

Osmar Tomoyuki Yokoyama  
e Sérgio Luís Silva

**Análise da Situação Atual dos Sistemas Metro-ferroviários com Relação à  
Mitigação de Ruídos e Vibrações**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para o curso de Especialização em  
Tecnologia Metro-ferroviária.

Área de Concentração:  
Tecnologia Metro-Ferroviária

Orientador:  
Prof. Doutor  
Carlos Alberto Nunes Dias

São Paulo  
2007

ESP/TMF

2007

Si 38 a

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500019008

M 2007 CE

1794248

Silva, Sérgio Luís e Yokoyama, Osmar Tomoyuki  
Análise da Situação Atual dos Sistemas Metro-  
Ferroviários com Relação à Mitigação de Ruídos e  
Vibrações, São Paulo, 2007.  
102p.

Dissertação (Especialização) – Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo. Programa de Educação  
Continuada em Engenharia.

1. Tecnologia Metro-ferroviária 2. Engenharia Mecânica  
I. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Programa de Educação Continuada em Engenharia.

## DEDICATÓRIA

Dedicamos esta Dissertação à nossas famílias, que nos incentivaram e nos aturaram, compreendendo a magnitude e importância da conclusão deste curso para nós.

“Por isso, todo mestre da lei instruído quanto ao Reino dos céus é como o dono de uma casa que tira do seu tesouro coisas novas e coisas velhas”

Mt 13.52

## AGRADECIMENTOS

Aproveitamos o ensejo para agradecer a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desta dissertação e com a conclusão do Curso de Especialização em Tecnologia Metro-ferroviária. Dentre todos destacamos:

- A todos Mestres e Doutores que de forma briosa aceitaram o desafio de lecionar num curso novo, nem sempre sendo a especialidade de sua cadeira.
- Ao nosso orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias, que em alguns momentos pareceu mais motivado do que nós mesmos no andamento do trabalho. Agradecemos pela paciência e pelo tempo investido neste desafio árduo que foi nos orientar e nortear a elaboração desta dissertação.
- Aos Eng<sup>os</sup>. Dr. Marco Juliani e Dr. Adilson Roberto Takeuti e a Eng<sup>a</sup> Maria Luiza Belderrain pelas reuniões, discussões e materiais fornecidos, sem os quais seriam impossíveis a pesquisa e conclusão desta dissertação.
- Aos nossos chefes e colegas de trabalho que nos incentivaram e ofereceram as condições necessárias para a participação no curso de Especialização em Tecnologia Metro-ferroviária.
- As nossas famílias, pelos dias em que estivemos ausentes do convívio do lar, porém, investindo o tempo em nossa formação profissional.
- Principalmente a DEUS pela saúde e discernimento para concluirmos esta difícil tarefa.

## RESUMO

A questão ambiental cada vez mais influencia a qualidade de vida das pessoas. O atendimento às normas e a certificação das Empresas como forma de qualificação de seus serviços torna-se primordial para a sobrevivência e a evolução da mesma, isto aliado ao crescente nível de conscientização dos cidadãos faz com que os órgãos governamentais exijam que as empresas prestadoras de serviço no ramo metro-ferroviário se ajustem à legislação vigente para continuarem operando.

Neste contexto a nossa análise visa apresentar a situação atual dos sistemas metro-ferroviários com relação à mitigação de ruídos e vibrações e estabelecer parâmetros de atuação preventiva e corretiva para adequação das Linhas em operação a esta realidade. Para isto podemos dividir esta análise em três grupos de estudos distintos:

### 1. Ábaco de correlação

Elaborar um Ábaco através das medições de ruídos e vibrações efetuadas em diversos pontos das linhas metroviárias com o objetivo de caracterizar os diversos tipos de construções dos sistemas metro-ferroviários correlacionando os níveis de ruídos e vibrações. Este tipo de instrumento é útil tanto para o projeto básico de novas linhas como para a manutenção das linhas existentes.

Pesquisar as medições já executadas no Metrô e acompanhar as medições programadas para o segundo semestre de 2006, e para cada ponto de medição efetuar um levantamento das distâncias radiais envolvidas, as características de construção do sistema metroviário, o tipo de material rodante, a geometria da via permanente, a geologia predominante na região e os resultados obtidos nas medições de ruído e vibração. A partir destes dados, traçar curvas onde possamos fazer extrapolações, com determinado grau de precisão, para outros pontos da linha em condições semelhantes. A construção deste tipo de Ábaco é muito complexa e envolve muitos recursos de medição que, eventualmente, não conseguimos obter até a conclusão desta

monografia, neste caso serão demonstradas as técnicas para a elaboração do Ábaco, bem como uma proposta para o Metrô efetuar as medições necessárias para a geração do mesmo.

## 2. Mapeamento das Linhas

Definir, para cada uma das linhas, o mapa de medições a serem realizadas, fixando faixas de distâncias radiais críticas em função do tipo de construção do sistema metroviário e levando em conta as principais características de solo, da via e do material rodante. A partir das faixas de distâncias radiais críticas poderemos estabelecer imóveis lindeiros que estejam inseridos nestas faixas para propor ao Metrô a realização das medições necessárias.

## 3. Estabelecimento de Rotinas

Estabelecer parâmetros e rotinas de medição de ruído e vibração em pontos específicos pré-definidos pelo Mapeamento das Linhas, com o objetivo de monitorar o desempenho dos sistemas e estruturas. Estas rotinas também servirão para atendimento a reclamações de lindeiros relativas a ruído e vibração oriundas dos sistemas metro-ferroviários.

Analisar as normas pertinentes ao tema Ruído e Vibração, específicas referentes aos sistemas metro-ferroviários e definir os parâmetros a serem recomendados para utilização no Metrô-SP, então poderão ser definidos os recursos técnicos e materiais necessários para implantação da rotina.

## ABSTRACT

The environmental question has each time more influence on people quality life. The norms attendance and the Companies certification, as a form to qualify their services, become primordial to their survival and evolution. Also, added to the increasing level of citizen awareness, this make the governmental bodies demand rendering meter-railroad services companies to adjust their operation to the current laws. Inside this context, this analysis aims to present the current subway-railroad systems situation regarding to noises and vibrations mitigation in order to establish parameters for preventive and corrective performance, searchin Lines adequation for this operational reality. For this purpose, we can divide this analysis in three distinct sudies groups:

### 1. Correlation Abacus

In the Correlation Abacus construction, there were made noises and vibrations measurements in many sites of subway lines. These measurements aimed to get the characteristics of the various construction types on meter-railroad systems as well the noises and vibrations levels associated. This instrument is very useful for new lines project and for existing lines maintenance.

In this construction, there were used measurements already made in São Paulo Subway Company. For each noises and vibration measurement, there was conducted a survey in the following aspects: radial distances, subway system construction characteristics, rolling stock type, permanent way geometry, predominant geology. From these data, characteristics curves there were plotted, allowing some extrapolation with some precision degree for other sites in similar conditions. This Abacus construction is very complex, requiring many measurement resources that, in the moment of this study, haven't led to a conclusion. However, this construction will be demonstrated as well a proposal for the measurement needed to conclude the construction.



## 2. Lines Mapping

There was made a Lines mapping in order to map the associated measurements, as well the distance bands associated to each construction type, main ground characteristics and rolling stock associated. From the critical band distance, it is possible to establish bordering properties in order to allow the needed measurement accomplishment.

## 3. Establishing Routines

This study aimed to get and establish measurement parameters and routines for noises and vibrations on determined sites defined by the Line Mapping. These measurements aim to monitor the systems structures and performance. These routines also will serve for bordering claims attendance. This study is also to make an analysis of related noise and vibration norms, to construct a reference for subway-railroad systems and to define parameters for use on subway systems. From these specifications, the material and technical resources can be listed for the routines implementation.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1.	INTRODUÇÃO .....	14
1.1.	OBJETIVO .....	14
1.2.	MOTIVAÇÃO .....	14
2.	FENÔMENO VIBRO-ACUSTICO .....	15
3.	VIBRAÇÕES ORIUNDAS DOS SISTEMAS METRO-FERROVIÁRIO .....	20
4.	SISTEMAS DE AMORTECIMENTO .....	23
5.	CONCEITUAÇÃO METODOLÓGICA .....	31
5.1.	PERCEPÇÃO HUMANA PARA VIBRAÇÕES E RUÍDOS TRANSMITIDOS PELO SOLO .....	32
5.1.1.	Níveis Típicos para Ruído e Vibração Transmitidos pelo Solo .....	32
5.1.2.	Fatores que Influenciam a Vibração e o Ruído Transmitidos pelo Solo .....	34
5.2.	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES .....	38
5.2.1.	Categorias de Vibração Relativa a Sensibilidade da Edificação .....	38
5.2.2.	Critérios de Impacto de Vibração Transmitida pelo Solo .....	41
5.3.	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DO RUÍDO TRANSMITIDO PELO SOLO .....	44
5.4.	PROCEDIMENTO PARA MAPEAR VIBRAÇÕES .....	44
5.4.1.	Mapeamento das Vibrações .....	45
5.4.2.	Mapeando Distâncias .....	45
5.4.2.1.	Categorias de Projetos .....	45
5.4.2.2.	Distâncias .....	47
5.5.	ÁBACO DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO .....	48
5.5.1.	Avaliação Geral da Vibração .....	48
5.5.2.	Seleção da Curva Base para o Nível de Vibração .....	50
5.5.3.	Ajustes .....	53
5.5.4.	Análise dos Locais Impactados pela Vibração .....	61
5.6.	DETALHAMENTO DA PREDIÇÃO DE VIBRAÇÕES .....	61
5.6.1.	Caracterizando as Condições de Vibração Existentes .....	62
5.6.2.	Procedimento de predição da vibração .....	65
5.6.2.1.	Visão Geral do Procedimento de Predição .....	66

5.6.2.2.	Principais Passos na Análise Detalhada .....	70
5.6.3.	Medindo a Transferência de Mobilidade e a Força Densidade .....	75
5.6.3.1.	Instrumentação .....	77
5.6.3.2.	Análise de Dados da Transferência de Mobilidade .....	79
5.6.3.3.	Força Densidade .....	81
5.6.4.	Avaliação do Impacto da Vibração .....	82
5.6.5.	Mitigação da Vibração .....	84
6.	DESENVOLVIMENTO .....	88
6.1.	ÁBACO DE CORRELAÇÃO .....	88
6.1.1.	Extensão Leste (Expresso Leste – CPTM – Trecho DOM-JBO) .....	88
6.1.1.1.	Exemplos de Gráficos e Espectro .....	89
6.1.1.2.	Valores Encontrados .....	91
6.1.1.3.	Detalhes de Operação da Via .....	92
6.1.2.	Linha 1 – Azul (Trecho SAN-JPA) .....	92
6.1.2.1.	Exemplo de Gráficos e Espectros .....	93
6.1.2.2.	Valores Encontrados para o Ruído .....	95
6.1.2.3.	Valores Encontrados para Vibração .....	96
6.1.2.4.	Detalhes da Operação da Via .....	97
6.2.	MAPEAMENTO DAS LINHAS .....	97
6.3.	ESTABELECIMENTO DE ROTINAS .....	97
7.	CONCLUSÃO .....	98
8.	REFERÊNCIAS .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curva "A" de Compensação.....	17
Tabela 2 - Resposta Humana a Diferentes níveis de Ruído e Vibração.....	34
Tabela 3 - Fatores que Influenciam os Níveis de Ruído e Vibração .....	37
Tabela 4 - Critérios de Impacto para Avaliação Geral .....	40
Tabela 5 - Critérios de Impacto para Edificações Especiais. ....	41
Tabela 6 - Interpretação dos Critérios de Vibração para Análise Detalhada.....	43
Tabela 7 - Tipos de Projetos para o Procedimento de Mapeamento da Vibração .....	47
Tabela 8. Distâncias de Mapeamento .....	48
Tabela 9 - Fatores de Ajustes para Predições Generalizadas de Ruído e Vibração.....	54
Tabela 9 - Fatores de Ajustamento para Predições Generalizadas de Ruído e Vibração (continuação). ....	55
Tabela 10 – Posicionamento dos Transdutores .....	88
Tabela 11 – Frequência pela Velocidade de Vibração .....	91
Tabela 12 – Valor Global de Vibração.....	91
Tabela 13 – Posicionamento dos Transdutores .....	92
Tabela 14 – Frequência pela Velocidade de Vibração .....	96
Tabela 15 – Valor Global de Vibração.....	96
Tabela 16 – Aplicação da Equação Normal.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes Métodos de Descrição de um Sinal de Vibração.....	19
Figura 2 – Exemplificação da Propagação da Vibração .....	21
Figura 3 – Placa Vulcanizada Tipo Landis .....	24
Figura 4 – Palmilha Amortecedoras Tipo Silomer .....	25
Figura 5 – Palmilha Amortecedoras Tipo Pandrol.....	25
Figura 6 – Sistema Massa Mola - Conceito .....	26
Figura 7 – Secção Transversal do Túnel com Massa Mola Apios Discretos.....	27
Figura 8 – Detalhes da Montagem do Massa Mola Apios Discretos .....	28
Figura 9 – Detalhe da Manta Sob Laje Flutuante.....	28
Figura 10 – Manta Elastomérica Antivibratória Sob Lastro .....	29
Figura 11 – Manta Elastomérica Antivibratória Sob Lastro .....	29
Figura 12 – Secção Transversal do Túnel com Massa Mola Isoamortecedores.....	30
Figura 13 – Disposição dos Isoamortecedores ao Longo da Via .....	30
Figura 14 – Detalhes dos Elementos Isoamortecedores .....	31
Figura 15 - Níveis Típicos de Vibração Transmitida pelo Solo .....	33
Figura 16 - Critério para Análise de Vibração Detalhada. ....	42
Figura 17 - Fluxograma do Processo de Mapeamento da Vibração. ....	46
Figura 18 - Curvas Generalizadas de Vibração da Superfície do Solo .....	52
Figura 19 - Diagrama do Modelo de Vibração e Ruído Transmitidos pelo Solo .....	67
Figura 20 - Forças Densidades Típicas para veículos ferroviários, 40mph.....	72
Figura 21 - Exemplos de Ponto-Fonte da Transferência de Mobilidade .....	73
Figura 22 - Exemplos de Linha-Fonte da Transferência de Mobilidade.....	73
Figura 23 - Resposta da Fundação para Vários Tipos de Edificações .....	75
Figura 24 - Configuração de Testes para Medição da Mobilidade de Transferência .....	76
Figura 25 - Equipamentos Requeridos para Teste de Campo e Análise Laboratorial ...	78
Figura 26 - Análise da Transferência de Mobilidade.....	80
Figura 27 - Esquema de Transferência de Mobilidade com Uma Linha de Impactos ....	81
Figura 28 – Esquema de Localização dos Transdutores.....	89
Figura 29 – Gráfico Direto do Acelerômetro - Aceleração.....	89
Figura 30 – Gráfico Tratado para Velocidade.....	90
Figura 31 – Espectro da Velocidade de Vibração x Banda de Frequência .....	90
Figura 32 – Esquema de Localização dos Transdutores.....	92
Figura 33 – Gráfico Direto do Acelerômetro - Aceleração.....	93
Figura 34 – Gráfico Tratado para Velocidade.....	93
Figura 35 – Espectro da Velocidade de Vibração x Banda de Frequência.....	94
Figura 36 – Gráfico do Ruído no Tempo .....	94
Figura 37 – Seleção da Passagem do Trem.....	94
Figura 38 – Gráfico de Análise Sonora.....	95
Figura 39 – Curva de Comparação Teórica x Equação Normal .....	100

## **1. INTRODUÇÃO**

A dinâmica que envolve os sistemas de transporte sobre trilhos traz muitos benefícios aos seus usuários e às cidades de um modo geral, porém, acarretam também distúrbios que devem ser avaliados e tratados. Dentro desta problemática propusemos a realizar uma Análise da Situação Atual dos Sistemas Metro-ferroviários com Relação à Mitigação de Ruídos e Vibrações.

### **1.1. OBJETIVO**

Analisar as estratégias, métodos de medição e procedimentos relativos à mitigação de ruídos e vibrações em sistemas metro-ferroviários com vistas ao cumprimento às determinações e parâmetros estabelecidos pelos órgãos governamentais e atendimento às normas e recomendações internacionais.

### **1.2. MOTIVAÇÃO**

A questão ambiental cada vez mais influencia a qualidade de vida das pessoas. O atendimento às normas e a certificação das Empresas como forma de qualificação de seus serviços torna-se primordial para a sobrevivência e a evolução da mesma, isto aliado ao crescente nível de conscientização dos cidadãos faz com que os órgãos governamentais exijam que as Empresas prestadoras de serviços metro-ferroviários se adequem a legislação vigente para continuarem operando. A temática envolvendo ruídos e vibrações oriundas dos sistemas de transporte sobre trilhos cada vez mais preocupa as Empresas operadoras. Neste contexto, aliado à inexistência de procedimentos e equipamentos para determinação dos níveis de ruídos e vibrações emitidos pela passagem dos trens, acreditamos ser uma necessidade patente à análise mais detalhada desta questão.

## **2. FENÔMENO VIBRO-ACUSTICO**

Todo o fenômeno vibro-acústico tem como origem o deslocamento de partículas de fonte emissora que se propagam através de um meio, seja ele sólido ou fluido.

Os fenômenos vibro-acústicos comumente são desassociados em ruídos e vibrações, para que se tenha uma avaliação mais detalhada de cada um destes fenômenos. Nos capítulos a seguir detalharemos cada um deles, com ênfase aos ruídos transmitidos pelo solo e as vibrações oriundas dos veículos de trânsito rápido sobre trilhos.

O ruído e a vibração transmitida pelo solo podem ser uma séria preocupação para vizinhos muito próximos aos sistemas metro-ferroviários ou instalações de manutenção, fazendo com que edificações tremam e sons estrondosos sejam ouvidos. Em contraste com o ruído transmitido pelo ar, o ruído e a vibração transmitida pelo solo não são problemas ambientais comuns. Algumas fontes comuns de ruído e vibração transmitidos pelo solo são trens, ônibus em estradas mal conservadas e atividades de construção como detonações, escavação e operação de equipamentos pesados de remoção de terra.

Os efeitos da vibração transmitida pelo solo incluem movimentos perceptíveis de pisos de edificações, chacoalhar de janelas, tremor de objetos em armários e prateleiras e sons estrondosos; que acabam caracterizando ruídos transmitidos pelo solo. Em casos extremos a vibração pode causar danos em edificações. Danos em edificações não é um fator determinante para projetos de sistemas metro-ferroviários normais, com exceção de ocasionais detonações ou escavações durante a construção. A perturbação originada pela vibração freqüentemente ocorre quando o ruído ou a vibração excede o limiar de percepção humana (U.S. DEPARTMENT...,2006).

## 2.1 RUÍDO

### 2.1.1. Terminologia (RT-1125-MD-001...2006)

Para compreendermos mais sobre os fenômenos relacionados ao ruídos, destacamos alguns tópicos da terminologia relativa ao assunto:

- Decibel: A faixa de pressões sonoras audíveis é muito extensa, variando entre o limiar de audibilidade (cerca de  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ) até o limiar de dor (cerca de  $20 \text{ N/m}^2$ ). Esta faixa de mais de  $10^6 \text{ N/m}^2$  não poderia ser utilizada como escala linear em nenhum instrumento de medição prático, em função da precisão requerida. Sendo assim, optou-se pela utilização do decibel, que é uma escala logarítmica. Por definição, o decibel é uma unidade adimensional que relaciona o logaritmo da razão entre uma quantidade a ser medida e uma quantidade de referência.
- Nível de pressão sonora: O nível de pressão sonora, em dB, é o parâmetro mais utilizado em instrumentos de medição. Sua expressão é dada por :

$$L_p = 20 \log P / P_0$$

onde:  $P$  = pressão sonora a ser medida

$P_0$  = pressão sonora de referência =  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  = limiar audibilidade = 0 dB.

- Faixas de frequência: Nas avaliações de ruído é muito importante conhecer os níveis de pressão sonora por faixas de frequência: quanto maior a precisão desejada, mais estreita será a faixa. Normalmente, é suficiente medir o ruído em bandas de oitava de frequência. Por definição, uma oitava é o intervalo compreendido entre uma frequência e seu dobro. As frequências centrais, em Hz, que definem as bandas de oitava são:  
- 31,5; 63; 125; 250; 500; 1K; 2K; 4K e 8K.



- Escalas de ponderação: Estudos levaram à conclusão de que o ouvido humano não responde igualmente ao espectro sonoro, apresentando grande variação, principalmente nas baixas frequências. Esse fato levou à introdução de curvas de compensação nos instrumentos de medição de som, de modo a simularem o aparelho auditivo. Atualmente, apenas as curvas "A" e "C" são empregadas, com ênfase para a curva "A" na avaliação do ruído ocupacional. A tabela a seguir apresenta as correções que devem ser aplicadas ao espectro para se obter o dB(A).

Freq. (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Corr. (dB)	-39	-26	-16	-9	-3	0	+1	+1	-1

Tabela 1 - Curva "A" de Compensação

#### 2.1.2. Ruído Transmitido pelo Solo

O som causado pela vibração das paredes e piso dos cômodos é chamado ruído transmitido pelo solo. O potencial de perturbação do ruído transmitido pelo solo é usualmente caracterizado com o nível de som da curva "A" de compensação (ponderado) demonstrado acima.

Embora o nível de som da curva "A" de compensação seja quase a única métrica usada para caracterizar o ruído ambiente, existem potenciais problemas quando caracterizamos ruído de baixa frequência usando nível de som da curva "A" de compensação devido a não-linearidade da audição humana que faz sons dominados por componentes de baixa frequência parecer mais altos que a faixa ampla de sons que tem o mesmo nível de som da curva "A" de compensação. O resultado é que o ruído transmitido pelo solo com um nível de 40 dBA soa mais alto que um ruído de faixa ampla. Isto é explicado pela colocação de limite para ruído transmitido pelo solo mais baixo que seria no caso de ruído de faixa ampla.

## 2.2 VIBRAÇÃO

Vibração é um movimento oscilatório que pode ser descrito em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Porque a movimento é oscilatório, não existe movimento líquido do elemento de vibração e a média de qualquer descrição de movimento é zero. Deslocamento é o conceito mais fácil de entender. Para um piso vibrando, o deslocamento é a distância que um ponto do piso move a partir da posição estática. A velocidade representa a rapidez instantânea do movimento do piso. A aceleração é o coeficiente de mudança da velocidade (U.S. DEPARTMENT...,2006).

Embora o deslocamento seja mais fácil de entender que a velocidade ou a aceleração, é raramente usada para descrever a vibração transmitida pelo solo. Muitos transdutores usados para medição de vibração usam qualquer um dos dois, velocidade ou aceleração. Além disso, a resposta de humanos, edificações e equipamentos à vibração é mais precisamente descrita usando velocidade ou aceleração.

Vibração consiste em rápidos movimentos flutuantes com um deslocamento médio de zero. Alguns conceitos podem ser utilizados para quantificar a amplitude de vibração, dos quais três são mostrados na Figura 1. O sinal bruto é a curva mais fina no topo do gráfico. Esta curva mostra a velocidade de vibração instantânea que flutua positiva e negativamente sobre o ponto zero. O pico de velocidade da partícula (Peak Particle Velocity - PPV) é definido como pico máximo instantâneo positivo ou negativo do sinal de vibração. PPV é freqüentemente usado no monitoramento de vibração desde que ele esteja relacionado à tensão que é experimentada pelas edificações (U.S. DEPARTMENT...,2006).

O pico de velocidade da partícula (PPV) é apropriado para avaliação do potencial de danos às edificações, porém não é adequado para avaliar a resposta humana. De um modo geral, o corpo humano responde a uma amplitude de vibração média, visto que a média líquida de um sinal de

vibração é zero, a amplitude raiz quadrada média (rms) é usada para descrever a vibração de amplitude “ajustada” (U.S. DEPARTMENT...,2006).

