



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

GMEC – Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PTR 2562

Prof. Túlio N. Bittencourt
Eng. Alfredo P. C. Neto

- *Transmissibilidade de vibrações e análise de sinais dinâmicos*
- *Comentários sobre estados limites de vibração excessiva*
- *Comentários sobre análise modal experimental*

03 de Junho de 2013



LMC

LEM

Sumário:

1. Comentários sobre a relevância da questão estrutural dinâmica / transmissibilidade de vibrações
2. Comentários sobre itens pertinentes da NBR6118
3. Exemplo: incômodos causados pelo tráfego de trens aos ocupantes das construções lindeiras à via / procedimentos normativos / análise de sinais dinâmicos
4. Visita ao laboratório GMEC/LEM: noções sobre análise modal experimental

Relevância da questão estrutural dinâmica / transmissibilidade de vibrações

CASO	FONTE	IMPORTÂNCIA (segurança estrutural)	INCÔMODOS ÀS PESSOAS
Edifícios altos	Vento, tráfego de veículos	M	S
Pontes estaiadas	Vento, tráfego de veículos	G	S (pessoas que estão sobre a ponte)
Pontes ferroviárias	Tráfego de trens	G	N
Pontes rodoviárias e passarelas	Tráfego de veículos pesados	G, M	S (pessoas que estão sobre a ponte, passarela)
Instalações industriais	Teares, peneiras, máquinas de porte	G	S
Residências (casas, edifícios baixos)	Metrô, linhas ferroviárias	P	S
Estádios, similares	Danças, manifestações do público	G	S
Torres eólicas e de alta tensão	Vento	G	N
Plataformas Offshore	Mar / ondas	G	S (*)

Notas:

- 1) Importância / intensidade: G=grande; M=média; P=pequena (informação de caráter geral, sendo necessária investigação apropriada para cada caso)
- 2) S=sim; N=não; (*)=vibrações em baixíssimas frequências ($f < 1\text{Hz}$, causando náuseas)
- 3) Informações de caráter qualitativo; só se referem à parte dinâmica da resposta estrutural

NBR 6118 — itens 3.2.8 e 23.3

Estado limite de vibrações excessivas

“Estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção”

“A análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais.

Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. A condição abaixo deve ser satisfeita:”

$$f > 1,2 f_{crit}$$

Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas

Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

“Nos casos especiais, em que as prescrições anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em normas internacionais, enquanto não existir Norma Brasileira específica.”



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

GMEC – Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto

TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÕES PARA CONSTRUÇÕES LINDEIRAS À VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

- Referências:
- “Transit Noise and Vibration Impact Assessment”; Federal Transit Administration; FTA-VA-90-1003-06; May 2006
- Chapter 7: Basic Ground Borne Vibration Concepts
- Chapter 8: Vibration Impact Criteria
- Chapter 10: General Vibration Assessment
- ~~Chapter 11: Detailed Vibration Analysis~~

SENSIBILIDADE HUMANA A VIBRAÇÕES

Ref.: Bruel & Kjaer Technical Review, No.1, 1982

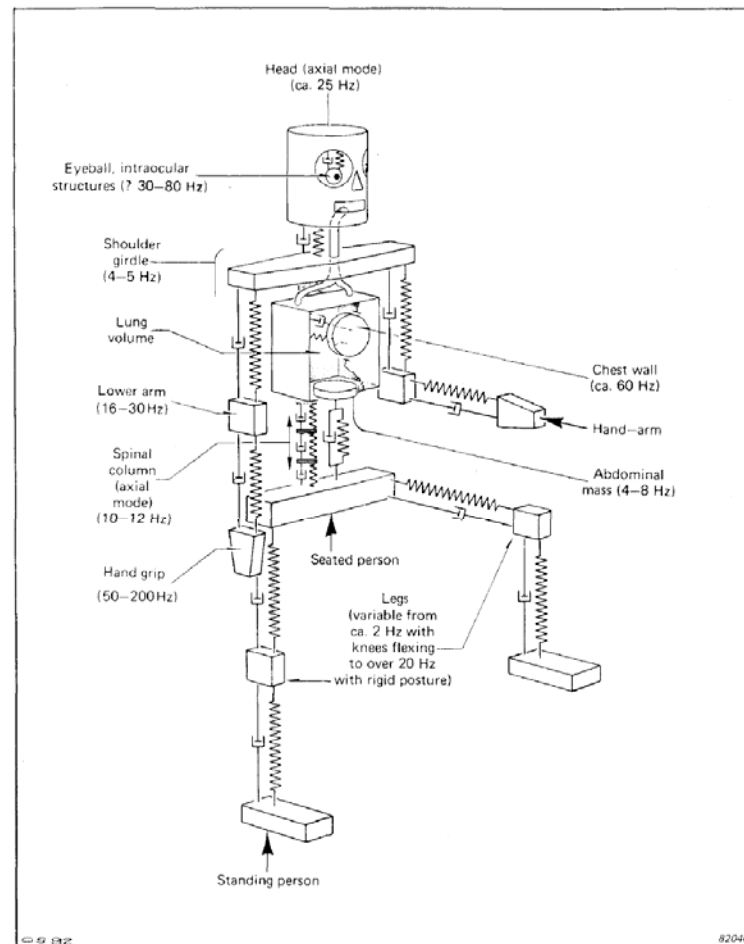


Fig. 1. Simplified mechanical system representing the human body standing on a vertically vibrating platform

