

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

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

Pedro Faria

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

faria.p@aluno.ifsp.edu.br

Rodrigo Antunes Pinheiro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

rodrigo.antunes@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo investiga os efeitos das vibrações no conforto e na segurança de passageiros em diferentes modos de transporte: aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade. Analisamos as fontes de vibração, as metodologias de avaliação e as normas regulatórias aplicáveis, como ISO 2631, ISO 5349 e ANSI S3.18. Com base em uma revisão abrangente da literatura, incluindo estudos de caso específicos para cada modal, comparamos os impactos das vibrações na saúde humana e no desempenho de tarefas, bem como as estratégias de mitigação empregadas para otimizar a experiência do passageiro. Os resultados indicam que os impactos sobre o bem-estar dos passageiros seguem padrões semelhantes, embora as vibrações sejam inerentes a todos os sistemas de transporte, a compreensão de suas características e a aplicação de normas adequadas são cruciais para garantir um ambiente de viagem seguro e confortável, melhorando a experiência dos usuários e reduzir riscos à saúde.

Palavras-chave

Vibração de corpo inteiro, conforto, segurança, aeronaves, automóveis, trens de alta velocidade.

Abstract

This paper investigates the effects of vibrations on passenger comfort and safety across different modes of transportation: aircraft, automobiles, and high-speed trains. We analyze the sources of vibration, assessment methodologies, and applicable regulatory standards such as ISO 2631, ISO 5349, and ANSI S3.18. Based on a comprehensive literature review, including case studies specific to each mode, we compare the impacts of vibrations on human health and task performance, as well as the mitigation strategies employed to optimize the passenger experience. The results indicate that the impacts on passenger well-being follow similar patterns. Although vibrations are inherent in all transportation

systems, understanding their characteristics and applying appropriate standards are crucial to ensuring a safe and comfortable travel environment, improving user experience, and reducing health risks.

Keyword

Whole-body vibration, comfort, safety, aircraft, automobiles, high-speed trains.

1 – Introdução

A experiência de viagem em qualquer meio de transporte é intrinsecamente influenciada por diversos fatores, entre os quais a vibração, que é o movimento periódico, ou aleatório, de um elemento estrutural ou peça de uma máquina: movimento repetitivo a partir de uma posição de repouso. se destaca como um elemento crítico para o conforto e a segurança dos passageiros. Seja em aeronaves que cruzam os céus, automóveis que percorrem estradas ou trens de alta velocidade que deslizam sobre trilhos, a exposição a vibrações é uma constante que pode variar em intensidade, frequência e duração. Essas vibrações, embora muitas vezes imperceptíveis em níveis baixos, praticamente inevitável e algumas vezes até necessária, podem ter impactos significativos na fisiologia humana, no desempenho cognitivo e na percepção geral de bem-estar, podendo, em casos extremos, comprometer a segurança e a saúde a longo prazo. É sabido que a vibração também pode danificar máquinas e estruturas, e por isto mesmo ela deve ser controlada e/ou isolada.

Por isso, com o crescimento contínuo do mercado automobilístico e a expansão das redes de transporte ferroviário de alta velocidade, juntamente com a demanda por viagens aéreas mais eficientes, intensificam a necessidade de uma compreensão aprofundada dos efeitos das vibrações, pois existe uma busca por veículos que proporcionem não apenas rapidez e eficiência, mas também um elevado grau de conforto, tem impulsionado pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias de mitigação.

Nos últimos anos, o transporte de passageiros em alta velocidade 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).

A VCI não apenas influencia o conforto imediato dos ocupantes, mas também pode gerar efeitos fisiológicos adversos, como fadiga, dores musculoesqueléticas e distúrbios gastrointestinais. A longo prazo, trabalhadores expostos cronicamente a vibrações apresentam maior incidência de problemas lombares e degenerações na coluna vertebral.

Diante desse cenário, torna-se fundamental investigar de forma comparativa como aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade transmitem vibrações aos passageiros, quais normas técnicas

regulam essa exposição e quais estratégias de mitigação podem ser adotadas no projeto e operação desses veículos.

O presente artigo busca consolidar um estudo abrangente sobre o tema, detalhando conceitos, equações de avaliação, normas técnicas, análise por modal e comparações quantitativas.

A análise comparativa também permitirá identificar similaridades e diferenças nos desafios e soluções adotadas em cada contexto, contribuindo para um entendimento mais holístico da problemática das vibrações no transporte de passageiros.

