con modelos tridimensionales de diferencias finitas implementados en el programa FLAC3D. Los resultados mostraron que la influencia del túnel en la respuesta de la Catedral no compromete la integridad de la estructura ante un escenario sísmico de gran magnitud, como el que se puede esperar para un periodo de retorno de 500 años.

**Palabras Clave.** Interacción suelo-estructura, Respuesta de sitio, Análisis numérico dinámico, FLAC3D.

## 1. Introducción

El túnel de la nueva Línea 3 del Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara pasa por debajo de varios edificios de gran valor histórico, entre ellos el más significativo es la Catedral de Guadalajara. La ciudad de Guadalajara se encuentra en una zona de alta sismicidad, por lo tanto, evaluar el comportamiento de la Catedral en presencia del túnel para determinar cambios en su respuesta dinámica bajo escenarios sísmicos severos, permitirá establecer si estos comprometen la integridad de la estructura.

En este trabajo se presentan los resultados de los análisis de interacción dinámica suelo-túnel-estructura, realizados a partir de modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas en FLAC3D, con los cuales se evaluó el cambio en el comportamiento de la estructura de la Catedral de Guadalajara en términos de sus ordenadas de aceleración espectral.

---

<sup>1</sup> Luis Osorio Flores, Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México; E-mail: LOsorioF@iingen.unam.mx

## 2. Sitio de estudio

El sitio de estudio que se analizó es el que corresponde al tramo de avance del túnel de la Línea 3 entre los cadenamientos 11+100 y 11+300 km. En este interactúan la Catedral de Guadalajara, el túnel de la Línea 3 que corre de norte a sur y el túnel vehicular Miguel Hidalgo que corre de este-oeste. Estos dos túneles hacen cruce en colindancia con la torre norte de la catedral. Adicionalmente a estas estructuras, también se incluyeron los tableros de muro diafragma instalados a lo largo de la fachada principal, implementados como medidas de protección para la Catedral para mitigar los efectos del paso del nuevo túnel.

### 2.1. Catedral de Guadalajara

La Catedral de Guadalajara es una estructura cuya construcción data de 1568 y que se concluyó en 1875. La fachada principal mide 79.0 m, en tanto que su fachada posterior mide 77.0 m, la altura libre de la cubierta principal es de 19 m. En la fachada norte se encuentran dos torres de base cuadrada de 12 x 12 metros, y cuentan con una altura aproximada de 65.5 m. La presión de contacto a nivel de la cimentación ha sido estimada en 50 ton/m<sup>2</sup> bajo las torres, y de 20 ton/m<sup>2</sup> para el resto de la estructura [1].

### 2.2. Túnel vehicular Miguel Hidalgo

Bajo la avenida Miguel Hidalgo y Costilla corre un túnel vehicular de 600 m de largo, este túnel colinda con la fachada posterior norte de la Catedral. El túnel es de sección transversal cuadrada de 10.7 m de ancho a ejes de muros laterales, y 4.5 m de altura libre. Los muros laterales se construyeron con pilas circulares de 0.8 m de diámetro y 9.15 m de longitud. Las losas de rodamiento y de cubierta son de concreto reforzado de 0.5 m de espesor. El punto más cercano entre la Catedral de Guadalajara y el túnel guarda una separación de 4 m.

### 2.3. Túnel de la Línea 3

El nuevo túnel para la Línea 3 tiene una geometría circular con un diámetro de 11.2 m. El centro del eje de avance de excavación se localiza a 23 m de profundidad, quedando la clave del túnel a 17.4 m con relación al nivel de rodamiento de la avenida Fray Antonio Alcalde. El sistema de sostenimiento del túnel se conforma por una secuencia de anillos de dovelas prefabricadas de 0.4 m de espesor. La separación horizontal que existe entre el hastial y la fachada principal de la Catedral es de 11 m.

### 2.4. Estructuras de protección

Para el control de asentamientos de la Catedral derivado del proceso de construcción del túnel de la Línea 3, fue construida una barrera física entre el túnel y la Catedral. Esta barrera consistió en la construcción de tableros de muro Milán a lo largo de toda la fachada principal de la catedral. Estos tableros tienen un ancho de 2.7 m y espesor de 1 m, y existe una separación entre tableros de 0.4 m. Los tableros tienen una longitud de 44 m y están desplantados a la profundidad del macizo rocoso.

