

Efeitos de Vibrações em Conforto e Segurança de Passageiros: Comparação entre Aeronaves, Automóveis e Trens de Alta Velocidade

Pedro Faria
Faria.p@aluno.ifsp.edu.br

Rodrigo Antunes Pinheiro
Rodrigo.antunes@aluno.ifsp.edu.br



Introdução

- Nos últimos anos, o transporte de passageiros evoluiu significativamente, trazendo avanços tecnológicos em aerodinâmica, sistemas de propulsão e conforto estrutural. No entanto, um dos fatores persistentes que impactam diretamente a experiência do usuário é a exposição à vibração de corpo inteiro(VCI).
- Diante desse cenário, torna-se fundamental investigar de forma comparativa como aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade transmitem vibrações aos passageiros.
- A apresentação busca consolidar um estudo abrangente sobre o tema, detalhando conceitos, normas técnicas, análise por modal e comparações quantitativas.



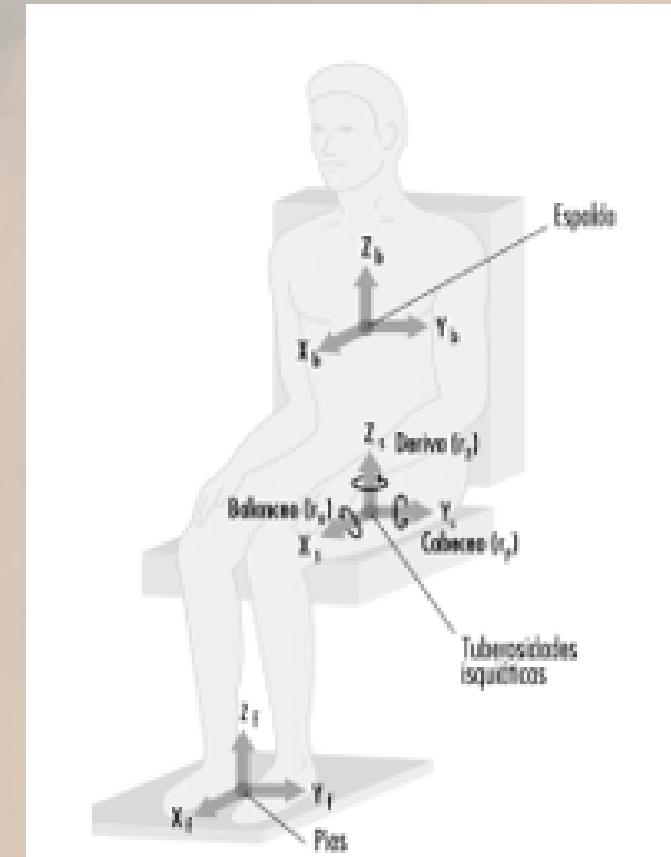
Vibração

- 💡 A vibração é um movimento oscilatório de um corpo em torno de um ponto de referência, que pode ser descrito por sua posição, velocidade ou aceleração. É caracterizado por parâmetros fundamentais:
- 💡 Amplitude: Refere-se à magnitude do movimento oscilatório;
Frequência: Indica o número de ciclos completos de oscilação que ocorrem em um segundo;
Valor RMS: O valor RMS é considerado a medida mais relevante da amplitude de vibração. Possibilita avaliar a média de energia contida no movimento oscilatório, mostrando o potencial de dano ou desconforto para o corpo humano.

$$x_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_2}^{T_1} [f(t)]^2 dt \right)}$$

Vibração de Corpo Inteiro (VCI)

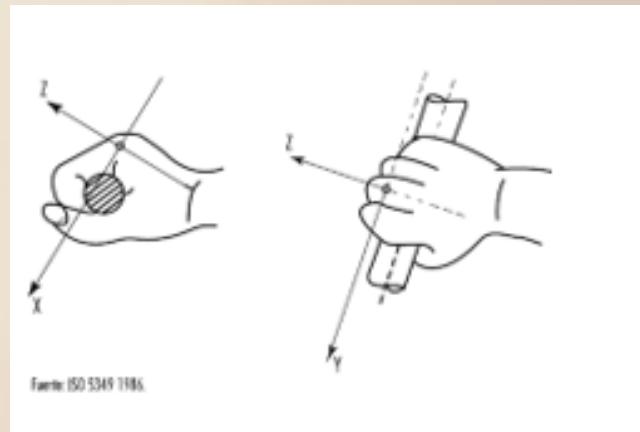
- 💡 Vibração de Corpo Inteiro (VCI): Ocorre quando uma parte significativa do peso corporal (como sentado, em pé ou deitado) está em contato com uma superfície vibratória. Afeta o corpo como um todo, geralmente em uma faixa de frequência de 0,5 a 80 Hz. É comum em veículos de transporte, como automóveis, trens e aeronaves.
- 💡 A ISO 2631-1 (1997) é amplamente utilizada para avaliar a exposição humana à vibração de corpo inteiro.