2 - Fundamentação Teórica

2.1 - Definição e Características da 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. Becker (2006) afirma que a vibração está presente em qualquer sistema mecânico que se mova, diferindo de um sistema para outro apenas em nível e conteúdo espectral. Este movimento pode ser periódico ou aleatório e é caracterizado por três parâmetros fundamentais: amplitude, frequência e fase. A compreensão desses parâmetros é crucial para avaliar os impactos da vibração em sistemas mecânicos e, mais importante, no corpo humano.

Amplitude: Refere-se à magnitude do movimento oscilatório, ou seja, a distância máxima que o corpo se desloca de sua posição de equilíbrio. Pode ser expressa em termos de deslocamento (metros), velocidade (metros por segundo) ou aceleração (metros por segundo ao quadrado). A aceleração é a medida mais comum para quantificar a vibração e sua severidade, pois está diretamente relacionada às forças inerciais que atuam sobre o corpo.

Frequência: Indica o número de ciclos completos de oscilação que ocorrem em um segundo, medida em Hertz (Hz). A frequência é um parâmetro crítico porque a sensibilidade do corpo humano à vibração varia significativamente com ela. Diferentes frequências podem ressoar com diferentes partes do corpo, causando efeitos distintos.

Valor RMS (Root Mean Square): É uma medida estatística amplamente utilizada para quantificar a amplitude efetiva de um sinal de vibração, especialmente quando este é complexo e não senoidal. O valor RMS é considerado a medida mais relevante da amplitude de vibração, pois de acordo com Fernandes (2000), possibilita avaliar a média de energia contida no movimento oscilatório, mostrando o potencial de dano ou desconforto para o corpo humano. Para uma função variável contínua $f(t)$ definida sobre o intervalo de tempo $T \leq t \leq T_2$, o seu valor rms é dado pela expressão:

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

As vibrações podem ser classificadas de diversas formas, incluindo sua origem (natural ou artificial), duração (curto ou longo prazo) e o objeto afetado. No contexto da exposição humana, as vibrações são categorizadas principalmente em dois tipos:

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.

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.

2.2 - Normas e Metodologias de Avaliação

A avaliação da exposição humana à vibração é guiada por diversas normas internacionais, sendo as mais proeminentes a série ISO 2631 (para VCI) e a ISO 5349 (para VMB). A ISO 2631-1 (1997) é amplamente utilizada para avaliar a exposição humana à vibração de corpo inteiro, considerando tanto o conforto quanto a saúde. Esta norma estabelece curvas de ponderação por frequência (W_k e W_d) e fatores de multiplicação para diferentes eixos (x , y , z), que ajustam as medições de aceleração RMS para refletir a sensibilidade do corpo humano a diferentes frequências e direções [1].

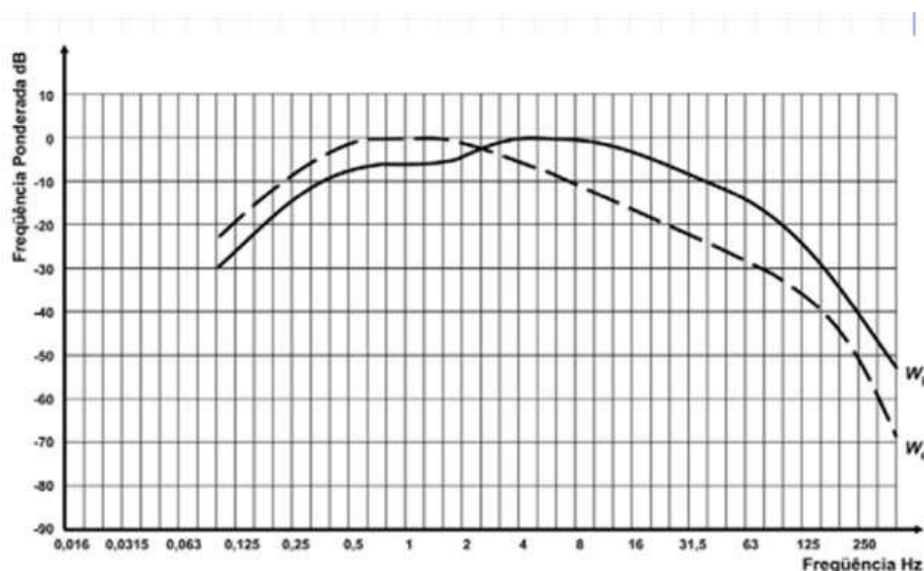


Figura 1- gráfico curvas W_k e W_d .

