

# Protótipo para homologação em laboratório do sistema massa-mola da via permanente da Linha 5-Lilás

TIAGO JULIANI\*, LUCAS JULIANI\*\*

## INTRODUÇÃO

A Linha 5-Lilás do Metrô de São Paulo tem, aproximadamente, 20 km de extensão, iniciando na Estação Capão Redondo e terminando na Estação Chácara Klabin. Por ser uma linha urbana, seu traçado se desenvolve ao longo de regiões densamente povoadas do município de São Paulo, as quais possuem hospitais, escolas, laboratórios de exames clínicos, teatros, residências, escritórios etc. Conseqüentemente, uma grande preocupação resultante deste tipo de empreendimento são as questões das emissões de vibrações e ruídos pelas passagens dos trens na via permanente, uma vez que os usuários das edificações lindeiras à linha podem ser afetados e seu conforto comprometido.

Por essa razão, durante o projeto da su-

perestrutura da via permanente o sistema de atenuação de vibrações e ruído secundário deve ser desenvolvido para que os níveis nas edificações fiquem abaixo dos prescritos pela especificação técnica do Metrô e/ou normas vigentes. O conceito deste projeto se baseia em um sistema dinâmico de um grau de liberdade, em que a frequência natural é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dessa maneira, como  $k$  é a rigidez dada pelos apoios da laje da via e  $m$  é a soma de todas as massas constantes (laje, fixações, massa não-suspensa do trem), o sistema de atenuação de vibrações e ruído secundário é denominado sistema massa-mola.

## SISTEMA MASSA-MOLA (SMM) NA LINHA 5-LILÁS

Ao longo do trecho entre as estações Adolfo Pinheiro e Chácara Klabin, há diversos segmentos de sistemas massa-mola com quatro frequências naturais distintas: 5 Hz, 6 Hz, 10 Hz e 14 Hz. Quanto menor a frequência natural, mais eficiente é a atenuação de vibrações, uma vez que o campo de frequências atenuadas é maior.

Para o dimensionamento da frequência natural do sistema, alguns parâmetros da fonte, meio e receptor são levados em conta. Para a fonte, relativa à interação veículo/via/túnel, o espectro de vibrações deve ser medido ou fornecido e é a partir dele que todo o cálculo se desenvolve. Para o meio de propagação, neste caso o solo, a geologia do terreno deve ser conhecida para que seus parâmetros vibracionais sejam estimados, enquanto que o receptor são as edificações lindeiras. Como ao longo do traçado da via há milhares de imóveis, são selecionados para análise aqueles com maior sensibilidade às vibrações, ou seja, aqueles que possuem os menores limites. Logo, fatores como distância em planta à via permanente, número de pavimentos, uso do imóvel e transmissibilidade de vibrações são levadas em conta para o dimensionamento do sistema massa-mola em determinado trecho. Para se obter a transmissibilidade de um imóvel, as vibrações são medidas simultaneamente em diversos pavimentos para que a relação "pavimento superior/pavimento inferior" seja obtida.

A figura 1 apresenta um esquema da propagação de vibrações pelo solo até uma edificação vizinha.

No caso do sistema de 5 Hz, sua aplicação se deu principalmente por causa de um aparelho de ressonância magnética localizado no Hospital São Paulo, situado na Rua Napoleão de Barros esquina com a Rua Pedro de Toledo. Para atender aos limites vibracionais fornecidos pelo fabricante do equipamento, um projeto especial e inédito no mundo teve de ser elaborado. No caso, além de uma laje maior, para aumento da massa, e de molas de rigidezes