SENSIBILIDADE HUMANA A VIBRAÇÕES

Ref.: *Bruel & Kjaer Technical Review, No.1, 1982*

(Norma ISO2631 — 1978 / veículos, pessoas sentadas)

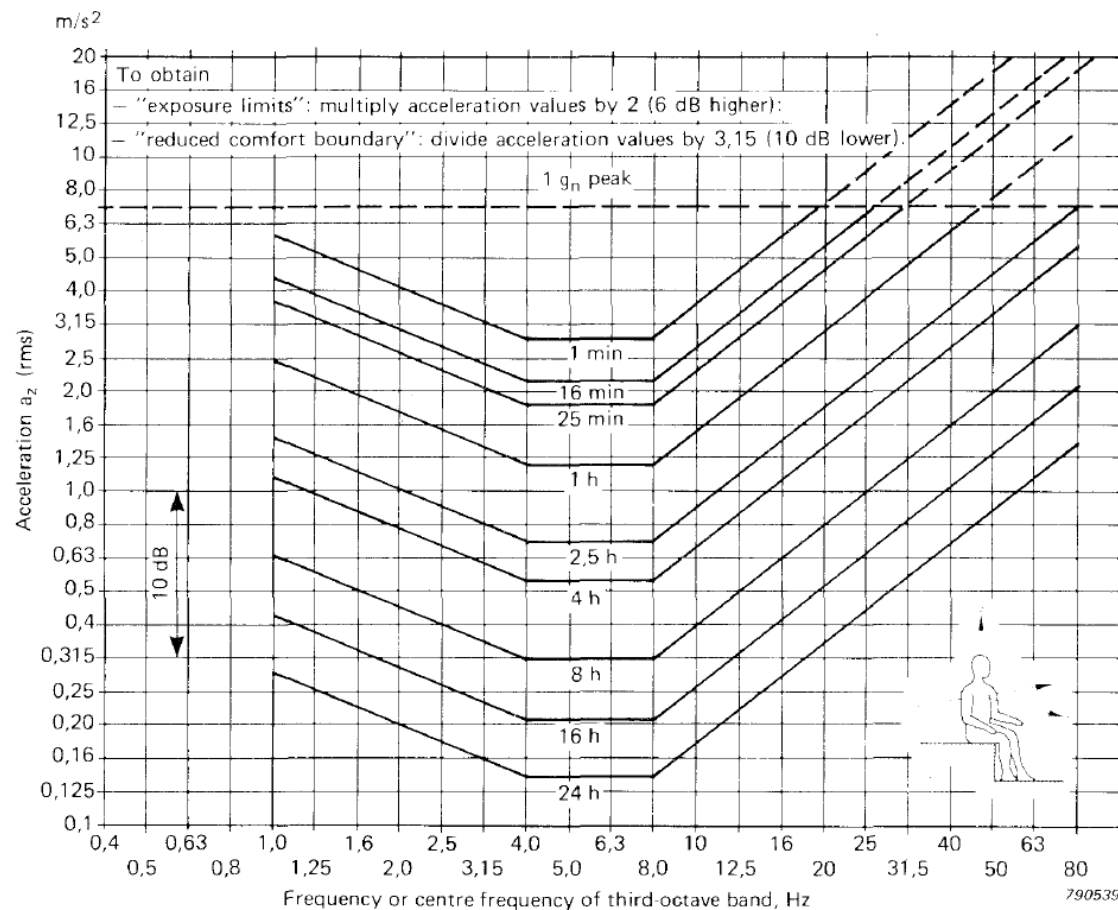
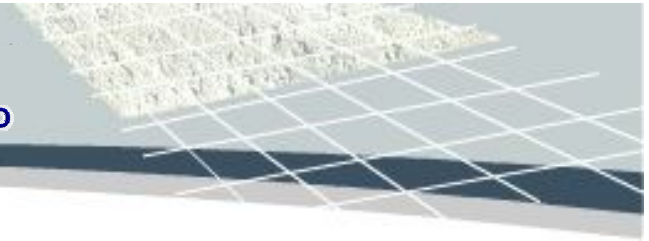


