

ANÁLISE DO CONFORTO EM CARROS DE PASSAGEIROS EM VIAS COMPARTILHADAS

Caroliny Suque Endlich, B.Sc., UNICAMP, Brasil.

Ryan David Earl, M.Sc., UNICAMP, Brasil.

Victor Hugo Garcia de Campos, M.Sc., UNICAMP, Brasil

Leonardo Bartalini Baruffaldi, M.Sc., IFSP, Brasil

Auteliano Antunes dos Santos, Dr., UNICAMP, Brasil

RESUMO

Nesta pesquisa, investiga-se o conforto dos passageiros no contexto específico das ferrovias brasileiras, enfrentando um desafio notável: a transformação de linhas ferroviárias inicialmente projetadas para o transporte de cargas pesadas para a utilização por passageiros. O objetivo é examinar a experiência dos usuários sem gerar custos adicionais e sugerir limites de velocidade que assegurem o conforto dos passageiros frente a irregularidades de alinhamento de classe 4 da FRA na via. Analisa-se o impacto de variáveis como a velocidade, o raio de curvatura da via e a posição de medição no conforto percebido. Utilizando simulações dinâmicas baseadas em um modelo de multicorpos, a metodologia emprega duas abordagens reconhecidas para avaliação do conforto: o Índice Médio de Conforto (conforme a norma EN 12299:2009) e o Método de Sperling. A pesquisa destaca nuances na percepção do conforto, com especial atenção à velocidade como um fator chave que os operadores podem ajustar para melhorar a experiência dos passageiros. Para vias retas, encontrou-se um limite de velocidade de 40 km/h para garantir um conforto mediano e tolerável por ambos os métodos. Além disso, os resultados destacam a importância de posicionar estrategicamente o medidor empregado para análise do conforto, incluindo no centro, na traseira e na frente do carro de passageiros, para assegurar uma avaliação abrangente da sensação do passageiro. Isso é especialmente relevante ao avaliar o Índice Médio de Conforto, o qual revelou uma discrepância máxima significativa de 3,23 nos resultados obtidos. Analisando as vias, conclui-se que a curvatura se torna crucial em cenários de alta velocidade e, para esse caso, o método empregado para avaliar o conforto resultará em um comportamento diferente. Ao comparar o Índice Médio de Conforto com o Método de Sperling, conclui-se que ambos fornecem perspectivas similares em relação ao limite de velocidade a ser adotado na via.

Palavras-chaves: Índice de conforto; Irregularidade; Simulação dinâmica multicorpos; Geometria da ferrovia; Índice de Sperling.

1. INTRODUÇÃO

A análise do conforto em vagões de passageiros é fundamental para garantir não apenas uma experiência satisfatória para os usuários, mas também a eficiência do sistema

de transporte ferroviário. À medida que a busca por velocidades mais altas nos trens se torna um diferencial competitivo diante de outros modais, surgem desafios inerentes à segurança, ao conforto dos passageiros e à manutenção da infraestrutura ferroviária. No Brasil, a realidade é ainda mais complexa, visto que muitas ferrovias foram originalmente concebidas para o transporte de cargas, não necessariamente atendendo às necessidades de velocidade e segurança dos modernos trens de passageiros. Mudar essa realidade exigiria investimentos consideráveis na adaptação ou reconstrução das vias, além de uma manutenção rigorosa e avanços tecnológicos contínuos para assegurar tanto a segurança quanto o conforto dos passageiros. Como o foco nessas ferrovias é a carga, não há sentido em investimentos para a reconstrução de vias, mas sim na adequação dos projetos dos veículos e composições para atender ao conforto e à segurança necessários.

Na literatura atual, há estudos que visam formas de elevar a satisfação dos usuários para incentivar o uso mais frequente do transporte ferroviário sem grandes custos. Dizo et al. (2021), enfatizam a importância dos parâmetros de suspensão no conforto dos passageiros, demonstrando, por meio de simulações, como ajustes na rigidez das suspensões podem impactar no conforto da viagem. Da mesma forma, Li et al. (2022) propõem a otimização dos parâmetros da suspensão para aprimorar tanto a estabilidade lateral quanto o conforto, aplicando o algoritmo genético NSGA-II para identificar a melhor performance dinâmica lateral. Porém, para aprimorar o modelo de carro de passageiros empregado nas ferrovias compartilhadas nacionais é preciso antes compreender o conforto e suas características distintivas.

Para avaliar o índice de conforto, existem várias metodologias aceitas por normas internacionais. A ISO 2631-1 estabeleceu os procedimentos básicos para avaliar o conforto em veículos ferroviários devido a vibração e a dinâmica do carro de passageiros, desconsiderando ruídos, temperatura, e outros fatores. A partir disso, outras normas, relatórios e guias foram desenvolvidos como a norma EN 12299:2009, o método formulado por Sperling (VIJAY K. GARG; RAO V. DUKKIPATI, 1984), o *Ride Comfort Level* utilizada no Japão (SUZUKI, 1998) e a norma chinesa GB/T 5599-85. Além disso, alguns programas de simulação multicorpos, como o SIMPACK®, possuem alguns filtros prontos para serem aplicados no pós-processamento da simulação dinâmica para veículos de passageiros, visando a análise do conforto.

Kim et al. (2003) evidenciam que o conforto em veículos é influenciado por uma ampla gama de fatores, levando à criação de vários métodos e critérios de avaliação específicos para cada região sob análise. Esta diversidade evidencia a importância de uma seleção meticulosa de um método de avaliação que seja adequado ao veículo e ao trecho em análise. Empregando um modelo de vibrações desenvolvido a partir de medições de aceleração do veículo, Kim et al. (2003) estabeleceram uma correlação entre o método de Sperling, o *ride comfort level* (RCL) e o índice de conforto parcial da norma EN12299:2009 através de um processo de ajuste de curvas, obtendo uma correlação confiável e eficaz para os dados seus dados.

Dumitriu e Leu (2018) também identificaram uma correlação entre os índices de conforto definidos pela norma EN 12299:2009 e o índice de Sperling, através da condução de simulações numéricas. Seus achados reforçam a noção de que a velocidade tem um papel significativo na influência do conforto vertical. Adicionalmente, destacaram a importância do posicionamento dos sensores de medição da aceleração para encontrar os pontos críticos de conforto no carro de passageiros.

Já Herrero (2013) conduziu um estudo focado na otimização da suspensão primária de um trunfo de trem de alta velocidade. Para tal, examinou o índice de conforto em cinco diferentes macrogeometrias, cada uma permitindo velocidades máximas

distintas. Seus resultados revelaram que o índice de conforto tende a melhorar com a diminuição do raio das curvas, mas isso se dá ao fato de que as curvas menores foram simuladas com velocidades menores. Este achado enfatiza a relação intrínseca entre a geometria da via, a velocidade do trem e o conforto dos passageiros.

Diante desse panorama, este estudo propõe analisar o conforto, através de simulação dinâmicas de um modelo multicorpos, de forma a que os resultados possam servir, inclusive, para que medições em campo possam ser conduzidas para levar em conta especificidades não observadas na simulação. O objetivo do trabalho é identificar como a percepção de conforto é afetada pela variação da velocidade, da macrogeometria e do posicionamento do sistema de medição, e a consideração duas metodologias aceitas para avaliação do conforto.