A ANSI S3.18 é outra norma relevante, especialmente no contexto aeronáutico, para a avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro [2]. As normas definem limites de exposição para fadiga, conforto e saúde, muitas vezes apresentados em gráficos que relacionam a aceleração RMS ponderada com a frequência e o tempo de exposição. A superação desses limites pode indicar risco de desconforto, fadiga ou até mesmo danos à saúde a longo prazo.

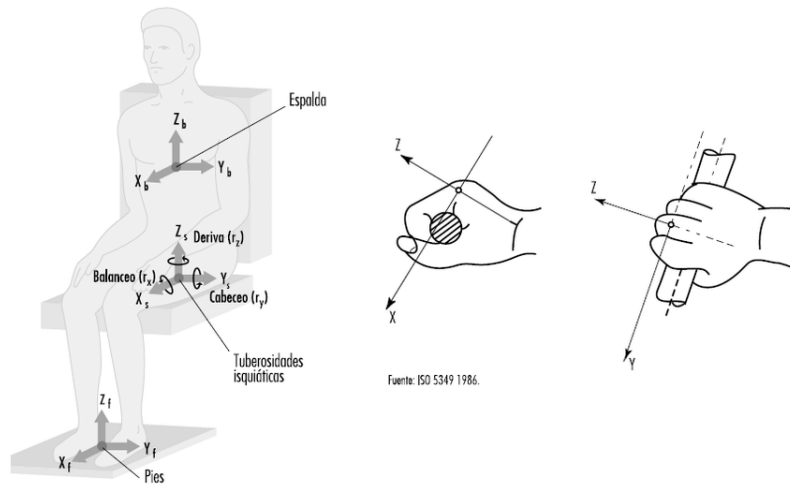


Figura 2 - Sistema de coordenadas basicêntrico adotado para vibração mão-braço e corpo inteiro.

3 - Efeitos da Vibração no Corpo Humano

De acordo com Seagull e Wickens (2006), em uma locomoção normal, como caminhando, o sistema músculo-esquelético amortece os efeitos dos movimentos corporais que possam ser estranhos à cabeça. As pernas, o dorso, e o pescoço são responsáveis por absorver o choque e limitar a quantidade de movimento que é transmitida para a cabeça. Entretanto, quando existe um ambiente vibratório, estas mesmas partes do corpo podem ressonar. Há ressonância quando ocorre transferência de energia de um sistema oscilante para outro, sempre que a frequência do primeiro coincide com uma das frequências próprias do segundo.

A exposição à vibração pode induzir uma série de respostas fisiológicas e psicológicas. Em baixas frequências (0,1 a 0,5 Hz), como as encontradas em navios ou veículos de transporte, pode causar cinetose (doença do movimento). Em frequências mais altas, a vibração pode levar a dores abdominais, náuseas, dores no peito, perda de equilíbrio e contrações musculares. Queixas de fadiga, irritação, aumento da frequência cardíaca e até impotência podem ser associadas à exposição prolongada [3]. Estudos indicam que 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 [3].

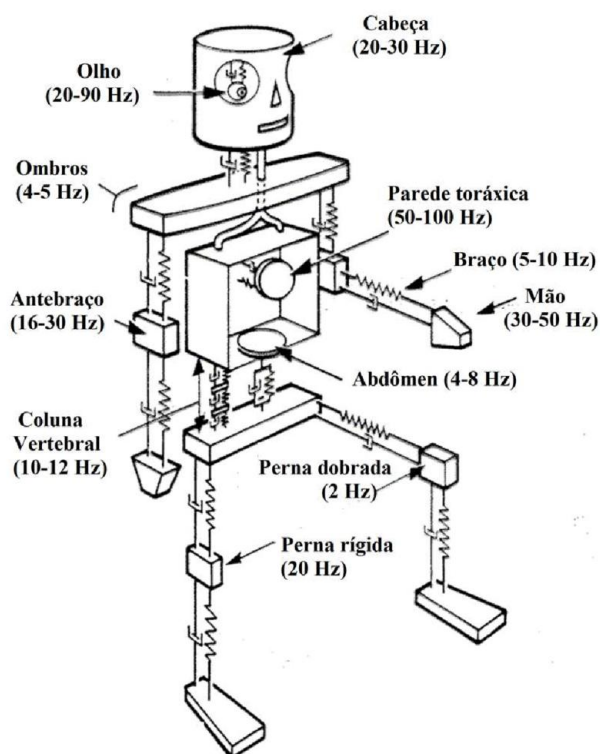


Figura 3 - Modelo mecânico do corpo humano mostrando as faixas de frequência de ressonância das várias partes do corpo.