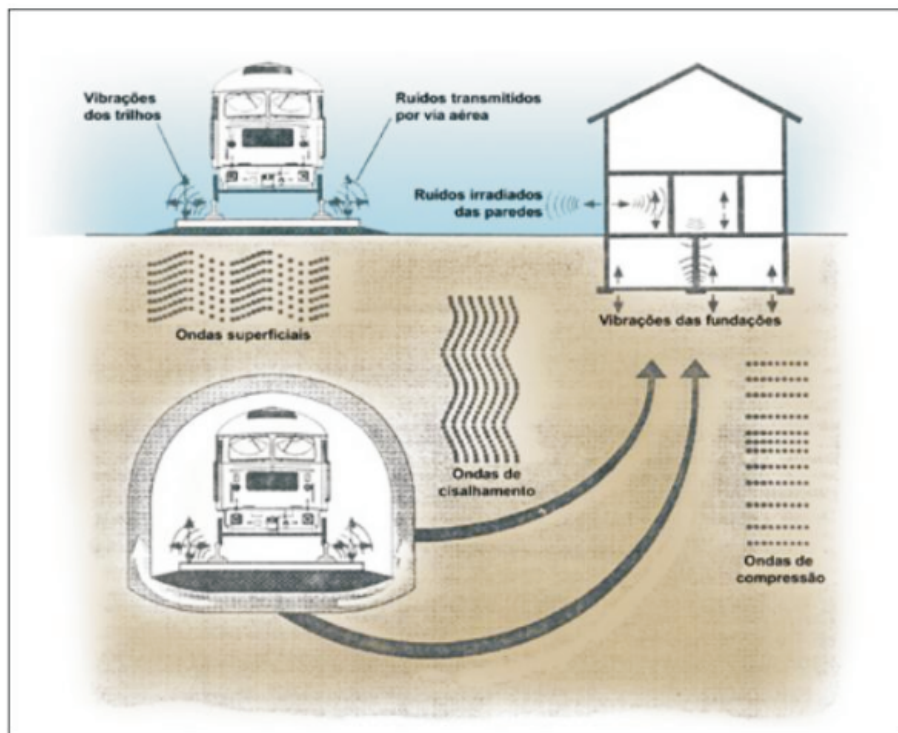


Figura 1 - Transmissão de vibração pelo solo

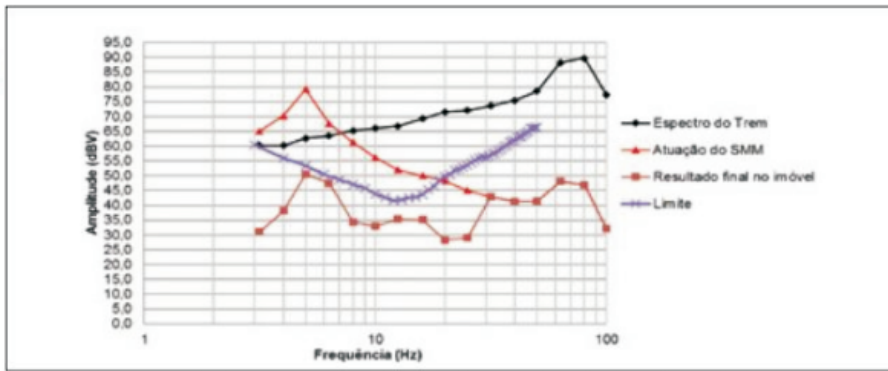


Figura 2 - Espectro de vibrações final no Hospital São Paulo após atuação do SMM

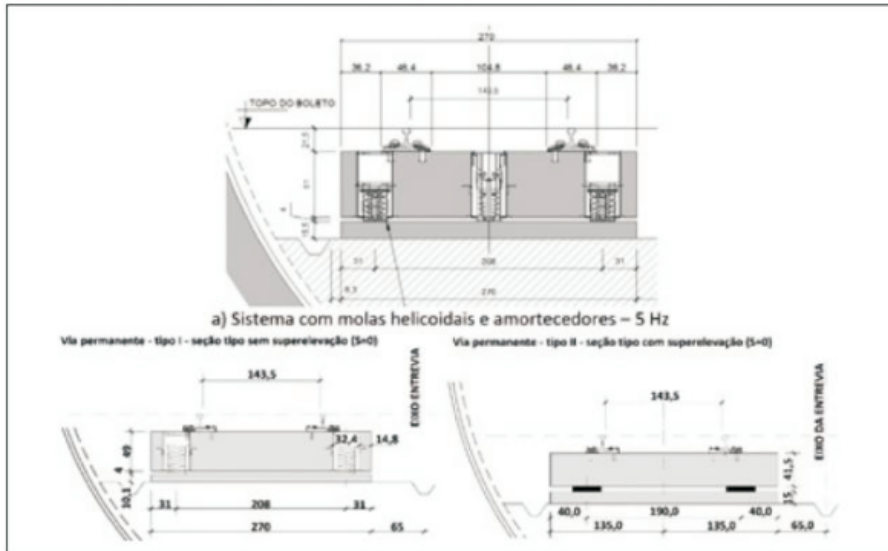


Figura 3 - Seções da via permanente com sistema massa-mola  
a) Sistema com molas helicoidais e amortecedores - 5 Hz  
b) Sistema com isoladores metálicos (molas helicoidais) - 6 Hz  
c) Sistema com PADs - 10 Hz e 14 Hz