Por serem as metodologias mais usualmente empregadas, adotou-se o índice de conforto médio da norma EN 12299:2009 e o método de Sperling W_z (VIJAY K. GARG; RAO V. DUKKIPATI, 1984). Como resultado, este estudo dedica-se também a explorar as duas metodologias mais utilizadas para o cálculo do conforto de passageiros, contribuindo também para o aprofundamento do conhecimento, aplicação e comparação das normas.

Na sessão 2, é apresentado um panorama detalhado do índice de conforto e de como ele é aplicado na simulação dinâmica empregando programas multicorpos. Os resultados das simulações são apresentados e discutidos no Capítulo 3, no qual é explorada a relação entre os índices calculados. Por fim, o Capítulo 4 sintetiza as conclusões, destacando as contribuições do estudo para a prática e sugerindo direções para pesquisas futuras.

2. DESENVOLVIMENTO

Para calcular o nível de conforto dos passageiros é preciso se basear em algum resultado mensurável. Embora uma pesquisa com os passageiros possa ser feita, o mais comum, e que não envolve eventuais desvios associados à diferença de sensibilidade entre as pessoas, é através de alguma medição aceita. A variável que é empregada para essa avaliação é a aceleração. Assim, é necessário obter a medida da aceleração em função do tempo na direção a ser analisada. Os sinais obtidos devem ser processados de acordo com as características do método empregado, em alguns casos expressas na forma de curvas de ponderação de frequência. Neste artigo será estudado o índice de conforto médio (Mean Comfort - N_{MV}) e o índice de Sperling (Sperling's ride index - W_z) para a aceleração vertical e lateral, os mais aceitos para essa finalidade.

2.1. Modelo Dinâmico

A modelagem do carro de passageiros em questão abrange uma série de elementos críticos, como o peso, os sistemas de suspensão, tanto primária quanto secundária e os perfis de roda e trilho. Os perfis de roda foram trocados para alinhar-se aos padrões utilizados em vagões de carga na EFVM. Adicionalmente, este estudo integra considerações sobre macrogeometria e irregularidades. A metodologia empregada para detalhar a configuração do veículo segue rigorosamente as informações fornecidas pela operadora ferroviária (VALE S.A.), garantindo uma abordagem a partir de dados reais para a análise dos truques e seus componentes.

Para a suspensão, são empregados truques derivados do modelo Y32RS francês, projetados para atingir velocidades de até 160 km/h. No entanto, dentro do contexto da ferrovia sob estudo sua velocidade máxima admitida é reduzida.

O modelo multicorpos foi desenvolvido empregando o software SIMPACK®. Tal modelo, mostrado na Figura 1, é construído com elementos de massa, rigidez, amortecimento e juntas. A suspensão primária é modelada por quatro amortecedores (1), quatro molas lineares (2) e quatro buchas (3). A suspensão secundária é modelada por duas molas (4) em cada lado, entre a estrutura e a travessa, e com dois amortecedores verticais (5) e um amortecedor lateral (6). As barras de antirrolagem (7) são instaladas entre a travessa e a estrutura. Essa conexão é feita por duas hastes que permitem rotação em y. A própria rigidez da barra é feita por um elemento de rigidez torcional. A junta de Watt (8) é modelada por três corpos, com uma junta livre para rotação em z conectando a travessa com a base da junta de Watt e quatro juntas esféricas conectando a base da junta de Watt com a estrutura, através de duas hastes. Por fim, a travessa é conectada rigidamente com a caixa.

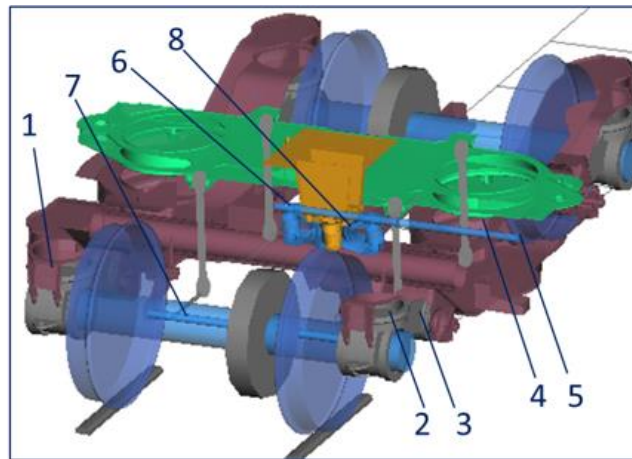


Figura 1: Modelo em multicorpos desenvolvido no programa SIMPACK®, conforme utilizado neste trabalho (EARL et al., 2023).

Para conduzir uma análise abrangente do conforto dos passageiros, foram selecionados seis segmentos de via, consistindo em uma via tangente e cinco curvas, as quais, juntas, representam mais de 87% das curvas presentes na ferrovia sob estudo. Os dados referentes a esses segmentos foram fornecidos pela operadora, destacando-se que a velocidade máxima autorizada é de 65 km/h para todas as curvas analisadas. Cada uma dessas curvas é precedida e seguida por uma seção tangente de 300 metros, possuindo um raio de curvatura constante de 180 metros e uma extensão subsequente à curva também de 180 metros. As especificações relativas ao comprimento da curva de transição e à superelevação foram rigorosamente seguidas conforme as informações fornecidas. Os detalhes específicos desses segmentos de via são apresentados na Tabela 1, enquanto o layout das vias é ilustrado na Figura 2, proporcionando uma visão detalhada do trecho no qual a análise de conforto foi realizada.

Tabela 1. Dados dos trechos simulados da EFVM.

Nº Via	Raio [m]	Comprimento absoluto da curva de transição [m]	Altura da superelevação [mm]	Velocidade máxima [km/h]
1	∞	0	0	65
2	2211,92	10,40	8,70	65
3	1119,26	20,50	17,90	65
4	540,33	42,40	28,00	65
5	371,60	61,70	57,20	65
6	281,66	81,40	68,20	65