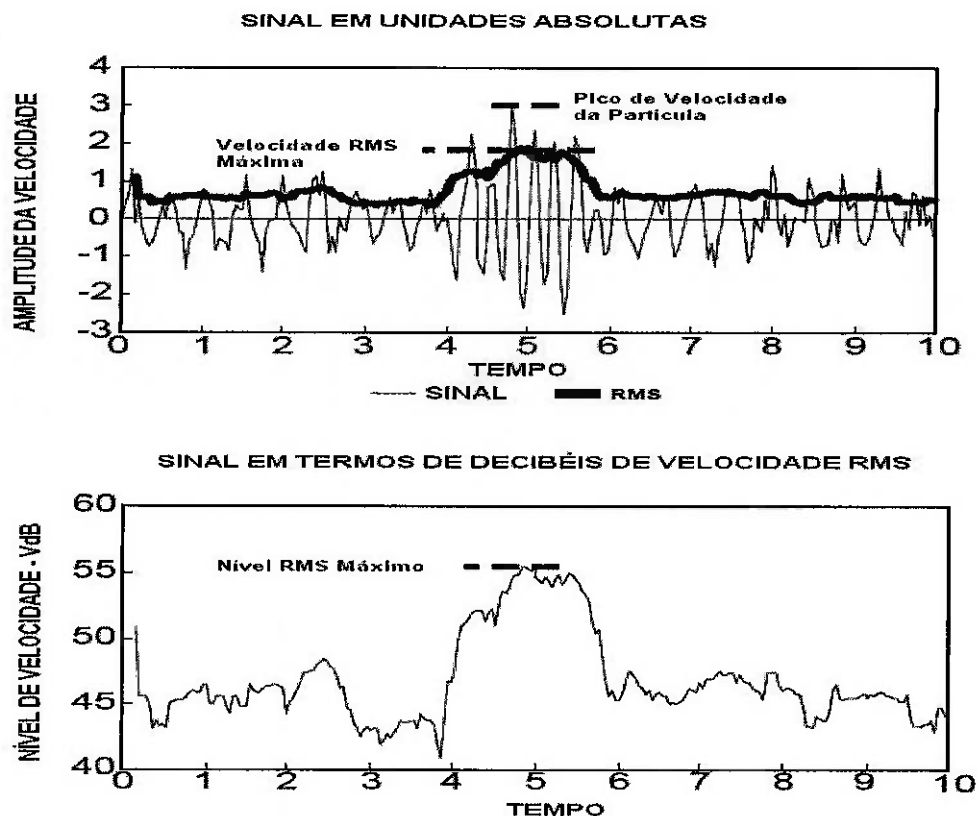


Figura 1 - Diferentes Métodos de Descrição de um Sinal de Vibração (U.S. DEPARTMENT...,2006)

O PPV e a velocidade rms são normalmente descritos em polegadas por segundo nos EUA e metros por segundo no resto do mundo. Embora não seja universalmente aceito, a notação decibel está em uso comum para vibração.

Assim como na medição de ruído, a notação de decibel atua para reduzir a faixa de números requeridos para descrever a vibração. O gráfico inferior da Figura 1 mostra a curva rms do gráfico superior expressa em decibéis. O nível de velocidade de vibração em decibéis é definido como:

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

Onde: "Lv" é o nível de velocidade em decibéis,  
 "v" é a amplitude de velocidade rms, e  
 "vref" é a amplitude de velocidade referência.

A referência deve ser especificada sempre que a quantidade é expressa em termos de decibéis. As quantidades de referência aceitas para velocidade de vibração são  $1 \times 10^{-6}$  polegadas por segundo nos EUA e ou  $1 \times 10^{-8}$  metros por segundo ou  $5 \times 10^{-8}$  metros por segundo no resto do mundo. Por causa das variações nas quantidades referência, é importante ser claro sobre qual quantidade referência está sendo usada sempre que os níveis de velocidades são especificados. Embora não seja uma notação universalmente aceita, a abreviação "VdB" é usada para decibéis de vibração para reduzir o potencial de confusão com decibéis de som.

### **3. VIBRAÇÕES ORIUNDAS DOS SISTEMAS METRO-FERROVIÁRIO**

#### **3.1. CONCEITO**

Muitos são as fontes emissoras de ruídos e vibrações nos sistemas metro-ferroviários, tanto no carro, quanto em sistemas auxiliares, como sistemas de ventilação e escadas rolantes, até as máquinas operatrizes instaladas nas oficinas dos pátios de manobra e manutenção. Nos ateremos às vibrações transmitidas pelas estruturas da via permanente oriundas, basicamente, do contato roda-trilho.

O sistema de via permanente, independentemente do seu método construtivo, transmite ruídos e vibrações, cabendo aos sistemas de amortecimento, que veremos detalhadamente a seguir, manter a transmissibilidade destas vibrações dentro dos parâmetros internacionalmente aceitos e definidos em normas e recomendações registradas sobre o assunto.

Os conceitos básicos de vibração transmitida pelo solo para um sistema de transporte sobre trilhos estão ilustrados na Figura 2. As rodas do trem rolando

nos trilhos criam uma energia de vibração que é transmitida através do sistema fixação dos trilhos para a estrutura. A quantidade de energia que é transmitida para a estrutura depende de fatores tais como desgastes ou deformações das rodas do trem, as frequências de ressonância da suspensão do veículo, o sistema de fixação de trilhos e os sistemas de atenuação da superestrutura da via permanente. Esses, como todos os sistemas mecânicos, têm ressonâncias que resultam em aumento da resposta da vibração em certas frequências, chamadas frequências naturais (U.S. DEPARTMENT...,2006).

A vibração da estrutura excita o solo adjacente, criando ondas de vibração que propagam através de várias camadas de solo e rochas até as fundações das edificações próximas. A vibração propaga para o restante da fundação e para o resto da estrutura da edificação. A máxima amplitude de vibração dos pisos e paredes da edificação freqüentemente estará na frequência de ressonância dos vários componentes da edificação.



Figura 2 – Exemplificação da Propagação da Vibração

### 3.2. ESTADO DA ARTE

Atualmente o Metrô-SP utiliza-se de alguns sistemas de amortecimento de ruídos e vibrações nos sistemas de via permanente. Porém, em construções menos recentes estes sistemas resumiram-se na instalação de placas de apoio vulcanizadas ou dormentes sobre lastro.

Com o avanço da tecnologia e o aumento das exigências ambientais, o Metrô-SP teve que mudar a concepção dos sistemas de amortecimento de ruídos e vibrações aplicados à via permanente, dependendo das construções lindeiras e suas exigências relativas ao tipo de utilização destas edificações. Ocorre que nas construções anteriores a este tipo de análise temos tido diversas manifestações de ocupantes de imóveis lindeiros registrando o desconforto com relação a ruídos e vibrações oriundos da passagem dos trens.

Para os casos de reclamações em linhas operacionais, como abordado acima, que são caracterizados como problemas de manutenção, com objetivo de comprovar as reclamações dos lindeiros com vistas à tomada de providências no intuito de minimizar os ruídos e vibrações, a cada reclamação é agendada uma visita no imóvel de tal sorte que os técnicos do Metrô-SP, ainda que de uma forma subjetiva, possam julgar as condições do imóvel e recomendar, caso seja necessário, medições com emissão de laudo para se comprovar os níveis de ruídos e vibrações provenientes do tráfego de trens. Caso estas medições apontem para níveis acima dos definidos em normas e recomendações internacionais, obriga ao Metrô-SP a tomar uma ação corretiva para mitigar o ruído e ou vibração na região.

Este tipo de procedimento pode ser avaliado sob vários pontos de vista, porém destacamos dois deles:

1- Econômico: neste âmbito de análise podemos afirmar que este procedimento torna-se dispendioso em função de que a cada nova avaliação se gera um novo contrato para medição de ruídos e vibrações, sem contar o

custo de mão de obra dos técnicos do Metrô-SP investidos nas visitas aos lindeiros.

2- Atendimento ao Cliente: nos programas de qualidade implantados no Metrô-SP tem-se por princípio o atendimento aos clientes em primeiro lugar, seja ele interno ou externo. No atendimento aos clientes que registram suas reclamações de ruídos e vibrações advindos da operação dos sistemas Metro-ferroviários, em alguns casos, é colocado sob suspeita à capacidade e competência dos técnicos do Metrô-SP, gerando uma perda de credibilidade da empresa e caso tenha que se licitar um contrato para medição, o tempo e a quantidade de visitas realizadas ao imóvel passam ser aspectos de descontentamento por parte do proprietário.

Para se evitar este tipo de problema cada vez mais o Metrô-SP tem investido em pesquisa de novos sistemas de amortecimento, principalmente no âmbito do projeto do sistema, haja vista, que qualquer outra forma de mitigação de ruído e vibração após a construção da via fica altamente dispendioso no campo financeiro.

#### **4. SISTEMAS DE AMORTECIMENTO**

Existem alguns sistemas de amortecimentos conhecidos e comumente aplicados a sistemas metro-ferroviários, dentre os quais podemos destacar:

##### **4.1. SISTEMA DE ATENUAÇÃO PELA FIXAÇÃO DOS TRILHOS**

Existem sistemas de atenuação de ruídos e vibrações que utilizam a própria fixação dos trilhos para esta finalidade. Estes sistemas, ditos resilientes, são assim chamados por sua característica principal de se deformarem sempre numa zona elástica, não perdendo suas propriedades amortecedoras. Para cada tipo de material existe uma vida útil prevista, porém, temos casos no Metrô-SP de placas vulcanizadas instaladas desde sua inauguração.

Outra característica importante deste tipo de sistema é que ele pode ser instalado ou substituído mesmo com o sistema metro-ferroviário em funcionamento, dentro de intervalos de manutenção.

Os sistemas que utilizam a fixação dos trilhos para atenuar os ruídos e vibrações são, geralmente, utilizados para absorver pequenos níveis vibrações. A seguir detalharemos as características de alguns destes sistemas.

#### 4.1.1. Placas Vulcanizadas

As placas vulcanizadas consistem na utilização de uma material metálico – placa base, e um composto de polímeros, geralmente borracha, aderido à placa base.

As placas vulcanizadas são utilizadas há muito tempo para fins de amortecimento e são amplamente conhecidas no meio metro-ferroviário.

A seguir apresentamos alguns tipos de placas vulcanizadas:



Figura 3 – Placa Vulcanizada Tipo Landis



#### 4.1.2. Palmilhas

As palmilhas de materiais resilientes podem ser aplicadas sob as placas de fixação dos trilhos e até mesmo sob os próprios trilhos.

Como existe uma gama enorme de polímeros que possuem características resilientes, também existe uma grande quantidade de palmilhas no mercado utilizadas para amortecimento e mitigação dos ruídos e vibrações. Para cada aplicação específica deve a ser utilizado um tipo de palmilha também específica.

A seguir apresentamos alguns tipos de palmilhas resilientes:

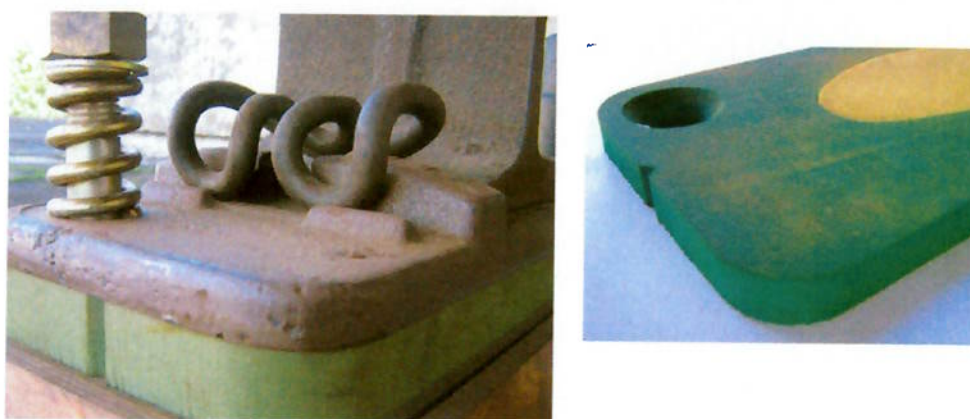


Figura 4 – Palmilha Amortecedoras Tipo Silomer



Figura 5 – Palmilha Amortecedoras Tipo Pandrol

## 4.2. SISTEMAS MASSA MOLA

Os sistemas de amortecimento do tipo massa mola são constituídos, como o próprio nome diz, por uma "massa" (laje e material rodante) e uma "mola" (material destinado à absorção e dissipação da energia). Este é o tipo de conceito mais utilizado atualmente e pode se apresentar de várias formas, porém, mantendo a mesma teoria em sua aplicação.

A disposição típica de um sistema massa mola é demonstrada a seguir:

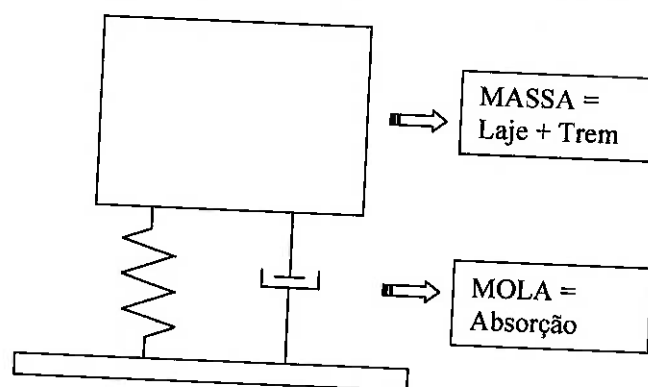


Figura 6 – Sistema Massa Mola - Conceito

Os sistemas massa mola podem assumir diversos formatos, como veremos a seguir:

### 4.2.1. Apoios Discretos

Utiliza-se de uma formação da laje de fundo do túnel como base, apoiando discretamente a laje flutuante sob os trilhos. Os materiais utilizados como apoio discreto podem ser desde poliuretano e seus derivados até materiais compostos por borracha e cortiça.

Um exemplo de apoio discreto é um composto de material micro celular, incorporando dois componentes básicos:

- componente de matriz elastomérica, que permite determinar a rigidez e as características de resistência. Os elastômeros utilizados normalmente são borracha natural, nitrílicas, neoprene, etc.
- Material de enchimento ativo, que permite controlar o amortecimento mecânico interno ao material. Este material é do tipo micro celular, de alta resistência selecionado de acordo com as características de granulometria, porosidade interna, densidade e resistência a compressão.

A mistura destes dois componentes resulta na obtenção de um material antivibratório, que apresenta um comportamento dinâmico melhorado, quando comparado com o material base, e constante num largo espectro de cargas e frequências.

As principais características mecânicas, elásticas e dinâmicas são:

- frequência de ressonância
- rigidez dinâmica
- rigidez estática
- fluência (Creep)

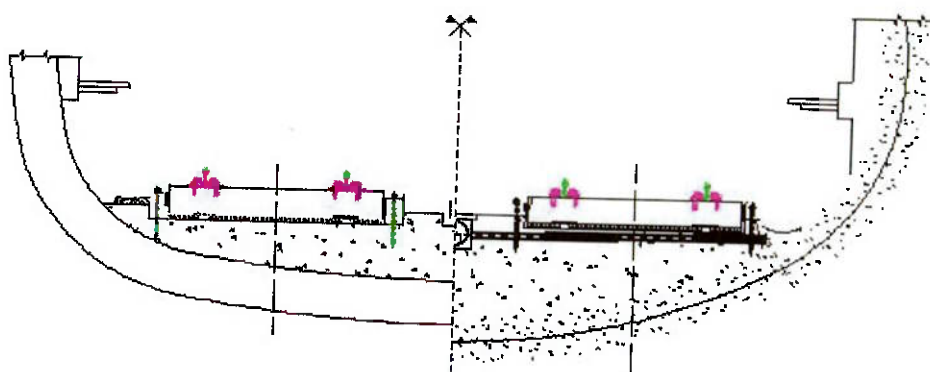


Figura 7 – Seção Transversal do Túnel com Massa Mola Apios Discretos

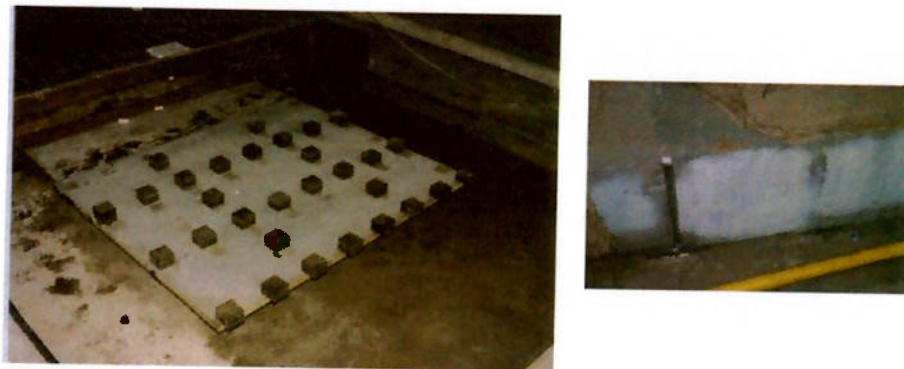


Figura 8 – Detalhes da Montagem do Massa Mola Apios Discretos

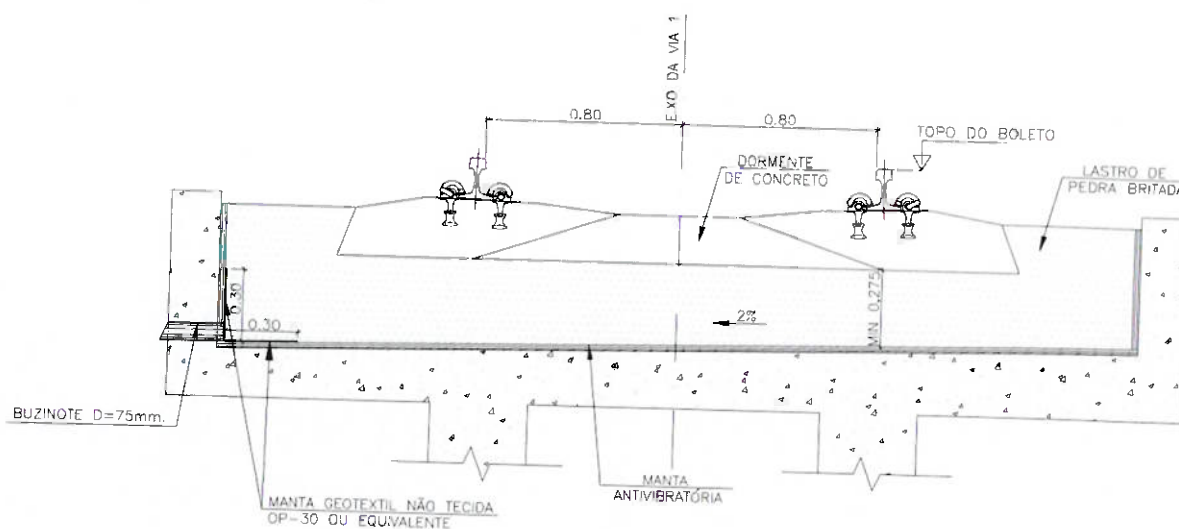
#### 4.2.2. Mantas

As mantas elastoméricas utilizam o mesmo princípio do apoio discreto, porém, ocupa todo espaço compreendido ente a laje de fundo e a laje flutuante.



Figura 9 – Detatalhe da Manta Sob Laje Flutuante

Este tipo de sistema também pode ser utilizado em vias assentadas sobre lastro, tendo a configuração abaixo como um típico sistema de atenuação de vibração.



**Figura 10 – Manta Elastomérica Antivibratória Sob Lastro**



**Figura 11 – Manta Elastomérica Antivibratória Sob Lastro**

#### 4.2.3. Sistemas Isoamortecedores

Dos sistemas apresentados até aqui e já aplicados no Metrô-SP, os sistemas de atenuação do tipo isoamortecedores são os que obtiveram os melhores resultados na atenuação dos ruídos e vibrações transmitidos pelo solo.



O conceito utilizado é o apoio da laje flutuante sobre molas helicoidais submersas numa massa viscosa. Esta montagem confere ao sistema uma atenuação das vibrações, bem como a atenuação do ruído secundário gerado pelo sistema com a passagem dos trens (GERB,..., 1994).

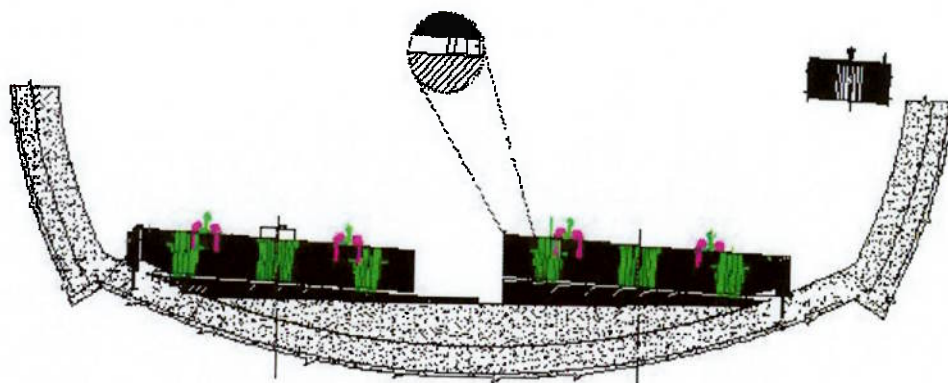


Figura 12 – Secção Transversal do Túnel com Massa Mola Isoamortecedores



Figura 13 – Disposição dos Isoamortecedores ao Longo da Via



Figura 14 – Detalhes dos Elementos Isoamortecedores (GERB,...., 1994).

## **5. CONCEITUAÇÃO METODOLÓGICA (U.S. DEPARTMENT...,2006)**

O conceito de metodologia adotada neste estudo se baseia na FTA – Federal Transit Administration que regulamenta o transporte de carga e passageiro nos Estados Unidos da América e possui uma recomendação específica para os critérios relativos aos ruídos e vibrações oriundas dos veículos de transporte. Cumpre dizer, que no caso de transporte metro-ferroviário, a questão mais amplamente discutida é a vibração, tendo em vista que a maioria das instalações, por concepção, são subterrâneas, portanto, se elimina a questão do ruído aéreo como um item de desconforto para os

imóveis lindeiros às instalações de metrô, porém, o que comumente é relatado em reclamações é o ruído advindo da vibração, denominado ruído secundário. A seguir demonstraremos os critérios e procedimentos que baseiam a metodologia adotada para a questão da vibração e conseqüentemente para o ruído secundário.

#### 5.1. PERCEPÇÃO HUMANA PARA VIBRAÇÕES E RUÍDOS TRANSMITIDOS PELO SOLO

Mostraremos um panorama geral sobre resposta humana para diferentes níveis de vibração de edificações.

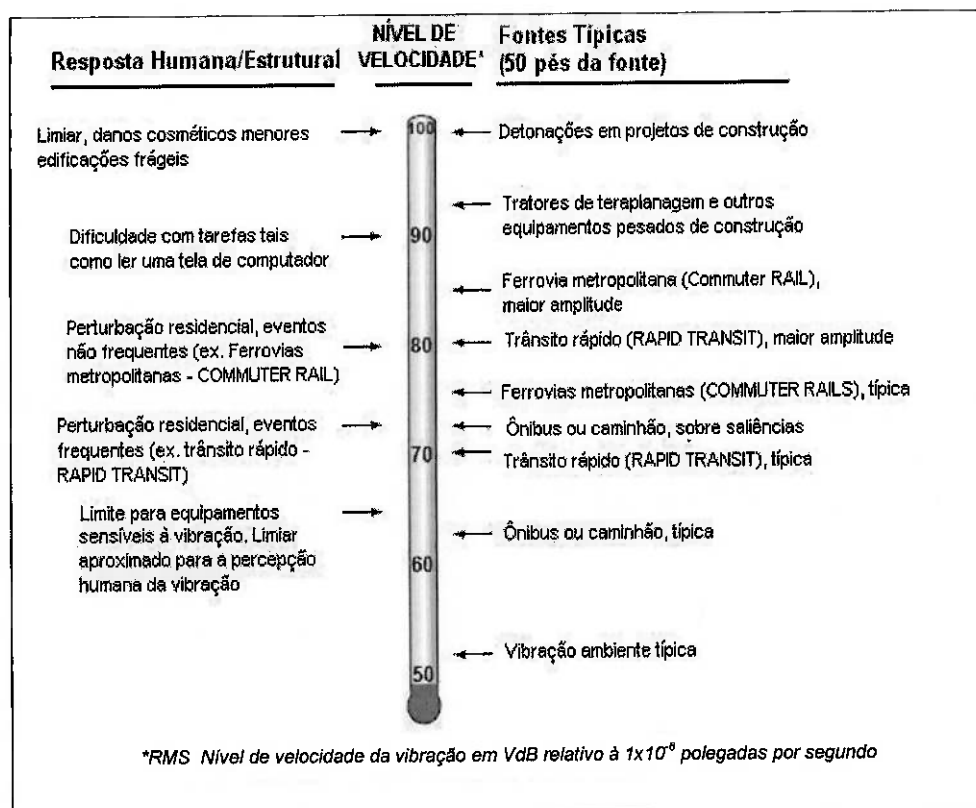
##### 5.1.1. Níveis Típicos para Ruído e Vibração Transmitidos pelo Solo

A figura 15 ilustra fontes comuns de vibração e a resposta humana e estrutural à vibração transmitida pelo solo. A faixa de interesse é aproximadamente de 50VdB a 100VdB. A vibração de fundo (ambiente) é normalmente abaixo do limiar de percepção humana e é preocupante somente quando a vibração afeta equipamentos de fabricação ou de pesquisa sensíveis.