### 3. Modelo numérico

Los análisis para evaluar la interacción dinámica suelo-túnel-estructura se llevaron a cabo con un modelo numérico tridimensional de diferencias finitas implementado en el programa FLAC3D [2]. En la Figura 1 se muestra el modelo empleado. Este modelo representa un área cuadrada de 146 x 146 m y 44 m de profundidad, siendo este último el espesor del depósito de suelo hasta el macizo rocoso.

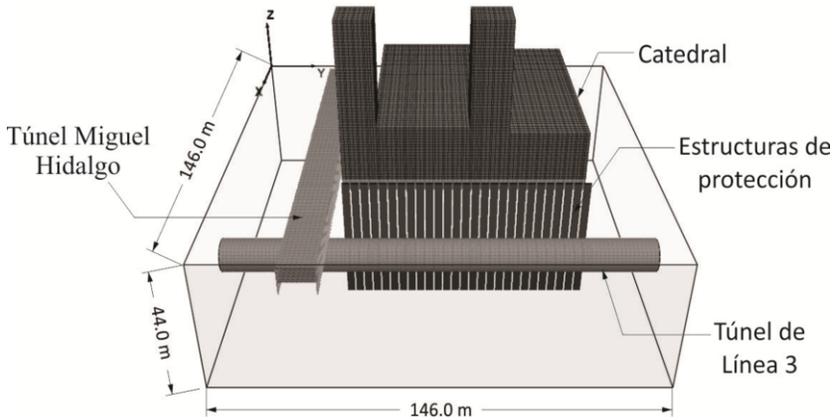


Figura 1. Geometría del modelo de diferencias finitas del sitio de la Catedral de Guadalajara.

#### 3.1. Modelo geotécnico

El modelo geotécnico fue generado a partir de la información obtenida de las campañas de exploración [3], observándose que en el sitio predominan las arenas pumíticas, las cuales varían su compacidad con la profundidad. El perfil estratigráfico fue definido con base en la información de las pruebas de penetración estándar, SPT. En la tabla 1 se presentan los espesores y descripción del material de cada uno de estos estratos.

Tabla 1. Descripción de materiales.

Estrato	Espesor (m)	Descripción de material(*)
Est-1	4	Arena fina con contenido de limo y gravilla
Est-2	5	Arena fina con bajo contenido de limo
Est-3	6	Arena fina con contenido de limo
Est-4	8	Arena fina con contenido de limo
Est-5	11	Arena fina con bajo contenido de limo y gravilla
Est-6	4	Arena arcillosa poco cementada
Est-7	6	Arena gruesa con alteraciones de arena arcillosa cementada

(\*) Descripciones de material recuperadas de la campaña de exploración geotécnica

En el modelado del comportamiento mecánico y cíclico del suelo se emplearon los parámetros mostrados en la tabla 2. Los parámetros mecánicos peso volumétrico ( $\gamma$ ), ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y cohesión ( $c$ ) fueron obtenidos por el diseñador en las campañas de exploración. El módulo de rigidez ( $G$ ) se determinó a partir de la relación elástica que existe con la velocidad de onda de corte del suelo ( $V_s$ ).

**Tabla 2.** Parámetros de resistencia del suelo (\*\*).

Estrato	Peso volumétrico $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Módulo de Young E MPa	Razón de Poisson $\nu$ -	Angulo de fricción interna $\phi$ -	Cohesión c' kPa	Velocidad de onda de corte Vs m/s	Módulo de rigidez G MPa
Est-1	16.71	10	0.40	29	5.0	192	63
Est-2	16.36	50	0.33	35	22.0	300	150
Est-3	18.54	40	0.33	33	20.0	300	170
Est-4	19.05	40	0.33	33	20.0	320	199
Est-5	18.28	55	0.33	36	25.0	450	377
Est-6	19.28	55	0.33	36	25.0	540	573
Est-7	20.40	60	0.33	35	30.0	636	841

(\*\*) Parámetros reportados en la campaña de exploración geotécnica.

### 3.2. Modelación de estructuras

Las estructuras fueron implementadas en el modelo numéricos de dos formas:

1. La catedral fue modelada mediante elementos de volumen, con los cuales se modelaron los muros principales, las losas de cubierta y cimentación.
2. Las estructuras embebidas en el suelo, túneles y estructuras de protección fueron modeladas mediante elementos tipo placa y tipo viga.

Los parámetros empleados en el modelado de la estructura de la Catedral se determinaron a partir de la resistencia de la mampostería. Empleando las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería del Distrito Federal [4], se determinó el módulo de Young (E) a partir de las características propias de la mampostería. En la tabla 3 se presentan los parámetros de modelación para la Catedral.