Conforme mencionado anteriormente, a ferrovia em questão pertence à classe 4 de irregularidade da *Federal Railroad Administration (FRA)*, caracterizando-se pela adoção de uma função de densidade espectral de potência (PSD) específica para o descrever as irregularidades da via. Existem seis categorias de classificação ferroviária, com a qualidade melhorando progressivamente do nível 1 ao 6. A categoria 4, que representa cerca de 10% das ferrovias americanas, permite velocidades máximas de 97 km/h para trens de carga e 129 km/h para trens de passageiros. A norma para alinhamento nesta classe estipula um desvio máximo de 38,10 mm para um segmento de 62 pés (aproximadamente 18,90 metros), segundo Garg e Dukkipati (1984). Como primeira abordagem, será apenas aplicado a irregularidade de alinhamento da via, visto que esse é um estudo preliminar. O alinhamento, tipicamente aplicado à linha central da via, é descrito pela seguinte formulação empírica da PSD:

$$S_v(\Omega) = \frac{kA_v\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (\text{alinhamento vertical}) \quad (1)$$

$$S_l(\Omega) = \frac{kA_a\Omega_c^2}{\Omega^2(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (\text{alinhamento lateral}) \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), Ω representa a frequência espacial e Ω_c a frequência crítica, ambas em rad/m, e os coeficientes de rugosidade A_v e A_a expressos em $\text{cm}^2 \cdot \text{rad/m}$, estabelece-se k como uma constante, com valor de 0,25 pela literatura. Para a classe 4, os valores atribuídos são $A_v = 0,5376$ e $A_a = 0,3027$, com $\Omega_c = 0,8245$ (ROHIM; BERAWI, 2013). A determinação do intervalo de comprimento de onda, entre 3,0 e 25,0 m para o defeito de alinhamento da via, foi baseado em Podwórna (2015), enquanto o número total de incrementos de frequência é em 2500 (LEI; NODA, 2002). A partir destes dados, constrói-se a PSD que em seguida é transformada em excitação, considerando os limites de comprimento de onda. A irregularidade de alinhamento lateral e vertical em função da distância, é visualizada na Figura 3.

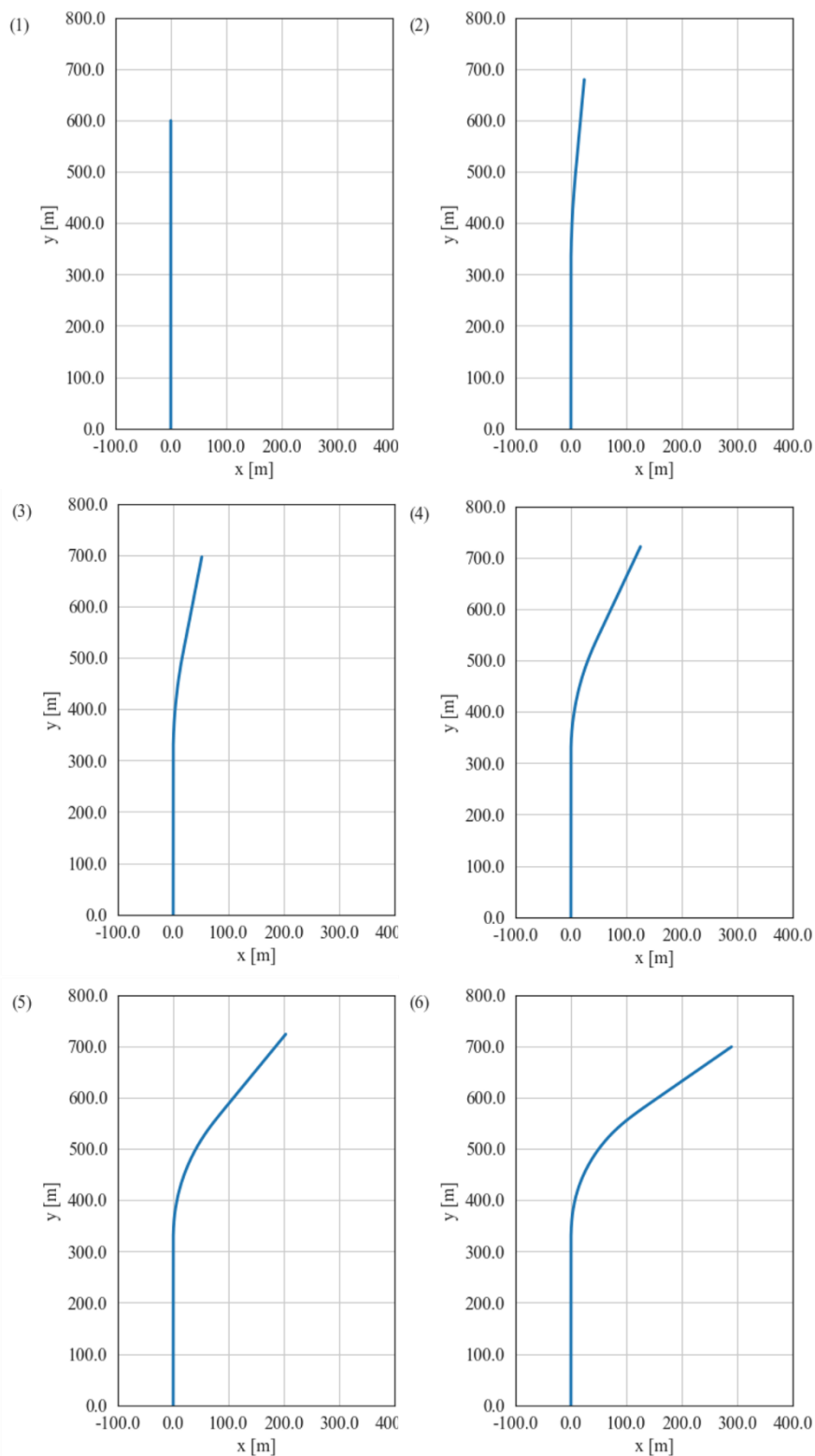


Figura 2: Seguintos de vias selecionados para realizar a análise do índice de conforto neste trabalho

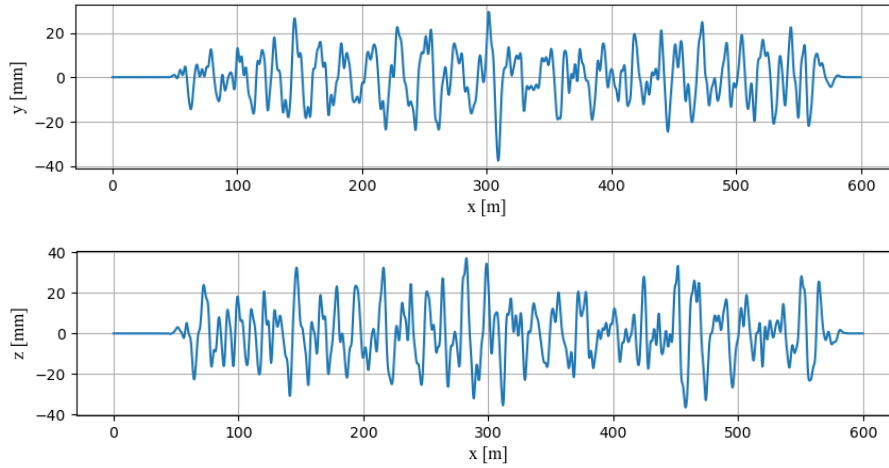


Figura 3: Irregularidade da via.

2.2. Índice de Conforto Médio - N_{MV}

A norma EN 12299:2009 define o Índice de Conforto como a percepção corporal total dos passageiros, influenciada por oscilações ou forças de inércia durante a movimentação do carro de passageiros. É relevante notar que a aplicabilidade da norma é para indivíduos saudáveis, sem levar em conta atividades pontuais como a leitura ou escrita. Dumitriu e Stănică (2021) apontam que a abordagem foi inicialmente divulgada através do documento UIC 513R, sendo posteriormente refinada pela EN 12299:2009 para incluir efeitos de eventos discretos e analisar a curva de transição, que corresponde a uma clotóide que conecta a tangente à curva de raio constante. A fundamentação para a análise do conforto se dá pela norma ISO 2631-1, que se concentra na influência das vibrações e movimentações do veículo.

