



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

FIA2008-A010

Aislamiento de vibraciones de trenes de pasajeros por medio de neumáticos triturados

DAROUX, Pablo A. ^(a),
WOLFE, Steven L. ^(b),

(a) Wilson, Ihrig & Associates, Inc., Consultores en Acústica y Vibraciones, 5776 Broadway, Oakland, California 94618. EEUU. E-mail: pdaroux@wiai.com

(b) Wilson, Ihrig & Associates, Inc., Consultores en Acústica y Vibraciones, 5776 Broadway, Oakland, California 94618. EEUU. E-mail: swolfe@wiai.com

Abstract

There are a number of methods for reducing groundborne vibration and noise transmitted from rail rapid transit and railroad lines to nearby buildings. This work presents the results from various field tests carried out to study the degree of vibration isolation attained when a layer of tire shreds is inserted under standard ballast. The results obtained indicate that the isolation benefits fall in between those obtained with commercially available ballast mats and floating slab trackbed, at a competitive cost with that of those alternatives. Its use also provides for a significant environmental benefit as it allows reuse of the approximately 253 million scrap tires generated each year in the United States, which is roughly equivalent to one scrap tire per person per year.

Resumen

Existen varios métodos para reducir los niveles de vibración y de ruido transmitido a través del suelo cuando éstos son originados por trenes de pasajeros. Este trabajo presenta los resultados de varias pruebas de campo realizadas para estudiar el grado de aislamiento de vibraciones a obtener cuando se instala una capa elástica compuesta por neumáticos de deshecho triturados que se coloca por debajo del balasto. Los resultados indican que los beneficios de aislamiento se ubican entre aquellos obtenidos con láminas de caucho aislantes de disponibilidad comercial y los obtenidos con sistemas de losas flotantes a un costo competitivo con esas alternativas. Su uso también trae un beneficio significativo para el medio ambiente ya que ayuda a reducir la contaminación producida por los más de 253 millones de neumáticos de deshecho que se generan en los Estados Unidos cada año, lo que equivale prácticamente a un neumático por persona por año.

1 Introducción

En 1996 Associated Press (AP) informo que existen mas de 850 millones de neumáticos usados almacenados en vertederos (la mayoría a cielo abierto) en los Estados Unidos. Aproximadamente 253 millones de neumáticos de deshecho son generados cada año, lo que es equivalente a un neumático/persona/año aproximadamente. Aproximadamente el 72% de esos neumáticos son utilizados con algún fin útil como ser combustibles derivados del caucho, aplicaciones en ingeniería civil y la manufactura de productos con contenido de caucho. El resto continua acumulándose en pilas y hoyos. Con este gran inventario de neumáticos desechados se necesita encontrar usos adicionales para reducir los problemas ambientales que se generan como ser la combustión de el producto en los hoyos, el uso de valioso espacio en los vertederos de residuos y el daño visual al paisaje. Estos hechos motivaron que la Comisión de la Administración del Manejo de Deshechos de California (California Integrated Waste Management Board) se contactara con Wilson, Ihrig & Associates a través de su Consultor de Ingeniería, Dana N. Humprey para estudiar la posibilidad de que los neumáticos de deshechos triturados pudiesen ser utilizados para la reducción de ruido y vibraciones. Se determinó entonces que los neumáticos triturados de deshecho podrían tener aplicación prometedora como un método de mitigación de vibraciones producidas por trenes de carga y pasajeros y/o para el aislamiento de edificios completos contra las vibraciones transmitidas a través del suelo.

Para determinar objetivamente si el uso de estos neumáticos triturados es un método efectivo de mitigación y amortiguamiento de vibraciones se decidió efectuar una serie de pruebas de campo. Ya ha sido demostrado ampliamente que neumáticos que han sido triturados pueden utilizarse como material de relleno en obras civiles. Hasta la fecha se han utilizado principalmente en proyectos de autopistas como material de relleno liviano, de relleno convencional, como muros de contención, como material aislante del calor para limitar el espesor de la escarcha y también como relleno para sistemas de desagüe de lluvias a los costados o como capas de drenaje debajo de caminos. Este uso significativo de neumáticos de deshecho determino la creación de una norma ASTM (American Society for Testing and Materials) numero D 6270-98, "Practicas para el uso de neumáticos de deshecho en aplicaciones de ingeniería civil".

