

EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES DEL SUELO CAUSADAS POR TRENES SUBTERRÁNEOS USANDO ELEMENTOS FINITOS

Tomás Montalvo¹ y Luis E. Suárez²

RESUMEN: En este trabajo se presenta un análisis numérico de las vibraciones inducidas por la propagación de ondas originadas por el paso de trenes a través de túneles subterráneos. La metodología desarrollada es útil para realizar el análisis de vibraciones requerido por agencias reguladoras cuando los resultados de investigaciones preliminares indican que se van a exceder los umbrales seguros de vibración. Se estudiaron los niveles de vibraciones en los túneles del proyecto del Tren Urbano, que se está construyendo en San Juan, Puerto Rico. Se estudiaron secciones típicas de cada una de las tres clases de túneles que se usaron en el proyecto. El método de elementos finitos se utilizó para discretizar la geometría de los modelos y para calcular los desplazamientos, las velocidades y los esfuerzos inducidos por la propagación de ondas. El programa de elementos finitos ALGOR se utilizó para modelar el suelo, los diversos túneles y las estructuras en la superficie. Los resultados de la simulación numérica se compararon con mediciones en el campo efectuadas antes del inicio del proyecto Tren Urbano por la compañía consultora Harris Miller Miller & Hanson, Inc. Se encontró que los resultados de ambos procedimientos comparan favorablemente.

INTRODUCCIÓN

Es razonable afirmar que, en general los trenes, tanto los que operan a nivel de la superficie como los subterráneos, son uno de los medios de transportación masiva más ambientalmente seguros, ya que sus niveles de contaminación y el espacio que requieren son bien reducidos comparados con carreteras de capacidad similar. No obstante, un posible problema de este medio de transportación en zonas urbanas son las vibraciones que generan y los ruidos emitidos. Las vibraciones son causadas por las fuerzas dinámicas en la zona de contacto entre las ruedas y los rieles, por irregularidades en las superficies o simplemente por la variación del punto de aplicación. Estas fuerzas dan origen a ondas que se transmiten desde el punto de aplicación hacia la superficie libre, ya sea siguiendo un camino directo o luego de múltiples reflexiones y refracciones (Figura 1). El problema del ruido generado por el tránsito de trenes es ciertamente también muy importante pero no es el objeto de estudio de este trabajo.

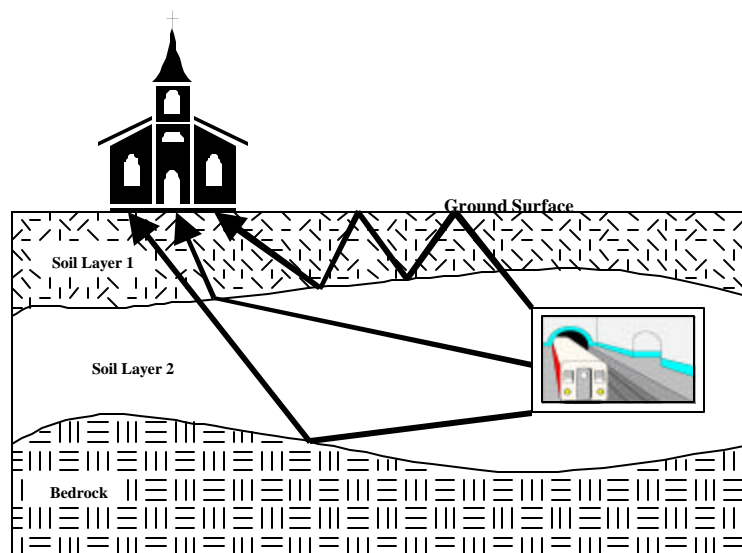


Figura 1: Vibraciones del terreno debido a la propagación de ondas desde un túnel.

¹ Ayudante Especial del Director Ejecutivo, Autoridad de Carreteras y Transportación, San Juan, Puerto Rico 00940-2007

² Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041

Comúnmente, en la etapa de diseño el estudio de las vibraciones se lleva a cabo mediante ensayos de campo en la zona del trazado del tren. En los sistemas ya construidos se pueden efectuar mediciones más precisas del nivel de vibraciones. Una alternativa a este método es un análisis numérico del problema y éste es el tema de este trabajo. Entre las técnicas numéricas que se pueden aplicar para el análisis, el método de elementos finitos es probablemente el más versátil y conocido, por lo cual se lo escogió como la herramienta para la simulación. No obstante, el método tiene limitaciones, principalmente debido a las simplificaciones que hay que hacer para poder estudiar un problema tri-dimensional complicado con un modelo razonable en dos dimensiones. Éstas se discuten en más detalle en la sección de Conclusiones.

Al momento de efectuar este estudio existían varios programas de elementos finitos disponibles en el Departamento de Ingeniería Civil de UPR-M. Algunos de ellos como, QUAD4-M o SASSI, están especialmente diseñados para analizar dinámicamente depósitos de suelo. No obstante, se deseaba usar un programa en donde se pudiese modelar con facilidad no sólo el suelo sino también los túneles y las estructuras en la superficie. Por lo tanto, se decidió usar el programa comercial ALGOR. Este programa tiene la ventaja de que su uso es relativamente sencillo debido a la interfaz gráfica para la entrada de datos y generación de la malla, como también al procesador gráfico de los resultados.

El estudio que aquí se presenta está aplicado a los túneles del proyecto Tren Urbano en el área metropolitana de San Juan, Puerto Rico, aunque la metodología puede usarse en cualquier proyecto similar.