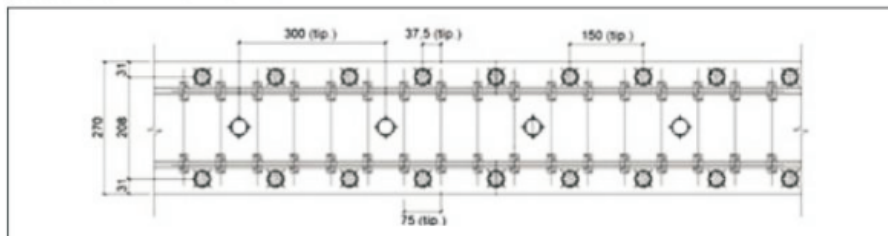


Figura 4 - Planta do sistema de via de 5 Hz

menores, para diminuição do  $k$  da via, foram necessários amortecedores hidráulicos com um líquido de alta viscosidade (polibuteno) espaçados a cada 3 m no eixo da via para aumento do amortecimento do sistema para 5%, enquanto que para os outros sistemas o amortecimento previsto foi de 2%. A figura 2 apresenta um gráfico contendo a previsão do espectro de vibrações final na sala do equipamento do hospital após a atuação do SMM.

Para cada imóvel selecionado para o cálculo da frequência natural dos sistemas massa-mola nos trechos de via, um gráfico semelhante ao da figura 2 é obtido. Como consequência, as rigidezes dos apoios da laje da via permanente são então definidas. Adicionalmente, as dimensões da laje também têm de ser definidas. Vale ressaltar que a via permanente com sistema massa-mola deve ter sua estabilidade garantida, para que a segu-

rança operacional não sofra nenhum prejuízo.

Na Linha 5-Lilás, dois tipos de materiais foram utilizados como apoio da laje permanente para fornecer as rigidezes necessárias: Isoladores metálicos amortecidos (molas helicoidais protegidas por carcaça metálica) para os sistemas massa-mola de 5 Hz e 6 Hz; PADs (materiais elastoméricos) para os sistemas massa-mola de 10 Hz e 14 Hz.

A figura 3 apresenta três seções de via com os sistemas massa-mola de molas helicoidais e de PADs.

Conforme especificação técnica do Metrô, todos os materiais envolvidos na construção da via permanente devem ser homologados. Logo, tanto as molas helicoidais quanto os PADs devem ter suas características e desempenho mecânico comprovados por ensaios prescritos por normas vigentes ou por procedimentos de teste aprovados pelo corpo técnico do Metrô.

## PROTÓTIPOS DE VIA COM SISTEMA MASSA-MOLA

Para a Linha 5-Lilás, além dos ensaios de homologação dos materiais, houve também a necessidade de se homologar a via permanente com sistema massa-mola como um todo. Para isso, foram construídos 3 protótipos de via permanente em escala real para que fossem realizados ensaios estáticos e dinâmicos, antes e depois da fadiga de 3 milhões de ciclos, de acordo com a norma italiana UNI 11389-3:2011, única no mundo para este objetivo. Sendo assim, os comprimentos de cada protótipo foram então definidos e são apresentados na tabela 1.

As seções dos protótipos e todos os materiais da via, como trilho, fixações e apoios da laje, são exatamente os mesmos da via permanente construída na Linha 5-Lilás. Como exemplo, a figura 4 apresenta a planta do protótipo de 5 Hz, onde é possível observar os pares de isoladores metálicos amortecidos espaçados a cada 1,5 m e os amortecedores hidráulicos a cada 3 m no eixo da laje.

A figura 5 apresenta fotografias dos protótipos.

O principal objetivo dos protótipos foi comprovar a eficiência do sistema massa-mola quanto à atenuação das vibrações, ou seja, verificar que a via permanente tinha as propriedades dinâmicas, frequência natural e amortecimento, conforme projeto. Além disso, o comportamento quase-estático também foi avaliado por ensaios com aplicação de carregamentos lentos nas direções vertical e transversal. Em suma, os ensaios realizados nos protótipos foram:

- Ensaio Quase-Estático com Carga Vertical
- Ensaio Dinâmico com Carga Senoidal Vertical
- Ensaio Dinâmico com Carga Vertical por Impulso
- Ensaio Quase-Estático com Carga Transversal
- Ensaio Dinâmico com Carga Senoidal Transversal
- Ensaio Dinâmico com Carga Transversal por Impulso
- Ensaio de Fadiga (carregamento repetido) - 3 milhões de ciclos

Conforme mencionado anteriormente, todos os ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados novamente após a fadiga. Desta forma, a variação dos resultados pode ser obtida para avaliação pela norma quanto ao envelhecimento dos componentes da via (trilhos, fixações, apoios das lajes).

