O desenvolvimento em mais de duas décadas dos sistemas de amortecimento de vibrações e ruídos secundários no Metrô

ADILSON ROBERTO TAKEUTI*,
JANAINA TOBIAS DE CARVALHO**,
ANTÔNIO JOSÉ CALDAS DE SOUSA***

A via permanente do Metrô de São Paulo nesses 45 anos de operação obteve muitos avanços tecnológicos.

A maneira como a via deve ser projetada hoje é mais complexa e leva em conta parâmetros que antes não eram considerados, como, por exemplo, o incômodo que a passagem dos trens pode causar nas edificações lindeiras devido as vibrações, introduz vários fatores a serem considerados na concepção da via permanente.

O contato entre a roda do trem e o trilho produz ondas mecânicas que se propagam pela estrutura do túnel e solo, podendo chegar às edificações vizinhas a linha do Metrô, causando vibrações e ruídos secundários que causam incômodo e desconforto (*figura 1*). Desta forma é necessário que esses efeitos sejam mitigados por meio de sistemas de amortecimento implantados nas linhas metroviárias.

PARÂMETROS SEGUIDOS PELO METRÔ

A percepção e o incômodo humanos são variáveis, as normas e recomendações consideram tal fato quando estabelecem os valores de vibração máxima aceitável associada a atividade que é efetuada nas diferentes edificações.

Assim o nível aceitável em uma residência unifamiliar é inferior ao de um edifício comercial, devido a natureza das atividades executadas.

A mensuração destes níveis de vibração pode ser em velocidade ou aceleração das partículas e apresentados na escala decibel (dBV) como mostrado na Equação 1.

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

Equação 1

Onde L_V é a velocidade em nível de dBV, v é a amplitude de velocidade RMS e v_{ref} é a amplitude de velocidade de referência (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2006). A velocidade de referência utilizada é $v_{ref} = 25{,}4 * 10^{-6}$ *mm/s*. Tal medida é utilizada no Metrô como critério para os níveis máximos permitidos, conforme tabela 1.

MEIOS DE ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Pode-se atenuar as vibrações tanto na fonte (via), no caminho (meio) que as ondas mecânicas percorrem para chegar as edificações (receptor) ou na própria estrutura do imóvel. Tanto no caminho como no receptor a atenuação é mais difícil já que requerem mais obras de intervenção, além da própria construção do metrô. Assim o que é mais comumente utilizado é a atenuação na fonte, ou seja, escolher uma solução na construção da superestrutura da via permanente que amenize essa vibração para que ela chegue as edificações com os níveis aceitáveis já pré-definidos.

A utilização do sistema massa-mola para a atenuação de vibrações

De forma simplificada um sistema massa-mola pode ser representado por um arranjo de molas, massas e amortecedores interconectados. Todo o sistema possui um modo próprio de vibrar, e esta propriedade é função deste arranjo. A frequência natural do sistema (frequência que a estrutura tem mais facilidade de vibrar) e os modos associados a elas são uma forma de medir a propriedade vibracional do material. Por simplificação a frequência natural pode ser calculada como mostrado na figura 2.

A capacidade amortecedora de um sistema pode ser medida a partir da sua transmissibilidade, que é a taxa da vibração transmitida de um sistema a outro. A transmissibilidade depende da frequência natural de vibração e da frequência imposta ao sistema (no caso do Metrô, a frequência

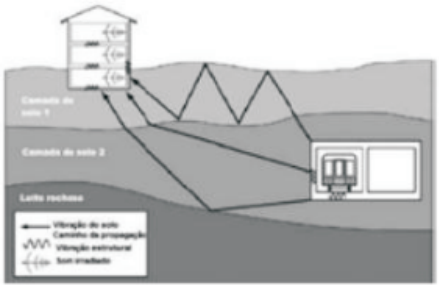

Figura 1 - Propagação da vibração do solo até a edificação

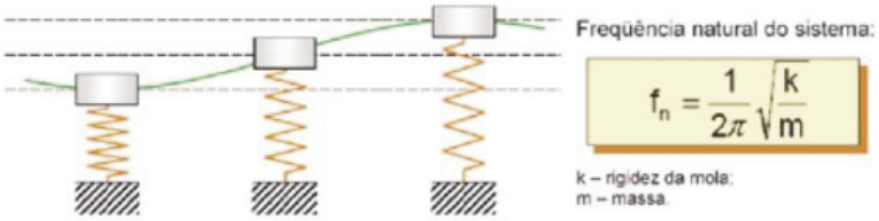

Figura 2 - Esquema simplificado de um sistema massa-mola e sua frequência natural