Embora o limiar de percepção seja cerca de 65VdB, a resposta humana à vibração normalmente não é significativa, a menos que a vibração exceda 70VdB.

Sistemas de transporte sobre trilhos tipicamente geram níveis de vibração de 70VdB ou mais, isto próximo aos trilhos. Se existem trilhos e rodas desgastadas ou deformadas, condições geológicas que promovam eficiente propagação da vibração, ou veículos com sistema de suspensão muito rígida, os níveis de vibração de qualquer fonte podem ser 10 decibéis mais alto que o típico. Por isso, a uma distância de 15 metros a mais alta amplitude para vibração em metrô é cerca de 80 VdB e a alta amplitude para vibração em sistemas ferroviários é 85VdB.





**Figura 15 - Níveis Típicos de Vibração Transmitida pelo Solo**

A relação entre a vibração transmitida pelo solo e o ruído transmitido pelo solo depende do conteúdo da vibração e da absorção acústica do espaço receptor. Quanto maior a absorção acústica, menor será o nível de ruído. A Tabela 2 descreve a resposta humana a diferentes níveis de vibração e ruídos transmitidos pelo solo. A primeira coluna é o nível de velocidade da vibração, e as próximas duas colunas são para o nível de ruído correspondente, assumindo que o espectro de vibração culmina em 30Hz ou 60Hz. O nível de ruído da curva "A" de compensação será aproximadamente 40 dB a menos que o nível de velocidade da vibração se o pico do espectro for por volta de 60 Hz. A tabela 2 ilustra que alcançando só um dos parâmetros, nível de vibração aceitável ou nível de ruído aceitável não garante que o outro será aceitável. Por exemplo, o ruído causado pela vibração de componentes estruturais pode ser muito perturbador ainda que a vibração não possa ser sentida. Alternativamente, uma vibração de baixa frequência pode ser perturbadora enquanto o ruído transmitido pelo solo que ela gera seja aceitável.

Nível de velocidade da Vibração	Nível de Ruído		Resposta Humana
	Baixa Frequência 1	Média Frequência 2	
65 VdB	25 dBA	40 dBA	O limiar de percepção aproximado para muitos humanos. Sons de baixa frequência normalmente inaudíveis, sons de média frequência excessivos para áreas de descanso (dormir).
75 VdB	35 dBA	50 dBA	Linha divisória aproximada entre pouco perceptível e distintamente perceptível. Muitas pessoas acham a vibração do trânsito a esse nível perturbante. Ruído de baixa frequência aceitável para áreas de repouso, ruído de média frequência perturbador em muitas áreas pouco ocupadas (sossegadas).
85 VdB	45 dBA	60 dBA	Vibração aceitável somente se existe um número não frequente de eventos por dia. Ruído de baixa frequência perturbador para áreas de repouso, ruído de média frequência perturbador mesmo para eventos não frequentes com uso de terrenos institucionais, tais como escolas e igrejas.
Notas: 1. Nível de ruído aproximado quando o pico do espectro de vibração é próximo a 30 Hz 2. Nível de ruído aproximado quando o pico do espectro de vibração é próximo a 60 Hz			

**Tabela 2 - Resposta Humana a Diferentes níveis de Ruído e Vibração.**

#### 5.1.2. Fatores que Influenciam a Vibração e o Ruído Transmitidos pelo Solo

A Tabela 3 é um resumo de alguns dos muitos fatores que são conhecidos ou são suspeitos de ter influência significativa nos níveis de ruído e vibração transmitidos pelo solo. Como indicado, os parâmetros físicos das instalações dos meios de transportes, a geologia e a edificação receptora, todos influenciam nos níveis de vibração. Os parâmetros físicos importantes podem ser divididos em quatro categorias:

- Fatores do veículo e operacionais: Inclui todos os parâmetros relacionados a veículo e operação de trens. Fatores como alta velocidade, suspensões primárias rígidas no veículo, e rodas desgastadas ou deformadas, poderão aumentar a possibilidade de problemas originados pela vibração transmitida pelo solo.

- **Vias:** O tipo e a condição dos trilhos, o tipo de via, o sistema de fixação dos trilhos, a massa e a rigidez da estrutura da via terão todos uma influência sobre o nível de vibração transmitida pelo solo. Trilhos desgastados, e impactos das rodas em trabalhos especiais feitos nos trilhos podem causar um aumento substancial na vibração transmitida pelo solo. Um sistema ferroviário de vias pode ser ou subterrâneo, na superfície ou elevado. É raro que vibração transmitida pelo solo seja um problema em vias ferroviárias elevadas, exceto quando os suportes da via estão localizados dentro do limite de 15 metros da edificação. Para vias na superfície, o ruído diretamente irradiado é normalmente o problema dominante, embora a vibração possa ser um problema dependendo da superestrutura de via adotada. Para as vias subterrâneas, a vibração transmitida pelo solo é freqüentemente um dos mais importantes problemas ambientais.
- **Geologia:** As condições do solo e da superfície são conhecidas por terem uma forte influência nos níveis de vibração transmitida pelo solo. Entre os fatores mais importantes estão a rigidez e o amortecimento interno do solo e a profundidade da camada (leito) de rochas. A experiência com vibração transmitida pelo solo é que a propagação da vibração é mais eficiente em solos argilosos e rígidos, e rochas pouco profundas parecem concentrar a energia de vibração perto da superfície, o que pode resultar em problemas com a vibração transmitida pelo solo a grandes distâncias dos trilhos. Fatores como o assentamento das camadas do solo e a profundidade do lençol de água podem ter efeitos significantes na propagação da vibração transmitida pelo solo.
- **Edificação Receptora:** A edificação receptora é uma componente chave na avaliação da vibração transmitida pelo solo desde que os problemas de vibração transmitida pelo solo ocorram quase exclusivamente dentro da edificação. A vibração do trem pode ser perceptível para pessoas que estão do lado de fora, mas é muito raro que de fora cause reclamações. Os níveis de vibração dentro de uma edificação são dependentes da energia da vibração que alcança a fundação da edificação, o acoplamento

da fundação da edificação com o solo, e a propagação da vibração através da edificação. Quanto mais espessa uma edificação é, mais baixa será a resposta para a energia vibração incidente.

<b>Fatores Relacionados com a Fonte de Vibração</b>	
<b>Fator</b>	<b>Influência</b>
Suspensão do Veículo	Se a suspensão é rígida na direção vertical, as forças de vibração efetiva serão mais altas. Em carros de transporte ferroviário, somente a suspensão primária afeta os níveis de vibração, a suspensão secundária que sustenta o corpo do carro não tem efeito aparente.
Tipo e Condição das Rodas	Rodas elásticas (resilientes) normais em sistemas ferroviários de transporte normalmente são rígidas demais para proporcionar uma redução significativa da vibração. Rodas deformadas e rodas desgastadas são as principais causa de vibração originada de sistemas ferroviários rodas de aço/trilhos de aço.
Superfície dos Trilhos	Os trilhos desgastados são freqüentemente a causa de problemas com vibração. Mantendo a superfície lisa, aplainada, os níveis de vibração reduzirão.
Sistema de Fixação dos Trilhos	Em sistemas ferroviários, o sistema de fixação dos trilhos é um dos principais componentes na determinação dos níveis de vibração transmitida pelo solo. Os mais altos níveis de vibração são criados por um trilho que é rigidamente fixado a um "dormente" de concreto. Os níveis de vibração são muito mais baixos nos sistemas de trilhos com controle especial de vibração como cliques elásticos (resilientes), lastro e lajes flutuantes.
Velocidade	Como intuitivamente esperado, velocidades mais altas resultam em mais altos níveis de vibração. Duplicar a velocidade normalmente resulta em um aumento de 4 a 6 decibéis no nível da vibração.
Estrutura	A regra geral é que quanto mais pesada a estrutura, menores serão os níveis de vibração. O nível de vibração de um túnel perfurado leve será normalmente mais alto que o de uma caixa subterrânea de concreto vazada.
Profundidade da Fonte de Vibração	Existem diferenças significantes nas características da vibração quando a fonte é subterrânea, comparada ao nível da superfície.

<b>Fatores Relacionados à Trajetória da Vibração</b>	
<b>Fator</b>	<b>Influência</b>
Tipo de Solo	Os níveis de vibração geralmente são mais altos em solos rígidos tipo argila que em solos arenosos.
Camadas de Rochas	Os níveis de vibração são normalmente altos perto de trilhos de superfície quando a profundidade da camada (leito) de rochas é de 9 metros ou menos. Passagens subterrâneas fundadas (com fundação) em rochas resultarão em amplitudes de vibração mais baixas perto da passagem subterrânea. Por causa da propagação eficiente, o nível de vibração não atenua tão rapidamente em rocha como acontece no solo.
Assentamento das Camadas do Solo	O assentamento das camadas do solo terá uma substancial, mas imprevisível, efeito nos níveis de vibração visto que cada extrato pode ter características dinâmicas significativamente diferentes.
Profundidade do Lençol de Água	A presença de um lençol freático pode ter um efeito significativo na vibração transmitida pelo solo, mas não foi estabelecida uma relação definitiva.

<b>Fatores Relacionados ao Receptor da Vibração</b>	
<b>Fator</b>	<b>Influência</b>
Tipo da Fundação	A regra geral é que quanto mais pesada for a fundação da edificação, maior a perda de acoplamento e como a vibração propaga do solo para dentro da edificação.
Construção da Edificação	Visto que a vibração e o ruído transmitidos pelo solo são quase sempre avaliados em termos de receptores internos (de dentro da edificação), a propagação da vibração através da edificação deve ser considerada. Cada edificação tem diferentes características relativas à vibração transmitida pela estrutura, embora a regra geral é: quanto mais maciça a edificação, mais baixos são os níveis de vibração transmitida pelo solo.
Absorção Acústica	A quantidade de absorção acústica no cômodo receptor afeta os níveis de ruídos transmitidos pelo solo.

**Tabela 3 - Fatores que Influenciam os Níveis de Ruído e Vibração**

## 5.2. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

Comumente vemos pesquisas sobre a resposta humana à vibração de edificações e ruído transmitido pela estrutura. Contudo, com a construção de novos sistemas metro-ferroviários nos últimos 30 anos, tem sido obtida uma experiência considerável no que diz respeito às reações das pessoas aos vários níveis de vibração das edificações. Esta experiência, combinada com as normas nacionais e internacionais disponíveis, representa bons fundamentos para predição de perturbações originadas por ruído e vibração transmitidos pelo solo em áreas residenciais bem como interferências em atividades sensíveis à vibração.

Os critérios de avaliação para impacto ambiental de ruído e vibração transmitidos pelo solo são baseados nos máximos níveis de vibração (rms) para eventos repetidos da mesma fonte.

Os critérios apresentados na Tabela 4 levam em consideração a variação nos tipos de projetos bem como a frequência dos eventos, que diferem muito entre os projetos de transporte. Os critérios estão fundamentalmente baseados em experiências com operações de trens de passageiros. A similaridade nas operações de trens de subúrbio de passageiros e metrô, é que ambos criam eventos de vibração que duram menos que cerca de 10 segundos.

### 5.2.1. Categorias de Vibração Relativa a Sensibilidade da Edificação

Os critérios para uma vibração transmitida pelo solo aceitável estão expressos em termos de níveis de velocidade rms em decibéis e os critérios para ruído transmitido pelo solo aceitável estão expressos em termos de nível de som da curva "A" de compensação. Os limites estão especificados para três categorias de uso de locais definidas abaixo:

- Categoria de Vibração 1 – Alta Sensibilidade: Nesta categoria estão incluídas as edificações onde a vibração poderia interferir em operações

realizadas dentro das mesmas, incluindo níveis que podem estar bem abaixo dos associados à perturbação humana. Salas de Concertos e outras instalações de uso especial são abordadas separadamente na Tabela 4. Os usos típicos de locais abrangidos por esta categoria são: atividades de pesquisas e fabricação sensíveis à vibração, hospitais com equipamentos sensíveis à vibração, e atividades de pesquisa nas universidades. O grau de sensibilidade à vibração dependerá dos equipamentos específicos que serão afetados pela vibração, e mesmo microscópios ópticos normais poderão ser algumas vezes ter o seu uso dificultado quando a vibração está bem abaixo do nível de perturbação humana.

- **Categoria de Vibração 2 – Residencial:** Esta categoria cobre todos os usos de locais residenciais e qualquer edificação tais como hotéis e hospitais. Nenhuma diferenciação é feita entre os diferentes tipos de áreas residenciais. Isso é principalmente por causa da vibração e do ruído transmitidos pelo solo serem experimentados do lado de dentro e os ocupantes da edificação ter praticamente nenhum meio de reduzir a sua exposição. Os critérios aplicam-se para a vibração e os ruídos transmitidos pelo solo quer a fonte seja trens operando no subterrâneo ou na superfície. O tráfego nas ruas frequentemente reduz à noite quando os meios de transporte públicos continuam a operar. Portanto, um ocupante de um quarto em uma área urbana tranquila é tão passível de ser exposto à vibração e aos ruídos transmitidos pelo solo quanto alguém em uma área urbana ruidosa.
- **Categoria de Vibração 3 – Institucional:** A categoria de Vibração 3 inclui escolas, igrejas, outras instituições que não têm equipamentos sensíveis à vibração, mas continuam tendo o potencial para interferência nas atividades. Embora geralmente se inclua edifícios de escritórios nesta categoria, não é apropriado incluir todas as edificações que tenham algum espaço de escritórios. Por exemplo, muitas edificações industriais têm espaços de escritórios, mas isso não quer dizer que edificações fundamentalmente de uso industrial sejam incluídas nesta categoria.

Categoria de Uso do Local	Níveis de Impacto (Vibração) (VdB ref. 1micro-pol/s)			Níveis de Impacto (Ruído) (dB ref. 20 micro Pascal)		
	Eventos Frequentes <sup>1</sup>	Eventos Ocasionais <sup>2</sup>	Eventos não frequentes <sup>3</sup>	Eventos Frequentes <sup>1</sup>	Eventos Ocasionais <sup>2</sup>	Eventos não frequentes <sup>3</sup>
<b>Categoria 1:</b> Alta Sensibilidade.	65 VdB <sup>4</sup>	65 VdB <sup>4</sup>	65 VdB <sup>4</sup>	N/A <sup>4</sup>	N/A <sup>4</sup>	N/A <sup>4</sup>
<b>Categoria 2:</b> Residências e Edificações.	72 VdB	75 VdB	80 VdB	35 dBA	38dBA	43 dBA
<b>Categoria 3:</b> Usos Institucionais	75 VdB	78 VdB	83 VdB	40 dBA	43 dBA	48 dBA
<b>Notas:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "Eventos Frequentes" são definidos como mais que 70 eventos de vibração da mesma fonte por dia. As maiorias dos projetos se encaixarão nessa categoria.</li> <li>2. "Eventos Ocasionais" são definidos como entre 30 e 70 eventos de vibração da mesma fonte por dia.</li> <li>3. "Eventos não frequentes" são definidos como menos de 30 eventos do mesmo tipo por dia.</li> <li>4. Este critério limite é baseado nos níveis que são aceitáveis para a maioria dos equipamentos moderadamente sensíveis, como microscópios ópticos. Fabricação ou pesquisas sensíveis à vibração irão requerer uma avaliação detalhada para definir os níveis de vibração aceitáveis.</li> <li>5. Equipamentos sensíveis à vibração geralmente não são sensíveis ao ruído transmitido pelo solo.</li> </ol>						

**Tabela 4 - Critérios de Impacto para Avaliação Geral**

Salas de Concerto, estúdios de TV e gravações, e Salas de Teatro que podem ser muito sensíveis à vibração e ao ruído, mas não se enquadram em nenhuma das três categorias. Por causa da sensibilidade dessas edificações, elas normalmente justificam a atenção especial durante a avaliação ambiental de um projeto de trânsito. A Tabela 5 apresenta critérios para os níveis aceitáveis de vibrações e ruídos transmitidos pelo solo para vários tipos de edificações especiais.



Tipo de Edificação ou Sala	Níveis de Impacto de Vibração Transmitida pelo Solo (VdB ref. 1micro-pol/s)		Níveis de Impacto de Ruído Transmitido pelo Solo (dB ref. 20 micro Pascal)	
	Eventos Frequentes <sup>1</sup>	Eventos Ocasionais ou Eventos não frequentes <sup>2</sup>	Eventos Frequentes <sup>1</sup>	Eventos Ocasionais ou Eventos não frequentes <sup>2</sup>
Salas de Concerto	65 VdB	65 VdB	25 dBA	25 dBA
Estúdios de TV	65 VdB	65 VdB	25 dBA	25 dBA
Estúdios de Gravação	65 VdB	65 VdB	25 dBA	25 dBA
Auditórios	72 VdB	80 VdB	30 dBA	38 dBA
Salas de Teatros	72 VdB	80 VdB	35 dBA	43 dBA
<b>Notas:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "Eventos Frequentes" são definidos como mais de 70 eventos de vibração da mesma fonte por dia. As maiorias dos projetos se encaixarão nessa categoria.</li> <li>2. "Eventos Ocasionais ou Não-Frequentes" são definidos menos que 70 eventos de vibração da mesma fonte por dia.</li> <li>3. Se a edificação raramente estará ocupada quando os trens estiverem operando, não existe necessidade de considerar os impactos.</li> </ol>				

**Tabela 5 - Critérios de Impacto para Edificações Especiais.**

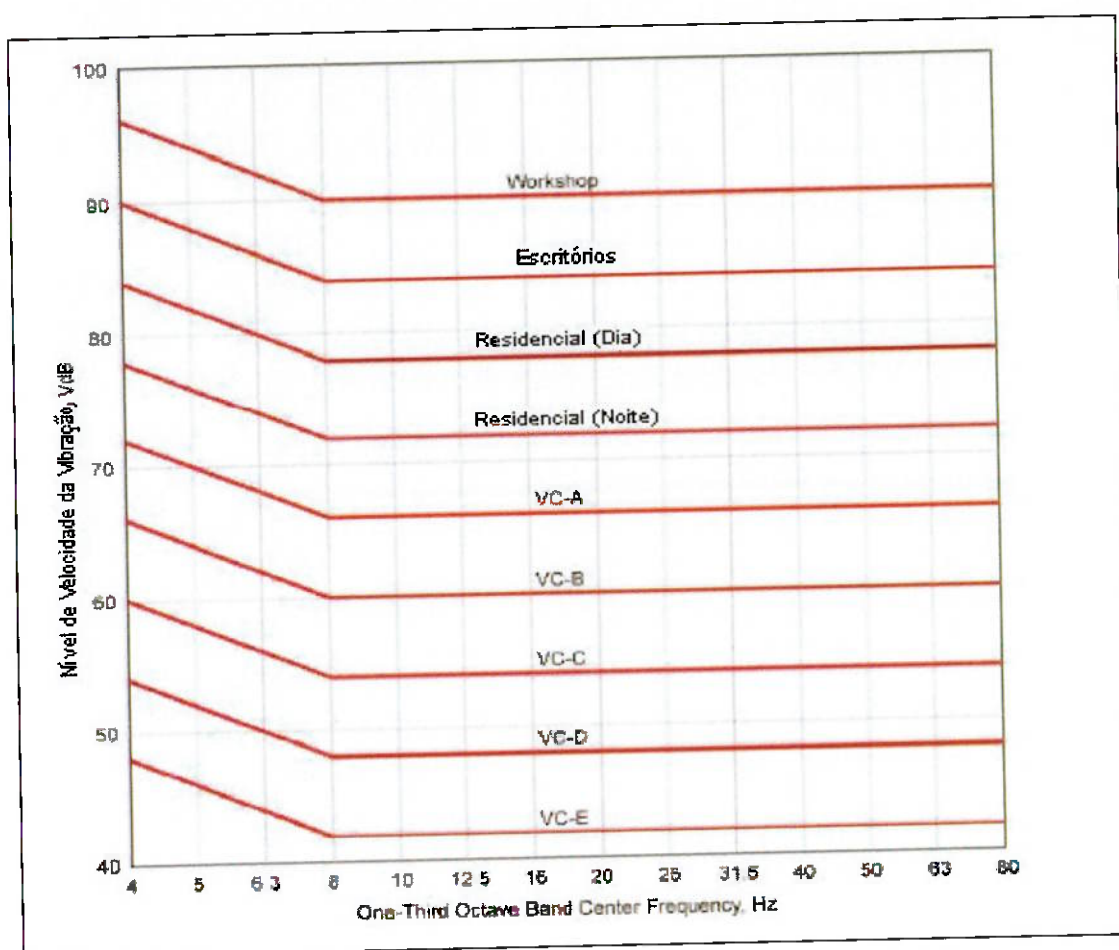
Os critérios das Tabelas 4 e 5 estão relacionados à vibração transmitida pelo solo causando perturbação humana ou interferindo no uso de equipamentos sensíveis à vibração. É raro que a vibração originada da operação de trens cause qualquer tipo de dano à edificação, mesmo danos superficiais de menor importância. Contudo, existe preocupação sobre danos causados em frágeis edificações históricas localizadas próximo da via. Mesmo nesses casos, os danos são improváveis, exceto quando os trilhos (via) estarão muito próximos da estrutura.

#### 5.2.2. Critérios de Impacto de Vibração Transmitida pelo Solo

As especificações das medidas de mitigação requerem informações mais detalhadas e critérios de impactos mais refinados que os utilizados na Avaliação Geral. A distribuição de frequência, ou o espectro da energia da vibração determinam se as vibrações têm probabilidade de gerar uma resposta significativa em uma edificação ou estrutura receptora. O método de

Análise Detalhada proporciona uma estimativa da resposta da edificação em termos de espectro de frequência de faixa em bandas de terça de oitavas.

Os critérios de impacto de vibração são mostrados na Figura 16 onde as curvas de normas internacionais e as normas industriais são plotados na mesma figura. São apresentadas interpretações dos vários níveis na Tabela 6. Os resultados da Análise Detalhada em níveis de espectros de "bandas de terça de oitavas" que são plotados por cima das curvas mostradas na Figura 16. Os níveis da faixa que excedem uma curva de critério específico indicam a necessidade de mitigação e a amplitude de frequência dentro da qual o tratamento precisa ser efetuado.



**Figura 16 - Critério para Análise de Vibração Detalhada.**

Curva Critério <sup>1</sup>	Máx. $L_v$ (VdB) <sup>2</sup>	Descrição do Uso
Oficinas de trabalho	90	Vibração distintamente perceptível. Apropriada para oficinas de trabalho e áreas não-sensíveis.
Escritórios	84	Vibração perceptível. Apropriada para escritórios e áreas não-sensíveis.
Residencial (Dia)	78	Vibração pouco perceptível. Adequada para equipamentos de computadores e microscópios ópticos de baixa resolução (acima de 20X).
Residencial (Noite), Salas de Operação	72	Vibração não perceptível, mas o ruído transmitido pelo solo pode ser audível dentro de salas tranquilas. Adequadas para microscópios ópticos de média resolução (100X) e outros equipamentos de baixa sensibilidade.
VC-A	66	Adequada para microscópios ópticos de média a alta resolução (400X), balanças de precisão, equilíbrio óptico, e equipamentos especiais similares.
VC-B	60	Adequada para microscópios ópticos de alta resolução (1000X), equipamentos de inspeção e litografia com amplitude de linha de 3 micron.
VC-C	54	Adequada para a maioria dos equipamentos de inspeção e litografia com tamanho de detalhe de 1 micron.
VC-D	48	Adequada para a maioria dos equipamentos, incluindo microscópios eletrônicos operados no limite da sua capacidade.
VC-E	42	A maioria dos critérios de exigência de equipamentos extremamente sensíveis à vibração.

<sup>1</sup> Descritores em curva são aqueles fornecidos pelas Referências 2 e 3.

<sup>2</sup> Como medido em bandas de terça de oitavas de frequência por cima da amplitude de frequência de 8 a 80 Hz

#### Tabela 6 - Interpretação dos Critérios de Vibração para Análise Detalhada

Esses critérios usam um espectro de frequência porque os problemas relacionados à vibração geralmente ocorrem devido às ressonâncias dos componentes estruturais da edificação ou de um equipamento sensível à vibração. A resposta da ressonância é dependente da frequência. Uma Análise Detalhada pode proporcionar uma avaliação que identifica potenciais problemas resultantes das ressonâncias.