As simulações devem ser realizadas a uma velocidade constante, com medições na interface do piso, no centro do carro de passageiros e na posição alinhada ao centro dos truques. A partir dessas medições, calculam-se os valores RMS das acelerações ponderadas para períodos de 5 segundos ao longo da pista, seguidos pela determinação do percentil de 95%. Dessa forma podem ser calculados os índices parciais de conforto médio.

$$N_{MVX} = 6 \cdot a_{XP95}^{Wd} \text{ (Longitudinal)} \quad (3)$$

$$N_{MYY} = 6 \cdot a_{YP95}^{Wd} \text{ (Lateral)} \quad (4)$$

$$N_{MVZ} = 6 \cdot a_{ZP95}^{Wb} \text{ (Vertical)} \quad (5)$$

O índice de conforto médio é calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos índices parciais (eq. 6). A Tabela 2 apresenta a escala de conforto correspondente.

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{Wd})^2 + (a_{YP95}^{Wd})^2 + (a_{ZP95}^{Wb})^2} \quad (6)$$

Para a eq. 6, o valor da aceleração longitudinal é calculado no centro do carro de passageiros.

Tabela 2. Escala do índice de conforto médio N_{MV} .

Nível de conforto	Valores limites	Classificação
(5)	$N_{MV} < 1,5$	Muito confortável
(4)	$1,5 \leq N_{MV} < 2,5$	Confortável
(3)	$2,5 \leq N_{MV} < 3,5$	Conforto mediano
(2)	$3,5 \leq N_{MV} < 4,5$	Desconfortável
(1)	$N_{MV} \geq 4,5$	Muito desconfortável

2.2. Índice de Sperling - W_z

O índice de conforto proposto por Sperling e detalhado no relatório ORE C116/RP8, em 1997, é uma métrica que permite a avaliação tanto da qualidade quanto do conforto da viagem. Inicialmente, este índice focava na sensibilidade do passageiro às vibrações, seja lateral ou vertical, com base em um fator de frequência específico, $F(f)$ (GARG; DUKKIPATI, 1984).

Com o passar dos anos e o avanço dos equipamentos eletrônicos, a fórmula para calcular esse índice evoluiu. Atualmente, utiliza-se as seguintes equações para representar essa métrica:

$$W_z = \sqrt[10]{a^3 B(f)^3} \text{ (cúbica)} \quad (7)$$

$$W_z = \sqrt[6,67]{a^2 B(f)^2} \text{ (quadrática)}, \quad (8)$$

onde, $B(f)$ é o fator de ponderação da frequência, eq. (9) e (10), que varia de acordo com a direção da vibração, e a é a amplitude da aceleração.

$$B(f)_s = 58,8 \sqrt{\frac{1,911f^2 + (0,25f^2)^2}{(1 - 0,277f^2)^2 + (1,563f - 0,0368f^3)^2}} \text{ (Vertical)} \quad (9)$$

$$B(f)_w = 1,25 B(f)_s \text{ (Lateral)} \quad (10)$$

Já para o índice de qualidade, o fator de ponderação é a eq. (11):

$$B(f) = 1,14 \sqrt{\frac{(1 - 0,056f^2)^2 + (0,645f)^2 \cdot (3,55f^2)}{[(1 - 0,277f^2)^2 + (1,547f - 0,00444f^3)^2](1 + 3,55f^2)}} \quad (11)$$

A metodologia para calcular o índice de conforto envolve a análise espectral da aceleração, aplicando a transformada de Fourier aos dados coletados. Isso permite identificar as amplitudes de vibração em um espectro de frequência de 0,5 a 20 Hz. Cada ponto desse espectro é avaliado individualmente, com a soma dessas avaliações fornecendo uma medida geral do conforto, eq. (12) e (13).

$$W_z = \sqrt[10]{W_{z1}^{10} + W_{z2}^{10} + \dots + W_{zn}^{10}} \text{ (cúbica)} \quad (12)$$

$$W_z = \sqrt[6,67]{W_{z1}^{6,67} + W_{z2}^{6,67} + \dots + W_{zn}^{6,67}} \text{ (quadrática)} \quad (13)$$

Como o espectro de vibração é uma função contínua da frequência, o W_Z também será, podendo ser obtido pela integração das eq. (12) e (13), obtendo-se as eq. (14) e (15). Nesse artigo, calculou-se o índice de conforto para o intervalo de tempo que compreende desde o início da curva até o final da via, para cada velocidade.

$$W_Z = \sqrt[10]{\left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} |a|^3 B^3 dt\right)} \text{ (cúbica)} \quad (14)$$

$$W_Z = \sqrt[6,67]{\left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} a^2 B^2 dt\right)} \text{ (quadrática)} \quad (15)$$

A Tabela 3 abaixo, determina as escalas do índice de conforto.

Tabela 3. Escala do índice de conforto de Sperling W_Z .

Nível de conforto	Valores limites	Classificação
(7)	1,00	Apenas perceptível
(6)	2,00	Nitidamente perceptível
(5)	2,50	Mais acentuado, mas não desagradável
(4)	3,00	Forte, irregular, mas tolerável
(3)	3,25	Muito irregular
(2)	3,50	Extremamente irregular, desagradável, irritante; Exposição prolongada intolerável
(1)	4,00	Extremamente desagradável; Exposição prolongada prejudicial

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao realizar as simulações com o modelo dinâmico proposto, com variações de velocidade de 10 a 90 km/h para cada tipo de via, foram obtidas medições de aceleração extraídas em três posições diferentes do chão do carro de passageiros: no centro, na conexão com o truque traseiro e com o truque frontal. Após isso, foram aplicados filtros às leituras de aceleração, utilizando o pós-processamento do software SIMPACK®, que permitiu calcular os índices de conforto conforme a norma EN 12299:2009, além do índice de Sperling, de acordo com o equacionamento mostrado anteriormente.

Na Figura 4, são apresentadas as quatro variantes do índice de conforto de acordo com a norma EN 12299:2009: conforto longitudinal (N_{MVX}), lateral (N_{MYY}), vertical (N_{MVZ}) e o índice médio de conforto (N_{MV}), calculados para a via 1 (tangente), com o acelerômetro localizado no centro do carro de passageiros. As diferentes cores de fundo na figura indicam os níveis de conforto definidos pela norma, detalhados na Tabela 2. Observa-se que aos 45 km/h, o nível de conforto (índice médio) é avaliado como "muito desconfortável"; contudo, ao atingir 55 km/h, o índice alcança um vale, aproximando-se de uma avaliação de "conforto mediano", e retorna a aumentar. Esse comportamento também é observado no índice de conforto vertical nas simulações realizada por Dumitriu e Leu (2018) no ponto de medição central e traseiro do carro de passageiros, para os dois métodos de avaliação, com outras condições de operação e projeto de veículos. Destaca-se que a velocidade máxima permitida para garantir o conforto na condição simulada é de 40 km/h.

