

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

FREDERICO SILVA HORTA

**ESTUDOS SOBRE MEDIÇÃO, PREDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE
VIBRAÇÃO E RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO NO
BRASIL**

Belo Horizonte

(2014)

H821e

Horta, Frederico Silva.

Estudos sobre medição, predição e avaliação de vibração e ruído ambiental ferroviário no Brasil [manuscrito] / Frederico Silva Horta. – 2014. 113 f., enc.: il.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 110-113.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Acústica - Teses. 3. Ruído - Medição - Teses. 4. Mecânica - Vibração - Teses. 5. Vibração – Medição – Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

**"ESTUDOS SOBRE A MEDIÇÃO, PREDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE
VIBRAÇÃO E RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO NO BRASIL"**

Frederico Silva Horta

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Alexander Mattioli Pasqual
DEMEC - UFMG

Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda
UFSC

Belo Horizonte, 13 de junho de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço a coordenação e aos funcionários da secretaria do Departamento de Engenharia de Estruturas – UFMG pela colaboração e paciência, aos meus professores que me ensinaram a “aprender a aprender” e a todos os demais que contribuíram direta ou indiretamente para a realização do presente trabalho.

Em especial agradeço aos professores Marco Antônio Vecci e Francisco Carlos Rodrigues pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho e a minha esposa Egiancarla Silva Horta pelo apoio, ajuda e companhia durante todo o tempo.

RESUMO

Neste trabalho são desenvolvidos vários tópicos do estudo de vibração e ruído ambiental ferroviário. O objetivo específico deste trabalho é propor metodologias para medir, prever e avaliar vibração e ruído ambiental de ferrovias brasileiras. Outro importante objetivo é a análise da coerência dos critérios de avaliação de vibração e ruído existentes na literatura consultada. Para a realização desse trabalho, foi necessária uma etapa experimental com o objetivo de caracterizar níveis de vibração e ruído de passagens de composições ferroviárias. As metodologias propostas e utilizadas para ruído ambiental ferroviário foram a estabelecida pela norma NBR 10151 (2000) para medição, a praticada nos Estados Unidos da América para avaliação e a estabelecida pela norma ISO 9613 (com adaptações) para simulação. As metodologias propostas e utilizadas para vibração ambiental ferroviária foram a estabelecida pela norma DIN 45669 para medição e o chamado “Método Sueco para Predição de Vibração” com adaptações de predição. Para avaliação da vibração ambiental ferroviária foram aplicados diversos critérios e proposto uma metodologia de estudo futuro de forma a poder indicar cientificamente um critério de avaliação.

Palavras-chaves: Vibrações Mecânicas. Dinâmica de Estruturas. Vibração e Ruído Ferroviário. Critérios de Avaliação de Vibração e Ruído. Predição de Vibração e Ruído. Medição de Vibração e Ruído.

ABSTRACT

This work developed various topics in the study of railway noise and vibration. The goal of this study is to propose methodologies to measure, predict and evaluate environmental vibration and noise of the Brazilian railroads. Another important objective é to analyze the consistency of the vibration and noise evaluation criteria available in the literature. To carry out this work, it was necessary a experimental stage in order to characterize the level of vibration and noise of rail by pass.

The methodologies proposed and used for railway environmental noise were established by NBR 10151 (2000) for measurement, as practiced in the United States for evaluation and established by ISO 9613 (with adjustments) for simulation. The methodologies proposed and used to railway environmental vibration were established by DIN 45669 for measurement and the so-called "Swedish Method for Predicting Vibration" with adaptations for prediction. To evaluate the railway ambient vibration various criteria were applied and proposed a methodology for future study in order to be able to indicate scientifically evaluation criteria.

Keywords: Mechanical Vibrations. Structural Dynamics. Environmental Vibration. Evaluation Criteria Vibration. Prediction of Vibration. Vibration Measurement.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.2 JUSTIFICATIVAS	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 FONTES DE VIBRAÇÃO E RUÍDO FERROVIÁRIO	14
2.1.1 Rolagem	14
2.1.2 Curva Squeal (“curve squeal”)	15
2.1.3 Tração Motora	15
2.1.4 Ruído Aerodinâmico	16
2.1.5 Outras Fontes de Vibração e Ruído Ferroviário	17
2.2 TERMOS E DESCRITORES DE RUÍDO AMBIENTAL	17
2.3 TERMOS E DESCRITORES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL	22
3.2 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL	23
3.3 AVALIAÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO	25
3.4 AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA	33
3.5 PREDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO	38
3.6 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO	43
4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO ADOTADOS	45
4.3 AVALIAÇÕES DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO	48
5 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	49
5.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA E DAS SIMULAÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO	49
6 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
6.1 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO	65
6.1.1 Aplicação dos Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário	65
6.1.2 Proposta e Análise Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário	83
6.1.3 Caracterização dos Níveis de Ruído Típicos Provenientes da Passagem de Composições Ferroviárias	87
6.1.4 Algumas Análises do Descritor Sonoro L_{dn}	89
6.2 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA	91
6.2.1 Aplicação e Avaliação dos Critérios de Avaliação de Vibração Ambiental Ferroviária	91
6.2.2 Proposta de Critério de Avaliação de Vibração Ambiental Ferroviária	95
7 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO	98
7.1 SIMULAÇÃO DE RUÍDO	98
7.1.1 Proposta de Metodologia de Simulação de Ruído Ambiental Ferroviário	98

7.1.2 Aplicação da Proposta de Metodologia de Simulação de Ruído Ambiental Ferroviário	100
7.2 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO	104
7.2.1 Adaptação do Método Sueco de Previsão de Vibração	106
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS	110
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	112

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

IEC	International Electrotechnical Commission
R.M.S	Root Mean Square
USA	United States of America
FFT	Fast Fourier Transform
ISO	International Organization for Standardization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RBC	Rede Brasileira de Calibração
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
DIN	Deutsches Institut Für Normung
TSG	Technical Study Group
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
B&K	Brüel & Kjaer
ANSI	American National Standards Institute
NCSL	National Conference of State Legislatures

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mecanismo de geração de ruído e vibração por rolagem Fonte: Vedrami e Paul (2009).....	12
Figura 2: Fontes de ruído ferroviário e função da velocidade da composição ferroviária Fonte: Vedrami e Paul (2009).....	14
Figura 3: Descritores de vibração ambiental	19
Figura 4: Montagem para afixação do acelerômetro triaxial ao solo	44
Figura 5: Acelerômetro triaxial afixado ao solo e medidor de vibração em um ponto de medição	45
Figura 6: Aplicação do critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado nos EUA	84
Figura 7: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “A” ..	85
Figura 8: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “E” local 01.....	85
Figura 9: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “E” local 02.....	86
Figura 10: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “M”	86
Figura 11: Convergência do descritor sonoro L_{dn} – Ferrovia	87
Figura 12: Níveis de vibração V_{ef} medidos versus avaliação subjetiva.....	92
Figura 13: Resultados da simulação de ruído no entorno da malha ferroviária E local 02 – Visualização 3D.....	99
Figura 14: Resultados da simulação de ruído no entorno da malha ferroviária E local 02 – Mapa Acústico	100
Figura 14: Níveis de vibração V_{ef} previstos no entorno da linha férrea da malha “E” local 02	105
Figura 15: Níveis de vibração V_{ef} previstos no ponto de avaliação E06.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário praticado em diversos países (TSG3, 2009)	24
Tabela 2 Critério de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário praticado nos EUA	30
Tabela 3: Critérios de Avaliação de Vibração LNEC para Seres Humanos	31
Tabela 4: Critérios de Avaliação de Vibração LNEC para Edificações*	32
Tabela 5: Critérios de Vibração USA para Seres Humanos	33
Tabela 6: Critérios de Vibração USA para Edificações	33
Tabela 7: Critérios de Avaliação de Vibração propostos por Whiffin & Leonard para Seres Humanos e Edificações.....	34
Tabela 8: Critérios de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150 para Edificações.	35
Tabela 9: Critérios de Vibração CETESB	36
Tabela 10: Lista dos equipamentos principais para medição de vibração e ruído	42
Tabela 11: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Diurno entre 07:01h e 19:00h.....	48
Tabela 12: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Vespertino entre 19:01h e 22:00h	49
Tabela 13: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Noturno entre 22:01h e 07:00h.....	50
Tabela 14: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária A ...	51
Tabela 15: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária E – local 01.....	52
Tabela 16: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária E – local 02.....	53
Tabela 17: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária M...	55
Tabela 18: Resultados das medições de vibração sem passagem de composições ferroviárias (vibração residual) efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M	56
Tabela 19: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malhas ferroviárias A.....	58
Tabela 20: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malhas ferroviárias E – local 01	59
Tabela 21: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malha ferroviária E – local 02	60
Tabela 22: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malha ferroviária M	61
Tabela 23: Percepção da vibração durante a passagem de composição ferroviária por duas pessoas	62
Tabela 24: Descritores Sonoros determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M .	64
Tabela 25: Descritores Sonoros L_{dn} determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M.....	65
Tabela 26: Descritores Sonoros L_{den} determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M.....	66

Tabela 27: Descritores Sonoros L_{Aeq}^* determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M.....	67
Tabela 28: Tipo de Uso e Ocupação do Solo dos locais de medição no entorno das malhas ferroviários A, E e M	68
Tabela 29: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Bélgica (Bruxelas)	69
Tabela 30: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em São Paulo (CETESB).....	70
Tabela 31: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Dinamarca	71
Tabela 32: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Alemanha	72
Tabela 33: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Coréia do Sul.....	73
Tabela 34: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em Portugal.	74
Tabela 35: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Eslovênia.....	75
Tabela 36: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Turquia.....	76
Tabela 37: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado nos EUA	77
Tabela 38: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em diversos países.....	79
Tabela 39: Comparação entre os descritores sonoros L_{dn} e L_{den} calculados no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M”	88
Tabela 40: Fatores de ponderação em frequência W_k e W_d (ISO 2631-1, 1997).	94
Tabela 41: Média logarítmica dos níveis globais e espectro sonoro medidos no ponto E06 durante a passagem de composições ferroviárias	98
Tabela 42: Níveis sonoros, L_{Aeq} , obtidos para os 04 (quatro) pontos de avaliação na malha ferroviária E, considerando a passagem de 01 (uma) composição ferroviária	99
Tabela 43: Níveis Sonoros L_{dn} – Ferrovia determinados no entorno da Linha Férrea da malha E local 02.	101
Tabela 44: Média logarítmica dos níveis globais e espectro sonoro medido para diversas condições da linha férrea durante a passagem de composições ferroviárias	101
Tabela 45: Níveis de vibração V_{ef} previstos e medidos no entorno da linha férrea da malha “E” local 02.....	103

1 INTRODUÇÃO

Para estudar a vibração e ruído ambiental ferroviário, que são as vibrações e ruídos provenientes de ferrovias sobre seu entorno, é necessário saber como medir, ter critérios de avaliação e realizar predição de ruído e vibração ambiental.

No Brasil, a medição do ruído ambiental ferroviário geralmente é feita por exigência de órgãos ambientais ou em casos quando há a reclamação (ou mesmo ações judiciais) de moradores vizinhos às empresas ferroviárias. Já a medição da vibração ambiental ferroviária geralmente é feita em casos específicos onde se percebe que o potencial de danos a edificações pode ser de elevado risco à estrutura, como no caso de prédios antigos bastante próximos a linhas férreas.

Como no Brasil não há uma regulamentação própria para a medição de vibração e ruído ambiental ferroviário, o responsável técnico utiliza critérios de outros países fundamentados em artigos científicos, documentos técnicos e resoluções.

A predição de vibração e ruído ambiental ferroviário é uma ferramenta para entender quais os efeitos que serão observados no futuro em uma determinada situação. Normalmente, a predição passa a ser desenvolvida e estudada somente quando a medição e os critérios de avaliação já estão consolidados.

Neste contexto, por falta de normas/legislação, no Brasil o método de medição, os critérios de avaliação e a predição de vibração e ruído ambiental ferroviário não são os mesmos utilizados por diferentes profissionais acadêmicos e comerciais. Com isto, por

exemplo, trabalhos diferentes podem obter conclusões opostas no estudo de uma mesma situação.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo específico deste trabalho é propor metodologia para medir, avaliar e realizar predição de vibração e ruído ambiental de passagens de composições ferroviárias, tomando como base normas, dados e textos científicos existentes sobre o assunto. As composições ferroviárias são caracterizadas por serem compostas por unidades tratoras, locomotivas, e unidades tracionadas, vagões de carga ou passageiros. A passagem de composição ferroviária é o deslocamento de uma composição ferroviária por um local considerado. Cabe ressaltar que, além de malhas ferroviárias, ferrovias possuem áreas de apoio como oficinas de manutenção. Entretanto, essas áreas de apoio não são objeto de estudo deste trabalho.

Para o desenvolvimento do objetivo específico é necessário que alguns objetivos secundários sejam realizados. Sendo eles:

- Estudos da literatura existente sobre medição, avaliação e predição de vibração e ruído ambiental ferroviário;
- Realização de medições de vibração e simulação de ruído ambiental baseada em dados experimentais de passagens de composições ferroviárias em diversas malhas ferroviárias;
- Aplicação dos critérios de avaliação de vibração e ruído ambiental ferroviário sobre os dados de níveis de vibração e ruído obtidos;
- Realização de predição de vibração e ruído ambiental ferroviário;
- Análise crítica do material encontrado na literatura sobre vibração e ruído ambiental ferroviário quando aplicado no Brasil.

- Identificação de qual método de medição, critério de avaliação e predição de vibração e ruído ambiental ferroviário são adequados à malha ferroviária brasileira. Devido à realidade brasileira, em termos de estruturas de linhas férreas, tipos de tráfego ferroviário e tipos de composições ferroviárias em operação (que podem se diferenciar de outros países), pode ser necessário adaptar/desenvolver método de medição, critério de avaliação e predição de vibração e ruído ambiental mais adequados à malha ferroviária brasileira.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A necessidade de se ter dados, procedimentos, métodos e textos para efetuar a medição, avaliação e predição de vibração e ruído ambiental ferroviário dentro da realidade brasileira é de grande importância tanto para uma padronização de como realizar a avaliação ambiental de vibração e ruído, quanto para propor técnicas que possam auxiliar aos profissionais de forma efetiva em trabalhos futuros.

A padronização é indicada para que todos os estudos sigam um mesmo procedimento de forma que não haja diferenças ao avaliar uma mesma situação e é fundamental para fiscalização de órgãos ambientais.

O fator fundamental que justifica o presente trabalho é estabelecer procedimentos e métodos adequados para avaliar danos às construções e incômodo a seres humanos devido à vibração e ruído provenientes da passagem de composições ferroviárias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FONTES DE VIBRAÇÃO E RUÍDO FERROVIÁRIO

Segundo Thompson (2009) as principais fontes de vibração e ruído da passagem de composição ferroviária são: a rolagem (entre roda e trilho), a curva squeal (“curve squeal”), a tração motora e o ruído aerodinâmico. A seguir são apresentadas essas fontes de vibração e ruído ferroviário.

2.1.1 Rolagem

O mecanismo de geração de ruído e vibração da rolagem é a interação, durante o deslocamento, entre roda e trilho devido à rugosidade do conjunto roda-trilho conforme apresentado na Fig. 1.

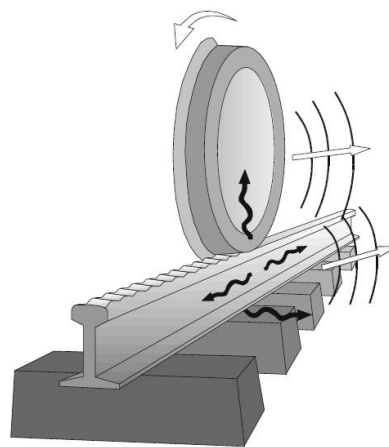


Figura 1: Mecanismo de geração de ruído e vibração por rolagem
Fonte: Vedrami e Paul (2009)

O ruído e a vibração provenientes da rolagem são maiores em composições ferroviárias de carga do que em composições ferroviárias de passageiros, devido à rugosidade dos trilhos e das rodas serem normalmente maiores em situações com trens de carga.

A energia do ruído de rolagem aumenta com a velocidade da composição ferroviária (V) numa taxa de cerca de $30\log(V)$, ou seja, 9dB de aumento no nível de ruído de rolagem do trem toda vez que se duplica sua velocidade.

Além de induzir vibração vertical por meio da rolagem, é pelo mecanismo apresentado na Fig. 1 que toda a vibração gerada pelo restante da composição ferroviária é transmitida.

2.1.2 Curva Squeal (“curve squeal”)

Outra fonte de vibração e ruído ferroviário também proveniente da interação das rodas com os trilhos é o “curve squeal”, do qual existem dois tipos. O primeiro tipo é gerado pelo contato das bordas das rodas com as bordas dos trilhos. O segundo tipo é gerado pelo deslizamento das rodas no trilho em curvas fechadas. Este fato ocorre porque em uma composição ferroviária o conjunto de duas rodas não possui diferencial para compensar o fato que, em uma curva, as rodas externas a esta devem rodar mais que as rodas internas. Com isto, as rodas internas são forçadas a deslizar na superfície do trilho. Como curvas fechadas são mais comuns em trilhos utilizados por metrô, o “curve squeal” é um problema maior neste meio de transporte.

2.1.3 Tração Motora

A fonte de vibração e ruído tração motora é composta pela operação do motor (a diesel ou elétrico), sistema de transmissão, sistema de exaustão e ventilação da composição ferroviária. Em alguns casos, transformadores de corrente e da eletrônica de potência podem compor a fonte de vibração e ruído da tração motora.

O ruído proveniente da tração motora depende pouco da velocidade da composição ferroviária.

2.1.4 Ruído Aerodinâmico

Ao contrário das outras fonte de ruído e vibração, em que o ruído é proveniente da radiação sonora de superfícies vibrantes (rodas, trilhos ...), o ruído aerodinâmico é causado pelo escoamento turbulento do ar sobre a composição ferroviária. O ruído aerodinâmico somente é considerável aos outros ruídos provenientes da composição ferroviária para velocidades acima de 100km/h, conforme pode ser verificado na Fig. 2.

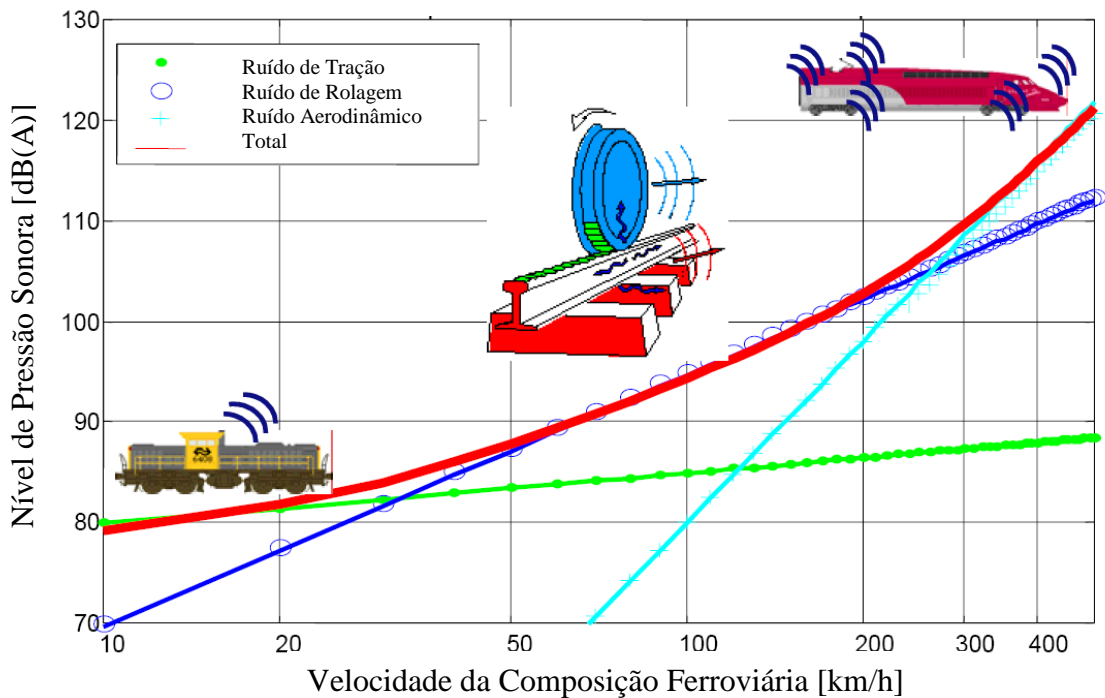


Figura 2: Fontes de ruído ferroviário e função da velocidade da composição ferroviária
Fonte: Vedrami e Paul (2009)

2.1.5 Outras Fontes de Vibração e Ruído Ferroviário

Existem algumas outras fontes de vibração e ruído ferroviário específicos como buzinas de composições ferroviárias e sinais sonoros fixos nas estruturas das linhas férreas, existentes e acionados intermitentemente por questão de segurança. Também se ressalta o ruído e vibração provenientes de pontes durante a passagem da composição ferroviária.