Os critérios de vibração detalhados são baseados em casos genéricos quando pessoas estão em pé ou o equipamento está montado no piso na maneira convencional. Conseqüentemente, os critérios são menos estritos em frequências muito baixas abaixo de 8 Hz. Onde uma isolamento da vibração especial tenha sido provida na forma de isoladores pneumáticos, a frequência de ressonância do sistema de isolamento é muito baixa. Consequentemente, nesse caso especial, as curvas podem ser estendidas nas frequências mais baixas.

### 5.3. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DO RUÍDO TRANSMITIDO PELO SOLO

Os impactos do Ruído Transmitido pelo Solo são avaliados com base nos critérios de perturbação humana e interferência em atividades. Os resultados da Análise Detalhada estipulam o espectro de vibração dentro da edificação. Esses espectros de vibração podem ser convertidos para espectro de nível de pressão do som em espaços ocupados usando métodos específicos. Para edificações residenciais, os critérios para aceitabilidade são dados em termos de nível de som da curva "A" de compensação na Tabela 4. Para edificações especiais listadas na Tabela 5, um único nível de valorização pode não ser suficiente para avaliar as interferências nas atividades no estágio de Análise Detalhada. Cada edificação especial pode ter uma especificação única para níveis aceitáveis de ruído. Por exemplo, um estúdio de gravação pode ter exigências estritas para ruído admissível em cada faixa de frequência. Por isso, os critérios de ruído transmitido pelo solo para cada edificação sensível dessa categoria terão que ser determinados fundamentalmente caso a caso.

### 5.4. PROCEDIMENTO PARA MAPEAR VIBRAÇÕES

É utilizado para identificar projetos que tenham pouca possibilidade de criação de impactos adversos significantes. Se o procedimento não identificar nenhuma área problemática, é normalmente seguro eliminar maiores considerações sobre o impacto da vibração na análise ambiental.

#### 5.4.1. Mapeamento das Vibrações

Os procedimentos de mapeamento estão resumidos na Figura 17 em formato de fluxograma. Na sequência está o resumo dos passos:

**Decisão Inicial:** se o projeto inclui algum tipo de veículo com rodas de aço/trilhos de aço, existe potencial para impacto de vibração. Passando diretamente para a avaliação das distâncias de mapeamento.

**Nenhum Impacto (Caixa A):** As decisões no passo 1 conduzem ou para a caixa A, "Nenhum impacto de vibração provável", ou para a caixa B. Chegar à caixa A indica que não é requerida uma análise mais detalhada.

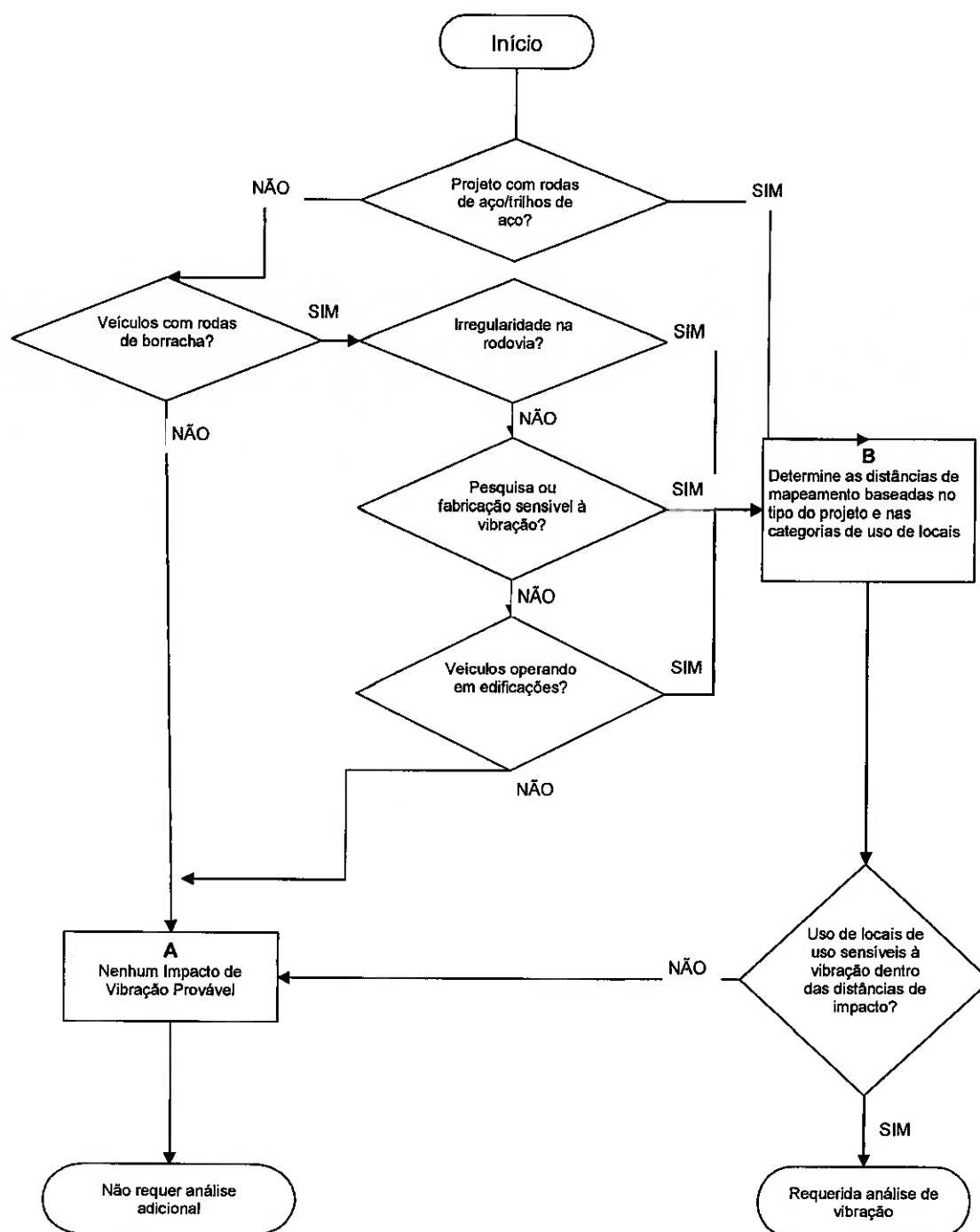
**Mapeando distâncias (Caixa B):** Se o resultado do primeiro passo é que existe potencial para impacto de vibração, determine se algum local de uso sensível à vibração está dentro das zonas mapeadas. Locais de uso sensível à vibração são identificados nas Tabelas 4 e 5. As Tabelas 7 e 8 são usadas para determinar as distâncias de mapeamento da vibração aplicáveis para o projeto.

**Impacto:** Se existe qualquer local de uso sensível à vibração dentro das distâncias mapeadas, existe o potencial para impacto da vibração. O resultado do procedimento de mapeamento é que a Avaliação Geral de Vibração poderia ser dada como parte da análise ambiental.

#### 5.4.2. Mapeando Distâncias

##### 5.4.2.1. Categorias de Projetos

O procedimento de mapeamento da vibração é aplicável para todos os projetos assistidos pela FTA. As categorias de projetos para o procedimento de mapeamento da vibração estão resumidas na Tabela 7 para quatro tipos de transporte ferroviário (sobre trilhos).



**Figura 17 - Fluxograma do Processo de Mapeamento da Vibração.**

Tipo de Projeto	Descrição
1. Ferrovia	Ambos, as locomotivas e os vagões de passageiros, criam vibração significativa. Os mais altos níveis de vibração normalmente são os criados pelas locomotivas. Veículos ferroviários elétricos criam níveis de vibração transmitida pelo solo que são comparáveis com os metrô.
2. Metrô	O impacto da vibração transmitida pelo solo originada de trens de metrô é um dos maiores problemas ambientais para os novos sistemas. Para a operação no subterrâneo, a vibração transmitida pelo solo é usualmente um impacto ambiental significativo. É menos comum que linhas de metrô na superfície e elevadas criem vibração transmitida pelo solo intrusiva.
3. Veículo Leve sobre Trilhos	As características da vibração transmitida pelo solo para de veículos leves sobre trilhos são muito similares àquelas dos metrô. Devido as velocidades deste sistema serem normalmente baixas, os níveis de vibração típicos são normalmente mais baixos.
4. Capacidade Intermediária	Por causa das baixas velocidades de operação de muitos sistemas de capacidade intermediária, problemas significantes de vibração não são comuns. Contudo, estes sistemas com rodas de aço que operam perto de edificações sensíveis à vibração têm o potencial de causar vibração intrusiva. Com o sistema de suspensão rígido, poderia causar vibração intrusiva.

**Tabela 7 - Tipos de Projetos para o Procedimento de Mapeamento da Vibração**

#### 5.4.2.2. Distâncias

As distâncias de mapeamento são dadas na Tabela 8. Estas distâncias são baseadas nos critérios apresentados anteriormente, com um fator de segurança de 5 decibéis incluso. As distâncias foram determinadas usando procedimentos de predição de vibração assumindo uma propagação “normal” da vibração. Uma propagação eficiente da vibração pode resultar em níveis de vibração substancialmente mais altos.

Por causa do fator de segurança de 5 decibéis, mesmo com propagação eficiente, as distâncias de mapeamento identificarão a maioria das áreas potencialmente impactadas. Especificamente por não levar em conta a possibilidade de propagação eficiente da vibração, existe alguma possibilidade que algumas áreas de impacto potencial não sejam identificadas no processo de mapeamento. Quando existem evidências de propagação eficiente, tais como reclamações anteriores sobre instalações existentes ou um histórico de problemas com a vibração de construções, as distâncias da Tabela 8 poderiam ser aumentadas por um fator de 1,5.

Tipo de Projeto	Distâncias Críticas para Categorias de Uso dos Locais*		
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3
Ferrovia	180m	60m	35m
Metrô	180m	60m	35m
Veículo Leve sobre Trilhos	135m	45m	30m
Capacidade Intermediária	60m	30m	15m
* Alguns locais de uso sensível à vibração não estão incluídos nessas categorias. Exemplos são: Salas de Concerto e Estúdios de TV que, para o procedimento de mapeamento, podem ser avaliadas com Categoria 1; Auditórios podem ser avaliados como Categoria 2.			

**Tabela 8. Distâncias de Mapeamento**

## 5.5. ÁBACO DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO

### 5.5.1. Avaliação Geral da Vibração

Os procedimentos que podem ser usados para desenvolver as predições generalizadas de vibração e de ruído transmitidos pelo solo incluindo três diferentes níveis de detalhe para a projeção da vibração transmitida pelo solo são:

- **Mapeamento:** A tabela padrão de distância de impactos é usada para determinar se as vibrações transmitidas pelo solo podem afetar locais de uso sensível às vibrações. São requeridas análises mais detalhadas se qualquer local de uso sensível à vibração está dentro das distâncias de mapeamento. O procedimento de mapeamento não requer nenhum conhecimento específico sobre as características da vibração do sistema ou geologia da área.
- **Avaliação Geral:** É uma extensão do procedimento de mapeamento. Esta avaliação usa dados generalizados para desenvolver uma curva de níveis de vibração em função da distância dos trilhos. Os níveis de vibração em



edificações específicas são estimados através da leitura de valores da curva e efetuando ajustes considerando fatores como o sistema de fixação dos trilhos, a velocidade do veículo, o tipo da edificação, e condições das rodas e dos trilhos. O nível geral trata somente com o nível global de velocidade da vibração e o nível de som da curva "A" de compensação. Ele não considera o espectro de frequência da vibração ou ruído.

- **Análise Detalhada:** A análise detalhada inclui a aplicação de todas as ferramentas disponíveis para projeção precisa do impacto da vibração em locais específicos. O procedimento inclui um teste do veículo (ou de um veículo similar) para definir as forças geradas pela fonte de vibração e testa o local em questão para definir o quanto a geologia do local afeta a propagação da vibração.

É consideravelmente mais complexo desenvolver projeções detalhadas da vibração transmitida pelo solo do que desenvolver projeções detalhadas para ruído transmitido pelo ar. Portanto, predições detalhadas de vibração são usualmente realizadas durante a fase final de planejamento do projeto quando existem motivos suficientes para suspeitar sobre impactos de vibração adversos em decorrência do projeto. O procedimento para Análise Detalhada da Vibração é baseado em medições para caracterizar a propagação da vibração em locais específicos.

Nem sempre existe uma clara distinção entre predições gerais e detalhadas. Por exemplo, é freqüentemente apropriado usar várias medições representativas de propagação da vibração ao longo do traçado planejado no desenvolvimento de curvas de propagação generalizadas. Outras vezes, curvas de predição generalizadas podem ser suficientes para a maioria dos traçados, mas com a Análise Detalhada aplicada a edificações particularmente sensíveis tais como salas de concerto. Os métodos para analisar a vibração são compatíveis com aquelas descritas em reconhecidos manuais e normas internacionais.

A proposta da Avaliação Geral é fornecer um método relativamente simples de desenvolvimento de estimativas para os níveis globais de vibrações e ruídos transmitidos pelo solo que podem ser comparados com o critério de aceitabilidade. Para muitos projetos, particularmente quando comparando alternativas, este nível de detalhes será suficiente para a avaliação de impacto ambiental.

Onde existem problemas potenciais, a Análise Detalhada é então empreendida durante a fase final de planejamento da alternativa selecionada para definir exatamente o nível de impacto e planejar as medidas de mitigação.

A abordagem básica para a Avaliação Geral é definir a curva, ou conjunto de curvas, que prediz a vibração global na superfície do solo em função da distância da fonte, e então efetuar ajustes para essas curvas levando em conta fatores como a velocidade do veículo, o tipo de edificação, e a posição do receptor dentro da edificação e inclui curvas de nível de vibração em função da distância da fonte para os tipos comuns de fontes de vibração como trens e ônibus. Quando o tipo de veículo não é abrangido pelas curvas incluídas nesta seção, será necessário definir uma curva apropriada ou pela extrapolação através das informações existentes ou pela realização de medições em uma instalação existente.

#### 5.5.2. Seleção da Curva Base para o Nível de Vibração

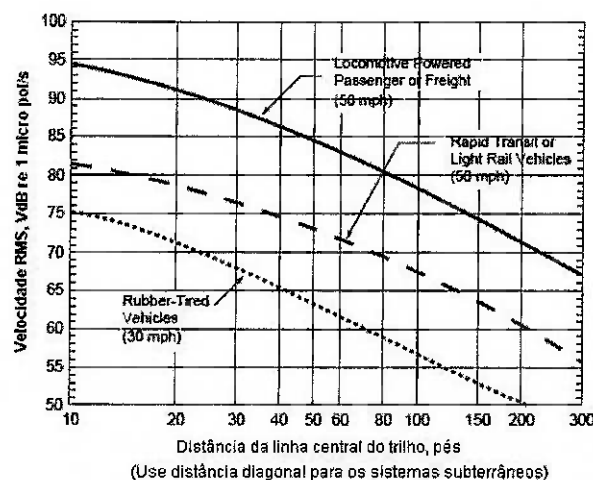
As curvas base para três sistemas de transporte padrão são definidas na Figura 18. Esta figura mostra níveis típicos de vibração na superfície do solo, assumindo equipamentos em boas condições e velocidades de 80km/h para os sistemas de transporte sobre trilhos e 48km/h para ônibus. Os níveis devem ser ajustados levando em conta fatores como velocidades diferentes e condições geológicas diferentes das assumidas.

Sistemas de transporte subterrâneo e no nível da superfície podem ser representados pela mesma curva, mesmo que a vibração transmitida pelo solo criada por um trem operando no subterrâneo tenha características muito diferentes que a vibração dos trilhos no nível da superfície. Contudo, apesar dessas diferenças, os níveis globais de velocidade da vibração são comparáveis. Trilhos subterrâneos tendem a ter mais problemas com vibração que os no nível da superfície devido a dois fatores:

- 1 - Normalmente os caminhos subterrâneos estão localizados em áreas mais densamente desenvolvidas,
- 2 - Para sistemas no nível da superfície o ruído transmitido pelo ar é normalmente um problema mais sério que a vibração transmitida pelo solo.

Outra diferença entre trilhos subterrâneos e no nível da superfície é que a vibração transmitida pelo solo originada por trilhos subterrâneos tende a ter frequência mais alta que a vibração originada por trilhos no nível da superfície, o que faz o ruído transmitido pelo solo mais perceptível.

As curvas na Figura 18 foram desenvolvidas a partir de medições de vibração transmitida pelo solo. A experiência com dados de vibração transmitida pelo solo é que, para qualquer tipo específico de modalidade de transporte, uma significativa variação nos níveis de vibração sob condições aparentemente similares não é incomum. As curvas na Figura 18 representam a mais alta faixa de medição de dados de sistemas mantidos com boa manutenção. Embora os níveis reais flutuem muito, é raro que a vibração transmitida pelo solo exceda as curvas da Figura 18 por um ou dois decibéis, a menos que existam circunstâncias agravantes, tais como defeitos nas rodas ou no curso da superfície.



**Figura 18 - Curvas Generalizadas de Vibração da Superfície do Solo**

Uma proposta para tratar com a flutuação normal é mostrar projeções como uma faixa de tolerância. Por exemplo, o nível projetado pela Figura 18 para um sistema de veículos leves sobre trilhos com a velocidade dos trens de 80km/h é cerca de 72 VdB a uma distância de 18 metros da linha central dos trilhos, exatamente no limiar de vibração transmitida pelo solo aceitável para locais de uso residencial. Para ajudar a ilustrar a flutuação normal, o nível projetado de vibração transmitida pelo solo pode ser dado como de 67 a 72 VdB. Essa proposta não é recomendada, visto que ela tende a confundir a interpretação se os níveis de vibração projetados excedem ou não o limiar de impacto.

Contudo, deve-se ter alguns cuidados ao interpretar projeções porque os níveis reais de vibração transmitida pelo solo algumas vezes diferirão substancialmente das projeções. Algumas diretrizes são dadas abaixo:

- A vibração projetada é abaixo do limiar de impacto. O impacto da vibração é improvável nesse caso.
- A vibração transmitida pelo solo projetada é de 0 a 5 decibéis maior que o limiar de impacto. Nessa faixa existe ainda uma chance significativa de que os níveis reais de vibração transmitida pelo solo estejam abaixo do limiar de impacto.

- A vibração transmitida pelo solo projetada é 5 decibéis ou mais, maior que o limiar de impacto. O impacto da vibração é provável e uma Análise Detalhada será necessária durante a fase final do projeto para ajudar a determinar medidas apropriadas de controle da vibração.

Os dois fatores mais importantes que devem ser levados em conta em uma Avaliação Geral são o tipo da fonte da vibração e as características de propagação da vibração. É bem sabido que existem situações em que a vibração transmitida pelo solo propaga muito mais eficientemente que o normal.

O resultado são níveis de vibração inaceitáveis em distâncias de duas ou três vezes a distância normal. As condições geológicas que promovem a propagação eficiente não têm sido bem documentadas e não estão completamente compreendidas. Frequentemente estão envolvidos camadas de rochas pouco profundas e solos argilosos rígidos. Uma possibilidade é que a camada de rochas pouco profunda atue para conservar a energia da vibração perto da superfície. Muito da energia que normalmente seria irradiada para baixo é direcionada de volta para a superfície pela camada de rochas fazendo com que a vibração da superfície do solo seja maior que o normal.

#### 5.5.3. Ajustes

Uma vez que a curva base tenha sido selecionada, os ajustes da Tabela 9 podem ser usados para desenvolver projeções de vibração para posições específicas dos receptores dentro das edificações. Todos os ajustes são dados como números únicos para serem adicionados a, ou subtraídos de, o nível base. Os parâmetros de ajustes são velocidade, tipo e condições das rodas e dos trilhos, tipo do sistema de suporte de trilhos, tipo da fundação da edificação e número de pisos acima do nível da fundação. Pode ser reconhecido que muitos desses ajustes são fortemente dependentes do espectro de frequência da fonte de vibração e da dependência da frequência da propagação da vibração. Os valores de números únicos são adequados

para avaliações generalizadas de impacto de vibração e medidas de mitigação da vibração desde que eles estejam baseados no espectro de vibração típico. Contudo, os ajustes com números únicos não são adequados para avaliações detalhadas de impacto em edificações sensíveis ou para especificações detalhadas de medidas de mitigação.

A Análise Detalhada requer consideração da relativa importância dos diferentes componentes da frequência.

Fator da Fonte		Ajuste para a Curva de Propagação		Comentários
Velocidade	<u>Velocidade do Veículo</u>	<u>Velocidade Ref.</u>		O nível de vibração é aproximadamente proporcional a $20 \cdot \log(\text{velocidade}/\text{velocidade}_{ref})$ . Algumas vezes a variação com a velocidade tem sido observada como sendo mais baixa que de 10 a 15 log (velocidade/velocidade <sub>ref</sub> ).
		<u>80 km/h</u>	<u>48 km/h</u>	
	96 km/h	+1, 6dB	+6,0 dB	
	50 km/h	0,0 dB	+4,4 dB	
	64 km/h	-1,9 dB	+2,5 dB	
	48 km/h	-4,4 dB	0,0 dB	
	32 km/h	-8,0 dB	-3,5 dB	
Parâmetro dos Veículos (não cumulativa, aplicar somente o maior valor).				
Veículo com suspensão primária rígida	+8 dB		Veículos de transporte com suspensões primárias rígidas têm sido mostrados como criadores de altos níveis de vibração. Inclua esse ajuste quando a suspensão primária tem uma frequência de ressonância vertical maior que 15 Hz.	
Rodas Resilientes	0 dB		Rodas resilientes geralmente não influenciam a vibração transmitida pelo solo, exceto em frequências maiores que 80 Hz.	
Rodas Gastas ou rodas deformadas	+10 dB		Rodas deformadas desgastadas podem causar altos níveis de vibração. Isso pode ser prevenido com retificação das rodas e detectores de escorregamento/deslizamento para evitar que as rodas escorreguem nos trilhos	
Condições dos Trilhos (não cumulativa, aplicar somente o maior valor).				
Trilhos desgastados ou com calos	+10 dB		Se ambos, rodas e trilho estão desgastados, somente um ajuste pode ser usado. Trilhos com calos é um problema comum. Fesagem em trilhos novos pode causar níveis de vibração mais altos até que o trilho tenha sido usado por algum tempo.	
Trabalhos especiais nos trilhos	+10 dB		O impacto das rodas em trabalhos especiais nos trilhos irão aumentar significativamente os níveis de vibração. O aumento será menor a grandes distâncias dos trilhos.	
Trilhos com juntas	+5 dB		Trilhos com juntas podem causar níveis de vibração mais altos que os trilhos soldados.	
Tratamentos dos Trilhos (não cumulativa, aplicar somente o maior valor).				
Leito dos trilhos lajes flutuantes.	-15 dB		A redução conseguida com o leito dos trilhos com lajes flutuantes é fortemente dependente das características de frequência da vibração.	
Brita	-10 dB		A redução real é fortemente dependente da frequência da vibração.	
Clipes de alta resiliência.	-5 dB		Lajes de trilhos com clipes que são muito complacentes, na direção vertical podem reduzir a vibração em frequências maiores que 40 Hz.	