2 Primeras pruebas de campo

2.1 Organización y detalles

Las primeras pruebas de campo se realizaron utilizando dos terraplenes de relleno con dos secciones cada uno que consistió de una sección de control donde no se introdujeron neumáticos triturados y tres secciones de prueba con capas de distintos espesores y características. Tres fuentes de vibración móviles y una fuente estacionaria de impactos fueron utilizadas para determinar el grado de atenuación a proveer por cada una de las secciones de prueba en comparación con la sección de control. Las pruebas se llevaron a cabo en Mayo de 1999 en un sitio preparado especialmente dentro del relleno sanitario "Chicago Grade" en la ciudad de Templeton, California.

Los terraplenes de prueba fueron preparados siguiendo estrictas especificaciones de construcción. Se utilizaron 12 puntos receptores de vibración vertical en zonas adyacentes a la sección de control y las tres de prueba. El terraplén 1 estuvo compuesto por la sección de control y una de las secciones de prueba, llamada "Área A" la cual fue equipada con una capa de 15 cm. (0.5 pie) de relleno de neumáticos triturados de Tipo III que se caracterizan por

tener un espesor de partícula máximo de 75 mm. El terraplén 2 estuvo compuesto por dos secciones de prueba adicionales: “Área B” con una capa de espesor nominal de 30 cm. (1 pie) de neumáticos triturados de Tipo II con un espesor de partícula de 30 cm. (12 pulgadas) máximo y el “Área C” con una capa de espesor nominal de 30 cm. (1 pie) de neumáticos triturados del Tipo III. Ambos terraplenes fueron evaluados con 3 capas de tierra compactada y alisada de espesor incrementadamente mayor con espesores nominales de 30, 60 y 90 cm. (1, 2 y 3 pies).

Tres fuentes móviles de vibración fueron utilizadas: una topadora *Dresser TD25* (peso bruto bajo carga de 41.200 kg/91.000 libras), una excavadora *CAT 996F* (peso bruto bajo carga de 20.900 kg/46.096 libras) y un camión tanque de agua de 7.500 litros (2.000 galones) con un peso bruto cargado de 16.500kg/36.300 libras. El camión de agua y la excavadora fueron operados a dos velocidades en su paso sobre los terraplenes mientras que la excavadora fue operada a tres velocidades. Las velocidades fueron aproximadamente 8,4 kph/5,2 mph (“lenta”) y 15 kph/9,4 mph (“rápida”) para el camión de agua, 5,2 kph /3,3 mph (“lenta”), 10,1 kph/6,3 mph (“rápida”) para la excavadora y 3,4 kph/2,1 mph (“lenta”), 6,7 kph/4,1 mph (“mediana”) y 7,7 kph/4,8 mph (“rápida”) para la topadora.

Una fuente de vibración de impacto estacionaria fue utilizada también en 3 puntos a lo largo de la sección de control y de cada una de las 3 secciones de prueba. Los resultados obtenidos con la fuente estacionaria confirmaron los obtenidos con las fuentes móviles y por lo tanto no se discutirán mas en este trabajo.

2.2 Instrumentación utilizada y análisis de la información recogida

Transductores sensibles a la velocidad de vibración (geófonos) similares a los utilizados para prospecciones sísmicas fueron instalados en cada una de los 12 puntos de medición utilizando clavos similares a los usados para amarrar rieles a durmientes de ferrocarril. La señal de cada geófono fue condicionada, amplificada y grabada en un grabador de cinta digital (DAT) para su procesamiento posterior.

La información capturada de las fuentes móviles fue analizada por medio de un analizador de tiempo real de 1/3 de octavas. La atenuación de la vibración obtenida en cada una de las secciones de prueba puede entonces determinarse directamente por comparación entre los resultados obtenidos en esas secciones con los de la sección de control.