2.2 TERMOS E DESCRITORES DE RUÍDO AMBIENTAL

A seguir são apresentadas as definições dos termos técnicos e descritores de ruído ambiental utilizados neste trabalho e constantes no Projeto de Revisão NBR 10.151 (ABNT, 2012).

Designações de tempo e local.

Tempo de Medição: tempo durante o qual é efetuada a medição.

Período Horário: período de tempo ao longo de um dia ao qual se refere à avaliação do ruído.

Ponto de Medição: local onde o microfone de medição é posicionado.

Designação de níveis sonoros.

Nota: as curvas de ponderação em frequência “A” e no tempo “F” (0,125s) são normalizadas pela norma IEC 61672-1.

$L_{Aeq,T}$: nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um determinado intervalo de tempo “T”, conforme a Eq. 2.1.

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{p_0^2} dt \right] dB(A) \quad (2.1)$$

Onde:

A em frequência da curva “A”;

dB é a expressão de nível em decibel;

L é a denominação de nível (Level);

p é a pressão sonora instantânea;

p_0 é a pressão sonora de referência ($p_0 = 20\mu\text{Pa}$);

T é o tempo de integração.

L_{AFmax} : máximo nível de pressão sonora na curva de ponderação “A” e na ponderação no tempo “F” (Fast / 0,125s) em um determinado intervalo de tempo “T”.

L_d : nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um determinado intervalo de tempo “T” representativo e compreendido dentro do período horário Diurno (day).

L_e : nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um determinado intervalo de tempo “T” representativo e compreendido dentro do período horário Vespertino (evening).

L_n : nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um determinado intervalo de tempo “T” representativo e compreendido dentro do período horário Noturno (night).

L_{dn} : nível que caracteriza nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um intervalo de tempo de 24h, sendo determinado pelo resultado da soma logarítmica ponderada dos resultados de L_d e L_n conforme a Eq. 2.2.

$$L_{dn} = 10 \log \left(\frac{d}{24} 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{n}{24} 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

“d” é o número de horas do período diurno e “n” é o número de horas do período noturno (d + n = 24).

L_{den} : nível que caracteriza nível de pressão sonora contínuo equivalente na curva de ponderação “A” em um intervalo de tempo de 24h, sendo determinado pelo resultado da soma logarítmica ponderada dos resultados de L_d , L_e e L_n conforme a Eq., 2.3.

$$L_{den} = 10 \log \left(\frac{d}{24} 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{e}{24} 10^{\frac{L_e+5}{10}} + \frac{n}{24} 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

“d” é o número de horas do período diurno, “e” é o número de horas do período vespertino (ou entardecer) e “n” é o número de horas do período noturno ($d + e + n = 24$).

Designação de som.

Som Total (Ruído Total): som totalmente existente numa dada situação e num dado instante, usualmente composto pelo som resultante de várias fontes sonoras, próximas e distantes.

Som Específico (Ruído Ferrovia): componente do som total que pode ser especificamente identificado e que está associado a uma determinada fonte.

NOTA: para o estudo em questão, o som específico é aquele produzido pela passagem de composições ferroviárias.

Som Residual (Ruído Ambiente): som remanescente numa dada posição e numa dada situação quando é (são) suprimido(s) o(s) som(ns) específico(s) em consideração.

Som Impulsivo (Ruído Impulsivo): som caracterizado por impulsos de pressão sonora de duração inferior a 1,0s e que se repete em intervalos superiores a 1,0s.

2.3 TERMOS E DESCRITORES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

A seguir são apresentadas as definições dos termos técnicos e descritores de vibração ambiental (Fig. 3) utilizados neste trabalho.

V_{ef} : é a velocidade r.m.s global referente a todo o tempo de medição. (AZEVEDO E PATRÍCIO, 2001)

$V_{ef,max}$: é a velocidade r.m.s global máxima entre todos os tempos de integração medidos. (DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE – USA, 2006)

V_{pico} : é a velocidade de pico global máxima entre todos os tempos de integração medidos. (DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE – USA, 2006)

$V_{p,Hz}$: é a velocidade de pico máxima entre as frequências do espectro medido através de FFT (Fast Fourier Transform). (WHIFFIN e LEONARD, 1971)

Segundo DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE – USA (2006) o Fator de Pico, que é o fator dado pela razão de um valor de pico sobre um valor R.M.S ($V_{pico} / V_{ef,max}$), para passagem de composições ferroviárias é tipicamente o valor de 04 (quatro).

Eixos de medição de vibração: os eixos de medição de vibração são definidos por suas 03 direções, as quais são estabelecidas pelos eixos do sistema cartesiano de coordenadas. O eixo vertical é designado por z e os eixos horizontais são designados por x e y.

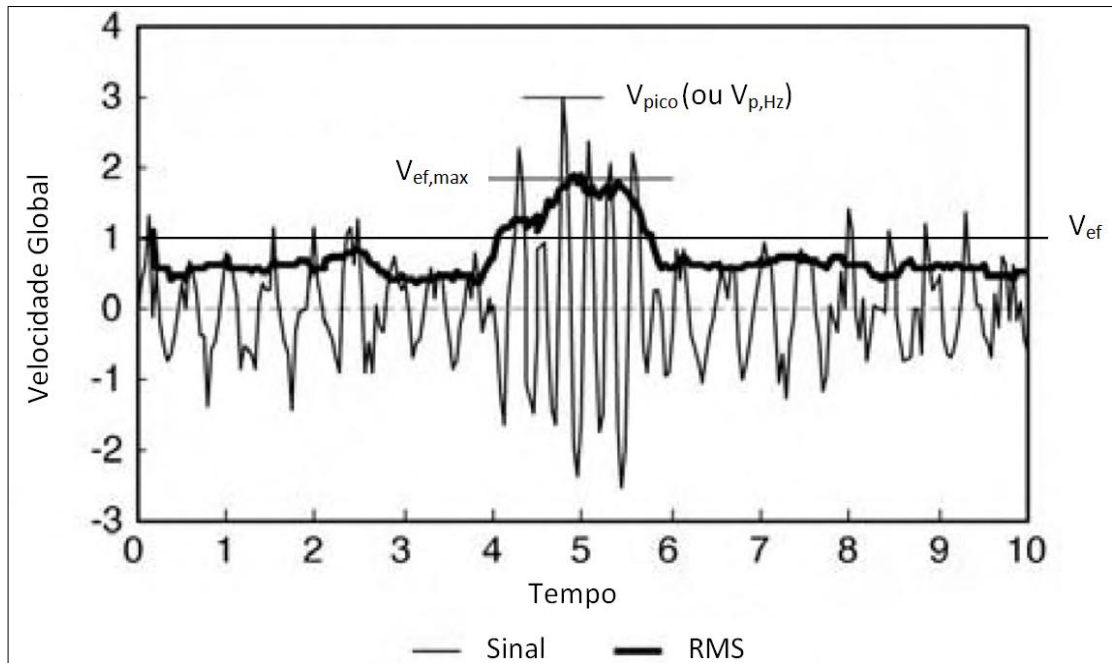


Figura 3: Descritores de vibração ambiental

Fonte: Adaptado de DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE – USA (2006)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MEDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL

Não há normas específicas para medição de ruído ambiental ferroviário, sendo essa medição realizada seguindo normas de ruído ambiental em geral, para todos os tipos de fontes sonoras. Internacionalmente a medição de ruído ambiental é padronizada pela norma ISO 1996 – Parte 1 (ISO, 2003) e Parte 2 (ISO, 2007) e no Brasil pela norma NBR 10.151 (ABNT, 2000), a qual segue as orientações daquela.

A seguir são apresentados os procedimentos para medição de ruído ambiental estabelecidos pela norma NBR 10.151 (ABNT, 2000).

Equipamentos de Medição: para medição de ruído utiliza-se sonômetro (medidor de nível de pressão sonora) e calibrador acústico de classe 2 ou superior, devendo os mesmos possuir certificado de calibração emitido a menos que dois anos pela Rede Brasileira de Calibração (RBC) ou pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

Ponto de Medição: o ponto de medição deve ser posicionado externamente a pelo menos 2 (dois) metros dos limites da propriedade que contém a fonte sonora objeto de avaliação, a 1,2 metro do solo e a 2 (dois) metros de quaisquer outras superfícies refletoras como muros, paredes etc. Na ocorrência de reclamações, as medições devem ser efetuadas nas condições e locais indicados pelo reclamante, devendo ser atendidas as demais condições.

Não devem ser efetuadas medições na existência de interferências audíveis advindas de fenômenos da natureza (por exemplo: trovões, chuvas fortes etc.).

Tempo de Medição: o tempo de medição deve ser definido de forma a permitir a caracterização adequada dos ruídos em avaliação.

3.2 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Não há normas específicas para a medição de vibração ambiental ferroviária, sendo essa medição realizada seguindo normas de vibração em geral. Normalmente a medição de vibração é realizada com os procedimentos estabelecidos pela norma DIN 45669 – Parte 1 (DIN, 1995) e Parte 2 (DIN, 2005), ou outras normas que se baseiam nesta.

A norma DIN 45669 estabelece as características do equipamento de medição de vibração em sua Parte 1 (DIN, 1995) e o método de medição de vibração em sua Parte 2 (DIN, 2005). A seguir são listados os principais procedimentos que devem ser seguidos para medição de vibração de acordo com a norma DIN 45669 – Parte 1 (DIN, 1995) e Parte 2 (DIN, 2005).

- Requisitos do equipamento de medição de vibração:

- Equipamento classe 1 ou classe 2;
- Faixa de medição em frequência de 1Hz a 315Hz;
- Direções de medição definidas em relação ao sistema de coordenadas cartesianas (eixo vertical designado por z e eixos horizontais designados por x e y);
- Recomenda Tempo de Integração (τ) de 0,125 segundo (correspondente ao tempo de integração “fast” dos medidores de pressão sonora) para realização de medições e de 1,0 segundo para realização de verificação.

- A verificação do equipamento de medição de vibração pode ser feita pela entrada de uma excitação mecânica ou por teste de sinais, ambos de acordo com as especificações e procedimentos do fabricante do equipamento.

- O ponto de medição deve ser definido de forma a adequar ao propósito da avaliação.

Como regra, podem ser definidos os seguintes locais de medição:

- Fundações de construções e componentes estruturais (pisos, paredes...) para avaliar o efeito de vibrações em edificações;
- Pisos em diversos andares para avaliar o efeito da vibração em seres humanos (DIN 4150-2);
- Subsolo para avaliar uma área de futuras construções.

- Ao avaliar vibrações em fundações, o ponto de medição não deve estar a mais de 0,5 metro do solo e, preferencialmente, a medição pode ser realizada fora da fundação (no solo) de forma que o local de medição fique mais próximo da fonte de vibração.

- Pontos de medição no solo também podem ser estabelecidos em substituição da medição no subsolo, desde que sejam observadas as heterogeneidades do solo e distâncias entre a fonte de vibração e o local de medição.

- Direção dos eixos de medição: eixo z na direção vertical e o eixo (horizontal) x na direção da fonte de vibração.

- Montagem dos transdutores deve ser feita de forma a não interferir no resultado da vibração a ser medida. Preferencialmente, monta-se o transdutor em superfícies rígidas, de forma que o transdutor e o objeto de medição (solo, piso, fundação...) fiquem firmemente conectados e, assim, evite ressonâncias e movimentos indesejados na faixa de medição (de 1Hz a 315Hz). Esse procedimento deve ser adotado em todas as direções de medição (eixos x, y e z).

- O Tempo de Medição deve ser suficiente para representar a vibração em análise.

- Período de Medição deve ser estabelecido conforme o tipo de vibração e o tipo de objeto de medição, ou estipulado por legislação, normas...

- Todos os fatores que influenciarem ou interferirem nos resultados das medições de vibração devem ser detalhadamente descritos.

3.3 AVALIAÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO

Nas Tabs. 01 e 02 a seguir são mostrados um resumo dos critérios de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado em diversos países, os quais são apresentados no documento "Survey of Legislation, Regulations, and Guidelines for Control of Community Noise" (TSG3, 2009).

Tabela 1: Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário praticado em diversos países (TSG3, 2009)

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]	
Bélgica (Bruxelas)	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _{Aeq,sp,rail-ways} *	Todas	70	-	65	-	-	-	-	*L _{Aeq,sp,rail-ways} : L _{Aeq,T} calculado somente durante as operações da ferrovia em um específico intervalo de tempo. Para novas estruturas ferroviárias ou expansão de estruturas existentes deve ser subtraído 05dB(A) nos níveis critérios de avaliação estabelecidos.
São Paulo (CETESB)	Diurno (6h-23h) / Noturno (23h-6h)	L _{Aeq} *	Asilos, Creches, Hospitais ou similares	60	-	55	-	-	-	-	Para novas ferrovias ou novas áreas deve ser subtraído 05dB(A) nos níveis dos critérios de avaliação estabelecidos. *O nível sonoro da ferrovia é calculado pela seguinte fórmula $L_{Aeq} = 10 \times \log_{10} \{ 0,01 \times [Pt \times 10^{(L_t/10)} + (100 - Pt) \times 10^{(L_{ra}/10)}] \}$ Onde: · L _t = Nível de ruído equivalente, em dB (A), medido durante o período audível de uma passagem de composição ferroviária. · L _{ra} = Nível de ruído ambiente, em dB (A), característico do local, sem a influência da composição ferroviária. · Pt = % de tempo com passagem da composição ferroviária, calculado por: $Pt = T_t \times F_t \times 100 / 3600$ Onde: · T _t = tempo médio audível de uma passagem de composição ferroviária (segundos) · F _t = Fluxo de composição ferroviária (média horária).
			Residências, Comércio ou Serviços Locais	65	-	60	-	-	-	-	
			Instituições de Ensino ou Religiosa e de Atividades Equivalentes	68	-	63	-	-	-	-	

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]	
República Tcheca	Diurno / Noturno	L _{Aeq,T}	Hospital	50	-	45	-	-	-	-	Para fontes sonoras com características predominantemente impulsivas deve ser subtraído no critério de avaliação o valor de 07dB(A).
			Residência	60	-	55	-	-	-	-	
			Indústria	70	-	65	-	-	-	-	
Dinamarca	Diurno / Vespertino / Noturno	L _{den}	Residências de Verão e de Campo	-	-	-	-	59	-	-	-
			Hospital, Escola e Residência	-	-	-	-	58	-	-	
			Hotel e Escritório	-	-	-	-	63	-	-	
Finlândia	Diurno (7h-22h) / Noturno (22h-7h)	L _{Aeq,T}	Residência	55	-	50	-	-	-	-	-
			Recreacional	55	-	50	-	-	-	-	
			Instituições Educacionais ou de Saúde	55	-	50	-	-	-	-	
			Novas Residências, Recreacional e Instituições Educacionais ou de Saúde	55	-	45	-	-	-	-	
			Locais de Descanso (campo, etc.)	45	-	40	-	-	-	-	

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]	
França	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _{Aeq,T}	Residência* e Escola*	60	-	55	-	-	-	-	*Novo ou modificado uso e ocupação do solo.
			Hospital*	57	-	55	-	-	-	-	
			Outras Áreas*	65	-	60	-	-	-	-	
Alemanha	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _{Aeq,T}	Hospital e Escola	57*	-	47*	-	-	-	-	*Critério de Avaliação de rodovias modificadas ou novas rodovias. Para sons provenientes de ferrovias (novas ou existentes) os critérios são os mesmos para rodovias, exceto do fato que é subtraído 05dB(A) do valor de L _{Aeq,T} medido.
			Residências	59*	-	49*	-	-	-	-	
			Comercial e Residencial	64*	-	54*	-	-	-	-	
			Indústria "Leve" (Areas with light industry)	69*	-	59*	-	-	-	-	
Hungria	Diurno / Noturno	L _{Aeq,T}	Áreas residenciais e administrativas próximo a vias férreas secundárias.	60	-	50	-	-	-	-	-
			Áreas residenciais e administrativas próximo a vias férreas principais.	65	-	55	-	-	-	-	
			Áreas residenciais e administrativas com predominância de edifícios altos	65	-	55	-	-	-	-	

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]	
Itália	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _{Aeq,T}	Local de Medição a menos de 100m de distância da Ferrovia	70	-	60	-	-	-	-	-
			Áreas Sensíveis: Escola, Hospital	50	-	40	-	-	-	-	
Coréia do Sul	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _{Aeq,T}	Priotariamente Residencial	70	-	60	-	-	-	-	-
			Comercial, Residência ou Outras Áreas	75	-	65	-	-	-	-	
Holanda	Diurno / Vespertino / Noturno	L _{den}	Todas	-	-	-	-	(47 a 72)*	-	-	*O Critério de Avaliação pode variar dentro de uma determinada faixa de valores, sendo estabelecido em função do tipo de área e das autoridades locais e regionais.
Noruega	Diurno / Vespertino / Noturno	L _{den}	Todas	-	-	-	-	58	-	-	-
Portugal	Diurno (7h-20h) / Vespertino (20h-23h) / Noturno (23h-7h)	L _{den} / L _n	Mista, Residencial e Comercial	-	-	55	-	65	-	-	Áreas sensíveis na vizinhança de ferrovias e rodovias existentes devem atender ao critério de avaliação de área mista (residencial e comercial). Áreas sensíveis na vizinhança de projetos de futuras rodovias e ferrovias, devem atender ao critério de avaliação de área mista (residencial e comercial) subtraído de 05dB(A).
			Áreas Sensíveis ou Residenciais	-	-	45	-	55	-	-	

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES	
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]		
Eslovênia	Diurno (6h-18h) / Vespertino (18h-22h) / Noturno (22h-24h) & (00h-6h)	L _d / L _e / L _n / L _{den}	Industrial	70	65	60	-	70	-	-	-	
			Mista, Residencial e Indústria Leve ou Comercio	65	60	55	-	65	-	-		
			Prioritariamente Residencial	60	55	50	-	60	-	-		
			Rural, Sítios e Fazendas	55	50	45	-	55	-	-		
Espanha	Diurno / Noturno	L _{Aeq,T}	Todas	65	-	55	-	-	-	-	-	
Suécia	24h	L _{Aeq,24h} / L _{AFmax}	Todas	-	-	-	-	-	55	70	-	
Suíça	Diurno (6h-22h) / Noturno (22h-6h)	L _r *	Recreacional	55	-	45	-	-	-	-	-	<p>* Nível de Avaliação $L_r = 10 \lg (10^{0.1 \cdot L_{r1}} + 10^{0.1 \cdot L_{r2}})$ com $L_{r1} = L_{Aeq,T} + K1$ para tráfego regular de trem $L_{r2} = L_{Aeq,T} + K2$ para tráfego de trem em locais de bifurcação Ajuste K1 para tráfego regular: K1= -5 dB for N > 79 K1= 10 lg(N/250) dB for 7.9 < N < 79 K1= -15 dB for N < 7.9 (N = trains/day or night) Ajuste K2 para tráfego próximo a bifurcação: 0 to +8 dB</p> <p>Para novas ferrovias ou novas áreas deve ser subtraído 05dB(A) nos níveis dos critérios de avaliação estabelecidos.</p>
			Residencial	60	-	50	-	-	-	-	-	
			Mista	65	-	55	-	-	-	-	-	
			Industrial	70	-	60	-	-	-	-	-	

PAIS	PERÍODO HORÁRIO	PARÂMETRO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO	TIPO DE ÁREAS / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO							OBSERVAÇÕES
				L _d [dB(A)]	L _e [dB(A)]	L _n [dB(A)]	L _{dn} [dB(A)]	L _{den} [dB(A)]	L _{Aeq,24h} [dB(A)]	L _{AFmax} [dB(A)]	
Turquia	Diurno (7h-19h) / Vespertino (19h-23h) / Noturno (23h-7h)	L _{Aeq,T}	Residencial e Ambiente Natural	65	-	-	55	-	-	-	-
Reino Unido	Diurno (6h-24h) / Noturno (00h-6h)	L _{Aeq,T}	Todas	68	-	63	-	-	-	-	Critérios de Avaliação válidos para novas ferrovias.
Reino Unido	Diurno (6h-24h) / Noturno (00h-6h)	L _{Aeq,T}	Todas	74	-	66	-	-	-	-	Critérios de Avaliação válidos para ferrovias existentes.
Estados Unidos da América	Diurno / Noturno	L _{dn}	Locais onde normalmente as pessoas dormem ou o ruído noturno é importante (Residências, Hospitais, Hotéis, etc.)	-	-	-	**	-	-	-	*L _{Aeq,1h} medido na hora mais ruidosa referente as atividades da ferrovia, dentro das 24h diárias. ** ver Tabela 02.
		L _{Aeq,1h} *	Outras Áreas	**	-	**	-	-	-	-	-

Tabela 2 Critério de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário praticado nos EUA

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO EUA*		
L _{dn} ou L _{Aeq,1h} ** [dB(A)]		
SOM RESIDUAL	SOM DA FERROVIA***	SOM TOTAL
<42	(som residual) + 10	-
42	52	52
43	52	53
44	52	53
45	52	53
46	53	54
47	53	54
48	53	54
49	54	55
50	54	55
51	54	56
52	55	57
53	55	57
54	55	58
55	56	59
56	56	59
57	57	60
58	57	61
59	58	62
60	58	62
61	59	63
62	59	64
63	60	65
64	61	66
65	61	66
66	62	67
67	63	68
68	63	69
69	64	70
70	65	71
>70	66	-

* L_{dn} é utilizado em áreas onde o ruído noturno é sensível e um fator importante, geralmente onde as pessoas dormem (Residências, Hospitais, Hotéis, etc.).