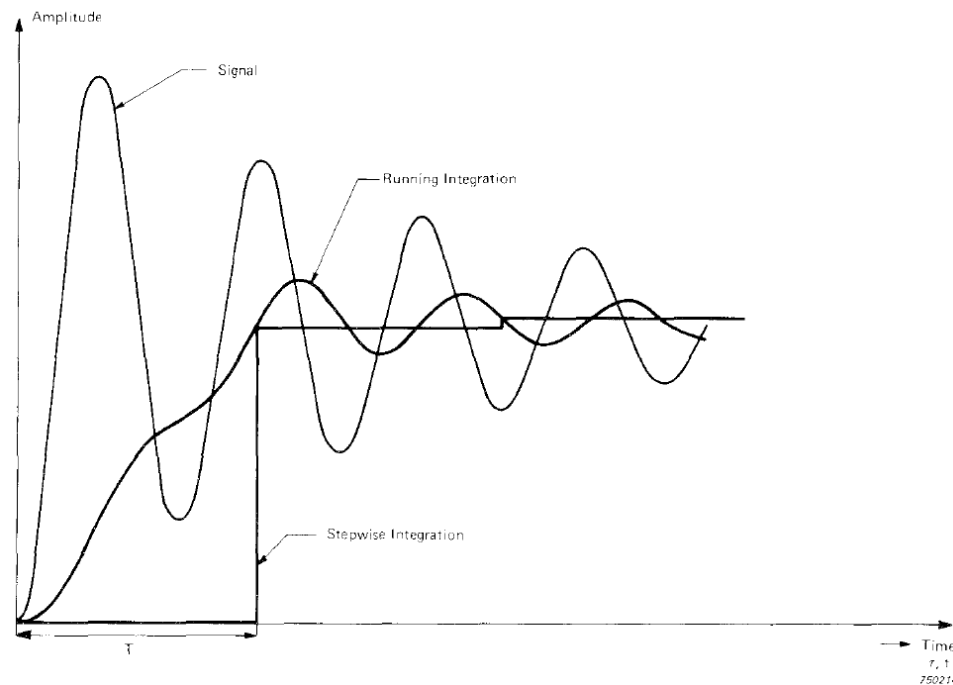
Fig. 5. Vertical vibration exposure criteria curves defining equal fatigue-decreased proficiency boundaries



