

Metrô de São Paulo supera mais um desafio

Desenvolvimento de sistema de superestrutura amortecedor de vibrações e ruídos secundários para garantir o perfeito funcionamento dos equipamentos de ressonância magnética do Hospital São Paulo

ADILSON ROBERTO TAKEUTI*
ANTÔNIO JOSÉ CALDAS DE SOUSA**

INTRODUÇÃO

O projeto de uma linha metroferroviária em áreas densamente construídas e habitadas deve levar em consideração as edificações lindeiras ocorrentes ao longo dela e classificá-las de acordo com a sua ocupação (função): residências, templos, escolas e principalmente aquelas especiais que façam uso de equipamentos de precisão usados nos hospitais, laboratórios e gravadoras, por exemplo. Este cuidado faz-se necessário em função de que a passagem das rodas do trem sobre os trilhos (contato roda/trilho) provoca uma excitação na superestrutura da via, causando vibrações que se propagam através das paredes dos túneis, do solo, das

fundações, paredes e lajes das edificações lindeiras. Dependendo da frequência natural da estrutura da edificação, esta pode entrar em ressonância, amplificando as vibrações e até mesmo provocando ruído secundário oriundo das suas estruturas que se comportam como um diapasão, causando incômodo aos seus ocupantes ou prejudicando o perfeito funcionamento dos equipamentos de precisão nelas instalados, como é o caso de hospitais e laboratórios.

Objetivando eliminar estes efeitos indesejáveis, o Metrô, baseado neste levantamento identifica para cada trecho de suas novas linhas o quanto destas vibrações é necessário amortecer. Em função do amortecimento de vibrações necessário de cada trecho, define os sistemas de superestrutura a serem implantados neles. Estes sistemas podem ser do tipo: simples placas de apoio dos trilhos resilientes ou até mesmo sistemas sofisticados de lajes de concreto armado instaladas sobre molas de aço helicoidais ou elementos elastoméricos, em cima das quais é instalada a superestrutura metroviária propriamente dita.

No projeto de superestrutura de via permanente para a expansão da Linha 5-Lilás do Metrô-SP, no trecho onde se localiza o Hospital São Paulo, entre as estações Hospital São Paulo e Santa Cruz, conforme figura 1, foi previsto um sistema de amortecimento de vibrações do tipo laje flutuante (massa-

-mola) com frequência natural de 6Hz que determina a capacidade amortecedora deste sistema, conforme figura 2.

Após a escavação da Estação Hospital São Paulo e do túnel neste trecho, a reitoria da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) informou ao Metrô que seus equipamentos de ressonância magnética seriam substituídos por outros mais modernos, com o dobro do campo magnético (1,5 Teslas para 3,0 Teslas), maior sensibilidade e com menor tolerância às vibrações. A figura 1 mostra a localização da edificação onde se situam as salas de ressonância magnética em relação à estação e ao túnel.

Com a curva limite de tolerância de vibrações dos equipamentos, encaminhada pela reitoria da Unifesp, o Metrô constatou que o sistema projetado de 6Hz não atenderia tal curva, e em substituição a ele estudou duas alternativas:

- implantação no túnel, de um sistema amortecedor de vibrações com frequência natural da ordem de 3,6Hz, considerando para a taxa de amortecimento a de um sistema massa mola usual de 2%, conforme figura 3;
- implantação, nas salas de ressonância, de um sistema amortecedor consistindo de uma laje flutuante sobre isoamortecedores, alternativa que atenuaria não só as vibrações provenientes dos trens do Metrô, como também aquelas oriundas do tráfego local e, portanto, mantendo nas



PLANTA DE LOCALIZAÇÃO

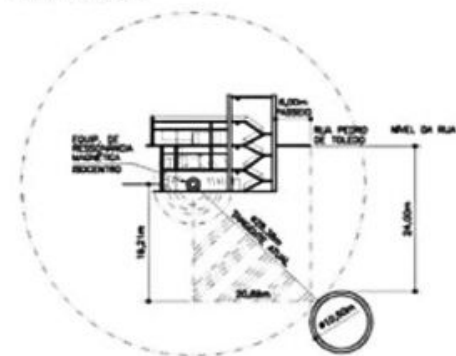


Figura 1 - Esquema simplificado da localização e perfil do edifício das salas de ressonância magnética e a Linha 5-Lilás