** L_{Aeq,1h} medido na hora mais ruidosa referente as atividades da ferrovia, dentro das 24h diárias.

*** Para áreas em que a utilização é prioritariamente diurna, como em escolas, bibliotecas e teatros, é admitido um acréscimo de 05dB(A) ao limite do som da ferrovia.

3.4 AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA

Em sequência são apresentados critérios de avaliação de vibração ambiental ferroviária praticados em diversos países. Estes critérios de avaliação abordam totalmente, ou em parte, os seguintes tópicos:

- Especificação de qual descritor de vibração é avaliado;
- Faixa de avaliação em frequência;
- Direção, ou direções, de medição na qual a avaliação é realizada;
- Especificação se o critério de avaliação trata-se do efeito da vibração sobre

estruturas ou sobre os seres humanos.

Critérios de Vibração LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal)

Segundo Azevedo e Patrício (2001), os Critérios de Vibração LNEC estabelecem limites de vibrações sobre edificações e seres humanos.

A direção de medição a ser avaliada é o eixo (x, y ou z) que possuir o maior valor de velocidade eficaz (V_{ef}).

Nas Tabs. 03 e 04 são apresentados os Critérios de Avaliação de Vibração LNEC para seres humanos e edificações, respectivamente.

Tabela 3: Critérios de Avaliação de Vibração LNEC para Seres Humanos

V_{ef} [mm/s]	Sensação
$V_{ef} < 0,11$	Nula
$0,11 < V_{ef} < 0,28$	Perceptível, suportável para pequena duração.
$0,28 < V_{ef} < 1,10$	Nítida, incômoda, podendo afetar as condições de trabalho.
$V_{ef} > 1,10$	Muito nítida, muito incômoda, reduzindo as condições de trabalho.

Tabela 4: Critérios de Avaliação de Vibração LNEC para Edificações*

V_{ef} [mm/s]	Efeitos
$V_{ef} < 3,5$	Praticamente nulos.
$3,5 < V_{ef} < 7$	Possibilidade de danos estéticos em edifícios antigos.
$7 < V_{ef} < 21$	Trincas em revestimentos.
$21 < V_{ef} < 42$	Rachaduras acentuadas nos revestimentos e alvenarias.
$V_{ef} > 42$	Danos consideráveis, possibilidade de rachadura em concreto armado.

* excluindo monumentos e edifícios sensíveis.

Critérios de Vibração USA

O documento “Transit Noise and Vibration” (Departamento de Transporte – USA, 2006) expressa os valores dos critérios de vibração em nível de velocidade de vibração (VdB; valor de referência 1×10^{-6} inch/s). Entretanto, assim como Rosão (2011), os valores de nível de vibração foram convertidos em mm/s (considerou-se 1 inch = 25,4 mm) de acordo com a Eq. 3.1.

$$V_{ef} = 10^{VdB/20} \times 25,4 \times 10^{-6} \text{ mm/s} \quad (3.1)$$

Na Tab. 5 são apresentados os Critérios de Vibração USA para o incômodo da vibração em edificações a percepção humana.

Tabela 5: Critérios de Vibração USA para Seres Humanos

Tipo de Uso	$V_{ef,max}$ [VdB e mm/s]*		
	Mais de 70 eventos de vibração por dia.	Entre 30 e 70 eventos de vibração por dia.	Menos de 30 eventos de vibração por dia.
Habitacões e edifícios onde as pessoas usualmente dormem.	72 VdB 0,101 mm/s	75 VdB 0,143 mm/s	80 VdB 0,254 mm/s
Habitacões e edifícios utilizados predominantemente no período diurno (escolas, igrejas...).	75 VdB 0,143 mm/s	78 VdB 0,202 mm/s	83 VdB 0,359 mm/s
Salas de concerto, estúdio de televisão e gravação.	65 VdB 0,045 mm/s		
Auditórios e Teatros	72 VdB 0,101 mm/s	80 VdB 0,254 mm/s	

* valores limite para que não ocorra incômodo gerado por vibração em seres humanos dentro de edificações.

Na Tab. 6 são apresentados os Critérios de Vibração USA para danos em edificações.

Tabela 6: Critérios de Vibração USA para Edificações

Tipo de Edificação	V_{pico} [mm/s]*
Sensíveis	3
Sem projeto de engenharia	5
Com projeto de engenharia	8
Reforçados	13

* valores limite para que não ocorram danos em edificações devido a vibrações.

Critérios de Avaliação de Vibração Whiffin & Leonard

Whiffin e Leonard (1971) propuseram Critérios de Avaliação de Vibração sobre edificações e seres humanos.

A direção de medição a ser avaliada é somente a direção vertical, o eixo z do sistema cartesiano.

Na Tab. 7 são apresentados os Critérios de Avaliação de Vibração propostos por Whiffin & Leonard para seres humanos e edificações.

Tabela 7: Critérios de Avaliação de Vibração propostos por Whiffin & Leonard para Seres Humanos e Edificações

$V_{p,Hz}$ [mm/s]	Reação Humana	Efeitos sobre Edificações
0 – 0,15	Imperceptível; não incomoda.	Não causam danos de nenhum tipo.
0,15 a 0,30	Limiar de percepção.	
2,0	Vibração perceptível.	Vibrações máximas recomendadas para ruínas e monumentos antigos.
2,5	Vibrações contínuas produzem incômodo.	Não causam dano arquitetônico nas construções normais.
5	Vibrações incômodas.	Limiar no qual existe risco de dano às construções.
10 - 15	Vibrações desagradáveis.	Causam danos arquitetônicos as construções.

Critérios de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150

A norma DIN 4150 (DIN, 1986) estabelece Critérios de Avaliação de Vibração sobre edificações.

A direção de medição a ser avaliada é somente a direção vertical, o eixo z do sistema cartesiano.

Na Tab. 8 são apresentados os Critérios de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150 para edificações.

Tabela 8: Critérios de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150 para Edificações

Tipos de Estruturas	$V_{p,Hz}$ [mm/s]*			
	Fundação			Andares superiores
	< 10 Hz	(10-50) Hz	(50-100) Hz	Qualquer frequência
Industrial	20	20-40	40-50	40
Residencial	5	5-15	15-20	15
Sensíveis	3	3-8	8-10	8

* valores limite para que não ocorram danos em edificações devido a vibrações.

Outros países europeus desenvolveram próprias normas baseando-se ou relacionando-se à norma Alemã DIN 4150.

Critério de Vibração CETESB

O documento “Decisão de Diretoria N° 215/2007/E, de 07 de novembro de 2007” (CETESB, 2007) estabelece os valores limites de vibração por tipo de ocupação do solo e período de medição.

Na Tab. 9 são apresentados os Critérios Vibração CETESB para os valores limites de vibração por tipo de ocupação do solo e período de medição.

Tabela 9: Critérios de Vibração CETESB

Limites de Velocidade de Vibração de Partícula – Pico [mm/s]		
Tipos de Áreas	Diurno (7h às 20h)	Noturno (20h às 7h)
Áreas de hospitais, casas de saúde, creches e escolas.	0,3	0,3
Área predominantemente residencial.	0,3	0,3
Área mista, com vocação comercial e administrativa.	0,4	0,3
Área predominantemente industrial.	0,5	0,5

3.5 PREDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO

Segundo Fafaiol e Alarcão (2009), a previsão dos níveis de pressão sonora em áreas externas adjacentes a fontes de ruído requer a análise da propagação do som no ar livre. A energia gerada por fontes sonoras sofre atenuações ao se propagar na atmosfera desde o emissor até ao receptor ao longo dos caminhos de transmissão. Os principais fatores causadores de atenuação do som são: distância percorrida (divergência geométrica e absorção atmosférica), tipo de solo, presença de obstáculos (efeitos de reflexões e difrações), vegetação e condições meteorológicas (variação da temperatura e da umidade, efeito dos ventos e turbulência).

A atenuação do nível de pressão sonora devido à divergência geométrica depende do tipo da distribuição das fontes de ruído consideradas. No caso da passagem de composição

ferroviária, por ser estreita numa direção e comprida na outra se comparada com a distância a um receptor, essa fonte sonora pode ser considerada como distribuição linear (fonte linear).

Da fonte linear as ondas sonoras propagam-se segundo uma geometria cilíndrica (bidimensional). O nível de pressão sonora é o mesmo para todos os pontos situados à mesma distância da fonte linear, e decresce em 3dB por duplicação da distância.

Para uma fonte linear localizada em espaço livre, com um nível de potência sonora por metro (L_w/m), o nível de pressão sonora (L_p) a uma distância r da mesma é dado pela Eq. 3.2.

$$L_p = \frac{L_w}{m} - 10\log(r) - 8 \quad (3.2)$$

Se a fonte linear estiver localizada junto a uma superfície rígida infinita, então a Eq.3.3 é válida.

$$L_p = \frac{L_w}{m} - 10\log(r) - 5 \quad (3.3)$$

Para obtenção da potência sonora (L_w/m) de ferrovias (passagens de composições ferroviárias) existem diversos bancos de dados como o alemão Schall03 e o holandês RLM2. Entretanto, no Brasil não existe um banco de dados de potência sonora de ferrovias para as composições ferroviárias que tipicamente circulam na malha ferroviária brasileira.

Em algumas situações de cálculo a fonte linear pode ser dividida em secções lineares, sendo cada secção representada por uma fonte pontual no seu centro.

Da fonte pontual as ondas sonoras propagam-se segundo uma geometria esférica. O nível de pressão sonora é o mesmo para todos os pontos situados à mesma distância da fonte pontual, e decresce em 6dB por duplicação da distância.

Para uma fonte pontual localizada em espaço livre, com um nível de potência sonora (L_w), o nível de pressão sonora (L_p) a uma distância r da mesma é dado pela Eq. 3.4.

$$L_p = L_w - 20\log(r) - 11 \quad (3.4)$$

Se a fonte pontual estiver localizada junto a uma superfície rígida infinita, então a Eq.3.5 é válida.

$$L_p = L_w - 20 \log(r) - 8 \quad (3.5)$$

A norma ISO 9613 – Parte 1 (1993) e Parte 2 (1996) apresenta um método de engenharia para o cálculo da atenuação do som durante a sua propagação no ar livre.

O método permite prever o nível sonoro contínuo equivalente ponderado em A (L_{Aeq}) a partir de fontes de emissão sonora conhecidas.

As equações deste método são válidas para fontes sonoras pontuais. Entretanto, como mencionado anteriormente uma fonte linear pode ser dividida em secções lineares, sendo cada uma das quais representadas no seu centro por uma fonte pontual.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente por bandas de oitava ($L_{eq,Hz}$) num local receptor, (para as oito bandas de oitava entre os 63Hz e os 8kHz) é dado pela Eq. 3.6.

$$L_{eq,f} = L_w + D_c - A - C_{met} [dB] \quad (3.6)$$

Onde:

L_w é o nível de potência sonora por bandas de oitava, em dB, produzido pela fonte sonora pontual, relativo à potência de referência de $10^{-12}W$;

D_c é o fator de correção de diretividade, em dB, se a fonte não emite som igualmente em todas as direcções. Para uma fonte omnidirecional radiando em espaço livre, $D_c = 0dB$;

A é o termo de atenuação por banda de oitava, em dB, devido à propagação da fonte sonora pontual ao receptor (Equação 3.7);

C_{met} é o fator de correção das condições meteorológicas médias da região sob estudo, o qual depende das estatísticas meteorológicas locais relativas ao regime dos ventos e a gradientes de temperatura. Valores típicos para C_{met} situam-se entre 1dB e 3dB.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} [dB] \quad (3.7)$$

Onde:

A_{div} é a atenuação devida à divergência geométrica (Eq. 3.4 ou Eq. 3.5);

A_{atm} é a atenuação devida à absorção atmosférica (valores tabelados em função da temperatura, umidade relativa, frequência e distância da fonte sonora ao receptor);

A_{gr} é a atenuação devida ao efeito do solo (valores tabelados em função do tipo de solo, frequência e distância da fonte sonora ao receptor);

A_{bar} é a atenuação devida à difração por obstáculos como um muro (valores tabelados em função da geometria do obstáculo, posição do obstáculo e distância da fonte sonora ao receptor);

A_{misc} é a atenuação devida a outros efeitos diversos (por exemplo: vegetação, áreas industriais, áreas residências, etc.).

Por último, as reflexões da onda sonora são consideradas através da construção de fonte imagem, e os cálculos da propagação sonora da fonte imagem são realizados igualmente aos cálculos da fonte real descritos anteriormente.

3.6 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA

Suhairy (2000) desenvolveu o chamado “Método Sueco de Previsão de Vibração” para a predição de vibração ambiental proveniente de passagem de composição ferroviária, o qual é apresentado resumidamente a seguir.

O procedimento do “Método Sueco de Previsão de Vibração” resume-se na utilização da Eq. 3.8, a qual prevê o valor máximo da velocidade eficaz ($V_{ef,max}$) da passagem de uma composição ferroviária.

$$V_{ef,max} = V_{ef,max,0} \times \left(\frac{D_{vib}}{D_{vib,0}} \right)^{F_D} \times \left(\frac{C_{vib}}{C_{vib,0}} \right)^{F_C} \times F_R \times F_B \quad (3.8)$$

Onde:

$V_{ef,max,0}$ corresponde ao valor da $V_{ef,max}$ medida à distância de referência $D_{vib,0}$ de 20 metros para uma velocidade de referência de circulação da composição ferroviária $C_{vib,0}$ de 70 km/h;

D_{vib} é a distância efetiva do ponto de previsão à linha férrea;

F_D é o fator de atenuação com a distância;

C_{vib} é a velocidade efetiva da composição ferroviária;

F_C é o fator de variação com a velocidade de circulação da composição ferroviária, sendo assumido o valor de 0,9;

F_R é o fator de qualidade da linha, sendo assumido o valor de 0,8;

F_B é o fator de amplificação do edifício, sendo assumido o valor de 2 para casa comuns.

4 METODOLOGIA

4.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO

Os equipamentos principais utilizados nas medições de vibração e ruído foram 01 (um) medidor de vibração (vibrômetro), 01 (um) acelerômetro triaxial, 01 (um) calibrador portátil de aferição do conjunto “Vibrômetro e Acelerômetro”, 02 (dois) medidores de nível de pressão sonora, 02 (dois) calibradores de nível de pressão sonora, 01 (um) anemômetro e 01 (um) termo-higrômetro. Todos esses equipamentos possuem calibração por normas adequadas ao seu uso. Na Tab. 10 estão apresentadas as características dos equipamentos principais para medição de vibração e ruído.

A medição da velocidade do vento foi necessária devido ao impedimento de se realizar a medição de ruído com velocidades do vento acima de 5,0m/s. Já as medições de temperatura e umidade relativa foram necessárias para certificar que os equipamentos de ruído e vibração estavam dentro de suas faixas de operações em temperatura e umidade relativa.

Todas as medições foram realizada entre setembro de 2013 e junho de 2014.

Tabela 10: Lista dos equipamentos principais para medição de vibração e ruído

Equipamento	Fabricante	Modelo	Nº de Série	Normas de Calibração	Data da Última Calibração
Vibrômetro	Svantek	Svan 948	8819	ISO 16063-21: 2003	25/03/2011
Acelerômetro Triaxial	Dytran Instruments	3233A	1061	ANSI/NCSL Z540-1-1994	11/06/2013
Calibrador Portátil de Vibração	PCB Piezotronics	PCB 394C06	3168	ISO 16063-21: 2003	21/01/2011
Medidor de Nível de Pressão Sonora	B&K	2250L	3003182	IEC 60651 IEC 60804	23/08/2013
Calibrador de Nível de Pressão Sonora	B&K	4231	3006591	IEC 60942:2003	23/08/2013
Medidor de Nível de Pressão Sonora	B&K	2250L	3003519	IEC 60651 IEC 60804	23/08/2013
Calibrador de Nível de Pressão Sonora	B&K	4231	3006437	IEC 60942:2003	23/08/2013
Anemômetro	Lutron	AM 4202	L639703	-	25/01/2013
Termo-Higrômetro	Minipa	MTH 1362	MB 1362000706	-	28/01/2013

4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO ADOTADOS

Para medições de vibração e ruído ambiental ferroviário foram consideradas 03 (três) malhas ferroviárias denominadas neste trabalho por “A”, “E” e “M”, nas quais o fluxo de composições ferroviárias é predominantemente de trens de carga. Essas 03 (três) malhas ferroviárias são representativas de toda malha ferroviária brasileira por suas características de tipos de composições de carga, traçado geométrico da linha férrea (curvas e retas) e bitolas. Nas malhas ferroviárias “A” e “M” foi selecionado em cada uma 01 (um) local de medição em área aberta rural ou urbana (sem edificações e topografia plana) e na malha ferroviária “E” foram selecionados 02 (dois) locais de medição com as mesmas características, totalizando 04 (quatro) locais de medição. Em cada local de medição foram estabelecidos 03 (três) pontos de medição de vibração e ruído ambiental a distâncias diferentes da linha férrea, resultando em um total de 12 pontos de medição.

Todos os procedimentos de medição de vibração utilizados seguiram as recomendações da Norma Alemã DIN 45669 – Mechanical Vibration and Shock Measurement. A seguir estão listados alguns procedimentos que necessitam de detalhamento.

- Registro da aceleração da vibração nos 03 (três) eixos cartesianos (x, y e z) simultaneamente, de forma a atender as necessidades para o cálculo dos descritores de vibração ambiental utilizados pelos critérios de avaliação de vibração ambiental.
- O acelerômetro triaxial foi afixado no solo em cada ponto de medição, utilizando uma bolacha de metal de 2 (duas) polegadas de diâmetro aterrada pela metade na terra e uma massa adesiva para fixar o acelerômetro na bolacha, conforme as fotos das Figs. 04 e 05.

- A posição do acelerômetro foi definida posicionando o eixo x perpendicularmente à linha férrea, o eixo y paralelamente à linha férrea e o eixo z (vertical) ortogonal aos eixos x e y.
- Faixa de medição em frequência de 1Hz a 615Hz em FFT (Fast Fourier Transform) com passo de 0,391Hz e janela Hanning.
- O tempo de medição da passagem de composição ferroviária foi igual à duração desse evento. O tempo de medição da vibração residual, vibração sem a presença de passagem de composição ou qualquer outra fonte de vibração alheia ao objeto de estudo, foi igual a 10 (dez) minutos.
- Tempo de Integração (τ) igual a 0,100 segundo.

