DERYON LLOYD DE SOUZA LEITE

**Estudo de alternativas para atenuação de vibração e ruído em via permanente
metroferroviária de base rígida em área urbana**

São Paulo

2019

DERYON LLOYD DE SOUZA LEITE

**Estudo de alternativas para atenuação de vibração e ruído em via permanente
metroferroviária de base rígida em área urbana**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof.^a Dra. Rosângela dos Santos
Motta

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Leite, Deryon

Estudo de alternativas para atenuação de vibração e ruído em via permanente metroferroviária de base rígida em área urbana / D. Leite -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

93 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Dinâmica das estruturas 2.Vias permanentes 3.Ferrovias subterrâneas 4.Metrô 5.Vibrações I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

À minha família e à memória de Sonia Maria de Almeida, inesquecível professora
que tanto me incentivou a realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe dona Benta, que com pouca instrução me ensinou a ser um ser humano correto e verdadeiro.

Ao meu pai Sergio pelo total incentivo aos estudos, ao senso de justiça e honestidade.

À minha esposa e amiga Monique Dias, que desde os tempos de graduação me incentiva e me apoia, pela compreensão, paciência, carinho, amor, incentivo e principalmente amizade.

À Profa. Dra. Rosângela dos Santos Motta, minha orientadora, pela paciência, incentivo, cobrança, por confiar no meu potencial para desenvolver este trabalho e pela disponibilidade das orientações tão valiosas e dedicadas.

Ao meu amigo Felipe Rabay pelo incentivo ao início do curso, constante apoio, força, sempre disposto a ajudar e a me incentivar a qualquer momento.

Aos meus colegas de trabalho Alberto dos Santos e Laércio Yassuda, referências metroferroviárias na minha vida profissional que me inspiraram a realizar este estudo. Agradeço todo apoio, ensinamentos e orientações ao longo destes anos.

À Eng. Janaína Tobias de Carvalho que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pela disponibilidade, delicadeza, paciência, orientação, incentivo, força e apoio.

Aos professores Laura Maria Goretti da Motta e Ricardo Carrazedo pelas valiosas contribuições no exame de qualificação.

À Planservi Engenharia LTDA, em nome do Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki e Felipe Issa Kabbach Junior, pelo incentivo, apoio e total compreensão nas minhas ausências para cursar as disciplinas e elaboração desta dissertação.

A todos os meus professores ao longo da minha vida acadêmica. Cada um deles me inspira de alguma forma todos os dias, por isso admiro e sou grato a todos eles por compartilhar em tão valiosos conhecimentos.

Aos meus amigos e colegas que sempre me incentivaram e me deram muita força para seguir em frente.

Ao meu grande amigo Thiago Wada que sempre soube compreender as minhas ausências e sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis.

RESUMO

A preocupação com o impacto ambiental decorrente da implantação e operação de novas linhas metroferroviárias faz com que seja necessário o uso de sistemas que amortecem as vibrações e atenuem os ruídos secundários oriundos deste modo de transporte. Uma solução de atenuação largamente empregada é o sistema massa-mola, composto por lajes de concreto armado, apoiadas sobre materiais resilientes. Este trabalho tem como objetivo o estudo de alternativas para mitigação da vibração da via permanente por meio do conhecimento da variabilidade das respostas dinâmicas e frequências naturais de sistemas massa-mola criados computacionalmente. Entre as soluções propostas tem-se o uso de concreto pesado na construção da laje flutuante. A avaliação foi realizada utilizando modelos numéricos calibrados com dados experimentais presentes nas revisões bibliográficas. Os resultados do estudo indicaram que as soluções propostas podem ser consideradas nos projetos de atenuação de vibração de via permanente.

Palavras-chave: Dinâmica das estruturas. Vias permanentes. Ferrovias subterrâneas. Metrô. Vibrações.

ABSTRACT

The concern with the environmental impact resulting from the implementation and operation of new subway lines makes it necessary to use systems that cushion the vibrations and attenuate the secondary noises from this mode of transportation. A widely used attenuation solution is the mass-spring system, composed of reinforced concrete slabs resting on resilient materials. The objective of this work is to study the alternatives for permanent vibration attenuation through the knowledge of the variability of the dynamic responses and natural frequencies of computationally created mass-spring systems. Among the proposed solutions is the use of heavy concrete for construction of the floating slab. The evaluation was performed using numerical models calibrated with experimental data from bibliographic reviews. The results of the study indicated that the proposed solutions can be considered in permanent vibration attenuation projects.

Keywords: Dynamics of structures. Permanent ways. Underground railways. Subway. Vibrations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis típicos de vibração no solo.....	17
Figura 2 - Contribuição dos componentes no comportamento elástico da via permanente (%)......	22
Figura 3 - Seção típica de via em túnel	23
Figura 4 - Conjunto trilho, dormente e fixação.....	24
Figura 5 - Palmilha resiliente	24
Figura 6 - Modelo de geração de ruído	25
Figura 7 - Ilustração do mecanismo de geração de ruído oriundo de contato roda-trilho	26
Figura 8 - Propagação das vibrações pelo solo e edificações	27
Figura 9 - Resposta humana à vibração de construção residencial com 4 a 15 trens de trânsito rápido por hora	35
Figura 10 – Porcentagem de pessoas com vários graus de irritação devido a vibrações residenciais, plotadas contra valores máximos estatísticos calculados para velocidade ponderada, V_{w95} em mm/s.....	36
Figura 11 – Esquemas de barreiras acústicas ferroviárias.....	39
Figura 12 – Barreira acústica Linha 3 – Vermelha do Metrô de São Paulo.....	39
Figura 13 - Esquema transversal da indução de vibração na estrutura do MASP	42
Figura 14 – Instrumentação do teatro do MASP	42
Figura 15 - Sistema básico de um grau de liberdade	47
Figura 16 - Equilíbrio dinâmico das forças	48
Figura 17 - Coeficiente de amplificação dinâmica, com $D(\beta)$ para distintos valores de ξ	51
Figura 18 - Coeficiente de amplificação dinâmica $D(\beta, \xi)$	52
Figura 19 - Sistema de um grau de liberdade com isolamento de vibrações	52
Figura 20 - Fator de transmissibilidade, $TR(\beta)$, para distintos valores de ξ	53
Figura 21 - Sensibilidade da relação entre a estabilização das rigidezes	55
Figura 22 - PADs para apoio de laje flutuante.....	56
Figura 23 - PADs para apoio de laje flutuante.....	57
Figura 24 – Seção transversal de um túnel em via dupla indicando a posição dos PADs	57

Figura 25 - Execução do posicionamento da laje flutuante da Linha 5 – Lilás do Metrô de SP	58
Figura 26 - Inserção dos PADs na Linha 4 – Amarela do Metrô-SP	58
Figura 27 - Elevação da laje flutuante depois da ativação das molas da Linha 2 – Verde do Metrô-SP	59
Figura 28 - Içamento da laje flutuante para instalação dos PADs na Linha 5 – Lilás do Metrô-SP	59
Figura 29 - Corte do isoamortecedor instalado na laje flutuante	60
Figura 30 – Seção transversal da via permanente com isoamortecedores.....	61
Figura 31 - Isoamortecedor com mola ativada concretado na laje da Linha 11 - Coral da CPTM	61
Figura 32 - Posicionamento dos isoamortecedores para concretagem da laje flutuante da Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo.....	62
Figura 33 - Inserção das molas nas carcaças dos isoamortecedores antes da ativação da Linha 2 – Verde do Metrô-SP	62
Figura 34 – Brita de magnetita	64
Figura 35 – Brita de barita	64
Figura 36 – Limonita.....	64
Figura 37 – Amostra de concreto com agregado pesado. Barita, magnetita, limonita	65
Figura 38 - Necessidade de atenuação das vibrações – Fluxograma de estudo analítico.....	66
Figura 39 - Modelos considerando solo envolvente: três vigas (laje flutuante)	69
Figura 40 – Fluxograma da metodologia no usada nesta dissertação	72
Figura 41 – Nível de vibração no túnel Caso 0.....	74
Figura 42 – Nível de vibração do túnel em relação à variação de massa específica	75
Figura 43 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de espaçamento dos PADs	76
Figura 44 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de rigidez dinâmica dos PADs	78
Figura 45 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de espaçamento dos PADs e fixando o valor da massa específica da laje	79

Figura 46 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de rigidez dinâmica dos PADs e fixando o valor da massa específica da laje	80
Figura 47 – Variação das frequências naturais em relação ao aumento da massa específica	81
Figura 48 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da massa específica	82
Figura 49 - Variação das frequências naturais em relação ao aumento do espaçamento entre os PADs.....	83
Figura 50 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da massa específica	83
Figura 51 - Variação das frequências naturais em relação ao aumento da rigidez dinâmica dos PADs	84
Figura 52 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da rigidez dos PADs	85
Figura 53 – Comparação entre o método de 1 GL e em EF para todos os casos desta pesquisa.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de α e c	30
Tabela 2 – Valores de n para tipos e fontes de ondas	30
Tabela 3 – Atenuação dentro das edificações.....	31
Tabela 4 - Efeitos da vibração no organismo	32
Tabela 5 - Efeitos da vibração no organismo, segundo a frequência.....	33
Tabela 6 - Problemas decorrentes de ruídos	34
Tabela 7 - Critério geral de impacto das vibrações e ruído	37
Tabela 8 - Critério para edificações especiais de impacto das vibrações e ruído	38
Tabela 9 - Métodos de atenuação de vibração do Expresso Leste (Artur Alvim à Guaianazes).....	44
Tabela 10 - Características das massas de trens	47
Tabela 11 – Classificação dos agregados segundo sua massa unitária	63
Tabela 12 - Características geométricas da seção do túnel.....	69
Tabela 13 - Características geométricas considerando a seção completa (duas vigas suportes)	70
Tabela 14 - Rigidez e espaçamento dos elementos elásticos.....	70
Tabela 15 - Espectro do trem obtido graficamente, em função da frequência natural (f_n).....	70
Tabela 16 - Valores para os casos de estudo desta pesquisa	73
Tabela 17 – Valores característicos do Caso 0	74
Tabela 18 – Resultados dos 4 primeiros casos estudados	75
Tabela 19 - Resultados dos casos de 5 a 9	76
Tabela 20 – Resultados dos casos 10 a 16	77
Tabela 21 – Resultados dos casos 17 a 21	79
Tabela 22 - Resultados dos casos 22 a 28	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1GL	1 Grau de Liberdade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
DOT	<i>Department of Transportation</i>
EF	Elementos Finitos
EUA	Estados Unidos da América
FTA	<i>Federal Transit Administration</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MASP	Museu de Arte de São Paulo
Metrô-SP	Companhia do Metropolitano de São Paulo
NATM	<i>New Austrian Tunnelling Method</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
PAD	Ponto de Apoio Discreto
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAP2000	Software para Análise Estrutural por Elementos Finitos
SMM	Sistema Massa-Mola
VCA	Vala à céu aberto
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante
A_{CP}	Amortecimento composto
A_F	Amortecimento físico
A_G	Amortecimento geométrico
c	Coeficiente de amortecimento
c_{crit}	Amortecimento crítico
C_i	Amortecimento histerético
C_v	Amortecimento viscoso
D	Fator de amplificação dinâmica
f	Frequência angular
f_d	Frequência de estabilização da rigidez
f_D	Força de amortecimento
f_I	Força inercial
f_{max}	Força máxima
f_n	Frequência natural
f_s	Força da mola
F	Força
G	Constante complexa, módulo de cisalhamento
k	Rigidez da mola
k_d	Rigidez dinâmica
k_s	Rigidez estática
K	Reação elástica em fase com o deslocamento
m	Massa
M_s	Massa suspensa
M_t	Massa total do carro
M_u	Massa não suspensa do trem
n	Coeficiente de atenuação geométrica
s	Constante

t	Tempo
v	Deslocamento
$\dot{v}$	Velocidade
$\ddot{v}$	Aceleração
V	Amplitude da velocidade
V_{ref}	Amplitude da velocidade de referência
TR	Transmissibilidade
x	Comprimento
α	Fator de perda por comprimento de onda
β	Relação entre frequências
γ_a	Massa unitária
δ_1, δ_2	Deflexão de lajes adjacentes
ξ	Fator de amortecimento
ρ	Amplitude dos deslocamentos, densidade do solo
θ	Ângulo de fase
ϕ	Ângulo de fase randômico
ω	Frequência
ω_d	Frequência amortecida
ω_t	Frequência natural circular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo	20
1.2	Apresentação da dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Via Permanente	22
2.2	Vibrações geradas por tráfego ferroviário	24
2.2.1	Fonte	24
2.2.2	Caminho de propagação	27
2.2.3	Receptor	31
2.2.4	Resposta humana às vibrações.....	32
2.3	O Sistema Massa-Mola (SMM)	41
2.3.1	Conceitos dinâmicos do sistema massa-mola - Oscilação harmônica simples	45
2.4	Apoios Elastoméricos.....	54
2.5	Isoamortecedores.....	60
2.6	Concreto pesado	63
2.7	Critérios para o projeto de mitigação das vibrações metroferroviária	66
3	METODOLOGIA	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1	Resultados	74
4.2	Variabilidade da frequência natural e do nível de vibração no túnel	81
4.3	Passos para avaliação de uma solução para atenuação de ruído e vibração em via permanente	87
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	88
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

A expansão da malha metroferroviária na cidade de São Paulo, bem como outros grandes centros do país, demanda projetos cada vez mais sofisticados da infraestrutura da via permanente. Os projetos geométricos, por exemplo, enfrentam muitos desafios ao definir o traçado entre dois extremos de uma linha metroferroviária, como terrenos com declividades muito acentuadas, existência de interferências naturais (por exemplo: leito de rios e solos moles), dispositivos de instalações hidráulicas enterrados (como adutoras) e o cruzamento com linhas existentes. Além disso, terrenos muito acidentados e as próprias fundações das edificações podem dificultar o projeto do traçado da via, devido à aproximação com estruturas enterradas, como as fundações das edificações.

Segundo Carvalho (2015), como houve uma preocupação tardia com a distribuição dos centros comerciais e com os modos de transporte, não só na cidade, mas também no estado de São Paulo, bem como em diversas cidades do mundo, esta expansão tem provocado problemas ambientais relacionados a ruído e vibração.

As fundações das edificações também podem facilitar a transmissão de ondas vibratórias oriundas do tráfego de trens metropolitanos, especialmente em túneis, podendo impactar seriamente as edificações lindeiras: o trem metropolitano, quando está em contato com o trilho e em movimento, produz ondas vibratórias que se direcionam à estrutura do túnel e do solo envolvente, até atingir as fundações das edificações, as quais podem se atenuar ou se amplificar pelas suas estruturas. Essas vibrações podem causar desconforto às pessoas que as utilizam, interferir no funcionamento de máquinas e equipamentos que requerem certa precisão e até mesmo causar danos permanentes a estas estruturas (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2006)

Na Figura 1 é possível verificar as faixas de vibração e a relação da percepção humana e estrutural. É possível notar que a região de vibração oriunda de tráfego ferroviário se localiza entre 70 e 85 dBV (decibéis), e a percepção humana reage a vibrações a partir de 65 dBV (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2006). Pelo gráfico da Figura 1, verifica-se que o transporte ferroviário pode trazer a necessidade de medidas que aliviem estes fenômenos dinâmicos e, por consequência, a geração de ruídos relacionados a eles.