Análise de sinais

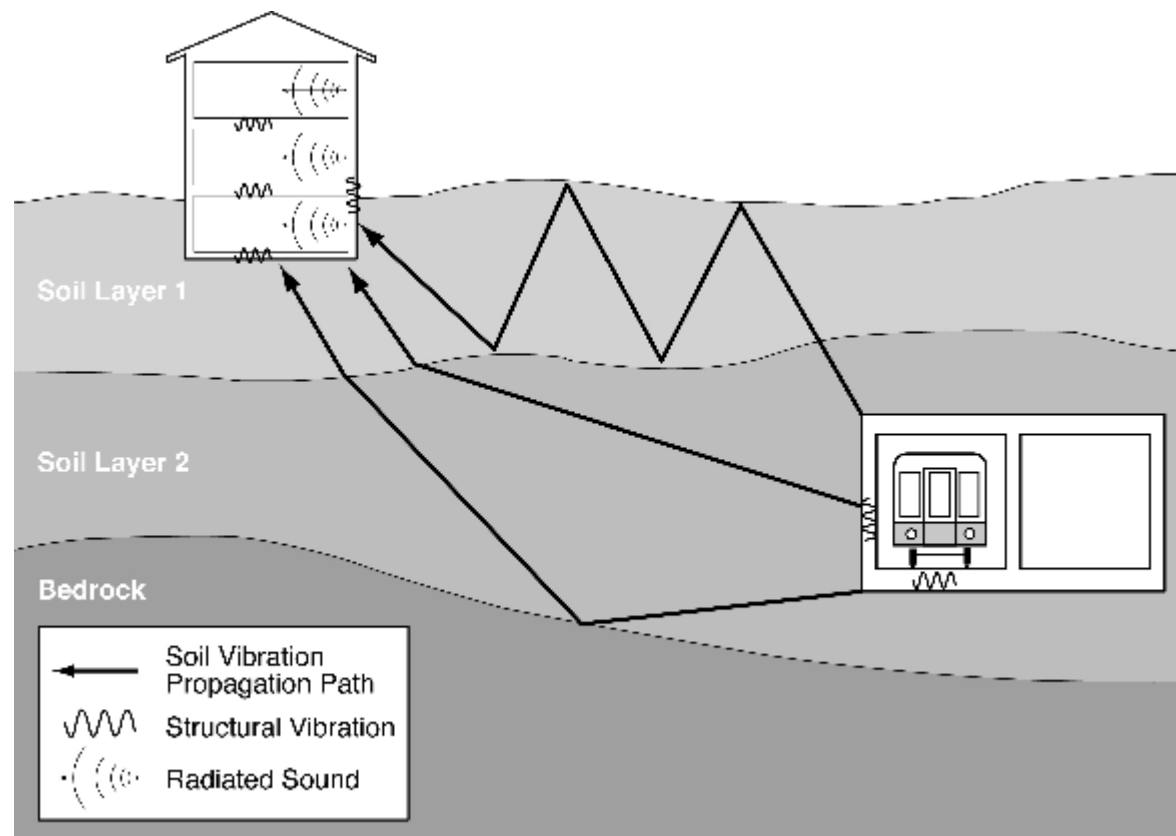
RMS (“Root Mean Square”) : conceito

Ref.: Bruel & Kjaer Technical Review, No.2, 1975



$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Fig. 1. Illustration of the concepts of running integration and stepwise integration.