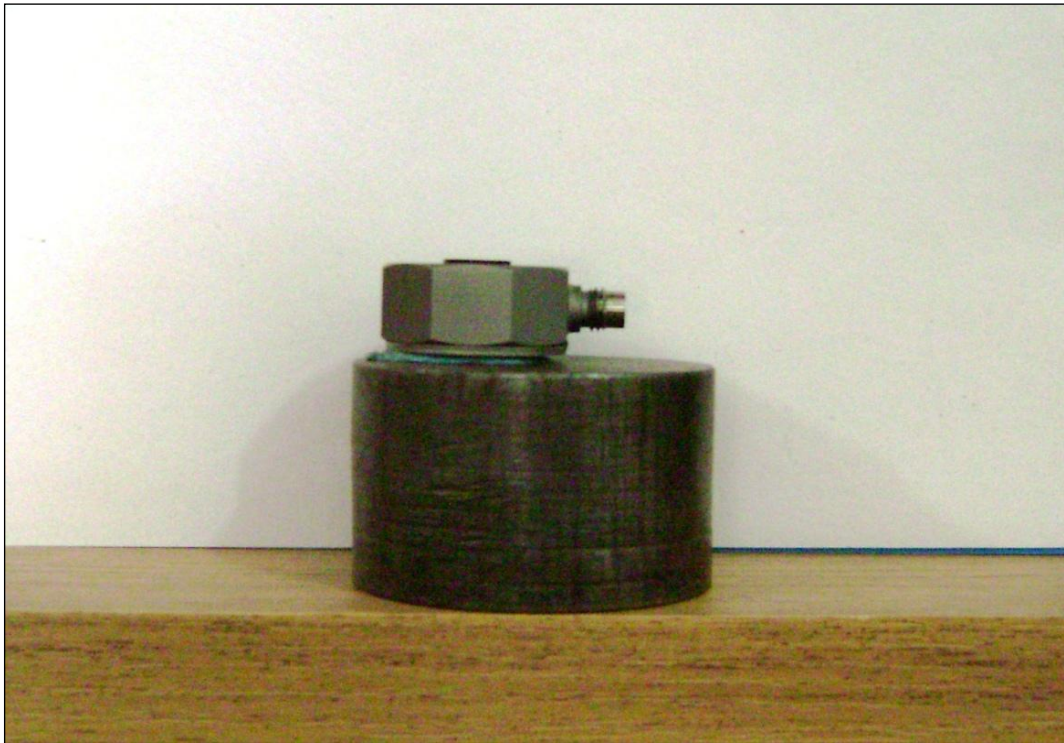


Figura 4: Montagem para afixação do acelerômetro triaxial ao solo

Crédito foto: Frederico Silva Horta



Figura 5: Acelerômetro triaxial afixado ao solo e medidor de vibração em um ponto de medição

Crédito foto: Frederico Silva Horta

Todos os procedimentos de medição de ruído utilizados seguiram as recomendações da norma NBR 10.151 (ABNT, 2000). Com o objetivo de caracterizar adequadamente o Ruído Residual para o cálculo de descritores sonoros, foi estabelecido um tempo de medição de 4:00h (quatro horas) para o período diurno, compreendido entre 07:01h (sete horas e um minuto) e 19:00h (dezenove horas), de 1:00h (uma hora) para o período vespertino, compreendido entre 19:01h (dezenove hora e um minuto) e 22:00h (vinte e duas horas), e de 3:00 (três horas) para o período noturno, compreendido entre 22:01h (vinte e duas horas e um minuto) e 07:00h (sete horas). Adicionalmente, foram considerados como níveis L_{Aeq} provenientes da passagem de composição ferroviária os níveis L_{Aeq} superiores em 03dB(A) ao Ruído Residual durante a passagem composição.

4.3 AVALIAÇÕES DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO

Os resultados das medições realizadas conforme procedimentos descritos anteriormente foram utilizados no cálculo de descritores de vibração e ruído ambiental para comparação com os critérios de avaliação de vibração e ruído ambiental ferroviário apresentados na revisão bibliográfica. Posteriormente, esses resultados também foram utilizados para realização de predição de vibração e ruído ambiental ferroviário no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M”.

5 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

5.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA E RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO

Os Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, $L_{Aeq,T}$, bem como os descritores de vibração ambiental, medidos no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M” no ano de 2013, estão resumidos a seguir nas Tabs. 11 a 22.

De forma a facilitar a identificação, a nomenclatura dos 12 (doze) pontos de medição foi composta do nome da malha ferroviária da qual o ponto pertence seguida de uma numeração em sequência.

As velocidades médias estimadas apresentadas nas Tabs. 11 a 22 foram calculadas medindo o tempo da passagem da frente da composição ferroviária por 02 (dois) pontos determinados, nos quais era conhecida a distância entre eles.

Tabela 11: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Diurno entre 07:01h e

19:00h

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L_{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [h]	Temperatura [°C]	Umidade Relativa [%]	Vento [m/s]
A01	50	Sem Passagem de Composição Ferroviária (Ruído Residual Diurno)	38	4	41	20	< 5,0
A02	100		38	4	40	20	< 5,0
A03	200		39	4	40	20	< 5,0
E02	25		60	4	23	45	< 5,0
E03	50		60	4	23	45	< 5,0
E04	75		58	4	23	45	< 5,0
E05	25		50	4	30	20	< 5,0
E06	50		52	4	30	20	< 5,0
E07	75		55	4	29	20	< 5,0
M02	50		41	4	31	45	< 5,0
M03	100		43	4	30	45	< 5,0
M04	200		47	4	30	45	< 5,0

Tabela 12: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Vespertino entre 19:01h e

22:00h

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L_{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [h]	Temperatura [°C]	Umidade Relativa [%]	Vento [m/s]
A01	50	Sem Passagem de Composição Ferroviária (Ruído Residual Vespertino)	46	1	25	35	< 5,0
A02	100		47	1	25	35	< 5,0
A03	200		46	1	25	35	< 5,0
E02	25		50	1	22	48	< 5,0
E03	50		49	1	22	48	< 5,0
E04	75		48	1	22	48	< 5,0
E05	25		51	1	24	44	< 5,0
E06	50		53	1	24	44	< 5,0
E07	75		55	1	24	44	< 5,0
M02	50		49	1	30	45	< 5,0
M03	100		45	1	30	46	< 5,0
M04	200		46	1	30	45	< 5,0

Tabela 13: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M. Período: Noturno entre 22:01h e

07:00h

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L_{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [h]	Temperatura [°C]	Umidade Relativa [%]	Vento [m/s]
A01	50	Sem Passagem de Composição Ferroviária (Ruído Residual Noturno)	46	3	23	44	< 5,0
A02	100		47	3	23	44	< 5,0
A03	200		50	3	23	44	< 5,0
E02	25		48	3	19	66	< 5,0
E03	50		47	3	19	66	< 5,0
E04	75		48	3	19	66	< 5,0
E05	25		49	3	20	55	< 5,0
E06	50		50	3	20	55	< 5,0
E07	75		53	3	20	55	< 5,0
M02	50		47	3	22	30	< 5,0
M03	100		47	3	22	30	< 5,0
M04	200		46	3	22	30	< 5,0

Tabela 14: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária A

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L _{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [min.]	Nº da Passagem de Composição Ferroviária
A01	50	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 20km/h]	70	4,22	PC01
			65	3,02	PC02
			63	6,23	PC03
			69	6,08	PC04
			70	3,90	PC05
			67	2,52	PC06
			64	5,02	PC07
			68	4,43	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
A02	100	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 20km/h]	69	4,22	PC01
			63	3,02	PC02
			58	6,23	PC03
			64	6,08	PC04
			65	4,89	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
			60	3,90	PC05
A03	200	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 20km/h]	59	2,52	PC06
			54	5,02	PC07
			58	3,81	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias

Tabela 15: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária E – local 01

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L_{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [min.]	Nº da Passagem de Composição Ferroviária
E02	25	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 25km/h]	76	4,02	PC01
			72	4,18	PC02
			70	5,67	PC03
			73	5,13	PC04
			73	4,75	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
E03	50	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 25km/h]	70	4,02	PC01
			67	4,18	PC02
			62	5,67	PC03
			65	5,13	PC04
			68	3,32	PC05
			68	4,46	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
E04	75	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 25km/h]	68	3,32	PC05

Tabela 16: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária E – local 02

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L_{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [min.]	Nº da Passagem de Composição Ferroviária
E05	25	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 50km/h]	80	4,10	PC01
			80	2,47	PC02
			78	3,13	PC03
			77	3,10	PC04
			80	5,32	PC05
			77	2,65	PC06
			77	3,87	PC07
			79	3,52	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
E06	50	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 50km/h]	73	4,10	PC01
			73	2,47	PC02
			72	3,13	PC03
			72	3,10	PC04
			75	5,32	PC05
			73	2,65	PC06
			71	3,87	PC07
			72	1,40	PC08
			72	4,70	PC09
			71	2,58	PC10
			76	3,27	PC11
			72	3,90	PC12
			71	2,52	PC13
			74	2,38	PC14

			76	1,75	PC15
			73	3,14	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
E07	75	Passagem de Composição Ferroviária com Buzina [velocidade média estimada de 50km/h]	72	1,40	PC08
			71	4,70	PC09
			71	2,58	PC10
			75	3,27	PC11
			71	3,90	PC12
			71	2,52	PC13
			73	2,38	PC14
			74	1,75	PC15
			73	2,81	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias

Tabela 17: Resultados das medições sonoras efetuadas no entorno da malha ferroviária M

Ponto de Simulação	Distância a Linha Férrea [m]	Situação	L _{Aeq} Medido [dB(A)]	Tempo de Medição [min.]	Nº da Passagem de Composição Ferroviária
M02	50	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 35km/h]	59	4,60	PC01
			65	2,93	PC02
			60	6,03	PC03
			66	6,22	PC04
			67	1,90	PC05
			59	5,47	PC06
			63	3,67	PC07
			64	4,97	PC08
			60	5,67	PC09
			62	6,97	PC10
			63	4,84	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
M03	100	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 35km/h]	54	4,60	PC01
			61	2,93	PC02
			57	6,03	PC03
			62	6,22	PC04
			62	1,90	PC05
			56	5,47	PC06
			60	4,53	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias
M04	200	Passagem de Composição Ferroviária sem Buzina [velocidade média estimada de 35km/h]	56	3,67	PC07
			55	4,97	PC08
			56	5,67	PC09
			55	6,97	PC10
			56	5,32	Média de todas as passagens de composições Ferroviárias

Tabela 18: Resultados das medições de vibração sem passagem de composições ferroviárias (vibração residual) efetuadas no entorno das malhas ferroviárias A, E e M

Ponto de Medição	V _{ef} [mm/s]				V _{ef,max} [mm/s]				V _{p,Hz} [mm/s]					V _{pico} [mm/s]			
	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	Hz	x	y	z	Res.*
A01 [50m]**	0,13	0,13	0,30	0,35	0,29	0,24	1,32	1,37	0,11	0,11	0,35	0,39	1,172	1,16	0,97	5,27	5,49
A02 [100m]**	0,22	0,20	0,92	0,96	0,56	0,80	5,13	5,22	0,37	0,25	1,09	1,18	1,172	2,24	3,22	20,52	20,89
A03 [200m]**	0,12	0,12	0,25	0,30	1,05	0,95	1,56	2,10	0,37	0,36	0,48	0,70	1,172	4,19	3,80	6,23	8,42
E02 [25m]**	0,35	0,39	0,42	0,67	3,92	4,12	2,34	6,15	0,08	0,08	0,32	0,34	1,172	15,69	16,49	9,34	24,60
E03 [50m]**	0,16	0,17	0,23	0,33	4,26	4,17	12,69	14,02	0,04	0,04	0,11	0,12	1,172	17,03	16,68	50,75	56,07
E04 [75m]**	0,24	0,25	0,39	0,52	3,37	4,13	5,50	7,66	0,10	0,10	0,29	0,33	1,172	13,48	16,50	22,02	30,64
E05 [25m]**	0,22	0,20	0,48	0,56	7,77	3,85	2,07	8,91	0,10	0,11	0,55	0,57	1,172	31,07	15,38	8,27	35,64
E06 [50m]**	0,14	0,13	0,17	0,25	4,08	1,33	0,93	4,39	0,13	0,13	0,16	0,25	1,172	16,31	5,34	3,72	17,56
E07 [75m]**	0,24	0,23	0,55	0,65	2,76	4,20	3,74	6,26	0,20	0,23	0,63	0,70	1,172	11,02	16,80	14,95	25,05
M02 [50m]**	0,10	0,10	0,14	0,20	8,72	10,54	3,32	14,08	0,63	0,72	0,56	1,12	1,172	34,88	42,16	13,27	56,30
M03 [100m]**	0,13	0,11	0,30	0,35	2,26	1,59	0,88	2,90	0,12	0,10	0,34	0,37	1,172	9,05	6,36	3,52	11,61

M04 [200m]**	0,26	0,24	0,25	0,43	1,59	2,51	3,09	4,29	0,03	0,04	0,14	0,15	1,172	6,36	10,05	12,37	17,16
-----------------	------	------	-------------	------	------	------	------	-------------	------	------	-------------	------	-------	------	-------	-------	--------------

* Resultante das componentes dos eixos x, y e z.

** Distância entre o ponto de medição e a linha férrea.

Tabela 19: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malhas ferroviárias

A

Ponto de Medição	V _{ef} [mm/s]				V _{ef,max} [mm/s]				V _{p,Hz} [mm/s]				V _{pico} [mm/s]				
	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	Hz	x	y	z	Res.*
A01 [50m]**	0,55	0,57	0,78	1,11	2,83	2,75	3,61	5,34	0,19	0,20	0,48	0,55	1,172	11,30	11,00	14,42	21,37
	0,58	0,59	0,74	1,11	3,96	5,17	5,31	8,40	0,18	0,19	0,37	0,46	1,172	15,84	20,66	21,25	33,60
	0,44	0,45	0,60	0,87	2,24	1,82	2,12	3,58	0,06	0,06	0,20	0,22	1,172	8,97	7,28	8,46	14,32
	0,70	0,71	0,83	1,30	3,14	1,84	4,13	5,50	0,29	0,29	0,37	0,55	1,172	12,58	7,35	16,51	22,01
A02 [100m]**	0,57	0,52	1,12	1,36	0,86	0,53	4,88	4,99	0,22	0,21	0,96	1,01	1,172	3,44	2,12	19,53	19,95
A03 [200m]**	1,43	0,98	1,01	2,00	4,12	0,97	3,19	5,30	1,11	0,73	0,72	1,51	1,172	16,49	3,88	12,76	21,21

* Resultante das componentes dos eixos x, y e z.

** Distância entre o ponto de medição e a linha férrea.

Nota: velocidade média estimada das passagens das composições ferroviárias igual a 20km/h.

Tabela 20: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malhas ferroviárias

E – local 01

Ponto de Medição	V _{ef} [mm/s]				V _{ef,max} [mm/s]				V _{p,Hz} [mm/s]					V _{pico} [mm/s]			
	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	Hz	x	y	z	Res.*
E02 [25m]**	1,03	1,15	1,53	2,17	8,27	13,38	19,21	24,83	0,09	0,10	0,40	0,42	1,172	33,07	53,52	76,83	99,30
E03 [50m]**	0,68	0,59	0,57	1,07	9,93	9,27	35,38	37,90	0,07	0,07	0,11	0,15	1,172	39,71	37,10	141,51	151,58
	0,70	0,62	0,40	1,02	7,24	4,96	1,50	8,91	0,03	0,03	0,09	0,10	1,172	28,98	19,85	6,02	35,64
	0,55	0,50	0,39	0,84	6,15	4,37	1,40	7,68	0,04	0,04	0,08	0,10	1,172	24,61	17,48	5,59	30,70
E04 [75m]**	0,48	0,55	0,52	0,89	3,72	6,07	7,12	10,07	0,03	0,04	0,09	0,11	1,172	14,86	24,30	28,49	40,28
	0,41	0,48	0,40	0,75	3,67	6,22	1,90	7,47	0,04	0,04	0,10	0,11	1,172	14,66	24,90	7,62	29,88

* Resultante das componentes dos eixos x, y e z.

** Distância entre o ponto de medição e a linha férrea.

Nota: velocidade média estimada das passagens das composições ferroviárias igual a 25km/h.

Tabela 21: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malha ferroviária E

– local 02

Ponto de Medição	V _{ef} [mm/s]				V _{ef,max} [mm/s]				V _{p,Hz} [mm/s]					V _{pico} [mm/s]			
	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	Hz	x	y	z	Res.*
E05 [25m]**	2,56	2,22	2,02	3,95	12,79	7,81	6,76	16,44	0,41	0,46	0,83	1,03	1,172	51,16	31,24	27,05	65,77
	2,49	2,12	1,65	3,66	19,91	15,53	7,85	26,44	0,29	0,32	0,53	0,68	1,172	79,65	62,10	31,41	105,77
E06 [50m]**	0,93	0,90	0,79	1,52	3,12	2,91	1,63	4,57	0,24	0,27	0,31	0,48	1,172	12,49	11,65	6,52	18,28
	0,90	0,90	0,93	1,58	2,14	0,82	2,46	3,36	0,41	0,39	0,53	0,78	1,172	8,55	3,27	9,82	13,43
	0,97	0,97	0,87	1,62	5,16	1,54	0,57	5,41	0,51	0,51	0,54	0,90	1,172	20,62	6,16	2,29	21,65
	1,45	1,32	1,13	2,26	8,19	4,25	1,51	9,35	0,40	0,42	0,43	0,72	1,172	32,74	17,01	6,02	37,39
	1,15	1,07	0,92	1,82	5,76	6,90	1,52	9,11	0,20	0,21	0,22	0,36	1,172	23,03	27,59	6,09	36,45
	1,49	1,40	1,27	2,41	5,75	6,31	1,89	8,75	0,55	0,56	0,58	0,97	1,172	23,01	25,26	7,55	34,99
E07 [75m]**	0,64	0,58	0,52	1,01	2,65	2,39	1,96	4,07	0,04	0,04	0,10	0,11	1,172	10,58	9,54	7,84	16,27
	1,12	1,23	1,45	2,20	2,50	3,57	1,30	4,55	0,52	0,55	0,79	1,09	1,172	10,00	14,26	5,21	18,18
	0,72	0,78	0,82	1,34	1,27	1,22	1,47	2,30	0,43	0,45	0,51	0,80	1,172	5,09	4,86	5,90	9,19
	1,14	1,25	1,33	2,15	2,10	3,18	2,01	4,31	0,52	0,55	0,62	0,98	1,172	8,42	12,72	8,06	17,25
	0,36	0,39	0,50	0,73	2,40	1,66	2,03	3,56	0,07	0,07	0,25	0,26	1,172	9,58	6,66	8,13	14,22
	0,88	0,94	0,93	1,59	4,91	5,56	2,33	7,77	0,35	0,36	0,36	0,62	1,172	19,62	22,24	9,33	31,09
	0,84	0,92	0,92	1,55	4,07	3,22	2,62	5,81	0,43	0,43	0,45	0,75	1,172	16,26	12,88	10,48	23,24
0,96	1,01	1,01	1,71	3,53	2,73	0,90	4,55	0,36	0,36	0,37	0,63	1,172	14,11	10,91	3,61	18,20	

* Resultante das componentes dos eixos x, y e z.

** Distância entre o ponto de medição e a linha férrea.

Nota: velocidade média estimada das passagens das composições ferroviárias igual a 50km/h.

Tabela 22: Resultados das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias efetuadas no entorno da malha ferroviária M

Ponto de Medição	V_{ef} [mm/s]				$V_{ef,max}$ [mm/s]				$V_{p,Hz}$ [mm/s]					V_{pico} [mm/s]			
	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	x	y	z	Res.*	Hz	x	y	z	Res.*
M02	0,10	0,11	0,21	0,26	0,21	0,13	0,92	0,95	0,05	0,05	0,18	0,19	1,172	0,85	0,52	3,67	3,80
[50m]**	1,32	1,36	1,48	2,41	1,58	2,67	0,19	3,11	0,71	0,67	0,80	1,26	1,172	6,30	10,68	0,77	12,42
M03	0,13	0,13	0,26	0,31	1,36	0,70	0,91	1,78	0,06	0,05	0,19	0,21	1,172	5,42	2,80	3,63	7,10
[100m]**																	
M04	0,11	0,13	0,18	0,25	0,42	0,35	0,48	0,73	0,04	0,04	0,10	0,12	1,172	1,70	1,40	1,91	2,91
[200m]**																	

* Resultante das componentes dos eixos x, y e z.

** Distância entre o ponto de medição e a linha férrea.

Nota: velocidade média estimada das passagens das composições ferroviárias igual a 35km/h.

Na Tab. 23 é apresentada a percepção da equipe que realizou as medições (duas pessoas) em relação à vibração durante as passagens de composições ferroviárias nos 12 (doze) pontos de medição. Destaca-se que a equipe se encontrava durante as medições na posição em pé, ou seja, a vibração percebida foi de corpo inteiro na posição vertical. Ressalta-se ainda que estes resultados não possuem nenhuma significância estatística, por se tratar da percepção de apenas duas pessoas.

