



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A011

## **Evaluación de medidas de mitigación de vibraciones en ferrocarriles subterráneos urbanos**

Carlos Reyes<sup>(a)</sup>

(a) Wilson, Ihrig and Associates, Inc. 5776 Broadway, Oakland, California, USA. E-mail: creyes@wiai.com

### **Abstract**

The construction of urban rail alignments normally requires a design within areas densely populated. The underground construction in central urban areas, reduces the distance between the vibrational source and potential sensitive receptor to groundborne vibration, to just the distance between the tunnel and the building foundation. A shorter distance between them is likely to increase the degree of impact and it would require more efficient control measures while keeping a reasonable cost of implementation.

This paper presents the results of the evaluation on groundborne noise mitigation measures during both preliminary and final engineering of a rail project extension in the area of the Silicon Valley in California. Control measures were investigated to reduce the level of impact. Such mitigation measures included resilient bases, floating slab tracks, and several resiliently supported rail fasteners. An additional theoretical study was developed as a research for potential combinations of resilient rail fasteners.

### **Resumen**

La construcción de sistemas de ferrocarriles urbanos normalmente requiere un diseño del trazado por zonas densamente pobladas. Mas aún, la construcción subterránea en zonas urbanas céntricas, minimiza la distancia entre la fuente generadora y los receptores sensibles a vibración, a sólo la distancia entre el túnel y la fundación del edificio. Menores distancias aumentan el grado de impacto y a la vez requieren medidas de control más efectivas, manteniendo un costo razonable de implementación.

Este trabajo presenta los resultados de la evaluación de medidas de mitigación para ruido transmitido por estructuras durante la etapa de ingeniería preliminar y final de un proyecto de extensión en el área del Valle del Silicio en California. Medidas de control fueron investigadas para reducir el nivel de impacto. Dentro de las medidas evaluadas se incluye bases elásticas, losas flotante y diferentes tipos de fijación de rieles con soportes elásticos. Un estudio teórico adicional fue desarrollado como investigación de posibles combinaciones de fijaciones elásticas.

## 1 Introducción

El proyecto presentado en este trabajo, corresponde al trazado de extensión del sistema de tren urbano de la bahía de San Francisco (BART) hacia el Valle del Silicio. El trazado corresponde aproximadamente a 26 km de extensión, ocho de los cuales serán subterráneos. La profundidad del túnel varía entre 15 y 21 metros con un diseño que en su gran mayoría corresponde a doble túnel excavado. Túnel de apertura y excavado sólo fue considerado en las inmediaciones de las dos estaciones subterráneas.

Wilson, Ihrig and Associates Inc (WIA), participó como experto en la especialidad de ruido y vibración del equipo de ingenieros a cargo del diseño preliminar y final para los tramos en superficie y subterráneo del proyecto de extensión.

Este trabajo presenta brevemente el resultado del análisis efectuado durante la ingeniería preliminar. Específicamente, se presenta aquí los resultados de la evaluación de la reducción al ruido transmitido por estructuras de algunos tipos de soporte de rieles. Seis tipos de soportes de rieles fueron investigados y comparados con el sistema original recomendado para el proyecto.

Algunos resultados fueron determinados empíricamente o a través de mediciones, otros fueron derivados de modelos matemáticos aquí mencionados, los cuales aún deben ser validados.

## 2 Background

El análisis de vibración y ruido transmitido por estructuras en sistemas de transporte de ferrocarriles urbanos financiados con fondos federales, deben ser efectuado en los Estados Unidos, de acuerdo al modelo propuesto por la Federal Transit Administration (FTA). El modelo empírico de predicción incluye tres componentes fundamentales: el nivel de densidad de fuerza para fuentes lineales, la transferencia de movilidad para la fuente lineal, y una tercer componente que incluye ajustes relacionados con el acoplamiento de la fundación de edificios y amplificación/reducción de vibración hacia los pisos superiores de la estructura. Las ecuaciones (1) y (2) presentan el modelo fundamental de predicción propuesto por FTA y utilizado durante la evaluación de impactos. Estudios describiendo la exactitud de este modelo de predicción ha sido investigado anteriormente por Carman, Wolfe y Reyes [2], [3], [4].