**Tabela 9 - Fatores de Ajustes para Predições Generalizadas de Ruído e Vibração**

Fatores Afetando a Trajetória da Vibração				
Fator da Trajetória	Ajuste para a Curva de Propagação			Comentários
Tiras resilientes suportadas	-10 dB			Sistemas de tiras resilientes suportados têm sido encontrados para prover um controle muito efetivo de vibração de baixa frequência.
Configuração dos Trilhos (não cumulativa, aplicar somente o maior valor).				
Tipo da Estrutura de Transporte	Relativa à cinta e lastro no nível da superfície:			A regra geral é que quanto mais pesada é a estrutura, menores são os níveis de vibração. Colocar os trilhos em passagens pode reduzir os níveis de vibração ligeiramente (levemente). Os caminhos subterrâneos com base em rochas geram vibração de mais altos.
	Estruturas elevadas: -10 dB Passagens abertas 0 dB			
	Relativa ao túnel subterrâneo perfurado :			
	Estação -5 dB			
	Cortado e coberto -3 dB			
	Base de rochas -15 dB			
Efeitos na Propagação Transmitida pelo Solo				
Condições geológicas que promovem eficiente propagação da vibração	Propagação eficiente no solo +10 DB			Refere ao texto para orientações sobre identificação de áreas onde a propagação eficiente é possível.
	Propagação na camada de rochas	Dist. 15 metros 30 metros 45 metros 60 metros	Ajust. +2 dB +4 dB +6 dB +9 dB	O ajustamento positivo leva em conta a baixa atenuação da vibração em rochas comparando ao solo. É geralmente mais difícil provocar vibrações em rochas que em solo na fonte.
Acoplamento para a fundação da edificação	Casas com estrutura de madeira -5 dB			A regra geral é que quanto mais pesadas forem as edificações, maior é a perda de acoplamento.
	1-2 pavimentos de alvenaria -7 dB			
	3-4 pavimentos de alvenaria -10 dB			
	Grande alvenaria em estacas -10 dB			
	Grande alvenaria em alicerces amplos -13 dB			
	Fundação em rochas 0 dB			
Fatores Afetando Receptores da Vibração				
Fator Receptor	Ajustamento para a Curva de Propagação			Comentários
Atenuação piso-a-piso	De 1 a 5 pisos acima do nível:	-2 dB/piso		Esse fator leva em conta a dispersão e atenuação da energia de vibração como ela propaga através da edificação.
	De 5 a 10 pisos acima do nível:	-1 dB/piso		
Amplificação devido a ressonâncias dos pisos, paredes, e tetos.	+6 dB			A amplificação real irá variar grandemente dependendo do tipo da construção: a amplificação é mais baixa perto das intersecções de parede/piso e parede/teto.
Conversão para Ruído Transmitido pelo Solo				
Nível de Ruído em dBA	Frequência pico da vibração do solo:			Use esses ajustamentos para estimar o nível de som da curva "A" de compensação dando o nível de velocidade da vibração média das superfícies do cômodo. Veja o texto para diretrizes para selecionar características de baixa, típica e altas frequências. Use o ajustamento de alta frequência para túneis subterrâneos em rochas ou se as frequências dominantes do espectro de vibração são sabidas como sendo 60 Hz ou maiores.
	Baixa frequência (< 30 Hz) -50 dB			
	Típica (pico de 30 a 60 Hz) -35 dB			
	Alta frequência (>60 Hz) -20 dB			

**Tabela 9 - Fatores de Ajustes para Predições Generalizadas de Ruído e Vibração**  
(continuação).

Sem considerações cuidadosas do perfil (forma) do espectro de vibração real, uma medida inapropriada de controle de vibração pode ser selecionada, o que poderia efetivamente causar um aumento nos níveis de vibração.

As diretrizes demonstradas na tabela 9 são usadas para selecionar os fatores de ajustes apropriados. Note que os ajustes para condições das rodas e dos trilhos não são cumulativos. Por exemplo: o ajuste para trilhos unidos por talas é 5 decibéis e o ajuste para rodas deformadas é de 10 decibéis. Em uma área onde existem trilhos unidos por talas e muitos veículos têm rodas deformadas, os níveis de vibração projetada devem ser acrescidos em 10 decibéis e não 15 decibéis.

- **Velocidade do trem:** Os níveis de vibração e ruído transmitidos pelo solo variam aproximadamente em 20 vezes o logaritmo da velocidade. Isso significa que dobrar a velocidade do trem irá aumentar os níveis de vibração em aproximadamente 6 decibéis e diminuir a velocidade do trem pela metade irá reduzir os níveis em 6 decibéis. A Tabela 9 tabula os ajustes para velocidades de veículos referência de 48 km/h para veículos com rodas de borracha e 80 km/h para veículos com rodas de aço. A seguinte relação pode ser usada para calcular os ajustamentos para outras velocidades.

$$ajuste(dB) = 20x \log \left( \frac{velocidade}{velocidade_{ref}} \right)$$

- **Veículo:** Os fatores mais importantes para os veículos são o sistema de suspensão, condições das rodas, e tipo de roda. Veículos para os quais a suspensão primária consiste em uma borracha ou um disco de neoprene em torno do eixo do mancal usualmente tem uma suspensão primária muito rígida com uma frequência de ressonância vertical maior que 40 Hz. A curva referência leva em conta rodas sem defeitos, mas rodas com deformações ou rugosidades podem causar níveis de vibração que são 10 VdB mais altos que o normal. Rodas resilientes irão reduzir os níveis de vibração em frequências maiores que a efetiva frequência de ressonância da roda. Por essa frequência de ressonância ser relativamente alta, frequentemente maior que 80 Hz, as rodas resilientes normalmente têm somente um efeito marginal sobre a vibração transmitida pelo solo. É importante usar somente um dos ajustes nessa categoria, o maior que se aplicar.



- **Sistema de Trilhos e Fixações:** Essa categoria inclui o tipo de trilho, sistema de fixação dos trilhos, e condições da via. Todas as curvas base presumem vias soldadas em boas condições. O impacto das rodas em trabalhos especiais nos trilhos, tais como os “jacarés” em cruzamentos, cria forças de vibração muito mais altas que o normal. Por causa dos altos níveis de vibração nos trabalhos de trilhos especiais, cruzamentos freqüentemente acabam sendo as principais áreas de impacto nos sistemas metro-ferroviários. Modificar o sistema de fixação dos trilhos é um método de mitigar o impacto da vibração. Sistemas especiais de fixação de trilhos tais como dormentes de concreto, cliques de alta resiliência, placas resilientes e lajes flutuantes, têm todos mostrado serem eficientes na redução dos níveis de vibração. As condições da superfície de rolamento dos trilhos podem afetar fortemente os níveis de vibração. Fatores como corrugações (desgaste ondulatório), desgaste geral ou fresagem em trilhos novos podem causar níveis de vibração que são de 5 a 15 decibéis mais altos que o normal. A fresagem irá normalmente desgastar depois de algum tempo em serviço; contudo, o trilho deve ser esmerilhado para remover as corrugações (desgaste ondulatório) ou para reduzir a aspereza produzida pelo uso constante. Novamente, aplique somente um dos ajustes.
- **Estrutura de Transporte:** O peso e tamanho de uma estrutura de transporte afetam a vibração irradiada por aquela estrutura. A regra geral é que os níveis de vibração serão mais baixos para as estruturas de transporte mais pesadas. Portanto, podemos presumir que o nível de vibração para uma caixa dupla de concreto cortada e coberta subterrânea como sendo mais baixo que a vibração de um túnel leve perfurado de concreto alinhado. A vibração originada de estruturas elevadas é mais baixa que as originadas pelos trilhos no nível da superfície por causa da massa e do amortecimento da estrutura e a distância extra que a vibração precisa percorrer antes de atingir o receptor.

- **Características da Propagação:** Na Avaliação Geral é necessário fazer uma seleção entre as características gerais de propagação. Para um caminho subterrâneo a seleção é uma escolha razoavelmente direta se o caminho subterrâneo será, ou não, edificado (fundado) dentro de um leito de rochas. Como visto na Tabela 9, se o caminho subterrâneo é no solo ou dentro de um leito de rocha, pode significar uma diferença de 15VdB nos níveis de vibração. Quando consideramos fontes de vibração no nível da superfície, a seleção é entre propagação da vibração "normal" e "eficiente". A propagação eficiente da vibração resulta em níveis de vibração aproximadamente 10 decibéis mais altos. Isso mais que duplica a zona de impacto potencial para vibração transmitida pelo solo. Um dos problemas com a identificação da causa da propagação eficiente é a dificuldade em determinar se os níveis de vibração mais altos que o normal são devido às condições geológicas ou devido a condições especiais das fontes (ex. corrugação nos trilhos ou rodas deformadas). Embora se saiba que condições geológicas têm um significativo efeito sobre os níveis de vibração, raramente é possível desenvolver mais que um entendimento geral das características de propagação da vibração para uma Avaliação Geral. A abordagem conservadora pode ser usar o ajuste de 10 decibéis para propagação eficiente para avaliar todos os impactos de vibração potenciais. Por isso, é melhor rever os dados geológicos disponíveis e algum histórico de reclamações de linhas de transporte existentes e principais áreas de construção perto do corredor de transporte para identificar áreas onde é possível uma propagação eficiente. Se existe alguma razão para se suspeitar de condições de propagação eficiente da vibração, então uma Análise Detalhada durante a fase final do projeto poderá incluir testes de propagação da vibração nas áreas identificadas como locais potenciais de propagação eficiente da vibração.

Algumas condições geológicas são repetidamente associadas com propagação eficiente. Leitões de rochas pouco profundos, a menos que 9 metros abaixo da superfície são prováveis de ter uma propagação eficiente. Outros fatores que podem ser importantes são o tipo de solo e

sua rigidez. Em particular, solos argilosos rígidos têm algumas vezes sido associados com propagação eficiente da vibração. A investigação dos registros de sondagem do solo pode ser usada para estimar a profundidade do leito de rochas e a presença de condições de solo problemáticas. Um fator que pode ser particularmente complexo para expressar (numericamente) é o efeito da propagação através das rochas. Existem três fatores da Tabela 9 que precisam ser incluídos quando uma estrutura subterrânea será fundada em rochas. O primeiro é o ajuste de -15 decibéis na categoria "Tipo da Estrutura de Transporte". O segundo é o ajuste baseado na distância de propagação na categoria "Condições Geológicas". Esse ajuste positivo é aplicado às distâncias mostradas na Figura 6; o aumento no ajuste com a distância é porque a vibração atenua mais vagarosamente em rochas que em solo, usado como base para a curva referência. Um terceiro fator está na categoria "Acoplamento à Edificação". Quando a fundação de uma edificação é diretamente sobre a camada de rochas, não existe "perda de acoplamento" devido ao peso e rigidez da edificação. Use os fatores de acoplamento padrão se existe ao menos uma camada de solo de 3 metros entre a fundação da edificação e a camada de rochas.

- **Tipo da Edificação e Local de Recepção dentro da Locação:** A perturbação produzida por ruído e vibração transmitidos pelo solo são fenômenos ocorridos do lado de dentro das edificações, os efeitos da estrutura da edificação na vibração devem ser considerados. Grandes edificações alvenaria com bases de alicerce amplas têm uma baixa resposta à vibração do solo. A vibração geralmente reduz em nível enquanto ela propaga através da edificação. Como indicado na Tabela 9, é usualmente presumida uma atenuação de 1 a 2 decibéis por piso. Contrariando isso, ressonâncias da estrutura da edificação, particularmente os pisos, irão causar alguma amplificação da vibração. Os ajustes para o primeiro piso, assumindo um subsolo são: -5 decibéis para a perda de acoplamento; -2 decibéis para a propagação produzida pelo subsolo (porão) para o primeiro piso; e +6 decibéis para a amplificação do piso. O ajuste total nesse caso é -1 decibel.

- **Vibração para Ajuste de Ruído Transmitido pelo Solo:** É possível estimar os níveis de ruídos irradiados dando a amplitude de vibração média das superfícies dos cômodos (pisos, paredes e tetos) e a absorção acústica total no cômodo. O nível de pressão do som é aproximadamente igual ao nível de velocidade da vibração quando o nível de velocidade é referenciado em  $1 \times 10^{-6}$  polegadas/segundo. Contudo, para estimar o nível de som da curva "A" de compensação a partir do nível de velocidade, é necessário ter algumas informações sobre o espectro de frequência. O ajuste do nível de som da curva "A" de compensação cai rapidamente em baixas frequências, refletindo a relativa insensibilidade do ouvido (audição) humano a baixas frequências. Por exemplo, nível de som da curva "A" de compensação é -16 dB em 125 Hz, -26 dB em 60 Hz e -40 dB em 30 Hz. A Tabela 9 fornece ajustes para vibração dependendo se as características são de baixa, típica ou alta frequência. Algumas diretrizes gerais para classificação das características das frequências são:
  - **Baixa Frequência:** As características da vibração de baixa frequência podem ser assumidas para caminhos subterrâneos cercados por solo arenosos pouco coesivos ou sempre quando o sistema de fixação de trilhos para a isolação da vibração for usado. As características da baixa frequência podem ser presumidas para a maioria dos trilhos de superfície.
  - **Típica:** A característica da vibração típica é a presunção contumaz para caminhos subterrâneos. Deve ser assumida para caminhos subterrâneos até que exista informação indicando que uma das outras suposições é mais apropriada. Pode ser usada para trilhos de superfície quando o solo é muito rígido e com um alto conteúdo de argila.
  - **Alta Frequência:** as características da alta frequência podem ser assumidas para caminhos subterrâneos ou em qualquer lugar no qual a estrutura de transporte esteja fundada em rochas ou quando existe solo argiloso muito rígido.

#### 5.5.4. Análise dos Locais Impactados pela Vibração

A proposta do procedimento é desenvolver uma análise completa das edificações que possam experimentar vibração ou ruído transmitido pelo solo que excedam os critérios de impacto. Nesse ponto, é preferível fazer uma conservadora avaliação do impacto. Isso é, é melhor incluir algumas edificações onde a vibração transmitida pelo solo possa estar abaixo do limiar de impacto que excluir edificações onde ela possa exceder o limiar de impacto. O inventário deve ser organizado de acordo com as características de cada edificação onde a vibração ou ruído transmitido pelo solo projetado exceda o limiar de impacto aplicável, uma ou mais opções de controle da vibração podem ser consideradas para aplicação.

#### 5.6. DETALHAMENTO DA PREDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

A abordagem deste sub-item foca os passos chave normalmente seguidos por um profissional da área (campo). Devemos utilizar todas as ferramentas disponíveis para desenvolver projeções acuradas do potencial impacto da vibração transmitida pelo solo e, quando necessário, planejar medidas de mitigação. A Análise Detalhada irá requerer o desenvolvimento de estimativas dos componentes da frequência do sinal de vibração, normalmente em termos do espectro de bandas de terço de oitava.

Uma Análise Detalhada da vibração consiste em três partes:

1. Estudo da Vibração Existente: Embora não sejam usualmente requeridos, existem vezes em que um estudo da vibração existente é valioso. Documentação da vibração de fundo existente em edificações sensíveis, medição dos níveis de vibração criados por fontes como linhas ferroviárias existentes e, em alguns casos, caracterização da vibração geral de fundo no corredor projetado.

2. **Predição da Vibração Futura e Impacto da Vibração:** Todas as ferramentas disponíveis devem ser aplicadas na Análise Detalhada para desenvolver as melhores estimativas possíveis do potencial de impacto da vibração. Envolve a realização de testes para caracterizar a propagação da vibração em locais onde um impacto significativo é provável, os procedimentos de testes de propagação da vibração e a avaliação de impacto da vibração.
3. **Desenvolver Medidas de Mitigação:** Consiste no desenvolvimento de medidas de custos acessíveis para reduzir os níveis de vibração. Serão consideradas as seleções de medidas práticas de controle da vibração que irão ser efetivas nas frequências de vibração dominantes e compatíveis com estrutura de transporte e sistema de fixação de trilhos adotados.

#### 5.6.1. Caracterizando as Condições de Vibração Existentes

A vibração ambiental é raramente de magnitude suficiente para ser perceptível ou causar ruído transmitido pelo solo audível a menos que exista uma fonte de vibração específica próxima, tal como uma linha férrea. Na maioria dos casos a vibração perceptível dentro de uma edificação é causada por equipamentos ou atividades dentro da própria edificação. Devido à vibração ambiental existente ser normalmente abaixo da percepção humana, um estudo limitado da vibração é suficiente, mesmo para uma Análise Detalhada. Isso contrasta com a análise do impacto de ruído, onde documentar o ruído ambiente existente é requerido para avaliar o impacto.

- **Determinar a vibração existente em edificações sensíveis:** Uma documentação cuidadosa da vibração pré-existente fornece informações valiosas sobre a sensibilidade real da atividade à vibração externa e dá a condição referencial sob a qual a vibração não é um problema.
- **Usar fontes de vibração existentes para caracterizar a propagação:** A fonte de vibração existente pode ser usada para caracterizar a propagação

da vibração. Medições cuidadosamente planejadas e executadas podem eliminar a necessidade de testes de propagação mais complexos.

- **Documentar os níveis existentes do fundo geral:** A vibração existente em áreas urbanas e suburbanas é normalmente devido ao tráfego. Se um local de medição tem vibração existente próxima da faixa de percepção humana (ex. os níveis máximos de velocidade da vibração são maiores que cerca de 65 VdB), então esse local deve ser cuidadosamente avaliado pela possibilidade de propagação eficiente da vibração.
- **Documentar a vibração das linhas ferroviárias existentes:** Medições para documentar os níveis de vibração criados por linhas ferroviárias existentes podem ser importantes para a avaliação do impacto de novas fontes de vibração e na determinação das características de propagação da área.

Embora a vibração transmitida pelo solo seja quase exclusivamente um problema do lado de dentro das edificações, medições da vibração ambiente existente geralmente podem ser executadas do lado de fora.

Documentar os níveis de vibração dentro de uma edificação sensível à vibração pode ser particularmente importante visto que equipamentos e atividades dentro da edificação algumas vezes causam vibração maior que aquelas devido a fontes externas, como tráfego nas ruas ou sobrevôos de aviões. As medições da vibração no piso são tomadas perto do centro de uma envergadura do solo (centro da laje ou piso) onde as amplitudes de vibração são as mais altas.

Embora os componentes transversais possam transmitir significativa energia de vibração dentro da edificação, os componentes verticais normalmente têm amplitudes maiores que a vibração transversal. Além do mais, a vibração vertical é normalmente transmitida mais eficientemente dentro das fundações das edificações que a vibração transversal.

A maneira que o transdutor é montado pode afetar os níveis de vibração transmitida pelo solo. Porém, em frequências normalmente preocupantes para a vibração transmitida pelo solo (menos de 200 Hz), métodos corretos de montagem de transdutores na superfície do solo ou no pavimento são adequados para medições de vibração vertical. Superfícies de concreto ondulado ou rochas requerem montagens especiais.

Os locais selecionados para caracterizar um corredor de transporte podem ser distribuídos ao longo de todo projeto e podem ser representativas dos tipos de ambientes de vibração encontrados nesse corredor. Isso geralmente pode incluir:

- Medições em áreas residenciais sem vias principais de tráfego para caracterizar baixas vibrações ambiente;
- Medições ao longo de vias de trânsito principais, rodovias ou estradas para caracterizar as áreas de alta vibração;
- Medições em qualquer área com atividades sensíveis à vibração; e
- Medições de qualquer fonte de vibração existente, significativa como linhas ferroviárias.

Os transdutores podem ser posicionados perto da calçada da edificação para medições de vibração de fundo. As medições ambientes ao longo da linha ferroviária idealmente incluirão: locais múltiplos, diversas distâncias da linha ferroviária em cada local, e de quatro a dez passagens de trem para cada teste. O tipo de ferrovia e suas condições afetam fortemente os níveis de vibração.

Os métodos apropriados para caracterizar a vibração ambiente são dependentes do tipo de informação requerida para análise. A seguir estão alguns exemplos:



- **Vibração Ambiente:** a vibração ambiente é normalmente caracterizada por uma medição contínua com duração de 10 a 30 minutos. O Leq (média equivalente) do nível de velocidade da vibração sobre o período medido dá uma indicação da energia de vibração média. O Leq é equivalente ao longo (extenso) cálculo da média de tempo do nível rms. Eventos específicos podem ser caracterizados pelo nível rms máximo (Lmax) do evento ou pela realização de análises estatísticas de níveis rms sobre o período de medição. A média de tempo de rms de 1 segundo pode ser usado pra análises estatísticas dos níveis de vibração.
- **Eventos Específicos:** Eventos específicos como passagens de trens devem ser caracterizados, os níveis rms durante o tempo em que o trem passa devem ser registrados.
- **Análise de Espectro:** Quando os dados da vibração serão usados para caracterizar a propagação da vibração ou para outras análises especiais, a análise espectral da vibração é requerida. O espectro de faixa estreita também pode ser valioso, particularmente para identificar e planejar medidas de mitigação específicas.

Note que é preferível que a vibração ambiente seja caracterizada em termos de nível de velocidade em valor eficaz (rms - raiz quadrada média), e não velocidade pico da partícula (ppv), como é comumente usado para monitorar a vibração em construções.

#### 5.6.2. Procedimento de predição da vibração

Predizer a vibração transmitida pelo solo associada com projetos de transporte continua a ser um campo em desenvolvimento. A maioria dos procedimentos de projeção, que têm sido usados para projetos de transporte, conta com dados empíricos. Os procedimentos descritos nesta seção são baseados em testes locais específicos de propagação da vibração.

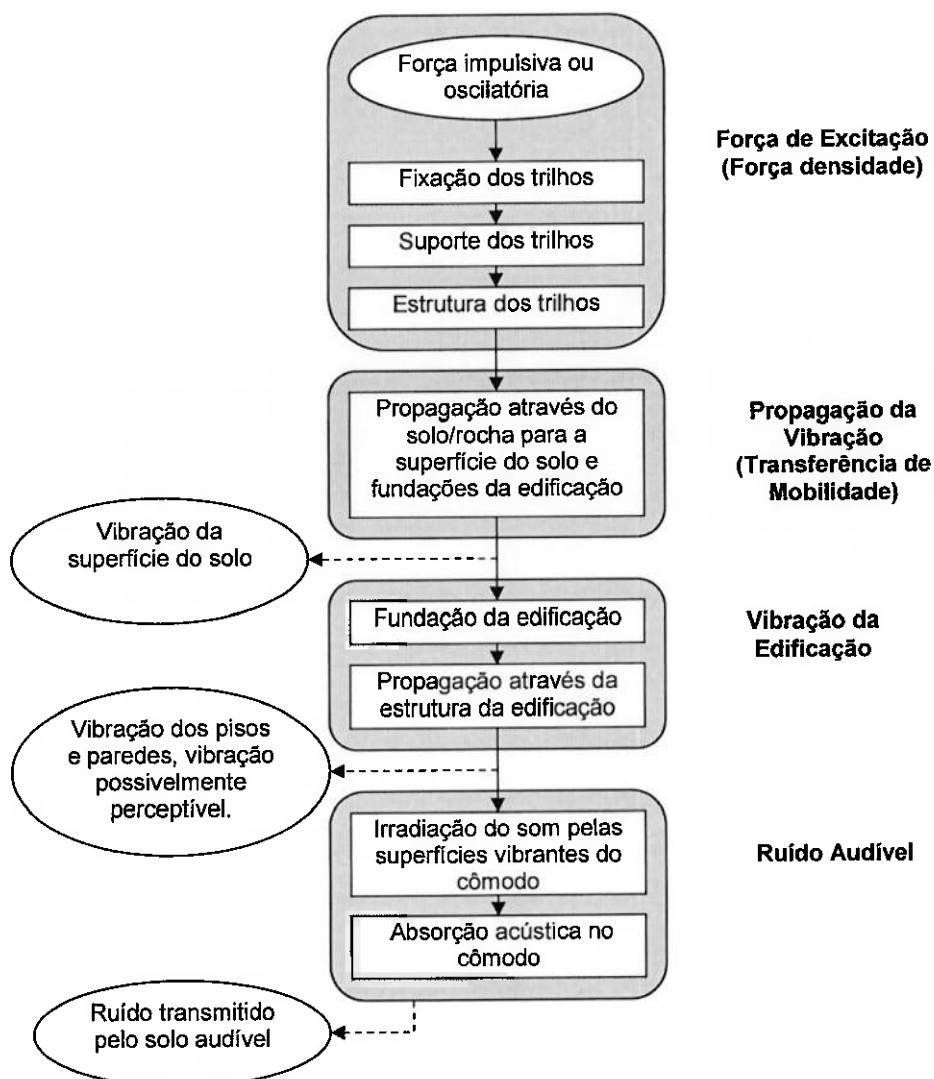
Outras abordagens para o processo de predição, incluindo alguns que usam métodos matemáticos puros usando elementos finitos estão sendo usadas para estimar vibração transmitida pelo solo em túneis subterrâneos, mas a maioria das abordagens numéricas está ainda em estágios iniciais de desenvolvimento.

#### 5.6.2.1. Visão Geral do Procedimento de Predição

O método de predição foi desenvolvido para permitir o uso de dados coletados em uma locação para prever acuradamente os níveis de vibração em outro local onde as condições geológicas podem ser completamente diferentes. O procedimento é baseado no uso de uma função de medição especial chamada transferência de mobilidade.

A transferência de mobilidade medida em um sistema de transporte existente é usada para normalizar os dados da vibração transmitida pelo solo e remover os efeitos da geologia. A vibração normalizada é indicada como a força densidade. A força densidade pode ser combinada com medições de transferência de mobilidade em locais sensíveis ao longo do novo projeto para desenvolver projeções futuras de vibração transmitida pelo solo.

A transferência de mobilidade representa a relação entre a fonte de vibração que excita o solo e a vibração resultante na superfície do solo. Ela é função de ambos, frequência e distância da fonte. A transferência de mobilidade entre 2 pontos define completamente as características da propagação da vibração composta entre os 2 pontos. Na maioria dos casos práticos, o receptor está perto o bastante dos trilhos do trem que a vibração não pode ser considerada sendo originada de um único ponto. A fonte de vibração deve ser modelada como uma linha-fonte. Consequentemente, o ponto de transferência de mobilidade deve ser modificado levando-se em conta a linha-fonte.  $TM_{\text{ponto}}$  é usado para indicar o ponto-fonte de transferência de mobilidade medido e  $TM_{\text{linha}}$  é usada para a transferência de mobilidade da linha-fonte derivada do  $TM_{\text{ponto}}$ .