Tabela 1: Valores de ação e limite de exposição diária para vibrações (A(8)) de corpo inteiro e mão-braço, conforme Decreto-Lei n.º 46/2006.

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

Esses efeitos destacam a importância de monitorar e controlar a exposição à vibração em ambientes de transporte e trabalho para proteger a saúde e o bem-estar dos indivíduos.

4 - Análise Comparativa dos Modais

4.1 - Aeronaves

As aeronaves são expostas a vibrações provenientes de diversas fontes, incluindo motores, turbulência atmosférica e sistemas aerodinâmicos. Essas vibrações podem afetar tanto o conforto dos

passageiros quanto o desempenho e a segurança dos pilotos. 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.

Tabela 2: Reações devido a vibração, segundo a ISO 2631-1 (1997).

Aceleração (m/s ²)	Reação provável
Menor do que 0,315	Confortável
Entre 0,315 e 0,63	Pouco desconfortável
Entre 0,5 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)

No entanto, a aceleração ponderada total é uma quantidade física vibracional, ou seja, é uma medida objetiva da vibração, não incluindo as diferenças de percepção de indivíduos. Para resolver essa questão, Griffin et al (1991) sugeriu a taxa de incômodo, em uma tentativa de quantificar essa percepção subjetiva. Através de pesquisas relevantes, Griffin mostrou que a percepção das vibrações pelas pessoas segue uma distribuição normal ou lognormal. Para modelar essa percepção, foi sugerido o modelo lognormal a seguir.

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

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.

Já a relação entre aceleração e incômodo é descrita 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.

$$v(u) = \begin{cases} 0 & u < u_{\min} \\ a \ln(u) + b & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ 1 & u > u_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

Com base nas equações anteriores, Yongshuai Wen et al (2025) 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. Os resultados mostram que a relação entre a aceleração ponderada abrangente e a altitude e velocidade de voo é complexa, não sendo uma relação linear única.

Os resultados da avaliação do conforto vibracional demonstram que a parte frontal da aeronave é a mais confortável, seguida pela parte traseira pôr fim a parte intermediária é a mais desconfortável, e a maioria das condições recebe a avaliação que se situa entre um pouco desconfortável e razoavelmente desconfortável.

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.

Tabela 3: Avaliação do conforto a partir da vibração das partes frontais, medianas e traseiras.

	Altura I			Altura II		
Velocidade	Frontal	Meio	Meio	Frontal	Meio	Meio
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

Notação: ND significa “Não desconfortável”, UPD significa “Um pouco desconfortável”, RD significa “Razoavelmente desconfortável” e ENTRE significa entre um pouco desconfortável e razoavelmente desconfortável.

O trabalho de Packer investigou a influência da vibração na execução de tarefas de pilotos de aeronaves. Vibrações verticais de alta frequência (30–100 Hz) têm impacto significativo no conforto sentado — especialmente nos assentos do meio e traseiros da cabine, que apresentam maior energia vibratória e, conseqüentemente, maior desconforto.

Utilizando uma bancada de teste com um assento de aeronave, o estudo avaliou a transmissibilidade da vibração vertical e seus efeitos em atividades como leitura, escrita e digitação. Os resultados confirmaram que níveis elevados de aceleração, como os causados por falhas de turbina, podem prejudicar significativamente a habilidade dos pilotos em desempenhar essas tarefas.

A avaliação foi realizada com base nas normas ISO 2631-1 e ANSI S3.18, que são relevantes para o contexto aeronáutico. A vibração pode levar à fadiga, reduzir a capacidade de concentração e, conseqüentemente, aumentar o risco de erros operacionais.

Durante a fase de cruzeiro, a vibração pode alcançar níveis descritos como “desconfortáveis” — apesar de menor intensidade em decolagens e pousos — afetando principalmente assentos na cabine traseira e comando.

Em aeronaves turboélice, ruído e vibração são os principais fatores geradores de desconforto. Modelos preditivos mostram que à medida que ambos aumentam, o desconforto também cresce.