$$L_v = L_f + TM_{linea} + C_{edificio} \quad (1)$$

$$L_A = L_v + K_{rad} + K_{A-wt} \quad (2)$$

El nivel de densidad de fuerza presentado en la ecuación (1) es característico del tipo de vehículo, así por ejemplo, el nivel de fuerza de un tren liviano es distinto de uno considerado pesado. Además, la fuerza transmitida por la fuente vibracional es función de la velocidad del tren, la suspensión primaria de los coches y el sistema de soporte de rieles entre otras variables. Por lo tanto, se espera niveles de vibración mayores para velocidades altas que velocidades bajas y para diseños de sistemas con soporte de rieles rígidos que elásticos o simplemente rieles sobre balastos. Otras de variables que intervienen en las ecuaciones anteriormente presentadas, tienen relación con el tipo de suelo y tipo de edificio.

El criterio de evaluación empleado en el análisis, también corresponde al recomendado por FTA. El criterio actual de evaluación de vibraciones es basado en el análisis espectral de frecuencia, similar el criterio de ANSI S2.29, mientras que el criterio de ruido transmitido por estructuras, es basado en el nivel de presión sonora con ponderada de A.

El trazado evaluado corresponde a una categoría de trenes frecuente de acuerdo a lo estipulado en el modelo de FTA, es decir más de 70 eventos por día. Basado en el tipo de uso de suelo, el criterio de ruido aplicable al proyecto era de 35 o 40 dBA.

El análisis inicial de vibración y ruido transmitido por estructuras del proyecto de extensión, arrojó niveles por debajo del criterio de vibración recomendado. Sin embargo, identificó áreas del trazado con receptores sensibles (por ejemplo áreas residenciales) donde existía potencial de impacto producto del ruido transmitido por estructuras. WIA recomendó medidas de mitigación iniciales durante el proceso de ingeniería preliminar. A su vez propuso realizar un análisis más detallado durante ingeniería final. Durante PE se identificó que era factible mejorar el modelo de predicción, incorporando los datos obtenidos durante PE y acumulados hasta ese momento. Cabe mencionar que normalmente en trabajos de considerable extensión como éste, y debido a las limitaciones en el costo de la evaluación, sólo se realiza mediciones en áreas representativas, determinada con antelación. Por lo cual muchas veces problemas locales como por ejemplo, suelos de alta conductividad a las vibraciones, no son encontrados sino hasta después de analizar los resultados.

El estudio adicional, aprobado por el equipo de diseño, incluyó mediciones del comportamiento del suelo a las vibraciones en una zona donde la profundidad del trazado original había sido modificada. Además se aprobó mediciones de la respuesta a vibraciones de edificios residenciales. Este último representó la oportunidad para WIA de utilizar en el modelo de predicción, respuestas de amplificación específicas para aquellas residencias.

Paralelamente, el equipo de diseño solicitó la evaluación de medidas adicionales de mitigación a las ya inicialmente recomendadas. Las medidas adicionales eran específicamente enfocadas en reducir el nivel de ruido transmitido por estructuras por debajo del criterio máximo permitido por FTA.

Dos medidas de mitigación fueron recomendadas durante la primera etapa de investigación: soportes de alta elasticidad y losa flotante. Mitigaciones adicionales incluyó el análisis de un sistema de durmientes elásticos modificado, que incorpora un soporte de goma moldeado con bota fina y un bloque 30 % más ancho. También se evaluó el producto Delta Track Fastener (DTF) comercialmente disponible por Advance Track Products (ATP), el modelo Panguard o Vanguard comercializado por Pandrol y finalmente una estructura denominada Isolated Slab Track (IST), consistente de una losa de concreto aislada de la base del túnel utilizando un producto similar al Ballast Mat.

Una vez finalizado el trabajo de ingeniería preliminar, un estudio teórico fue efectuado por J. T. Nelson para determinar los niveles de reducción esperados para sistemas originales y modificados de soportes elásticos de rieles. Resultados del modelo son presentados brevemente en este trabajo.