El problema del ruido y las vibraciones generados por el tránsito de trenes es un tema que ha sido muy estudiado por ingenieros e investigadores. Debido a que el público general es cada vez más consciente y exigente en lo que a problemas ambientales se refiere, es razonable que en el futuro los sistemas de transporte público terrestre estarán sometidos a un escrutinio aún más riguroso de los potenciales problemas de ruidos y vibraciones. La mayoría de los estudios sobre el tema son de la autoría de investigadores de Europa del Norte y Central, probablemente porque estos países dependen más de estos sistemas de transporte. La gran mayoría de los trabajos existentes sobre el tema están dedicados al problema de la contaminación acústica o ruido. Muchos de los restantes tratan el tema de las vibraciones inducidas por trenes que transitan a nivel del terreno o elevados (por ejemplo, Kuppelweiser y Ziegler, 1996; Madshus et al, 1996). El único artículo que trata un tema similar al aquí reportado es el de Unterberger y colegas (1997) en una revista comercial de la ingeniería de túneles. Aún en este caso, los autores estaban interesados solamente en la respuesta del túnel mismo. En otro artículo relevante, Ungar y Bender (1975) estudiaron los diversos parámetros que influyen en la transmisión de ruidos y vibraciones y presentaron un método para estudiar el nivel de ruido en las paredes, techos y pisos de edificios en función de los niveles de vibración. Otro método basado en una formulación analítica simple y en ensayos de laboratorio complementados con mediciones in situ para predecir los niveles de ruido y vibraciones en edificios debido a líneas de trenes subterráneos fue propuesto por Melke (1988). Un método similar, aunque más enfocado al problema de ruidos, fue propuesto por Kurzweil (1979). Todos estos son métodos semi-empíricos cuyo principal objetivo es no sólo predecir los niveles de vibración sino además establecer los niveles aceptables para la población.

EL PROYECTO TREN URBANO

El proyecto conocido como Tren Urbano se comenzó a construir en julio de 1996 en el área metropolitana de San Juan, la capital de Puerto Rico. El Tren Urbano es la obra de infraestructura de mayor envergadura y complejidad emprendida actualmente en Puerto Rico. Al presente tiene una longitud de 17.2 km (10.5 millas) donde 40% del sistema se encuentra a nivel del terreno, 52% en tramos elevados y 8% en túneles subterráneos. Dichos túneles atraviesan el sector conocido como Río Piedras, una zona altamente congestionada y con numerosos edificios históricos. El sistema pasará allí de elevado a subterráneo requiriendo la construcción de 1.8 km de túneles.

Debido a las condiciones de suelo y otras características del proyecto, los diseñadores decidieron usar tres tipos de túneles. Éstos se identifican por sus siglas o nombres en inglés, como NATM (por New Austrian Tunneling Method), Stack Drift y EPBM (por Earth Pressure Balance Machine). Una descripción detallada de estos túneles se presenta en la referencia 8 (Montalvo, 2001).

Una vez en operación, se espera que el sistema opere 20 horas diarias, con trenes corriendo cada cuatro minutos en las horas pico. La flota consistirá de pares de unidades acopladas hasta formar un tren de seis vagones en las horas de mayor uso.

VIBRACIONES INDUCIDAS POR SISTEMAS DE TRANSPORTE

Cuando se estudia el efecto de las vibraciones inducidas en la superficie libre o en edificios por el movimiento de transportes terrestres o por actividades de construcción, se suele usar la velocidad de las partículas de suelo como cantidad de comparación. Esto se debe a que a través del tiempo, el estudio de estos efectos se ha

desarrollado a partir del establecimiento de correlaciones empíricas entre el daño observado y la velocidad pico de las partículas del suelo. Además, otra razón para el uso de velocidades es que el efecto de las vibraciones en los seres humanos, en lo que a percepción se refiere, se puede relacionar más directamente con estas cantidades.

En general, en esta disciplina el nivel de vibraciones se suele especificar o medir en términos de la velocidad expresada en decibeles o *VdB*. Si v es la amplitud de la velocidad en unidades de longitud/tiempo, y v_{ref} es la amplitud de una velocidad de referencia en las mismas unidades, la velocidad en decibeles L_v se define como

$$L_v = 20 \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (1)$$

La agencia del gobierno que regula los sistemas de transportación públicos en los Estados Unidos, la Administración Federal de Tránsito (o FTA por las siglas en inglés de Federal Transit Administration) usa como velocidad de referencia $v_{ref} = 1$ micro pulgada/segundo. Esta organización también especifica los criterios para ruido y vibraciones que deben satisfacer los sistemas de transportación públicos. Para el caso en estudio, éstos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles permisibles de vibraciones en función del uso de las edificaciones.

Categoría de uso del terreno	Niveles de vibraciones terrestres permisibles (VdB re 1 μ pulgada/seg)
Categoría 1: Edificios en donde un ambiente bajo en vibraciones es esencial para las operaciones.	65 VdB
Categoría 2: Residencias y edificios en donde por lo general duerme el público.	72 VdB
Categoría 3: Construcciones mayormente de uso institucional durante el día.	75 VdB

La FTA propone usar un diagrama de flujo (no incluido aquí por razones de espacio) para identificar si se requiere o no un análisis de vibraciones para un determinado proyecto. Para vehículos que tienen ruedas de acero y que transitan sobre rieles de acero, dicho análisis es un requisito si hay áreas “sensitivas” dentro de las zonas de impacto del proyecto. Este es el caso del proyecto Tren Urbano en la zona de Río Piedras y fue lo que motivó el presente estudio.