Figura 1 - Níveis típicos de vibração no solo

Fonte: Adaptado de Federal Transit Administration (2006)

Assim, no projeto de uma via permanente em área urbana muitas vezes se faz necessária esta consideração, determinando-se os níveis de vibração que podem ser considerados aceitáveis na transmissão para as edificações localizadas na superfície. As soluções de atenuação de vibração que devem ser estudadas para cada trecho costumam ser bastante onerosas ao projeto executivo, sendo cerca de 40% mais caras (Edital Metrô-SP¹) que as soluções convencionais (sem atenuação de vibração).

¹ COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (Org.). Licitações/Editais. Processo 41428212

Muitas questões permeiam o estudo das atenuações das excitações dinâmicas oriundas de tráfego metroferroviário, principalmente nos grandes centros urbanos, onde há dificuldade de posicionamento dos traçados. No caso de vias existentes, por exemplo, é necessário compreender o fenômeno dinâmico envolvido, de forma a empregar as soluções mais adequadas para cada projeto.

Lichtberger (2011) explica que os materiais utilizados na composição da via permanente sobre laje de concreto são muito mais rígidos que o lastro granular. A substituição do lastro por um material mais rígido tem grande influência no comportamento mecânico da via. Esta perda de elasticidade no sistema sobre laje de concreto é geralmente compensada com a utilização de elementos elásticos, de forma a conferir ao sistema a resiliência necessária para o funcionamento adequado da estrutura.

O sistema massa-mola é uma técnica muito comum empregada na mitigação de vibrações em sistemas metroferroviários em túneis, onde são instalados dispositivos resilientes como apoio, para absorverem grande parte da energia gerada pela passagem das composições sobre a laje. A esta laje dá-se o nome de laje flutuante, que é a estrutura de fixação dos trilhos e onde os impactos do contato roda-trilho são absorvidos e direcionados às molas que, por sua vez, estão apoiadas na estrutura da via. De modo geral, também são empregados dispositivos atenuantes entre a laje flutuante e a estrutura de apoio.

Em São Paulo, por exemplo, o sistema massa-mola tem sido utilizado muito recentemente, tendo sido aplicado na Linha 11 – Coral (CPTM – Expresso Leste), 4 – Amarela e 5 – Lilás, enquanto que em diversos locais do mundo tem sido empregado em larga escala, como nos VLT (veículo leve sobre trilhos) de Zagreb (Croácia) e de Tóquio (Japão), além dos metrô de Berlim e Munique (Alemanha) e de Nova Iorque (EUA)², etc.

É importante ressaltar que, com a aproximação entre os greides dos túneis entre linhas diferentes, devido aos traçados das linhas metropolitanas e à proximidade com fundações de edificações (como já comentado), é possível que haja restrições e dificuldades no projeto quanto a questões como cota do topo do boleto e gabarito

² Informações encontradas no catálogo *Getzner Mass-Spring System*

dinâmico do túnel. Conhecer os efeitos que a mudança de características da via permanente pode acarretar na frequência natural dela é de grande interesse, visto que a melhor compreensão da variabilidade do comportamento da via pode ser fator decisivo na escolha de uma melhor solução para possíveis dificuldades de projeto, em um cenário de traçados cada vez mais concorrentes.

Por outro lado, não há acesso às considerações dos métodos de cálculo utilizados para o projeto da atenuação da vibração de via permanente: durante as pesquisas deste trabalho notou-se que há dificuldade em se obter tais metodologias, no que se refere as considerações e as referências na literatura que embasem os métodos, uma vez que são confidenciais das empresas que as desenvolveram e utilizam. Além disso, assim como os métodos de cálculo, espectros de vibração de trens metropolitanos também são de difícil obtenção na literatura, o que motivou a apresentação nesta dissertação de um espectro que pode ser utilizado em trabalhos futuros.

São propostas neste trabalho algumas soluções, como mudança dos valores das rigidezes usuais dos elementos elásticos da via (apoios elastoméricos) e utilização de concreto com agregado pesado na laje flutuante, sendo esta última uma aplicação diferenciada em um sistema do tipo massa-mola. Ou seja, levou-se em consideração que uma das opções para o ajuste das frequências seja o aumento da massa do sistema, sem alterar as características geométricas estabelecidas inicialmente. É vantajoso que esta solução se justifique, pois, considerando a massa necessária no sistema e a conservação da geometria da via, como a espessura, problemas de gabarito podem ser resolvidos lançando mão desta solução.

Utilizando os conceitos já empregados nos projetos de atenuação de vibração de via permanente, e uma metodologia de cálculo de previsão de vibração existente na literatura, este trabalho propõe tais alternativas e as avalia do ponto de vista das frequências naturais da via permanente.

1.1 Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo estudar diferentes soluções de atenuação de vibração e de ruído, usadas para projetos metroferroviários de via sobre base rígida.

Faz-se a proposição de uma alternativa em que seriam empregados agregados pesados na confecção do concreto de tal base rígida. Para tanto, foi avaliada a sensibilidade das frequências naturais do sistema, o nível global de vibração, quando há variação de parâmetros como espaçamento dos apoios elásticos e suas rigidezes.

Por meio de uma análise paramétrica com o programa SAP 2000 e com um método de cálculo, o estudo traz uma comparação das referidas soluções, empregando dados frequentemente usados em projetos metroferroviários em meio urbano. O estudo considera as frequências naturais verificadas com as diferentes soluções em um determinado espectro de vibração. Os resultados permitem uma melhor compreensão de quais parâmetros de projeto da via permanente produzem maior impacto na questão da vibração, contribuindo para o desenvolvimento de projetos metroferroviários otimizados sob este aspecto. Ao final é apresentada uma sugestão de sequência de passos para avaliação de uma solução para atenuação de ruído e vibração em via permanente.

1.2 Apresentação da dissertação

O conteúdo de cada capítulo e a ordem de apresentação são os seguintes:

Capítulo 1: **Introdução** – Apresentação da motivação/justificativa para o desenvolvimento da pesquisa, objetivo do trabalho e apresentação da dissertação.

Capítulo 2: **Revisão bibliográfica** – Apresentação do problema de vibrações, conceitos básicos da formulação de sistemas massa-mola, geração de forças dinâmicas a partir das irregularidades da via e os prejuízos dos efeitos da vibração nos seres humanos.

Capítulo 3: **Metodologia** – Descrição dos modelos utilizados, das variáveis, e do tipo de via permanente a ser avaliado.

Capítulo 4: **Resultados e discussões** – Apresentação dos resultados obtidos e comparação com os dados experimentais de referência.

Capítulo 5: **Conclusões e sugestões** – Apresentação das conclusões e comentários adicionais.

Capítulo 6: **Referências bibliográficas.**

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Via Permanente

Via permanente é o conjunto de elementos que compõe o pavimento ferroviário, sendo dividido em infraestrutura e superestrutura. O tipo mais comum de via permanente é a sobre lastro, tendo como grade ferroviária os trilhos, fixações e dormentes, apoiados sobre uma camada de lastro granular, camada de sublastro (muitas vezes) e subleito.

A interação entre as partículas das camadas de lastro e subleito conferem ao pavimento ferroviário certa elasticidade. Lichtberger (2011) mostra na Figura 2 a contribuição de cada componente no comportamento elástico da via.

Figura 2 - Contribuição dos componentes no comportamento elástico da via permanente (%)

Fonte: Adaptado de Lichtberger (2011)

É possível ver que a superestrutura da via é responsável por cerca de 60% da elasticidade da plataforma ferroviária. Um terço desta elasticidade é atribuída ao lastro, que com suas propriedades granulométricas conferem à via permanente uma

base elástica. Assim, as vias que não estão apoiadas sobre lastro, como as em laje de concreto, têm características menos elásticas que as lastradas. Esta perda de elasticidade deve ser compensada por meio de elementos elásticos instalados na via, que exercem papel fundamental no controle de vibrações das vias permanentes sobre base rígida.

Na via permanente sobre base rígida, a estrutura de concreto armado substitui a camada de lastro das vias permanentes convencionais (vias lastradas). Na Figura 3 estão indicados os principais componentes da via permanente rígida.

Figura 3 - Seção típica de via em túnel

Fonte: Adaptado de Monteiro (2015)

No caso de vias em túnel, o enchimento é feito sobre o *invert* deste, onde devem ser executadas valas de drenagem e sobre ele a laje de regularização, que na fase de execução tem a função de apoio para a concretagem da laje dita flutuante. Nela estão contidos os elementos de apoio dos trens, como trilhos e fixações. Após a cura do concreto da laje flutuante, os apoios elásticos são inseridos entre esta e a laje de regularização.

Ainda entre as fixações e a laje, podem existir palmilhas resilientes que têm função de isolamento elétrico do conjunto de trilhos e fixações e garantem melhor assentamento da placa de apoio no concreto da laje. As Figura 4 e Figura 5 ilustram um tipo de conjunto de fixação muito utilizado nas obras das linhas de Metrô-SP e a palmilha resiliente que compõe este conjunto.

Figura 4 - Conjunto trilho, dormente e fixação

Fonte: Adaptado de BrrailParts (2017)

Figura 5 - Palmilha resiliente

Dimensões: 25 x 25 cm

Fonte: Adaptado de BrRailParts (2017)

2.2 Vibrações geradas por tráfego ferroviário

Qualquer modelo de vibração terrestre induzida pela passagem de trens inclui, pelo menos, três componentes principais: fonte, caminho de propagação e receptor. Em qualquer uma destas três posições há fatores que podem amplificar ou atenuar as vibrações que são geradas pelo tráfego ferroviário. A seguir cada uma delas é explicada.

2.2.1 Fonte

De acordo com uma revisão do estado da arte feita por Nelson e Saurenman (1983), a vibração terrestre causada pelo tráfego de trens é influenciada por fatores como a rugosidade das rodas e dos trilhos, apoios dos trilhos,

características dinâmicas do suporte de rolamento, rigidez da plataforma ferroviária, estrutura e características do solo.

Já segundo Thompson (2009) existem muitas fontes de vibração e ruído em um sistema de via permanente, sendo que a mais importante delas é a causada pelo contato roda-trilho. Imperfeições nas rodas, desgaste excessivo dos trilhos, soldas com acabamento irregular e desgaste nas rodas, combinadas às imperfeições e desgaste dos trilhos, são alguns exemplos de situações que podem agravar o efeito vibratório da passagem dos trens. No fluxograma da Figura 6, Thompson (2009) descreve a geração das vibrações e seus efeitos. Em seguida, a Figura 7 representa a interação roda-trilho e a origem do ruído primário³ a partir deste contato.

Figura 6 - Modelo de geração de ruído

Fonte: Adaptado de Thompson (2009)

³ Considera-se ruído primário aquele ocasionado pelo contato roda-trilho que se propaga pelo ar. Este fenômeno acontece no tráfego de trens de superfície e elevados (DAWN, 1983)

Figura 7 - Ilustração do mecanismo de geração de ruído oriundo de contato roda-trilho

Fonte: Thompson (2009)

Bahrekazemi (2004) explica que a caixa do trem está conectada ao truque através da suspensão secundária, que geralmente, no caso de trens de passageiros, consiste em uma bolsa de ar. O peso da caixa do trem é, então, transferido para as rodas através de um truque que está conectado às rodas pelo sistema de suspensão primária. As rodas transferem a carga para os trilhos, isto é, estão em contato com os trilhos e aí há a geração de vibração.

Dawn e Stanworth (1979), assim como Krylov (1995), Madshus *et al.* (1996) e Degrande e Lombart (2000) reconheceram a velocidade do trem como um fator importante que influencia a quantidade de energia transmitida da via para edificações lindeiras.

Segundo Fujikake (1986), picos no espectro de vibração do solo ocorrem na frequência de passagem dos eixos. Jones (1994) enumera os mecanismos de origem das vibrações das passagens de trem como rugosidade, vibração gerada na via, excitação paramétrica na frequência de passagem pelos dormentes e vibração quase-estática devido a carga em movimento.

Krylov e Ferguson (1994), usando as funções de Green, discutem a teoria de geração de vibrações do solo de baixa frequência devido à tensão quase estática das rodas. Considerando o solo como base elástica, e usando o Euler-Fórmula de Bernoulli para um feixe elástico em uma base elástica, a geração de vibrações devido à passagem da curva de deflexão de cada dormente e a vibração induzida por cada dormente no solo foi formulada. Expressando que a maior parte da energia é transportada por ondas de Rayleigh, apenas essas ondas foram consideradas na

determinação da densidade espectral da vibração vertical nos estudos de Krylov e Ferguson (1994). Concluiu-se que os espectros de vibração dependem fortemente da carga por eixo.

2.2.2 Caminho de propagação

Depois de ser gerada na via, a vibração se propaga para o entorno através do meio. A Figura 8 exemplifica o comportamento da vibração gerada nos túneis e o encaminhamento pelo solo até atingir edificações próximas. Os efeitos da vibração incluem movimento sensível dos pisos das edificações, queda de itens sobre prateleiras ou pendurados nas paredes. Em casos extremos, as vibrações podem causar danos estruturais (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2006).

Figura 8 - Propagação das vibrações pelo solo e edificações

Fonte: Adaptado de Federal Transit Administration (2006)

As vibrações terrestres de sistemas de transporte sobre trilhos podem ser motivo de séria preocupação para edificações lindeiras, por conta de desconforto sonoro e vibratório.

Jones (2010) conta que as primeiras contribuições significativas no estudo de vibrações são atribuídas a Rayleigh em 1885 e Lamb em 1904. Estes primeiros trabalhos previam matematicamente que os distúrbios em meios elásticos poderiam ser expressos por três tipos de propagação de ondas: ondas de pressão (P-waves), ondas de cisalhamento (S-waves) e as ondas de superfície.

As ondas de pressão (P-waves) e as de cisalhamento (S-waves) são denominadas ondas de corpo ou volume e se propagam em grandes extensões. As P-waves são ondas longitudinais se propagando na direção da frente de onda. As ondas de cisalhamento são ondas transversais em que as partículas se movem na direção perpendicular à frente de onda. Os deslocamentos causados pelas S-waves podem ter várias direções no plano normal à direção de propagação.

Eitzenberger (2008) explica que estas ondas são geradas quando um meio isotrópico, homogêneo e elástico é submetido a uma força. O meio sendo homogêneo, essas são as duas únicas ondas geradas. Já para um meio onde possui uma superfície livre, ondas de superfície são geradas. Elas se originam de ondas de corpo que estão se propagando ao longo do meio. Consequentemente, ondas de superfície sempre aparecerão ao longo da superfície do solo e ao longo de discontinuidades. A onda de superfície mais conhecida é a onda Rayleigh (R-waves), que se propaga ao longo da superfície em movimentos longitudinais e laterais. A velocidade de propagação é menor que a de corpo.