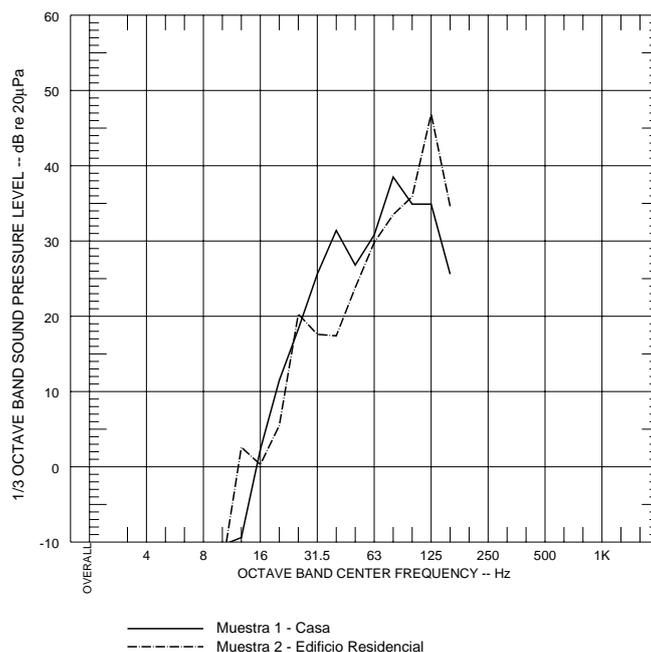
### **3 Medidas de Reducción Originales**

El ruido transmitido por estructuras provocadas por túneles de mediana profundidad presentan un pico de nivel en frecuencias alrededor de los 50 a 100 Hz y tal vez hasta los 200 Hz. La figura 1 muestra el espectro de frecuencia típico proyectado al interior de casas y edificios residenciales cercanos al trazado subterráneo. Los niveles presentados en la figura, corresponden a la condición básica de diseño, es decir, con un sistema de soporte de rieles, comercialmente denominado, de baja vibración or LVT por sus siglas en inglés.

La agencia de transporte del área de la bahía de San Francisco, adoptó LVT como el sistema de soporte de rieles básico en sus diseños, no sólo por su aparente reducción del ruido transmitido por estructuras (comparado con sistemas de rigidez mayor), sino que también por la disminución en la ruptura de clips y pernos de anclaje experimentados. El sistema LVT utiliza una bota sin-costillas y un soporte de bloque elastomérico del tipo HDPE.

Instalaciones de este producto han sido efectuadas en sistemas de transporte de los Estados Unidos, Brazil, y Hong Kong. El sistema LVT original provee una reducción de los niveles de vibración a partir de 63 Hz. Sin embargo, el nivel total de reducción de ruido transmitido por estructuras esperado no era muy elevado (aproximadamente 1 a 2 dBA), cuando se compara con un sistema de mayor rigidez dinámica (por ejemplo uno de 61 MN/m).

Los niveles de ruido transmitido por estructura proyectados inicialmente con el sistema LVT original, excedían hasta 12 dBA por sobre el criterio de ruido. Por lo tanto, se evaluó sistemas de soporte que aportará una mayor reducción de los niveles de ruido por sobre los 63 Hz.



**Figure 1.** Espectro de frecuencia típico proyectados con el sistema de fijación original.

Un de los sistemas evaluado inicialmente fue el sistema de fijación de soporte de alta elasticidad. Uno de los sistema de soporte de alta elasticidad conocidos por su exitoso funcionamiento en los Estados Unidos es el producto de Advance Track Products (ATP) tipo Egg. El sistema Egg es un soporte con rigidez estática de aproximadamente 14,5 MN/m y una relación entre la rigidez dinámica y estática de aproximadamente 1.25. Este sistema ya habia sido instalado en unos de los proyectos de extensión más recientes en el área de la bahía de San Francisco.

Mediciones del funcionamiento de este sistema habian sido efectuadas durante el estudio previo a ingeniería de diseño por ATS Consultant y Wilson, Ihrig & Associates, por lo que se esperaba una atenuación de aproximadamente 5 a 6 dBA con respecto al sistema LVT original. Esta reducción de niveles de ruido permitiría disminuir el impacto sobre la gran mayoría de receptores ubicados en las inmediaciones del trazado. Sin embargo, aún existiría aproximadamente 20 receptores en donde los niveles de ruido estarían por sobre el criterio establecido.