2.3 Resultados de las mediciones

Como ya se ha indicado arriba, la diferencia aritmética entre los niveles de vibración obtenidos en cada una de las tres secciones de prueba y la obtenida en la sección de control provee una lectura casi directa de el grado de atenuación o de “perdida de inserción” que proporciona cada una de las capas de neumáticos triturados. Durante el proceso de revista y promedio de la información recogida se observó que parece no haber diferencia significativa entre los resultados obtenidos con cada uno de los tres espesores de la capa de tierra que cubrió la capa de neumáticos triturados. Por esa razón, una comparación final fue hecha para cada una de las secciones de prueba utilizando promedios de los resultados obtenidos con cada uno de los espesores de tierra. En la comparación inicial, la información provista por las tres fuentes móviles en todas las velocidades que se evaluaron fueron promediadas para evaluar el comportamiento de las varias secciones estudiadas.

La atenuación promedio obtenida en base a las pruebas con las tres capas de tierra de cobertura de los neumáticos triturados indica que la mas significativa reducción de vibración ocurre en la región de los 31,5 Hz. Esta reducción del nivel de vibraciones es del orden de 10 dB. Cuando se consideran todas las varias combinaciones y permutaciones estudiadas,

resulta evidente que las capas de neumáticos triturados proveen una reducción consistente en el rango de frecuencias de aproximadamente 12 Hz a 100 Hz.

Una inspección más profunda indica que la vibración producida por la topadora en los puntos de medición mas cercanos proveyó las mayores diferencias entre niveles de la fuente y ambientales. Por ese motivo, el enfoque del análisis se basa principalmente en la información obtenida con la topadora donde la relación señal/ruido es mas favorable a través del rango de frecuencias de interés. La figura 1 presenta ejemplos de el espectro de frecuencias típico que se observó en el sensor ubicado a 7,6 m (25 pies) del eje de recorrido de la topadora cuando pasaba por cada una de las secciones de prueba y la de control operando a la velocidad “media”. La vibración creada por la topadora es claramente perceptible a la distancia de prueba de 7,6 m y posee componentes de frecuencia que son predominantes en el tercio de octava correspondiente a 20 Hz. La figura 2 indica que la atenuación o perdida por inserción se extiende desde aproximadamente 6 Hz a 200 Hz.

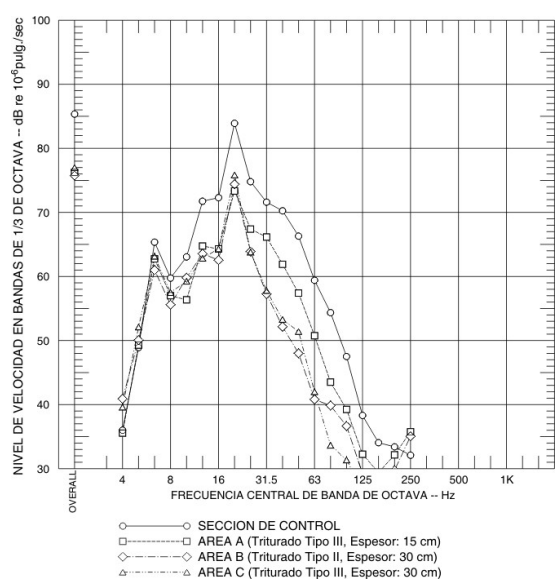


Figura 1: Comparación de niveles de vibración vertical generados por la topadora a 7,6 m.

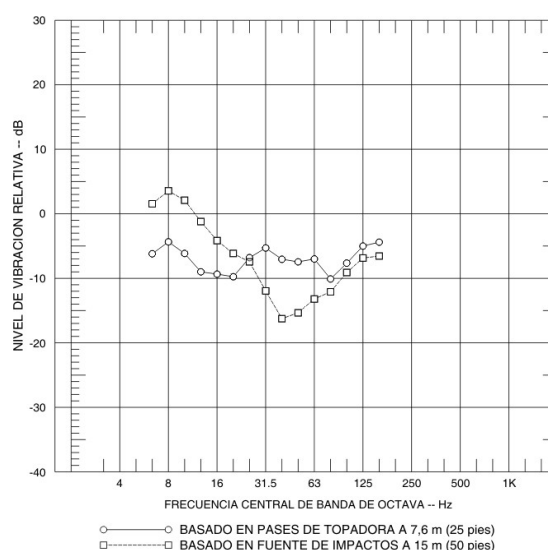


Figura 2: Atenuación o perdida por inserción promedio. Área A. Topadora y fuente de impactos