No caminho de propagação das ondas vibratórias no solo, Bahrekazemi (2004) define que há amortecimento composto (A_{CP}), que são o amortecimento geométrico (A_G) e o amortecimento físico (A_F), conforme mostra a Equação (1):

$$A_{CP} = A_G + A_F \quad \text{Equação (1)}$$

O amortecimento geométrico é a atenuação da vibração no caminho de propagação (solo), causada pelo espalhamento da energia quando ela se afasta da fonte. O amortecimento geométrico pode ser representado pela Equação (2).

$$A_G = k \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

A_G = amortecimento geométrico (dBV);

r_0 = distância entre a fonte e uma localização de referência (m) (exemplo: topo do boleto até a parede do túnel);

r = distância entre a fonte e o ponto onde a vibração está sendo calculada (m) (exemplo: topo do boleto até a edificação lindeira);

k = constante adimensional, cujo valor depende da característica da fonte e do tipo de onda (adota-se comumente nos projetos de engenharia os valores de $k = 3$ para fonte linear de superfície e $k = -10$ para fonte linear em túnel. Valores definidos de forma empírica)

Adicionalmente ao amortecimento geométrico do caminho de propagação (solo), considera-se também o amortecimento físico, que é fortemente dependente da frequência (BAHREKAZEMI, 2004). O método de cálculo adotado, que mostra a dependência da frequência, é dado pela Equação (3), assumindo-se que o amortecimento físico é independente do tipo de onda (compressão, cisalhamento ou superfície).

$$A_F = -\alpha \left(\frac{f}{c} \right) x \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

A_F = amortecimento físico (dBV);

α = fator de perda por comprimento de onda (dBV);

f = frequência em bandas de terço de oitava (Hz);

c = velocidade de propagação da vibração (m/s);

x = distância do ponto em que a atenuação está sendo calculada (m).

Os valores de α e c que são geralmente utilizados nos projetos brasileiros são os definidos pela *U.S. Department of Transportation* (1982) (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de α e c

Tipo de solo	α (Hz/comprimento de onda)	c (m/s)	
		Compressão	Cisalhamento
Argila	4,40	1500	150
Silte	2,60	800	160
Areia	0,86	500	150
Rocha	5,00	6000	3300

Fonte: Adaptado de U. S. Department of Transportation (1982)

Nelson e Saurenman (1983) apresentaram uma equação que calcula a atenuação da partícula a partir da fonte, em termos da velocidade de propagação. A Equação 4 é para a atenuação de propagação de ondas em meio elástico linear, onde n é dado pela Tabela 2 e, alguns exemplos de α são dados pela Tabela 1. As ondas Rayleigh são muito importantes, especialmente a maiores distâncias da via, uma vez que as ondas do corpo se dissipam mais rapidamente por espalhamento geométrico do que as ondas Rayleigh.

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-n} \cdot e^{-\alpha(r-r_0)} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

v_0 = velocidade da partícula na fonte (m/s);

r_0 = distância da fonte ao ponto de referência na superfície (m);

r = distância da fonte ao receptor (m);

n = coeficiente de atenuação geométrica (Tabela 2) ;

α = fator de amortecimento do material.

Tabela 2 – Valores de n para tipos e fontes de ondas

Tipo de onda		Fonte	
		Ponto	Linear
Ondas de corpo	Cortante	1	0,5
	Compressão	1	0,5
Ondas de superfície	Rayleigh	0,5	0
	Love	0,5	0

Fonte: Adaptado de Nelson e Saurenman (1983)

2.2.3 Receptor

Depois de ser gerado na fonte e propagar-se através do meio, as vibrações são recebidas pelas fundações de edifícios lindeiros. Das fundações, as vibrações se propagam através da estrutura dos edifícios.

De acordo com Hannelius (1974), a ressonância de todo o edifício geralmente ocorre abaixo de 10 Hz, enquanto as ressonâncias de paredes e tetos ocorrem na faixa de 10 a 60 Hz. Jones (1994) resume a resposta do edifício às vibrações como tipicamente tendo ressonâncias de todo o edifício em sua base em cerca de 4 Hz, pisos em cerca de 20 a 30 Hz e paredes e janelas acima de 40 Hz.

Jonsson (2000) apresentou a investigação experimental e teórica realizada para caracterizar e explicar vibrações estruturais e de baixa frequência relacionadas ao tráfego ferroviário. Foi concluído a partir de um estudo de caso que apenas o conteúdo de baixa frequência das vibrações é efetivamente transmitido para a fundação do prédio.

A Tabela 3 apresenta níveis globais de atenuação que podem ser utilizados para se estimar, em relação ao nível de vibração global que atinge suas fundações, o nível de vibração global dentro da edificação. Isto é, sabendo-se a vibração que atinge suas fundações, é possível se ter uma estimativa de vibração nos andares subsequentes.

Tabela 3 – Atenuação dentro das edificações

Tipo de edificação	Nível de atenuação (dB)
Térrea	-5
com 2 pavimentos	-7
de 3 a 5 pavimentos	-8
6 a 8 pavimentos	-9
9 a 10 pavimentos	-10
acima de 11 pavimentos	-11

Fonte: Adaptado de U.S. Department of Transportation (1982)

2.2.4 Resposta humana às vibrações

Os efeitos da vibração podem ser nos ocupantes dentro do prédio, nos equipamentos sensíveis e em danos à edificação. Estas são as três principais questões que surgem a esse respeito.

O excesso de vibração nas edificações pode trazer sérios riscos à saúde humana. Segundo Simões (2014), os efeitos fisiológicos e psicológicos de vibração e ruído excessivo sobre o organismo podem ocasionar diversos problemas de saúde (Tabela 4 e Tabela 5). Estes problemas vão além de problemas perceptíveis no dia a dia. Eles podem se desenvolver ao longo do tempo de exposição e podem ser de difícil identificação da causa.

Tabela 4 - Efeitos da vibração no organismo

Vibrações no corpo inteiro	Vibrações na mão/braço
Danos Físicos Irreversíveis: Lombalgia Sistema circulatório Sistema urológico	Síndrome de Raynaud (dedos brancos): Falta de sensibilidade e controle Tremor dos dedos Destruição das artérias e nervos das mãos
Distúrbios no Sistema Nervoso Central	Danos nos tendões e músculos entre o pulso e o cotovelo
Fadiga Insônia Dor de cabeça Tremores	

Fonte: Adaptado de Simões (2014)

Simões (2014) ainda completa que a nocividade dos efeitos apresentados na Tabela 4 dependerá do tipo de exposição (partes ou totalidade do corpo), da sua duração e da frequência, bem como da intensidade das acelerações. A exposição excessiva a vibrações pode determinar acidentes a curto prazo ou danos físicos irreversíveis a longo prazo. Analogamente, na Tabela 5 descreve-se os problemas decorrentes de ruído.

Tabela 5 - Efeitos da vibração no organismo, segundo a frequência

Frequência de vibração	Origem da vibração	Efeito sobre o organismo
Vibrações de frequências muito baixas (< 1 Hz)	Transportes: aviões, comboios, barcos e automóveis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estimulam o labirinto do ouvido esquerdo ✓ Perturbam o sistema nervoso central ✓ Podem produzir náuseas e vômitos
Vibrações de baixa frequência (1 a 20 Hz)	Veículos de transporte de mercadorias e passageiros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Patologias diversas ao nível da coluna vertebral, lombalgias, hérnias, etc
	Veículos industriais	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Agravam lesões raquidianas menores e incidem sobre perturbações devidas a más posturas
	Tratores e máquinas agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sintomas neurológicos: variação de ritmo cerebral, dificuldade de equilíbrio, inibição de reflexos
Vibrações de alta frequência (20 a 1000 Hz)	Maquinário e veículos de obras públicas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Perturbações na visão; diminuição da acuidade visual
	Ferramentas manuais rotativas alternativas, tais como polidoras, lixadoras, motosserras, martelos pneumáticos, etc.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Perturbações osteoarticulares observáveis radiologicamente tais como: artroses e lesões de pulso ✓ Perturbações tendinosas ✓ Afeções angioneurológicas da mão que acompanham perturbações na sensibilidade e crises de Raynaud ✓ Aumento da incidência de afeções do aparelho digestivo (hemorroidas, dores abdominais, constipação)

Fonte: Adaptado de Simões (2014)

A Tabela 6 apresenta os problemas que são ocasionados de exposição humana aos ruídos.

Tabela 6 - Problemas decorrentes de ruídos

Tipo de problema	Descrição
Psicológicos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Irritabilidade ✓ Agravamentos de estados de depressão e ansiedade ✓ Perturbação na comunicação ✓ Diminuição do rendimento no trabalho ✓ Perda de capacidade de concentração ✓ Fadiga, estresse agudo ✓ Perda dos reflexos ✓ Falta de vigilância e atenção
Cardiovasculares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Compressão dos vasos sanguíneos ✓ Possível aumento da pressão arterial e da frequência cardíaca
Aparelho digestivo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento da secreção gástrica ✓ Transtornos digestivos ✓ Aumento da atividade gástrica e intestinal
Sistema nervoso central	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alterações do sono ✓ Diminuição da memória de retenção
Pele e músculos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vasoconstrição dos vasos ✓ Piloereção ✓ Aumento da tensão muscular
Sistema vestibular	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vertigens ✓ Perda de equilíbrio
Órgão da visão	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diminuição da discriminação das cores ✓ Diminuição da visão na obscuridade ✓ Diminuição da sensação de relevo dos objetos

Fonte: Adaptado de Simões (2014)

A resposta humana à vibração terrestre é influenciada por muitos fatores. Alguns desses fatores são físicos como amplitude, duração e frequência de vibração, enquanto outros fatores como tipo de população, idade, gênero e expectativa são psicológicos (ISO 2631-2, 2003). Isso significa que a resposta humana à vibração é subjetiva e será diferente para diferentes pessoas. Portanto, enquanto são estudadas as relações exposição-efeito, a resposta das pessoas a determinado nível de vibração é considerada de forma estatística (KLÆBOE, ÖHRSTRÖM, *et al.*, 2003) expressando

quantos por cento da população perceberam as vibrações. Dois exemplos de curvas mostrando esta questão são apresentados pelas seguintes Figura 9 e Figura 10.

Figura 9 - Resposta humana à vibração de construção residencial com 4 a 15 trens de trânsito rápido por hora

Fonte: Adaptado de DOT-2005

Figura 10 – Porcentagem de pessoas com vários graus de irritação devido a vibrações residenciais, plotadas contra valores máximos estatísticos calculados para velocidade ponderada, V_{w95} em mm/s

Legenda

- 1 Vibrações perceptíveis
- 2 Alto, médio e baixo nível de irritação com a vibração
- 3 Alto e médio nível de irritação com a vibração
- 4 Alto nível de irritação com a vibração

Fonte: Adaptado de NSF (1999)

A Federal Transit Administration (2006) define níveis aceitáveis de vibração e ruído para diferentes tipos de edificação, que não prejudicam a saúde e conforto das pessoas que nelas estão, cujos critérios de categorização de ruído e vibração se baseiam na ocupação do edifício e na frequência do serviço. Como um valor de referência, a norma ANSI S3.29 (1983) afirma que um nível de vibração de 72 dBV é aproximadamente igual ao limiar de percepção para os seres humanos mais sensíveis. A

Tabela 7 e a Tabela 8 trazem os valores limites definidos pela FTA para o nível de ruído e o nível de vibração em relação ao uso do solo e ao tipo de edificação.

Tabela 7 - Critério geral de impacto das vibrações e ruído

Categoria do uso do solo	Nível Global de Vibração		
	Eventos Frequentes ¹	Eventos Ocasionais ²	Eventos Raros ³
Categoria 1: Prédios onde a vibração pode interferir com as atividades no seu interior	65 dBV ⁴	65 dBV ⁴	65 dBV ⁴
Categoria 2: Residências e prédios onde pessoas normalmente dormem	72 dBV	75 dBV	80 dBV
Categoria 3: Espaço institucional com uso principalmente diurno	75 dBV	78 dBV	83 dBV
	Nível Global de Ruído		
	Eventos Frequentes ¹	Eventos Ocasionais ²	Eventos Raros ³
Categoria 1: Prédios onde a vibração pode interferir com as atividades no seu interior	N/A ⁴	N/A ⁴	N/A ⁴
Categoria 2: Residências e prédios onde pessoas normalmente dormem	35 dBA	38 dBA	43 dBA
Categoria 3: Espaço institucional com uso principalmente diurno	40 dBA	43 dBA	48 dBA
<p>Notas:</p> <p>1. "Eventos Frequentes" é definido como mais de 70 eventos de mesma fonte de vibração por dia. A maioria dos projetos de VLTs se encaixam nesta categoria.</p> <p>2. "Eventos Ocasionais" é definido como entre 30 e 70 eventos de mesma fonte de vibração por dia. A maioria dos projetos de trens suburbanos se encaixam nesta categoria.</p> <p>3. "Eventos Raros" é definido como menos de 30 eventos de mesma fonte de vibração por dia. A maioria dos ramais de trens urbanos se encaixa nesta categoria.</p> <p>4. Este critério é baseado em níveis aceitáveis para equipamentos moderadamente sensíveis tal como microscópios óticos. A sensibilidade à vibração exigirá pesquisa de avaliação detalhada para definir os níveis aceitáveis. Garantir baixos níveis de vibração em prédios requer um projeto especial do sistema HVAC e lajes mais rígidas.</p> <p>5. Equipamentos sensíveis à vibração geralmente não são sensíveis ao ruído vindo do solo.</p>			

Fonte: Adaptado de Federal Transit Administration (2006)

Tabela 8 - Critério para edificações especiais de impacto das vibrações e ruído

Tipo de edifício ou sala ³	Nível de Vibração		Nível de Ruído	
	Eventos frequentes ¹	Eventos ocasionais ou raros ²	Eventos frequentes ¹	Eventos ocasionais ou raros ²
Salas de concerto	65 dBV	65 dBV	25 dBA	25 dBA
Estúdios de TV	65 dBV	65 dBV	25 dBA	25 dBA
Estúdios de gravação	65 dBV	65 dBV	25 dBA	25 dBA
Auditórios	72 dBV	80 dBV	30 dBA	38 dBA
Teatros	72 dBV	80 dBV	35 dBA	43 dBA
<p>Notas:</p> <p>1. "Eventos Frequentes" é definido como mais de 70 eventos de mesma fonte de vibração por dia. A maioria dos projetos de transporte se encaixam nesta categoria.</p> <p>2. "Eventos Ocasionais ou Raros" é definido como menos de 70 eventos de mesma fonte de vibração por dia. Esta categoria inclui a maioria dos sistemas ferroviários de passageiros</p> <p>3. Se o edifício raramente estará ocupado quando os trens estiverem em operação, não há necessidade de considerar impacto. Exemplo: considere a localização de uma linha de trem ao lado de uma sala de concertos. Se nenhum trem operar após as 19 horas, os trens raramente interferirão com o uso da sala.</p>				

Fonte: Adaptado de *Federal Transit Administration* (2006)

Segundo Carvalho (2015), o corpo humano leva algum tempo para perceber a existência de vibração. A sensibilidade responde a uma média de amplitudes, denominada RMS (*Root Mean Square*), que é a raiz quadrada da média das amplitudes do sinal ao quadrado, por isso a representação da vibração em dBV. Assim, pode-se calcular a vibração segundo a Equação (5) dada pela FTA:

$$L_v = 20 \times \log_{10}\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

L_v = velocidade de vibração (dBV);

V = amplitude da velocidade (RMS);

V_{ref} = amplitude da velocidade de referência (mm/s) (onde: $V_{ref} = 25,4 \times 10^{-6}$ mm/s).