El sistema de losa flotante reduciría los niveles de ruido transmitidos por estructura a un nivel muy por debajo del criterio de 35 dBA. El sistema de losa flotante proveía una reducción de aproximadamente 18 dBA para este proyecto. Sin embargo, significaba una

medida de mitigación de un costo muy elevado por lo que no representaba una medida de control atractiva para el equipo de diseño. El beneficio de una losa flotante es mayor reduciendo niveles de vibración en donde las frecuencias críticas son mucho menores a 50 Hz. Así por ejemplo, diseños de losas flotantes con frecuencia de resonancia de 8 a 16 Hz han probado ser muy efectivos reduciendo vibraciones de sistemas de transporte subterráneos en America del Norte como por ejemplo Washigton DC, San Francisco, Atlanta y Toronto, Canada.

### 3.1 Medidas de Reducción Adicionales

Otras medidas evaluadas durante la etapa de ingeniería preliminar incluyó un sistema modificado de soporte elástico original denominado LVT de alta atenuación (LVTAA). El sistema de LVTAA fue desarrollado originalmente para el sistema de Metro de Hong Kong en el año 2002. Modificaciones al diseño original adoptado para ese proyecto, incluyó el rediseño de la bota, un soporte del durmiente de concreto más elástico y además un bloque de inercia más grande. Sin embargo, datos de reducción existente eran sólo los proveidos por el fabricante, por lo que se recomendo efectuar un analysis para el proyecto incluyendo parámetros específicos del tipo de tren y rieles.

Otro sistema de atenuación evaluado fué el de losa aisladas (IST). El sistema IST consistente de una losa de concreto por sobre una carpeta elástica instalada en la base del túnel. Este sistema es bastante común en Europa y ha sido utilizado en lugares como Toronto y Sao Paulo. IST es de menor espesor que la losa flotante, lo que representaba una ventaja comparativa para este proyecto respecto de la losa flotante, ya que modificaciones de altura interior del túnel no hubiese sido necesarias para acomodar una losa de mayor espesor. Es diseño potencial evaluado para este proyecto, era constituido por una losa de concreto de 0.254 m a 0.30 m sobre un paño elástico como el Sylomer fabricado por Getzner o Ballast Mat. La reducción de vibraciones del sistema de IST fue estimado en 10 y 14 dBA. Sin embargo, esta reducción fué basada en un resultado preliminar por lo que se recomendó un analisis específico para el proyecto.

### 3.2 Estudio Teórico Adicional

Un estudio teórico adicional fue realizado por Nelson, J. T. [5]. La finalidad de este estudio fué determinar de una manera mas acabada el funcionamiento uno de los sistemas de soportes elásticos recomendados. El estudio teórico incluyó un modelo de 22 grados de libertad para el coche y un modelo idealizado para cinco soportes discretos elásticos de rieles. El modelo incluyó parametros para representar no solo el sistema de soporte LVT original, sino que el sistema estandard LVT (es decir, con aletas), LVT de alta atenuación (LVT\_AA), un sistema LVT de alta atenuación pero con un paño de bloque muy suave (LVT\_AAPS) y además, dos configuraciones de fijación directa. Estos últimos tipificados como un resorte elastomérico aglutinado a una placa superior e inferior. Ejemplos de los sistemas de fijación directa estudiados son el LBF F36 de Foster y el tipo Egg de Advance Track Products.

Nelson estudió dos modelos mecánicos de representación: modelo completo y el modelo simplificado. La figura 2 (izquierda) muestra una representacion gráfica del modelo completo utilizado. En ella se ve la incorporación al modelo de masas representando el marco de inercia, motor, eje y ruedas, además de las suspensiones primarias y secundarias del coche sintonizadas en 25 Hz y 2 Hz respectivamente.

En el diseño de soporte de rieles, Nelson assumió una separación entre soportes de 0.761 m y un riel de masa por unidad de largo de 59 kg/m tipo 115RE. La frecuencia de resonancia del bloque de inercia ( $F_c$ ) esta dada por la ecuación (3), donde K es la rigidez paralela combinada de los paños de riel y soporte principal, y M es la masa del bloque.

$$F_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{3}$$

La frecuencia de resonancia típica del bloque de inercia es aproximadamente 100 Hz. Esta resonancia, amplifica la fuerza aplicada en la base del túnel. Otra frecuencia de resonancia de interés es la producida por la masa del riel y del bloque. Esta frecuencia esta dada por la formula (3) con K igual a la rigidez del paño principal y M igual a la suma de las masas del bloque y el riel. Normalmente esta frecuencia es menor que la frecuencia del bloque, pero puede ser relativamente alta (del orden de 90 a 150 Hz).