Ao longo dos protótipos foram posicionados transdutores de deslocamentos e

Sistema	Comprimento do protótipo
5 Hz	11,70 m
6 Hz	13,20 m
10 e 14 Hz	13,20 m

Tabela 1 - Comprimento dos protótipos da via permanente

acelerômetros nas duas laterais da laje e sobre os dois trilhos. Assim, nos ensaios quase-estáticos os deslocamentos da laje e dos trilhos são obtidos nas direções vertical e transversal pela aplicação de três ciclos de carregamento. A figura 6 apresenta fotografias do ensaio quase-estático.

Como exemplo, a figura 7 apresenta para a direção vertical os três ciclos de carregamento e a histerese de um dos transdutores posicionados para medir o deslocamento da laje do protótipo de 5 Hz.

Em relação aos ensaios dinâmicos, como excitação, um atuador hidráulico aplicou um carregamento do tipo senoidal na faixa de frequência de 2 Hz a 30 Hz com incremento de 0,5 Hz. Para o protótipo do SMM de 5 Hz, referente ao trecho do Hospital São Paulo, o incremento foi de 0,1 Hz entre 4,5 Hz e 6 Hz, devido à alta precisão que o sistema requeria para atender aos limites do equipamento.

Como exemplo, as figuras 8 e 9 apresentam o resultado do ensaio dinâmico como uma FRF (função de resposta em frequência), a qual apresenta a primeira frequência natural obtida.

Além do carregamento senoidal, outra excitação dinâmica foi aplicada nos protótipos. A norma permite que sejam aplicados impactos sobre os trilhos por um martelo instrumentado, em que a torção é medida, possibilitando o cálculo das FRFs. Como é característico deste tipo de excitação, uma faixa de frequência maior é atingida em relação ao ensaio dinâmico com carga senoidal. A figura 10 apresenta o ensaio dinâmico com carga impulsiva.

Como exemplo, as figuras 11 e 12 apresentam as frequências naturais obtidas pelo ensaio com o martelo.

Para o ensaio de fadiga, o equipamento utilizado para aplicação do carregamento é denominado Vibrodina e seu funcionamento consiste em dois discos que giram em um plano na mesma velocidade angular e em sentido contrário (horário e anti-horário). Duas massas excêntricas são fixadas em cada disco, cujas posições an-



Figura 5 - Ensaios nos protótipos de via permanente

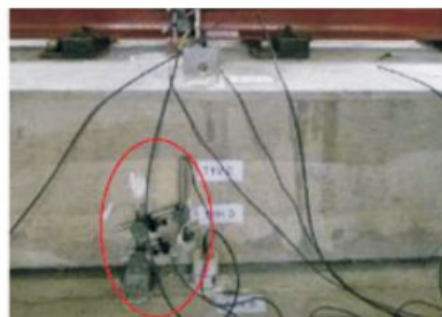


Figura 6 - Ensaio estático – atuadores e transdutores de deslocamento

a) Aplicação dos carregamentos vertical e transversal

b) Transdutores para medir deslocamentos da laje

gulares são predefinidas e reguladas antes do início do ensaio. A favor da segurança, a frequência de ensaio foi sempre próxima à da primeira frequência natural do sistema em estudo. A figura 13 apresenta o Vibrodina posicionado sobre a laje para aplicação de 3 milhões de ciclos do carregamento na direção vertical.

Todos os carregamentos aplicados nos ensaios foram previamente calculados por modelos numéricos tridimensionais em elementos finitos e apresentados em memoriais de cálculo analisados e aprovados pelo Metrô. Nos modelos, foram considerados o trem-tipo da linha e todas as pro-

priedades mecânicas estáticas e dinâmicas dos componentes da via permanente.

## CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu brevemente o projeto do sistema de atenuação de vibrações e ruído secundário, também denominado de sistema massa-mola, elaborado para a Linha 5-Lilás do Metrô de São Paulo. Tal metodologia é pioneira no Brasil e foi implementada pela IEME Brasil também nas linhas 2-Verde e 4-Amarela do Metrô de São Paulo.