Ao examinar o índice de Sperling para a mesma via e posicionamento do acelerômetro, comparando o método de Sperling cúbico e quadrático (Figura 5), observa-se que um comportamento semelhante entre os índices da direção vertical com o N_{MV} . O índice aumenta até alcançar um pico em 45 km/h, depois diminui até alcançar um vale em 55 km/h e, posteriormente, volta a crescer.

Considerando que a região do nível do índice de Sperling (3) até o (1) é percebida como mais desconfortável pelos passageiros, conforme visto na Tabela 3, deve-se evitar exposições prolongadas. Assim, a velocidade máxima recomendada é de 40 km/h para a direção vertical, 70 km/h para a direção horizontal pelo método cúbico e 55 km/h pelo método quadrático. Nota-se que para direção vertical o método de cálculo escolhido para o índice de Sperling não impacta significativamente o resultado. Contudo, na direção lateral, o método quadrático tende a superestimar os índices crescendo paralelamente com o W_{ZC} .

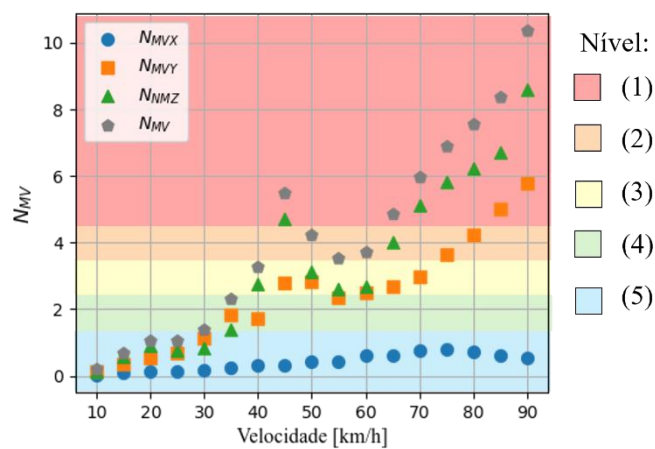


Figura 4: Variação dos índices de conforto da norma EN 12299:2009 em relação a velocidade na via 1.

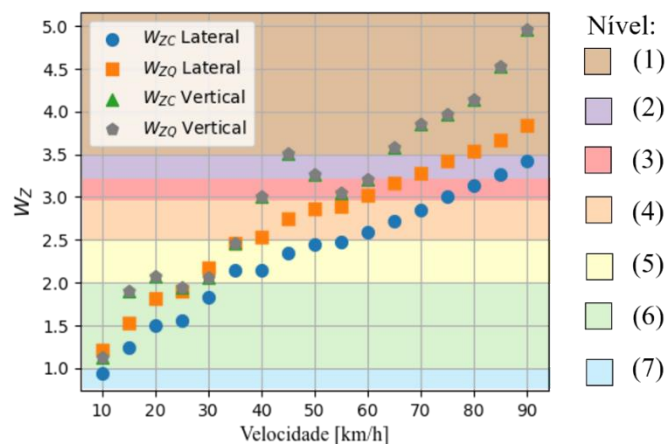


Figura 5: Variação dos índices de conforto de Sperling em relação a velocidade na via 1.

A partir dos resultados obtidos, foi analisado também o índice de conforto em função do posicionamento do acelerômetro na via 1. A Figura 6 revela diferenças significativas entre os acelerômetros traseiro, frontal e central, principalmente a partir de 45 km/h para o N_{MVY} e de 60 km/h para o N_{MVZ} . A diferença máxima do resultado entre

as posições traseira e frontal em relação ao central para N_{MVY} foi de 2,30 e para o N_{MVZ} foi de 3,23 e 1,45, respectivamente. No que se refere a direção vertical, o acelerômetro traseiro registrou amplitudes de aceleração maiores, refletindo em um índice de conforto mais elevado e uma variação maior quando comparado à posição central. A distinção dos resultados dos acelerômetros traseiro e frontal pode ser atribuída à modelagem do carro de passageiros que reproduz o comportamento do último carro de um trem, e por serem distantes do centro de gravidade (DUMITRIU; ALIN GHETI, 2015). Entretanto, para velocidades superiores a 90 km/h, o índice de conforto medido no centro do carro de passageiros pode se equiparar ou até superar aqueles medidos nas proximidades dos truques, conforme apontado por Dumitriu (2014) em casos de alta velocidade.

No índice de Sperling, usando o método cúbico (Figura 7), observa-se uma variação entre os dados dos acelerômetros das extremidades e o central, com diferenças máximas mais sutis: 0,42 a 0,52 para o lateral e 0,44 a 0,73 para o vertical, no acelerômetro traseiro e frontal, respectivamente.

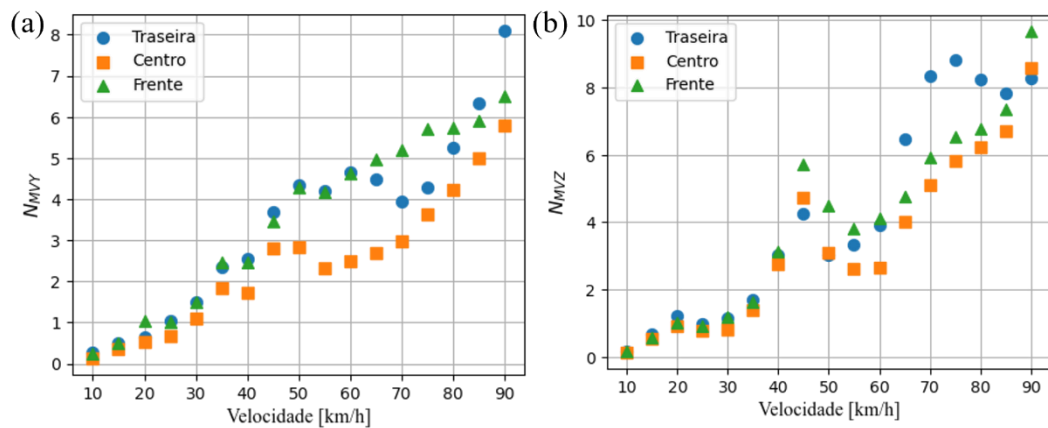


Figura 6: Comparação do índice de conforto da norma EN12299:2009 em relação a da posição do acelerômetro para a direção lateral (a) e vertical (b).

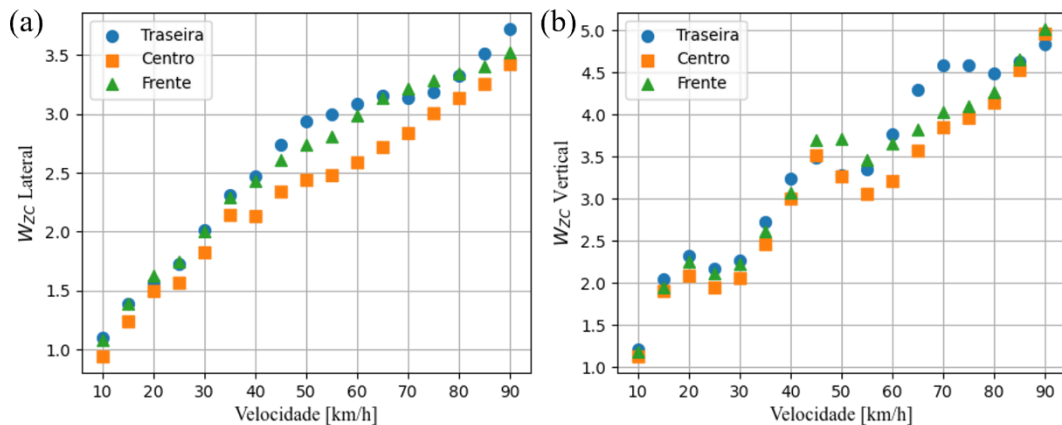


Figura 7: Comparação do índice de conforto do Sperling em relação a da posição do acelerômetro para a direção lateral (a) e vertical (b).