Propagação de vibrações transmitidas pelo solo para as construções

Características espectrais da fonte (observadas a partir das vibrações transmitidas do trem para a via em túnel)

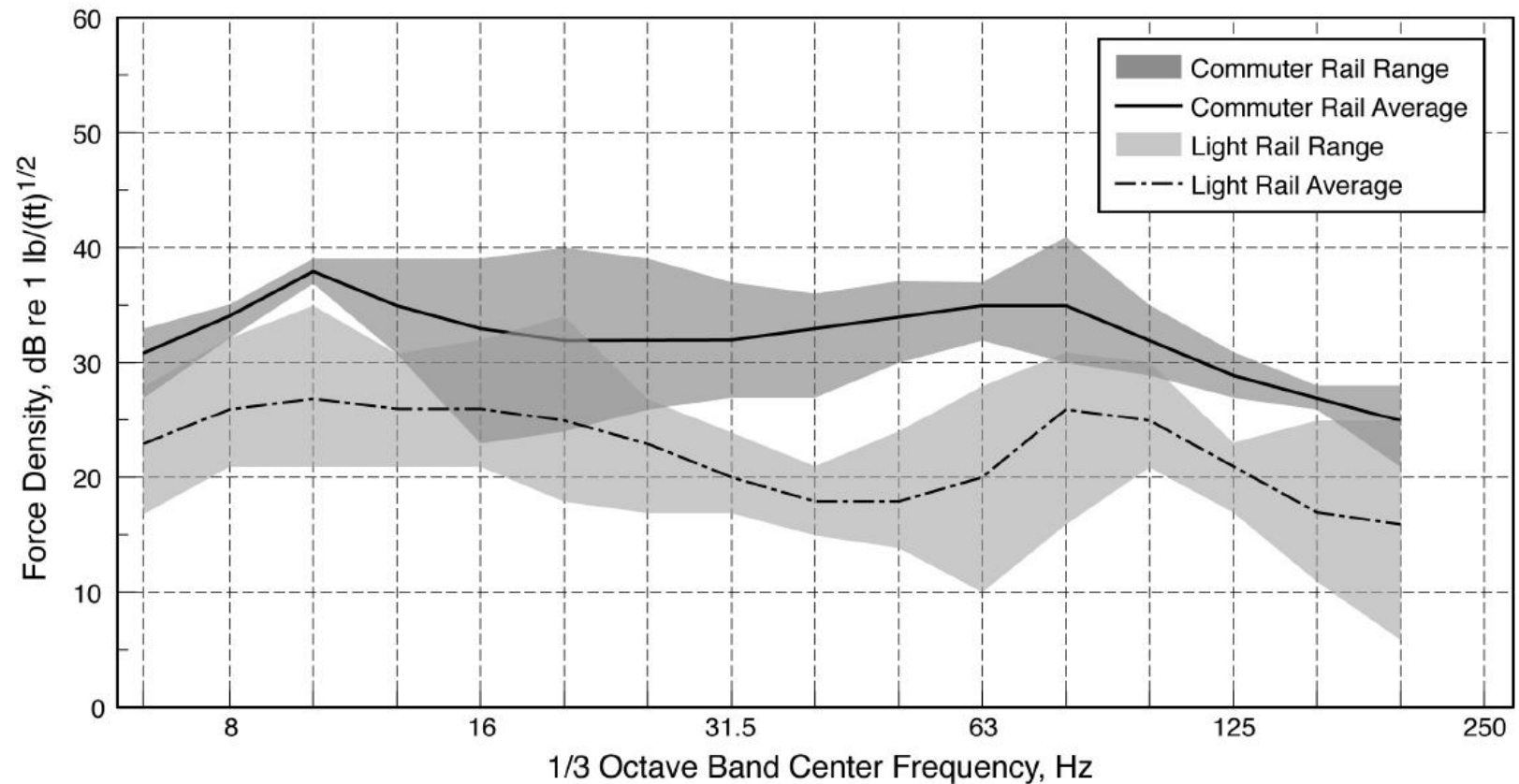
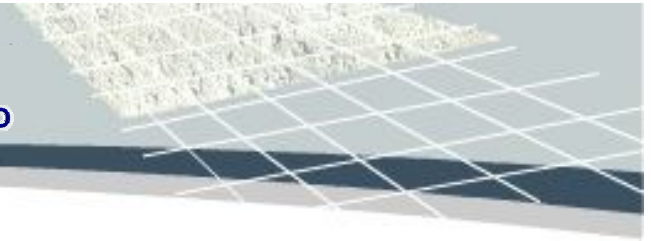