Tabela 23: Percepção da vibração durante a passagem de composição ferroviária por duas pessoas

Ponto de Medição	Distância a Linha Férrea [m]	Percepção quanto à vibração de corpo inteiro na posição vertical
A01	50	Pouco perceptível.
A02	100	Imperceptível
A03	200	Imperceptível
E02	25	Claramente perceptível
E03	50	Perceptível
E04	75	Pouco perceptível
E05	25	Perceptível
E06	50	Pouco perceptível
E07	75	Imperceptível
M02	50	Pouco perceptível
M03	100	Imperceptível
M04	200	Imperceptível

6 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO

6.1.1 Aplicação dos Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário

Neste item são aplicados diferentes critérios de avaliação de ruído ambiental ferroviário identificados anteriormente no item 3.3 para diversas condições reais, utilizando os dados das medições realizadas. Para tanto, é necessário o cálculo dos descritores sonoros L_d , L_e , L_n , L_{dn} , L_{den} e L_{Aeq}^* na aplicação desses critérios de avaliação, os quais estão descritos a seguir.

Nas Tabs. 24 a 27 estão discriminados os descritores sonoros L_d , L_e , L_n , L_{dn} , L_{den} e L_{Aeq}^* obtidos através de cálculos e de medições efetuadas nos 12 (doze) pontos no entorno das malhas ferroviárias A, E, e M, bem como os dados adicionais utilizados para calcular esses descritores sonoros.

Tabela 24: Descritores Sonoros determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Ruído Total Diurno [L _{Aeq}]	Ruído Residual Diurno [L _{Aeq}]	L _{Aeq} Ferrovia Diurno* [dB(A)]	Ruído Total Vespertino [L _{Aeq}]	Ruído Residual Vespertino [L _{Aeq}]	L _{Aeq} Ferrovia Vespertino* [dB(A)]	Ruído Total Noturno [L _{Aeq}]	Ruído Residual Noturno [L _{Aeq}]	L _{Aeq} Ferrovia Noturno* [dB(A)]
A01	50	68	38	= 68	68	46	= 68	68	46	= 68
A02	100	65	38	= 65	65	47	= 65	65	47	= 65
A03	200	58	39	= 58	58	46	= 58	58	50	= 57
E02	25	73	60	= 73	73	50	= 73	73	48	= 73
E03	50	68	60	= 67	68	49	= 68	68	47	= 68
E04	75	68	58	= 68	68	48	= 68	68	48	= 68
E05	25	79	50	= 79	79	51	= 79	79	49	= 79
E06	50	73	52	= 73	73	53	= 73	73	50	= 73
E07	75	73	55	= 73	73	55	= 73	73	53	= 73
M02	50	63	41	= 63	63	49	= 63	63	47	= 63
M03	100	60	43	= 60	60	45	= 60	60	47	= 60
M04	200	56	47	= 55	56	46	= 56	56	46	= 56

* Ruído obtido excluindo a influência do Ruído Residual sobre o Ruído Total.

Tabela 25: Descritores Sonoros L_{dn} determinados no entorno das malhas ferroviárias A, E e M

Ponto de Medição	Distância à Ferrovia [m]	Passagem de Composição* [L_{Aeq}]	Ruído Residual Diurno [L_{Aeq}]	Ruído Residual Noturno [L_{Aeq}]	Média do tempo de passagem de composição [s]	Tempo com Passagem de Composição	Tempo sem Passagem de Composição	L_{dn} Residual [dB(A)]	L_{dn} Total [dB(A)]
A01	50	68	38	46	266	6,5%	93,5%	52	63
A02	100	65	38	47	293	7,1%	92,9%	53	61
A03	200	58	39	50	229	5,6%	94,4%	56	57
E02	25	73	60	48	285	4,9%	95,1%	59	67
E03	50	68	60	47	268	4,6%	95,4%	59	63
E04	75	68	58	48	199	3,5%	96,5%	58	62
E05	25	79	50	49	211	12,5%	87,5%	56	76
E06	50	73	52	50	188	11,1%	88,9%	57	70
E07	75	73	55	53	169	10,0%	90,0%	60	70
M02	50	63	41	47	290	12,1%	87,9%	53	61
M03	100	60	43	47	272	11,3%	88,7%	53	58
M04	200	56	47	46	319	13,3%	86,7%	53	56

* Média logarítmica dos níveis sonoros, L_{Aeq} , de todas as passagens de composições ferroviárias.

Tabela 26: Descritores Sonoros L_{den} determinados no entorno das malhas ferroviários A, E e M

Ponto de Medição	Distância à Ferrovia [m]	Passagem de Composição* [L_{Aeq}]	Ruído Residual Diurno [L_{Aeq}]	Ruído Residual Vespertino [L_{Aeq}]	Ruído Residual Noturno [L_{Aeq}]	Media do tempo de passagem de composição [s]	Tempo com Passagem de Composição	Tempo sem Passagem de Composição	L_{den} Residual [dB(A)]	L_{den} Total [dB(A)]
A01	50	68	38	46	46	266	6,5%	93,5%	52	63
A02	100	65	38	47	47	293	7,1%	92,9%	53	61
A03	200	58	39	46	50	229	5,6%	94,4%	56	57
E02	25	73	60	50	48	285	4,9%	95,1%	59	67
E03	50	68	60	49	47	268	4,6%	95,4%	59	63
E04	75	68	58	48	48	199	3,5%	96,5%	58	62
E05	25	79	50	51	49	211	12,5%	87,5%	56	77
E06	50	73	52	53	50	188	11,1%	88,9%	57	70
E07	75	73	55	55	53	169	10,0%	90,0%	60	70
M02	50	63	41	49	47	290	12,1%	87,9%	54	61
M03	100	60	43	45	47	272	11,3%	88,7%	53	59
M04	200	56	47	46	46	319	13,3%	86,7%	53	56

* Média logarítmica dos níveis sonoros, L_{Aeq} , de todas as passagens de composições ferroviárias.

Tabela 27: Descritores Sonoros L_{Aeq}^* determinados no entorno das malhas ferroviárias A, E e M

Ponto de Medição	Distância à Ferrovia [m]	Lt (Passagem de Composição**) [L_{Aeq}]	Lra - Diurno (Ruído Residual Diurno) [L_{Aeq}]	Lra - Noturno (Ruído Residual Noturno) [L_{Aeq}]	Tt (Média do tempo de passagem de composição) [s]	Ft [composições / hora]	Pt (Tempo com Passagem de Composição) [%]	L_{Aeq}^* Diurno [dB(A)]	L_{Aeq}^* Noturno [dB(A)]
A01	50	68	38	46	266	0,88	6,46	56	56
A02	100	65	38	47	293	0,88	7,13	54	54
A03	200	58	39	50	229	0,88	5,56	46	51
E02	25	73	60	48	285	0,63	4,95	63	60
E03	50	68	60	47	268	0,63	4,65	61	55
E04	75	68	58	48	199	0,63	3,46	59	54
E05	25	79	50	49	211	2,13	12,47	70	70
E06	50	73	52	50	188	2,13	11,12	64	64
E07	75	73	55	53	169	2,13	9,95	64	63
M02	50	63	41	47	290	1,50	12,10	54	55
M03	100	60	43	47	272	1,50	11,33	51	52
M04	200	56	47	46	319	1,50	13,30	50	49

** Média logarítmica dos níveis sonoros, L_{Aeq} , de todas as passagens de composições ferroviárias.

Nas Tabs. 29 a 37 são comparados os níveis sonoros calculados anteriormente com os limites indicados pelos critérios de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticados na Bélgica (Bruxelas), São Paulo (CETESB), Dinamarca, Alemanha, Coréia do Sul, Portugal, Eslovênia, Turquia e Estados Unidos da América (EUA).

Para estabelecer corretamente os limites dos critérios de avaliação, foram considerados os tipos de uso e ocupação do solo apresentados na Tab. 28 para cada ponto de medição.

Tabela 28: Tipo de Uso e Ocupação do Solo dos locais de medição no entorno das malhas ferroviárias A, E e M

Ponto de Medição	Tipo de Uso e Ocupação do Solo
A01	Residencial.
A02	Residencial.
A03	Residencial.
E02	Residencial.
E03	Residencial.
E04	Residencial.
E05	Rural.
E06	Rural.
E07	Rural.
M02	Rural.
M03	Rural.
M04	Rural.

Tabela 29: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Bélgica (Bruxelas)

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado na Bélgica (Bruxelas)
		L _{Aeq} Ferrovia Diurno	L _{Aeq} Limite Diurno	L _{Aeq} Ferrovia Noturno	L _{Aeq} Limite Noturno	
A01	50	68	70	68	65	Não Atende
A02	100	65	70	65	65	Atende
A03	200	58	70	57	65	Atende
E02	25	73	70	73	65	Não Atende
E03	50	67	70	68	65	Não Atende
E04	75	68	70	68	65	Não Atende
E05	25	79	70	79	65	Não Atende
E06	50	73	70	73	65	Não Atende
E07	75	73	70	73	65	Não Atende
M02	50	63	70	63	65	Atende
M03	100	60	70	60	65	Atende
M04	200	55	70	56	65	Atende

Tabela 30: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em São Paulo (CETESB)

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado em São Paulo (CETESB)
		L _{Aeq} * Diurno	L _{Aeq} Diurno Limite	L _{Aeq} * Noturno	L _{Aeq} Noturno Limite	
A01	50	56	65	56	60	Atende
A02	100	54	65	54	60	Atende
A03	200	46	65	51	60	Atende
E02	25	63	65	60	60	Atende
E03	50	61	65	55	60	Atende
E04	75	59	65	54	60	Atende
E05	25	70	65	70	60	Não Atende
E06	50	64	65	64	60	Não Atende
E07	75	64	65	63	60	Não Atende
M02	50	54	65	55	60	Atende
M03	100	51	65	52	60	Atende
M04	200	50	65	49	60	Atende

Tabela 31: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Dinamarca

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]		Avaliação quanto ao critério praticado na Dinamarca
		L _{den} Total	L _{den} Limite	
A01	50	63	58	Não Atende
A02	100	61	58	Não Atende
A03	200	57	58	Atende
E02	25	67	58	Não Atende
E03	50	63	58	Não Atende
E04	75	62	58	Não Atende
E05	25	77	58	Não Atende
E06	50	70	58	Não Atende
E07	75	70	58	Não Atende
M02	50	61	58	Não Atende
M03	100	59	58	Não Atende
M04	200	56	58	Atende

Tabela 32: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Alemanha

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado na Alemanha
		(L _{Aeq} - 5) Ferrovia Diurno	L _{Aeq} Limite Diurno	(L _{Aeq} - 5) Ferrovia Noturno	L _{Aeq} Limite Noturno	
A01	50	63	59	63	49	Não Atende
A02	100	60	59	60	49	Não Atende
A03	200	53	59	52	49	Não Atende
E02	25	68	59	68	49	Não Atende
E03	50	62	59	63	49	Não Atende
E04	75	63	59	63	49	Não Atende
E05	25	74	59	74	49	Não Atende
E06	50	68	59	68	49	Não Atende
E07	75	68	59	68	49	Não Atende
M02	50	58	59	58	49	Não Atende
M03	100	55	59	55	49	Não Atende
M04	200	50	59	51	49	Não Atende

Tabela 33: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Coréia do Sul

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado na Coréia do Sul
		L _{Aeq} Ferrovia Diurno	L _{Aeq} Limite Diurno	L _{Aeq} Ferrovia Noturno	L _{Aeq} Limite Noturno	
A01	50	68	70	68	60	Não Atende
A02	100	65	70	65	60	Não Atende
A03	200	58	70	57	60	Atende
E02	25	73	70	73	60	Não Atende
E03	50	67	70	68	60	Não Atende
E04	75	68	70	68	60	Não Atende
E05	25	79	70	79	60	Não Atende
E06	50	73	70	73	60	Não Atende
E07	75	73	70	73	60	Não Atende
M02	50	63	70	63	60	Não Atende
M03	100	60	70	60	60	Atende
M04	200	55	70	56	60	Atende

Tabela 34: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em Portugal

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado em Portugal
		L _{Aeq} Ferrovia Noturno	L _{Aeq} Limite Noturno	L _{den} Total	L _{den} Limite	
A01	50	68	45	63	55	Não Atende
A02	100	65	45	61	55	Não Atende
A03	200	57	45	57	55	Não Atende
E02	25	73	45	67	55	Não Atende
E03	50	68	45	63	55	Não Atende
E04	75	68	45	62	55	Não Atende
E05	25	79	45	77	55	Não Atende
E06	50	73	45	70	55	Não Atende
E07	75	73	45	70	55	Não Atende
M02	50	63	45	61	55	Não Atende
M03	100	60	45	59	55	Não Atende
M04	200	56	45	56	55	Não Atende

Tabela 35: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Eslovênia

Ponto de Medição	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]								Avaliação quanto ao critério praticado na Eslovênia
		L _{Aeq} Ferrovia Diurno	L _{Aeq} Limite Diurno	L _{Aeq} Ferrovia Vespertino	L _{Aeq} Limite Vespertino	L _{Aeq} Ferrovia Noturno	L _{Aeq} Limite Noturno	L _{den} Total	L _{den} Limite	
A01	50	68	60	68	55	68	50	63	60	Não atende
A02	100	65	60	65	55	65	50	61	60	Não atende
A03	200	58	60	58	55	57	50	57	60	Não atende
E02	25	73	60	73	55	73	50	67	60	Não atende
E03	50	67	60	68	55	68	50	63	60	Não atende
E04	75	68	60	68	55	68	50	62	60	Não atende
E05	25	79	55	79	50	79	45	77	55	Não atende
E06	50	73	55	73	50	73	45	70	55	Não atende
E07	75	73	55	73	50	73	45	70	55	Não atende
M02	50	63	55	63	50	63	45	61	55	Não atende
M03	100	60	55	60	50	60	45	59	55	Não atende
M04	200	55	55	56	50	56	45	56	55	Não atende

Tabela 36: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado na Turquia

Ponto de Simulação	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]				Avaliação quanto ao critério praticado na Turquia
		L _{Aeq} Ferrovia Diurno	L _{Aeq} Limite Diurno	L _{dn} Total	L _{dn} Limite	
A01	50	68	65	63	55	Não Atende
A02	100	65	65	61	55	Não Atende
A03	200	58	65	57	55	Não Atende
E02	25	73	65	67	55	Não Atende
E03	50	67	65	63	55	Não Atende
E04	75	68	65	62	55	Não Atende
E05	25	79	65	76	55	Não Atende
E06	50	73	65	70	55	Não Atende
E07	75	73	65	70	55	Não Atende
M02	50	63	65	61	55	Não Atende
M03	100	60	65	58	55	Não Atende
M04	200	55	65	56	55	Não Atende

Tabela 37: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado nos EUA

Ponto de Simulação	Distância à Fonte [m]	Descritores Sonoros [dB(A)]			Avaliação quanto ao critério praticado nos EUA
		L _{dn} Residual	L _{dn} Total	Limite do L _{dn} Total*	
A01	50	52	63	57	Não Atende
A02	100	53	61	57	Não Atende
A03	200	56	57	59	Atende
E02	25	59	67	62	Não Atende
E03	50	59	63	62	Não Atende
E04	75	58	62	61	Não Atende
E05	25	56	76	59	Não Atende
E06	50	57	70	60	Não Atende
E07	75	60	70	62	Não Atende
M02	50	53	61	57	Não Atende
M03	100	53	58	57	Não Atende
M04	200	53	56	57	Atende

Na Tab. 38 é apresentado um resumo da aplicação dos critérios de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado na Bélgica (Bruxelas), São Paulo (CETESB), Dinamarca, Alemanha, Coréia do Sul, Portugal, Eslovênia, Turquia e Estados Unidos da América (EUA), constantes nas Tabs. 29 a 37.

Tabela 38: Aplicação do Critério de Avaliação de Ruído Ferroviário praticado em diversos países

Ponto de Simulação	Distância à Fonte	Passagem de Composição Ferroviária	Avaliação quanto ao critério praticado em diversos países								
			Bélgica (Bruxelas)	São Paulo (CETESB)	Dinamarca	Alemanha	Coréia do Sul	Portugal	Eslovênia	Turquia	EUA
A01	50	Sem buzina	Não Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
A02	100	Sem buzina	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
A03	200	Sem buzina	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Atende
E02	25	Com buzina	Não Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
E03	50	Com buzina	Não Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
E04	75	Com buzina	Não Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
E05	25	Com buzina	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
E06	50	Com buzina	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende

E07	75	Com buzina	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
M02	50	Sem buzina	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
M03	100	Sem buzina	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Não Atende
M04	200	Sem buzina	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Atende	Não Atende	Não atende	Não Atende	Atende

6.1.2 Proposta e Análise dos Critérios de Avaliação de Ruído Ambiental Ferroviário

Os critérios de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticados na Bélgica (Bruxelas), Alemanha, Coréia do Sul, Portugal, Eslovênia e Turquia utilizam um ou mais descritores sonoros para avaliar os ruídos provenientes da ferrovia nos períodos diurno, vespertino e noturno (L_d , L_e e L_n). Estes descritores sonoros são obtidos excluindo a influência do Ruído Residual sobre o Ruído Total. Sendo assim, nos locais onde os Ruídos Residuais são elevados, em relação ao Ruído Total, não é possível determinar exatamente os descritores sonoros (L_d , L_e e L_n) provenientes da ferrovia, impossibilitando a aplicação dos critérios de avaliação que os utilizam como descritor de ruído. Em geral, os limites ou critérios de avaliação praticados nos países citados acima são bastante restritivos quando aplicados à atual realidade ferroviária brasileira. Este fato pode ser averiguado nas tabelas comparativas apresentadas onde se verifica que os descritores sonoros medidos e calculados, no entorno das malhas ferroviárias avaliadas, estão, em geral, com valores acima dos critérios de ruído praticados nos países citados.

O critério de avaliação praticado em São Paulo (CETESB) apresenta uma incoerência na sua metodologia de avaliação devido ao descritor sonoro L_{Aeq}^* utilizado. No cálculo desse descritor o Ruído Residual (L_{ra}) e o Ruído da Ferrovia (L_t) são adicionados (Tab. 01), implicando no fato de que mesmo para baixos níveis sonoros da Ferrovia, o descritor L_{Aeq}^* poderá ter valores elevados e acima do limite estabelecido pelo critério em questão, devido à predominância do Ruído Residual elevado no cálculo do L_{Aeq}^* . Ressalta-se, também, que este critério apresenta limites diferenciados para áreas escolares, hospitais e residenciais dentre outros. No entanto, esta diferenciação não leva em consideração a existência de ambientes dormitórios (como hospitais, hotéis e residências, etc...) nos locais avaliados. Considerando que os ruídos provenientes das ferrovias impactam a atividade de dormir de modo similar,

estes locais deveriam ter o mesmo critério de avaliação, mesmo porque uns dos maiores incômodos gerados pelo ruído ferroviário estão diretamente relacionados à atividade de dormir.

Os critérios de avaliação praticados na Dinamarca, Portugal e Eslovênia utilizam o descritor sonoro L_{den} , o qual considera o ruído equivalente ao longo dos períodos diurno, vespertino com penalização de 05dB(A) e noturno com penalização de 10dB(A). Essas penalizações se devem ao fato de o ruído gerar maior incômodo na comunidade nos períodos vespertino e noturno. Os limites do descritor L_{den} estabelecidos pelos critérios de avaliação em questão dependem somente do tipo de uso e ocupação do solo do local de medição, e não é definido qual L_{den} deve ser comparado a esses limites, se o L_{den} calculado com os níveis de Ruído Total (Ruído Residual + Ruído Ferrovia) ou o L_{den} calculado com os níveis do Ruído da Ferrovia (obtido excluindo a influência do Ruído Residual sobre o Ruído Total).

O critério de avaliação praticado nos Estados Unidos da América (EUA) utiliza o descritor sonoro L_{dn} , o qual considera o ruído equivalente ao longo dos períodos diurno e noturno com penalização de 10dB(A) neste último período. O limite do descritor L_{dn} estabelecido pelo critério de avaliação dos EUA é definido em função do L_{dn} Residual (L_{dn} calculado considerando apenas os níveis sonoros residuais diurno e noturno). Esse limite é utilizado para tipos de uso e ocupação do solo onde geralmente existem ambientes para dormir, como hotéis e residências. Além disso, os limites de L_{dn} são claramente definidos em L_{dn} - Total (L_{dn} calculado considerando os Ruídos Residuais e os níveis sonoros provenientes da atividade ferroviária, nos períodos diurno e noturno) e L_{dn} - Ferrovia (L_{dn} calculado considerando somente os níveis sonoros provenientes das atividades ferroviárias, obtidos excluindo a influência do Ruído Residual sobre o Ruído Total). Os limites estabelecidos pelo critério em questão também são bastante restritivos quando aplicados à atual realidade

ferroviária brasileira, conforme pode ser verificado na tabela comparativa apresentada (Tab. 37).