2.4 Resumen de los resultados

Una inspección detallada de la información presentada en la figura 2 indica que las propiedades de atenuación de vibraciones resultante de la capa de neumáticos triturados es favorable con respecto a la que se necesita para sistemas de transporte de pasajeros rápido.

Las propiedades de atenuación de los neumáticos triturados parecen ser muy buenas para la reducción de vibraciones de bajas frecuencias. Esta característica es bastante importante para aquellas zonas donde la reducción de vibración transmitida por el suelo es necesaria. Inclusive para aquellas zonas donde la litigación de ruido originado por vibraciones transmitidas por suelo (a frecuencias por arriba de 30 a 40 Hz), el uso de neumáticos triturados parece proveer una reducción significativa de la vibración, la cual resultaría en una reducción correspondiente del ruido debido a vibraciones.

A pesar de que los resultados obtenidos indican que el uso de neumáticos triturados como método de mitigación aparentemente es practico y provee una reducción significativa,

se decidió investigar mas profundamente el tema con un segundo grupo de pruebas de campo antes de la implementación de una aplicación practica en un sistema de transito urbano.

3 Segundas pruebas de campo

Las segundas pruebas de campo consistieron en la instalación de una capa de neumáticos triturados por debajo de una configuración típica de vías de ferrocarril urbano con balasto y durmientes. La empresa de transportes del condado Californiano de Santa Clara (*Santa Clara Valley Transportation Authority – VTA*) necesitaba implementar algún sistema de mitigación de vibraciones en la zona de extensión del corredor *Vasona*, que pasa muy cerca de casas ya existentes. Por lo tanto se le propuso construir una sección de vías de prueba en el sitio de mantenimiento que la empresa posee en la ciudad de San José. Las pruebas de campo se hicieron utilizando una sección de 24,3 m (80 pies) de largo de prueba y otra de igual longitud a ser utilizada como de control. La fuente de vibración consistió de un vehículo articulado de ferrocarril liviano (*Light Rail Vehicle - LRV*) el cual fue operado a tres velocidades para determinar el grado de atenuación típico de la sección de prueba con respecto a la sección de control.

Las pruebas de campo fueron efectuadas en Febrero de 2001. Pruebas de tensión bajo deformación del riel (*rail strain*), y durmiente y de corrientes desviadas (*stray currents*) también fueron llevadas a cabo por otros investigadores como parte de un estudio mas exhaustivo de los varios factores que resulten debido a la introducción de este novedoso método de mitigación en la construcción de sistemas de transporte de pasajeros.

3.1 Organización de las pruebas y detalles

A pesar de que la construcción de una sección de vías de prueba mas larga hubiese sido deseable, la longitud de la sección de prueba fue determinada por la longitud de rieles disponible dentro del espacio de tiempo disponible para obtener los resultados de las pruebas de campo. La sección de prueba fue construida con una capa de 30 cm. (1 pie) de neumáticos triturados de Tipo III (7,5 cm./3 pulgadas de tamaño típico) y la sección de control fue construida con una configuración típica de balasto y durmientes. Ambas secciones fueron ensambladas con rieles soldados continuos (*continuous welded rail – CWR*) y durmientes de concreto. Se utilizaron 14 puntos de medición de vibración en el eje vertical en la proximidad de las secciones de prueba y de control.

