



Atenuação das vibrações geradas pelo tráfego dos trens: aspectos da concepção do sistema com lajes flutuantes

JANAINA TOBIAS DE CARVALHO*
RICARDO CARRAZEDO**
ADILSON ROBERTO TAKEUTI **

Qualquer sistema de transporte público deve situar-se próximo à população. No caso do metrô, a proximidade de trás inúmeras facilidades e vantagens, mas pode ocasionar alguns efeitos colaterais como ruídos e vibrações oriundos do tráfego dos trens.

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 fundações de certa edificação lindeira e se propagar por toda a estrutura.

Na fase de projeto é possível prever elementos de superestrutura de via permanente que atenuem as vibrações antes que elas sejam transmitidas ao túnel. Devido à sua grande capacidade de atenuação e facilidade de adequação às necessidades de diferentes situações, a solução com lajes flutuantes mostra-se, então, vantajosa dentre as possíveis opções para o problema.

Para estudar o problema das vibrações geradas pelo tráfego nos trens pode-se dividi-lo em três partes: a fonte das vibrações, o caminho que a vibração irá percorrer, e o receptor.

A fonte de vibração é o contato roda-trilho, a quantidade de energia a ser gerada nesta interação será determinante nos níveis de vibração. Resumidamente os fatores que influenciam a quantidade de energia gerada na fonte são relacionados abaixo.

- 1) Fatores operacionais: velocidade do veículo, carga por eixo, massa não suspensa e condições das rodas do trem.
- 2) Condições da via: tipo e condições dos trilhos, tipo de via (sobre lajes ou lastro), uso de fixações resilientes, uso de materiais elásticos sobre a via.

A geologia tem grande influência na transmissão das ondas de vibração. Os diferentes tipos de solos nas camadas, existência de água ou de leito rochoso são alguns dos

fatores que podem ser citados. Ainda quanto ao caminho a ser percorrido pelas ondas a profundidade e a massa do túnel além do seu método construtivo são fatores que influenciam o caminho das ondas.

Os receptores, ou seja, as edificações vizinhas às linhas férreas são onde os níveis de vibração podem causar incômodos. Os fatores que influenciam os receptores são a interação fundação-solo, massa do prédio e fatores de amplificação e atenuação da edificação, atenuação física e geométrica por andar e amplificações em elementos esbeltos.

O resumo destes elementos pode ser visto na figura 1.

As vibrações originadas pelo tráfego ferroviário podem causar desconforto nos ocupantes das edificações, mau funcionamento em equipamentos de precisão e ruídos secundários. O dano estrutural raramente ocorre (Federal Transit Administration, 2006).

Os níveis de vibrações considerados aceitáveis nos receptores são função do tipo e ocupação da edificação,

por exemplo, o nível admissível em uma residência unifamiliar é inferior ao de um edifício comercial.

Apesar de o deslocamento ser uma grandeza de fácil entendimento, raramente é utilizado para descrever vibrações. A maioria dos sensores que medem essa grandeza o