DEFINICIÓN DE LA EXCITACIÓN

Para definir las cargas dinámicas a ser aplicadas a los modelos de elementos finitos se usó la información provista por la compañía Siemens Transportation Systems de Sacramento, California, quienes son los proveedores de los vagones. Las características del tren relevantes para el estudio son:

- Número máximo de pasajeros por vehículo: 240
- Largo de los vagones: 23 m (~ 75 pies)
- Peso de cada vagón: 378 kN (~ 85 kip)
- Velocidad máxima de diseño: 66 km/h (~ 41 millas/h)

Las fuerzas aplicadas en los puntos donde los rieles cruzan el plano de análisis son debido al peso del tren y de los pasajeros. Aunque estas son fuerzas estáticas, debido a que el punto de aplicación se mueve se convierten en fuerzas dinámicas. Para definir la variación en el tiempo de las fuerzas a ser aplicadas al modelo se usó el siguiente razonamiento. Supongamos que en un punto fijo sobre las vías se coloca una celda de carga imaginaria. Cuando el tren se aproxima el sensor comenzará a medir una fuerza $P(t)$ cuya magnitud irá aumentando con el tiempo, hasta que alcanza un valor máximo cuando una rueda está sobre el punto de medición. A partir de este instante, la intensidad de la fuerza medida comienza a disminuir hasta que la próxima rueda se acerca, y el proceso se repite. Como no se dispone de datos sobre la variación exacta de la fuerza, se decidió asumir una variación sinusoidal.

Como se sabe, este tipo de fuerza es la que tiene el potencial de producir la respuesta de mayor magnitud en un sistema dinámico.

Siguiendo el razonamiento anterior, la fuerza que actúa sobre los rieles según el modelo tiene la siguiente variación:

$$P(t) = \frac{P_0}{2} [1 + \sin(\omega t - p/2)] \quad (1)$$

donde P_0 es la amplitud de la fuerza y ω es la frecuencia circular equivalente de la carga.

La Figura 2 muestra un esquema de un segmento del tren con las fuerzas aplicadas a los rieles y la distancia entre éstas. Es necesario destacar que en la realidad en los extremos de los vagones hay cuatro fuerzas que se transmiten a los rieles en correspondencia con cada boggie. La resultante de estas cuatro fuerzas, sumada a la que proviene del vagón contiguo es igual al peso del vagón más el de los pasajeros y es la que se muestra en la figura.

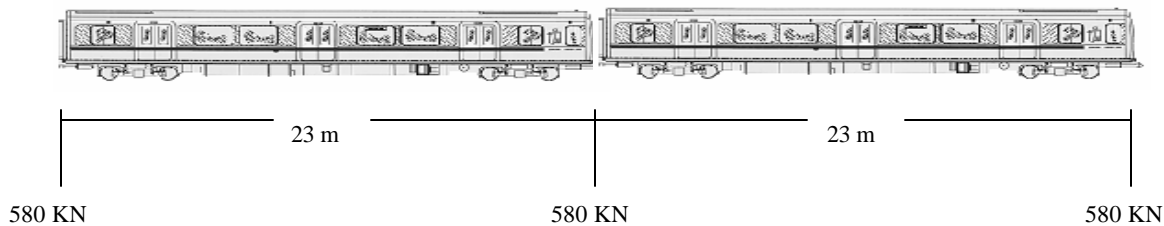


Figura 2: Grupo de dos vagones con las fuerzas aplicadas a los rieles.

Para calcular la frecuencia equivalente de la fuerza se necesita conocer el tiempo T que le lleva al tren recorrer una distancia igual al largo de un vagón. Si el tren viaja con velocidad constante, con los datos antes especificados se obtiene que

$$T = \frac{23 \text{ m}}{66 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ h}} = 1.255 \text{ seg}$$

Este tiempo corresponde al periodo de la carga armónica $P(t)$ y por consiguiente la frecuencia ω en rad/seg es

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1.255} \approx 5 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

Si se asume que el vehículo está cargado a capacidad y que el peso promedio por pasajero es de 190 lbs , el peso total W_p debido a los pasajeros es

$$W_p = 240 \text{ pasajeros} \times 190 \frac{\text{lbs}}{\text{pasajero}} = 45600 \text{ lbs}$$

El peso total de un vehículo W_t en condición de carga máxima es entonces

$$W_t = 45600 + 85000 = 130600 \text{ lbs} \approx 580 \text{ kN}$$

Como este peso se distribuye en dos rieles la amplitud de la fuerza en la Ec. (1) es $P_0 = W_t / 2$.

MODELOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS

Se analizaron tres modelos de elementos finitos que incluyen los túneles con el depósito de suelo que los rodea. Éstos corresponden a los tres tipos de túneles mencionados en la sección 2 (NATM, Stack-Drift y EPBM). Para modelar los túneles y el depósito de suelo se consideró que éstos se pueden representar mediante un estado de deformaciones planas, lo que equivale a suponer que los mismos se extienden sin límites en la dirección normal al plano de análisis. En el caso del túnel "Stack-Drift" también se incluyó en el modelo los edificios en la superficie usando elementos de esfuerzos (tensiones) planas.