Un separador de tela fue utilizado para mantener la separación entre la capa de neumáticos triturados y el balasto. El borde de la capa de neumáticos triturados fue construido en forma diferente en cada uno de los lados de la vía. En el lado norte, la capa de neumáticos se extendió horizontalmente por debajo de las vías y fue luego continuada en un codo con dirección vertical ascendiente una vez pasado el borde del riel y los durmientes. En el lado sur la capa de neumáticos se extendió solamente hasta un punto 2,1 m (7 pies) del centro de vía. Esas diferencias en diseño fueron implementadas para determinar si existen diferencias en la prestación del sistema de aislamiento como resultado de la extensión de la capa de tal forma de evitar corto circuitos mecánicos y/o flanqueo de la vibración en la dirección horizontal.

La fuente de vibración fue el coche numero 840 que posee un peso nominal vacío de 45.000 kg (98.700 libras). El coche fue cargado con pesos que simularon el de los pasajeros, resultando en un peso total de 53.800 kg (118.700 libras). Se lo hizo operar en ambas direcciones a velocidades de 16, 24 y 32 kph (10, 15 y 20 mph). Velocidades mas altas no fueron posible debido a la necesidad de detener el vehículo con un margen de seguridad antes

de que entre en secciones de curvas al fin de las secciones de prueba. Los métodos de instrumentación y análisis utilizados fueron los mismos utilizados en las primeras pruebas.

3.2 Resultados

La figura 3 presenta los resultados de la atenuación o pérdida de inserción promedio en la sección de prueba en comparación con la sección de control para cada uno de los dos lados (norte y sur) de todas las velocidades y para todas las distancias estudiadas. Un examen de la información presentada en esta figura revela que la capa de neumáticos triturados es muy efectiva en la región de frecuencias de 31,5 Hz y superiores y que lo es marginalmente dentro del rango de frecuencias de 12,5 Hz hasta 31,5 Hz aproximadamente. A pesar de que el desempeño a esas frecuencias bajas no es tan efectivo como resultó en el primer grupo de pruebas de campo, no es sin embargo un resultado inesperado debido a las restricciones impuestas por el diseño del riel. Debido a que los resultados están basados en una sección de prueba de solamente 24 m, es posible que el grado de atenuación sea mejor a muy bajas frecuencias en secciones de vía mas largas. El resultado que muestra la figura 3 indica que parece haber un beneficio en la extensión de la capa de neumáticos mas allá de 2,1 m del eje central de vía y creando un codo hacia arriba en el rango de frecuencias mayor a los 63 Hz aproximadamente.

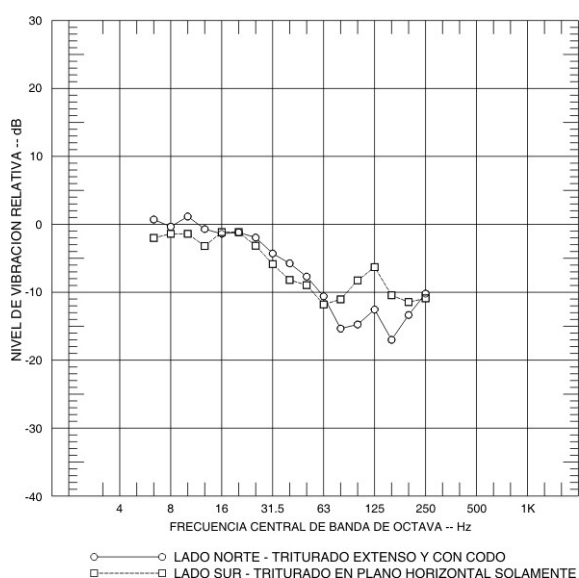


Figura 3: Atenuación promedio en la zona de prueba de VTA. Tren operado en ambas direcciones y a 3 velocidades distintas. Promedio de resultados a todas las distancias medidas