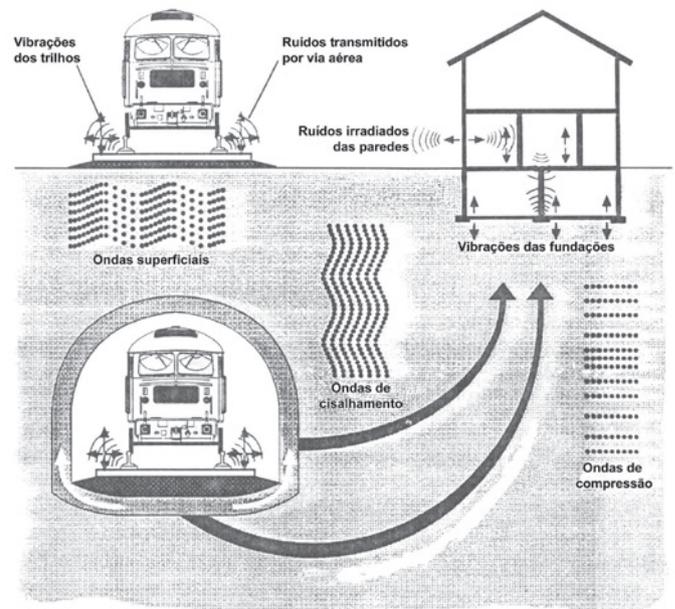


Figura 1 - Problema do estudo de vibrações - componentes

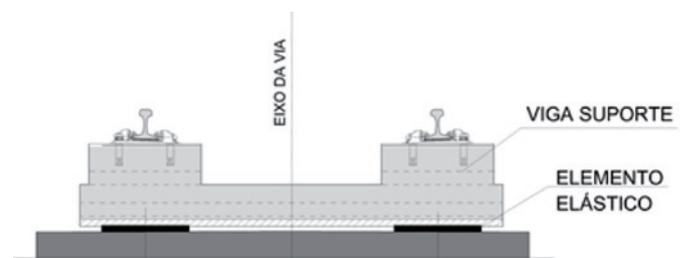


Figura 2 - Laje com viga suporte sobre apoio elástico

faz a partir da velocidade ou a aceleração.

Como o corpo humano leva algum tempo para perceber a existência de vibrações, este responde a uma média de amplitudes, a amplitude RMS (Root Mean Square) é usada para calcular a média das amplitudes, sendo a raiz quadrada da média das amplitudes do sinal ao quadrado A escala de análise adequada para o comportamento quanto as vibrações é decibel (dBV). Desta forma pode-se calcular a vibração em decibéis segundo a Equação 1.

$$L = 20 \times \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

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). No caso do presente estudo será utilizada $v_{ref}=25,4 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$.

A tabela 1 apresenta os níveis aceitáveis de vibração para cada tipo de edificação de acordo com as especificações técnicas do Metrô de São Paulo.

SISTEMA MASSA MOLA

De modo simplificado, uma laje flutuante consiste de um sistema tipo massa-mola que pode ser entendido como uma massa apoiada sobre um elemento elástico. Para esta finalidade, consideram-se a laje de concreto armado, trilhos e fixações como a massa e determinado elastômero ou molas helicoidais correspondem à sua componente elástica. Tal sistema com um grau de liberdade apresenta uma frequência natural pequena que possibilita a atenuação de frequências superiores à $\sqrt{2}$ vezes a frequência natural do sistema.

No metrô de São Paulo dois tipos de seções atualmente são utilizados nos sistemas massa mola.

As lajes com vigas suporte são largamente utilizadas e são caracterizadas por uma seção transversal composta por duas vigas longitudinais as quais as fixações dos trilhos são presas diretamente sobre estas. Estas duas vigas podem ou não estar ligadas por uma laje armada esbelta. Este tipo de seção

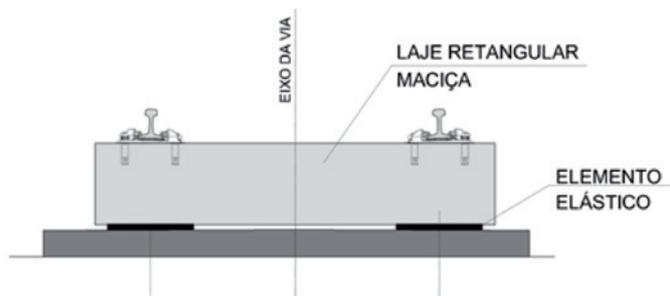


Figura 3 - Laje retangular sobre apoio elástico

Tabela 1 - Critérios para vibrações máximas provocadas pela operação de trem

A - Residências e Edifícios e áreas de pernoite				
Categorias da Área da Comunidade		Níveis Máximos de Vibração Transmitida por Via Sólida (dB re: $25,4 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$) (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: $25,4 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$) (2)
Salas de concerto / Estúdios de TV	65
Auditórios / Salas de música	70
Igrejas / Teatros	70-75
Dormitórios de Hospitais	70-75
Tribunais	75
Escolas / 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 superfície de piso dentro dos edifícios.

(2) Referência padrão para níveis de velocidade apresentada logarithmicamente em decibéis. Fonte: Wilson, Ihring & Associates (adotado por MARTA, WMAta, BARJ, BART, MTA, CTA, NFTA, SCTD E MTDB como critérios de projeto).

pode ser usado com mantas, tiras elastoméricas, PADs (elementos elastoméricos discretos) ou sistemas amortecedores de molas helicoidais (figura 2). Uma das principais vantagens é o reduzido volume de concreto utilizado.