Tabela 1 - Critérios para vibrações máximas do Metrô de São Paulo

Critérios para vibrações máximas provocadas pela operação de trem			
A - Residências e edifícios em áreas de pernoite			
Categoria da Área da Comunidade	**Níveis Máximos de Vibração Transmitida por via sólida (dB re: 25,4x10^{-6}mm/s) (2)**		
	Moradia Unifamiliar	**Edifício Multifamiliar**	**Hotel**
I Residencial de baixa densidade	70	70	70
II Residencial de média densidade	70	70	75
III Residencial de alta densidade	70	75	75
IV Comercial	70	75	75
V Industrial/Rodovia	75	75	75
B - Edificações com funções especiais			
Tipo de Edificação ou Sala	**Níveis Máximos de Vibração Transmitida por via sólida (dB re: 25,4x10^{-6}mm/s) (2)**		
Salas de concerto e estúdios de TV	65		
Auditórios e Salas de Música	70		
Igrejas e teatros	70-75		
Dormitórios de Hospitais	70-75		
Tribunais	75		
Escolas e Bibliotecas	75		
Edifícios de Universidades	75-80		
Escritórios	75-80		
Edifícios Comerciais e Industriais	75-85		
Laboratórios Industriais ou de Pesquisa (sensíveis a vibrações)	60-70		
(1) Os critérios se aplicam a vibração vertical de superfícies de piso dentro dos edifícios			
(2) Referência padrão para níveis de velocidade apresentada logaritmicamente em decibéis			

Fonte: Wilson, Ihring & Associates

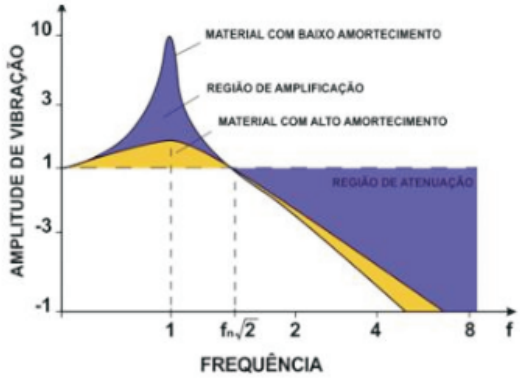

Figura 3 - Relação entre frequência natural do sistema e amortecimento

que os trens induzem a via) e do fator de amortecimento dos materiais que compõem o sistema massa-mola. A transmissão de vibração aumenta consideravelmente em regiões próximas a frequência natural do sistema massa-mola, quando a razão entre a frequência natural e a frequência imposta ao sistema é 1 o sistema está em ressonância, o que leva a transmissibilidade aos seus maiores níveis. Quando a razão entre as frequências natural e imposta é igual a $\sqrt{2}$, a transmissibilidade entra na região de atenuação de

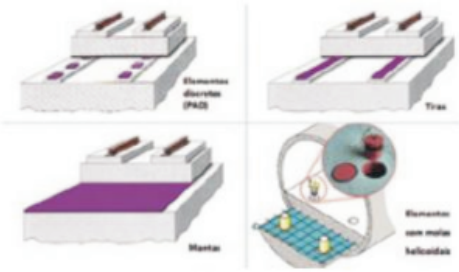

Figura 4 - Tipos via permanente com sistemas massa-mola

vibrações, como mostra a figura 3. Assim para fins de controle de vibrações quanto menor a frequência natural do sistema maior a sua capacidade de atenuação.

Na via a massa é caracterizada pelas massas da laje, trilhos, fixação dos trilhos e a massa não suspensa do trem e a mola pelos apoios elásticos. Utilizando a combinação desses componentes consegue-se atenuar as vibrações oriundas dos trens, para que cheguem às edificações próximas a via em níveis aceitáveis.

A figura 4 mostra os principais de tipos de superestrutura de via permanente com sistema massa mola.

DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE AMORTECIMENTO

A Linha 1-Azul do Metrô foi concebida com o que havia de mais avançado em tecnologia metroferroviária mundial da época. As vias foram implantadas em fixação direta, contando com uma viga suporte (*figura 5*) e placas vulcanizadas com baixa elasticidade (*placa Landis – figura 6*) para a fixação do trilho a via.

Na via permanente da Linha 3-Vermelha foram adotados trechos em fixação direta (semelhantes ao da Linha 1-Azul) e trechos em lastro com dormentes de concreto protendido nas vias em superfície.

No primeiro trecho da Linha 2-Verde (construção iniciada em 1987) a concepção da via permanente foi a mesma da Linha 1-Azul.

A placa Landis tem como principais

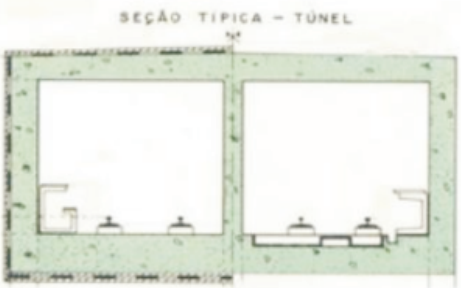

Figura 5 - Seção transversal Linha 1-Azul

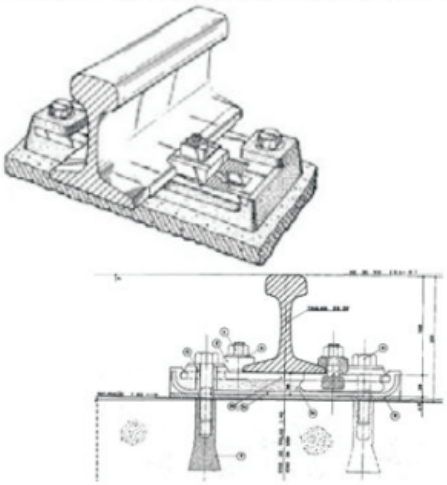

Figura 6 - Placa Landis

vantagens a grande estabilidade da via, montagem precisa da geometria e baixa manutenção. A viga suporte onde a placa é fixada era padronizada e de execução simples. Entretanto, o uso de placas vulcanizadas com baixa elasticidade, portanto, sem quase nenhum amortecimento de vibrações e ruídos secundários, resultava em muitos trechos com queixas de moradores lindeiros de vibrações em seus imóveis, culminando com as vibrações e ruídos secundários constatados na sala de concerto do Masp e nas lajes das residências próximas ao poço Sorocaba em 1992.

A solução encontrada foi a adoção de uma outra fixação de trilho que possui uma rigidez aproximadamente sete vezes menor do que a placa Landis, o sistema Nuremberg (*figura 7*), esse sistema é composto por uma placa nervurada metálica com uma palmilha resiliente (Sylomer) e tem a

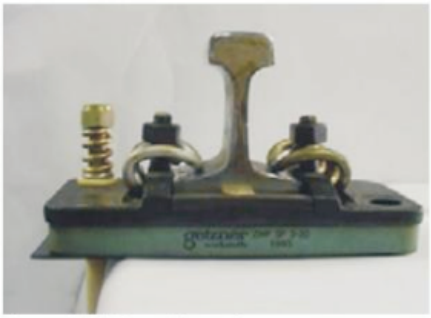

Figura 7 - Sistema Nuremberg

Figura 8 - Palmilha Sylomer

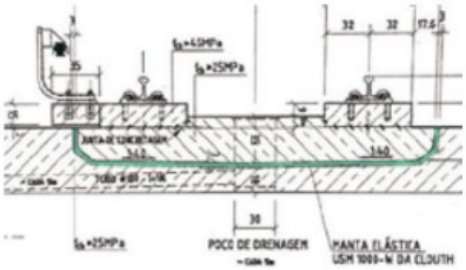

Figura 9 - Seção transversal da via sobre manta – Linha 2-Verde

capacidade amortecedora comparada a um sistema massa mola de 26Hz.

A citada palmilha resiliente Sylomer é composta por dois tipos de elastômero (*figura 8*) que possibilitam a deformação necessária para o amortecimento das vibrações sem comprometer a segurança do tráfego dos trens.

O Metrô, preocupado com o conforto dos lindeiros e em atendimento a Secretaria do Meio Ambiente, que condiciona a concessão da licença operacional de uma nova linha ao amortecimento destes efeitos indesejáveis, fez com que sua área técnica buscasse especialização neste assunto por meio de visitas técnicas a metrôs europeus e treinamento técnico especializado.