**Figura 19 - Diagrama do Modelo de Vibração e Ruído Transmitidos pelo Solo**

O procedimento de predição considera a vibração transmitida pelo solo como dividida em vários componentes básicos como mostrado esquematicamente na Figura 19. Os componentes são:

- **Força de Excitação:** a energia de vibração é criada por forças oscilatórias e impulsivas. Rodas de aço rolando sobre trilhos de aço criam forças oscilatórias randômicas. Quando uma roda encontra uma descontinuidade, uma força impulsiva é criada. A força excita a estrutura, tais como túneis

subterrâneos ou lastro para trilhos no nível da superfície. No método de predição, a combinação da força real gerada na interface roda/trilho e a vibração da estrutura de transporte são normalmente combinadas dentro de um nível de força densidade equivalente. O nível de força densidade descreve a força que excita o solo/rochas circundante da estrutura de transporte.

- **Propagação da Vibração:** A vibração da estrutura causa ondas de vibração no solo que propagam para longe da estrutura. A energia da vibração pode propagar através do solo ou rochas em uma variedade de formas de ondas. Todas as vibrações do solo incluem ondas de compressão e cisalhamento. Além do mais, ondas Rayleigh (Ondas Rayleigh (R) – provocam vibração no sentido contrário à propagação da onda – movimento de rolamento (descrevem uma órbita elíptica)), que propagam ao longo da superfície do solo, podem ser as principais transportadoras de energia de vibração. O modelo matemático da vibração é complicado quando, como normalmente é o caso, existem camadas de solo com diferentes propriedades elásticas. Como indicado na Figura 7, a propagação através do solo/rochas é modelada usando a transferência de mobilidade, que é normalmente determinada experimentalmente. A combinação do nível de força densidade e a transferência de mobilidade são usadas para prever a vibração superfície-solo. Aqui está a diferença essencial entre as abordagens Geral e Detalhada: o processo de projeção é simplificado na Avaliação Geral por ir diretamente para as estimativas generalizadas da vibração solo-superfície.
- **Vibração da Edificação:** Quando a vibração do solo excita uma fundação de uma edificação, isso coloca a edificação dentro do movimento da vibração e começa a propagação de ondas de vibração em toda a estrutura da edificação. A interação entre o solo e a fundação causa alguma redução nos níveis de vibração. A quantidade reduzida depende da massa e da rigidez da fundação. Quanto mais maciças são as fundações, mais baixa é a resposta à vibração do solo. Enquanto as ondas de vibração propagam através da edificação, elas podem criar vibração

perceptível e podem causar chacoalhar de janelas e itens pendurados ou em prateleiras.

- **Ruído Audível:** Além da vibração perceptível, a vibração das superfícies do cômodo irradia som de baixa frequência que pode ser audível. Como indicado na Figura 19, o nível de som é afetado pela quantidade de absorção acústica do cômodo receptor. Uma suposição fundamental da proposta de predição delineada aqui é que a força densidade, a transferência de mobilidade e o acoplamento da edificação ao solo são todos fatores independentes. As seguintes equações são as bases para o procedimento de predição onde todas as quantidades estão em níveis espectrais de bandas de terço de oitavas em decibéis com consistentes valores referência:

$$L_v = L_F + TM_{line} + C_{build}$$

$$L_A = L_v + K_{rad} + K_{A-wt}$$

Onde:

$L_v$  -nível de velocidade da vibração rms;

$L_A$  -nível de som da curva "A" de compensação;

$L_F$  -força densidade para uma fonte de vibração em linha, como um trem;

$TM_{line}$  -linha-fonte da transferência de mobilidade originada dos trilhos para o local sensível;

$C_{build}$  -ajustes levando-se em conta a interação solo-fundação da edificação e atenuação das amplitudes de vibração ao modo que a vibração propaga através das edificações,

$K_{rad}$  -ajustes levando em conta a conversão da vibração para nível de pressão do som levando se em conta também a quantidade de absorção acústica dentro do cômodo (um valor de zero pode ser usado para  $K_{rad}$  para cômodos típicos residenciais quando o valor de referência em decibéis para  $L_v$  é 1 micro polegada/segundo),

$K_{A-wt}$  -ajuste do nível de som da curva "A" de compensação no centro das frequências de bandas de terço de oitava.

Todas as quantidades dadas acima são funções de frequência. A abordagem padrão para tratar da dependência da frequência é desenvolver projeções em uma base de bandas de terço de oitava usando os valores médios para cada banda de terço de oitava. Os resultados finais da análise são os espectros de bandas de terço de oitava da vibração transmitida pelo solo e do ruído transmitido pelo solo. Os espectros são então aplicados aos critérios de vibração para Análise Detalhada. O nível de ruído transmitido pelo solo, ou seja o nível de som da curva "A" de compensação pode ser calculado a partir do espectro de vibração. Essa abordagem mais detalhada está em contraste com a Avaliação Geral onde o nível de velocidade da vibração global e o nível de som da curva "A" de compensação são preditos sem nenhuma consideração das características particulares da frequência da trajetória da propagação.

#### 5.6.2.2. Principais Passos na Análise Detalhada

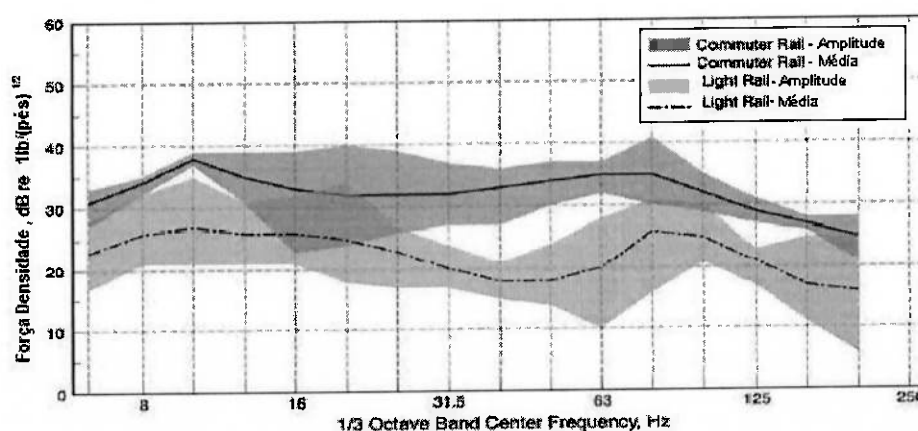
Os passos na realização da Análise Detalhada são destinados a obter dados para as equações dadas acima. Eles são:

1. Desenvolver estimativas da força densidade. A estimativa da força densidade pode ser baseada em medições prévias ou programas de testes especiais podem ser planejados para medir a força densidade em uma instalação existente. Se medições adequadas não estão disponíveis, os testes devem ser feitos em uma instalação de transporte com equipamentos similares aos veículos planejados. Os ajustes para fatores como velocidade do trem, sistemas de fixação de trilhos e suspensão do veículo podem ser necessários para combinar a força densidade às condições do local específico.
2. Medir o ponto-fonte de transferência de mobilidade em locais representativos. A transferência de mobilidade é uma função de ambos, frequência e distância da fonte. O ponto-fonte de transferência de mobilidade é usado para fontes com curta extensão, tais como veículos únicos ou colunas suportando estruturas elevadas.

3. Use integração numérica para estimar a linha-fonte da transferência de mobilidade a partir do ponto-fonte da transferência de mobilidade. A linha-fonte da transferência de mobilidade é aplicável para fontes longas, como trens.
4. Combine a força densidade e a linha-fonte da transferência de mobilidade para projetar a vibração solo-superfície.
5. Adicione fatores de ajuste para estimar a resposta da edificação à vibração solo-superfície e para estimar o nível de som da curva "A" de compensação dentro da edificação.

Os dois elementos chave para o procedimento de transferência da mobilidade são a função de força medida que representa a energia de vibração colocada dentro do solo e a transferência de mobilidade medida que caracteriza a propagação da vibração da fonte para o receptor. A unidade da força densidade é força dividida pela raiz quadrada do comprimento do trem, representada aqui em 1libras/(pés)<sup>1/2</sup>. A força densidade representa uma linha incoerente da força de vibração igual para o comprimento dos trens de transporte.

A Figura 20 mostra algumas forças no leito dos trilhos que têm sido desenvolvidos a partir de medições da vibração de veículos de transporte. A Figura fornece uma comparação das forças de vibração de trens de commuter rail pesados (heavy) e veículos de transporte light rail (leves) com diferentes tipos de suspensão primária ilustrando a gama de forças de vibração comumente experimentadas em um sistema de transporte. A força densidade de um veículo inclui as características do seu sistema de suporte de trilhos no local medido. Os ajustes devem ser feitos para a força densidade levando-se em conta as diferenças entre a instalação onde a força densidade foi medida e o novo sistema a ser analisado.



**Figura 20 - Forças Densidades Típicas para veículos ferroviários, 40mph**

O processo de medição da transferência de mobilidade envolve impactar o solo e medir a pulsação da vibração resultante a várias distâncias do impacto. Técnicas padrão de processamento do sinal são usadas para determinar a transferência de mobilidade, ou função e frequência da resposta, entre a força estimuladora e a vibração solo-superfície resultante. Métodos de regressão numérica são usados para combinar um número de dois pontos de transferência de função dentro de um ponto-fonte de transferência de mobilidade plano que representa as médias das características de vibração de um local em função de ambos, distância da fonte e frequência.

A transferência de mobilidade é normalmente expressa em termos de um grupo de transferências de mobilidades de bandas de terço de oitava. Esse processamento é realizado depois da transferência de dados para um computador. A Figura 21 mostra os pontos-fonte das transferências de mobilidades de uma série de testes no Transportation Technology Center (Centro de Tecnologia em Transportes) em Pueblo, Colorado. Uma vez que o ponto-fonte da transferência de mobilidade tenha sido definido, uma linha-fonte de transferência de mobilidade pode ser calculada usando técnicas de integração numérica. Esse processo foi descrito no documento Transportation Research Board. A Figura 22 mostra as linhas-fonte da transferência de mobilidade que foram derivadas dos pontos-fonte da transferência de



mobilidade mostrados na Figura 21. As linhas-fonte de transferência de mobilidade são utilizadas para normalizar os níveis de velocidade da vibração medidos de passagens de trens e para obter a força densidade.

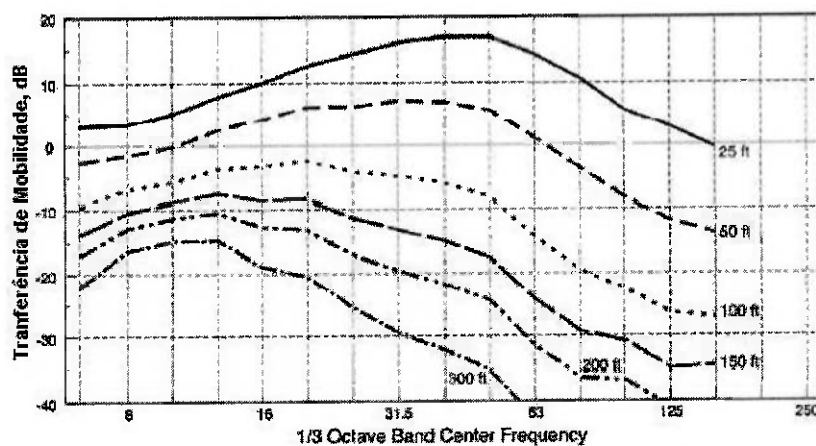


Figura 21 - Exemplos de Ponto-Fonte da Transferência de Mobilidade

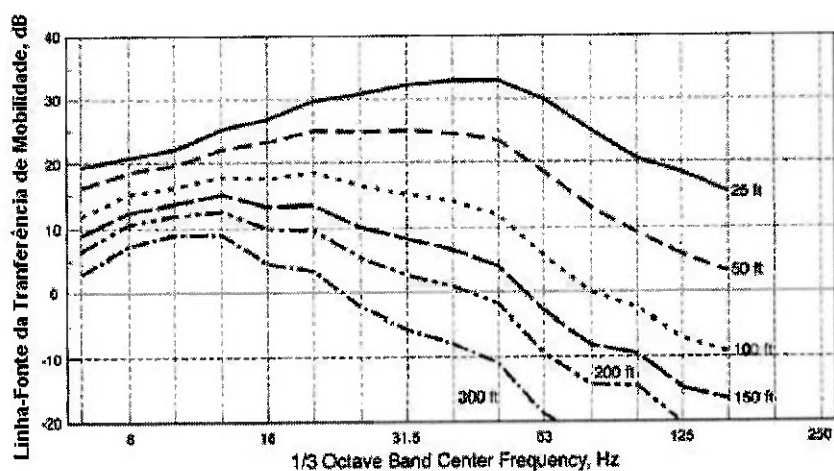


Figura 22 - Exemplos de Linha-Fonte da Transferência de Mobilidade

A propagação da vibração da fundação da edificação para o cômodo receptor é um problema muito complexo dependente do projeto específico da edificação. Uma avaliação detalhada da propagação da vibração pode requerer o uso extensivo de procedimentos numéricos como o método de

elemento finito. A propagação da vibração através de uma edificação e a irradiação do som pelas superfícies vibrantes da edificação é conseqüentemente estimada usando modelos empíricos simples ou teóricos. Os procedimentos recomendados estão delineados no "Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control" (Manual de Controle de Ruído e Vibração em Ferrovias Urbanas). A abordagem consiste em adicionar os seguintes ajustes ao espectro de bandas de terço de oitava da vibração solo-superfície projetada:

1. Resposta da Edificação ou Perda de Acoplamento: Isso representa a mudança em uma vibração solo-superfície incidente devido à presença da estrutura da edificação. Os ajustes do Handbook são mostrados na Figura 23. Note que a correção é zero quando estimando a vibração do piso do porão (subsolo) ou vibração de lajes no nível do solo. Os valores medidos podem ser usados no lugar dos ajustes genéricos.
2. Transmissão através da Edificação: A amplitude da vibração tipicamente decresce à maneira em que a energia da vibração propaga a partir da fundação através do restante da edificação. A suposição normal é que a vibração atenua em 1 ou 2 dB para cada piso.
3. Ressonâncias do Piso: As amplitudes de vibração serão amplificadas por causa das ressonâncias dos sistemas piso/teto. Para uma estrutura residencial típica de madeira, a ressonância fundamental é normalmente na faixa de 15 a 20 Hz. Pisos e lajes de concreto armado em edificações modernas terão freqüências de ressonância fundamentais na faixa de 20 a 30 Hz. Uma amplificação resultando em um ganho de aproximadamente 6 dB pode ser usada na amplitude de freqüência da ressonância fundamental. A vibração projetada no piso é usada para estimar os níveis de ruído transmitido pelo solo. Os fatores primários afetando o nível de ruído são o nível de vibração médio das superfícies do cômodo e a quantidade de absorção acústica dentro do cômodo. Como discutido acima, o ajuste de irradiação é zero para cômodos típicos, o que dá:

$$L_A \approx L_v + K_{A-wt}$$

Onde:  $L_A$  é o nível de som em uma banda de terço de oitava,  
 $L_v$  é o nível de velocidade da vibração nessa faixa e  
 $K_{A-wt}$  é o ajuste nível de som da curva "A" de compensação na  
 frequência central da banda de terço de oitava. Os nível de som  
 da curva "A" de compensação em banda de terço de oitava são  
 então combinados para dar o nível de som da curva "A" de  
 compensação global (total).

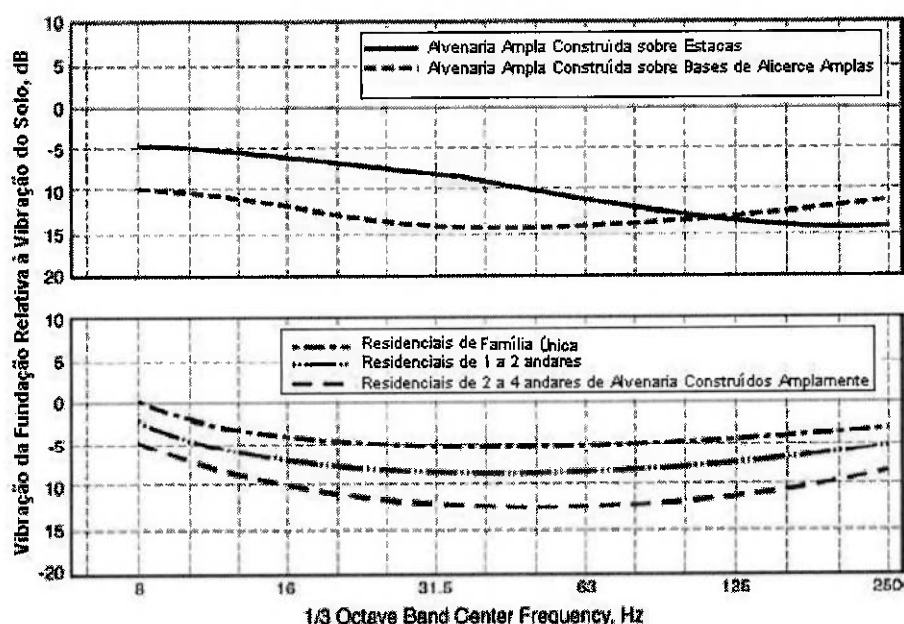


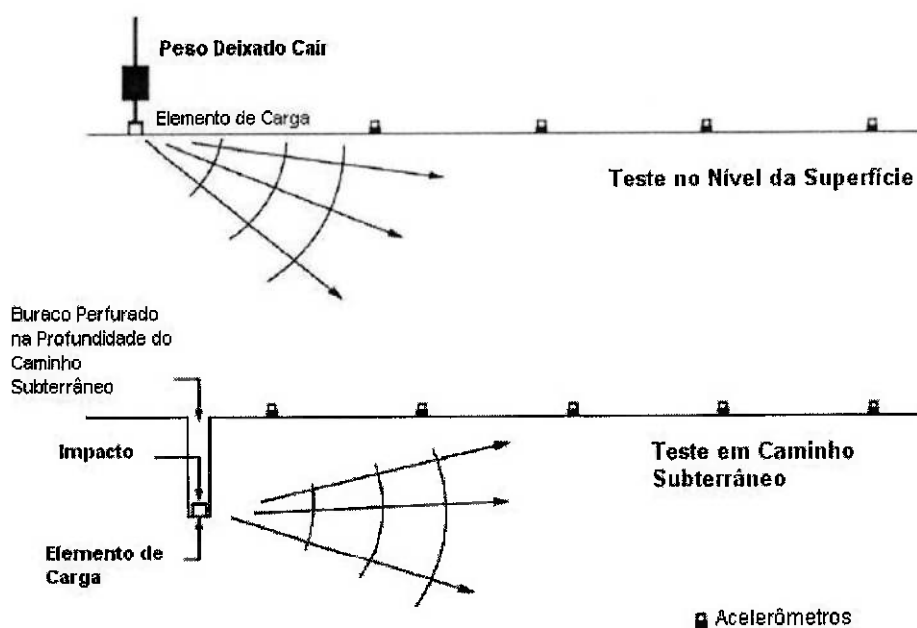
Figura 23 - Resposta da Fundação para Vários Tipos de Edificações

### 5.6.3. Medindo a Transferência de Mobilidade e a Força Densidade

Os procedimentos de testes para medir a transferência de mobilidade basicamente consistem em deixar cair um peso no solo e medir a força dentro do solo e a resposta a várias distâncias do local do impacto. O objetivo do teste é criar impulsos de vibração que viajam a partir da fonte até o receptor

usando a mesma trajetória que será tomada pela vibração originada do sistema de transporte. A transferência de mobilidade expressa a relação entre a força de entrada e a vibração solo-superfície.

A figura 24 ilustra o procedimento de campo para testes de transferência de mobilidade no nível da superfície e subterrâneos. Deixa-se cair um peso a uma distância de 0,9m a 1,2m sobre um transdutor de força. As respostas dos transdutores de força e vibração são registradas em um registrador com canais múltiplos para análise posterior em laboratório. Uma abordagem alternativa é estabelecer os equipamentos de análise em campo e capturar os sinais diretamente. Isso complica o teste de campo, mas elimina a análise em laboratório dos dados gravados.



**Figura 24 - Configuração de Testes para Medição da Mobilidade de Transferência**

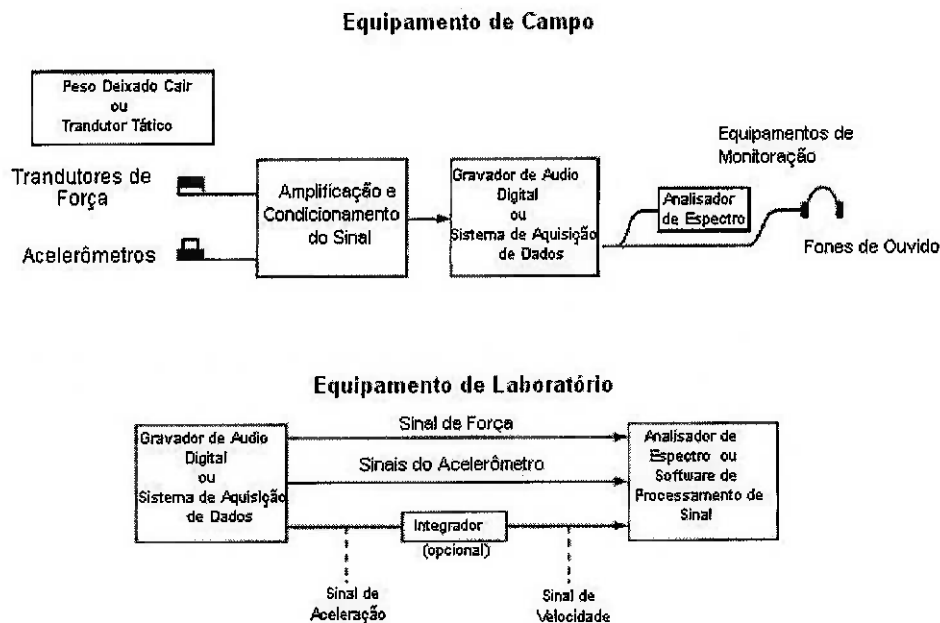
Quando o procedimento é aplicado a caminhos subterrâneos, a força deve ser posicionada na profundidade aproximada do caminho subterrâneo. Isso é feito perfurando um poço e posicionando um transdutor de força no fundo do mesmo. Os testes são normalmente realizados ao mesmo tempo em que os

poços são perfurados. Isso permite o uso de equipamentos que retiram amostras do solo na perfuração para testes de transferência de mobilidade. O transdutor de força é fixado na parte inferior da haste do perfurador e descido até o fundo do poço. Um martelo perfurante de amostragem de solo padrão, que normalmente têm um peso de 140 libras é deixado cair 0,45 metros em um aro fixado na haste do perfurador e usado para excitar o solo. O transdutor de força deve ser capaz de operar embaixo da água se o lençol freático for próximo da superfície ou se usado um processo de perfuração na lama.

#### 5.6.3.1. Instrumentação

A execução dos testes de transferência de mobilidade requer equipamentos especializados. A maioria dos equipamentos está facilmente disponível nas fontes comerciais. Um elemento de carga pode ser usado como transdutor de força. Para testes em poços perfurados, um elemento de carga deve ser hermeticamente selado e capaz de ser usado no fundo do poço de 9m a 30m de profundidade parcialmente preenchido com água. A instrumentação típica para testes de campo e análises laboratoriais de transferência de mobilidade é mostrada na Figura 25. Acelerômetros ou geofones podem ser usados como transdutores de vibração.

O requerimento é que os transdutores com amplificadores associados sejam capazes de medir acuradamente níveis de 0,0001 pol/s em 40 Hz e tenham uma resposta de frequência plana de 6 Hz a 400 Hz. Os dados devem ser adquiridos com um sistema digital de aquisição, com uma resposta de frequência plana ao longo da faixa de 6 a 400Hz.



**Figura 25 - Equipamentos Requeridos para Teste de Campo e Análise Laboratorial**

Um analisador de espectro de faixa de sintonização estreita ou um software de processamento de sinal pode ser usado para calcular a função de transferência e coerência entre os dados de força e vibração. O analisador deve ser capaz de capturar impulsos de pelo menos dois canais para calcular o espectro de frequência da função de transferência entre a força e os canais de vibração. Todas as funções de transferência podem incluir a média de pelo menos 20 impulsos. A média de impulsos irá prover significativa intensificação do sinal, que é normalmente requerido para caracterizar apuradamente a função de transferência. A intensificação do sinal é particularmente importante quando o transdutor de vibração está a mais de 30 metros do impacto.