De forma geral, os níveis de ruídos provenientes das passagens de composições ferroviárias avaliadas não atendem aos limites estabelecidos pelos critérios de diversos países, conforme pode ser verificado na Tab. 38. Este fato provavelmente é devido à inexistência de normas, legislações ou similares sobre ruído ferroviário ambiental no Brasil, o qual gerou a falta execução de medidas de mitigação de ruído por partes das empresas ferroviárias brasileiras e a falta de fiscalização dos órgãos ambientais competentes no Brasil.

Dentro do contexto apresentado nos parágrafos anteriores, propõe-se que o critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado nos EUA seja proposto para avaliação do ruído ferroviário brasileiro, visto que este critério apresenta a metodologia melhor estruturada entre os critérios expostos. Entretanto, como a adequação dos níveis de ruído provenientes das passagens de composições ferroviárias ao critério proposto exige tempo e investimentos, sugere-se adotar limites intermediários durante um período de tempo determinado, até que seja viável o atender os limites estabelecidos pelo critério proposto.

Na Fig. 06 é apresentada a aplicação do critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado nos EUA (Tab. 37), o qual é proposto para ser praticado no Brasil. Nesta figura verifica-se que, considerando os 04 (quatro) pontos de avaliação que estão a distância de 50 (cinquenta) metros da linha férrea (A01, E03, E06 e M02), os níveis de $L_{dn} - Total$ calculados estão acima do limite estabelecido de 01dB(A) a 10dB(A). Além disso, tipicamente a utilização de barreiras acústicas atenuam o níveis de ruído entre 10dB(A) e 15dB(A), o que torna o critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado nos EUA tecnicamente viável para o Brasil.

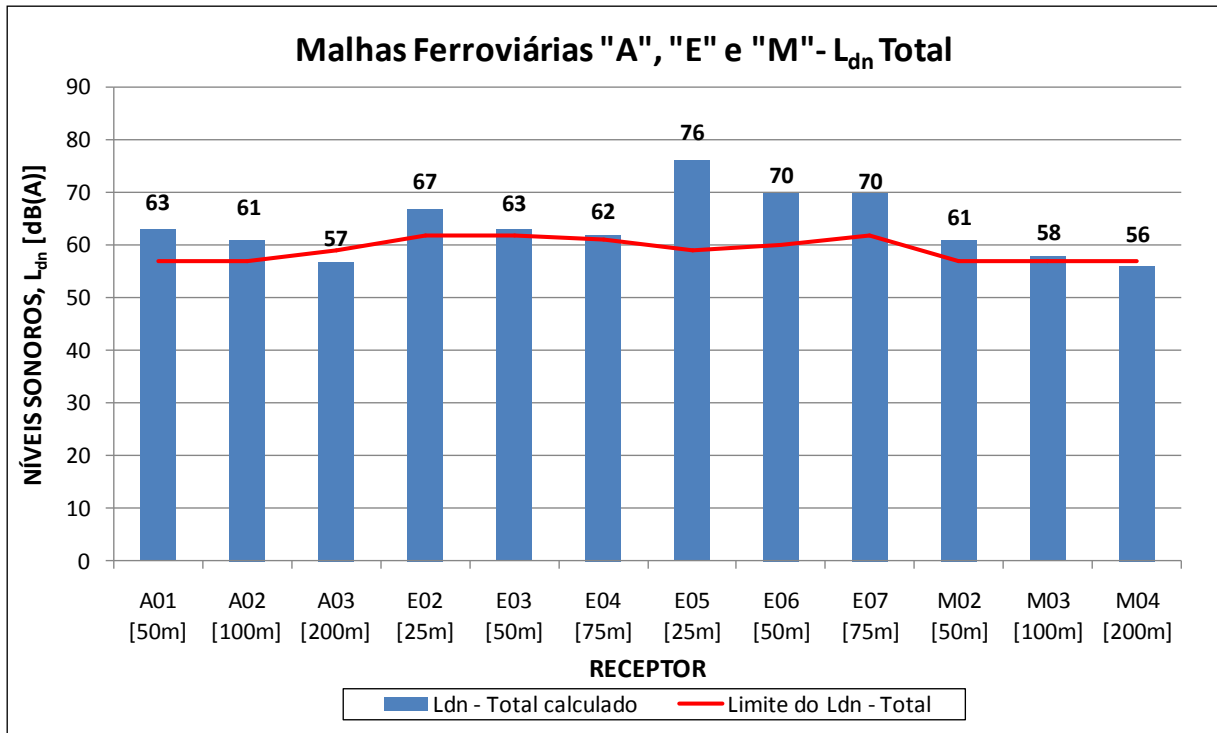


Figura 6: Aplicação do critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário praticado nos EUA

6.1.3 Caracterização dos Níveis de Ruído Típicos Provenientes da Passagem de Composições Ferroviárias

Para caracterizar os níveis sonoros típicos provenientes da passagem de composições ferroviárias, nas Figs. 07 a 10 estão apresentados os resultados dos Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , medidos a 50m da linha férrea e calculados para as demais distâncias considerando as medições simultâneas constantes nas Tabs. 14 a 17 no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M”. Destas figuras é possível verificar que existe uma variabilidade de até 08 (oito) dB(A) para o L_{Aeq} da passagem de composições ferroviárias em mesmo ponto de medição, o que indica a necessidade da medição de cerca de no mínimo 05 (cinco) passagens de composições para caracterizar adequadamente o nível de L_{Aeq} da passagem de composição em um determinado ponto.

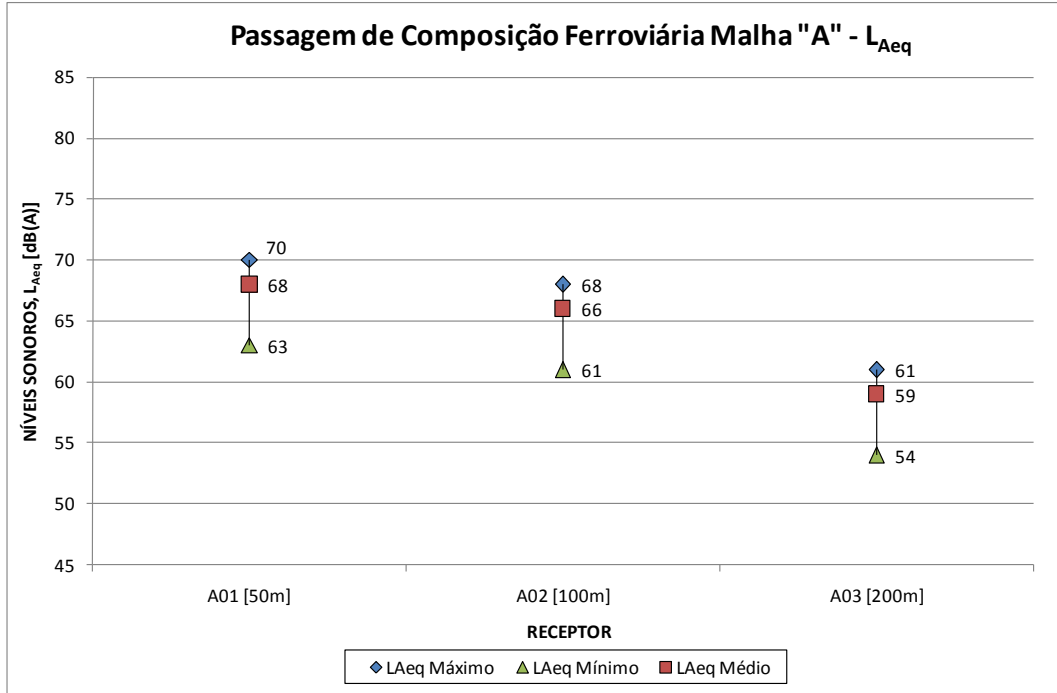


Figura 7: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “A”

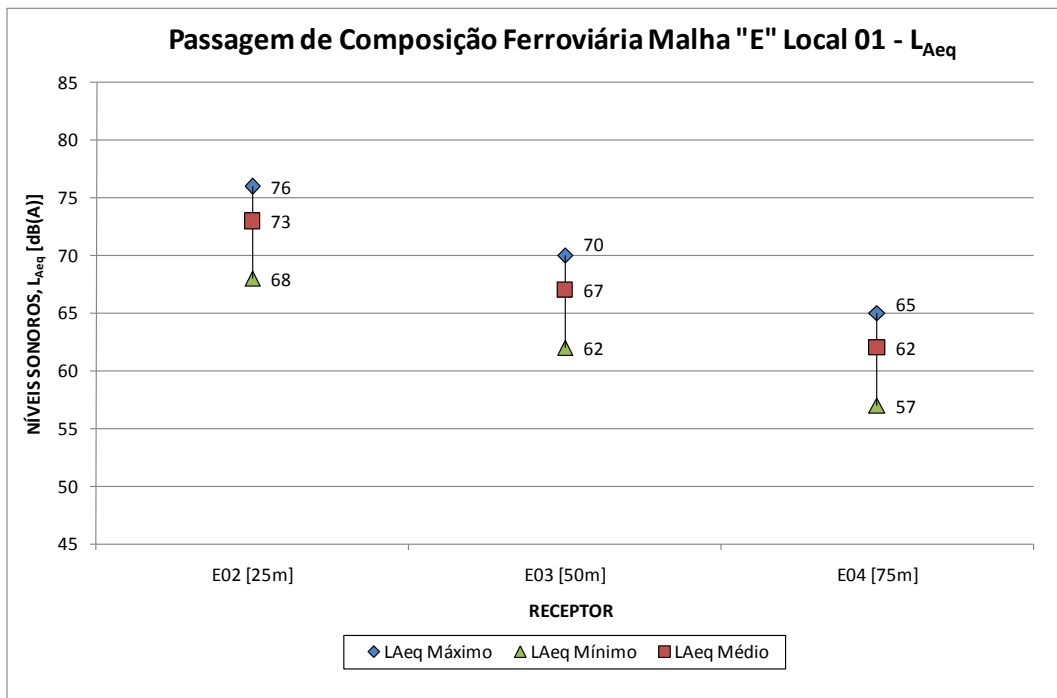


Figura 8: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq} , da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “E” local

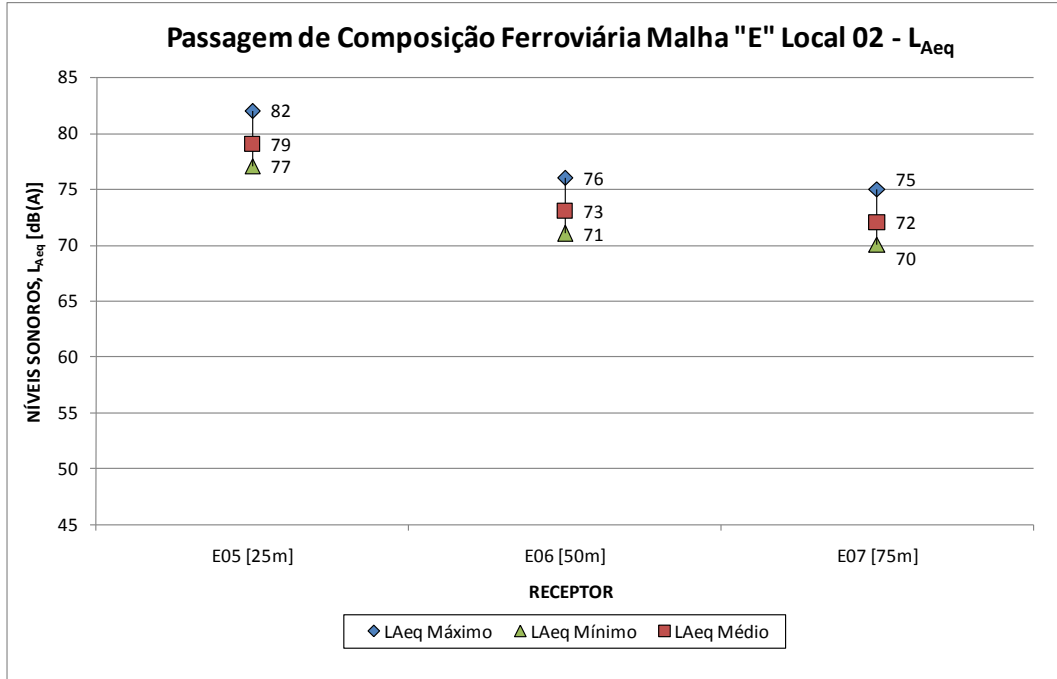


Figura 9: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq}, da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “E” local 02

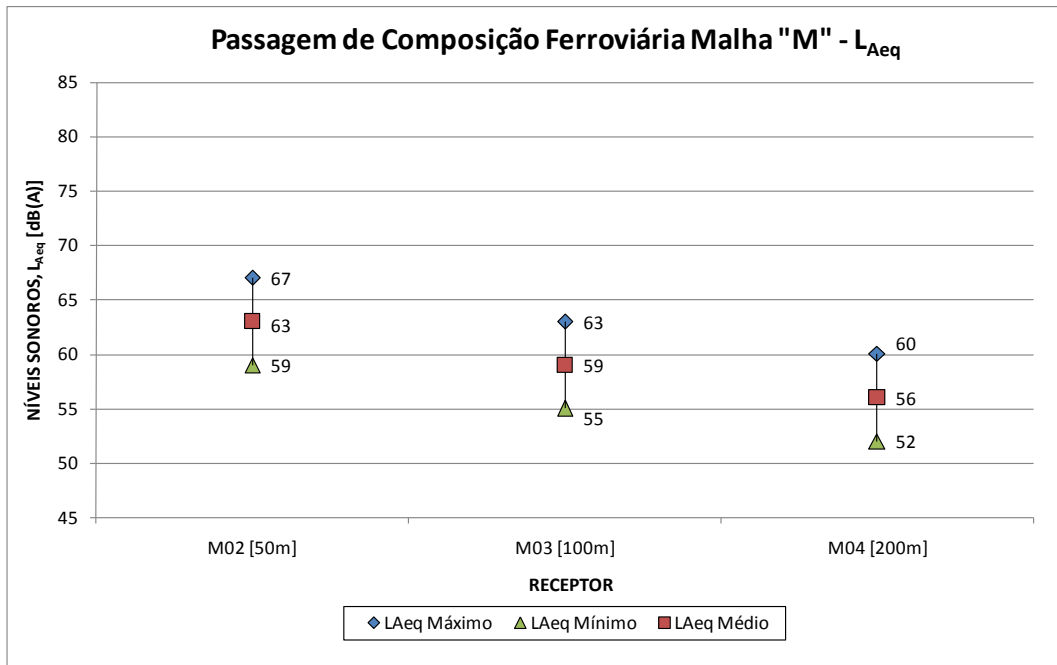


Figura 10: Níveis Sonoros Contínuos Equivalentes, expressos na curva de ponderação A, L_{Aeq}, da Passagem de Composições Ferroviárias no entorno da malha ferroviária “M”

6.1.4 Algumas Análises do Descritor Sonoro L_{dn}

Como o descritor sonoro L_{dn} é utilizado pelo critério de avaliação de ruído ambiental ferroviário proposto, duas análises específicas desse descritor serão apresentadas a seguir.

Os valores dos níveis sonoros L_{dn} - Ferrovia (L_{dn} calculado considerando somente os níveis sonoros provenientes das passagens de composições ferroviárias) convergem para o valor do nível sonoro L_{Aeq} proveniente da passagem de 01 (uma) composição ferroviária acrescido de 06dB(A). Considerando o valor do nível sonoro L_{Aeq} (proveniente da passagem de 01 (uma) composição ferroviária) igual a 74dB(A), o valor máximo do nível sonoro L_{dn} - Ferrovia será de 80(74+6)dB(A). A Fig. 11 apresenta essa convergência.

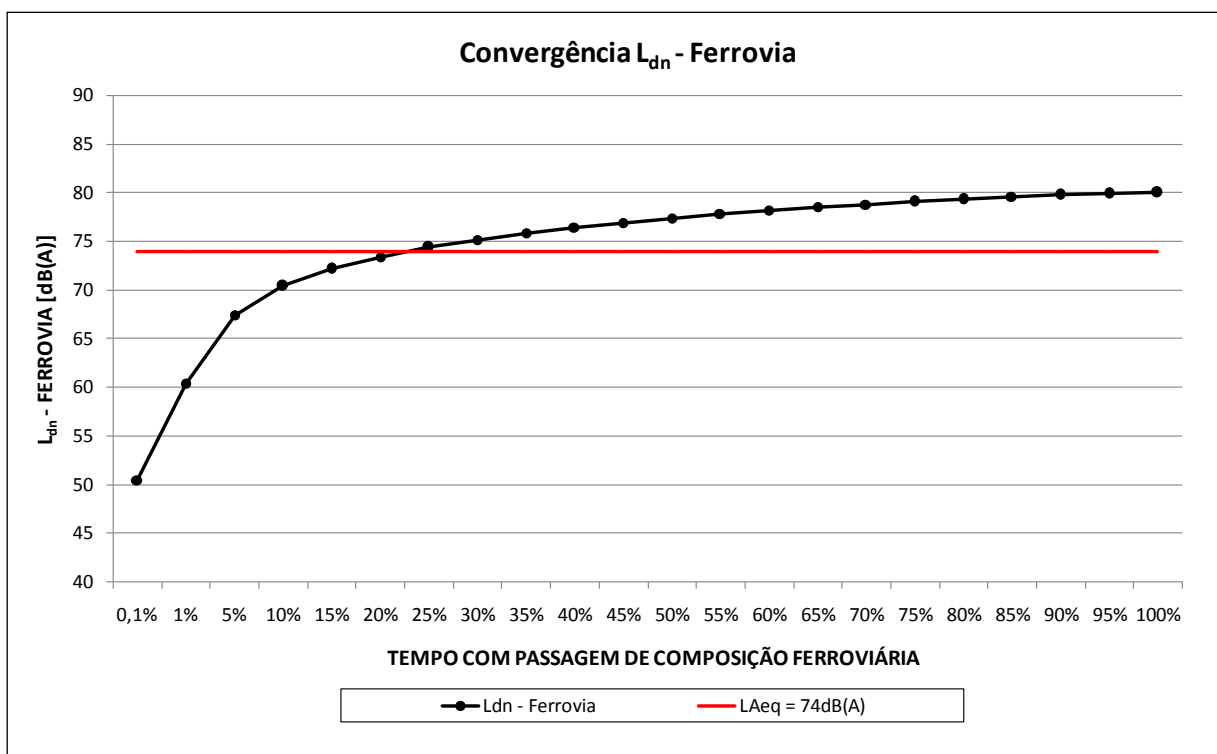


Figura 11: Convergência do descritor sonoro L_{dn} - Ferrovia

Questionamentos podem ser feitos em relação ao fato de se utilizar o descritor sonoro L_{dn} ao invés do descritor sonoro L_{den} , uma vez que o L_{den} divide às 24h do dia em três períodos e o L_{dn} em dois períodos. Entretanto, na Tab. 39 é feito um comparativo entre os descritores L_{dn} – Residual, L_{den} – Residual, L_{dn} – Total e L_{den} – Total calculados para os 12 (doze) pontos de avaliação no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M” (Tabs. 25 e 26). Esse comparativo mostra que não há uma diferença superior a 01dB(A) entre os valores dos níveis de L_{dn} e L_{den} calculados com os dados das medições de ruído deste trabalho. Com isto, não existe a necessidade de utilizar o descritor sonoro L_{den} ao invés do descritor sonoro L_{dn} para melhor caracterizar o ruído ambiental ferroviário.

Tabela 39: Comparação entre os descritores sonoros L_{dn} e L_{den} calculados no entorno das malhas ferroviárias “A”, “E” e “M”

Ponto de Medição	L_{dn} Residual [dB(A)]	L_{den} Residual [dB(A)]	$(L_{dn}-L_{den})$ Residual [dB(A)]	L_{dn} Total [dB(A)]	L_{den} Total [dB(A)]	$(L_{dn}-L_{den})$ Total [dB(A)]
A01	52	52	0	63	63	0
A02	53	53	0	61	61	0
A03	56	56	0	57	57	0
E02	59	59	0	67	67	0
E03	59	59	0	63	63	0
E04	58	58	0	62	62	0
E05	56	56	0	76	77	-1
E06	57	57	0	70	70	0
E07	60	60	0	70	70	0
M02	53	54	-1	61	61	0
M03	53	53	0	58	59	-1
M04	53	53	0	56	56	0

6.2 AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL FERROVIÁRIA

6.2.1 Aplicação e Avaliação dos Critérios de Avaliação de Vibração Ambiental Ferroviária

O Critério de Vibração LNEC utiliza o maior valor de velocidade eficaz (V_{ef}) entre os eixos de medição x, y e z para avaliar a percepção da vibração em seres humanos e efeitos sobre edificações.