No caso da Linha 5-Lilás, vale destacar a solução inédita em todo o mundo para o caso do Hospital São Paulo, em que um sistema massa-mola de alto amortecimento e baixa frequência foi desenvolvido em parceria com o corpo técnico do projeto de via permanente do Metrô e do fornecedor **VIBTECH**. Todos os componentes utilizados para atenuação das vibrações foram homologados separadamente em laboratório conforme normas vigentes ou procedimentos aprovados pelo Metrô.

Outro diferencial no desenvolvimento do projeto do sistema massa-mola da Linha 5-Lilás foi a utilização de protótipos

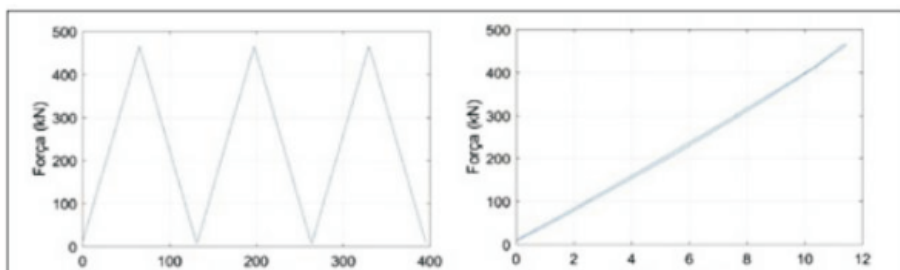


Figura 7 - Ensaio estático na direção vertical – exemplo de resultados para protótipo de 5 Hz

a) Três ciclos de carregamento

b) Força x deslocamento

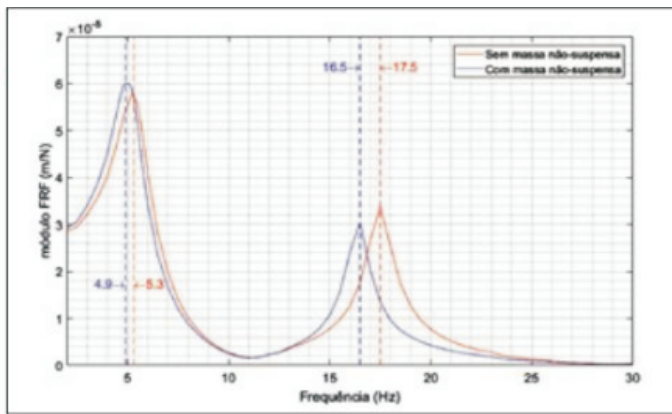


Figura 8 - Resultado do ensaio dinâmico com carga senoidal – protótipo do sistema de via de 5 Hz

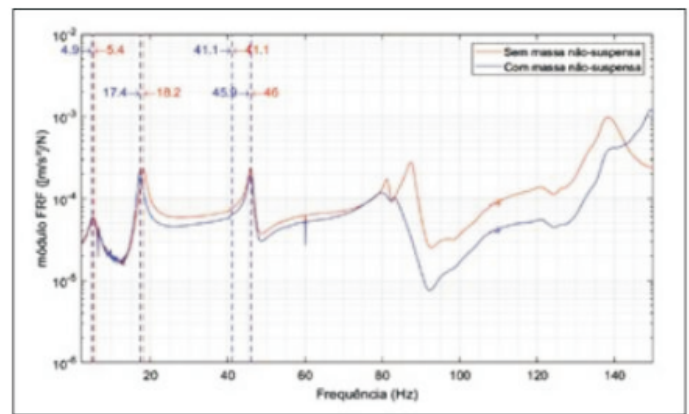


Figura 11 - Resultado do ensaio dinâmico com martelo instrumentado – protótipo do sistema de via de 5 Hz

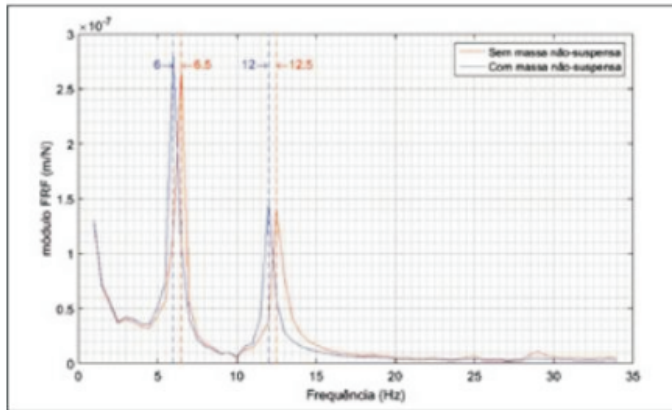


Figura 9 - Resultado do ensaio dinâmico com carga senoidal – protótipo do sistema de via de 6 Hz