Após uma análise comparativa das metodologias mais utilizadas na literatura para calcular o índice de conforto e a avaliação do posicionamento do acelerômetro no carro de passageiros para a via 1, procedeu-se à comparação das variações desse índice

com as observadas em outras vias simuladas. A Tabela 1 apresenta a descrição das vias, incluindo a numeração e as características geométricas específicas, destacando-se que existe uma diminuição do raio da curva da via 1 até a via 6. Essa análise específica foi conduzida utilizando-se o acelerômetro posicionado no centro do carro.

Na Figura 8, são apresentados os índices de conforto parciais e o índice de conforto médio, conforme a norma EN 12299:2009. Nota-se que, na direção longitudinal, a via 6 exibe um desempenho inferior em comparação às vias com maiores raios, particularmente a velocidades superiores a 40 km/h, um padrão que se mantém para a direção lateral até atingir a marca de 75 km/h. A partir desse ponto, vias com raios menores começam a ser percebidas como mais problemáticas para o conforto. Esse fenômeno pode ser atribuído ao baixo valor de superelevação dessas vias, o que potencializa o aumento da amplitude da aceleração e o desenvolvimento de *hunting*. No entanto, essa tendência não se aplica ao conforto vertical e, conseqüentemente, não afeta significativamente o índice médio de conforto.

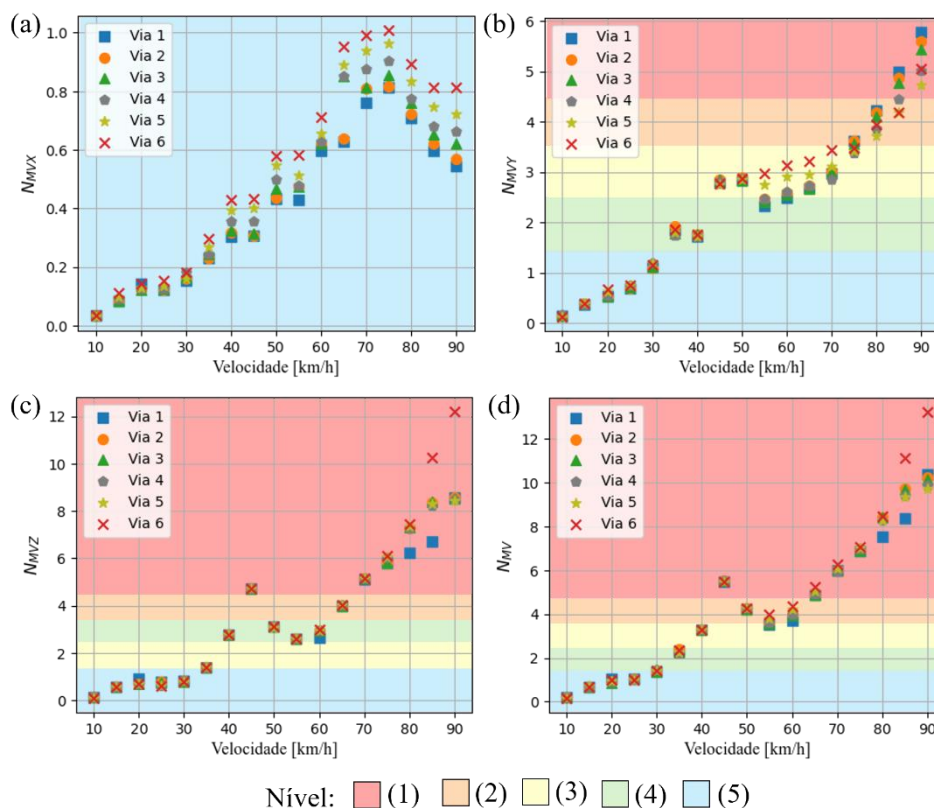


Figura 8: Comparação do índice de conforto da Norma EN12299:2009 longitudinal (a), lateral (b), vertical (c) e médio (d) em relação a macrogeometria da via.

Em contraste, para o índice de conforto de Sperling (Figura 9), a via 6 não se destaca como a mais problemática. Pelo contrário, a via 1 é percebida como a mais desafiante em termos de conforto para as duas direções, correspondendo a uma tangente, com exceção do conforto vertical em velocidades acima de 55 km/h, onde a via 6 assume a posição de maior desconforto.

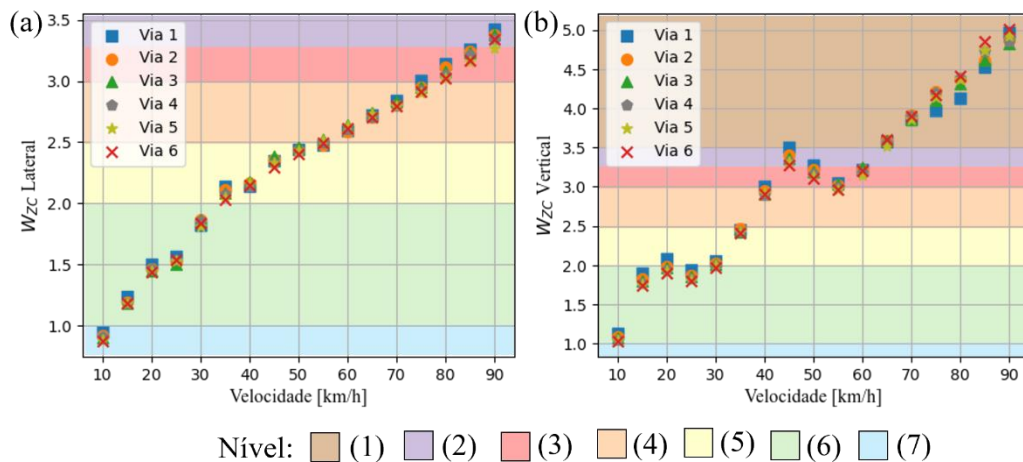


Figura 9: Comparação do índice de Sperling lateral (a) e vertical (b) em relação a macrogeometria da via.