A fim de reduzir a vibração terrestre induzida pelo trem a uma distância da via, várias questões como a geração da vibração na fonte, sua propagação através do meio e a interação com a estrutura no receptor devem ser consideradas, como visto.

Algumas soluções podem ser empregadas, como a utilização de barreiras acústicas. Elas têm a função de impedir acusticamente as ondas que são geradas na via férrea de atingir o meio lindeiro. A Figura 11 mostra esquemas de como este método de atenuação utiliza barreiras físicas ao longo da faixa de domínio da ferrovia.

Figura 11 – Esquemas de barreiras acústicas ferroviárias

Fonte: Adaptado Aquilino e Vittorino (2013)

A Figura 12 mostra como exemplo de aplicação uma barreira acústica montada na região do Brás em São Paulo, onde há a passagem dos trens da Linha 3 – Vermelha do Metrô. Esta barreira tem função de atenuar os ruídos primários gerados no contato roda-trilho, que podem se propagar pelo meio além dos limites da via.

Figura 12 – Barreira acústica Linha 3 – Vermelha do Metrô de São Paulo

Fonte: Saviano (2017)

Estes casos se referem diretamente às vias permanentes que estão em superfície, onde não há uma barreira física como o túnel, como no caso das vias subterrâneas.

As vias subterrâneas, no entanto, têm como problema a propagação da vibração pelo meio e a geração de ruído secundário⁴, que é provocado pela vibração que incide nas edificações próximas às ferrovias. Carvalho (2015) explica que a mitigação das vibrações no receptor muitas vezes se torna inviável, já que a medida mais eficaz seria a adoção de elementos elastoméricos nas fundações da edificação. Solução como essa só teria viabilidade na fase de construção das edificações lindeiras, o que, na prática, é difícil que aconteça, uma vez que a infraestrutura ferroviária é estabelecida muito depois da consolidação do uso/ocupação do solo da região.

Quanto à mitigação no caminho de propagação das ondas, há a possibilidade da criação de barreiras, ou trincheiras, que podem ser vazias ou sólidas, porém essa solução é pouco usada⁵, em função das interferências que seriam encontradas na hora da escavação em centros urbanos.

Neste sentido, a atenuação na fonte, de maneira geral, mostra-se mais interessante, pois existe um grande número de possibilidades de alterações que podem ser feitas nesta, a fim de se mitigar o problema da vibração. As soluções mais comuns são o uso de materiais elastoméricos entre a superestrutura e a laje flutuante (mantas, apoios contínuos ou discretos), fixações de trilhos com resiliência e escolha correta do material rodante. Cada solução apresenta certo nível de atenuação, sendo parte do escopo do projeto da via permanente a solução mais adequada e o método correto para cada necessidade de atenuação, a fim de atender aos níveis de conforto da ocupação das edificações.

⁴ É o ruído provocado pela vibração da via permanente em túnel, onde as ondas vibratórias se propagam pela estrutura enterrada, cuja vibração é transmitida pelo solo e movimenta as edificações próximas.

⁵ Nos projetos de engenharia.

No caso do uso de sistema massa-mola, nesses pontos devem ser avaliados os níveis de vibração sem qualquer sistema de atenuação para que, posteriormente, se defina a frequência natural deste, para atender aos limites admissíveis de vibração.

2.3 O Sistema Massa-Mola (SMM)

O sistema massa-mola aplicado em vias metroferroviárias consiste no posicionamento de elementos flexíveis e amortecedores entre a laje flutuante e a laje de regularização de concreto em vias rígidas, possibilitando a atenuação das vibrações geradas na passagem dos trens e auxiliando na atenuação da transmissão de vibração para a estrutura. Sem a aplicação de um sistema deste tipo, a mitigação de transmissão de vibração para as edificações lindeiras ao traçado da via poderia se dar com o aprofundamento do greide, por exemplo, onerando consideravelmente a construção e operação.

A Linha 1 do Metrô de São Paulo - Azul foi a primeira linha de trem metropolitano a ser construída no Brasil, na década de 1970. Com trecho compreendido entre os bairros do Tucuruvi e Jabaquara, esta linha foi construída como via permanente assentada diretamente sobre vigas contínuas de concreto armado, sem massa-mola (este método é também denominado fixação direta, onde se fixam os trilhos diretamente na laje de concreto).

Como explica Manoel Filho (1998), no início da operação da Linha 2 - Verde, inicialmente entre as estações Trianon/MASP e Clínicas, a passagem dos trens gerava ruído e vibração no auditório do Museu de Arte de São Paulo (MASP) e em residências próximas. A solução encontrada foi a troca das fixações dos trilhos por fixações de maior resiliência, o que atendeu 84% das edificações afetadas. Houve significativa redução dos níveis de vibração e de ruído.

Na Figura 13 verifica-se esquematicamente o trajeto da propagação de vibração até atingir a fundação do MASP.

Figura 13 - Esquema transversal da indução de vibração na estrutura do MASP

Fonte: Adaptado de Manoel Filho (1998)

As fotos da Figura 14 mostram o sistema de instrumentação para medição de vibração no interior do museu.

Figura 14 – Instrumentação do teatro do MASP

Fonte: IEME BRASIL

Esta experiência fez com que os projetos seguintes contassem previamente com estudos de impacto ambiental causados por vibrações, devido à passagem de trens subterrâneos. Manoel Filho (1998) afirma que, em meados de 1997, o Metrô de São Paulo utilizou o sistema massa-mola em trechos de novos projetos, como a

extensão da Linha 11 – Coral⁶, de Artur Alvim a Guaianazes, e a extensão da Linha 2 – Verde, entre Sumaré e Vila Madalena (neste foram utilizados sistemas de fixação direta sem massa-mola e com massa-mola). No trecho sem massa-mola os trilhos de via corrida e os trilhos dos AMVs (Aparelho de Mudança de Via) foram assentados sobre placas resilientes. Na via corrida utilizaram placas de apoio tipo Pandrol⁷ e nos AMVs foram empregadas fixações tipo Vossloh⁸. No trecho com massa-mola a laje flutuante foi assentada sobre manta elástica de borracha natural ao longo da linha, sob a projeção dos trilhos.

Com relação ao trecho da Linha 11 - Coral (Expresso Leste), existem trechos de túneis, elevados, transições e superfície. Manoel Filho (1998) descreve os métodos de atenuação usados conforme listado na Tabela 9. Nela são resumidos os trechos de via, o tipo de estrutura, a descrição do problema ocorrido e a solução do problema. Alguns valores de níveis de atenuação para as soluções empregadas são apresentados também nesta tabela.

⁶ O antigo trecho entre Artur Alvim e Guaianazes foi suprimido para dar lugar a um novo traçado, em que foram construídas a nova estação Itaquera e as estações Dom Bosco, José Bonifácio e Guaianases (nova).

⁷ Pandrol Track Systems, fabricante de equipamentos de via permanente.

⁸ Vossloh, fabricante de equipamentos de via permanente.

Tabela 9 - Métodos de atenuação de vibração do Expresso Leste (Artur Alvim à Guaianazes)

Trecho de via	Descrição do problema	Solução	Nível de atenuação global previsto (dBv)
Lastro em elevado	Para as estações Itaquera e Guaianazes, os equipamentos de estação estão locados abaixo do nível do tabuleiro, que apresentaram alto nível de vibração	Manta amortecedora de borracha natural	10
Lastro em elevado	Onde poderia ocorrer moagem e colmatação do lastro, devido à movimentação da estrutura e confinamento	Manta protetora de borracha natural e cortiça moída entre o lastro e a estrutura	6
Rígida com fixação direta sem massa-mola	Excesso de vibração nos trechos em elevado e transições sobre viga suporte contínua	Placas de apoio tipo Pandrol sobre palmilhas resilientes de borracha natural	15
Rígida com fixação direta e massa-mola	Nos trechos em túneis houve a necessidade de um sistema bastante eficiente de atenuação	Sistema de apoio discreto tipo CDM ⁹ de borracha natural e cortiça moída coladas sob uma chapa de fibrocimento distribuídos	25
Rígida com fixação direta e massa-mola	Na região da Avenida Jacu-Pêssego (em elevado) houve a necessidade de amortecimento de vibração. Devido à altura disponível para assentamento da via e esbeltez do elevado, foi necessária a adoção de sistema misto de amortecimento	Os sistemas foram constituídos de conjunto de placas de apoio Pandrol com palmilhas resilientes sob elas e manta amortecedora sob a laje de concreto	19 a 24
Rígida com fixação direta e massa-mola	No túnel a leste da estação José Bonifácio houve necessidade de amortecimento	Sistema massa-mola tipo GERB ¹⁰ , constituído de laje flutuante com molas helicoidais imersas em meio viscoso (isoamortecedores)	22 a 28

Fonte: Adaptado de Manoel Filho (1998)

⁹ Conjunto de apoios discretos de borracha natural (70x70x50 mm) aplicados entre a laje de regularização e a laje flutuante

¹⁰ Gerb do Brasil, fabricante de isoamortecedores

A partir destas soluções adotadas nestes trechos, passou-se a considerar estes tipos de soluções em projetos posteriores. A obtenção de dados de medições de vibração e ruído de operações reais nestes primeiros trechos foram de grande valor para a aplicação deste sistema nos demais projetos.

2.3.1 Conceitos dinâmicos do sistema massa-mola - Oscilação harmônica simples

Segundo Tipler (2009), a oscilação harmônica simples é um movimento periódico de forma senoidal com uma amplitude constante. É empregada como modelo matemático para uma variedade de movimentos, tais como o sistema massa-mola.

Além da amplitude, o movimento de oscilação harmônico simples é caracterizado pelo período T , que é o tempo que um objeto leva para executar um ciclo completo de movimento oscilatório – de um extremo ao outro e de volta ao anterior – e o inverso dele, e a frequência f , que é o número de ciclos por unidade de tempo $f=1/T$ (sua fase φ determina o ponto de origem da onda senoidal). O período e a frequência são constantes para um determinado sistema, enquanto a amplitude e a fase são determinadas pela condição inicial (origem e velocidade) do sistema. A Equação (6) descreve o movimento harmônico simples:

$$x(t) = A \operatorname{sen} (2\pi f(t) + \varphi) \quad \text{Equação (6)}$$

A Equação (7) é a equação diferencial da força para um objeto de massa m , sob a ação de uma oscilação harmônica simples, que é dada por:

$$F = m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = -kx \quad \text{onde } k = (\text{N/m}) \quad \text{Equação (7)}$$

Na Equação (7) k é a constante de mola relativa ao deslocamento do objeto devido à força aplicada sobre ele. A solução geral da Equação (7), expressa com base na frequência de oscilação, é indicada na Equação (8):

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{onde } f = (\text{rad/s}) \quad \text{Equação (8)}$$

Já a frequência expressa em (Hz) é dada como apontado na Equação (9):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{onde } k = (\text{N/m}) \text{ e } m = (\text{kg}) \quad \text{Equação (9)}$$

Na Equação (9) k (N/m) é a rigidez do material elastomérico e m (kg) é a massa da laje, trilho e acessórios (fixações) e parte da massa do trem. Em observação à esta equação, uma análise inicial foi feita com a finalidade de reduzir o valor da frequência f . Pela Equação (9), isso é possível diminuindo o valor de k ou aumentando o valor de m . A utilização de concreto pesado se encaixa nesta passagem, para obter o aumento do valor da massa m .

Nos projetos de engenharia ferroviária há um método de cálculo da massa do sistema que é utilizado nos cálculos dos sistemas massa-mola do Metrô de São Paulo, empregando a massa do trilho e da fixação, a massa da laje da via permanente e a massa não suspensa do trem, como escrito na Equação (10):

$$m = m_{\text{trilho}} + m_{\text{fixação}} + m_{\text{laje}} + m_{\text{trem}} \quad \text{Equação (10)}$$

A massa do trilho está em (kg/m) de via, a massa das fixações depende da quantidade delas por metro de via e a massa da laje depende da sua geometria, do consumo de aço e do traço do concreto. No traço do concreto é possível adicionar agregados de densidade mais elevada que o convencional, para que tenha efeito na diminuição da frequência natural de vibração do sistema.

A massa do trem por metro de via leva em conta apenas a massa não suspensa. Esta consideração é usual do âmbito de projeto, partindo-se do princípio que os fabricantes de material rodante informam a massa total dos trens e a massa dos conjuntos dos truques e rodeiros.

Considerando que os amortecedores dos trens absorvem as vibrações dos carros, a massa que deve ser considerada é apenas a dos truques e rodeiros (que pode variar entre os tipos de materiais rodantes), mas que usualmente é considerada como 15% da massa total do trem. Gupta, Degrande e Lombaert (2008) apresentam as massas de dois tipos de carros na Tabela 10, onde Mt é a massa total do carro, Ms a massa suspensa e Mu a massa não suspensa. As porcentagens em torno de 15% são aquelas utilizadas nos projetos de via permanente. Esta consideração deve ser feita porque admite-se que a massa a ser atenuada é a massa que não é amortecida

pela suspensão secundária do material rodante (entre o carro e o truque), compondo-se, assim, a massa do sistema massa-mola.

Tabela 10 - Características das massas de trens

	Mt (kg)	Ms (kg)	Mu (kg)	%
Carro motor	8.387,50	7.177,50	1.210,00	14,4
Reboque	5.685,00	4.735,00	950,00	16,7

Fonte: Adaptado de GUPTA, DEGRANDE e LOMBAERT (2008)

Clough e Penzien (1995) explicam que um sistema estrutural linearmente elástico, submetido a uma fonte de excitação externa, tem como propriedades físicas sua massa, rigidez ou flexibilidade e mecanismo de perda de energia ou amortecimento. No sistema básico de vibrações de um grau de liberdade cada uma destas propriedades é assumida como sendo concentrada em um elemento físico, como mostra a Figura 15. Toda massa m desse sistema pontual só tem a liberdade de se deslocar em uma direção (Figura 15, na direção $v(t)$ no deslocamento horizontal), sendo chamado de sistema de um grau de liberdade, onde k é a rigidez da mola, c é o coeficiente de amortecimento e $p(t)$ representa um carregamento externo que varia com o tempo.