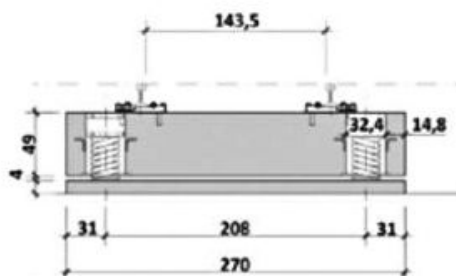


Figura 2 - Sistema massa-mola com frequência natural de 6Hz

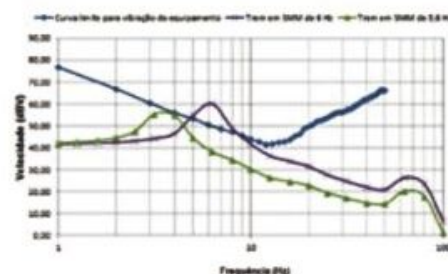


Figura 3 - Espectros de vibrações resultantes para os sistemas de 3,6Hz e 6,0Hz

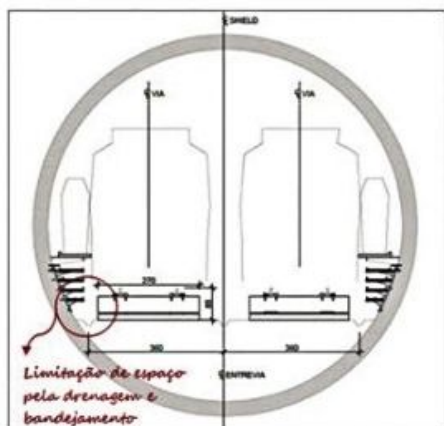


Figura 4 - Seção do túnel e espaço disponível para a via permanente

vias a instalação do projeto original do tipo massa mola com 6Hz.

As soluções estudadas pelo Metrô foram descartadas pelos seguintes motivos:

1. O sistema com frequência natural de 3,6Hz é composto por elementos amortecedores mais flexíveis que os usuais e, as dimensões da laje (para aumentar a massa) maiores do que o do sistema original com frequência natural de 6Hz, conseqüentemente não sendo possível a sua implantação, uma vez que superaria o espaço destinado a implantação da superestrutura da via permanente no túnel, conforme figura 4.

2. No caso das lajes flutuantes nas salas de ressonância, a reitoria da Unifesp informou ao Metrô que tal alternativa inviabilizaria a instalação dos novos equipamentos de ressonância magnética.

Assim, tendo sido esgotadas as alternativas usuais de amortecimento de vibrações, o Metrô foi obrigado a buscar para o amortecimento das vibrações, uma solução técnica inédita, a ser implantada no túnel.

Será apresentado neste artigo o relato das etapas de projeto desde a concepção do sistema, o desenvolvimento de elementos amortecedores não usuais que o compõem, testes de homologação em laboratório, até a sua implantação no túnel em frente ao Hospital São Paulo. E, finalmente, a comprovação do atendimento a tolerância a vibrações dos equipamentos de ressonância magnética por meio da passagem de trens com a sua maior carga por eixo e máxima velocidade do trecho.

CONCEPÇÃO DO SISTEMA AMORTECEDOR INÉDITO

No intuito de obter subsídios para o desenvolvimento de soluções a serem es-



Figura 5 - Seção do túnel e planta do segundo subsolo do edifício da ressonância com as instrumentações realizadas no edifício de ressonância magnética do Hospital São Paulo

tudadas, foi executado ensaio dinâmico com vibração forçada por meio de equipamento indutor de vibrações, implantado no túnel, denominado Vibrodina. Com este ensaio foram obtidos os coeficientes reais de transmissibilidade entre o túnel e a edificação, conforme figura 5.

Os valores dos coeficientes de transmissibilidade obtidos e a limitação para o aumento das seções das lajes flutuantes levou o Metrô a considerar a possibilidade da utilização de elementos amortecedores tipo massa-visco inéditos e, portanto, a serem desenvolvidos especialmente para diminuir o pico de vibração na frequência natural do sistema, com conseqüente aumento do seu amortecimento.

O sistema de amortecimento resultante de tal desenvolvimento apresenta uma frequência natural de 4,9Hz e 5% de amortecimento, conforme curva apresentada na figura 6, combinada a uma altura viável de laje flutuante.