En todos los casos se usó un amortiguamiento modal de 5% para todos los modos. El programa ALGOR no permite asignar razones de amortiguamiento diferentes para los elementos finitos asociados a los distintos tipos de

suelo. De todos modos, no se disponía de información sobre el amortiguamiento de ninguno de los suelos en la zona.

En todos los análisis se asumió que el suelo y los túneles se comportan en forma lineal. Ésta es una suposición muy razonable para el tipo de problema bajo estudio, dado que las cargas no son lo suficientemente altas como para producir grandes deformaciones en el suelo y en las estructuras.

Antes de comenzar la serie de análisis, se efectuaron pruebas para determinar el tamaño adecuado de la malla de elementos finitos. Dado que el programa ALGOR, en su versión actual, no posee bordes especiales para simular medios semi-infinitos o infinitos, se aplicaron las condiciones de borde ficticias lo suficientemente alejadas de la zona de interés (los túneles y el área en la superficie por encima de ellos). Para determinar la geometría correcta de la malla, se incrementaron sus dimensiones hasta que los resultados no variaron de manera apreciable.

Las propiedades de los suelos requeridas para el análisis dinámico: módulo de elasticidad, densidad, razón de Poisson, y profundidad, se tomaron de los estudios geotécnicos disponibles. Todos los túneles están dentro del tipo de suelo que se conoce como la formación de Hato Rey, la que para los efectos del diseño de los túneles y los de este trabajo se dividió en tres capas, identificadas 1, 2, y 3 comenzando desde la superficie:

- Capa 1: Arcilla superior, caracterizada por arcillas rígidas limosas.
- Capa 2: Zona media estratificada, formada por capas alternadas de arenas limpias, arenas limosas, arenas arcillosas y arcilla.
- Capa 3: Arena inferior, constituida mayormente por arcillas con algún contenido de arenas arcillosas.

Los primeros túneles analizados fueron los del tipo NATM que se encuentran a la llegada de la Estación de Río Piedras. Éstos son, en realidad, un grupo de cuatro túneles debido a que se han construido dos túneles extras para una futura ampliación del proyecto hacia el municipio de Carolina. La Figura 3 muestra una vista en planta de los túneles NATM llegando y saliendo de la estación de Río Piedras.

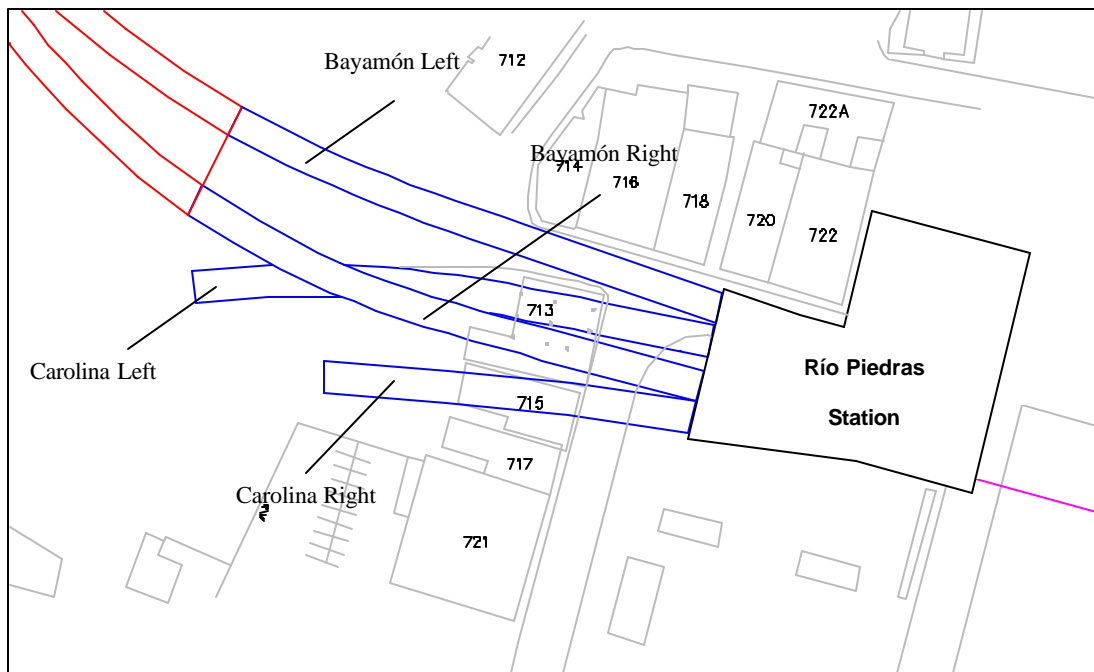


Figura 3: Vista en planta de los túneles NATM.

Los resultados del análisis, en términos de desplazamientos, asumiendo que dos trenes transitan por los túneles superiores en direcciones contrarias se presentan en forma gráfica en la Figura 4. El máximo desplazamiento en la superficie, que ocurre en el punto medio de los dos túneles superiores, fue de 4.14 mm. La máxima velocidad en la superficie fue de 72.4 VdB, la cual excede levemente el valor máximo de 72 VdB recomendado por la Administración Federal de Tránsito (ver Tabla 1).