Figura 15 - Sistema básico de um grau de liberdade

Fonte: Clough e Penzien (1995)

O equilíbrio dinâmico desse sistema pode ser visto na Figura 16, onde $f_D(t)$ é a força de amortecimento do sistema, $f_S(t)$ é a força da mola e $f_I(t)$ são as forças inerciais.

Figura 16 - Equilíbrio dinâmico das forças

Fonte: Clough e Penzien (1995)

Analiticamente este equilíbrio pode ser escrito sob forma de equação, como segue na Equação (11):

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad \text{Equação (11)}$$

Pelo princípio de D'Alembert as forças podem ser reescritas da seguinte forma (Equação 12 a Equação 14):

$$f_I(t) = m\ddot{v}(t) \quad \text{Equação (12)}$$

$$f_D(t) = c\dot{v}(t) \quad \text{Equação (13)}$$

$$f_S(t) = k v(t) \quad \text{Equação (14)}$$

Assim substituindo (12), (13) e (14) em (11) tem-se a seguinte Equação (15) diferencial:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + k v(t) = p(t) \quad \text{Equação (15)}$$

Para a determinação da frequência natural a estrutura é considerada como sistema em vibração livre sem amortecimento, ou seja, desprezando a força de amortecimento e o carregamento externo, conforme Equação (16):

$$m\ddot{v}(t) + k v(t) = 0 \quad \text{Equação (16)}$$

Assim, a solução para este problema considerando as condições iniciais é (Equação 17):

$$v(t) = v(0) \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{v}_0}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad \text{Equação (17)}$$

Onde ω_t é denominada frequência natural circular (rad/s), sendo definida como (Equação 18):

$$\omega_t = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação (18)}$$

E, portanto, a frequência em Hz (s^{-1}) é (Equação 19):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação (18)}$$

Para um sistema livre amortecido, a equação pode ser escrita como a Equação (20):

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + k v(t) = 0 \quad \text{Equação (19)}$$

A solução da vibração livre amortecida na forma exponencial é (Equação 21):

$$v(t) = Ge^{st} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde G é uma constante arbitrária complexa.

Para o sistema livre amortecido a equação fica (Equação 22):

$$s^2 + \frac{-c}{2m}s + \omega^2 = 0 \quad \text{Equação (21)}$$

A solução da Equação (22) é dada na Equação (23):

$$s_{1,2} = \frac{-c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \quad \text{Equação (22)}$$

Se o valor da raiz quadrada é zero tem-se uma condição crítica de amortecimento. Assim, o amortecimento crítico é definido na Equação (24):

$$C_{crit.} = 2m\omega \quad \text{Equação (23)}$$

Um sistema é chamado subamortecido quando $\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} < 0$. Para avaliar a vibração livre neste caso é conveniente expressar o amortecimento em termos de razão entre o amortecimento da estrutura (c) e o amortecimento crítico (c_{crit}). Esta relação é definida como amortecimento relativo (ξ) (Equação 25).

$$\xi = \frac{c}{c_{crit}} \quad \text{Equação (24)}$$

Assim, a solução para o sistema subamortecido é a Equação (26):

$$s_{1,2} = -\xi\omega \pm i\omega_d \quad \text{Equação (25)}$$

Onde ω_d é a frequência de vibração amortecida, expresso na Equação (27):

$$\omega_d = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad \text{Equação (26)}$$

Uma situação possível, mas que não é usual em vias permanentes, é o caso de $\xi > 1$, sendo este chamado de superamortecido.

Considerando que a estrutura estará sujeita a um carregamento periódico senoidal com amplitude ρ_0 (máxima) e uma frequência circular $\bar{\omega}$, a relação entre esta frequência e a frequência natural (ω) é definida como um coeficiente β indicando na Equação (28).

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \quad \text{Equação (27)}$$

A amplitude dos deslocamentos ρ em relação ao tempo é calculada como (Equação 29):

$$\rho = \frac{\rho_0}{k} [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2} \quad \text{Equação (28)}$$

Com a amplitude pode-se definir o Fator de Amplificação (Equação 30):

$$D = \frac{\rho}{\rho_0/k} = [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2} \quad \text{Equação (29)}$$

Para encontrar o β_{max} deriva-se a expressão de D em relação à β igualando a expressão encontrada à zero. Assim tem-se a Equação (31):

$$D_{max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-2\xi^2}} \quad \text{Equação (30)}$$

A Figura 17 mostra o gráfico do fator de amplificação D , em função da relação entre as frequências circular e natural. Nota-se que quando o amortecimento $\xi = 0$, a função não tem solução, assim como se nota na Equação (31).

Figura 17 - Coeficiente de amplificação dinâmica, com $D(\beta)$ para distintos valores de ξ

Fonte: (MAZZILLI *et al.*, 2016)

O gráfico da Figura 18 mostra o plano da amplificação dinâmica em função das relações entre as frequências circulares e naturais e o amortecimento.

Figura 18 - Coeficiente de amplificação dinâmica $D(\beta, \xi)$

Fonte: (MAZZILLI *et al.*, 2016)

Um exemplo de sistema para a isolação de vibrações geradas por um carregamento senoidal é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Sistema de um grau de liberdade com isolamento de vibrações

Fonte: Clough e Penzien (1995)

A Equação (32) define os deslocamentos para o regime permanente de vibrações:

$$v_p(t) = \frac{\rho_0}{k} D \sin(\bar{\omega}t - \theta) \quad \text{Equação (31)}$$

A transmissibilidade (TR) é um coeficiente entre a amplitude da força do carregamento (ρ_0) e a força máxima (f_{max}) (Equação 33).

$$f_{max}(t) = [f_{s,max}(t)^2 + f_{d,max}(t)^2]^{1/2} = \rho_0 D [1 + (2\xi\beta)^2]^{1/2} \quad \text{Equação (32)}$$

Assim, a transmissibilidade pode ser calculada segundo a Equação (34):

$$TR = D\sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad \text{Equação (33)}$$

Utilizando a Equação (34) na Equação (5) temos que a transmissibilidade TR é a relação entre as velocidades, logo, temos a Equação (35).

$$Massa\ mola = 20 \times \log_{10}(TR) \quad \text{Equação (34)}$$

A Equação (35) representa a atenuação ou amplificação em dBV do conjunto do sistema massa mola. O cálculo do nível de vibração no túnel é obtido somando os resultados da Equação (35) e o valor da vibração em dBV do espectro experimental em cada banda de terça de oitavas.

Figura 20 - Fator de transmissibilidade, $TR(\beta)$, para distintos valores de ξ

Fonte: (MAZZILLI *et al.*, 2016)

Pela Figura 20 pode-se concluir que um sistema massa-mola começa a atenuar as vibrações quando $\beta \geq \sqrt{2}$.

2.4 Apoios Elastoméricos

Os apoios elastoméricos, mais conhecidos no Brasil como PAD (Ponto de Apoio Discreto) ou PADs (plural), são palmilhas resilientes que podem ser utilizadas tanto como apoio das placas de fixação quanto como apoio discreto das lajes flutuantes. Diversos materiais podem ser usados para este fim, sendo que os principais são feitos em borracha natural e poliuretano.

Segundo Calemberg Ingenieure (2010), a forma estrutural das cadeias moleculares define o grau de elasticidade do elastômero e outras de suas propriedades. Em uma faixa de temperatura determinada, o elastômero exerce a função de elemento resiliente, sem desgaste excessivo, e transmite os esforços com segurança.

Segundo Castellani *et al.* (1998), grande parte da literatura trata os apoios elastoméricos como molas lineares e amortecedores viscosos, mas a relação típica de tensão e deformação de um material elastomérico não é linear. A energia que se dissipa pela utilização deste tipo de material está associada a ciclos de histerese. Em problemas de vibração, em que as frequências estão em faixas limitadas, o amortecimento viscoso pode ser satisfatório para representar a dissipação de energia. Porém em casos de vibrações mecânicas induzidas por tráfego ferroviário, este tipo de vibração possui dissipação de energia dependente da frequência do carregamento. Os modelos que só levam em conta o amortecimento viscoso não são apropriados para representar a dissipação de energia nos modelos de via com apoios elastoméricos.

Um modelo interpretativo foi sugerido por Castellani *et al.* (1998) para a descrição matemática dos elastômeros. Analisando a deflexão dinâmica, fora de fase com as forças de reação, esta parece crescer com a frequência, mas não de forma linear como se ela fosse composta apenas por forças viscosas. Os resultados dos estudos mostram que tanto os amortecimentos viscosos e histeréticos devem fazer parte do modelo de caracterização do elastômero. Assim, as reações devido aos deslocamentos impostos são representados no domínio da frequência pela Equação 36:

$$\sigma_d = K(f) \cdot \delta_d(f) + i \cdot C_i \cdot \delta_d(f) + i \cdot 2\pi f \cdot C_v \cdot \delta_d(f) \quad \text{Equação (35)}$$

Onde:

- K é real e representa a reação elástica (curva das rigidezes K_s e K_d) em fase com o deslocamento (N/cm^3)
- C_i é o amortecimento histerético (N/cm^3)
- C_v é o amortecimento viscoso ($\text{N/cm}^3.\text{s}$)
- f é a frequência do carregamento (Hz)
- i é o número imaginário $= \sqrt{-1}$.

O modelo de Castellani *et al.* (1998) mostra que K cresce com a frequência, até f_d (ponto em que K estabiliza) como no gráfico da Figura 21. Os autores propõem que o material elastomérico seja caracterizado pela sua rigidez quase estática K_s , rigidez dinâmica K_d , frequência de estabilização da rigidez f_d os amortecimentos viscoso C_v e histerético C_i .

Figura 21 - Sensibilidade da relação entre a estabilização das rigidezes

Fonte: (CASTELLANI, KAJON, *et al.*, 1998)

A rigidez quase estática é a taxa de deformação do material com o carregamento sendo aplicado lentamente. Já a rigidez dinâmica é a rigidez do material frente a uma carga que varia com uma determinada frequência. Essa dependência se torna constante em uma certa frequência (f_d) como mostrou a Figura 22. A rigidez dinâmica na maior parte das vezes é maior do que a rigidez quase estática, visto que para os materiais elastoméricos a amplitude das deformações se mantém constante e a tensão aumenta proporcionalmente com a frequência.

Para a maioria dos modelos de análise de vibrações o material elastomérico é caracterizado por seu amortecimento viscoso C_v e sua rigidez dinâmica K_d .

Os PADs elastoméricos são apoios elásticos, constituídos de um elemento elástico em um composto de borracha natural. Internamente, há um anel elástico (em borracha natural) aderido à uma base metálica de maneira a ajustar a rigidez lateral do conjunto.

A composição das lajes flutuantes do Metrô de São Paulo, nos trechos que utilizam apoios elastoméricos, basicamente são de PADs que formam sistemas de frequência natural de 10 e 14 Hz e têm a finalidade de atenuar as vibrações e ruídos resultantes da passagem dos trens. Na Figura 22 e na Figura 23 têm-se alguns exemplos de onde podem ser aplicados os PADs na via permanente.

Figura 22 - PADs para apoio de laje flutuante

Fonte: Adaptado de GETZNER

Figura 23 - PADs para apoio de laje flutuante

Fonte: Adaptado de GETZNER

Outro exemplo é mostrado na Figura 24, onde tem-se a seção transversal de uma via dupla em túnel, em que se nota o posicionamento dos PADs entre a laje flutuante e a laje de regularização.

Figura 24 – Seção transversal de um túnel em via dupla indicando a posição dos PADs

Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro trecho da Linha 5 – Lilás do Metrô de SP, construído em 2001 entre as estações Capão Redondo e Largo 13, teve como método de atenuação de vibração as tiras elastoméricas ou apoios contínuos. A Figura 25 mostra o posicionamento da laje flutuante sobre os apoios contínuos.

Figura 25 - Execução do posicionamento da laje flutuante da Linha 5 – Lilás do Metrô de SP

Fonte: Gerb do Brasil

Na Linha 4 – Amarela do Metrô-SP (2008) foram instalados os PADs e isoamortecedores ao longo da linha que compreende o trecho entre as estações Luz e Butantã. A Figura 26 mostra a instalação dos PADs.

Figura 26 - Inserção dos PADs na Linha 4 – Amarela do Metrô-SP

Fonte: Gerb do Brasil

Em 2009, a Linha 2 – Verde do Metrô-SP passou por modificações, tendo seu novo trecho construído entre as estações Alto do Ipiranga e Vila Prudente. Na Figura

27 é possível perceber a distância entre a laje de regularização e a laje flutuante. Na instalação dos apoios resilientes, a laje flutuante passa por um processo de içamento, para que os apoios sejam posicionados, como visto Figura 26.

Figura 27 - Elevação da laje flutuante depois da ativação das molas da Linha 2 – Verde do Metrô-SP

Fonte: Gerb do Brasil

Em 2012, na execução da extensão da Linha 5 – Lilás do Metrô-SP, no trecho Largo 13 – Adolfo Pinheiro, foram utilizados isoamortecedores e PADs. A Figura 28 indica os macacos posicionados para içamento da laje, a fim de posicionar os PADs sob a laje flutuante e sobre a regularização.

Figura 28 - Içamento da laje flutuante para instalação dos PADs na Linha 5 – Lilás do Metrô-SP

Fonte: Gerb do Brasil

2.5 Isoamortecedores

As molas helicoidais 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), os isoamortecedores são capazes de obter os maiores níveis de atenuação. A Figura 29 mostra um exemplo de isoamortecedor do tipo utilizado no Metrô de São Paulo.

Figura 29 - Corte do isoamortecedor instalado na laje flutuante

Fonte: Acervo técnico GERB do Brasil

Segundo WAGNER (2004), as principais características das molas helicoidais quando utilizadas como apoios elásticos são:

- Alta capacidade de carga.
- Relação linear força x deslocamento.
- Alta rigidez horizontal.
- Equivalência entre as rigidezes estática e dinâmica.
- Propriedades elásticas constantes.
- Alta durabilidade.

Existem no Brasil alguns casos da utilização destes modelos de atenuação de vibração metroferroviária descritos. Na sequência, apresentam-se alguns projetos e ilustrações dos locais em que foi empregado o sistema massa-mola no Brasil (o primeiro caso já foi descrito no item 2.3.).

A seguir na Figura 30 um esquema de como o isoamortecedor é inserido na laje flutuante e como o apoio é feito na laje de regularização. A ativação das molas é feita com macaco hidráulico que, por reação, iça a laje “empurrando” a laje de

regularização para baixo e posicionando a laje flutuante na cota de projeto, por meio de anéis metálicos inseridos no interior do isoamortecedor.

Figura 30 – Seção transversal da via permanente com isoamortecedores.

Fonte: Elaborado pelo autor

Já na Linha 11 - Coral da CPTM a instalação de isoamortecedores foi feita entre as estações Dom Bosco e José Bonifácio (1997). A Figura 31 mostra o isoamortecedor instalado na laje, já concretada.