**Tabla 3.** Parámetros para el modelado de la Catedral.

Parámetro	Unidad		
Módulo de Young de la mampostería	$E_m$	MPa	530
Razón de Poisson	$\nu$	-	0.2
Peso volumétrico de la mampostería	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	10

Los parámetros para el modelo del túnel Miguel Hidalgo y las estructuras de protección se obtuvieron a partir de la resistencia nominal a la compresión del concreto ( $f'c$ ). Empleando las Normas Técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Distrito Federal [5], se determinó el módulo de Young (E) a partir de la resistencia del concreto. En las tablas 4 y 5 se presentan los parámetros para el modelo del túnel Miguel Hidalgo y las estructuras de protección, respectivamente.

**Tabla 4.** Parámetros para el modelado del túnel Miguel Hidalgo.

Parámetro	Unidad		
Resistencia nominal a la compresión	$f'c$	MPa	20
Módulo de Young	E	GPa	19.4
Razón de Poisson	$\nu$	-	0.2
Peso volumétrico	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	24

**Tabla 5.** Parámetros para el modelado de las estructuras de protección.

Parámetro	Unidad		
Resistencia nominal a la compresión	$f'c$	MPa	15
Módulo de Young	E	GPa	9.6
Razón de Poisson	$\nu$	-	0.2
Peso volumétrico	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	24

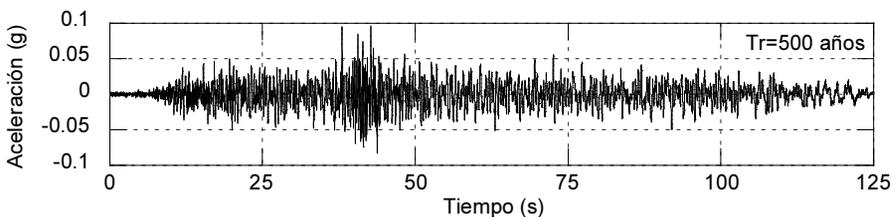
### 3.3. Etapas de análisis

El análisis se ejecutó en dos fases, en la primera se modelaron las etapas constructivas para determinar los cambios en los estados de esfuerzos de la masa de suelo. En la segunda partiendo del estado de esfuerzos de los modelos estáticos se aplicó una excitación en la base para determinar la interacción suelo-estructura. La excitación fue aplicada al 100% en la dirección transversal al túnel de la Línea 3, y a un 30% en la dirección longitudinal.

Para determinar el cambio en la respuesta dinámica de la Catedral se realizó un análisis dinámico en la etapa previa a la construcción del túnel de la Línea 3 y las estructuras de protección para obtener una respuesta de referencia. Posteriormente se realizó un análisis de interacción suelo-túnel-estructuras que incluyen las estructuras de protección y el túnel construidos para obtener la respuesta bajo esta nueva condición.

## 4. Ambiente sísmico

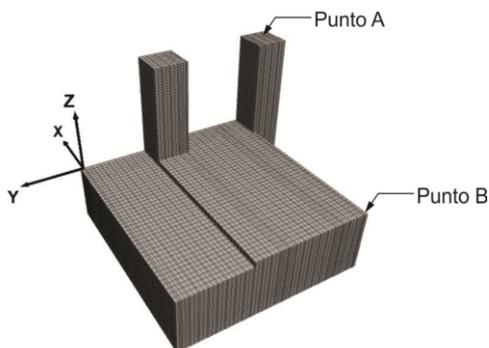
El ambiente sísmico para los análisis de interacción dinámica se definió a partir de un sismo sintético que caracteriza un escenario para un periodo de retorno de 500 años. Esta señal se obtuvo de un ajuste en el dominio del tiempo del registro en la dirección este-oeste del sismo de 1995 en la estación Rotonda, que se llevó a un afloramiento en roca, la estación se ubica en el centro de la ciudad de Guadalajara. En la Figura 2 se muestra el registro sintético empleado en el análisis.

**Figura 2.** Registro empleado como excitación.

Para los análisis se utilizó una ventana de tiempo de 14 segundos que corresponde a la parte más intensa del registro, entre los segundos 33 y 47, para lograr hacer los tiempos de cálculo más eficientes.