A partir disso, as novas linhas passaram a usar onde necessário, sistemas de superestrutura de via permanente com amortecedores de vibrações, conhecidos como massa-mola além das referidas placas resilientes.

Cabe lembrar, que devido a experiência vivida e buscando o aprimoramento, a partir deste empreendimento, todos os sistemas de superestrutura de via permanente, seus conjuntos e componentes são testados em laboratório, por meio de ensaios normalizados e de uso universal, com o objetivo de comprovar o desempenho daqueles elementos antes de serem implantados nas vias. Tais ensaios comprovam o desempenho sob os seguintes aspectos: amortecimento de vibrações, resistência a esforços atuantes, isolação elétrica e durabilidade. Após a sua implantação nas vias, são comprovados os aspectos de estabilidade das vias e a eficiência dos sistemas de amortecimento de vibrações ali implantados, por meio de testes efetuados com a passagem de trens carregados com máxima carga por eixo e em máxima velocidade de tráfego permitida no trecho.

Em 1998, na extensão da Linha 2-Verde, no trecho entre as estações Sumaré e Vila Madalena, foi adotado o sistema massa-mola composto por laje sobre manta elastomérica (frequência natural de 16 Hz), conforme ilustra a figura 9. A concepção desse tipo de via torna a troca do elemento amortecedor, extremamente dificultosa o que impossibilita esta atividade de ser realizada no exíguo período destinado à manutenção das vias em túneis.

Neste mesmo ano, no trecho entre as estações Arthur Alvim e Guaianazes da Linha 11-Coral (Linha da CPTM), mas construída pelo Metrô e na época denominada Extensão Leste da Linha 3-Vermelha – foram adotados diversos sistemas de massa-mola. Neste projeto foram feitos o mapeamento das edificações lindeiras e o cálculo da necessidade de atenuação para cada trecho da linha. Os tipos adotados foram: com manta (frequência natural de 16 Hz – figura 10a),

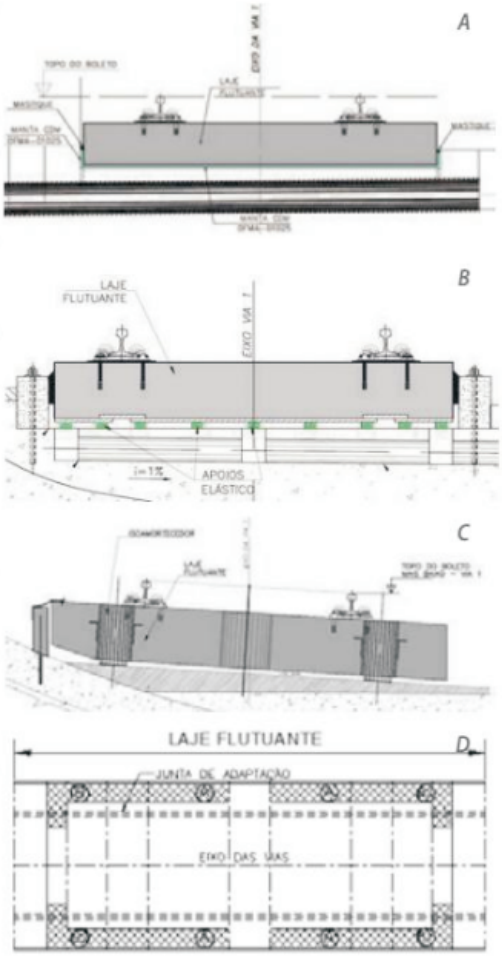

Figura 10 - Sistemas amortecedores implantados na linha 11 Coral

a - Seção transversal trecho com manta

b - Seção transversal trecho com apoios discretos

c - Seção transversal trecho com isoamortecedor

d - Vista inferior da superestrutura do novo sistema com tiras elatoméricas

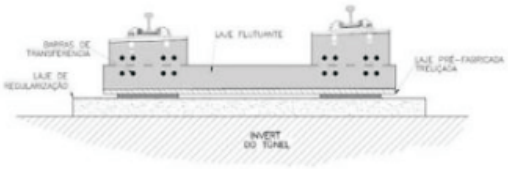

Figura 11 - Seção transversal Linha 2-Verde, trecho Poço Carlos Petit - Estação Alto do Ipiranga