Figura 31 - Isoamortecedor com mola ativada concretado na laje da Linha 11 - Coral da CPTM

Fonte: Gerb do Brasil

Na Figura 32 é mostrado o túnel da linha 4 – Amarela do Metrô-SP, no momento que estavam sendo posicionados os isoamortecedores antes da concretagem da laje flutuante durante as obras.

Figura 32 - Posicionamento dos isoamortecedores para concretagem da laje flutuante da Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo

Fonte: Gerb do Brasil

Em 2005, na extensão da Linha 2 – Verde do Metrô-SP, o trecho Ana Rosa – Alto do Ipiranga contou com o tratamento de vibrações com os isoamortecedores em via dupla, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Inserção das molas nas carcaças dos isoamortecedores antes da ativação da Linha 2 – Verde do Metrô-SP

Fonte: Gerb do Brasil

2.6 Concreto pesado

Uma das propostas a serem estudadas nesta dissertação é a utilização de concreto produzido com agregado pesado na composição da laje flutuante (barita, limonita e magnetita). O concreto pesado é um material amplamente utilizado na proteção contra raios radioativos em usinas nucleares, hospitais, e em estruturas onde a impermeabilidade radioativa é requerida (TOPÇU, 2002). Ele absorve a energia dos nêutrons através do seu conteúdo e, por esse motivo, pode ser usado como um material protetor de radioatividade.

O concreto pesado é chamado desta forma pelo fato deste possuir massa específica superior ao do concreto convencional. Segundo a ABNT NBR 8953:2015, as massas específicas de diferentes tipos de concreto geralmente são:

- Concreto leve – inferior a 2000 kg/m^3 ;
- Concreto normal – entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 ;
- Concreto pesado (ou denso) – superior a 2800 kg/m^3 .

Forlin e Birck (2012) dizem que os valores da massa específica do concreto pesado podem variar de 2500 a 4500 kg/m^3 . Segundo Metha e Monteiro (2008), a massa específica do concreto depende diretamente da massa específica dos agregados, da sua porosidade, textura, forma e tamanho. A massa específica de concretos com agregados naturais varia entre 2200 a 2500 kg/m^3 , sendo que para concretos com agregado pesado, como por exemplo, agregados do tipo barita ou limalha de ferro, esta massa específica pode variar entre 3200 a 3500 kg/m^3 (Tabela 11). Em seguida, as figuras ilustram os agregados pesados (Figura 34 à Figura 37).

Tabela 11 – Classificação dos agregados segundo sua massa unitária

Classificação	Massa Unitária $\gamma_a \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Exemplos	Utilização
Leves	$\gamma_a < 1000$	Escória de alto-forno, lodo de esgoto, argila expandida	Pré-moldados
Normais	$1000 < \gamma_a < 2000$	Areia, brita e pedregulho	Obras correntes
Pesados	$\gamma_a > 2000$	Barita, limonita, magnetita	Concreto de estruturas especiais

Fonte: Adaptado de Ribeiro, Pinto e Starling (2013)

Figura 34 – Brita de magnetita

Fonte: Google. Disponível em http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/a/aa/TC031_Novas_tecnologiasB_.pdf. Acesso em 26/06/2018.

Figura 35 – Brita de barita

Fonte: Google. Disponível em <https://www.grxsp.com.br/argamassas-e-compostos-especiais/brita-de-barita.html>. Acesso em 26/06/2018

Figura 36 – Limonita

Fonte: Google. Disponível em http://rochasmineraisgemasfosséis.blogspot.com/2015/02/mineral_20.html. Acesso em 26/06/2018.

Figura 37 – Amostra de concreto com agregado pesado. Barita, magnetita, limonita

Fonte: Google. Disponível em
<http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/a/aa/TC031_Novas_tecnologiasB_.pdf>. Acesso em
26/06/2018.

No que tange à aplicabilidade deste concreto em comparação ao concreto normal, Forlin e Birck (2012) esclarecem que o concreto pesado é de mesma maneira de aplicação, manuseio e lançamento que o concreto normal. Porém, uma maior exigência é atribuída às questões de cura, projeto de fôrma e escoramento, além de controle de qualidade mais apurado dos agregados. O procedimento de mistura é típico de concretos convencionais, onde os agregados pesados são misturados primeiramente, seguidos pelo cimento e água. No entanto, devido à elevada massa específica dos agregados, deve-se realizar uma vibração mais enérgica para evitar a segregação.

O emprego de concreto pesado na construção de base rígida de via permanente não foi encontrado na literatura, para esta finalidade específica. Esta é uma das proposições do presente trabalho, onde apenas a característica relativa à massa específica está sendo considerada (a questão da proteção radioativa não está sendo levada em consideração).

2.7 Critérios para o projeto de mitigação das vibrações metroferroviária

Para efeito de projeto, Carvalho (2015) mostra, em formato de fluxograma na Figura 38, um estudo analítico de propagação das vibrações, que facilita a compreensão da necessidade de atenuação e onde a mitigação deve ser empregada.

Figura 38 - Necessidade de atenuação das vibrações – Fluxograma de estudo analítico

Fonte: Carvalho (2015)

¹¹ NATM - *New Austrian Tunnelling Method*

¹² VCA – Vala a céu aberto

A Figura 38 mostra que, após os estudos de sondagem, cadastro das edificações lindeiras, identificação do perfil de ocupação e definição das características do material rodante, é possível estabelecer os parâmetros que serão analisados frente aos critérios limites de vibração estabelecidos em norma, como apresentado na Tabela 7 e na Tabela 8.

Assim que se determina a necessidade de adoção de sistemas que adequem a via dentro dos padrões normativos, é necessário lançar mão de técnicas que a coloquem em condições de operação. A seguir será apresentada a metodologia utilizada no presente trabalho, com base em conceitos empregados em projetos brasileiros de via permanente sobre base rígida.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa consistiu de variação de alguns dados de entrada como massa específica do concreto da laje flutuante, espaçamento e rigidez dos PADs a partir de um modelo de caso base, e obter as respostas dinâmicas que ocorrem com estas variações como vibração global, frequência natural do sistema e atenuação do sistema de amortecimento. Para isso foi utilizado um modelo de formulação com 1 grau de liberdade (1GL). Como este modelo pode acarretar aproximações e hipóteses que façam com que as respostas não sejam tão precisas, as hipóteses foram modeladas também em um método de elementos finitos, por análise modal utilizando-se o primeiro modo de vibração e os resultados obtidos em bandas de terças de oitavas. Este método foi encontrado na literatura e seus resultados foram observados e comparados.

Ao longo da elaboração desta dissertação, os dados dos projetos de via permanente do Metrô-SP não puderam ser disponibilizados, criando dificuldades quanto à validação quanto a modelagem do experimento. Dentro deste contexto, foi usado um trabalho da literatura que permitiu que as hipóteses levantadas inicialmente pudessem ser comparadas e avaliadas com fundamentação teórica e também prática. Trata-se do método computacional de simulação elaborado por Carvalho (2015). Nele, foram elaborados dois tipos de modelos, visando avaliar as vibrações resultantes das passagens dos trens: modelo considerando o solo envolvente e o modelo sem o solo envolvente. A utilização deste modelo teve como objetivo comparar os valores obtidos com o modelo de 1GL.

Para a finalidade da presente dissertação foi considerado apenas o modelo que representa o solo envolvente, visto que Carvalho (2015) considerou em suas conclusões que este modelo trouxe resultados mais satisfatórios em relação ao modelo sem solo envolvente. O modelo em questão foi elaborado em elementos finitos, sendo bidimensionais, com comprimento de 44 m, baseados em 100 modos de vibração para geração das respostas dinâmicas. O modelo considerando o solo envolvente é representado por três vigas para os trilhos, a laje e o túnel (Figura 39).

Figura 39 - Modelos considerando solo envolvente: três vigas (laje flutuante)

Fonte: Carvalho (2015)

Os trilhos, vigas e túneis foram modelados por Carvalho (2015) como elementos de barra, considerando a inércia e área de uma seção transversal completa. Por exemplo, a barra que representa o trilho tem as propriedades geométricas de dois trilhos. A discretização das barras foi de 0,2 m na direção longitudinal.

As molas que representam o contato roda-trilho, fixações e apoios elásticos foram colocadas a cada metro de via. Carvalho (2015) considerou os espaçamentos dos elementos fazendo uma ponderação entre a rigidez de cada um destes e seu espaçamento. Desta forma, é possível analisar vários casos de rigidezes e espaçamentos diferentes sem alterar a base do modelo numérico, o que foi fundamental para a análise do comportamento dinâmico da via com as variáveis propostas no presente trabalho.

A seção de via permanente estudada por Carvalho (2015) é da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo e é caracterizada como sendo um túnel tipo NATM singelo com viga suporte. As propriedades da seção do túnel estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Características geométricas da seção do túnel

Seção NATM singelo	A (m ²)	I _{xx} (m ⁴)	I _{yy} (m ⁴)	Ed (kN/m ²)
	6,67	30,49	34,13	4,30 x 10 ⁷

Fonte: Adaptado de Carvalho (2015)

O amortecimento relativo adotado por Carvalho (2015) para o concreto dos túneis foi $\xi = 0,02$. Este amortecimento será utilizado também no presente trabalho. A seção transversal da via permanente está caracterizada na Tabela 13.

Tabela 13 - Características geométricas considerando a seção completa (duas vigas suportes)

Viga suporte sobre PADs	A (m ²)	I _{xx} (m ⁴)	I _{yy} (m ⁴)	Ed (kN/m ²)
	0,87	0,015	0,496	4,30 x 10 ⁷

Fonte: Adaptado de Carvalho (2015)

O amortecimento relativo adotado para o concreto das lajes e aço dos trilhos são respectivamente 0,02 e 0,0008. Estes valores de amortecimento são utilizados também no presente trabalho.

Quanto às fixações e elementos elásticos, foram usadas fixações do tipo SFC da Pandrol, com espaçamento de 75 cm. Estas foram representadas no modelo por meio de molas lineares. Para a fixação SFC Pandrol considerou-se rigidez estática – 53,04 kN/mm e rigidez dinâmica – 84,27 kN/mm.

Os apoios elásticos têm suas rigidezes (kv) e espaçamentos mostrados na Tabela 14. Para as fixações foi utilizado um coeficiente de amortecimento $\xi = 0,05$.

Tabela 14 - Rigidez e espaçamento dos elementos elásticos

Elemento Elástico	Rigidezes verticais (N/m)		Espaçamento (m)
	kv estático	kv dinâmico	
PAD	11,6 x 10 ⁶	14,86 x 10 ⁶	2,25

Fonte: Carvalho (2015)

Para que no método de 1 grau de liberdade seja possível identificar as vibrações em bandas de terço de oitava, foi aplicado nele o mesmo espectro do trem do trabalho de Carvalho (2015). Estes dados referentes ao espectro do trem foram obtidos graficamente e reproduzidos na Tabela 15.

Tabela 15 - Espectro do trem obtido graficamente, em função da frequência natural (fn)

fn (Hz)	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
dBV	63,5	63,5	65,7	66,5	68,5	69,5	70,0	73,0	74,5	75,5	77,0	79,0	82,0	91,5	93,0	80,5

Fonte: Dados retirados do gráfico de vibração do túnel, obtido em Carvalho (2015)

O método de 1 grau de liberdade considera o cálculo da frequência natural utilizando a Equação (9) apresentada na revisão bibliográfica, com amortecimento de $\xi = 0,08$ definido por Carvalho (2015). Os espectros são obtidos para as frequências em banda de terço de oitava e o nível global de vibração pode ser calculado pela Equação (36).

$$\text{Nível RMS global} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum \left(10^{\frac{L_j}{10}} \right) \right) \quad \text{Equação (36)}$$

Onde:

L_j = nível RMS de vibração (em dBV) para as frequências em bandas de terço de oitava.

Para o cálculo da atenuação do sistema massa-mola foi utilizada a Equação (34) para a transmissibilidade, assim obtendo os valores de atenuação para cada frequência com a Equação (5).

No presente trabalho foram comparados os resultados do método de 1 grau de liberdade com o método computacional em elementos finitos (SAP2000 - versão 19), sendo feitas as análises das respostas dinâmicas com as variações dos seguintes parâmetros:

- Massa específica do concreto da laje flutuante – 2500 kg/m³, 3000 kg/m³, 3500 kg/m³, 4000 kg/m³ e 4500 kg/m³;
- Espaçamento longitudinal dos PADs – 2,25 m, 2,50 m, 3,00 m, 3,50 m, 4,00 m e 4,50 m;
- Rigidezes dos PADs – 14,86 kN/m, 8 kN/m, 10 kN/m, 12 kN/m, 16 kN/m, 18 kN/m, 20 kN/m e 22 kN/m.

Os valores de massa específica foram arbitrados dentro do intervalo de disponibilidade do concreto pesado no mercado. Nos testes iniciais as variações com intervalos menores não apresentaram grandes diferenças, então foi estabelecida a variação de 500 kg/m³. Os valores de espaçamentos longitudinais foram estabelecidos com intervalos de 0,50 m e espaçamento máximo de 4,50 m, afim de se obter valores suficientemente grandes para observar os limites da proposição. As rigidezes dos PADs foram escolhidas englobando valores de rigidezes utilizados amplamente em projetos, adicionados a outros valores para simular as mudanças. Com estas faixas de valores foi possível observar a sensibilidade dos resultados dos modelos, com a variação linear de cada um desses parâmetros apresentados.

Cada variação foi chamada de “Caso”, sendo o Caso-Base oriundo dos estudos de Carvalho (2015) denominado de Caso 0.

As análises comparativas em relação ao Caso 0 foram feitas a partir de gráficos gerados pelo método de 1 grau de liberdade, onde foi possível aplicar o espectro do trem da Tabela 15 e obter o espectro de vibração no túnel. A Figura 40 mostra o fluxograma que resume a metodologia deste trabalho. Em seguida, a Tabela 16 mostra o resumo dos valores utilizados para a formação dos casos de estudo.

Figura 40 – Fluxograma da metodologia no usada nesta dissertação

Os casos da Tabela 16 foram montados considerando que as análises deveriam ser feitas partindo do Caso 0, ou seja, foi variado um parâmetro por vez para obter as variações das respostas (Caso 1 a 16) e depois foi fixado o máximo valor de massa específica da laje, variando o espaçamento e a rigidez dinâmica (Casos 17 a 28). Estes últimos casos foram montados para explorar mais respostas dentro da proposição de aumento da massa específica.