O diferencial da solução concebida foi a introdução do amortecedor massa-visco no sistema e, por isso, os maiores esforços foram no desenvolvimento do seu projeto e dos procedimentos de testes para a sua homologação em laboratório antes de serem implantados na via.

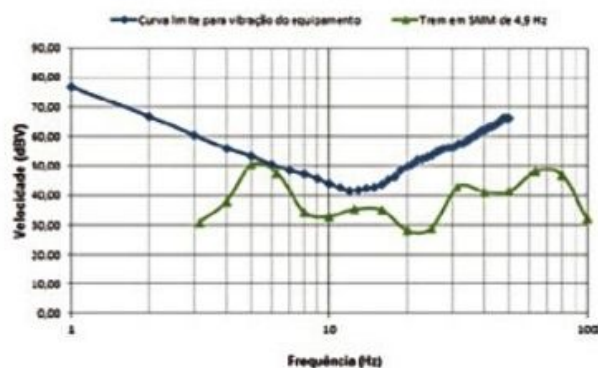


Figura 6 - Gráfico com a curva limite dos aparelhos de ressonância e a curva de vibrações remanescentes com a utilização do sistema de 4,9Hz

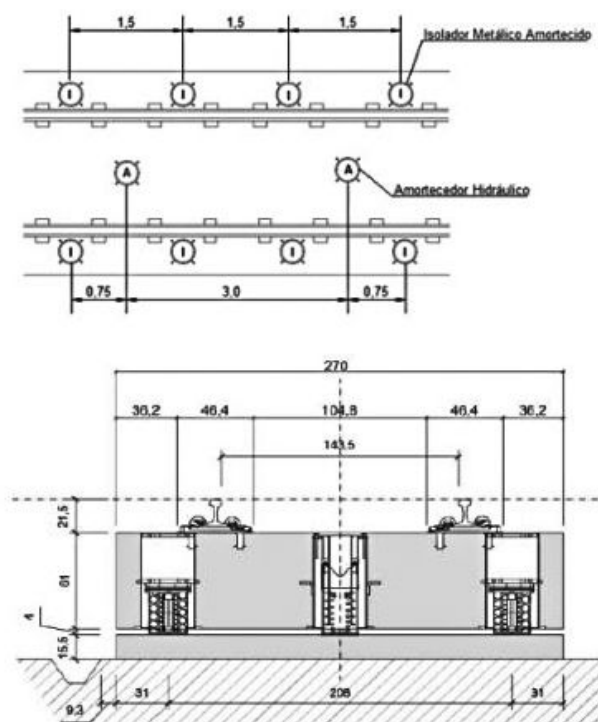


Figura 7 - Planta e seção transversal do sistema de amortecimento de 4,9Hz

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O desenvolvimento do sistema de amortecimento inédito de vibrações e ruídos, contou com a participação de uma equipe multidisciplinar das seguintes empresas: Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô), responsável pela análise e aprovação de todo o projeto; Consórcio Metropolitano 5, composto pelas construtoras Odebrecht e Queiroz Galvão, responsável pelo projeto, fornecimento e implantação da superestrutura a via permanente, pela compatibilização com as estruturas da obra civil e pela construção da obra de todo trecho entre os pcos Bandeirante e o Dionísio da Costa da Linha 5-Lilás; IEME Brasil Engenharia Consultiva: responsável pelo projeto do sistema amortecedor; Laboratório de Acústica e Ensaio Dinâmico e Estático (LAEDE), laboratório responsável por todos os ensaios realizados, componentes, conjuntos e protótipos do sistema; Planservi Engenharia Ltda., responsável pelo projeto da superestrutura da via permanente, incluindo o projeto estrutural das lajes do sistema; Vibtech Industrial Ltda., responsável pelo projeto dos elementos amortecedores (isoamortecedor metálico com molas helicoidais e amortecedor hidráulico).

O novo sistema consiste em uma laje de altura igual a 61cm, isoamortecedores convencionais com molas helicoidais (fi-

gura 8a) de rigidez igual a 2,70kN/mm espaçadas a cada 1,5m e amortecedores hidráulicos desenvolvidos (figura 8b) centralizados na laje espaçados a cada 3,0m com taxa de amortecimento igual 5%, na frequência de 4,9Hz, conforme figura 7. O comprimento total adotado para o trecho foi de 230,45 metros lineares (460,9 no total para as duas vias), para que as vibrações remanescentes no edifício que contém as máquinas de ressonância magnética do Hospital São Paulo não ultrapassem os limites de tolerâncias dos equipamentos.