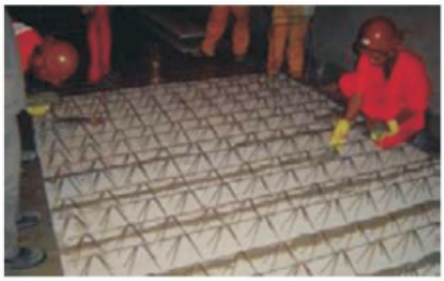

Figura 12 - Pré-moldadas utilizadas no trecho do Poço Carlos Petit à Estação Alto do Ipiranga

Figura 13 - Implantação das barras de transferência

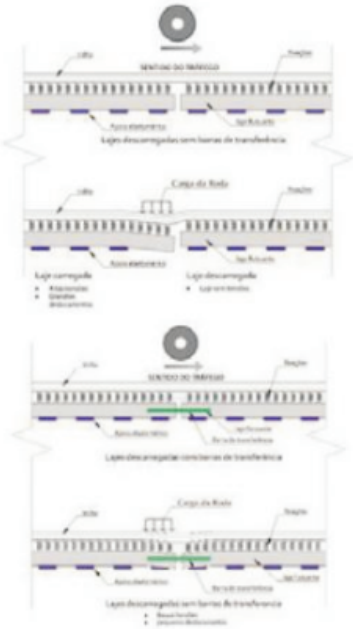

Figura 14 - Utilização das barras de transferência

com apoios elastoméricos discretos e batedores laterais para a contenção das deformações laterais (figura 10b) e com apoios de molas de aço helicoidais imerso em liquido viscoso denominado isoamortecedor (8Hz – figura 10c). Posteriormente, com a operação comercial, no sistema massa-mola com apoio discretos, devido a forma dos seus elastômeros foram constatados deslocamentos excessivos entre as lajes, resultando em quebras de clipes na região das juntas entre elas. Falha na drenagem dos túneis, ocorrida na época, fez com que o nível d'água atingisse os elementos elastoméricos deslocando-os de suas posições originais de projeto, obrigando a implantação de restrição de velocidade durante a operação comercial. Para a correção desta não-conformidade foi efetuada a substituição de 400m de linha com apoios discretos por tiras elastoméricas (dispostas conforme figura 10d). Outros componentes que apresentaram problemas após a operação comercial foram as contenções laterais, que devido a sua concepção com vigas de concreto e tiras elastoméricas, em conjunto com a movimentação da laje flutuante, resultou na movimentação das tiras e também no enrijecimento do sistema de amortecimento, ocasionando trabalhos adicionais de manutenção.

Os demais sistemas implantados, desempenharam com sucesso as suas funções: amortecedoras de vibrações e ruídos secundários e estabilidade de tráfego.

Em 2006, na construção do trecho entre o Poço Carlos Petit e a Estação Alto do Ipiranga da Linha 2-Verde, foram implantadas inovações: uso de lajes pré-fabricadas como formas das lajes dos sistemas massa-mola (*figura 11 e figura 12*), o uso de barras de transferência (*figura 13 e figura 14*) para conter deslocamentos diferenciais entre as lajes dos sistema massa mola, cuja ausência causaram as quebras de clipes na Linha 11-Coral e, o comprimento de 60 metros das lajes flutuantes, que tem como vantagens o melhor comportamento dinâmico do sistema, menores taxa de armadura e a utilização de um número menor de barras de transferência devido à diminuição de juntas entre lajes. Nos sistemas de amortecimento foram usados apoios discretos (sistema massa mola de 10,5 Hz) e sistemas com isoamortecedores (8 Hz). Como na operação comercial da Linha 11-Coral ocorreram problemas de estabilidade do sistema devido ao tamanho e forma dos apoios elastoméricos discretos,