A via sobre lajes retangulares é caracterizada por uma laje de seção retangular moldada in loco com o trilho sendo fixado diretamente sobre a laje com as fixações. É convencional no Metrô de São Paulo que este tipo de solução pos-

sua uma laje de regularização com uma espessura reduzida para que a laje principal possa se apoiar adequadamente e permitir uma concretagem mais precisa. As lajes podem também estar apoiadas sobre elementos resilientes discretos, em tiras ou mesmo molas helicoidais (figura 3).

Sendo a laje de concreto a massa do sistema, as molas (apoios elásticos) podem ser apoios elastoméricos ou molas helicoidais embebidas em líquido viscoso (figura 4).

Os elementos elastoméricos vêm sendo utilizados na atenuação de vibrações em vias permanentes como palmilhas resilientes das placas de fixação e como apoios elásticos.

Diversos tipos de materiais são utilizados para este fim, e pode-se citar o cloropreno, borracha natural, copolímero etileno-pro-

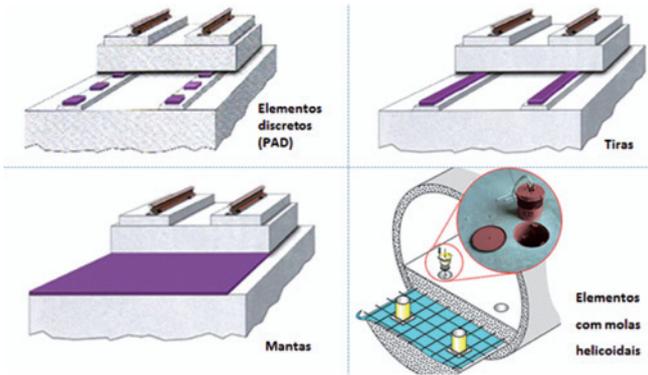


Figura 4 - Tipos de apoios elásticos¹

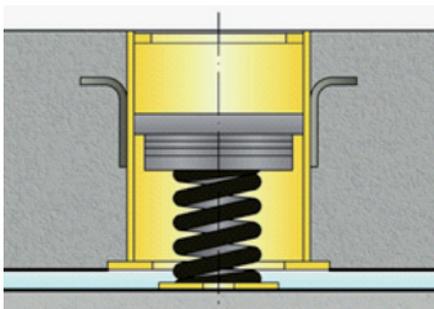


Figura 5 - Princípio do isoamortecedor GSI-Element²

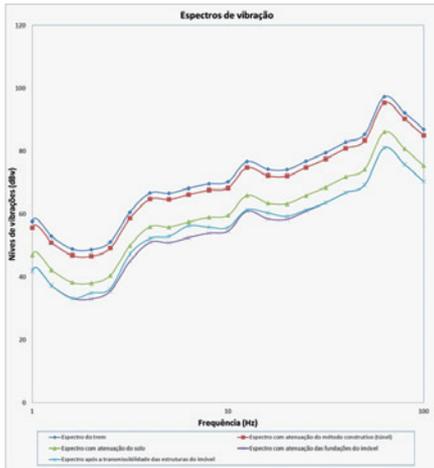
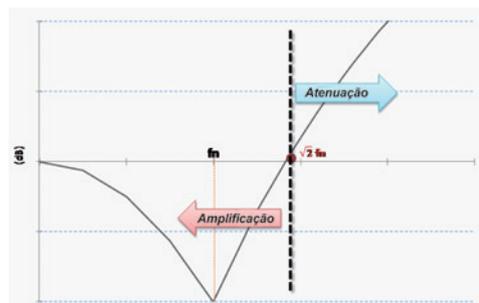


Figura 6 - Amplificação e atenuação em relação a frequência natural do sistema



7 - Amplificação e atenuação em relação a frequência natural do sistema

pileno-dieno (Calemberg Ingenieure, 2010). Como já citado acima podem ser utilizados como mantas, tiras ou PADS. Os elementos podem ser classificados pela sua capacidade de atenuação. Assim as mantas atenuam menos do que as tiras que, por conseguinte atenuam menos do que os PADS devido à sua rigidez.