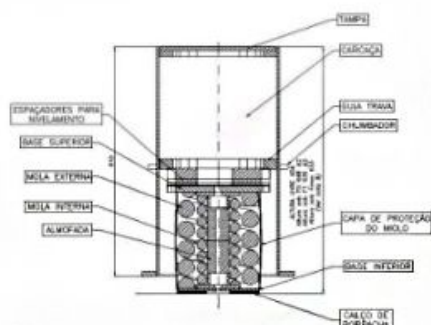
O conjunto do amortecedor hidráulico consiste em um reservatório contendo um fluido de alta viscosidade (Polibuteno), responsável pelo amortecimento, com uma mola helicoidal que tem a função de estabilizar a peça durante a movimentação da laje, protegidos por uma carcaça metálica ancorada no concreto da laje flutuante. O amortecedor hidráulico apresenta um coeficiente de amortecimento >47kN.s/m a 5Hz, na faixa de temperatura entre 20°C e 30°C.

Para verificação, tanto da estabilidade do sistema quanto do amortecimento, foi elaborada modelagem matemática por meio do MEF (Método de Elementos Finitos), conforme figura 9. Tal procedimento comprovou teoricamente a segurança de tráfego dos trens, bem como a eficiência do amortecimento.

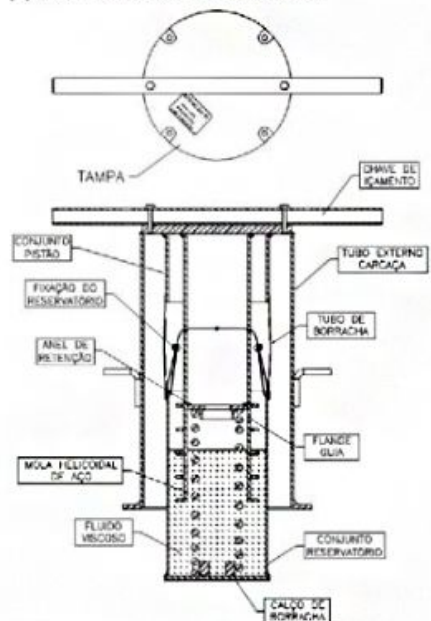
A modelagem matemática também forneceu as cargas que foram utilizadas nos testes de homologação em laboratório de todos os componentes do sistema, ou seja, dos isoamortecedores convencionais e dos amortecedores hidráulicos, conforme figura 10.

O amortecedor hidráulico possui a característica de ser susceptível às variações de temperatura. Em função disso, os ensaios a Fadiga (3 milhões de ciclos) com carregamento, tiveram que ser realizados com controle rigoroso de temperatura – utilizando um reservatório de água (figura 11) – para que os parâmetros fossem medidos na temperatura de interesse, 25°C ± 5°C (temperatura prevista dentro do túnel). Isso acarretou um tempo maior para a preparação e execução dos ensaios.

Assim que os resultados dos testes em laboratório de todos os componentes foram avaliados e aprovados, procedeu-se ao ensaio de homologação do pro-



(a) Isoamortecedor convencional



(b) Amortecedor hidráulico

Figura 8 - Detalhes do isoamortecedor convencional e do amortecedor hidráulico



Figura 9 - Modelo Matemático do Sistema de Amortecimento

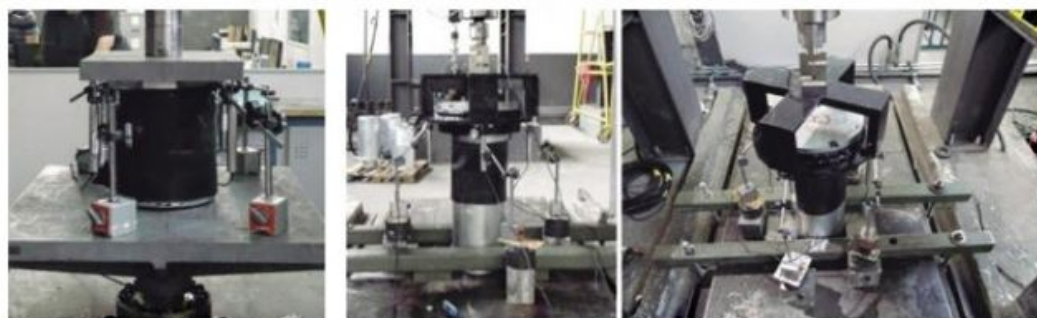


Figura 10 - Fotos dos testes em laboratório dos componentes do Sistema de Amortecimento



Figura 11 - Foto do ensaio de Fadiga do amortecedor



Figura 12 - Foto do protótipo do Sistema de Amortecimento

tótipo do sistema, simulando um trecho de via com 11 metros de comprimento, para avaliação do seu desempenho em termos de amortecimento, estabilidade e comportamento ao longo do tempo (figura 12).