Vibração do Sistema Mão-Braço (VMB)

- ⚠ Transmitida às mãos e braços através do contato com ferramentas vibratórias ou superfícies. Afeta principalmente os membros superiores, em uma faixa de frequência de 8 a 1000 Hz. É relevante para motoristas que seguram o volante e trabalhadores que operam máquinas manuais.
- ⚠ ISO 5349 é amplamente utilizada para avaliar a exposição humana à vibração de mão-braço(VMB).





Efeitos da Vibração no Corpo Humano

- ⚠ Em uma locomoção normal, como caminhando, o sistema músculo-esquelético amortece os efeitos dos movimentos corporais que possam ser estranhos à cabeça. Entretanto, quando existe um ambiente vibratório, estas mesmas partes do corpo podem ressonar.
- ⚠ A exposição à vibração pode induzir uma série de respostas fisiológicas e psicológicas.

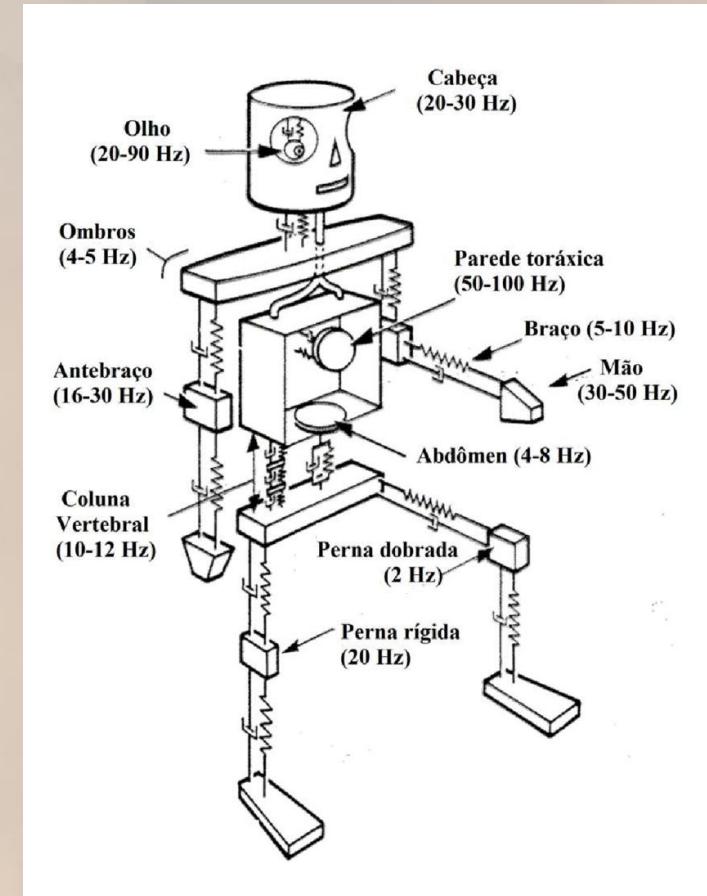
Tipo de vibração	Valor de ação de Exposição	Valor Limite de Exposição
Mão-Braço (VMB)	2,5 m/s ²	5 m/s ²
Corpo Inteiro (VCI)	0,5 m/s ²	1,15 m/s ²

Decreto-Lei n.º 46/2006.



Ressonância de Partes do Corpo Humano

- A ressonância de partes do corpo humano ocorre em faixas de frequência específicas: entre 5 e 10 Hz para o tórax e abdômen, 20 a 30 Hz para a cabeça e musculaturas de suporte, e 30 a 60 Hz para o sistema ocular
- Esses efeitos destacam a importância de controlar a exposição à vibração em ambientes de transporte para proteger a saúde e o bem-estar dos indivíduos.