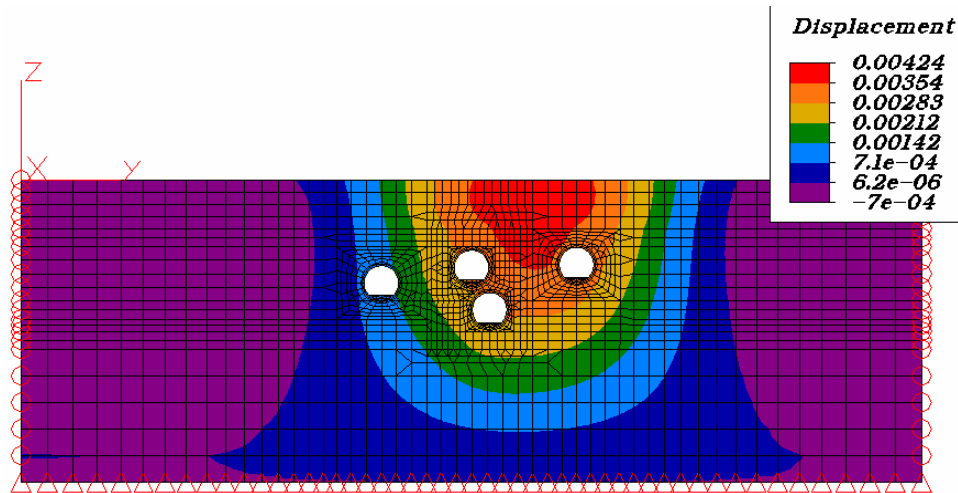


Figura 4: Desplazamientos en la zona de los túneles NATM debido al paso de dos trenes.

El siguiente caso analizado es el de la estación de Río Piedras, la que se construyó usando un túnel tipo “Stack-Drift”. Ésta área es particularmente importante porque en la superficie hay varias construcciones de valor histórico. En este caso se decidió incorporar al modelo del suelo y túnel, dos edificios en la superficie. Las dimensiones de estos edificios no corresponden a los reales en la zona, dado que no se disponía de información detallada sobre los mismos. La Figura 5 muestra el modelo de elementos finitos usado para este caso. Las respuestas de interés son los desplazamientos y velocidades en el túnel, en la superficie libre y en los edificios. Los valores picos del desplazamiento y velocidad en la plataforma de la estación fueron 2.7 mm y 68.5 VdB, respectivamente. En la superficie libre se halló que el máximo desplazamiento y velocidad eran, respectivamente, 3.2 mm y 70.1 VdB. En el interior de los edificios en la superficie el máximo desplazamiento encontrado fue 2.9 mm y la velocidad fue 69.1 VdB. Todos los valores de la velocidad están por debajo de los límites impuestos por la FTA, aunque en el caso de la superficie libre el valor predicho está muy cerca.

También se calcularon los máximos esfuerzos (o tensiones) en los edificios sobre el terreno y en la estructura del túnel, incluyendo la plataforma. Con esto se quería establecer si los esfuerzos eran lo suficientemente grandes como para producir grietas en estas estructuras. Se encontró que los esfuerzos son muy bajos como para producir algún tipo de daño.

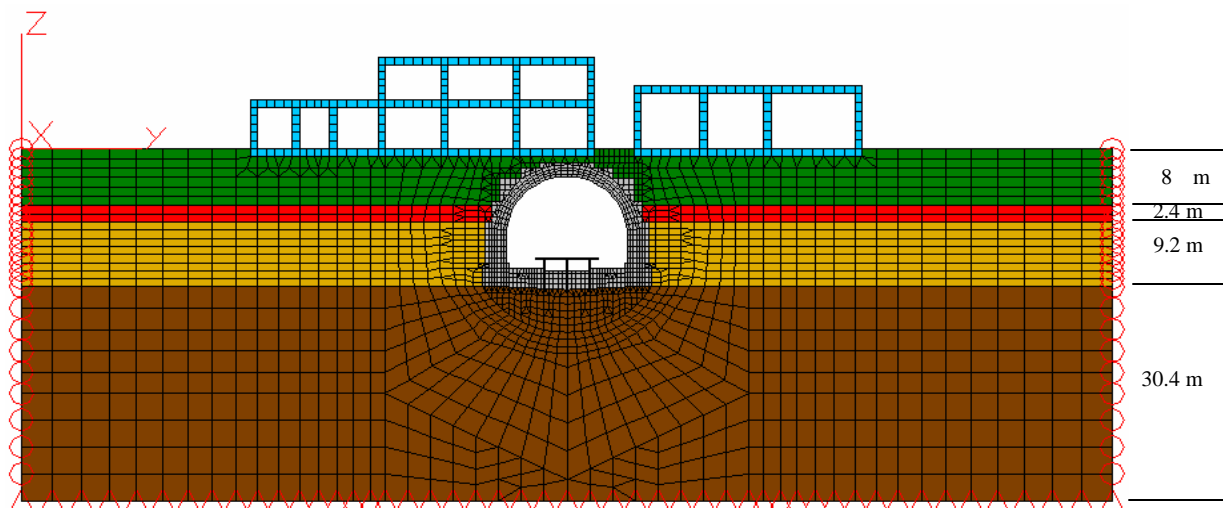


Figura 5: Modelos de elementos finitos para el túnel “Stack-Drift” y edificios en la zona.