As molas vêm sendo utilizadas como apoios elásticos desde 1994, em Berlim, na Alemanha (Wagner, 2004). Por sua alta elasticidade que faz com que a frequência natural da via seja baixa (menor do que 8 Hz) é considerada a forma mais eficaz de mitigar os efeitos das vibrações vindas do tráfego dos trens.

Segundo Wagner (2004), as principais características das molas helicoidais quando utilizadas como apoios elásticos são: (a) alta capacidade de carga; (b) relação linear força x deslocamento; (c) alta rigidez horizontal; (d) equivalência entre as rigidezes estática e dinâmica; (e) propriedades elásticas constantes; (f) alta durabilidade.

A figura 5 mostra o princípio do isoamortecedor.

ADOTANDO UM SISTEMA

A escolha do tipo de seção e apoio elástico leva em consideração a necessidade de amortecimento e a adaptação da seção da via permanente a seção do túnel ou elevado.

Após o levantamento dos tipos de edificações vizinhas as vias, tipo de solo, profundidade da via e tipo de túnel, cálculos são realizados para definir o nível de atenuação necessário. A figura 6 mostra todos os espectros de vibração em cada uma das etapas de cálculo.

Com esse dado em mãos, podem-se definir a massa e a elasticidade da mola, necessárias para conseguir que os níveis propostos sejam atendidos.

As seções transversais das lajes normalmente são pré-definidas levando-se em conta o espaço reservado a via permanente no túnel e o sistema construtivo da via permanente adotado. Assim trabalha-se com algumas espessuras para uma mesma largura e tipo de seção (viga suporte ou laje retangular).

As molas do sistema serão adotadas a fim de que seu efeito combinado com a seção da laje resulte em uma atenuação desejada.

A frequência natural do sistema é dada pela Equação 2.

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

O contato entra roda do trem e o trilho gera um espectro de vibrações que é convertido em um nível global de amplitudes de vibração (dBV).

Como o sistema massa mola só atenua vibrações maiores que $f_n \cdot \sqrt{2}$ (ver figura 7) para conseguir atenuar um espectro maior de frequências vibratórias, deve-se adotar um coeficiente de elasticidade da mola (k) que forneça uma frequência natural que respeite essa relação para alcançar o amortecimento pretendido.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a implantação de uma nova linha de metrô o projeto deve prever os níveis de vibração que podem chegar às edificações e para determinar medidas de mitigação dos efeitos indesejados da passagem dos trens.

As lajes flutuantes vêm se mostrando muito eficazes e muito adaptáveis a diversos tipos de seções de túneis e necessidade de atenuação. Varrendo uma ampla faixa de capacidade de amortecimento, com a variação do tipo de seção e apoio elástico, tornam os projetos de atenuação de vibrações mais eficazes e econômicos.

Notas

¹ Companhia do Metropolitano de São Paulo. Via Permanente. Disponível em: (http://www.metro.sp.gov.br/construcao_civil/via_permanente/te-superestrutura3.shtml). Acesso em 25/09/2011.

² Gerb - Jack-Up GSI-Elements. Disponível em: (<http://www.gerbua.com/index.php?id=107>). Acesso em 14/01/2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CALEMBERG INGENIEURE - Tecnologia de ponta para sistemas de apoios elastoméricos na construção civil. 1ª Salzhemmendorf, 2010.
- [2] FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION - Transit Noise and Vibration Impact Assessment: FTA-VA-90-1003-06. Washington, 2006.
- [3] WAGNER, Hans-georg - Vibration Control Systems for Trackbeds and Buildings Using Coil Steel Springs. In: Acoustics, 4., 2004, Gold Coast. Proceedings... Darlinghurst: Australian Acoustical Society, 2004. p. 99-104.

* **Janaina Tobias de Carvalho** é engenheira civil, mestranda em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e engenheira na Coordenadoria de Via Permanente, Metrô-SP
E-mail: jtcarvalho@metrosp.com.br

** **Ricardo Carrazedo** é professor doutor do Departamento de Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP)
Email: rcarrazedo@sc.usp.br

*** **Adilson Roberto Takeuti** é engenheiro civil, mestre e doutor em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e assessor técnico I do Metrô-SP.
E-mail: atakeuti@metrosp.com.br