A transferência de mobilidade também pode ser medida usando outros métodos. Um desses métodos envolve produzir impulsos de força de sequência máxima de profundidade (MLS) com um transdutor tátil. Um software de processamento de sinal é então usado para calcular a função de transferência das forças MLS e vibrações medidas. O método de medição MLS usa uma sequência binária pseudo-randômica como o sinal e tem a vantagem de aumentar o sinal de medição.

Analísadores de espectro multicanais especializados têm incorporado a capacidade para computar funções de transferência. O uso do analisador de espectro tem a vantagem de ser computacionalmente eficiente. Por outro lado, o software de processamento de sinal pode oferecer mais flexibilidade na análise de dados de sinais e permite o uso de diferentes métodos de processamento de sinal digital como o MLS. Os programas típicos de medição envolvem a aquisição de dados em campo e o posterior processamento das informações em laboratório. Contudo, os avanços recentes em instrumentação e softwares de processamento de sinal permitem que os dados possam ser coletados e analisados enquanto em campo.

#### 5.6.3.2. Análise de Dados da Transferência de Mobilidade

Duas diferentes abordagens têm sido usadas para desenvolver estimativas de linha-fonte de transferência de mobilidade. A primeira consiste em usar linhas de transdutores e a segunda consiste em uma linha de posições de impacto. Os passos para desenvolver curvas de linha fonte de transferência de mobilidade a partir de testes usando uma ou mais linhas de transdutores são mostrados na Figura 26. O procedimento começa com a função de transferência de faixa de sintonização estreita entre a fonte e o receptor a cada posição de medição. Pode existir um mínimo de 4 distâncias em qualquer linha de testes. Por causa da possibilidade de variações locais nas características de propagação, se não for mesmo possível, duas ou mais linhas podem ser usadas para caracterizar um local. Um total de 10 a 20 posições de transdutores é freqüentemente usado para caracterizar um local.

O primeiro passo no procedimento de análise é calcular as funções de transferência equivalentes a uma banda de terço de oitava. Isso reduz o espectro para 15 números. Como mostrado na Figura 26, o espectro de banda de terço de oitava é mais aplanado que o espectro de faixa de sintonização estreita. O próximo passo é calcular a curva de transferência de mobilidade mais adequada em função da distância para cada banda de terço de oitava. Quando analisando um local específico, a curva mais adequada será baseada

de 10 a 20 pontos. Até várias centenas de pontos podem ser usados para determinar a média das curvas mais adequadas para um número de lugares.

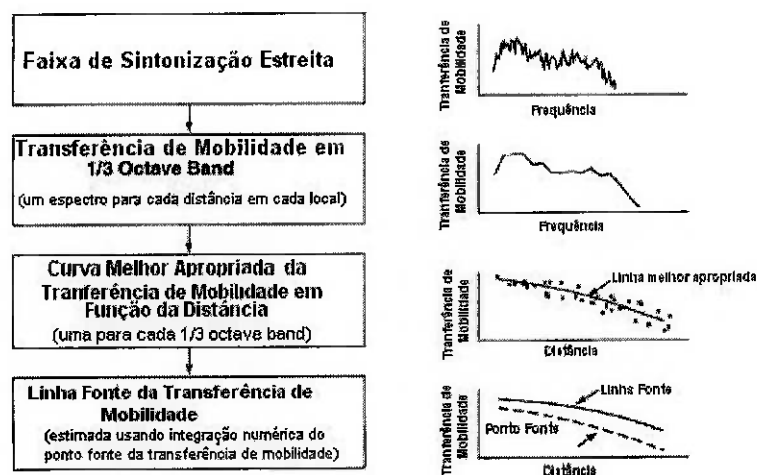
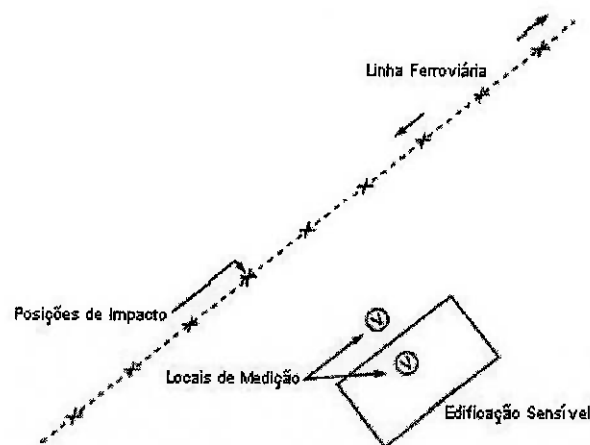


Figura 26 - Análise da Transferência de Mobilidade.

As curvas de banda de terço de oitava mais adequadas podem ser diretamente aplicadas a pontos de fonte de vibração. Para uma linha fonte de vibração como trem, a integração numérica deve ser usada para calcular a linha-fonte de transferência de mobilidade equivalente.

O segundo procedimento de estimação da linha-fonte de transferência de mobilidade, mostrado esquematicamente na Figura 27, é melhor para avaliação detalhada de trajetórias de vibração em edificações específicas. Os transdutores de vibração são posicionados em pontos específicos de interesse e uma linha de impacto é usada. Por exemplo, um trem de 50m pode ser representado por uma linha de 11 posições de impacto ao longo da linha central dos trilhos em intervalos de 4,5 metros. É possível somar os resultados dos pontos-força por integração para calcular diretamente a linha-fonte de transferência de mobilidade. Isso é uma abordagem consideravelmente mais direta do que a utilizada com as linhas de transdutores de vibração.





**Figura 27 - Esquema de Transferência de Mobilidade com Uma Linha de Impactos**

#### 5.6.3.3. Força Densidade

A força densidade não é uma quantidade que possa ser medida diretamente; ela deve ser deduzida através das medições da transferência de mobilidade e vibração do trem no mesmo local. Para derivar a força densidade, os melhores resultados são conseguidos derivando a linha-fonte de transferência de mobilidade de uma linha de impactos. A força densidade para cada 1/3-octave band é então simplificada:

$$L_F = L_V - TM_{Line}$$

Onde:  $L_F$  é a força densidade,

$L_V$  é a vibração transmitida pelo solo medida e

$TM_{Line}$  é a linha-fonte de transferência de mobilidade.

A abordagem padrão é usar a média da força densidade de medições em três ou mais posições.

#### 5.6.4. Avaliação do Impacto da Vibração

Os objetivos da avaliação são inventariar todos os locais de uso sensíveis à vibração que possam ser adversamente impactados pelo ruído ou vibração transmitidos pelo solo originados do projeto proposto e determinar as medidas de mitigação que irão ser requeridas para eliminar ou minimizar o impacto. Isso requer projetar os níveis de ruído ou vibração transmitidos pelo solo, comparando as projeções dos critérios de impacto, e desenvolver uma lista de medidas de mitigação adequadas. Note que a Avaliação Geral é incorporada como um passo intermediário na avaliação de impacto por causa de sua relativa simplicidade e potencial para restringir as áreas onde a Análise Detalhada necessita ser feita.

A avaliação do impacto de vibração deve prosseguir de acordo com os seguintes passos:

1. Mapear inteiramente a linha de transporte proposta para identificar áreas onde exista potencial de impacto da vibração transmitida pelo solo. Se não houver locais de uso sensível à vibração dentro das distâncias de mapeamento, não é necessário realizar nenhuma outra avaliação a mais.
2. Definir as curvas do nível de vibração solo-superfície em função da distância que pode ser usada com a Avaliação Geral. Normalmente isso irá significar selecionar a curva apropriada para a modalidade de transporte proposta. Para modalidades de transporte menos comuns, pode ser necessário fazer medições em uma instalação existente.
3. Usar procedimentos da Avaliação Geral para estimar os níveis de vibração para edificações ou grupos de edificações específicas. Os níveis projetados são comparados com os critérios de impacto para Avaliação Geral da Vibração para determinar se este é provável. O objetivo desse passo é desenvolver uma catalogação acurada das edificações que irão experimentar o ruído ou a vibração transmitida pelo solo que excedam os critérios. Aplicar os critérios de impacto para a Avaliação Geral resultará

em uma avaliação conservadora do impacto. Isso é, é possível que algumas edificações que são identificadas como impactadas podem não ser impactadas sob uma análise mais detalhada. Contudo, nesse estágio é melhor incluir algumas edificações que podem não ser impactadas que excluir algumas edificações que são prováveis de serem impactadas. Em locais onde a Avaliação Geral indica impacto, as mais refinadas técnicas da Análise Detalhada podem ser empregadas.

4. Em alguns casos poderá ser necessário realizar um estudo de vibração para caracterizar a vibração ambiente existente. Embora o conhecimento da vibração ambiente existente não seja geralmente requerido para avaliar o impacto de vibração, existem vezes em que um estudo das condições existentes é valioso.
5. Para áreas onde os critérios de impacto da Avaliação Geral são excedidos, rever medidas de mitigação de impacto potencial e reunir uma lista de abordagens praticáveis para controle da vibração. Para ser praticável, a medida, ou combinação de medidas, deve ser capaz de prover uma significativa redução dos níveis de vibração, ao menos 5VdB, enquanto sendo razoável para o ponto de vista de custos adicionais. A avaliação de impacto e a revisão das medidas de mitigação são preliminares a esse ponto visto que o controle da vibração é dependente da frequência, e recomendações específicas de medidas de controle de vibração podem ser feitas somente depois de avaliar as características das frequências de vibração.
6. Usar a Análise Detalhada da Vibração para refinar a avaliação de impacto e para desenvolver medidas detalhadas de mitigação da vibração onde necessárias. É normalmente necessário projetar o espectro de vibração em edificações que serão afetadas em níveis maiores que os limiares de impacto. Esse tipo de avaliação normalmente é realizado mais como parte do projeto final que durante o estágio de avaliação de impacto ambiental. Sendo a Análise Detalhada mais acurada que a Avaliação Geral existirão vezes em que a Análise Detalhada irá mostrar que os níveis de vibração e

ruídos transmitidos pelo solo estarão abaixo dos critérios aplicáveis e que a mitigação não é requerida. Se os níveis projetados ainda permanecem acima dos limites, os espectros fornecidos pela Análise Detalhada serão necessários para avaliar as abordagens de controle da vibração.

#### 5.6.5. Mitigação da Vibração

O propósito da mitigação da vibração é minimizar os efeitos que a vibração transmitida pelo solo projetada terá em locais de uso sensível. Tendo em vista que a vibração transmitida pelo solo não ser um problema tão comum como o ruído ambiental, as abordagens de mitigação não tem sido muito bem definidas. Em alguns casos, foram necessários desenvolver abordagens inovadoras para controlar o impacto.

Entre exemplos que tiveram sucesso estão os sistemas de lajes flutuantes.

A importância da manutenção adequada de rodas e trilhos no controle de vibração transmitida pelo solo não pode ser exageradamente enfatizada. Problemas com desgastes e defeitos nas rodas ou trilhos podem aumentar os níveis de vibração tanto como 20 dB em casos extremos, anulando mesmo os efeitos das mais efetivas medidas de controle da vibração. É raro que medidas práticas proporcionem mais de 15 a 20 dB de atenuação. Quando existem problemas com a vibração transmitida pelo solo com equipamentos de transporte existentes, a melhor medida de controle da vibração freqüentemente é implementar um novo ou aperfeiçoar os procedimentos de manutenção. Esmerilhar os trilhos desgastados ou defeituosos, usinar as rodas para eliminar deformidades e restaurar o perfil da roda pode proporcionar mais redução da vibração do que seria obtida com a completa realocação do sistema de trilhos existentes com lajes flutuantes. Dados os trilhos e veículos em boas condições, as opções para maiores reduções nos níveis de vibração se encaixam em uma das sete categorias:

- **Manutenção:** Como discutido acima, programas de manutenção efetivos são essenciais para controlar a vibração transmitida pelo solo. Quando as superfícies das rodas e dos trilhos permitem rebaixar os níveis de vibração podem aumentar tanto como 20 dB comparando com um sistema novo ou bem-mantido. Alguns procedimentos de manutenção que são particularmente efetivos em evitar a vibração transmitida pelo solo são:
  - **Trilhos esmerilhados em uma base regular:** O esmerilhamento de trilhos é particularmente importante para os trilhos que desenvolvem rugosidades. O esmerilhamento periódico dos trilhos realmente resulta em uma boa economia por ano no uso de rodas e trilhos.
  - **Rodas usinadas:** Para perfilar novamente a roda, proporcionar uma superfície de contato menos rugosa, e remover as deformidades da roda. A maioria dos resultados da redução drásticos da vibração resulta da remoção das deformidades das rodas. Contudo, melhorias significantes também podem ser observadas simplesmente na usinagem da pista de rolamento.
  - **Implementar programas de recondicionamento dos veículos,** especialmente quando componentes como o sistema de suspensão, freios, rodas e detectores de deslizamento estão envolvidos.
  - **Instalar sistemas de detectores de deformidades das rodas** para identificar os veículos que estão mais necessitados de usinagem nas rodas. Esses sistemas estão se tornando mais comuns em ferrovias e sistemas de passageiros intermunicipais, mas são relativamente raros em outros sistemas de transporte.
- **Planejamento e Projeto de Trilhos Especiais:** Uma grande porcentagem dos impactos de vibração originados de novas instalações de transportes

são freqüentemente causados por impactos das rodas em trilhos especiais de desvios e cruzamentos. Quando possível, a medida mais efetiva de controle da vibração é reposicionar estes trilhos especiais em áreas menos sensíveis à vibração. Algumas vezes isso requer ajustar o local em várias centenas de metros para não ter um impacto adverso significativo no plano de operação para o sistema. Uma revisão cuidadosa dos locais de cruzamento e desvios durante o estágio de engenharia preliminar é um passo importante para minimizar o potencial de impacto de vibração. Outra abordagem é usar dispositivos especiais em desvios e cruzamentos especiais que incorporam mecanismos próximos aos vãos entre trilhos contíguos. Jacarés com mecanismos carregados à mola ou jacarés com pontos móveis podem reduzir significativamente os níveis de vibração perto dos cruzamentos.

- **Especificações dos Veículos:** O veículo ferroviário ideal com respeito à minimização da vibração transmitida pelo solo, deve ter um baixo peso (peso das várias partes do veículo que não são sustentados pelas molas), uma suspensão primária leve, o mínimo de contato metal-com-metal entre as partes em movimento do truck, e rodas lisas e perfeitamente redondas. Um limite para a ressonância vertical de frequência da suspensão primária pode ser incluída nas especificações para qualquer veículo novo. Uma frequência de ressonância vertical a 12 Hz ou menos é suficiente para controlar os níveis de vibração transmitida pelo solo. Alguns têm recomendado que as especificações de veículos de transporte requeiram que a frequência de ressonância vertical seja menos que 8 Hz.
- **Sistemas Especiais de Fixação de Trilhos:** Quando a avaliação da vibração indica que os níveis de vibração serão excessivos, é normalmente o sistema de fixação de trilhos que é mudado para reduzir os níveis de vibração. As lajes flutuantes, placas resilientes de fixação e cliques de alta resiliência têm sido usados em caminhos subterrâneos para reduzir os níveis de vibração transmitida pelo solo. Para serem efetivas, todas essas medidas devem ser otimizadas para o espectro de frequência da vibração. A maioria desses procedimentos relativamente padrões tem sido usados

com sucesso em vários projetos de caminhos subterrâneos. Aplicações em trilhos no nível da superfície e elevados são menos comuns. Isso porque os problemas de vibração são menos comuns para trilhos no nível da superfície e elevados; o custo das medidas de controle da vibração é a porcentagem mais alta do custo da construção em trilhos no nível da superfície e elevados; a exposição para os elementos pode requerer significantes modificações no projeto.

- **Modificações nas edificações:** Em algumas circunstâncias é prático modificar a edificação impactada para reduzir os níveis de vibração. A isolamento da vibração em edificações basicamente consiste em sustentar a fundação da edificação com apoios de elastômero similares a apoios de sustentação de pontes. A isolamento da vibração de edificação é raramente uma posição para edificações existentes; aplicações normais são possíveis somente em novas construções. Quando os equipamentos sensíveis à vibração como microscópios eletrônicos serão afetados pela vibração do transporte, modificações na estrutura da edificação pode ser o método com maior custo-benefício para controlar o impacto. Por exemplo, o piso sobre o qual os equipamentos sensíveis à vibração estão localizados poderia ser reforçado e isolado do restante da edificação para reduzir a vibração. Alternativamente, o equipamento poderia ser isolado da edificação por um custo muito menor.
- **Mudanças na Operação:** A mudança operacional mais óbvia é reduzir a velocidade do veículo. Reduzir a velocidade do trem por um fator de 2 irá reduzir os níveis de vibração em aproximadamente 6 dB; outras mudanças operacionais que podem ser efetivas em casos especiais, como por exemplo usar o equipamento que gera os níveis mais baixos de vibração durante o período noturno, quando as pessoas são mais sensíveis à vibração e ruído. Ajustar os horários noturnos para minimizar movimentos nas horas mais sensíveis. Enquanto existem benefícios tangíveis da redução de velocidade e limites na operação durante os períodos de tempo mais sensíveis, esses tipos de medidas normalmente não são praticas do ponto de vista das necessidades dos serviços. Além disso, a

redução da vibração conseguida através das restrições operacionais requer monitoramento contínuo e será anulada se os operadores não aderirem as políticas estabelecidas. Como opção para controle de ruído, não é recomendada limites em operações como um modo para reduzir impactos da vibração.

## 6. DESENVOLVIMENTO

### 6.1. ÁBACO DE CORRELAÇÃO

Foi efetuado um trabalho de pesquisa de medições realizadas em pontos distintos de sistemas metro-ferroviários e são apresentados a seguir de forma a ilustrar os parâmetros encontrados:

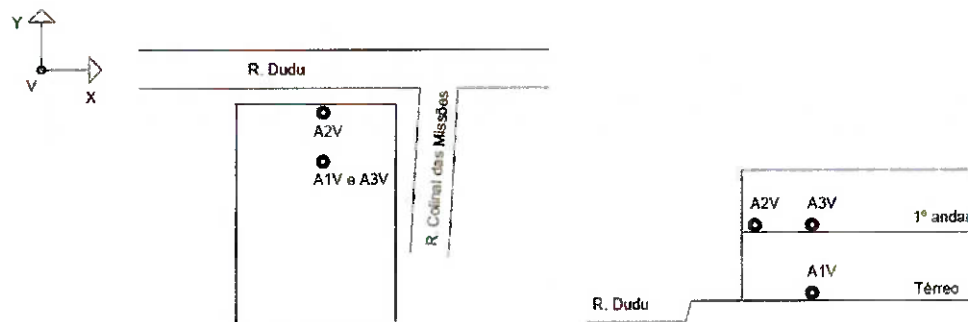
#### 6.1.1. Extensão Leste (Expresso Leste – CPTM – Trecho DOM-JBO) (RT-1125-MD-001...2006)

Na Extensão Leste foram estudados 2 imóveis com características próprias de distância radial, tipo de massa mola e geologia. Um resumo destas características é apresentado a seguir:

Posição	Localização	Direção
A1V	Sala no Térreo	Vertical
A2V	Varanda no 1º andar	Vertical
A3V	Quarto no 1º andar	Vertical

Tabela 10 – Posicionamento dos Transdutores

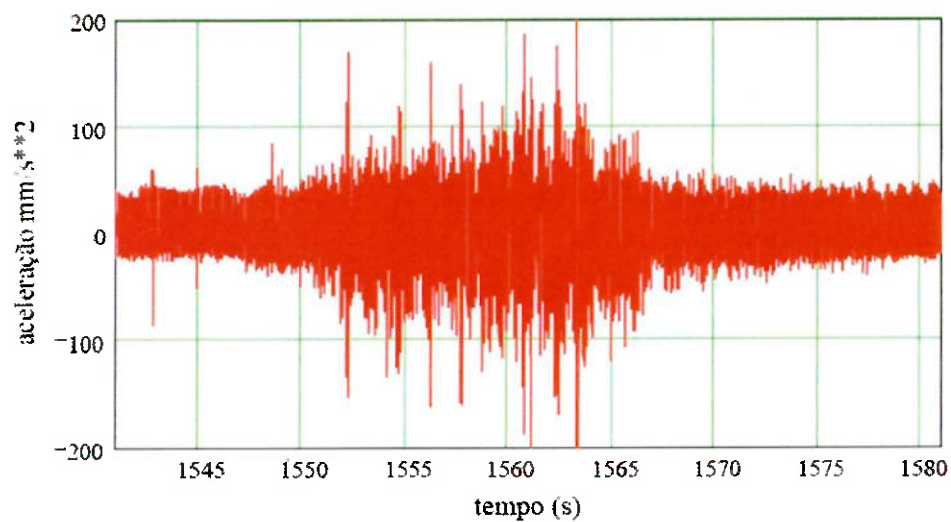




**Figura 28 – Esquema de Localização dos Transdutores**

#### 6.1.1.1. Exemplos de Gráficos e Espectro

Os gráficos e espectros apresentados a seguir demonstram a forma de aquisição de dados da medição com a passagem do trem.



**Figura 29 – Gráfico Direto do Acelerômetro - Aceleração**

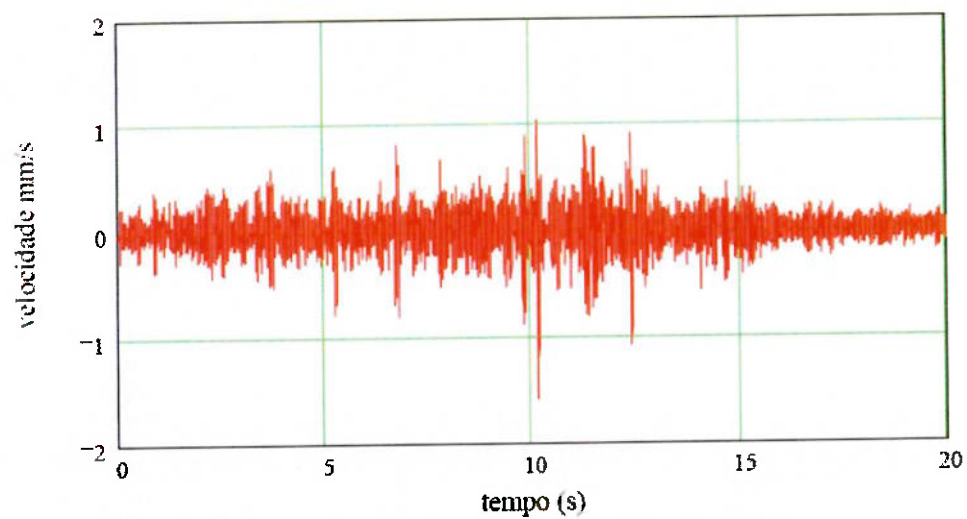


Figura 30 – Gráfico Tratado para Velocidade

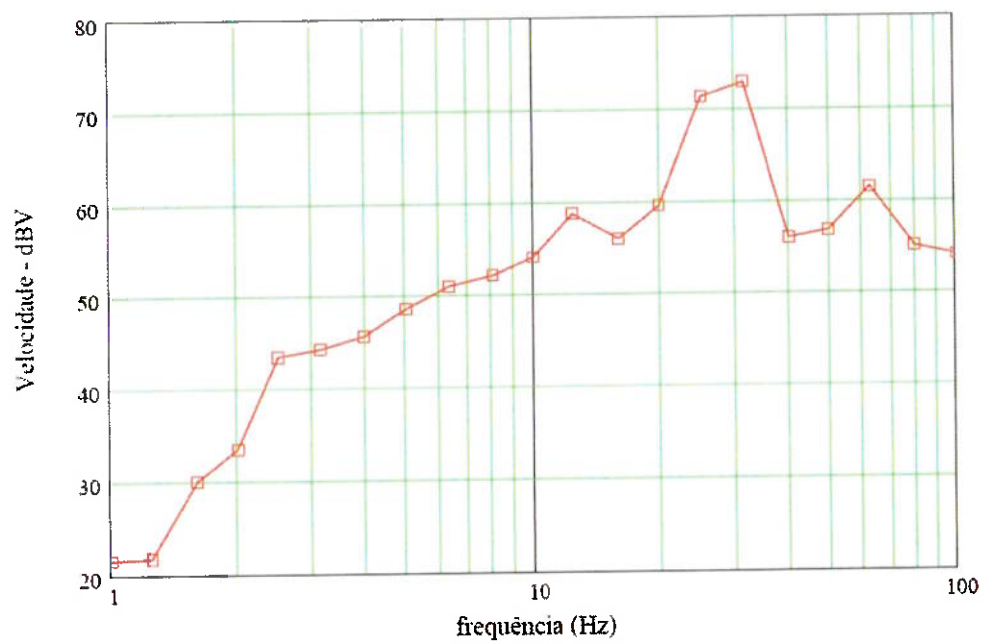


Figura 31 – Espectro da Velocidade de Vibração x Banda de Frequência

### 6.1.1.2. Valores Encontrados

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos na medição, sendo apresentado na tabela 11 os valores de vibração em VdB, ou dBV, por banda de frequência e a tabela 12 mostra os valores globais que são utilizados como referência para comparação com as normas e recomendações utilizadas internacionalmente.