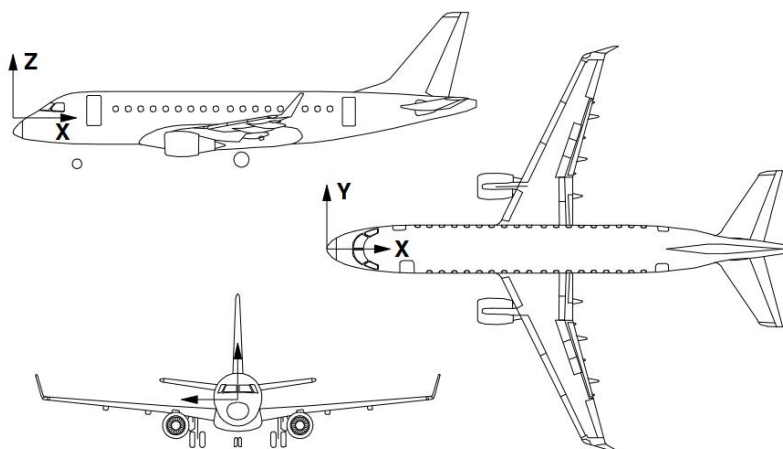


Figura 4 – Embraer ERJ-170.

4.2 - 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. A aceleração longitudinal e lateral tem maior influência no desconforto e na ocorrência de enjoo do que vibração vertical.

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. Todos os automóveis medidos possuem direção hidráulica e enquadram-se na mesma classe, com motores de 1,0 litro. São eles: Volkswagen Gol, Renault Sandero, Ford Fiesta e Fiat Palio.

Todos os automóveis testados encontravam-se em plenas condições de uso e todas as suas características, tais como pneus e rodas, foram mantidas originais. Os pneus de cada modelo foram calibrados pelo mesmo equipamento, de acordo com as recomendações de pressão de cada fabricante. Durante a realização das medições, todos os carros foram conduzidos pelo mesmo motorista de massa igual a 77 kg, acompanhado de um passageiro de 70 kg, a fim de manter a padronização dos testes.

As medições de vibração transmitidas pelos veículos foram realizadas por intermédio do equipamento VI-400Pro, S/N 12430, o qual consiste em um analisador de vibração portátil, com acelerômetros. Além de medir essas vibrações, o equipamento consegue armazenar os dados em uma memória interna com capacidade de 32 Mb. O aparelho é capaz de medir quatro canais de entrada simultaneamente, sendo três os utilizados para medir a vibração nos três eixos de coordenadas.

Dois tipos de pavimentação foram escolhidos para realização dos testes: pavimentação de asfalto e de paralelepípedos. A pavimentação de asfalto tem como característica ser uma superfície de rolamento lisa, porém com algumas irregularidades, decorrentes do desgaste e falta de manutenção, cenário muito comum nas vias de todo o Brasil. A pavimentação de paralelepípedos, apresenta uma superfície com constantes interrupções, devido as pequenas dimensões de cada paralelepípedo e pelo fato da via possuir um alto número de remendos, tornando a superfície rica em irregularidades.



Figura 5 – Rua de paralelepípedo na região de Tatuapé-SP.

As medidas das vibrações nos quatro veículos foram realizadas durante 60s, nas seguintes faixas de velocidade constante: 0 km/h, 30 km/h e 60 km/h, marcadas no velocímetro de cada veículo em ambos os pavimentos. Essas faixas de velocidade foram escolhidas, pois são comumente desenvolvidas em meios urbanos. A medida da vibração com o veículo parado (0 km/h) tem como objetivo simular os frequentes congestionamentos e paradas em sinais de trânsito, característico de cidades com elevada densidade populacional e alto número de veículos. As vibrações captadas são decorrentes do funcionamento do motor em marcha lenta e dos demais componentes do automóvel. O trabalho limita-se a utilizar três valores de velocidade, devido ao grande número de medições realizadas em diferentes condições e locais.

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. Além disso, a postura afeta como as vibrações são transmitidas e percebidas. Sentar-se de forma encurvada aumenta o desconforto, enquanto posições mais eretas estabilizam o corpo e ajudam a reduzir sensações negativas.

A rigidez da suspensão e o tipo de assento são fatores cruciais na mitigação dessas vibrações.



Figura 6 – Mercedes-Benz Classe C.

4.3 - 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. Embora os níveis medidos fossem geralmente considerados confortáveis de acordo com a ISO 2631, algumas situações e posições de medição apresentaram desconforto. O artigo ressalta a escassez de estudos sobre o tema no Brasil, indicando uma lacuna na pesquisa para este modal. Para trens de alta velocidade, a influência das irregularidades da via é um fator crítico.