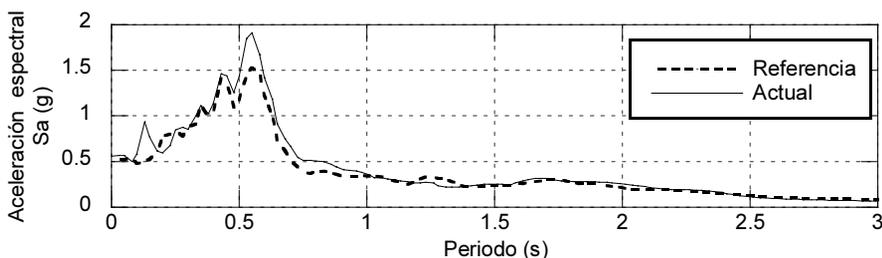
## 5. Resultados

Con base en los resultados de los análisis se evaluó la respuesta en términos de espectros de aceleración absoluta y los historiales de desplazamiento. En la Figura 3 se presenta la ubicación de los dos puntos evaluados. El punto A corresponde a la parte superior de la torre norte de la Catedral, y el punto B corresponde a la esquina noreste sobre la cubierta del cuerpo principal de la catedral.

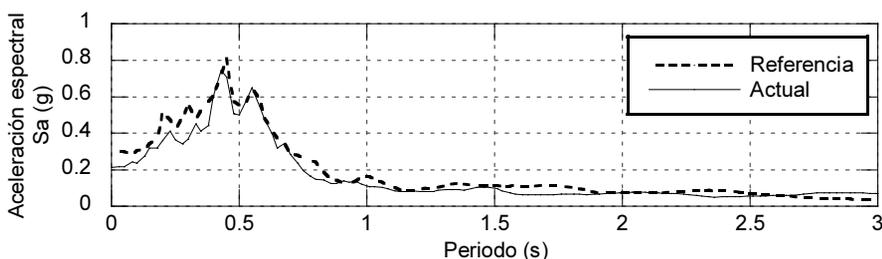


**Figura 3.** Ubicación de puntos de control en la estructura de la Catedral.

En las Figuras 4 y 5 se presentan los espectros de aceleración absoluta en la dirección X y Y para el punto de control A. Se observa que existe una amplificación mínima de las ordenadas espectrales en la dirección X. El aumento en la ordenada espectral máxima es del 25%, movilizándose de 1.53 g a 1.91 g. Para la dirección Y la ordenada espectral máxima se atenúa en un 10%, reduciéndose de 0.81 g a 0.7 g.



**Figura 4.** Espectros de aceleración absoluta para la dirección X del punto A.



**Figura 5.** Espectros de aceleración absoluta para la dirección Y del punto A.

En las Figuras 6 y 7 se presentan los espectros de aceleración absoluta en la dirección X y Y para el punto de control B. En la dirección X se observa un aumento en la ordenada espectral máxima de un 15%, aumentando de 1.28 g a 1.46 g. En la dirección Y la ordenada espectral máxima presenta una atenuación del 3%. En el análisis previo a la construcción del túnel de la línea se presenta una ordenada máxima de 0.61 g, para el análisis posterior a la construcción la ordenada es de 0.59 g.

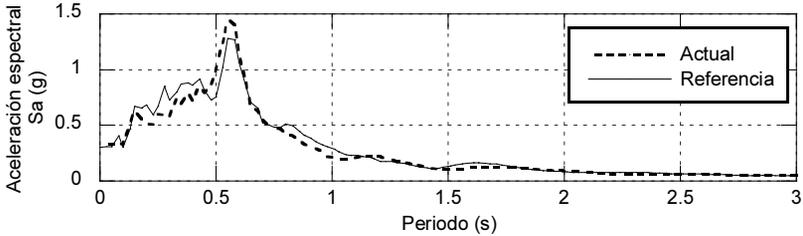


Figura 6. Espectros de aceleración absoluta para la dirección X del punto B.

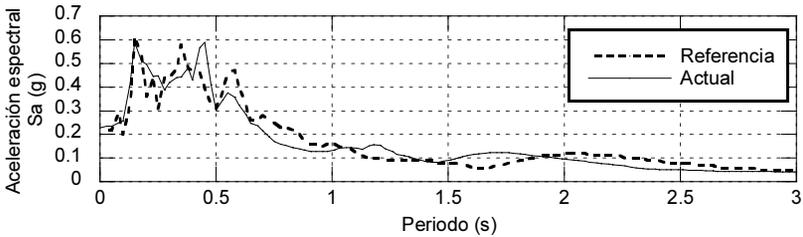


Figura 7. Espectros de aceleración absoluta para la dirección Y del punto B.