El tercer caso analizado corresponde al de los túneles EPBM localizados en el tramo que llega a la estación de la Universidad de Puerto Rico. La Figura 6 muestra el patrón de desplazamientos para el caso más crítico, el que ocurre cuando se colocan fuerzas armónicas en los dos túneles representando el paso de trenes circulando en sentidos opuestos. El máximo desplazamiento vertical superficial fue igual a 4.1 mm. La respuesta máxima en la superficie en términos de velocidades fue de 72.2 VdB. Al igual que en el primer caso tratado, este valor excede levemente los límites impuestos por la agencia reguladora FTA.

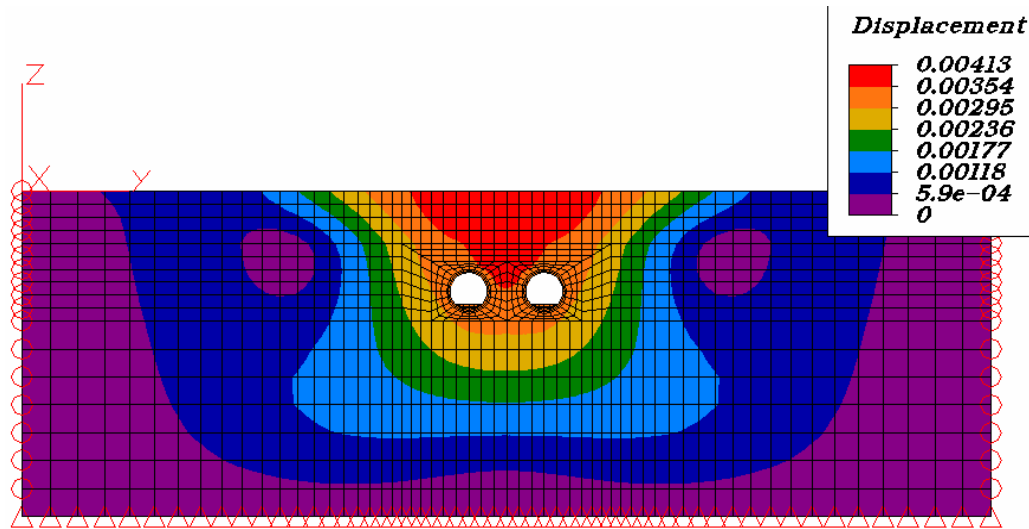


Figura 6: Desplazamientos en la zona de los túneles EPBM debido al paso de dos trenes.

MEDICIONES DE CAMPO

La oficina del Tren Urbano contrató una compañía consultora especializada en mediciones de ruido y vibraciones para realizar un estudio con el fin de estimar los niveles de vibraciones cuando el tren esté en operación. La compañía escogida fue Harris Miller Miller & Hanson, Inc., consultores con mucha experiencia en este campo, localizados en Burlington, Massachussets. El estudio se hizo en abril de 1995 y los resultados se describen en el reporte titulado “Noise and Vibration Technical Report for Tren Urbano Project” (1995b).

El proceso para estimar experimentalmente los posibles niveles de vibraciones es lento y costoso y requiere de conocimientos especializados. Para cada zona donde se desea estimar los niveles de vibraciones, se requiere primero hacer un barrenado hasta una profundidad representativa del futuro túnel. Luego se deja caer un objeto pesado (de aproximadamente 140 libras) en el cual se coloca un transductor de fuerza en su extremo y se mide la respuesta en la superficie libre. Para esto último se usan varios acelerómetros colocados en la superficie a distancias crecientes desde el barrenado. La información se registra y luego se procesa en el laboratorio. De esta manera se obtuvieron curvas como las que se muestra en la Figura 7. Típicamente este tipo de curvas muestran los niveles de vibración medido en decibeles como función de la distancia a la fuente de excitación.

COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar la simulación numérica se han comparado los resultados obtenidos con los ensayos de campo efectuados por la compañía Harris Miller Miller & Hanson antes mencionados. Para comparar los resultados se escogió una sección de los túneles EPBM que coincidiera con el lugar donde se efectuaron las mediciones experimentales y se calcularon los desplazamientos y la velocidad de las partículas de suelo aproximadamente en el mismo sitio donde se tomaron las mediciones en los ensayos. Se escogió un caso crítico de carga: aquel en el cual dos trenes pasan simultáneamente por ambos túneles. Los resultados obtenidos con los dos procedimientos en términos de las velocidades medidas en decibeles se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 7.

Tabla 2: Comparación de resultados del ensayo y de la simulación numérica.

Distancia horizontal desde el túnel al sensor (m)	Resultados del ensayo en el campo (VdB)	Resultados del análisis numérico (VdB)	Diferencia en porcentaje (%)
8	76	72	5.3
15	73	70	4.1
20	70	68	2.9
40	62	51	17.7
70	52	47	9.6