Figure 11-2. Typical Force Densities for Rail Transit Vehicles, 40 mph



Parâmetros que interferem nas vibrações:

- a) Características dinâmicas do veículo (material rodante): massas (incluindo pessoas / lotação), rigidez e amortecimento (frequências naturais e modos de vibração); características das suspensões primária e secundária; velocidade;
- b) Estado dos trilhos e configuração da via: desgaste dos trilhos, incluindo desgaste ondulatório; AMV's
- c) Contacto entre rodas e trilhos (estado das rodas p. ex. existência de calos de roda);
- d) Características dinâmicas da via permanente;
- e) Propriedades da estrutura complementar (túnel);
- e) Características dinâmicas do solo: tipos de solos, geometria das estratificações;
- f) Propriedades dinâmicas das edificações: tipo de fundação; massas, rigidezes e amortecimento dos elementos estruturais (frequências naturais e modos de vibração).

Percepção humana a vibrações: vibrações muito baixas, pouco acima “limiar da percepção” podem ser sentidas pelas pessoas dentro das construções e causar incômodos.

Nota: vibrações acústicas ou ruídos são irradiados simultaneamente pela estrutura para o interior das residências, podendo ser ouvidas.

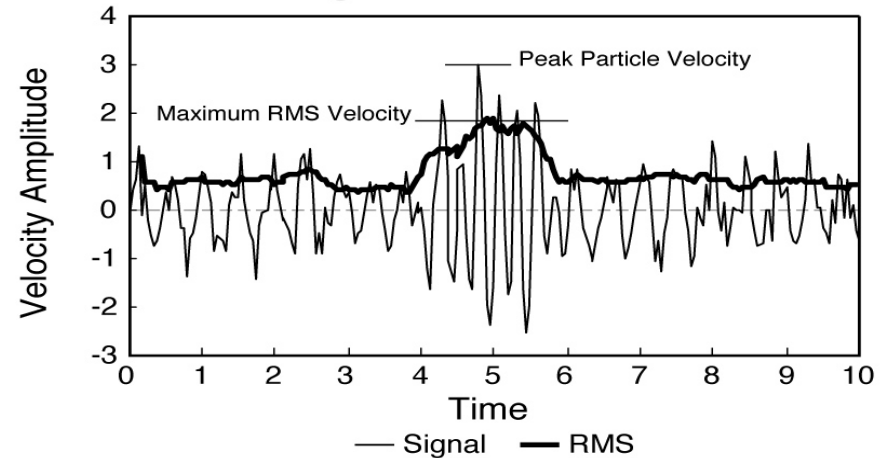
• Sinais de vibração

- Possíveis: deslocamento, velocidade, aceleração
- Considerado (FTA): velocidade (RMS) com valores em VdB para integração com constante de tempo igual a 1s.
- $L_v \text{ (VdB)} = 20 \cdot \log (v/v_{\text{ref}})$
- onde:
- $v_{\text{ref}} = 1\text{E-}06 \text{ in/s} = 2,54\text{E-}08 \text{ m/s} = 2,54\text{E-}05 \text{ mm/s}$

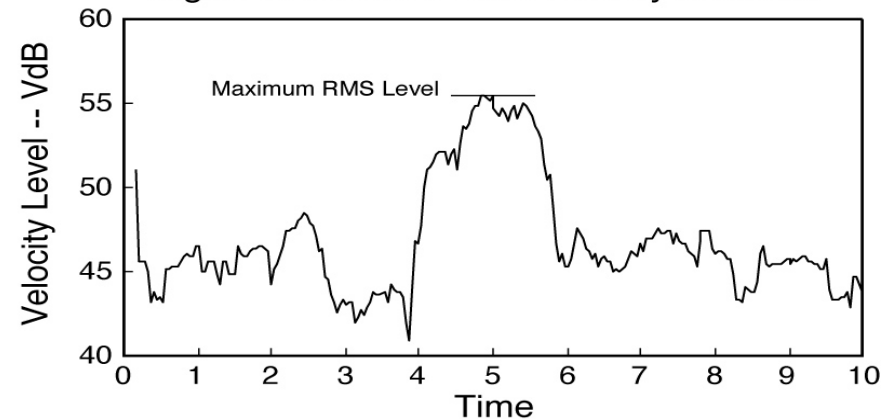
• **Notas:**

- Velocidade de partícula é normalmente utilizada para análise quanto à segurança estrutural (medição no piso / direção vertical / região de maiores vibrações); incômodos causados por vibrações em geral não indicam riscos para a estrutura.
- Outros critérios: WIA (Metrô SP), DIN 4150, ISO 2631.