Com a aprovação em todos os testes dos componentes e do protótipo nos ensaios de homologação em laboratório, foi autorizada a fabricação destes elementos, sendo que no seu fornecimento foram realizados outros ensaios laboratoriais para inspeção, com o intuito de garantir que tais peças e componentes atendiam os parâmetros estabelecidos em projeto, bem com assegurar que seriam produtos semelhantes aqueles testados anteriormente na fase de homologação, conforme procedimento usual do Metrô.

IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

A implantação e execução da via, bem como a instalação dos elementos amortecedores seguiu a sequência mostrada na figura 13.



Figura 14 - Foto de carro de trem carregado com sacos de areia

HOMOLOGAÇÃO DO SISTEMA COM A PASSAGEM DOS TRENS

Implantada a via permanente, bem como todos os demais sistemas para permitir a passagem dos trens, foi efetuada a homologação na via do sistema amortecedor.

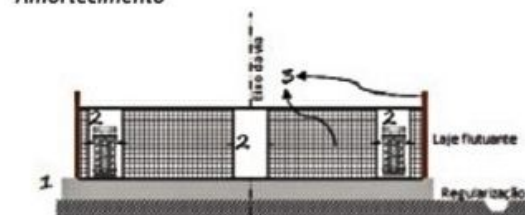
Justifica-se o ensaio na via, pois os realizados em laboratório, mesmo que constantes em normas, não representam fielmente, todos os esforços envolvidos (abertura de bitola, tensões no trilho, deslocamentos longitudinais, verticais, transversais e relativos entre lajes), na passagem de um trem carregado sobre a via permanente.

A figura 14 ilustra um carro lastreado com sacos de areia, a fim de simular o carregamento máximo de passageiros (17t/eixo), para um ensaio na via.

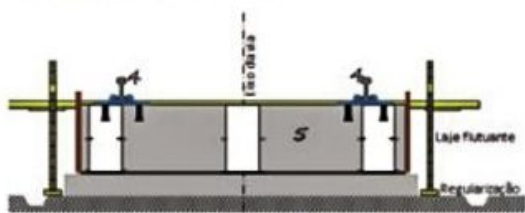
As duas salas de ressonância do Hospital São Paulo foram monitoradas, conforme figura 15, a fim de medir os níveis das vibrações remanescentes, decorrentes da passagem do trem carregado na máxima velocidade civil permitida no projeto geométrico da via sobre o sistema implantado.

As medições foram realizadas na madrugada de sábado para domingo, com o intuito de evitar que vibrações oriundas do tráfego de veículos (carros, ônibus, caminhões etc.), não interferissem na aquisição das vibrações decorrentes somente da passagem dos trens.

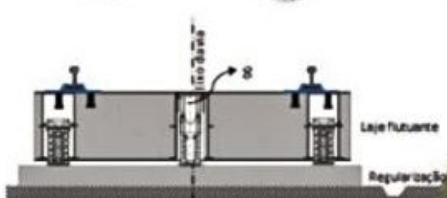
Durante todo o período de monitoramento, não foram detectadas vibrações e ruídos secundários característicos da passagem do trem carregado. Contudo, ao elaborar o gráfico destes efeitos registrados durante todo o período do ensaio (vide figura 16), percebe-se claramente que todas as vibrações ocorridas no perí-



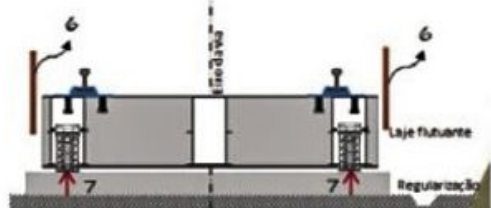
- 1) Limpeza da laje de regularização, aplicação de desmoldante e lona plástica
- 2) Posicionamento das carcaças e molas dos isolares e amortecedores sobre a laje de regularização
- 3) Armação e fôrma da laje