Aeronaves

- As aeronaves são expostas a vibrações provenientes de diversas fontes, incluindo motores, turbulência atmosférica e sistemas aerodinâmicos.
- De forma objetiva, valores apresentados no anexo C da ISO 2631-1 (1997) define reações prováveis quanto a vibração e ao conforto, com base em 6 graus:

Aceleração (m/s^2)	Reação provável
Menor do que 0,315	Confortável
Entre 0,315 e 0,63	Pouco desconfortável
Entre 0,6 e 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 e 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 e 2,5	Muito desconfortável
Superior a 2	Extremamente desconfortável

Fonte: ISO 2631-1 (1997)



Taxa de Incomodo

 Mas é uma medida objetiva da vibração. Para solucionar essa problemática a taxa de incômodo surgiu em uma tentativa de quantificar essa percepção subjetiva.

$$f(x|u) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi u\sigma)}} \exp\left[\frac{-(\ln u - (\ln x - \frac{1}{2}\sigma^2)^2)}{2\ln(1+\delta^2)}\right]$$

$$v(u) = \begin{cases} 0 & u < u_{\min} \\ a \ln(u) + b & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ 1 & u > u_{\max} \end{cases}$$

 onde x é a aceleração da vibração, u é a aceleração que os indivíduos sentem e δ é o coeficiente de variação de u , cujo valor é 0,3

 pela fórmula de Fechner, que considera um limite mínimo e um limite crítico para a aceleração, em que a percepção de incômodo se altera conforme a aceleração varia entre esses limites.



Avaliação do Conforto de Vibração

Yongshuai Wen avaliou o conforto de vibração e a taxa de incômodo das partes dianteira, central e traseira de uma aeronave sob diferentes condições de voo utilizando a aceleração ponderada abrangente.

Altura I				Altura II			
Velocidade	Frontal	Meio	Traseira	Frontal	Meio	Traseira	
I	ND	UPD	UPD	ND	ENTRE	UPD	
II	UPD	RD	ENTRE	ND	ENTRE	UPD	
III	UPD	RD	UPD	ND	ENTRE	ND	
IV	ENTRE	RD	ND	ND	ENTRE	UPD	

Os resultados da avaliação da taxa de incômodo indicam que as probabilidades máximas de se sentir incomodado para as partes frontal, intermediária e traseira são de cerca de 10%, 45% e 25%, respectivamente.



Automóveis

- Em automóveis de passeio, as vibrações são geradas principalmente pela interação dos pneus com a superfície da estrada, pelo motor e pela transmissão. A qualidade do pavimento e a velocidade do veículo são fatores determinantes na intensidade e nas vibrações transmitidas aos ocupantes.
- Em um estudo realizado por Francisco Kaderli e Herbert Martins Gomes para avaliar o conforto vibracional, realizaram-se as medições em quatro automóveis nacionais da mesma categoria de cilindradas. Dois tipos de pavimentação foram escolhidos para realização dos testes: pavimentação de asfalto e de paralelepípedos.



Os resultados mostraram que, embora um veículo pudesse ser mais confortável em média, a exposição à vibração em certas condições, especialmente para motoristas profissionais, poderia exceder os limites de exposição diária estabelecidos pelas normas, o que pode levar a dores nas costas, coluna e desconforto geral.





Trens de Alta Velocidade

- Os trens de alta velocidade, embora projetados para oferecer uma viagem suave e rápida, também estão sujeitos a vibrações que podem impactar o conforto e, em menor grau, a segurança dos passageiros. As principais fontes de vibração incluem a interação roda-trilho, irregularidades na via, sistemas de propulsão e, em velocidades muito altas, cargas aerodinâmicas.
- Um estudo de Fedatto Neto e Gomes sobre trens urbanos (Trensurb) em Porto Alegre, Brasil, avaliou os níveis de vibração de corpo inteiro em passageiros.
- Foi investigado como as irregularidades de longo comprimento de onda afetam a vibração e o conforto dos passageiros.



Trens de Alta Velocidade

- Vibrações verticais têm maior impacto no desconforto que as laterais ou longitudinais. Às velocidades mais altas, ocorrem efeitos de flexão do corpo do trem, especialmente sobre os bogies, elevando os índices de desconforto.
- A exposição contínua à vibração no trem pode resultar em problemas de coluna e agravar dores lombares — além de ser uma métrica útil para avaliação de manutenção da via e do veículo.



Conclusões

- As vibrações são um componente inevitável da experiência de viagem em aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade, com impactos diretos no conforto e na segurança dos passageiros. A análise comparativa revelou que, embora as fontes e as características das vibrações variem entre os modais, a necessidade de avaliá-las e mitigá-las é uma constante.
- Para automóveis, a atenção se concentra na interação com o pavimento e na otimização dos sistemas de suspensão.
- Em aeronaves, a prioridade é a segurança operacional e o desempenho dos pilotos, com a vibração afetando a capacidade de realizar tarefas críticas.
- Nos trens de alta velocidade, o desafio é manter o conforto em altas velocidades, gerenciando as irregularidades da via e os efeitos aerodinâmicos. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias de mitigação são essenciais para aprimorar a qualidade da viagem e proteger a saúde dos ocupantes em todos os modais de transporte.

Obrigado Pela Atenção