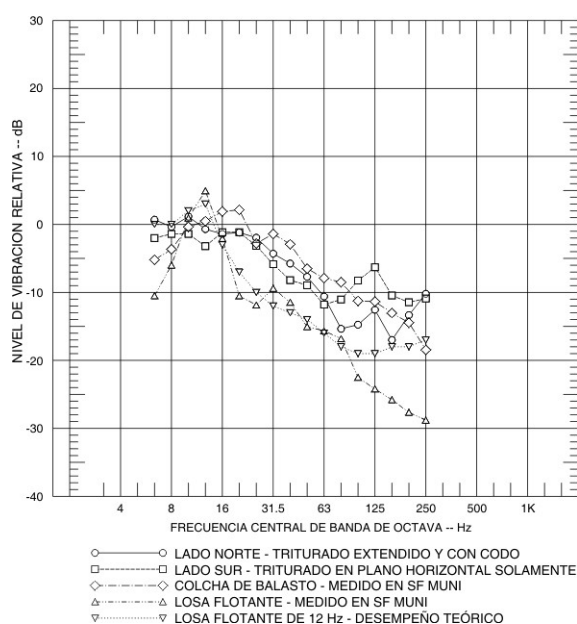


Figura 4: Comparación entre la mitigación observada con neumáticos triturados y con otros métodos de mitigación corrientes

4 Comparación con otros métodos de mitigación de uso corriente

Los dos sistemas de aislamiento de vibraciones mas similares a los neumáticos triturados son las colchas de balasto (*ballast mat*) y las losas de aislamiento flotantes (*floating slab trackbed*). La colcha de balasto es un material sintético o de caucho natural que se aplica por debajo de la capa de balasto en la cual descansan los durmientes y las vías. Es

generalmente continua, pero puede tener huecos dentro de sí, y posee un espesor de entre 2,5 y 5 cm. (1 y 2 pulgadas). Su efectividad solo comienza a partir de frecuencias de 30 Hz, dependiendo de los detalles de la instalación. Una instalación de colchas de balasto con base de concreto tiene un costo de aproximadamente US\$ 650 por metro adicional al costo de balasto y durmiente tradicional.

Otro método de mitigación de uso corriente es el sistema de losas flotantes, en el cual las vías se amarran a una losa de concreto la cual esta soportada por medio de tacos de goma. Este sistema de aislamiento puede ser diseñado para que resuene a una frecuencia en particular por lo que la aislamiento comienza (por lo menos en la teoría) a $\sqrt{2}$ multiplicado por la frecuencia de resonancia del sistema. Por lo tanto, usando una combinación apropiada de tamaño de taco de goma y espesor de losa se puede diseñar un sistema de losa flotante que posea las propiedades de aislamiento necesarias. Instalaciones de losa flotante tienen un costo adicional típico de aproximadamente US\$ 1 600 por metro por sobre el costo de balasto y durmiente tradicional.

Por supuesto, el método de aislamiento exacto dependerá de muchos factores, incluyendo las características del vehículo que transitara sobre esos rieles, las del suelo y la proximidad y tipo de uso de edificios cercanos a las vías. Sin embargo, en general, si el sistema de aislamiento de vibración puede proveer por lo menos 10 dB de reducción por arriba de alguna frecuencia en particular se lo considera apropiado en base a circunstancias particulares. Por lo tanto, si se necesita aislamiento de frecuencias superiores a los 30 Hz aproximadamente, el uso de colchas de balasto seria apropiado. Por otro lado, si se requiere una reducción significativa por arriba de 18 o 20 Hz, entonces el uso de un sistema de losa flotante de resonancia a aproximadamente 12 Hz seria adecuado.

La figura 4 compara las propiedades de atenuación medidas en el campo de neumáticos triturados con la de varios tipos de medidas de mitigación que fueron consideradas para la el corredor Vasona de VTA. El desempeño de la losa flotante de 12 Hz es teórico, mientras que el de la colcha de balasto y de la otra losa flotante fueron medidos en el sistema de San Francisco (*San Francisco Municipal Railway – Muni*) utilizando vehículos livianos (*Light Rail Vehicles – LRV's*) o coches PCC. La comparación es general en lo que se esperan desempeños similares en otros sistemas de transito, dependiendo por supuesto de los parámetros particulares de cada caso. La losa flotante de Muni tiene una frecuencia de resonancia de 12 Hz y la colcha de balasto es una “Clouth Vibrex” de 2,54 cm. (1 pulgada) de espesor nominal y está compuesta por una caja de concreto para el balasto con cama de concreto. Una inspección de los resultados presentados en la figura 4 indica que las propiedades de aislamiento provistas por neumáticos triturados parece estar entre medio de la que poseen las colchas de balasto y las losas flotantes con frecuencias de resonancia de 12 Hz.