- 4) Posicionamento dos trilhos e fixações
- 5) Concretagem da laje flutuante



- 8) Instalação dos amortecedores



- 6) Desforma
- 7) Içamento da laje através da ativação das molas



Figura 13 - Etapas de implantação do Sistema de Amortecimento

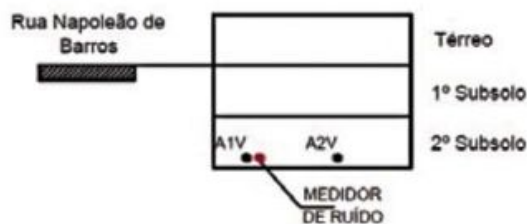


Figura 15 - Detalhes da instrumentação efetuada no Hospital São Paulo

odo de tempo (cerca de 40 minutos), em que foram feitas as passagens do trem carregado (10 passagens), não ultrapassaram a curva limite de tolerância dos aparelhos.

Com base nos resultados obtidos foi constatada a eficiência do amortecimento do sistema. Além disso, foram monitorados na via as tensões, deslocamentos e vibrações do sistema de amortecimento, com o objetivo de verificar a estabilidade do sistema, vide figura 17.

Todos os resultados obtidos tanto para a estabilidade da via quanto para o amortecimento de vibrações, atenderam plenamente os parâmetros estabelecidos no projeto.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema de amortecimento, inédito no Metrô de São Paulo, mostra o esforço da sua área técnica no constante investimento em estudos de novos componentes e no desenvolvimento de novos procedimentos de cálculos e ensaios, de forma a garantir que os sistemas instalados para a atenuação de vibrações e ruídos secundários tenham propriedades de mitigação adequadas e proporcionem conforto aos moradores lindeiros às vias, sem causar quaisquer tipos de danos a equipamentos sensíveis a vibrações, bem como garantir a segurança de tráfego dos trens.

Foi uma inovação para as obras metroferroviárias em âmbito nacional e mundial, com conseqüente capacitação e know-how técnico para os fabricantes, projetistas, construtores e para a equipe técnica de Via Permanente do Metrô de São Paulo.

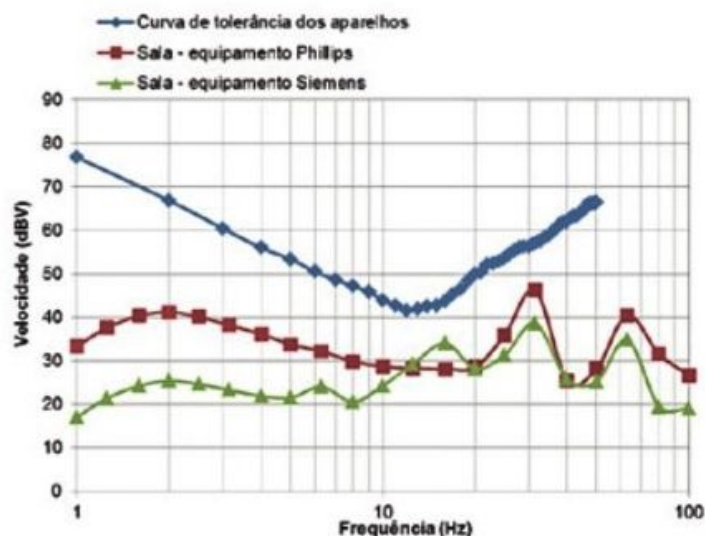


Figura 16 - Gráfico com as curvas obtidas no ensaio



Figura 17 - Fotos da instrumentação no túnel do sistema de amortecimento

Agradecimentos: Consórcio Metropolitano 5, composto pelas construtoras Odebrecht e Queiroz Galvão; IEME Brasil Engenharia Consultiva; Laboratório de Acústica e Ensaio Dinâmico e Estático (LAEDE); Planservi Engenharia Ltda.; Vibtech Industrial Ltda.

* **Adilson Roberto Takeuti** é engenheiro civil, mestre e doutor, pós-doutorado em Engenharia de Estruturas pela USP/EESC, é assessor técnico I de Projetos de Via Permanente do Metrô-SP
E-mail: atakeuti@metrosp.com.br

** **Antônio José Caldas de Sousa** é engenheiro civil, assessor técnico III do Metrô-SP
E-mail: ajcaldas@metrosp.com.br