Para investigar os detalhes do que foi encontrado, foram elaborados gráficos de barras representando a variação da velocidade de 10 a 65 km/h, conforme mostrado nas Figuras 10, 11 e 12. A análise revela que, considerando o índice de conforto médio, os resultados obtidos para as diferentes vias apresentam valores bastante similares. No entanto, observa-se que a partir de 65 km/h as vias com raios menores começam a apresentar maior desconforto. Em contraste, a análise do índice de Sperling evidencia que as vias com raios maiores sofrem de maior desconforto em ambas as direções. Contudo, quando se considera o conforto vertical, observa-se que, a partir de 60 km/h, as vias com raios menores começam a ter um acréscimo. Esta discordância entre os métodos utilizados pode ser embasada no fato da norma EN 12299:2009 aplicar um cálculo de valor eficaz ponderado ($r.m.s$ – root mean square) e o índice de Sperling não (KIM et al., 2003).

Apesar dessas discrepâncias entre as vias, é importante destacar que tais variações não alteram a classificação de conforto designada para uma velocidade em particular.

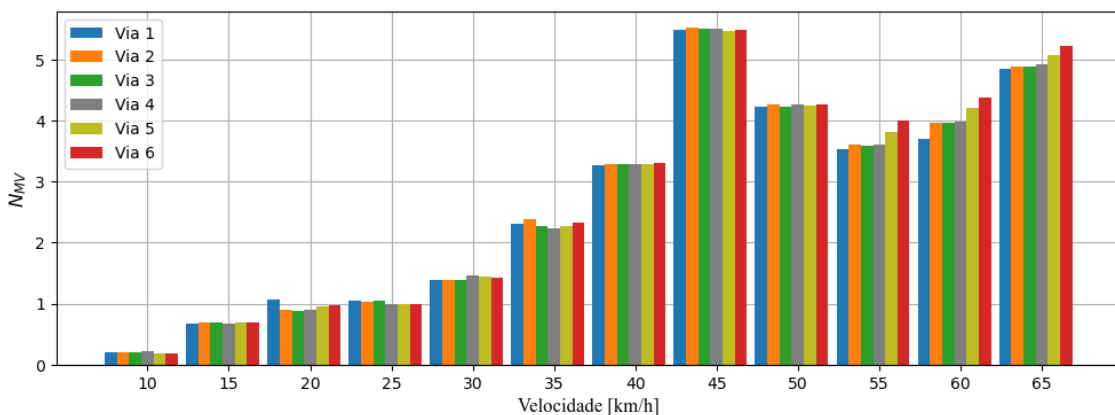


Figura 10: Variação do índice de conforto médio em relação a macrogeometria da via para velocidade de até 65 km/h.

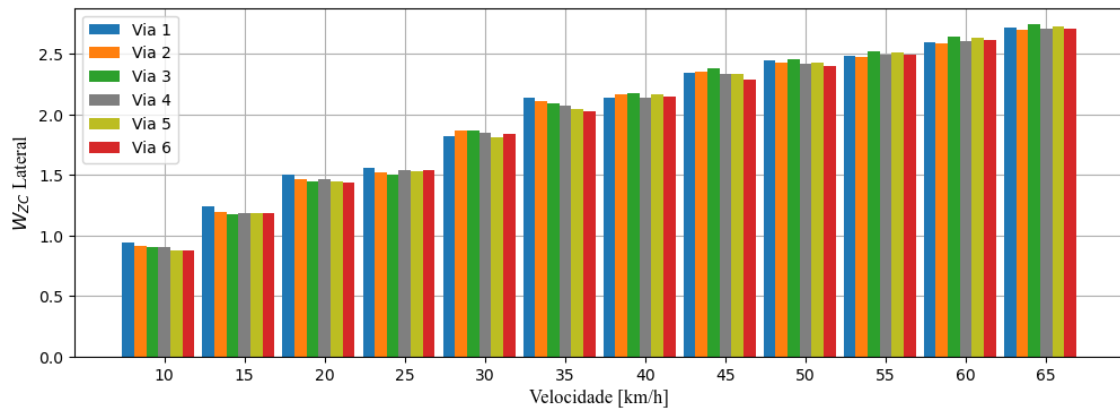


Figura 11: Variação do índice de conforto lateral de Sperling em relação a macrogeometria da via para velocidade de até 65 km/h.

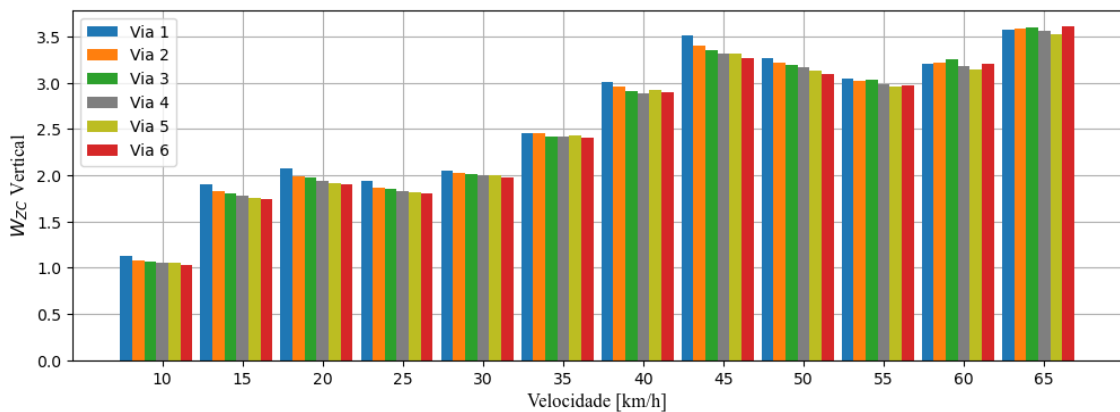


Figura 12: Variação do índice de conforto vertical de Sperling em relação a macrogeometria da via para velocidade de até 65 km/h.

4. CONCLUSÃO

Este estudo permitiu uma análise aprofundada sobre o conforto dos passageiros em carros de passageiros, particularmente, no contexto brasileiro de irregularidades da classe 4 FRA e vias compartilhadas, através do emprego de simulações dinâmicas fundamentadas em um modelo multicorpos. A investigação dos índices de conforto N_{MV} e W_z proporcionou uma compreensão detalhada de como a velocidade, posição no carro de passageiros e a geometria da via podem influenciar a percepção de conforto dos passageiros.

Além disso, a comparação entre os índices de conforto conforme a norma EN 12299:2009 e o método de Sperling reforça a aplicabilidade de ambos para aferir o conforto dos passageiros, visto que ambos estabeleceram o limite de velocidade em 40 km/h para a via 1 (tangente). Note-se que a velocidade é o único fator que pode ser modificado na operação a fim de manter o conforto dos passageiros, durante a operação. Alterações no projeto requerem novos truques ou modificações feitas em oficinas. Entretanto, aparentemente, adotar a norma EN 12299:2009 apresenta uma vantagem, possibilitando uma análise mais minuciosa para cada direção e a obtenção de um índice global de conforto.

A importância do posicionamento dos acelerômetros para identificar pontos críticos que influenciam o conforto no interior do carro de passageiros foi também evidenciada, considerando que a disparidade máxima observada atingiu 3,23 no índice de conforto entre uma leitura realizada na parte posterior e no centro do carro. Isso evidencia a importância de adotar múltiplos locais para a coleta de dados (central, traseiro e frontal) em testes de campo ou simulações dinâmicas. Tal estratégia de coleta de dados garante uma apreciação mais acurada das condições experimentadas pelos passageiros ao longo da viagem.