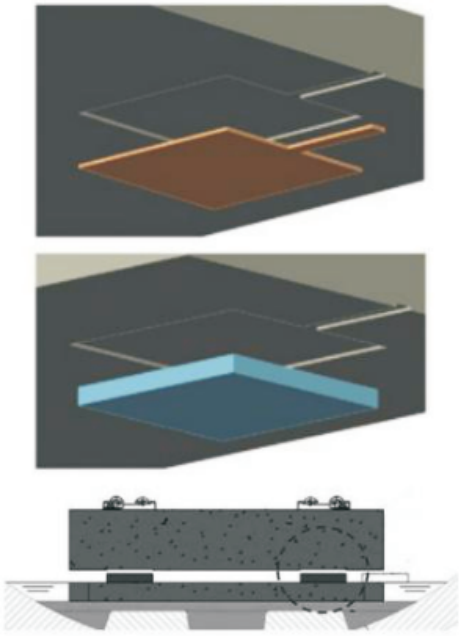

Figura 15 - Nichos para a colocação dos apoios elásticos

foi adotado nas especificações o fator de forma que limita a altura destes apoios em relação as suas larguras e comprimentos, bem como a implantação de nichos para posicionamento dos elastômeros na superfície inferior da laje flutuante, conforme figura 15. Além disto, devido aos maiores trabalhos de manutenção, decorrentes da experiência na Linha 11-Coral, a área de manutenção do Metrô decidiu restringir o uso de contenções laterais. Foi adotado o uso de lajes de regularização do invert dos túneis, para que os apoios elastoméricos não ficassem vulneráveis a quaisquer tipos de falhas do sistema de drenagem do túnel, conforme pode ser observado na figura 11.

As lajes pré-moldadas apesar de se mostrarem vantajosas para a velocidade e simplificação da execução da obra não foram utilizadas novamente. Problemas como o vazamento da nata de concreto entre as lajes pré-fabricadas ocasionou o mau funcionamento dos sistemas massa mola em alguns pontos da linha.

Em 2009 tiveram início as obras da via

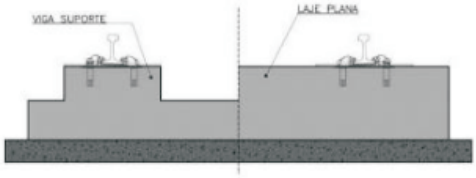

Figura 16 - Tipos de configurações da via permanente

Figura 17 - Sistema de fixação Vanguard

permanente da Linha 4-Amarela. A viga suporte foi substituída por uma laje plana, sem viga suporte (*figura 16*), pois neste projeto a via foi prevista como rota de fuga. Assim como na Linha 2-Verde foram utilizados sistemas de 8Hz e 10,5 Hz (laje sobre apoios discretos), sendo que o sistema de 8 Hz foi projetado de duas formas, a primeira com o uso de apoios elastoméricos sob laje com 70 cm de altura e a segunda com laje convencional e isoamortecedores (como executado na Linha 2-Verde).

Nos anos de 2009 e 2010, por conta de problemas de vibrações na região da Estação da Parada Inglesa da Linha 1-Azul, foi utilizada a solução Vanguard (*figura 17*), de placas resilientes com rigidez de 8kN/mm (comparado a um sistema massa mola de 26 Hz) em 1 200m de via singela.

Em 2010, iniciou-se a construção do trecho entre as estações Alto do Ipiranga e Vila Prudente da Linha 2-Verde, nele foram aplicadas as soluções de massa-mola com frequências de 10 Hz e 14 Hz com laje e vigas suportes sobre apoios elásticos e 8 Hz e 6 Hz sobre isoamortecedores.

Em 2012, iniciou-se a construção do trecho do prolongamento Adolfo Pinheiro da Linha 5-Lilás, onde foram instalados os sistemas massa-mola: compostos por lajes planas sobre apoios elásticos (frequência natural de 10,5 Hz) e sobre isoamortecedores com frequência natural de 8 Hz.

A continuação da Linha 5-Lilás (trecho entre a Estação Adolfo Pinheiro e o Poço Dionísio da Costa) iniciado no final de 2015, teve muitas inovações, como o uso de apoios elásticos de borracha natural fretada, nos sistemas de frequência natural 10 Hz e 14 Hz (*figura 18*). O sistema de 6 Hz, com isoamortecedores, foi também utilizado nesse trecho. Mas a grande inovação foi decorrente da proximidade da linha ao Hospital São Paulo.