Frequência (Hertz)	Velocidade (dBV)		
	A1V	A2V	A3V
1	16,4	26,0	21,6
1,25	17,8	24,5	21,7
1,6	25,6	29,5	29,9
2	20,3	34,0	33,5
2,5	27,5	35,6	43,4
3,15	32,8	39,2	44,2
4	36,4	38,2	45,7
5	36,1	43,8	48,5
6,3	41,4	42,0	50,8
8	41,5	47,5	52,1
10	42,3	49,1	54,0
12,5	45,8	49,8	58,8
16	41,7	49,9	56,0
20	44,3	56,8	59,5
25	51,7	60,1	71,4
31,5	49,4	65,8	73,0
40	59,2	55,2	56,0
50	58,6	52,8	56,9
63	48,9	60,8	61,5
80	39,0	46,8	55,1
100	39,5	43,5	54,0

**Tabela 11 – Frequência pela Velocidade de Vibração**

Prova	Passagem	Valor global (dBV)			Trens passando
		A1V	A2V	A3V	
1	1	64,8	70,2	76,1	ITA
1	2	64,3	70,3	76,5	ITA
2	1	62,0	63,2	67,7	DBO
2	2	62,8	66,7	68,7	DBO
2	3	63,4	68,7	75,9	ITA
LEGENDA					
ITA = Trem partindo da Estação Itaquera					
DBO = Trem partindo da Estação Dom Bosco					

**Tabela 12 – Valor Global de Vibração**

### 6.1.1.3. Detalhes de Operação da Via

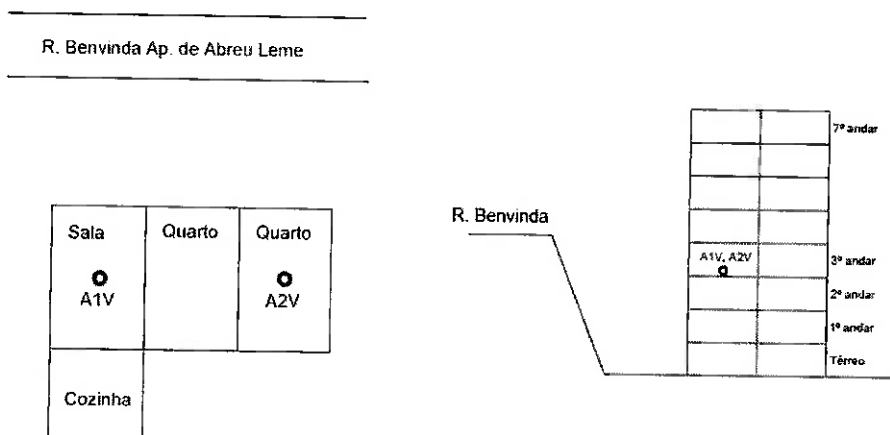
- Trem da CPTM: carregamento aproximado de 21t/eixo
- Características das vias:     Via 1: Massa Mola com Kest. 48MN/m  
     Via 2: Massa mola com Kest. 80MN/m
- Endereços:     1) Rua Dudu, 140  
                           2) Rua Botuporã, 184

### 6.1.2. Linha 1 – Azul (Trecho SAN-JPA) (RT-1125-MD-002...2006)

O estudo na Linha 1 – Azul está compreendido em 3 imóveis, nos quais além das medidas de vibração, foram realizadas medidas de ruído secundário em função da vibração propagada com a passagem dos trens, para exemplificar apresentaremos as medições realizadas na R. Benvinda Aparecida de Abreu Leme, 144 ap. 33.

Posição	Localização	Direção
A1V	Sala	Vertical
A2V	Quarto	Vertical

**Tabela 13 – Posicionamento dos Transdutores**



**Figura 32 – Esquema de Localização dos Transdutores**

### 6.1.2.1. Exemplo de Gráficos e Espectros

#### Vibração

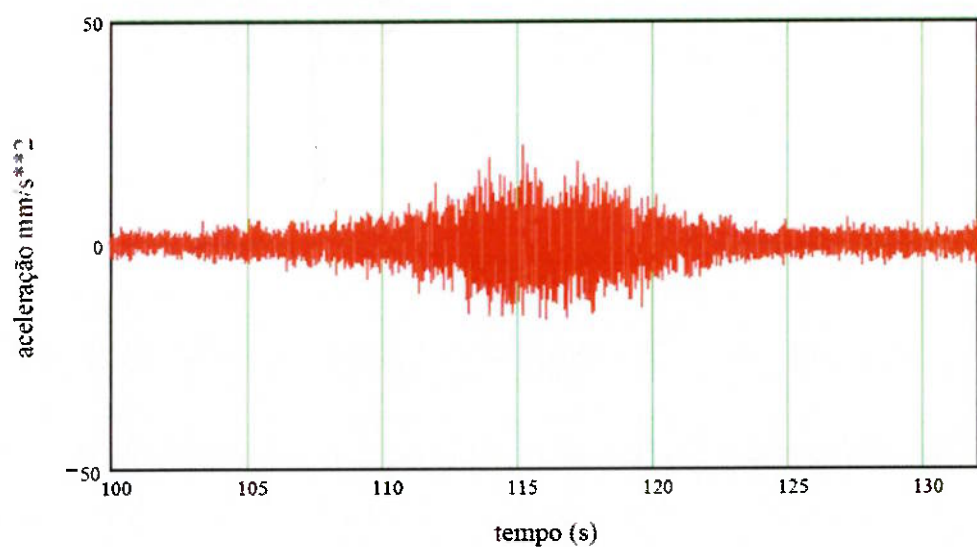


Figura 33 – Gráfico Direto do Acelerômetro - Aceleração

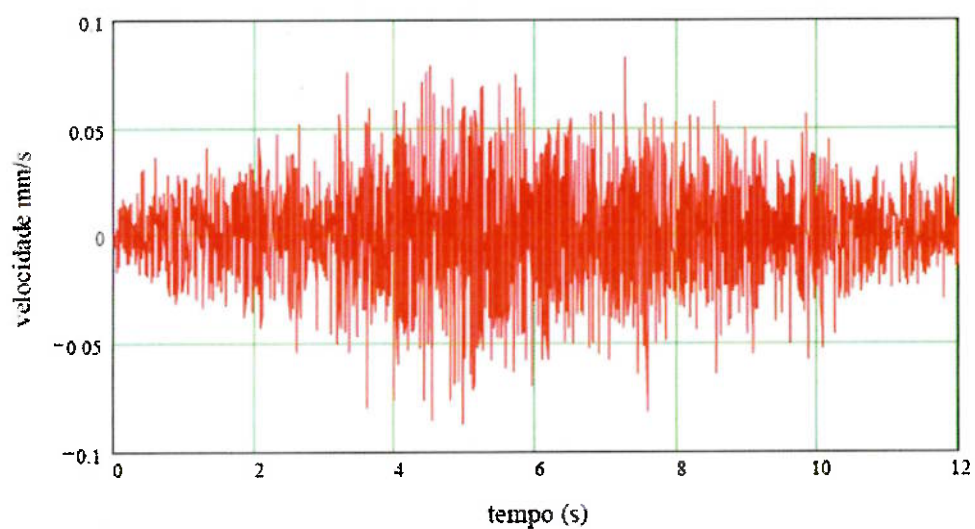
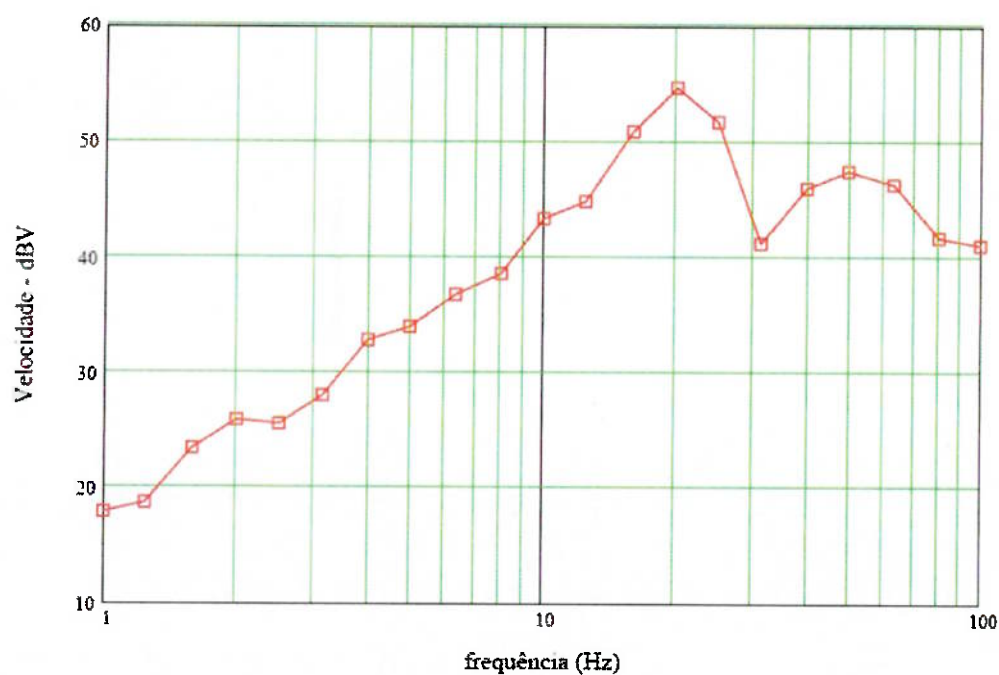
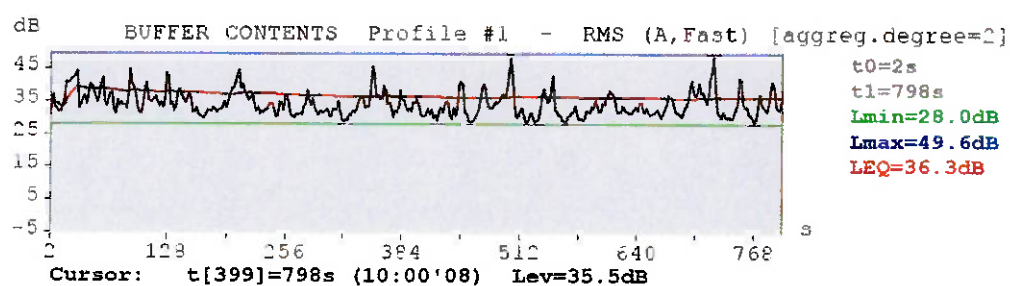


Figura 34 – Gráfico Tratado para Velocidade

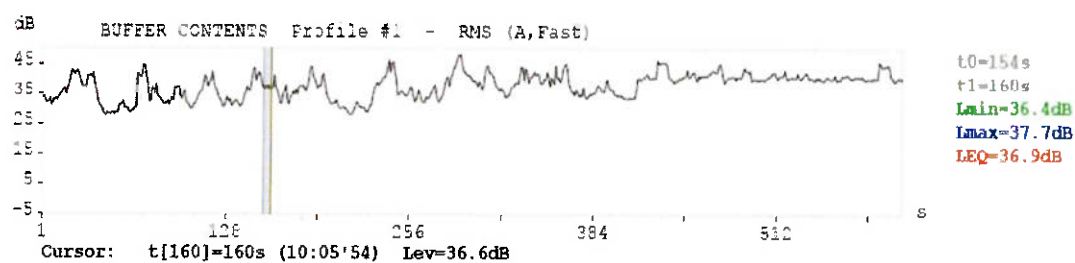


**Figura 35 – Espectro da Velocidade de Vibração x Banda de Freqüência**

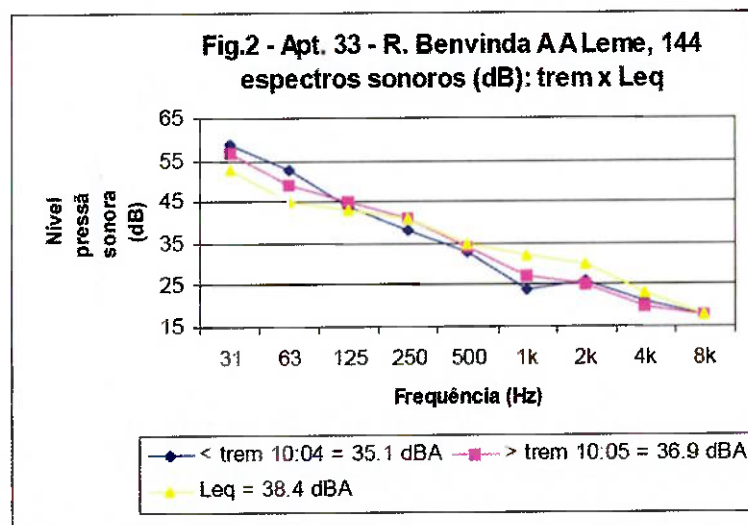
### Ruído Secundário



**Figura 36 – Gráfico do Ruído no Tempo**



**Figura 37 – Seleção da Passagem do Trem**



**Figura 38 – Gráfico de Análise Sonora**

#### 6.1.2.2. Valores Encontrados para o Ruído

Para termos uma idéia da análise realizada, conforme o documento “Diretrizes para Projeto de Instalações de Trânsito Rápido”, de 1979 da APTA, a Tabela 1 introduz os Critérios para Ruídos Secundários Máximos Provocados pela Operação de Trens, sendo o nível máximo admitido para imóveis de uso residência com baixa densidade de ocupação é de 35 dBA. No caso da medição do Ruído Secundário devido à passagem dos trens encontramos valores da ordem de 36,9 dBA.

### 6.1.2.3. Valores Encontrados para Vibração

Frequência (Hertz)	Velocidade (dBV)	
	A1V	A2V
1	17,7	13,9
1,25	18,6	13,1
1,6	23,3	21,8
2	25,8	24,3
2,5	25,5	30,1
3,15	27,9	32,5
4	32,7	32,5
5	33,8	37,9
6,3	36,6	39,2
8	38,4	42,6
10	43,2	44,5
12,5	44,7	44,5
16	50,8	53,4
20	54,5	49,6
25	51,7	50,6
31,5	41,1	43,2
40	45,9	48,2
50	47,3	49,1
63	46,1	51,0
80	41,6	46,0
100	40,9	41,9

Tabela 14 – Frequência pela Velocidade de Vibração

Prova	Passagem	Valor global (dBV)	
		A1V	A2V
1	1	59,0	59,4
1	2	59,3	59,9
2	1	59,9	59,9
2	2	60,0	60,9

Tabela 15 – Valor Global de Vibração



#### 6.1.2.4. Detalhes da Operação da Via

- Trem do Metrô: carregamento aproximado de 16t/eixo
- Características das vias:

Via rígida sem massa mola apoiada em dormentes de madeira. Neste trecho de via existiam aparelhos de mudança de via, que foram retirados com o objetivo de mitigar o ruído e vibração oriundo da passagem dos trens.

### 6.2. MAPEAMENTO DAS LINHAS

Para mapear as linhas metroviárias necessitaríamos de diversas medidas em pontos equidistantes ao longo de cada linha para parametrizar a atual condição, com relação aos ruídos e vibrações transmitidas pelo solo advindas do contato roda x trilho, para podermos efetuar comparações periódicas futuras.

Em função de não termos os equipamentos necessários às medições, não pudemos efetivamente dar andamento neste mapeamento. A intenção é continuarmos os contatos ora iniciados com empresas prestadoras de serviço para conseguirmos efetivamente mapear as linhas do Metrô-SP com relação aos ruídos e vibrações.

### 6.3. ESTABELECIMENTO DE ROTINAS

Documentar rotinas e parâmetros de medição de ruído e vibração estabelecidas em pontos pré-definidos pelo Mapeamento das Linhas, com o objetivo de monitorar desempenho dos sistemas e estruturas para a gestão pela manutenção. Estas rotinas também servirão para atendimento a reclamações de lindeiros relativas a ruído e vibração oriundas dos Sistemas Metro-ferroviários.

## 7. CONCLUSÃO

O Metrô de São Paulo tem os traçados das suas linhas passando em áreas densamente ocupadas por edificações que desenvolvem atividades de diversas naturezas e em horários variados.

No Metrô, dá-se o início da operação comercial às 4h40 se estendendo até as 01h00, em seguida acontece a manutenção nos diversos sistemas que compõe o Metrô com a entrada das equipes nas diversas linhas e frentes de trabalho para as execuções dos serviços, destacando o serviço de esmerilhamento da via, socaria de lastro, troca de trilho, tanto em túneis como em nível de superfície, além das atividades desenvolvidas nos diversos Pátios de Manutenção.

Devido às atividades quase ininterruptas no Metrô, principalmente na movimentação de trens durante a operação comercial, o convívio com os lindeiros se estende por todo esse período.

Comumente recebemos reclamações de ruídos e vibrações advindas do contato roda x trilho. Como dito, para o atendimento destas reclamações desenvolvemos atividades de medições de ruído e vibração executadas por empresas contratadas. Atualmente os tratamentos são pontuais, ou seja, busca-se conhecer os níveis de ruído e vibração existentes para o local determinado e então estudar medidas de mitigação necessárias, caso os níveis apresentados estejam acima dos permitidos. Hoje esta rotina de medição não está procedimentada dentro do Metrô-SP, embora se faça uma correlação com situações já avaliadas, principalmente em casos assemelhados.

O uso da metodologia Avaliação Geral apresentada neste trabalho padronizaria as rotinas e os critérios nas avaliações dos níveis de ruído e vibração possibilitando o levantamento de dados para elaboração de curvas bases específicas para o Metrô de São Paulo e onde só Avaliação Geral seria suficiente para análise da situação para tomada de uma decisão, não

necessitando da metodologia de Avaliação Detalhada, na qual o Metrô-SP já desenvolve suas etapas na fase de projeto. O uso da metodologia de Avaliação Detalhada para levantamento dos níveis de ruído e vibração possibilita obtenção de informações mais refinadas para tomada de decisão. Toda decisão para mitigação tanto do ruído ou da vibração exige altos investimentos, daí a necessidade de uso da metodologia adequada.

Nas situações de projeto, esta metodologia poderá ser utilizada na prospecção para obter informações importantes para o projeto do traçado, métodos construtivos e projeto da via permanente.

Atualmente esta metodologia está sendo utilizada para prospecção no projeto da extensão Leste da Linha-2 Verde.

Para verificarmos a consistência dos dados adquiridos nas medições apresentadas no Item 6.1, utilizamos a ferramenta "Solver" do aplicativo Excel da Microsoft com o objetivo de comprovarmos que é possível gerar as curvas bases através de medições em pontos conhecidos ao longo das linhas dos sistemas Metro-ferroviários. Aplicamos à equação Gaussiana (distribuição normal), que foi adotada com o melhor nível de aderência entre as equações disponíveis no aplicativo. Reproduzimos a curva da Figura 18 "locomotive powered/ passenger or freight" com pequena margem de desvio conforme demonstrado a seguir.

$$F(x) = A * \exp[-(x/S)^n]$$

Onde utilizamos:  $A[\text{vdB}] = 1,11\text{E}+02$

$S[\text{ft}] = 2,07\text{E}+03$

$n = 0,35$

$E[\%] = 9,08 = \text{Erro Quadrático Médio}$

$\text{Correlação} = 0,99932531$

Distância	Dados Disponíveis da Fig.18	Dados da Regressão	Erro
10	94,5	94,95	0,19909006
20	91,5	90,97	0,28117132
30	88,5	88,26	0,05703768
40	86	86,15	0,02347183
50	84,5	84,41	0,00873151
60	83	82,90	0,0090551
80	80,5	80,40	0,01094203
100	78	78,33	0,1080198
150	74	74,30	0,09020221
200	71	71,23	0,05215567
300	67	66,60	0,15718837

Tabela 16 – Aplicação da Equação Normal

Através dos dados obtidos da tabela 16, podemos plotar o gráfico da figura 37 e concluímos que poderíamos adotar esta equação como base para geração de curvas próprias para o Metrô-SP.

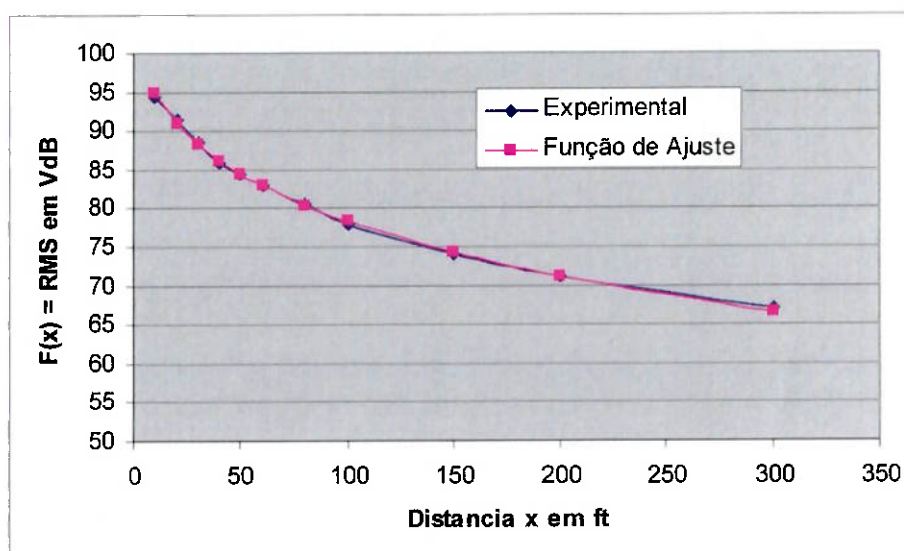


Figura 39 – Curva de Comparação Teórica x Equação Normal

Apesar desta conclusão, não conseguimos efetuar as medições necessárias, utilizando um mesmo trecho de túnel como padrão e apenas variando a distância radial o que nos forneceria valores confiáveis de velocidade de vibração, sem a influência dos tipos de solo, edificação e fundação.

Isto não inviabilizou o estudo de campo, haja visto que só pudemos obter esta conclusão através de tentativas de utilização do aplicativo “Solver” com os dados das medições que ignoravam as condições geológicas e das edificações, as curvas geradas foram completamente diferentes das apresentadas na figura 37.

Acreditamos que estamos bem próximo de termos as curvas características para o Metrô-SP e então poderemos utilizar estas para o controle preditivo dos ruídos e vibrações transmitidas pelo solo advindas do contato roda x trilho.

Temos a convicção de que o estabelecimento de rotinas preditivas de medição dos ruídos e vibrações transmitidas pelo solo em conjunto com as atividades de manutenção, ora aplicadas pelo Metrô-SP, nos conduziria a um efetivo controle das condições da via permanente com relação à mitigação dos ruídos e vibrações.

Com relação à melhoria no processo de atendimento das reclamações registradas com relação ao assunto, descrito no item 3.2, é recomendável à aquisição de equipamentos de medição de ruídos e vibrações que proporcionem maior rapidez, maior transparência e menor subjetividade no atendimento das reclamações sobre ruídos e vibrações oriundas da passagem dos trens, além de fornecerem maior autonomia ao Metrô-SP na determinação das prioridades no controle dos ruídos e vibrações, independentemente da contratação de terceiros para execução de medições puras.

## 8. REFERÊNCIAS

GERB, **Vibration Isolation Systems**, Schwingungsisolierungen GmbH & Co KG 9. Edition 1994.

HJ SAURENMAN, JT NELSON, GP WILSON, **Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control** - 1982.

ISO 2631-2, **Vibrações e Choques Mecânicos – Avaliação da exposição dos indivíduos às vibrações globais dos corpos**, 2ª Edição 01-04-2003.

ISO 1683, **Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels**, 1983.

ISO 4866, **Guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings**, Mechanical vibration and shock, Vibration of buildings, 1990.

RT-1125-MD-001- **Ensaio de Vibrações e Ruídos em Imóveis próximos às Estações Santana e Dom Bosco - Ponto 1**, Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ - 2006.

RT-1125-MD-002 -**Ensaio de Vibração e Ruído em Imóveis próximos às Estações Santana e Dom Bosco - Ponto 2**, Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ - 2006.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION., **FTA-VA-90-1003-06 -Transit Noise and Vibration Impact Assessment** – Carl E. Hanson, David A. Towers, and Lance D. Meister 2006.