Analisando os maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração sem passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito na Tab. 18), verifica-se que esses valores variam dentro da faixa de 0,14 a 0,92mm/s. Comparando essa faixa de valores medidos com o Critério de Avaliação de Vibração LNEC para avaliar a percepção da vibração constante na Tab. 03, avalia-se que em todos os 12 (doze) pontos de medição a vibração é perceptível ou nítida segundo tal critério. Como os níveis de vibração das medições com passagem de composições ferroviárias são superiores aos das medições sem passagem de composições (Tabs. 19 a 22), em todos os 12 (doze) pontos de medição a avaliação da vibração também é obtida como perceptível ou nítida na situação com passagem de composição.

Comparando os maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração sem e com passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito nas Tabs. 18 a 22) com o Critério de Avaliação de Vibração LNEC para avaliar a efeitos da vibração sobre edificações constate na Tab. 04, avalia-se que em todos os pontos de medição a vibração gera efeitos nulos em edificações.

O Critério de Vibração USA utiliza o descritor de vibração $V_{ef,max}$ para avaliar o incômodo da vibração em seres humanos e o descritor de vibração V_{pico} para avaliar danos

sobre edificações. Como esse critério não especifica qual eixo de medição deve ser adotado para avaliação, será considerado o valor da resultante de $V_{ef,max}$ e V_{pico} dos eixos de medição (x, y e z).

Analisando os valores de $V_{ef,max}$ das medições de vibração sem passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito na Tab. 18), verifica-se que esses valores variam dentro da faixa de 1,37 a 14,08mm/s. Comparando essa faixa de valores medidos com o Critério de Vibração USA para avaliar o incômodo da vibração (Tab. 05), avalia-se que em todos os 12 (doze) pontos de medição a vibração é incômoda para humanos segundo tal critério. Como os níveis de vibração das medições com passagem de composições ferroviárias são superiores aos das medições sem passagem de composições (Tabs. 19 a 22), em todos os 12 (doze) pontos de medição a avaliação da vibração também é incômoda aos humanos na situação com passagem de composição.

Comparando os valores de V_{pico} das medições de vibração sem e com passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito nas Tabs. 18 a 22) com o Critério de Vibração USA para avaliar a danos da vibração sobre edificações (Tab. 06), avalia-se que em todos os pontos de medição a vibração gera danos em edificações sem projeto de engenharia, mesmo na situação sem passagem de composição ferroviária.

O Critério de Avaliação de Vibração proposto por Whiffin & Leonard utiliza o valor de $V_{p,Hz}$ do eixo de medição vertical (eixo z) para avaliar a reação humana a vibração e os efeitos da vibração sobre edificações.

Analisando os valores de $V_{p,Hz}$ das medições de vibração sem passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito na Tabela 18), verifica-se que esses valores variam dentro da faixa de 0,11 a 1,09mm/s. Comparando essa faixa de valores medidos com o Critério de Avaliação de Vibração proposto por Whiffin & Leonard para avaliar a reação humana a vibração constata-se na Tab. 07, avalia-se que em todos os 12 (doze) pontos de

medição a vibração não é perceptível ou esta no seu limiar para percepção segundo tal critério. Como os valores de $V_{p,Hz}$ das medições com passagem de composições ferroviárias variam dentro da faixa de 0,08 a 0,96mm/s (Tabs. 19 a 22), em todos os 12 (doze) pontos de medição a avaliação da vibração também não é perceptível ou está no seu limiar para percepção na situação com passagem de composição.

Comparando os valores de $V_{p,Hz}$ das medições de vibração sem e com passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito nas Tabs. 18 a 22) com o Critério de Avaliação de Vibração proposto por Whiffin & Leonard para avaliar a efeitos da vibração sobre edificações constante na Tab. 07, avalia-se que em todos os pontos de medição a vibração não causa nenhum tipo de danos em edificações.

O Critério de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150 utiliza o valor de $V_{p,Hz}$ do eixo de medição vertical (eixo z) para avaliar os danos da vibração sobre edificações.

Analisando os valores de $V_{p,Hz}$ das medições de vibração sem e com passagem de composições ferroviárias (destacados em negrito nas Tabs. 18 a 22), verifica-se que esses valores variam dentro da faixa de 0,08 a 1,09mm/s. Comparando essa faixa de valores medidos com o Critério de Avaliação de Vibração da Norma Alemã DIN 4150 para avaliar danos em edificações devido a vibração (Tab. 08), avalia-se que em todos os 12 (doze) pontos de medição a vibração sem e com passagem de composições ferroviárias não gera danos em edificações.

O Critério de Vibração CETESB utiliza o descritor de vibração nomeado de “Velocidade de Vibração de Partícula – Pico”, porém, não apresenta a definição do mesmo. Além disso, tal critério não especifica qual eixo de medição deve ser adotado para avaliação. Assim, não será possível aplicar o Critério de Vibração CETESB.

6.2.2 Proposta de Critério de Avaliação de Vibração Ambiental Ferroviária

Para avaliar a percepção ou reação humana a vibração ambiental ferroviária, sugere-se o estabelecimento de um critério de avaliação baseado em uma pesquisa subjetiva estatisticamente significativa. Como exemplo, na Fig. 12 são apresentados os maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração sem e com passagem de composições ferroviárias classificados de acordo com a percepção à vibração da equipe que realizou as medições (Tab. 23), a qual não é estatisticamente significativa por se tratar de avaliação de apenas duas pessoas.

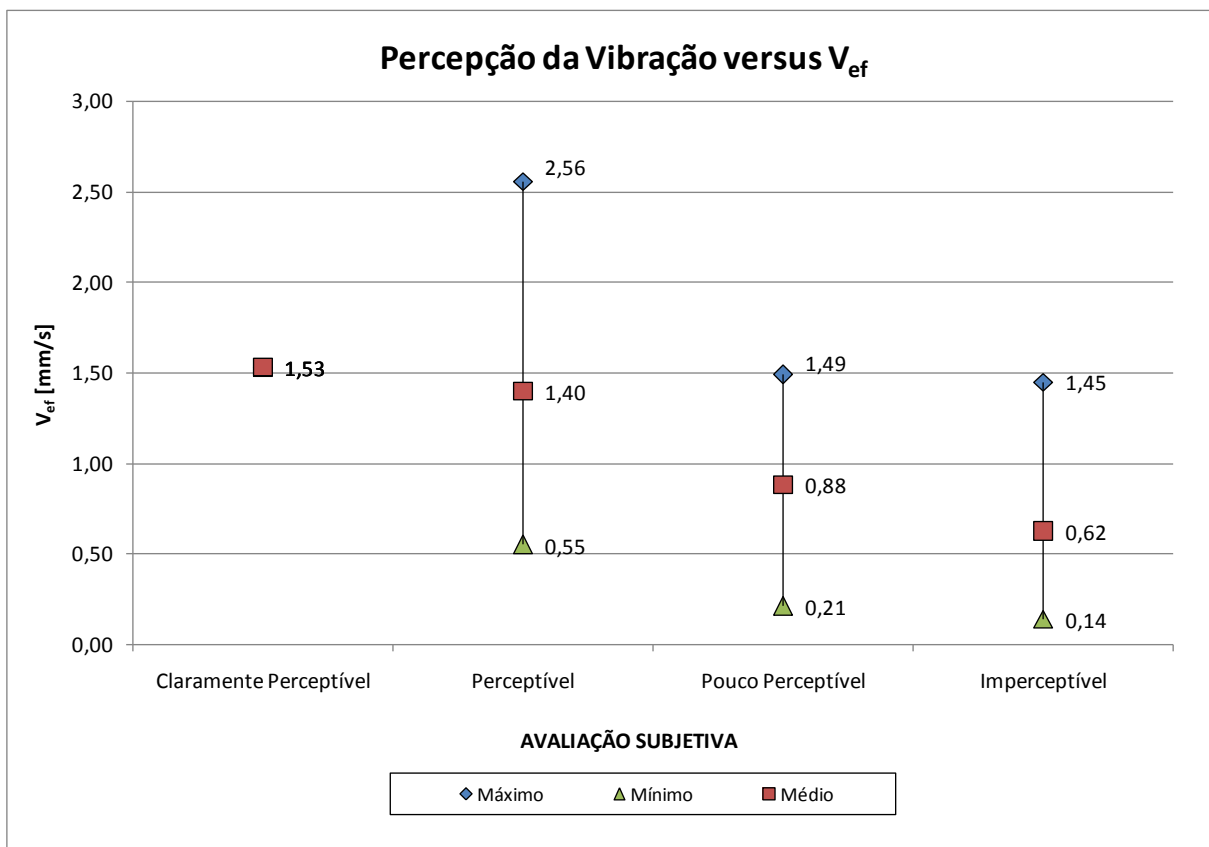


Figura 12: Níveis de vibração V_{ef} medidos versus avaliação subjetiva

Propõe-se ainda que o critério para avaliar a percepção humana a vibração ambiental ferroviária a ser praticado no Brasil seja baseado também nos fatores de ponderação em frequência W_k e W_d estabelecidos pela norma ISO 2631-1 (ISO, 1997). O fator de ponderação em frequência W_k é utilizado sobre os níveis de vibração medidos na direção vertical (eixo z) e o fator de ponderação em frequência W_d é utilizado sobre os níveis de vibração medidos nas direções horizontais (eixos x e y), ambos os fatores estão apresentados na Tab. 40. Esses fatores de ponderação foram estabelecidos considerando que a percepção humana à vibração é dependente da frequência da excitação.

Para avaliar efeitos ou danos de vibração em edificações devido a vibração ambiental ferroviária, sugere-se que seja adotado um critério de avaliação que utilize um descritor de vibração máximo ou de pico, devido ao fato que estruturas podem falhar com certos valores de cargas solicitantes mesmo que por um curto intervalo de tempo.

Tabela 40: Fatores de ponderação em frequência W_k e W_d (ISO 2631-1, 1997).

Frequência central da banda de 1/3 de oitava. [Hz]	W_k Fator x1000	W_d Fator x1000
1	482	1011
1,25	484	1008
1,6	494	968
2	531	890
2,5	631	776
3,15	804	642
4	967	512
5	1039	409
6,3	1054	323
8	1036	253
10	988	212
12,5	902	161
16	768	125
20	636	100
25	513	80,0
31,5	405	63,2
40	314	49,4
50	246	38,8
63	186	29,5
80	132	21,1
100	88,7	14,1
125	54,0	8,63
160	28,5	4,55
200	15,2	2,43
250	7,90	1,26
315	3,98	0,64
400	1,95	0,31

Não foi possível aplicar os fatores de ponderação em frequência W_k e W_d sobre resultados das medições deste trabalho devido às medições de vibração terem sido realizadas em FFT e tais fatores serem estabelecidos em 1/3 de banda de oitava (Tabela 40).

7 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO AMBIENTAL FERROVIÁRIO

7.1 SIMULAÇÃO DE RUÍDO

7.1.1 Proposta de Metodologia de Simulação de Ruído Ambiental Ferroviário

O procedimento de simulação sonora deve atender os procedimentos de propagação de ruído em ambientes externos estabelecidos na norma ISO 9613 - Partes 1 e 2, conforme apresentado no item 3.5.

Na modelagem do ambiente físico de simulação devem ser considerados os seguintes itens:

- Fonte sonora: a passagem de composição ferroviária é modelada por uma fonte sonora linear posicionada ao longo do eixo da ferrovia e a 2,5m do solo.
- Topografia: para representação do relevo devem-se considerar as curvas de níveis até uma distância mínima de 1000m do eixo da ferrovia, em cada um dos seus lados, e o tipo de absorção sonora do solo.
- Obstáculos acústicos: edificações, muros, barreiras acústicas e outros obstáculos significantes à propagação do ruído devem ser considerados. A modelagem desses obstáculos é realizada com as informações de sua geometria e absorção sonora de sua superfície externa.

- Condições ambientais: a média anual de temperatura e umidade do ar da região de simulação deve ser considerada, assim como a direção predominante de ventos, sempre que essa informação estiver disponível.
- Receptores: pontos de simulação sonora devem ser posicionados no(s) local(is) de medição sonora e em outros locais onde se deseja avaliar o ruído proveniente da ferrovia.

Mapas Acústicos de níveis de ruído podem ser confeccionados de forma a facilitar a visualização do ruído proveniente da ferrovia simulado no seu entorno.

Conforme já dito, no Brasil não existe um banco de dados de potência sonora de ferrovias para as composições ferroviárias que tipicamente circulam na malha ferroviária brasileira. Com isto, os níveis sonoros da ferrovia na simulação (potência sonora da fonte linear) em espectro de banda de oitava são determinados conforme as etapas do procedimento a seguir adaptado da norma ISO 3095 (2013):

- a) Medição sonora (níveis globais e espectro sonoro) de passagens de composições típicas da malha ferroviária em avaliação, considerando o local de medição em terreno plano sem obstáculos acústicos e um ponto de medição a 50m (ou distância mais próxima desta) do eixo da ferrovia.
- b) Utilizar como potência sonora da fonte sonora linear a média logarítmica do L_{eq} do espectro sonoro medido para as bandas de oitava de 63Hz a 8kHz.
- c) Calibrar a simulação sonora posicionando um receptor no ambiente de simulação à mesma distância do eixo da ferrovia que do ponto de medição, ajustando níveis globais de L_{Aeq} simulado da passagem de 01 (uma) composição ferroviária com a média logarítmica níveis globais L_{Aeq} medidos durante as passagens de composições no ponto de medição.

7.1.2 Aplicação da Proposta de Metodologia de Simulação de Ruído Ambiental Ferroviário

Para aplicação do modelo de simulação de ruído ambiental proposto para ferrovias, foi realizada a simulação da malha ferroviária “E” no local 2 (pontos de medição E05, E06 e E07).

Os procedimentos e padrões de cálculos estabelecidos pela norma ISO 9613 – Partes 01 e 02 estão implementados no software comercial CadnaA 4.1, o qual foi utilizado na simulação de ruído em questão.

O ambiente físico de simulação abrange um trecho de aproximadamente 500 (quinhentos) metros da malha ferroviária E e a área do seu entorno. A área delimitada para a simulação foi definida levando-se em consideração uma distância de 1000 (mil) metros a partir do eixo da ferrovia, em ambos os lados da mesma. Nas simulações de propagação sonora foi desconsiderada a presença de ventos e supostas temperaturas e umidades do ar, homogêneas em todo o modelo, iguais a 20°C e 50%, respectivamente.

Os níveis sonoros (potência sonora) da ferrovia foram obtidos, experimentalmente, a partir das medições sonoras de passagens de composições ferroviárias efetuadas no ponto de medição E06, o qual se encontra a 50m de distância da malha E. Na Tab. 41 é apresentada a média logarítmica dos níveis globais e espectro sonoro de passagens de composições medido no ponto E06, os quais foram utilizados para determinação da potência sonora da fonte linear na simulação.

Tabela 41: Média logarítmica dos níveis globais e espectro sonoro medidos no ponto E06 durante a passagem de composições ferroviárias

Ponto de Medição	Espectro em 1/1 de Oitava - L_{eq} [dB]								Níveis Globais - L_{eq}	
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	dB(A)	dB
E06 (Média Logarítmica dos Níveis Sonoros durante a Passagem de Composições Ferroviárias)	84	80	66	66	69	66	63	51	73	84

Com os procedimentos e dados anteriores, foram realizadas simulações de propagação de ruído considerando a passagem de 01 (uma) composição ferroviária, com o ruído proveniente deste evento representado pelo Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente, L_{Aeq} , durante a passagem da composição. A simulação de ruído foi calibrada igualando o nível de L_{Aeq} simulado no ponto E06 ao valor do nível L_{Aeq} medido no mesmo ponto.

Além dos 03 (três) pontos de medição E05, E06 e E07, foi acrescentado no ambiente de simulação um receptor (ES01) a 200 (duzentos) metros do eixo da ferrovia para analisar a influência do ruído no entorno da malha E.

Na Tab. 42 e nas Figs. 13 e 14 são apresentados os resultados das simulações sonoras considerando a passagem de 01 (uma) composição ferroviária.

Tabela 42: Níveis sonoros, L_{Aeq} , obtidos para os 04 (quatro) pontos de avaliação na malha ferroviária E, considerando a passagem de 01 (uma) composição ferroviária

Ponto de Avaliação	Nível de Pressão Sonora Equivalente (Simulado) (passagem de 01 composição ferroviária)	Nível de Pressão Sonora Equivalente (Medido) (média logarítmica do L_{Aeq} de passagens de composições ferroviárias)
	L_{Aeq} [dB(A)]	L_{Aeq} [dB(A)]
E05 [25m]*	76	79
E06 [50m]*	73	73
E07 [75m]*	69	73
ES01 [200m]*	66	-

*Distância do ponto de avaliação à via Férrea.

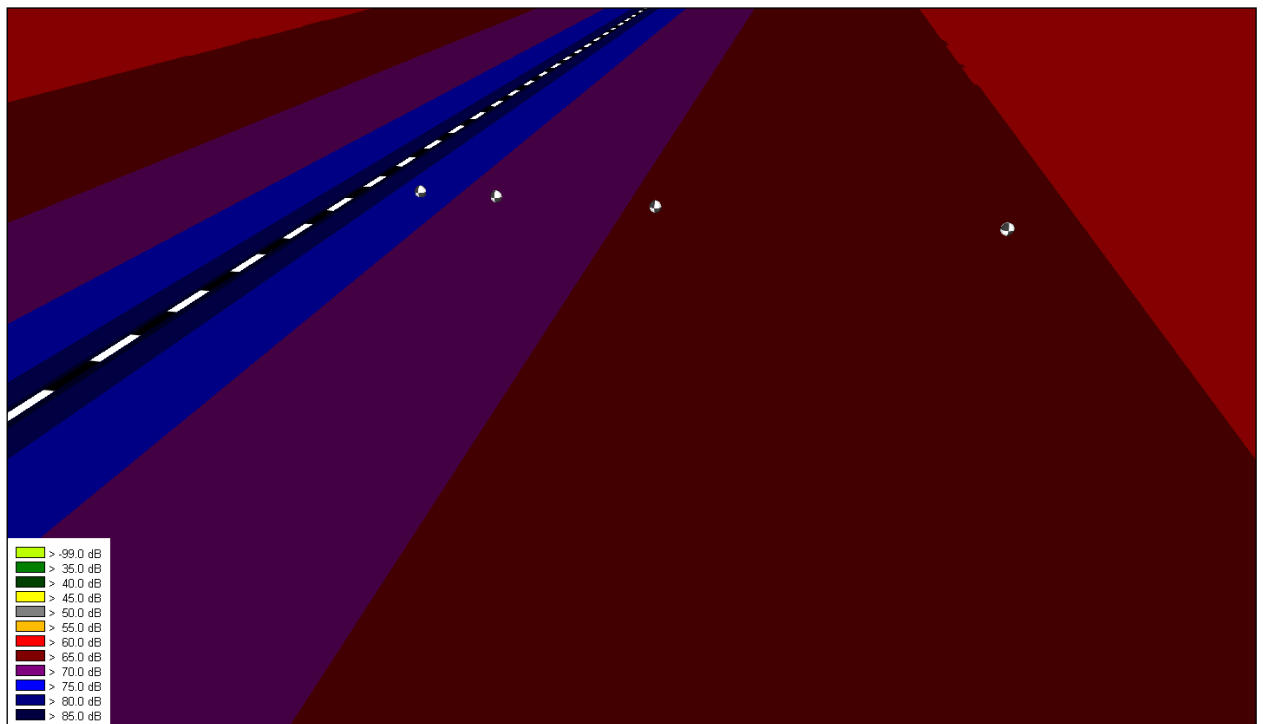


Figura 13: Resultados da simulação de ruído no entorno da malha ferroviária E local

02 – Visualização 3D

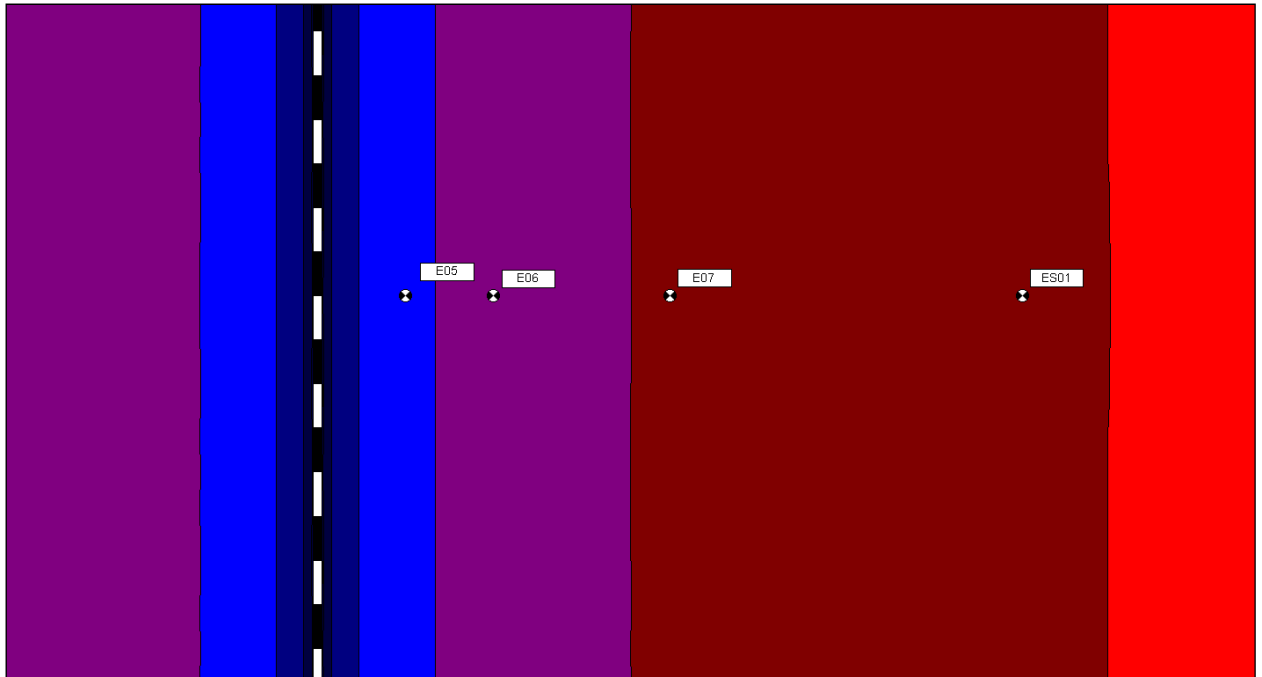


Figura 14: Resultados da simulação de ruído no entorno da malha ferroviária E local

02 – Mapa Acústico

Com os níveis sonoros globais simulados, L_{Aeq} , de uma passagem de composição ferroviária, é possível calcular os descritores sonoros L_{dn} – Ferrovia para os 04 (quatro) pontos de avaliação.