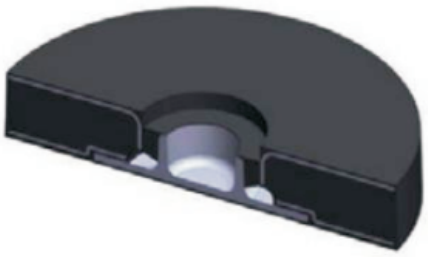

Figura 18 - Apoio elástico em borracha natural fretado - Linha 5-Lilás

Figura 19 - Isoamortecedor com massa-visco

A reitoria da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), informou ao Metrô, na época da construção da linha, que seus equipamentos de ressonância magnética seriam substituídos por outros mais modernos, com o dobro do campo magnético, maior sensibilidade, porém com menor tolerância a vibrações.

Assim o sistema massa mola original, previsto no projeto básico para essa área, com frequência natural de 6 Hz não atenuaria suficientemente as vibrações para garantir o perfeito funcionamento dos novos aparelhos de ressonância magnética a serem instalados.

Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de solução técnica inédita na América Latina, para o amortecimento das vibrações. Tal sistema massa-mola necessitou de isoamortecedores especiais do tipo massa-visco (*figura 19*), complementares aos isoamortecedores convencionais compostos por molas helicoidais já especificados no projeto básico. Este sistema especial, instalado em ambas as vias em frente as salas de ressonâncias e numa extensão de 200m, possui frequência natural de 4,9 Hz e amortecimento de 5% (*figura 20*). Com capacidade de atender aos restritos limites de tolerância às vibrações daqueles equipamentos, este sistema massa mola possui a maior capacidade amortecedora de vibrações já instalado nas vias do Metrô de São Paulo. A introdução de um amortecedor massa-visco no sistema foi o grande diferencial do projeto.

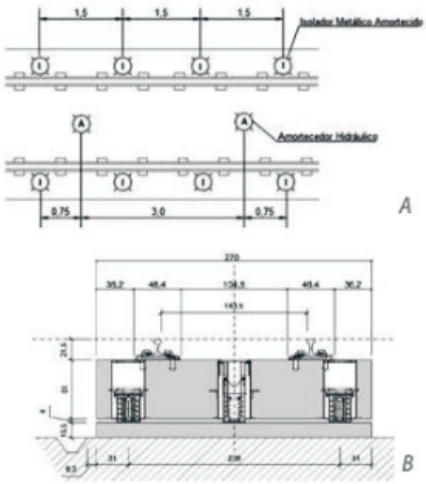

Figura 20 - Planta e seção transversal do sistema de amortecimento de 4,9 Hz
(a) Planta
(b) Seção transversal

Durante todos estes anos o Metrô de São Paulo implantou cerca de 61 quilômetros de via singela com sistemas amortecedores de vibrações e ruídos secundários, conforme figura 21.

PRÓXIMOS PASSOS

Utilização de dispositivos para contenção lateral

Apesar da restrição do uso de contenções laterais, devido à má experiência na Linha 11-Coral decorrente de uma concepção falha, tais dispositivos propiciam uma