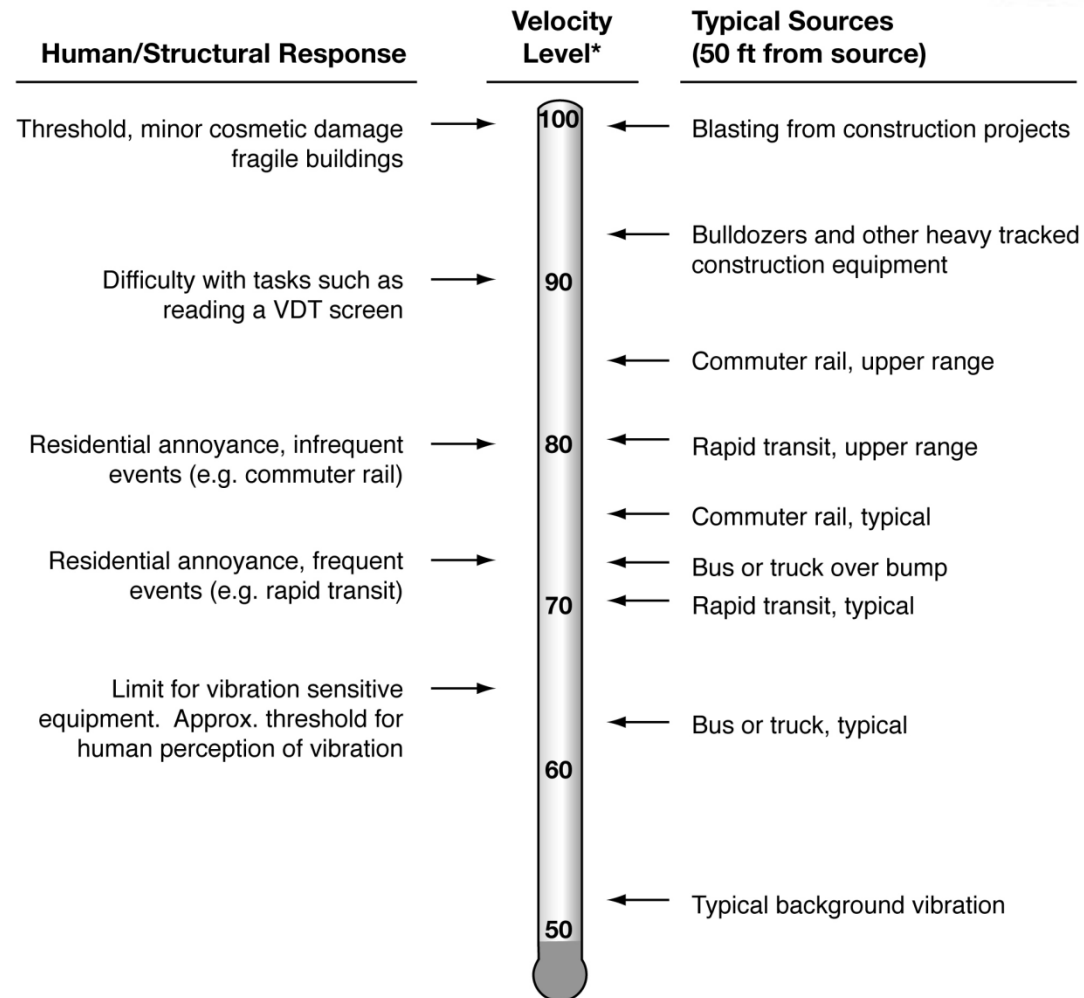
Signal in Absolute Units



Signal in Terms of RMS Velocity Decibels

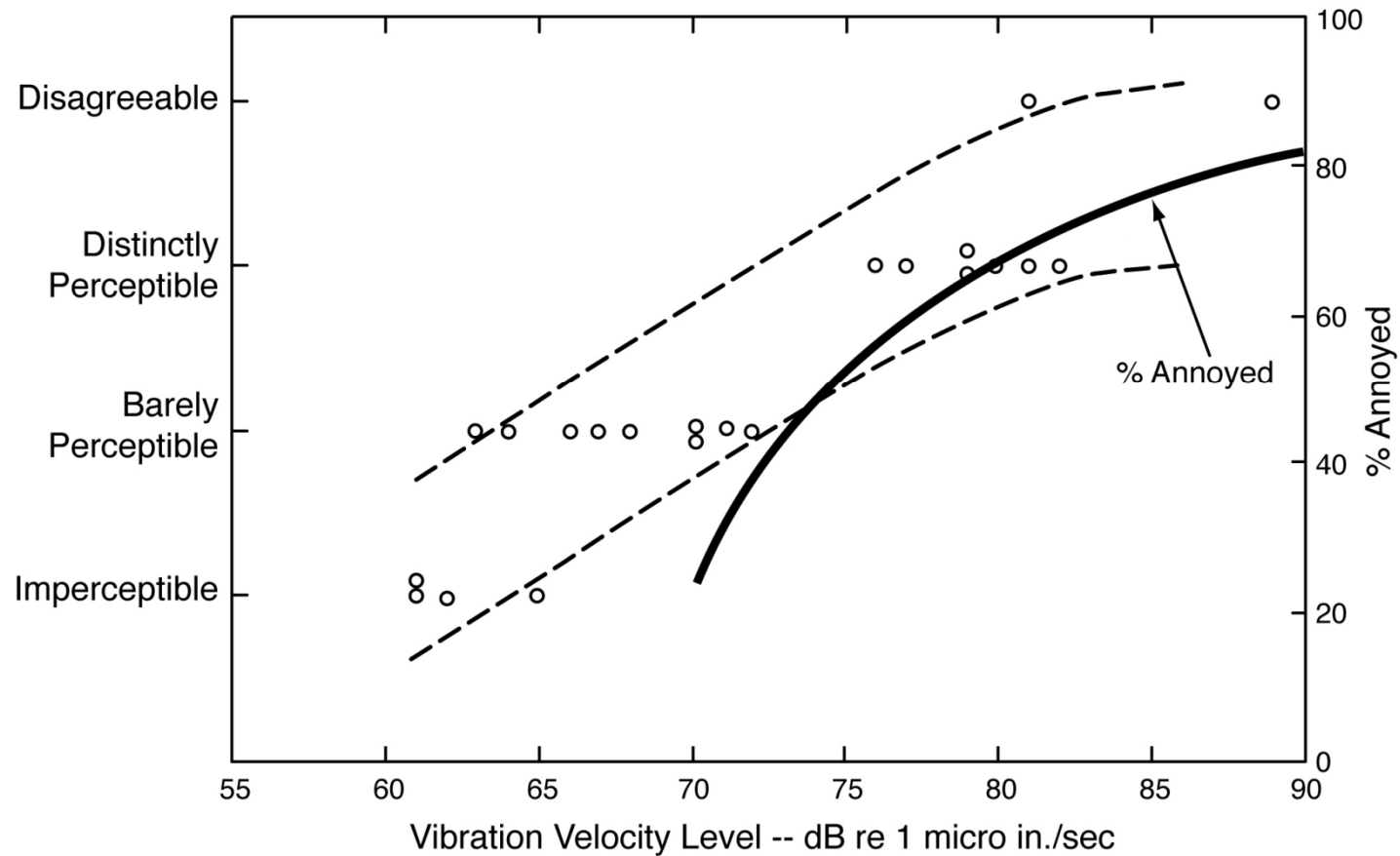


**NÍVEIS TÍPICOS DE
VIBRAÇÕES TRANSMITIDAS
PELO SOLO ÀS
CONSTRUÇÕES**



* RMS Vibration Velocity Level in VdB relative to 10^{-6} inches/second

Response to Residential Building Vibration 4 to 15 Rapid Transit Trains per Hour



VdB>75: inaceitável

--- (USA / 22 residências)

— (Japão / trens de alta velocidade)