Tabela 16 - Valores para os casos de estudo desta pesquisa

Caso	Espaçamento (m)	Rigidez dinâmica kd (kN/m)	Massa específica da laje (kg/m³)	Variação no estudo
0	2,25	1,49E+04	2500	---
1	2,25	1,49E+04	3000	massa específica da laje (mantendo espaçamento e rigidez dinâmica)
2	2,25	1,49E+04	3500	
3	2,25	1,49E+04	4000	
4	2,25	1,49E+04	4500	
5	2,50	1,49E+04	2500	espaçamento (mantendo rigidez dinâmica e massa específica da laje menor)
6	3,00	1,49E+04	2500	
7	3,50	1,49E+04	2500	
8	4,00	1,49E+04	2500	
9	4,50	1,49E+04	2500	rigidez dinâmica kd (mantendo espaçamento e massa específica da laje)
10	2,25	8,00E+03	2500	
11	2,25	1,00E+04	2500	
12	2,25	1,20E+04	2500	
13	2,25	1,60E+04	2500	
14	2,25	1,80E+04	2500	
15	2,25	2,00E+04	2500	
16	2,25	2,20E+04	2500	espaçamento (mantendo rigidez dinâmica e massa específica da laje maior)
17	2,50	1,49E+04	4500	
18	3,00	1,49E+04	4500	
19	3,50	1,49E+04	4500	
20	4,00	1,49E+04	4500	
21	4,50	1,49E+04	4500	rigidez dinâmica kd (mantendo espaçamento e massa específica da laje maior)
22	2,25	8,00E+03	4500	
23	2,25	1,00E+04	4500	
24	2,25	1,20E+04	4500	
25	2,25	1,60E+04	4500	
26	2,25	1,80E+04	4500	
27	2,25	2,00E+04	4500	
28	2,25	2,20E+04	4500	

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados cada caso e os resultados obtidos nos modelos de 1 grau de liberdade e elementos finitos de cada um deles. Os casos em que foi variado o valor da massa específica da laje são os casos de 1 a 4 e 17 a 28. Esta proposição é importante para conhecer a variabilidade da vibração do sistema quando se eleva a massa do sistema massa-mola.

4.1 Resultados

Caso 0

Este caso se refere ao modelo calibrado por Carvalho (2015) com os dados experimentais, com as seguintes características (Tabela 17):

Tabela 17 – Valores característicos do Caso 0

Espaçamento	2,25	m
$k_{\text{dinâmico}}$	1,49E+04	kN/m
$k_{\text{por m de via}}$	2,64E+04	kN/m/m
Massa específica laje	2500	kg/m ³

A Figura 41 representa o espectro do trem de referência e o espectro de vibração obtido no método com 1 GL. Nota-se que com a excitação do espectro do trem, a atenuação da vibração ocorre a partir da frequência de 10 Hz, o que caracteriza o sistema como de frequência natural de 10 Hz.

Figura 41 – Nível de vibração no túnel Caso 0

Os casos de 1 a 4 são descritos a seguir, onde há a variação do valor da massa específica do concreto da laje do sistema, ou seja, quando se empregaria o concreto pesado em sua construção. A Tabela 18 mostra um resumo dos resultados dos 4 primeiros casos analisados juntamente com o Caso 0.

Tabela 18 – Resultados dos casos de 1 a 4

Caso	Espaçamento (m)	kd (kN/m)	Massa específica da laje (kg/m³)	fn 1GL (Hz)	Vibração no túnel (dBV)	fn EF (Hz)
0	2,25	1,49E+04	2500	10,7	85,9	10,2
1	2,25	1,49E+04	3000	10,3	86,6	9,6
2	2,25	1,49E+04	3500	10	86,8	9,1
3	2,25	1,49E+04	4000	9,7	86,1	8,6
4	2,25	1,49E+04	4500	9,4	85,1	8,2

A Figura 42 mostra as curvas do comportamento dinâmico do túnel do modelo de 1GL, para os casos de 1 a 4, comparando com a curva do Caso 0 em destaque.

Figura 42 – Nível de vibração do túnel em relação à variação de massa específica

Para estas variações é possível notar que o aumento da massa da laje diminuiu a frequência natural do sistema tanto no modelo 1GL quanto no modelo considerando elementos finitos. Quanto maior a massa específica, menor a frequência natural. Este resultado era esperado, uma vez que a relação entre a massa do sistema

e o amortecimento diminuem, a frequência natural tende a diminuir também. Já o comportamento da vibração do túnel não segue um padrão, permanecendo numa faixa próxima à encontrada no Caso 0. Isso pode ser explicado pela não dependência linear da vibração global com o valor da vibração em cada faixa de frequência, em bandas de terças de oitavas. Ao se modificar o valor de atenuação do sistema, a curva de vibração no túnel se ajusta e pode não alterar seu valor global.

Os casos de 5 a 9 são descritos a seguir na Tabela 19, onde há a variação do espaçamento longitudinal entre PADs.

Tabela 19 - Resultados dos casos de 5 a 9

Caso	Espaçamento (m)	kd (kN/m)	Massa específica laje (kg/m³)	fn 1GL (Hz)	Vibração no túnel (dBV)	fn EF (Hz)
0	2,25	1,49E+04	2500	10,7	85,9	10,2
5	2,50	1,49E+04	2500	10,1	86,8	9,7
6	3,00	1,49E+04	2500	9,2	84,8	8,9
7	3,50	1,49E+04	2500	8,6	84,7	8,3
8	4,00	1,49E+04	2500	8,0	85,6	7,8
9	4,50	1,49E+04	2500	7,5	84,0	7,4

A Figura 43 mostra as curvas do comportamento dinâmico do túnel do modelo de 1GL, para os casos de 5 a 9, comparando com a curva do Caso 0 em destaque.

Figura 43 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de espaçamento dos PADs

Para estas variações é possível notar que o aumento do espaçamento dos PADs diminuiu a frequência natural do sistema, tanto no modelo 1GL quanto no modelo considerando EF. Quanto maior o espaçamento, menor a frequência natural. Este resultado era esperado, uma vez que o aumento do espaçamento dos apoios eleva a elasticidade da laje. Já o comportamento da vibração do túnel não segue um padrão de comportamento, permanecendo numa faixa próxima a encontrada no Caso 0. Analogamente aos primeiros casos, a não linearidade entre o valor da vibração global e o valor da vibração em cada faixa de frequência pode ser o motivo para que ela não apresente grande variação. A limitação do gráfico em função das bandas de terças de oitavas pode distorcer a curva do modelo no gráfico.

Os casos de 10 a 16 são descritos a seguir, onde há a variação da rigidez dinâmica dos PADs.

A Tabela 20 mostra um resumo dos resultados dos casos de 10 a 16, juntamente com o Caso 0, cuja variação foi a rigidez dinâmica dos PADs.

Tabela 20 – Resultados dos casos 10 a 16

Caso	Espaçamento (m)	kd (kN/m)	Massa específica laje (kg/m ³)	fn 1GL (Hz)	Vibração no túnel (dBV)	fn EF (Hz)
0	2,25	1,49E+04	2500	10,7	85,9	10,2
10	2,25	8,00E+03	2500	7,8	85,3	7,6
11	2,25	1,00E+04	2500	8,8	84,4	8,5
12	2,25	1,20E+04	2500	9,6	85,9	9,2
13	2,25	1,60E+04	2500	11,1	85,4	10,5
14	2,25	1,80E+04	2500	11,7	86,1	11,1
15	2,25	2,00E+04	2500	12,4	87,5	11,6
16	2,25	2,20E+04	2500	13	87,3	12,1

A Figura 44 mostra as curvas do comportamento dinâmico do túnel do modelo de 1GL, para os casos de 10 a 16, comparando com a curva do Caso 0 em destaque.

Figura 44 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de rigidez dinâmica dos PADs

Para estas variações é possível notar que com o aumento da rigidez dinâmica dos PADs há diminuição na frequência natural do sistema, tanto no modelo 1GL quanto no modelo considerando EF. Quanto maior a rigidez dinâmica do PAD, maior a frequência natural do sistema. Este resultado era esperado, uma vez que o incremento da rigidez dos apoios diminui a elasticidade da laje. Já o comportamento da vibração do túnel não segue um padrão de comportamento, permanecendo numa faixa próxima a encontrada no Caso 0. Como explicado nos casos anteriores, as variações nos picos dos gráficos não estão provocando grandes alterações na vibração global. Nota-se que em relação as Figuras 43 e 44, a variação de rigidez dos PADs provoca maior alteração nas curvas em relação ao Caso 0.

Os casos de 17 a 21 são descritos a seguir, onde há a variação da massa específica da laje e também do espaçamento dos PADs, em relação ao Caso 0. Estes casos têm o valor da massa específica fixada em 4500 kg/m^3 .

A Tabela 21 mostra um resumo dos resultados dos casos de 17 a 21, juntamente com o Caso 0, cuja variação foi o espaçamento dos PADs e a massa específica da laje.

Tabela 21 – Resultados dos casos 17 a 21

Caso	Espaçamento (m)	kd (kN/m)	Massa específica laje (kg/m³)	fn 1GL (Hz)	Vibração no túnel (dBV)	fn EF (Hz)
0	2,25	1,49E+04	2500	10,7	85,9	10,2
17	2,50	1,49E+04	4500	8,9	84,3	7,8
18	3,00	1,49E+04	4500	8,1	85,7	7,2
19	3,50	1,49E+04	4500	7,5	83,8	6,7
20	4,00	1,49E+04	4500	7,0	82,4	6,3
21	4,50	1,49E+04	4500	6,6	83,2	5,9

A Figura 45 mostra as curvas do comportamento dinâmico do túnel do modelo de 1GL, para os casos de 17 a 21, comparando com a curva do Caso 0 em destaque.

Figura 45 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de espaçamento dos PADs e fixando o valor da massa específica da laje

Nota-se que na figura anterior os picos de vibração declinam para frequências mais baixas, chegando em 6,3 Hz para vibrações perto de 80 dBV. Comparando com o Caso 0, nota-se um certo grau de atenuação, chegando a uma frequência baixa em relação aos 10 Hz do Caso 0.

A Tabela 22 mostra um resumo dos resultados dos casos de 22 a 28, juntamente com o Caso 0, cuja variação foi a rigidez dinâmica dos PADs e a massa específica da laje.

Tabela 22 - Resultados dos casos 22 a 28

Caso	Espaçamento (m)	kd (kN/m)	Massa específica laje (kg/m³)	fn 1GL (Hz)	Vibração no túnel (dBV)	fn EF (Hz)
0	2,25	1,49E+04	2500	10,7	85,9	10,2
22	2,25	8,00E+03	4500	6,9	82,6	6,1
23	2,25	1,00E+04	4500	7,7	84,7	6,8
24	2,25	1,20E+04	4500	8,4	85,1	7,4
25	2,25	1,60E+04	4500	9,7	86,3	8,5
26	2,25	1,80E+04	4500	10,3	86,6	9,0
27	2,25	2,00E+04	4500	10,9	85,5	9,5
28	2,25	2,20E+04	4500	11,4	85,5	9,9

A Figura 46 mostra as curvas do comportamento dinâmico do túnel do modelo de 1GL, para os casos de 22 a 28, comparando com a curva do Caso 0 em destaque.

Figura 46 - Nível de vibração do túnel em relação à variação de rigidez dinâmica dos PADs e fixando o valor da massa específica da laje

Para estas variações é possível notar que há o aumento da frequência natural do sistema, tanto no modelo 1 GL quanto no modelo em EF. A combinação não apresenta valores muito diferentes dos que podem ser obtidos alterando-se separadamente cada variável considerada. O que ocorre é que a laje pode ficar muito instável lateralmente, devido ao aumento do deslocamento lateral. Assim, os ganhos com a diminuição da frequência são consideráveis, porém os valores de amplitudes podem significar que a laje esteja instável para estas combinações de espaçamento e massa específica.

4.2 Variabilidade da frequência natural e do nível de vibração no túnel

Em termos da massa específica do concreto da laje flutuante ρ (kg/m^3)

A comparação entre os valores de frequências naturais obtidas no modelo de 1 GL e no modelo em EF é apresentada na Figura 47. O gráfico mostra que com o aumento da massa específica da laje há ganhos de no máximo 2 Hz na frequência natural da via permanente. Este resultado indica que, apesar do grande aumento na massa da laje, há uma pequena variação no resultado final da frequência natural do sistema. A importância desta variação depende da necessidade de cada projeto, sendo que por vezes um decréscimo de 2 Hz possa resolver um problema de implantação da via permanente. Além disso, também se observa como os resultados das frequências pelos dois métodos apresentados se comportam de maneira semelhante, ressaltando a validade do método de Carvalho (2015).

Figura 47 – Variação das frequências naturais em relação ao aumento da massa específica

A Figura 48 apresenta o gráfico da variação do nível de vibração global resultante no túnel com o aumento da massa específica. Os resultados não mostram grandes melhorias nos níveis de vibração e, ao contrário, indicam que a variação de massa da laje faria até com que os níveis de vibração aumentassem, o que é o oposto do objetivo dos métodos de atenuação de vibração. Se for observada a forma como a vibração global é calculada (Equação 36), ela depende de todos os valores das faixas de vibração por suas frequências. Logo, após a aplicação do espectro do trem de referência, o espectro do túnel adquire valores que, no cálculo da vibração global, não alteram em demais o seu valor. O fato de não haver grandes mudanças nesses valores não invalida o experimento, pois é possível que em situações de diferentes configurações de via permanente a atenuação da vibração no túnel seja maior que a encontrada neste trabalho.

Figura 48 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da massa específica

Em termos do espaçamento longitudinal entre PADs

A comparação entre os valores de frequências naturais obtidas no modelo de 1 GL e no modelo em EF é apresentada na Figura 49. O gráfico mostra que com o aumento do espaçamento entre PADs há uma tendência de diminuição da frequência natural da via permanente. Este resultado indica que é possível que o ajuste do espaçamento dos PADs diminua a frequência natural da via permanente. Além disso, este gráfico também ressalta a compatibilidade dos valores encontrados utilizando os métodos de 1 GL e em EF.

Figura 49 - Variação das frequências naturais em relação ao aumento do espaçamento entre os PADs

A Figura 50 apresenta o gráfico da variação do nível de vibração global resultante no túnel. Ele mostra que não há grande mudança na vibração global, nem uma tendência clara de diminuição com o espaçamento. Na verdade, a sensibilidade existe, mas é pequena.

Figura 50 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da massa específica

Em termos da rigidez dinâmica dos PADs k (kN/m)

A comparação entre os valores de frequências naturais obtidas no modelo de 1 GL e no modelo em EF é apresentada na Figura 51. O gráfico mostra que com a variação da rigidez dos apoios elásticos, há uma variação na frequência natural do sistema. Quanto menor a rigidez PAD, menor a frequência natural, para a faixa de valores estudada. O que ocorre é que se o conjunto de PADs com rigidez baixa é

instalado na via, confere ao sistema uma elasticidade alta, devido à baixa resistência do PAD a um movimento oscilatório vertical, que é provocado pela passagem dos trens. Este gráfico também ressalta a compatibilidade dos valores encontrados utilizando os métodos de 1GL e em EF. Esta variação é significativa dentro do contexto de atenuação de laje flutuante.

Figura 51 - Variação das frequências naturais em relação ao aumento da rigidez dinâmica dos PADs

A Figura 52 apresenta o gráfico da variação do nível de vibração global resultante no túnel em função do aumento da rigidez dos PADs. O gráfico mostra que há uma tendência de amplificação do nível de vibração com o aumento da rigidez do PAD para o intervalo dado. Isso acontece pois quanto mais rígida a via, menos energia (sob a forma de vibrações) ela vai absorver nos elementos elásticos. Esta energia é dissipada no túnel, fazendo com que os níveis de vibração globais aumentem.