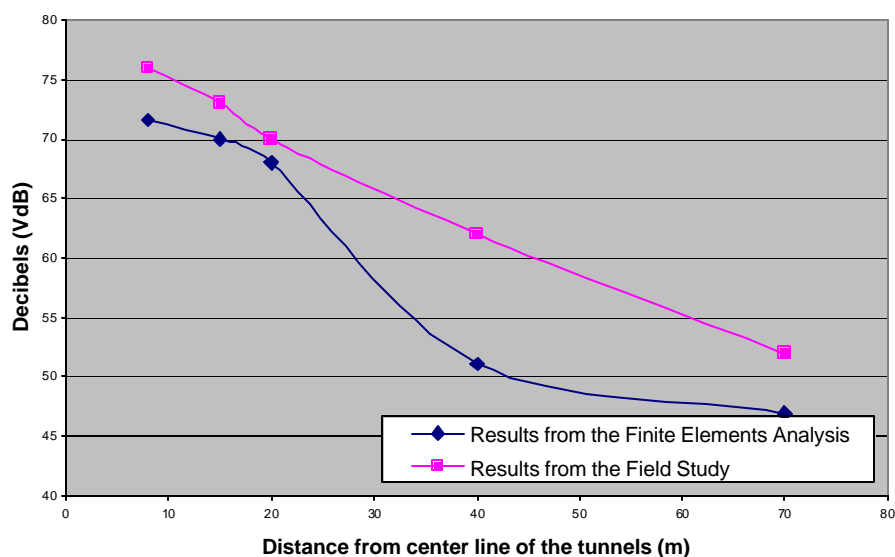


Figura 7: Velocidad en la superficie libre calculada experimental y numéricamente.

Las distancias que aparecen en la tabla y en el gráfico se miden desde una línea vertical simétrica respecto a los dos túneles hasta la posición del sensor. Notar que los niveles de vibración que predice el modelo numérico son un poco menores que los del ensayo de campo. El error en promedio entre ambas técnicas es de 7.9%, lo que se considera muy aceptable dada la naturaleza totalmente distinta de los métodos.

En el caso de los ensayos de campo, cuando se efectuaron los mismos había tránsito de camiones y automóviles cerca del área en estudio, los que generan ondas que pueden haber perturbado las mediciones. Además, obviamente la fuerza impulsiva no se aplicó sobre las vías del tren, sino dentro del depósito de suelo. Esto puede explicar el hecho de que los resultados del ensayo están por encima de los de la simulación numérica. En efecto, la presencia de los túneles de hormigón actúa como una barrera para las ondas generadas por las cargas dinámicas, lo que tiende a atenuar las vibraciones en la superficie. A base de las consideraciones anteriores es difícil decidir con honestidad cuál de los dos procedimientos produce resultados que se aproximan más a la realidad. No obstante, dadas las pequeñas diferencias entre ambos, se puede afirmar que la simulación numérica mediante elementos finitos es una técnica lo suficientemente confiable para ser usada en la predicción de vibraciones del terreno inducidas por trenes en túneles.

CONCLUSIONES

Este trabajo intentó demostrar que una simulación numérica usando el método de elementos finitos es una opción confiable y económica para estimar los niveles de vibraciones inducidos por el tránsito de trenes en túneles. En particular, la metodología puede ser muy útil para implementar el análisis detallado que requieren agencias reguladoras, como por ejemplo la Administración Federal de Tránsito de los Estados Unidos, cuando los resultados de pruebas preliminares indican que los niveles admisibles de vibraciones podrían excederse. Como ejemplo de aplicación se usó el tramo de túneles del proyecto Tren Urbano en el área metropolitana de San Juan. Se estudiaron los niveles de vibración para los tres tipos de túneles usados en el proyecto mencionado. Para validar el método propuesto se compararon los resultados que predice el modelo numérico con las velocidades de las partículas de suelo en la superficie libre obtenidas de un estudio experimental en el campo, realizado por la compañía Harris Miller Miller & Hanson. Se encontró que ambos resultados comparan favorablemente, aún cuando fueron obtenidos por metodologías totalmente diferentes.

Aunque siempre es deseable validar la metodología en otras situaciones, se puede concluir preliminarmente que un estudio del problema por medio de elementos finitos y las técnicas de dinámica estructural ofrecen una alternativa confiable y económica a un estudio de campo. Se puede argumentar que el uso de un modelo numérico como el presentado tiene varias ventajas sobre los estudios de campo. Por ejemplo, pueden citarse las siguientes:

- No hay fuerzas externas impredecibles que puedan afectar el análisis. En un estudio de campo el tránsito o actividades de construcción en la vecindad del sitio del estudio pueden afectar los resultados.
- Se pueden predecir diversos tipos de respuestas, como por ejemplo, esfuerzos (tensiones), desplazamientos y velocidades en distintas direcciones, en cualquier punto del modelo.

- Las fuerzas se pueden aplicar exactamente sobre los rieles. Para obtener información comparable con un estudio experimental, obligaría, en general, a usar distintos tipos de sensores en diversos lugares, lo que incrementaría notablemente el costo del análisis.
- Es posible predecir los niveles de vibración en las estructuras existentes en las cercanías de los túneles o en futuras construcciones sin mayor trabajo que el de ampliar el modelo. En un ensayo de campo, es posible, por supuesto, instrumentar las estructuras existentes en la superficie, pero a un costo adicional.
- Se puede repetir los análisis usando distintas configuraciones geométricas, propiedades de los materiales y cargas sin otro costo adicional que el tiempo necesario para modificar el modelo.
- Este método de análisis no causa ningún trastorno en el área de estudio, como por ejemplo interrupciones de tránsito. Un estudio experimental requiere que se despeje el área inmediata de trabajo lo que, dependiendo del lugar, puede causar inconvenientes al público y perturbaciones en la actividad económica en la zona.
- Es factible simular las diversas soluciones constructivas propuestas para mitigar los efectos de las vibraciones (Castellani et al, 1998; Wilson et al, 1983) requeridas cuando los resultados de los análisis predicen niveles superiores a los límites permisibles. Es evidente que esto no es posible con un estudio experimental. Ésta es una de las aplicaciones más interesantes de la metodología descrita en este trabajo. En la referencia 8, en la cual se basa este artículo, se examinaron algunas soluciones, si bien no en forma exhaustiva. Esta es una de las áreas hacia donde se podría extender el presente estudio.