En las Figuras 8 a 11 se presentan los historiales de desplazamiento monitoreados en los puntos de control A y B. Se observa que la estructura de la Catedral presenta cambios en sus desplazamientos del orden de milímetros.

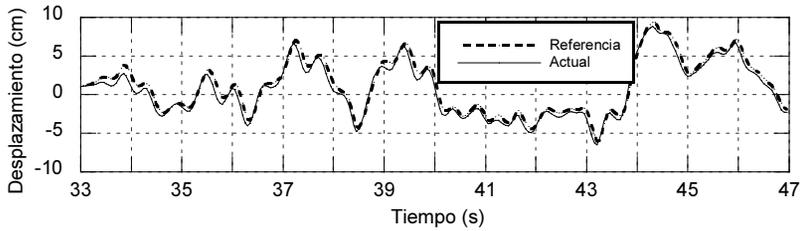


Figura 8. Historial de desplazamiento en la dirección X para el punto A.

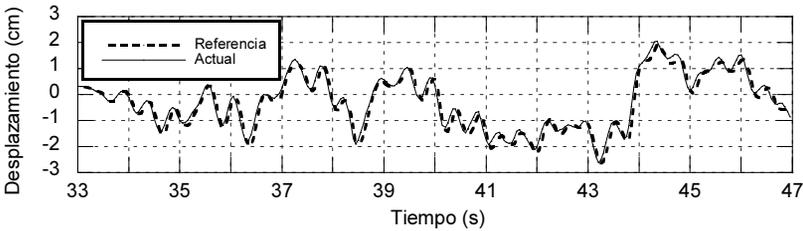


Figura 9. Historial de desplazamiento en la dirección Y para el punto A.

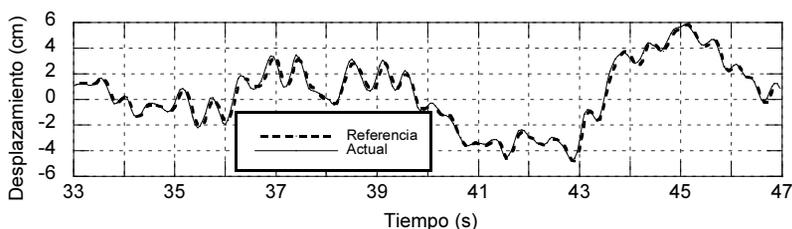


Figura 10. Historial de desplazamiento en la dirección X para el punto B.

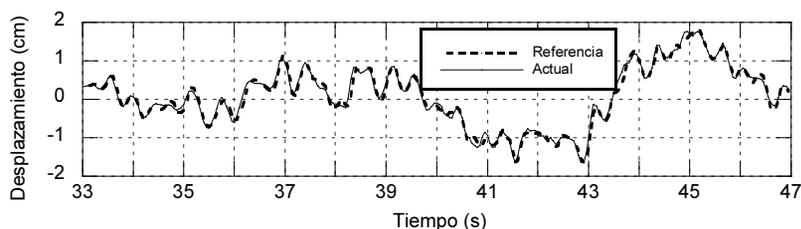


Figura 11. Historial de desplazamiento en la dirección Y para el punto B.

## 6. Conclusiones

En términos de las ordenadas de aceleración espectral, se observó una amplificación de la aceleración espectral máxima para las componentes transversales al túnel de la Línea 3, presentándose un incremento promedio de un 20%. Para las componentes longitudinales al eje del túnel se observaron reducciones de hasta un 10% en las ordenadas espectrales máximas. En función de los desplazamientos, la estructura no presenta cambios significativos, observándose diferencias del orden de milímetros. Finalmente, se concluye que la influencia del túnel de la Línea 3 sobre la respuesta de la Catedral no compromete su integridad estructural bajo un escenario sísmico de gran magnitud, similar al de un sismo con un periodo de retorno de 500 años.

## Referencias

- [1] Padilla E., Zambrano H., De la Mora F., *Experiencias en la construcción de un túnel vehicular en suelos puniticos*, X Reunión Nacional de Mecánica de Suelos (1980), págs. 43-52
- [2] Itasca, *FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions, Version 5.0* (2012), Minneapolis, Minesota, USA
- [3] SENERMEX Ingeniería y Sistemas SA de CV, *Informe Geológico y Campaña de Campo* (2013), Guadalajara, Jalisco
- [4] Gobierno del Distrito Federal, *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería* (2004), Distrito Federal, México
- [5] Gobierno del Distrito Federal, *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto* (2004), Distrito Federal, México