Figura 52 - Variação da vibração do túnel em relação ao aumento da rigidez dos PADs

Os resultados apresentados mostram que há algumas variações que devem ser observadas. Nos Casos 1, 2, 3 e 4 em que foi aplicada a variação de massa específica da laje, nota-se algumas mudanças na frequência natural, não sendo também possível tirar conclusões quanto ao nível de vibração global do túnel ser dependente da massa específica da laje flutuante. Os gráficos da vibração no túnel apresentam alguma variação. A condição de armadura foi mantida igual à do Caso 0, logo é importante deixar claro que as armaduras devem ser ajustadas para novas condições.

Nos casos em que o espaçamento longitudinal entre os PADs foi variado (Casos 5, 6, 7, 8 e 9) é possível notar uma mudança que deve ser comentada. Os resultados sugerem que o aumento da distância entre os PADs pode auxiliar na atenuação das vibrações e na redução da frequência natural do sistema. Há que se salientar a necessidade de recalculas as armaduras em relação ao Caso 0, pois os apoios serão modificados. Este sistema também pode alterar a estabilidade lateral da laje flutuante, sendo necessário um estudo específico neste sentido.

Para os Casos 10 a 16 onde as rigidezes dos apoios elásticos foram alteradas, houve mudança nos picos dos espectros de vibração do túnel, o que indica variação da frequência natural do sistema. Quanto menor a rigidez do PAD, menor a frequência natural do sistema, o que é esperado, pois confere mais elasticidade à laje, todavia, problemas de estabilidade lateral também devem ser estudados.

Os casos 17 a 28 (onde foram alteradas duas variáveis ao mesmo tempo) não apresentaram grandes ganhos face aos casos com variação de apenas um fator em relação ao Caso 0. A equivalência dos modelos de 1 GL e EF também se mostra menos significativa nos modelos com duas variáveis. A Figura 53 mostra a equivalência dos modelos.

Figura 53 – Comparação entre o método de 1 GL e em EF para todos os casos desta pesquisa

O modelo estudado por Carvalho (2015) se mostrou ser uma alternativa consistente para o estudo de vibrações em EF nas condições apresentadas. Alguns pontos das curvas do gráfico se distanciam, principalmente nos casos com duas variáveis e nos casos onde se variou a massa específica da laje.

Com base nos valores considerados como *input* nos métodos empregados e nos resultados obtidos, o melhor método para atenuação da vibração é o que faz alteração da rigidez dos PADs.

Vale ressaltar também que os resultados de variação da massa específica da laje foram importantes (uso de concreto pesado), mostrando que, como levantado na hipótese inicial, o seu aumento ajuda a diminuir a frequência natural em que vibra o sistema massa-mola, sem alterar drasticamente a deformação da laje e sua deflexão. Estes resultados são de grande relevância, uma vez que não foi verificado na literatura o uso desta solução para tal aplicação em via permanente. Esta solução pode ser utilizada quando há restrição de níveis de vibração e gabarito dos túneis.

A solução espaçando os PADs também trouxe bons níveis de redução da frequência natural, porém há que se estudar possíveis alterações na estabilidade da via e os cálculos da armação devem ser refeitos, visto que a condição de apoio da laje flutuante é alterada.

4.3 Passos para avaliação de uma solução para atenuação de ruído e vibração em via permanente

Neste item sugere-se uma sequência de passos a serem seguidos para avaliar uma solução que se deseja empregar em um projeto, seguindo a ideia da presente dissertação. Assim, em estudos de soluções de atenuação de vibração de via permanente metroferroviária de base rígida em área urbana, os pontos ideais que devem ser seguidos são:

1. Dados de um espectro de vibração de material rodante;
2. Determinação de um caso que sirva de base de comparação e que seja calibrado com dados reais coletados em campo;
3. Definição de métodos de cálculo para a avaliação das hipóteses;
4. Calibração do método de cálculo a partir do caso base;
5. Definição das hipóteses;
6. Aplicação das hipóteses no modelo de cálculo;
7. Comparação com o caso base calibrado com dados de campo;
8. Avaliação dos resultados.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho se propôs a testar hipóteses de soluções para atenuação de vibração e ruído em via permanente metroferroviária. O estudo das respostas dinâmicas e das frequências naturais das lajes de concreto de sistemas metroferroviários se mostrou complexo, porém foi possível extrair resultados que podem ajudar a compreender os fenômenos físicos envolvidos na mitigação de vibração de sistemas como este.

A utilização de um método de cálculo em elementos finitos encontrado na literatura pode dar um embasamento sólido na obtenção dos resultados das simulações efetuadas no presente trabalho. A existência de um método calibrado com estudos de campo permitiu um nível satisfatório na representatividade dos cálculos hipotéticos efetuados.

Os dados arbitrados na metodologia para variação das massas específicas, espaçamento de PADs e rigidez dos apoios foram determinados a partir da experiência profissional do autor, que definiu os valores como sendo possíveis de se reproduzir em projetos reais. Os valores para as massas específicas foram limitados à disponibilidade de mercado.

Os resultados das simulações apresentaram variações importantes. É possível afirmar que das três opções de solução, sendo elas aumento de massa específica da laje, variação de espaçamento de apoio e variação de rigidez dos apoios, a que mostrou mais reflexos nos modelos foi a variação de espaçamento. Há que se ressaltar que devem ser feitos ajustes na armadura da laje flutuante, para todas as mudanças propostas na presente pesquisa. Outra limitação do trabalho foi que os gráficos, por estarem em bandas de terças de oitavas, tiveram influência na sua interpretação.

A apresentação da solução com a utilização de concreto pesado foi motivada por experiências do autor em projetos de via permanente, em que surgiu o desafio de adequar a frequência natural da laje a um limite estabelecido após a execução do túnel, consequentemente com restrição de gabarito. Neste caso, deveria ser empregada uma solução sem que se alterasse a cota do topo do boleto da via permanente. Dentro deste contexto, o estudo foi satisfatório no sentido de abordar esta solução ainda não explorada na literatura.

De maneira geral, os valores encontrados para as frequências naturais mostraram certa compatibilidade com a expectativa inicial, onde a hipótese de diminuição da f_n da laje flutuante era esperada, com os valores das variáveis conferindo maior elasticidade à via. Assim, estudos devem avançar no sentido de avaliar a estabilidade lateral da via, uma vez que quanto mais baixo o valor da frequência natural da laje flutuante, mais vulnerável ela fica diante dos esforços laterais decorrentes da passagem dos trens. Outro ponto importante de atenção é que com a utilização de espaçamentos maiores, as tensões nos PADs aumentam e podem mudar a rigidez dinâmica destes ao longo do tempo. Estas alterações devem ser avaliadas e possíveis correções e ajustes devem ser considerados.

Os valores de nível de vibração global nos túneis não mostraram grandes mudanças para a faixa de valores testada, indicando que não têm grande efeito quando variados sozinhos, então não devem ser utilizados como forma de atenuação de vibração de forma isolada, mas em conjunto com outros fatores, para que se alcance níveis de atenuação de vibração que sejam satisfatórios. Logo, para os dados apresentados neste trabalho, a dupla variação de dados não é justificada para ser reproduzida em projetos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI S3.29-1983 (R2001). **American National Standard Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings.** : American National Standards Institute..

AQUILINO, M. M.; VITTORINO, F. **Ruídos e vibrações em trens; estudos dos níveis de ruídos e vibrações.** 1º Ciclo de Palestra em Gestão Ambiental; 8º encontro Monitoramento de QSMS. São Paulo: IPT. 2013. p. 129.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953 2015 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro: p.7, 2015.

BAHREKAZEMI, M. **Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction.** Tese de Doutorado, Royal Institute of Technology, Dept. Of Civil And Architectural Engineering. Stockholm, p. 168. 2004.

BRRAILPARTS. Catálogo Eletrônico. Disponível em: <http://www.brrailparts.com.br/isoladores_palmilhas.php>. Acesso em: 27 março 2017.

CALEMBERG INGENIEURE. Tecnologia de ponta para sistemas de apoios elastoméricos na construção civil, 2010.

CARVALHO, J. T. **Comportamento dinâmico das lajes flutuantes de vias permanentes em sistemas metroferroviários.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 136. 2015.

CASTELLANI, A. et al. Elastomeric Materials Used for Vibration Isolation of Railway Lines. **Journal of Engineering Mechanics**, Virginia, 1 junho 1998. 614-621.

CLOUGH, R.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures.** 3ª. ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 1995.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (ORG.). Licitações/Editais. **Processo 41428212.** Disponível em: <https://aplic.metrosp.com.br/as0001/frontend/index.php/processo/index?AvisosPublicados%5Bnr_areainteresse%5D=3&AvisosPublicados%5Bds_objeto%5D=&AvisosPublicados%5Bcd_processo%5D=&yt0=Buscar#>. Acesso em: 17 abril 2017.

DAWN, T. M. Ground Vibration from Heavy Freight Trains. **Journal of Sound and Vibration**, Derby, 22 Março 1983. 351-356.

DAWN, T. M.; STANWORTH, G. C. Ground Vibrations From Passing Trains. **Journal of Sound and Vibration**, Derby, 16 Julio 1979. 355-362.

DEGRANDE, G.; LOMBAERT, G. High-Speed Train Induced Free Field Vibrations: In Situ Measurements and Numerical Modelling. **Proceedings of the International Workshop Wave 2000**, Rotterdam, Dezembro 2000. 29-41.

EITZENBERGER , A. **Train-induced Vibrations in Tunnels – A Review**. Lulea University of Technology. Lulea, p. 90. 2008.

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **Transit Noise and Vibration Impact Assessment: FTA-VA-90-1003-06**. Washington. 2006.

FORLIN, M.; BIRCK, M. **Concretos e Argamassas Especiais - Concreto Pesado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.

FUJIKAKE, T. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains. **Journal of Sound and Vibration**, Dezembro 1986. 357-360.

FUJIKAKE, T. A. A Prediction Method for the Propagation of Ground Vibration from Railway Trains on Level Tracks With Welded Rails. **Journal of Sound and Vibration**, Yokohama, 8 Fevereiro 1989. 524-527.

GERB DO BRASIL. **Gerb Controle de Vibrações**. Disponível em: <http://www.gerb.com.br/index.php?id=1136&no_cache=1&tx_photogals_elementid=3394&tx_photogals_image=2>. Acesso em: 26 abril 2017.

GETZNER WERKSTOFFE GMBH. Brochure Mass-Spring Systems. **Getzner**, Bürs, p. 20. Disponível em: <<https://www.getzner.com/en/downloads>>. Acesso em: 8 Julho 2017.

GUPTA, S.; DEGRANDE, G.; LOMBAERT, G. Experimental validation of a numerical model for subway induced vibrations. **Journal of Sound and Vibration**, Leuven, 15 Outubro 2008. 786-812.

HANNELIUS, L. **Svängningsrörelser i jord genom tågtrafik. Förnimmelser och effekter i byggnader**. Statens Geotekniska Institut. Linköping. 1994. (em suéco).

IEME BRASIL. **IEME BRASIL**, 2017. Disponível em: <<http://www.iemebrasil.com.br/engenharia/clientes/metro>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2 Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)**. Geneva: p. 11, 2003. 11 p.

JONES, C. J. C. Use of numerical-models to determine the effectiveness of anti-vibration systems for railways. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport**, 1 Fevereiro 1994. 43-51.

JONES, S. W. **Ground Vibration from Underground Railways: How Simplifying Assumptions Limit Prediction Accuracy**. Tese de Doutorado, University of Cambridge, Department Of Engineering. Cambridge, p. 232. 2010.

JONSSON, J. O. **On Ground and Structural Vibrations Related to Railway Traffic**. Tese de doutorado, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg. 2000.

KLÆBOE, R. et al. Vibrations in dwellings from road and rail traffic. Part III towards a common methodology for socio-vibrational surveys. **Journal of Applied Acoustics**, Janeiro 2003. 111-120.

KRYLOV, V. V. Generation of Ground Vibrations by Superfast Trains. **Applied Acoustics**, Nottingham, 1995. 149-164.

KRYLOV, V.; FERGUSON, C. Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains. **Applied Acoustics**, Nottingham, 1994. 199-213.

LAKUSIC, S.; AHAC, M. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas. **Tehnički vjesnik - Technical Gazette**, Osijek, 2 Fevereiro 2012. 427-435.

LICHTBERGER, B. **Track Compendium**. Hamburgo: Eurailpress, 2011.

MADSHUS, C.; BESSASON, B.; HARVIK, L. Prediction Model for Low Frequency Vibration from Hight Speed Railways on Soft Ground. **Journal of Sound and Vibration**, Oslo, 30 Maio 1996. 195-203.

MANOEL FILHO, S. F. Via Permanente x Ruídos e Vibrações. **Revista Engenharia**, n. 529, p. 101-105, 1998. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/PTR0540/download/ruídos.pdf>>. Acesso em: 11 janeiro 2017.

MAZZILLI, C. E. N. et al. **Lições em Mecânica das Estruturas: Dinâmica**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3º. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTEIRO, D. T. **Influência da rigidez vertical no comportamento mecânico e dimensionamento da via permanente ferroviária**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 123. 2015.

NELSON, J. T.; SAURENMAN, H. J. **State-of-the-Art Review Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains**. Oakland: Wilson, Ihrig & Associates, 1983.

NORGES STANDARDISERINGS FORBUND. **NS 8176E Vibration and shock, Measurement of vibration in buildings from land based transport transport and guidance to evaluation of its effects on human beings**. Oslo: , 1999.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

SAVIANO, M. **Photobucket**, Sao Paulo, 2017. Disponível em: <<http://s904.photobucket.com/user/SavianoMarcio/media/Linha%203%20-%20Vermelha/BarreiraAcustica2.jpg.html>>. Acesso em: 27 Fevereiro 2017.

SIMÕES, S. C. D. **Ruído e Vibrações no Corpo Humano**. Projeto de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal. Setúbal, p. 74. 2014.

THOMPSON, D. **Railway noise and vibration**: mechanisms, modelling and means of control. 1^a. ed. Oxford: Elsevier Science, 2009.

TIPLER, P. A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6^o. ed. São Paulo: LTC, v. I - Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica, 2009.

TOPÇU, I. B. Properties of heavyweight concrete produced with barite. **Cement and Concrete Research**, Eskisehir, 21 Novembro 2002. 815-822.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **Fatal Injury and Accident Rates**. U. S. Government Printing Office. Washington. 1982.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment**. Office of Railroad Development. Massachusetts, p. 235. 2005.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **High-Speed Ground Transportation**. Office of Railroad Policy and Development. Washington, p. 248. 2012.

WAGNER, H.-G. Vibration control systems for trackbeds and buildings using coil steel springs. **Australian Acoustical Society**, Essen, 3 Novembro 2004.