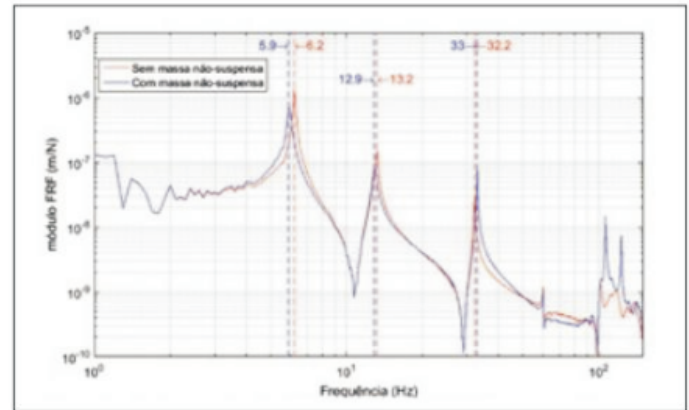


Figura 12 - Resultado do ensaio dinâmico com martelo instrumentado – protótipo do sistema de via de 6 Hz



Figura 10 - Ensaio dinâmico com carga impulsiva (martelo instrumentado)



Figura 13 - Vibrodina para realização do ensaio de fadiga nos protótipos

para homologação dos sistemas como um todo, com o objetivo de se comprovar a eficiência quanto à atenuação das vibrações. Para isso, pela primeira vez no Brasil, foram construídos em laboratório 3 protótipos de via com sistema massa-mola em tamanho real e com todos os componentes a serem utilizados (trilhos, fixações, apoios das lajes) para realização de ensaios estáticos e dinâmicos de acordo com a norma italiana UNI 11389-3:2011. Com estes últimos, as propriedades dinâmicas, frequências naturais e amortecimentos, de cada sistema projetado puderam ser comprovadas.

Finalmente, após o término da execução da obra pelo consórcio construtor, a homologação da via permanente construída ocorreu com passagens de um trem da Linha 5-Lilás. Durante esta homologação,

foram medidas as vibrações em determinadas edificações lineares para comparação dos níveis globais em dBV resultantes com os limites prescritos pela especificação técnica do Metrô. Além disso, foram medidas também na via permanente os deslocamentos das lajes, aberturas dinâmicas de bitola e tensões nos cliques para verificação da estabilidade quando da passagem do trem.

Com o ciclo todo de homologações, foi possível comprovar e garantir a eficiência dos sistemas massa-mola quando da operação comercial da Linha 5-Lilás. ↻

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

UNI 11389:2011 – Valutazione del comportamento statico e dinamico di sistemi di armamento ferroviario – Parte 3: Indagini in laboratorio; Behaviour assesment of the static and dynamic of railway and tramway track system general – Part 3: Laboratory tests.

### FICHA TÉCNICA

Projeto: IEME Brasil Engenharia Consultiva com colaboração da equipe da GRP-Via permanente do Metrô de São Paulo. Ensaio em laboratório: LAEDE (Laboratório de Acústica e Ensaio Dinâmicos e Estáticos). Fornecedor dos materiais para SMM: VIBTECH Industrial. Consórcios construtores: Andrade Gutierrez-Camargo Corrêa (Lote 3) e Consórcio Metropolitan 5 (Lote 7).

\* **Tiago Juliani** é engenheiro civil na empresa IEME Brasil desde 2008, graduado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e mestre em estruturas pela USP-São Carlos. Trabalhou em diversos projetos e instrumentação de superestrutura de via permanente e em diversas análises teóricas e experimentais de estruturas civis. E-mail: [tjuliani@iemebrasil.com.br](mailto:tjuliani@iemebrasil.com.br)

\*\* **Lucas Juliani** é graduado em engenharia civil pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e mestre em estruturas pela USP-São Carlos. Atualmente é coordenador do LAEDE com experiência em ensaios estáticos e dinâmicos em laboratório e em instrumentação de via permanente e de estruturas. E-mail: [ljuliani@iemebrasil.com.br](mailto:ljuliani@iemebrasil.com.br)