Figura 21 - Quilometragem de sistemas atenuadores de vibração

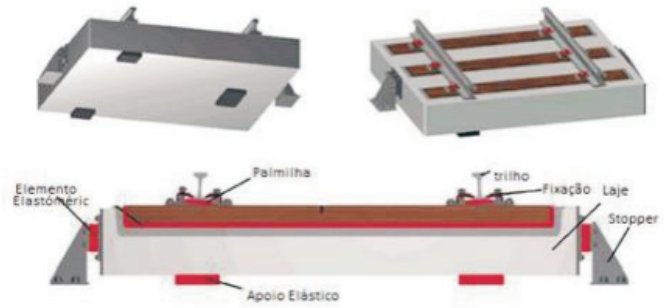

Figura 22 - Seção com batedores (stoppers) laterais

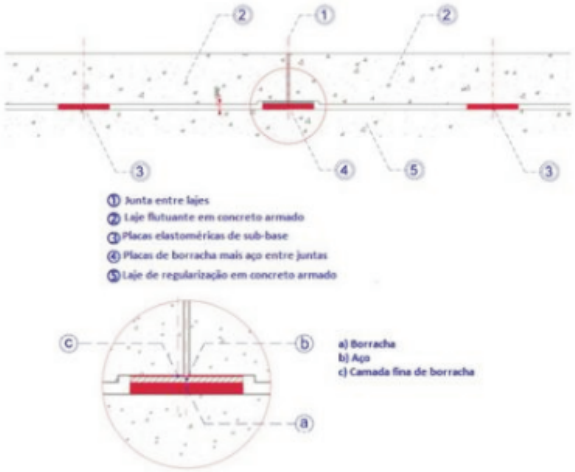

Figura 25 - Apoio elástico entre lajes para compatibilização de deslocamentos

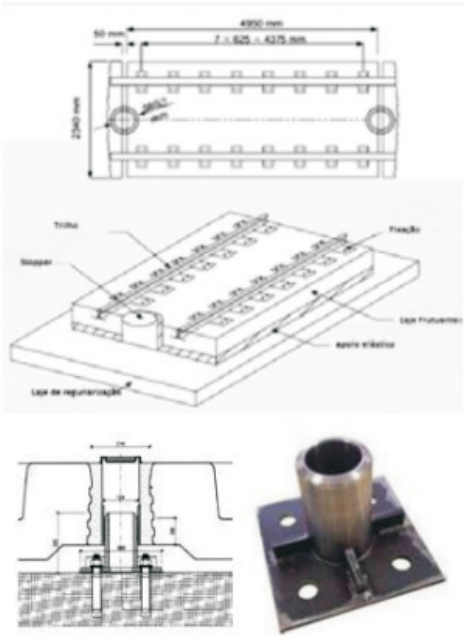

Figura 23 - Seção com stopper no centro da laje

Figura 24 - Barras de transferência externas

maior amplitude de adoção de outros tipos de apoios elásticos, que podem gerar economia na implantação da via permanente, já que limitam os deslocamentos transversais e longitudinais da via.

Esses mecanismos, se bem concebidos, podem ser implantados nas laterais das lajes (*figura 22*) ou no seu centro (*figura 23*).

Alternativas de dispositivos de transferência de carga entre lajes

Estudos de alternativas de dispositivos de transferência de carga estão sendo realizados para que o processo construtivo e a taxa de armadura das lajes sejam otimizados. Estudos sobre a utilização de barras de transferências externas à laje (*figura 24*) podem diminuir as armaduras e ter ganhos na execução da obra, já que não seria necessária uma fase a mais de concretagem como é realizado atualmente. Outra alternativa estudada é o uso de apoios elásticos nas juntas entre lajes (*figura 25*) para diminuir os deslocamentos diferenciais e como consequência a diminuição da taxa de armadura na região da junta.

Padronização das lajes de regularização e flutuante

Outro estudo que está sendo realizado é a padronização das lajes de regularização e flutuantes. Todos os projetos já executados estão sendo avaliados a fim de chegar a uma seção transversal e armaduras ótimas que pouparão tempo e recursos dos futuros projetos.

COMENTÁRIOS FINAIS

Nota-se que a evolução dos sistemas amortecedores implantados nas linhas do Metrô de São Paulo é decorrente da busca contínua de novas tecnologias, com o intuito de se manter em consonância com o estado da arte neste assunto, além da experiência adquirida das lições aprendidas com nossos erros e acertos. Cabe lembrar também, que a estrutura do Metrô de São Paulo, que abrange áreas de Expansão (projeto), Manutenção e Operação, favorece sobremaneira o feedback e troca de informações técnicas, que propiciam o contínuo aprimoramento técnico de todas as áreas. Ressalta-se, que tal evolução se deve também ao salutar hábito de gestão do conhecimento praticado pela área de via permanente.

A participação do Metrô de São Paulo no seleto grupo COMET, composto pelas operadoras de metrô mais carregadas do mundo, possibilita a troca de experiências e conhecimentos que apontam estar o Metrô de São Paulo na vanguarda do assunto de amortecimento de vibrações e ruídos secundário.

** **Adilson Roberto Takeuti** é engenheiro civil, mestre, doutor e pós-doutorado em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos (USP/EESC). Assessor Técnico I de Projetos de Via Permanente da Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô*
E-mail: imprensa@metrosp.com.br
*** **Janaina Tobias de Carvalho** é engenheira civil, mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos (USP/EESC). Engenheira Especializada de Projetos de Via Permanente da Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô*
E-mail: imprensa@metrosp.com.br
**** **Antônio José Caldas de Sousa** é engenheiro civil, UNESP/Bauru. Assessor Técnico III da Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô*
E-mail: imprensa@metrosp.com.br