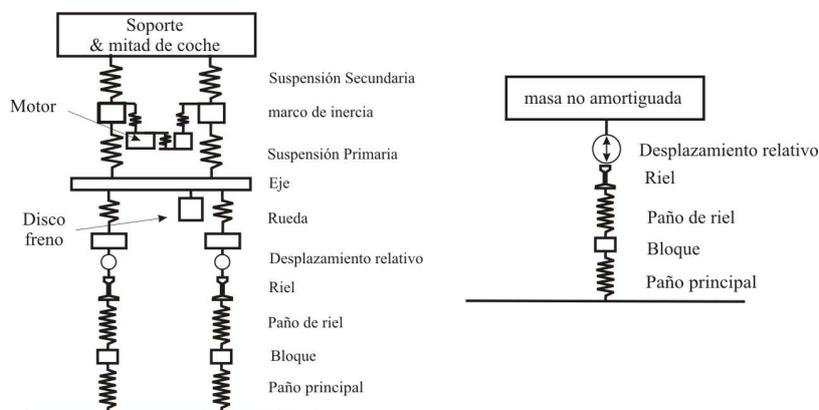
Tabla 1 siguiente muestra los resultados de frecuencia de resonancia obtenidas con cada configuración evaluada.

**Tabla 1.** Frecuencia de resonancia estimada del sistema de soporte de riel.

	Frecuencia de Resonancia del Sistema de Soporte de Riel [Hz]					
	LVTO	LVTSTD	LVTAA	LVTAPS	F36	Egg
Bloque	291	261	215	209	2069	2004
Riel + Bloque	139	93	60	42	177	84

El modelo completo empleó soluciones exactas resultante de la teoría de Bernoulli-Euler de viga soportada en nodos. Los cálculos fueron efectuados con el programa computacional DFTRACK de propiedad de WIA. El modelo es capaz de modelar vibraciones en rieles para frecuencias altas arbitrarias, incluyendo los modos "pinned-pinned". Las variables obtenidas por el modelo incluyo la transmisibilidad de la fuerza que representa la fuerza neta transmitida a la base del túnel por todas las fijaciones divididas por la carga del riel, la conformidad del riel que es el desplazamiento del riel en respuesta a cargas puntuales, y las fuerzas transmitidas.

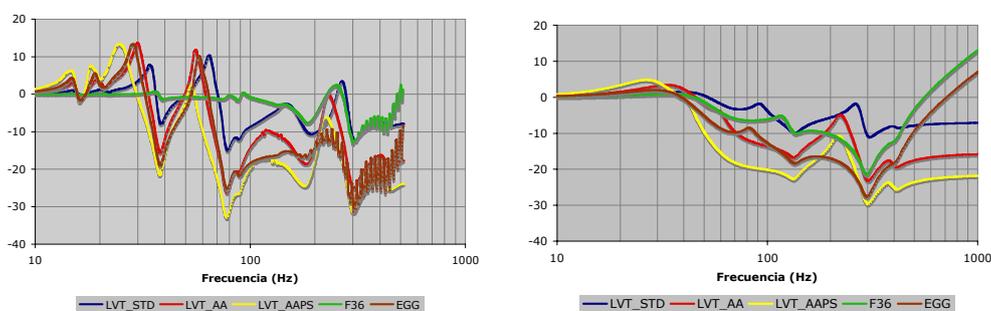
Paralelamente al modelo anteriormente descrito, un modelo simplificado fue desarrollado para representar la interacción rueda/riel. El modelo representa el soporte de rieles como una carga continua, dividiendo la impedancia de entrada del soporte de riel por el ángulo del soporte. El diagrama de la derecha en Figura 2 muestra el modelo simple asumido en el análisis. La Figura 2 muestra una masa simple sin resorte representando la masa de la rueda, disco de freno, y la mitad de masa del eje en vez del sistema de multi-grado de libertad presentado en el esquema de la izquierda.