Na Tab. 43 estão discriminados os Níveis Sonoros L_{dn} – Ferrovia calculados para os 04 (quatro) pontos de avaliação, no entorno da linha férrea malha E local 02, e os dados considerados para sua determinação.

Tabela 43: Níveis Sonoros L_{dn} – Ferrovia determinados no entorno da Linha Férrea da malha E local 02.

Ponto de Avaliação	Distância à Ferrovia [m]	Passagem de Composição* [L_{Aeq}]	Média do tempo de duração de passagem de composição [s]	Intervalo de tempo com Passagem de Composição durante 24hs	Intervalo de tempo sem Passagem de Composição durante 24hs	L_{dn}^{**} Ferrovia [dB(A)]
E05	25	76	180	10,6%	89,4%	73
E06	50	73	180	10,6%	89,4%	70
E07	75	69	180	10,6%	89,4%	66
ES01	200	66	180	10,6%	89,4%	63

* Níveis sonoro contínuos equivalentes, L_{Aeq} , simulado para o intervalo de tempo de duração de 01 (uma) passagem de composição ferroviária.

** L_{dn} da Ferrovia foi calculado considerando 51 passagens de Composições Ferroviárias por dia, com intervalo de tempo de duração de passagem de 180s.

Para futuras simulações em que não é possível a realização de medição, na Tab. 41 é apresentada a média logarítmica dos níveis de espectro sonoro de passagens de composições medido para diversas condições da linha férrea, os quais podem ser utilizados para determinação da potência sonora da fonte linear na simulação.

Tabela 44: Média logarítmica dos níveis globais e espectro sonoro medido para diversas condições da linha férrea durante a passagem de composições ferroviárias

Condições da Linha Férrea	Espectro em 1/1 de Oitava - L_{eq} [dB]							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Traçado em curva e alta velocidade (60 km/h)	74	73	64	62	62	57	54	43
Traçado em linha reta e baixa velocidade (20 km/h)	76	73	65	62	55	55	53	45
Traçado em linha reta e alta velocidade (60 km/h)	76	77	65	66	67	64	62	58

7.2 PREDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

7.2.1 Adaptação do Método Sueco de Previsão de Vibração

Como método de predição de vibração ambiental ferroviária propõe-se o “Método Sueco de Previsão de Vibração” (item 3.6) com algumas adaptações conforme a Eq. 7.1.

$$V_{ef} = V_{ef,0} \times \left(\frac{D_{vib}}{D_{vib,0}} \right)^{F_D} \times \left(\frac{C_{vib}}{C_{vib,0}} \right)^{F_C} \times F_R \times F_B \quad (7.1)$$

Onde:

$V_{ef,0}$ corresponde média aritmética dos maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias em um ponto a uma distância de referência $D_{vib,0}$ de 50 (cinquenta) metros da linha férrea;

$C_{vib,0}$ é a velocidade média de circulação das composições ferroviárias durante as medições de $V_{ef,0}$;

D_{vib} é a distância do ponto de previsão à linha férrea;

F_D é o fator de atenuação com a distância, sendo assumido o valor de -0,6, o qual é o valor típico praticado na Suécia;

C_{vib} é a velocidade da composição ferroviária de que se quer prever a vibração;

F_C é o fator de variação com a velocidade da composição ferroviária, sendo assumido o valor tipicamente praticado de 0,9;

F_R é o fator de qualidade da linha, sendo assumido o valor de 1 devido ao fato de não se ter parâmetros para basear a avaliação da qualidade da linha férrea;

F_B é o fator de amplificação do edifício, sendo assumido o valor de 1, visto que as medições foram realizadas no solo.

Resumindo, as variáveis do método proposto são $V_{ef,0}$, $C_{vib,0}$, C_{vib} e D_{vib} sendo os outros parâmetros constantes pré-estabelecidas conforme a seguir.

$$D_{vib,0} = 50\text{m}$$

$$F_D = -0,6$$

$$F_C = 0,9$$

$$F_R = 1$$

$$F_B = 1$$

Para aplicação do método proposto, foi realizada a predição vibração ambiental da malha ferroviária “E” no local 02 (pontos de medição E05, E06 e E07). Nessa área o ponto de referência é o ponto de medição E06 por estar posicionado a uma distância de 50 (cinquenta) metros ($D_{vib,0}$) da linha férrea. No ponto E06 a média aritmética dos maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias é de 1,08mm/s ($C_{vib,0}$) e a velocidade média estimada das passagens de composições ferroviárias durante a medição é de 50km/h ($C_{vib,0}$). Com esses dados e as constates pré-estabelecidas pelo método proposto, foi realizada a predição de vibração da malha ferroviária “E” - local 02 nos pontos de medição (E05, E06 e E07) e em mais 02 (dois) pontos de avaliação (EV01 e EV02). Os resultados dessa predição de vibração estão apresentados na Tab. 45.

Tabela 45: Níveis de vibração V_{ef} previstos e medidos no entorno da linha férrea da malha “E” local 02.

Ponto de Avaliação	D_{vib} [m]	C_{vib} [km/h]	V_{ef} Previsto* [mm/s]	V_{ef} Medido** [mm/s]	Erro [%] [(V_{ef} Simulado - V_{ef} Medido) / V_{ef} Medido]
E05	25	50	1,64	2,53	-35,2
E06	50	50	1,08	1,08	0,0
E07	75	50	0,85	1,00	-15,0
EV01	100	50	0,71	-	-
EV02	200	50	0,47	-	-

* V_{ef} Previsto calculado de acordo com a Eq. 7.1.

** Média aritmética dos maiores valores de V_{ef} entre os eixos x, y e z das medições de vibração com passagem de composições ferroviárias (Tabela 21).

O erro obtido comparando V_{ef} previsto com V_{ef} medido (Tab. 45) pode ser reduzido aumentando o número de medições de passagem de composições em cada ponto ou realizando medições simultâneas com o ponto de referência E06 com os demais.

Na Fig. 14 são apresentados os níveis de vibração V_{ef} previstos no entorno da malha ferroviária “E” – local 02 constantes na Tab. 45. Na Fig. 15 são apresentados os níveis de vibração V_{ef} previstos no ponto E06 para diversas velocidades da passagem de composição ferroviária, determinados conforme o método proposto.

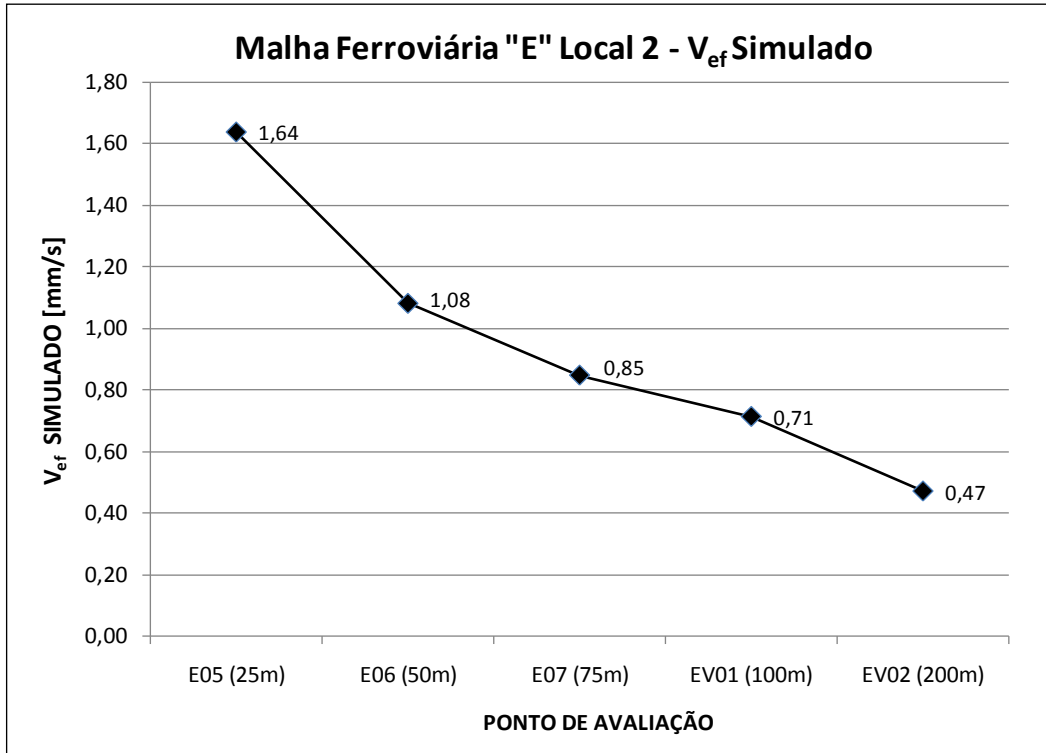


Figura 15: Níveis de vibração V_{ef} previstos no entorno da linha férrea da malha “E”

local 02

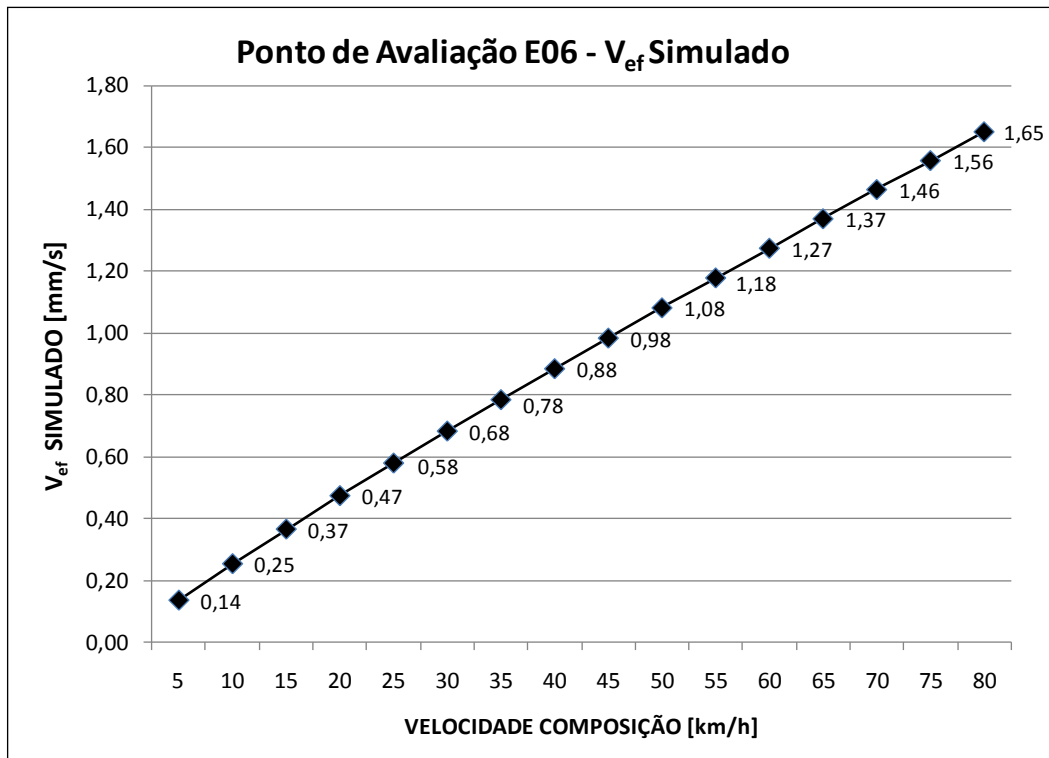


Figura 16: Níveis de vibração V_{ef} previstos no ponto de avaliação E06

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados deste trabalho foi possível indicar ou propor metodologia para medir, avaliar e realizar predição de vibração e ruído ambiental de passagens de composições ferroviárias. Além disso, com as medições realizadas, foi criado um banco de dados de níveis de ruído e vibração ambiental típicos das malhas ferroviárias avaliadas.

As metodologias propostas e utilizadas para ruído ambiental ferroviário foram a estabelecida pela norma NBR 10151 (2000) para medição, a praticada nos Estados Unidos da América para avaliação e a estabelecida pela norma ISO 9613 (com adaptações) para simulação. As metodologias propostas e utilizadas para vibração ambiental ferroviária foram a estabelecida pela norma DIN 45669 para medição e o chamado “Método Sueco para Predição de Vibração” com adaptações de predição. Para avaliação da vibração ambiental ferroviária foram aplicados diversos critérios e proposto uma metodologia de estudo futuro de forma a poder indicar cientificamente um critério de avaliação.

Algumas propostas de trabalhos futuros são pertinentes.

- Extensão deste trabalho para áreas de apoio da malha ferroviária brasileira, como pátios e oficinas ferroviárias.
- Estudo de outros sistemas lineares de transporte brasileiros, como o metroviário e rodoviário.

- Criar e aplicar uma metodologia para avaliação subjetiva do ruído ambiental ferroviário.
- Realizar análise de dinâmica de estruturas de sistemas construtivos típicos no Brasil, considerando sobre essas estruturas a ação dos níveis de vibração apresentados neste trabalho.
- Estudo e avaliação de diferentes tipos de mitigação de vibração e ruído ferroviário ambiental.
- Estudo da vibração e ruído ocupacional ferroviário brasileiro.
- Realizar análises de percepção de vibração com amostras representativas e de significância estatística.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 10.151, “Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade”, ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Projeto de Revisão NBR 10.151, “Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade”, ABNT, outubro de 2012.

AZEVEDO, F. S.; PATRÍCIO, J. Vibrações Ambientais. Critérios de Danos e de Incomodidade. Actualidade e Perspectivas Futuras. TecniAcústica, 2001.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Decisão de Diretoria Nº 215/2007/E, de 07 de novembro de 2007. Diário Oficial Estado de São Paulo – Caderno Executivo I, do dia 26/03/2008, Pág. nº 38.

DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, USA, FTA – FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, OFFICE OF PLANNING AND ENVIRONMENT. Transit Noise and Vibration Impact Assessment. FTA-VA-90-1003-06, may 2006.

DIN – DEUTSCHE NORM. DIN 45669, Mechanical Vibration and Shock Measurement, Part 1: Measuring Equipment. 1995.

DIN – DEUTSCHE NORM. DIN 45669, Mechanical Vibration and Shock Measurement, Part 2: Measuring Method. 2005.

DIN – DEUTSCHE NORM. DIN 4150, Structural vibration in buildings - effects on structures, 1986.

FAFAIOL, C.; ALARCÃO, D. Texto de Apoio da Disciplina Acústica Experimental e Previsional do Diploma de Formação Avançada em Engenharia Acústica. IST, 2009.

I-INCE TECHNICAL STUDY GROUP ON NOISE POLICIES AND REGULATIONS (TSG3). Survey of Legislation, Regulations, and Guidelines for Control of Community Noise. 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors”, ISO 9613 - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993-06 and Part 2: General method of calculation, 1996-12.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise”, ISO 1996 - Part 1 (2003): Basic quantities and assessment procedures and Part 2 (2007): Determination of environmental noise levels.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles”, ISO 3095 (2013).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration”, ISO 2631 - Part 1 (1997): General requirements.

ROSÃO, V. C. T. Desenvolvimentos Sobre Métodos de Previsão, Medição, Limitação e Avaliação em Ruído e Vibração Ambiente. Universidade do Algarve, 2011.

SUHAIRY, S. A. Prediction of Ground Vibration from Railways. SP Swedish National Testing and Research Institute, Acoustics, SP Report 2000:25.

THOMPSON, D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means. Elsevier, First edition, 2009.

VENDRAMI, C. E.; PAUL, S. Ruído Ferroviário. Acústica e Vibrações, nº 41, dezembro de 2009.

WHIFFIN, A.C.; LEONARD, D. R. A Survey of Traffic-Induced Vibrations. Road Research Laboratory, Department of the Environment, RRL Report LR 418, 1971.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9653, Guia para Avaliação dos Efeitos Provocados pelo Uso de Explosivos nas Minerações em Áreas Urbanas – Procedimento. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 7731, “Guia para execução de serviços de medição de ruído aéreo e avaliação dos seus efeitos sobre o homem”, ABNT, 1983.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Regulamentação de Níveis de Ruído em Sistemas Lineares de Transporte.

CHAVES, G. V. A.; Pimentel, R. L.; Melo, R. A.; Farias, J. P. Faixa de Domínio e sua relação com a redução de vibrações produzidas por trens de superfície em áreas urbanas. Transportes, volume XVII, número 1, junho de 2009, ISSN: 1415-7713.

COMPUTER AIDED NOISE ABATEMENT – Cadna A, Datakustik GmbH, “User’s manual”, version 3.7, 2007.

EUROPEAN COMMISSION WORKING GROUP ASSESSMENT OF EXPOSURE TO Noise (WG-AEN). Position Paper, “Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure”, Version 2, August 2007.

EU COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY AND TRANSPORT. A Study of European Priorities and Strategies for Railway Noise Abatement. Annex I Retrieval of Legislation.2002.

HARRIS, C. M., “Handbook of acoustical measurements and noise control”, 3rd Edition, Acoustical Society of America, Woodbury, NY, 1998.

PARLAMENTO EUROPEU. Directiva 2002/49/EC relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. 25 de junho de 2002.

REGULAMENTO GERAL DE RUÍDO: Decreto Lei nº 09/07. Portugal, janeiro de 2007.

REPORTS OF THE MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. Government resolution on noise abatement. Finland, 2007.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 01, de 8 de março de 1990, “Dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política”. Publicada no DOU Nº 63, de 2 de abril de 1990, Seção 1, página 6408.

SVANTEK SP. Z. O. O. SVAN 948, Sound and Vibration Data Logger, User’s Manual. Warsaw, June 2004.

VECCI, M. A. M., Notas de Aula da Disciplina Ruído Ambiental do Curso de Especialização em Engenharia Sanitária e Meio Ambiente, Belo Horizonte, 2004, 201p.