Apesar de vias com raios maiores possuírem um maior índice de conforto para Sperling, essa variação não é significativa para alterar a classificação do conforto, contanto que se mantenha a velocidade máxima estipulada para a via. Essa discordância entre os índices de conforto analisados nesse artigo deve-se a metodologia aplicada a cada um. A norma EN 12299:2009 aplica um cálculo de valor eficaz ponderado, escolhendo o percentil de 95%, enquanto Sperling opta por uma ponderação de frequência para encontrar um valor efetivo ponderado. Conclui-se, então, que o raio da curva é mais crítico para o conforto para casos de alta velocidade, evidenciando que a variação da velocidade tem uma influência mais significativa no conforto.

Este estudo contribui para o avanço no entendimento do conforto em veículos ferroviários, já que mostra quais índices empregar e quais os efeitos da velocidade, da posição de medição e da macrogeometria da via sobre o conforto. As descobertas abrem caminho para futuras investigações que possam explorar ainda mais a interação entre diferentes variáveis de design e operacionais com o índice de conforto para elevar a qualidade do transporte ferroviário de passageiros no Brasil e em outros contextos com desafios similares. Em análises futuras, será interessante analisar o índice de conforto em função dos parâmetros de suspensão e amortecimentos, da aderência roda-trilho e da possibilidade de controlar a lubrificação para melhorar o conforto, permitindo o aprimoramento dos projetos de carros de passageiros e da operação ferroviária.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento à Vale S.A. pelo financiamento da pesquisa, das bolsas aos mestrandos e doutorandos, além do suporte com informações técnicas. Além disso, ao CNPq (bolsa número 303582/2023-5), que contribuiu para o financiamento parcial deste estudo.

6. REFERÊNCIAS

- DÍŽO, J. et al. Evaluation of ride comfort in a railway passenger car depending on a change of suspension parameters. *Sensors*, v. 21, n. 23, 1 dez. 2021.
- DUMITRIU, M. On the critical points of vertical vibration in a railway vehicle. *Archive of Mechanical Engineering*, v. 61, n. 4, p. 609–625, 1 dez. 2014.
- DUMITRIU, M.; ALIN GHETI, M. EVALUATION OF THE RIDE QUALITY AND RIDE COMFORT IN RAILWAY VEHICLES BASED ON THE INDEX W_z . *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, v. 123, 2015.
- DUMITRIU, M.; LEU, M. Correlation between Ride Comfort Index and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, v. 880, p. 201–206, mar. 2018.

DUMITRIU, M.; STĂNICĂ, D. I. Study on the evaluation methods of the vertical ride comfort of railway vehicle-mean comfort method and sperling's method. Applied Sciences, v. 11, n. 9, 2021.

EARL et al. DYNAMIC SIMULATION MODELS FOR PASSENGER RAILWAY VEHICLES: A CASE STUDY CONCERNING THE CARAJÁS AND VITÓRIA TO MINAS RAILWAY COACHES. In: ANAIS DO VI SIMPÓSIO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA, 2023, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sef/sef-2023/trabalhos/dynamic-simulation-models-for-passenger-railway-vehicles-a-case-study-concerning?lang=pt-br>. Acesso em: 1 fev. 2024.

EUROPEAN STANDARDS. EN 12299: Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation. London, UK, 2009.

GARG, V. K.; DUKKIPATI, R. V. Chapter 3 - Description of the Railway Vehicle Models and Track Geometry. Em: GARG, V. K.; DUKKIPATI, R. V (Eds.). Dynamics of Railway Vehicle Systems. Academic Press, 1984. p. 58–102.

HERRERO, A. Towards optimization of a high-speed train bogie primary suspension. Master's Thesis—Göteborg: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole body vibration.1997.

KIM, Y.-G. et al. Correlation of ride comfort evaluation methods for railway vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Anais...Journal of Rail and Rapid Transit, 2003.

LEI, X.; NODA, N.-A. ANALYSES OF DYNAMIC RESPONSE OF VEHICLE AND TRACK COUPLING SYSTEM WITH RANDOM IRREGULARITY OF TRACK VERTICAL PROFILE. Journal of Sound and Vibration, v. 258, n. 1, p. 147–165, 2002.

LI, G. et al. Suspension parameters matching of high-speed locomotive based on stability/comfort Pareto optimization. Vehicle System Dynamics, v. 60, n. 11, p. 3848–3867, 2022.

NATIONAL STANDARDS OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. GB/T 5599-85: Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock. 2019.

PODWÓRNA, M. Modelling of random vertical irregularities of railway tracks. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, v. 20, n. 3, p. 647–655, 1 ago. 2015.

ROHIM, A. IMPROVING RAILWAY TRACK MAINTENANCE USING POWER SPECTRAL DENSITY (PSD). Doctor's Thesis - Porto: Universidade de Porto, 2013.

SUZUKI, H. Research trends on riding comfort evaluation in Japan. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, v. 212, p. 61–72, 1998.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC). UIC 513R: Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Paris, 1994.

VIJAY K. GARG; RAO V. DUKKIPATI. Dynamics of railway vehicle systems. Ontario, CA.: ACADEMIC PRESS, 1984.

VALE S.A. Comunicação Privada. Projeto Desenvolvimento de Modelos Computacionais para Simulação Dinâmica de Carros de Passageiros da EFVM e EFC - Escopo UNICAMP. 2023.

RIDE COMFORT INDEX ANALYSIS: INFLUENCE OF SPEED, MEASUREMENT POINT, AND TRACK GEOMETRY IN THE BRAZILIAN CONTEXT

Abstract

In this research, we investigate the comfort of passengers in the specific context of Brazilian railways, facing a notable challenge: the transformation of railway lines initially designed for heavy cargo transport into ones used by passengers. The aim is to examine the user experience without generating additional costs and to suggest speed limits that ensure passenger comfort in the face of Class 4 alignment irregularities of the FRA on the track. The impact of variables such as speed, track curvature radius, and measurement position on perceived comfort is analyzed. Using dynamic simulations based on a multibody model, the methodology employs two recognized approaches for comfort assessment: the Average Comfort Index (as per EN 12299:2009 standard) and the Sperling Method. The research highlights nuances in comfort perception, with special attention to speed as a key factor that operators can adjust to improve passenger experience. For straight tracks, a speed limit of 40 km/h was found to ensure median and tolerable comfort by both methods. Additionally, the results underscore the importance of strategically positioning the meter used for comfort analysis, including at the center, rear, and front of the passenger car, to ensure a comprehensive assessment of passenger sensation. This is especially relevant when assessing the Average Comfort Index, which revealed a significant maximum discrepancy of 3.23 in the obtained results. Analyzing the tracks, it is concluded that curvature becomes crucial in high-speed scenarios, and in this case, the method employed to assess comfort will result in different behavior. Comparing the Average Comfort Index with the Sperling Method, it is concluded that both provide similar perspectives regarding the speed limit to be adopted on the track.

Keywords: Ride comfort index; Irregularity; Multibody Dynamic Simulation; Railway Geometry; Sperling's Index.