**Figura 2.** Esquemas del modelo completo (izquierda) y el modelo simplificado (derecha)

Los resultados obtenidos por el autor con el modelo completo y simplificado son presentados en la Figura 3 a la izquierda y derecha respectivamente. La figura muestra la fuerza de vibración neta transmitida a la base del túnel para las diferentes configuraciones evaluadas con respecto al sistema LVT original. En la figura se muestra claramente que los soportes más elásticos proveen una mayor aislación a vibraciones superiores a 30 Hz. Incluso el soporte standard (F36) aparentemente provee reducción en frecuencias superiores a 50 Hz relativo a los sistema LVTSTD y LVT original. También se identificó que a medida que aumenta la elasticidad del paño principal de soporte, la fuerza transmitida a la base del túnel se reducía. Los sistemas de soporte Egg y LVTAAPS proveen la mayor atenuación en el rango de frecuencias de 40 a 70 Hz.

Ambos modelos muestran una amplificación en la región de bajas frecuencias (menores a 40 Hz), sin embargo la amplificación proyectada por el modelo completo alcanza hasta los 13 dB, mientras que solo 5 dB es mostrada por el modelo simplificado. Esto podría sugerir que realmente podría existir una amplificación en la región de frecuencias menores a 50 Hz y que el nivel de amplificación podría estar entre los dos valores proyectados por el modelo completo y el simplificado. Es decir, se podría esperar una amplificación de 8 a 9 dB.



**Figure 3.** Resultados del nivel de vibración relativo al soporte original de LVT con el modelo completo (izquierda) y el modelo simplificado (derecha)

Los resultados y recomendaciones del análisis presentado durante ingeniería preliminar no incluyó medidas de control con los datos obtenidos del modelo teórico. Sin embargo, al re-analizar el trazado con las nuevas medidas alternativas aquí presentadas, nos indica que el sistema de LVT\_AAPS podría eliminar todos los impactos de ruido transmitido por estructuras a lo largo del trazado. Sin embargo, producto de la amplificación esperada en la zona de baja frecuencias (alrededor de 30 Hz), podría resultar en un incremento de los niveles de vibración, incluso a niveles más altos que el criterio establecido.

#### 4 Conclusiones

El resultado de este estudio demostró que sistemas de soporte de rieles elásticos podrían ser utilizados en este proyecto para reducir completamente los impactos de ruido transmitido por estructuras.

Si bien sistemas de control como losas flotantes y losas aisladas (IST) representan sistemas de soporte de rieles probados de entregar una mayor reducción de los niveles de vibración no solo para frecuencias mayores a 50 Hz (importantes para controlar en el ruido transmitido por estructuras), sino que en frecuencias menores a 30 Hz (importantes para el control de la vibración). La desventaja es su mayor costo de instalación.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Nelson, el sistema de soporte con mejor funcionamiento para este proyecto sería la fijación suave denominado LVT\_AAPS con un

espaciamiento nominal menor o igual a 0.751 m. No obstante los resultados prometedores obtenidos del modelo teórico, estos deberán ser validados con mediciones en terrenos antes de ser recomendados con medida de mitigación definitiva para el proyecto.

## **5 Agradecimientos**

El autor desea agradecer al BART por autorizar la publicación de los resultados obtenidos por Wilson, Ihrig & Associates durante ingeniería preliminar del proyecto de extensión al Valle de Silicio. También desea agradecer a James Nelson por acceder a compartir los resultados obtenidos de su estudio teórico.

## **Referencias**

- Federal Transit Administration. "Transit Noise and Vibration Impact Assessment". FTA-VA-90-1003-06. May 2006.
- Carman R. A. "Rail Transit Groundborne Noise and Vibration Prediction Models – A Comparison of Predicted and Measured Data", paper presented at the American Public Transit Association June 1995 Rapid Transit Conference, New York, NY, USA.
- Wolfe S. L. "Prediction of Rail Transit Groundborne Noise and Vibration – A Case Study", paper presented at the A1F04 Committee Meeting of the Transportation Research Board, 1993.
- Carman, Richard; Reyes, Carlos. "Uncertainty of the in the FTA Groundborne Noise and Vibration Model, A Statistical Evaluation Based on a Case Study". Poster presented at the 8<sup>th</sup> IWRN, Buxton, England, 2004.
- Nelson, James T. "Track System Vibration Isolation Analysis". Silicon Valley Rapid Transit Project , Tunnel Segment, July 2007.