El método usado y otras técnicas numéricas también padecen, por supuesto, de limitaciones que deben tenerse presente. A continuación se destacan algunas de ellas. No obstante es necesario aclarar que algunas de estas desventajas no son intrínsecas del método numérico, sino más bien limitaciones del modelo usado en este estudio.

- Para mantener el nivel de complejidad del modelo a un nivel razonable es conveniente usar modelos bidimensionales, como se hizo en este trabajo. Por lo tanto, los posibles efectos tridimensionales no se tienen en cuenta. Esto hace que con estos modelos no sea posible investigar, al menos en forma precisa, el caso de tramos de túneles ascendientes o descendientes.
- Además la suposición de un estado de deformaciones planas obliga a asumir que el tren de cargas se extiende hacia el infinito en ambas direcciones normales al plano de análisis.
- En todo modelo de elementos finitos de un medio semi-infinito como un depósito de suelo habrá inevitablemente algunos errores debido al uso de una malla de dimensiones limitadas. Este error se puede reducir considerablemente usando los llamados bordes transmisores o absorbentes para los contornos laterales e inferior del modelo de elementos finitos. Alternativamente, los errores causados por usar bordes artificiales pueden también limitarse extendiendo la malla lejos de la zona de interés, como se hizo en este trabajo. No obstante, cualquiera de estos dos procedimientos es una aproximación al caso real, limitación que no existe en un estudio experimental en el área del futuro proyecto.
- El modelo numérico requiere conocer el número, profundidad y las propiedades de las capas de suelo que rodean a los túneles. Por lo general, esta información está disponible de los estudios geotécnicos que deben realizarse para un proyecto de tal envergadura. Aún en estos casos, y por falta de información más completa, suele asumirse que las capas son perfectamente horizontales y sus propiedades constantes en estas direcciones. Obviamente, los resultados de un ensayo de campo incluyen las capas reales, tanto en cuanto a sus geometrías como a sus propiedades.

En un estudio futuro, y para aumentar la precisión de los resultados se podría, además de usar modelos tridimensionales, simular de manera más detallada las fuerzas dinámicas en las zonas de contacto entre las ruedas y el riel. La excitación considerada en este trabajo se debe a que el punto de aplicación de las fuerzas está en movimiento. Sin embargo, las irregularidades de las ruedas o rieles que aumentan con el transcurso del tiempo, también son una fuente de fuerzas que contribuye a incrementar los niveles de vibración y ruido.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al auspicio del programa *UPR-MIT Tren Urbano Professional Development Program*, actualmente dirigido por el Dr. Benjamín Colucci del Departamento de Ingeniería Civil de UPR-M, en la forma de una ayudantía de investigación para el primer autor. Ambos autores agradecen el apoyo brindado. Información detallada sobre este programa se encuentra disponible en el portal de Internet <http://www.trenurbanopr.net>.

REFERENCIAS

- Castellani, A., Kajon, G., Panzeri, P. y Pezzoli, P. (1998). "Elastomeric Materials Used for Vibration Isolation of Railway Lines", *Journal of Engineering Mechanics*, vol 124(6), pp. 614-621.
- Harris Miller Miller & Hanson, Inc. (1995a). *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*, Federal Transit Administration, Washington, DC.
- Harris Miller Miller & Hanson, Inc. (1995b). "Noise and Vibration Technical Report for Tren Urbano Project", Tren Urbano Project, Apéndice C, pp. 56-77.
- Kuppelweiser, H. y Ziegler, J. (1996). "A Tool for Predicting Vibration and Structure-Borne Noise Immisions Caused by Railways", *Journal of Sound and Vibration*, vol 193(1), pp. 261-267.
- Kurzweil, L.G. (1979). "Ground-Borne Noise and Vibration from Underground Rail Systems", *Journal of Sound and Vibration*, vol 66(3), pp. 363-370.
- Madshus C., Bessason B. y Hårvik L. (1996). "Prediction Model for Low Frequency Vibration from High Speed Railways on Soft Ground", *Journal of Sound and Vibration*, vol 193(1), pp. 195-203.
- Melke, J. (1988). "Noise and Vibration from Underground Railway Lines: Proposals for a Prediction Procedure", *Journal of Sound and Vibration*, vol 120(2), pp. 391-406.
- Montalvo Torres, T. (2001). "Assessment of Ground-Borne Vibrations Caused by Subway Trains Using Finite Element Models", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR.
- Öhrström, E. y Skånberg, A. B. (1995). "Effects of Exposure to Noise and Vibration from Railway Traffic", *Journal of Sound and Vibration*, vol 193(1), pp. 39-47.
- Ungar, E. E. y Bender, E. K. (1975). *Vibrations Produced in Buildings by Passage of Subway Trains; Parameter Estimation for Preliminary Design*, Proceedings of Inter-noise 75, 491:498.
- Unterberger, W., Hochgatterer, B. y Poisel, R. (1997). "Numerical Prediction of Vibrations Caused by Trains in Tunnels", *Tunnels & Tunnelling International*, 45:47.
- Wilson, G. P., Saurenman, H. J. y Nelson J. T. (1983). "Control of Ground-Borne Noise and Vibration", *Journal of Sound and Vibration*, vol 87(2), pp. 339-350.