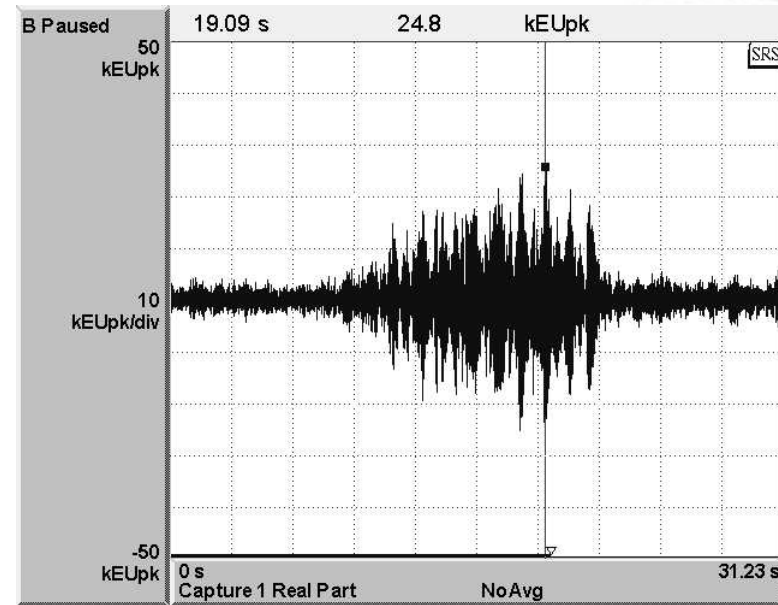
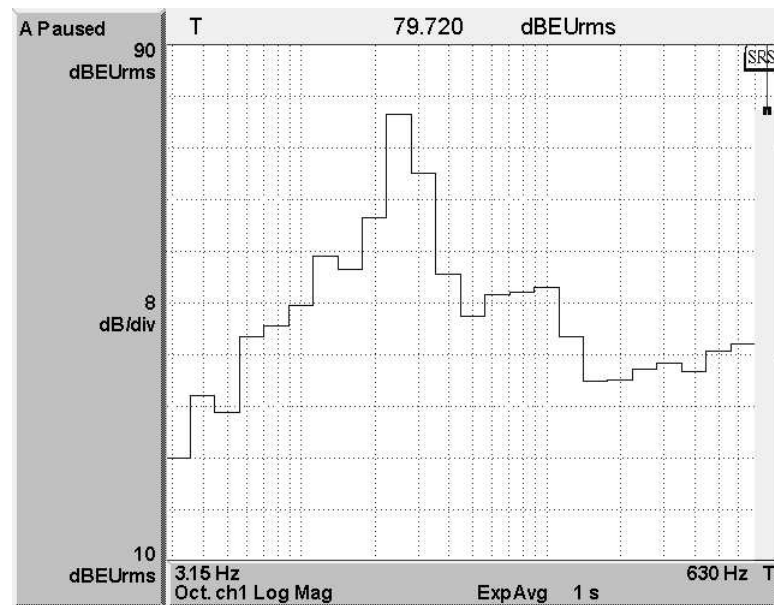
Sensibilidade humana às vibrações induzidas pelo tráfego de trens em residências

Resposta Humana a Vibração e Ruído Transmitido Através do Solo

Nível de Velocidade de Vibração (VdB)	Nível de Ruído (dBA)		Resposta Humana
	Freq. Baixa (1)	Freq. Intermediária (2)	
65	25	40	Valor aproximado para o limiar da percepção para muitas pessoas. Ruído de baixa frequência normalmente não audível; ruído de frequência intermediária é excessivo para áreas de dormir silenciosas.
75	35	50	Aproximadamente a linha divisória entre vibrações levemente perceptíveis e claramente perceptíveis. Muitas pessoas se sentem incomodadas com este nível de vibração. Ruído de baixa frequência é aceitável para áreas de dormir; ruído de frequência intermediária incomodam nas áreas de dormir silenciosas.
85	45	60	Vibração aceitável somente se há um número não frequente de vibrações por dia. Ruído de baixa frequência incomoda em áreas de dormir; ruído de frequência intermediária causa incômodos mesmo quando os eventos não são frequentes em edificações institucionais tais como em escolas e igrejas.
Notas: (1) Nível aproximado de ruído quando o pico do espectro do ruído é próximo de 30Hz. (2) Nível aproximado de ruído quando o pico do espectro do ruído é próximo de 60Hz.			

CRITÉRIO ADOTADO PELO METRÔ DE SÃO PAULO

- Vibrações medidas (sinais de velocidade de vibração): analisadas, quanto à sensibilidade humana, pelo critério da WIA (Wilson, Ihrig & Associates).
- Resultados: apresentados na forma de tabelas e gráficos típicos, representativos dos sinais de velocidade temporal e seus espectros RMS em terços de oitava.
- Níveis de vibração: “RMS” globais calculados, segundo o Critério WIA, através de
- $NG = \text{nível RMS global} = 10 \cdot \log [\sum_j (10^{L_j/10})]$
- onde L_j são os níveis RMS de velocidade de vibração v_j (em VdB) nas bandas de terços de oitava do espectro RMS, definidos por
- $L_j = 20 \cdot \log (v_j / v_{ref})$
- $v_{ref} = 25,4 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$
- Tempo de integração para a determinação dos espectros em terços de oitava é de 1s.
- Limites de tolerância:
- Edificações residenciais: 70 VdB / Escolas, igrejas ou teatros: 75 VdB / Escritórios: 80 VdB



Espectro RMS e velocidade de vibração em função do tempo

Notas:

1 VdB=1 dBEUrms

T=NG

1 kEUpk=25.400 x 10⁻⁶ mm/s

Pico máximo de velocidade de vibração medido durante a passagem: 24,8 kEUpk=0,63 mm/s

Frequências centrais dos terços de oitava (Hz):

3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630



EPUSP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

GMEC – Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto

Noções sobre Análise Modal Experimental (visita ao laboratório do GMEC/LEM)



EPUSP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

GMEC – Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto

Obrigado pela Atenção!



LMC

LEM