Foi investigado como as irregularidades de longo comprimento de onda afetam a vibração e o conforto dos passageiros. O estudo, que utilizou um modelo tridimensional de corpo humano acoplado ao veículo e à via, mostrou que irregularidades longitudinais da via levam a altos níveis de vibração e desconforto, especialmente quando a frequência de excitação se aproxima da frequência natural do trem. A rigidez da suspensão secundária vertical foi identificada como um parâmetro sensível para o conforto dos passageiros. Além disso, cargas aerodinâmicas, como ventos cruzados, podem induzir vibrações

significativas, afetando o conforto, principalmente na direção vertical, e podendo levar à ressonância do veículo.

Estudos utilizando modelos que integram veículo–assento–corpo humano revelam que, em velocidades entre 250 e 400 km/h, avaliados por aceleração do carro e índice Sperling, o conforto parece bom. Porém, quando se consideram aceleração equivalente total ponderada e índices de irritação ligados à resposta humana, passageiros próximos às extremidades das janelas podem sentir desconforto razoável.

Conforme a norma ISO 26311 e o padrão europeu EN 12299, a combinação das vibrações do piso, assento e encosto é usada para avaliação. Irregularidades longitudinais da via geram vibrações intensas, especialmente em frequências próximas à ressonância do bogie, afetando confortavelmente a percepção dos ocupantes.



Figura 7 – Trem 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 rigidez da estrutura reduz esse impacto — melhores resultados são observados com melhor amortecimento e rigidez.

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.

5 - Discussão

A comparação entre aeronaves, automóveis e trens de alta velocidade revela desafios e abordagens distintas na gestão das vibrações. Em automóveis, o foco está na interação com o pavimento

e na otimização da suspensão e do design do assento para o conforto diário, com atenção especial aos motoristas profissionais [1]. Em aeronaves, a segurança operacional é primordial, e a mitigação das vibrações visa proteger o desempenho cognitivo dos pilotos, além do conforto dos passageiros, que podem ser afetados por turbulências e falhas mecânicas [2]. Nos trens de alta velocidade, o desafio reside em manter um alto nível de conforto em velocidades elevadas, lidando com irregularidades da via e efeitos aerodinâmicos, com a suspensão e o design da carroceria sendo elementos chave. As normas ISO 2631 e ISO 5349 são universalmente aplicáveis para a avaliação da vibração de corpo inteiro e mão-braço, respectivamente, em todos os modais. No entanto, a interpretação e os limites aceitáveis podem variar ligeiramente dependendo do contexto e da duração da exposição.

A pesquisa demonstra que a ressonância do corpo humano é um fator crítico em todos os cenários, e a engenharia de cada veículo busca evitar que as frequências de vibração coincidam com as frequências naturais do corpo humano. As estratégias de mitigação incluem o aprimoramento dos sistemas de suspensão (automóveis e trens), o design aerodinâmico (aeronaves e trens), o uso de materiais absorventes de vibração em assentos e estruturas, e a manutenção rigorosa das vias (trens) e aeronaves.

A compreensão dos efeitos de longo prazo da exposição à vibração é fundamental para o desenvolvimento de diretrizes de segurança e saúde mais eficazes para todos os tipos de passageiros e operadores de transporte.

6 – 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. Normas internacionais como a ISO 2631 e a ISO 5349 fornecem a base para essas avaliações, mas a aplicação e a interpretação dos resultados devem considerar as especificidades de cada ambiente de transporte.

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.

7 – Referências

[1] Kaderli, F., & Gomes, H. M. (2013). Análise do conforto quanto à vibração em automóveis de passeio. *Revista Liberato*, 12(18), 185-206.

Disponível em: <http://www.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/530>

[2] Packer, S. P. (2008). Estudo sobre a influência da vibração na execução de tarefas de pilotos de aeronaves. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-13042017-113433/en.php>

[3] Fedatto Neto, M., & Gomes, H. M. (2017). Análise de níveis de vibração em usuários de trens urbanos. *Revista Liberato*, 18(29), 75-86.

Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/196914/001055142.pdf?sequence=1>

[4] Xiao, X., Xu, H., Yang, Y., Chen, P., & Hu, Q. (2024). Analysis of the influence of track irregularity on high-speed train ride comfort. *Vehicle System Dynamics*, 62(7), 1658-1685.

Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2023.2250888>

[5] Zhang, Z., Xiao, X., Xu, H., & Jin, X. (2025). Analysis of human body vibration response on high-speed trains under crosswinds. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111863.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327024007611>