En general, el uso de neumáticos triturados como capa base de aislamiento debajo de un sistema de balasto y durmientes convencionales parece ser practico y factible.

5 Otras propiedades de la vía

Además del el enfoque principal del estudio sobre los beneficios de neumáticos triturados con respecto a la reducción de vibraciones, se realizaron además otros estudios adicionales para determinar la factibilidad de su uso bajo balasto y durmientes convencionales. Mencionamos esos estudios brevemente a continuación.

5.1 Deformación de riel (*rail strain*) y de durmientes

En general, la deformación observada del riel fue mayor en la sección de vía de prueba que en la sección de control donde se uso una construcción convencional. Sin embargo, la

deformación provocada por el vehículo LRV fue menor que la producida por la contracción y extensión debida a cambios de temperatura. Por lo tanto se dedujo que la deformación es muy pequeña y se espera que tendrá un efecto muy poco significativo durante la operación del sistema de tránsito. La deformación demostró ser elástica, por lo que el riel retorna a su posición inicial luego de pasar el vehículo. La magnitud de la deflexión observada fue menor de 5 mm (0,2 pulgadas). Se observó un pequeño asentamiento permanente del durmiente en la sección con neumáticos triturados. Esto puede haberse debido a la forma en que se instaló la capa de neumáticos. Por otro lado, esto también puede significar que vías con bases de neumáticos triturados puedan necesitar alineamientos más frecuentes que configuraciones convencionales de balasto y durmientes.

5.2 Corrientes desviadas (*Stray currents*)

El impacto que pueda tener los neumáticos triturados por debajo de una instalación de balasto y durmientes en la fuga de corrientes desviadas es de gran importancia para los operadores de sistemas de transportes y los proveedores de servicios para sistemas domiciliarios como ser gas, electricidad y agua debido a la posibilidad de que estas corrientes se incrementen. Sin embargo se espera que el impacto en estos servicios sea insignificante debido a la separación que existe entre la capa de neumáticos y el balasto y durmiente. El parámetro eléctrico principal asociado con corrientes desviadas es la resistencia entre el riel y la tierra. El sistema de amarre de riel por lo general controla esta característica que en un sistema de balasto y durmiente está determinado por el aislador que se utiliza por debajo del amarre de riel y por el gancho aislante tipo Pandrol que se usa. Entre la capa de neumáticos triturados y el riel existen dos capas adicionales de material con alta resistividad, el balasto y el sub-balasto, los que separan el riel de los neumáticos en una distancia de por lo menos 60 cm. (24 pulgadas). Además, se ha utilizado una capa de tela para separar las capas y proteger contra una posible migración del balasto.

Los resultados de las pruebas indicaron que los valores de resistividad de la capa de neumáticos triturados se ubica muy por debajo de los valores medidos para la capa de balasto y sub-balasto de piedra con valores entre 15 y 38 veces menor. A pesar de que esto parece ser una diferencia dramática, los valores medidos de la capa de neumáticos son equivalentes a los que poseen los suelos nativos en la zona de características levemente corrosivas y por lo tanto no causaran degradación de la actividad de las corrientes desviadas asociada con las vías. Las mediciones de resistividad de los neumáticos indican valores de entre 2 y 5 veces la del suelo nativo. Por lo tanto esta resistividad mayor de los neumáticos ayudara a reducir el flujo de las corrientes de fuga desviadas.

Referencias

- American Society of Testing and Materials (ASTM) Designation D 6270-98, "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications", Approved June 10, 1998, Published August 1998.
- "Vibration Attenuation Performance of Tire Shred Underlayment for Light Rail Transit Ballast and Tie Track – Results of Field Tests", prepared by Wilson, Ihrig & Associates, Inc. for Santa Clara Valley Transportation Authority, April 2001
- "SCVTA Vasona Corridor: Vibration Study for Final Design", Final Report, prepared by Wilson, Ihrig & Associates, Inc. for Santa Clara Valley Transportation Authority, 18 January 2001.