

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO NUMÉRICO DAS CONDIÇÕES OCUPACIONAIS DE UM VEÍCULO DE
CARGA COM FORÇAS DE AMORTECIMENTO NÃO LINEARES

por

Rafael Neponuceno da Silva

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, outubro de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Rafael Neponuceno da
Estudo numérico das condições ocupacionais de um
veículo de carga com forças de amortecimento não
lineares / Rafael Neponuceno da Silva. -- 2022.
33 f.
Orientador: Walter Jesus Paucar Casas.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Dinâmica veicular. 2. Conforto. 3. Saúde. 4.
Vibração. I. Casas, Walter Jesus Paucar, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rafael Neponuceno da Silva

ESTUDO NUMÉRICO DAS CONDIÇÕES OCUPACIONAIS DE UM VEÍCULO DE
CARGA COM FORÇAS DE AMORTECIMENTO NÃO LINEARES

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela proteção e persistência para seguir em frente.

Agradeço aos meus pais, Luiz Carlos da Silva e Maria de Deus A. Neponuceno pelo amor incondicional e esforços para concretização deste sonho.

Agradeço ao Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas pelos conselhos e suporte na elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço à Educação Pública, das séries iniciais até o nível superior, que apesar de todos os desafios me permitiram o desenvolvimento da capacidade intelectual.

Agradeço também a todas as pessoas que acreditaram nessa jornada.

EPÍGRAFE

É preciso ter o caos dentro de si para gerar uma estrela dançante.

Friedrich Nietzsche.

SILVA, Rafael Neponuceno da. **Estudo numérico das condições ocupacionais de um veículo de carga com forças de amortecimento não lineares**. 2022. 33f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Estudos com foco nas condições ocupacionais de motoristas de veículos de carga têm evidenciado a relação entre as Vibrações de Corpo Inteiro e o desenvolvimento de doenças de natureza muscoesqueléticas. Dessa forma, o trabalho em questão busca analisar numericamente um modelo de veículo de carga de seis eixos e 13 graus de liberdade contendo forças de amortecimento não lineares na cabine e chassis. Assim, busca-se quantificar o nível de saúde e conforto que o trabalhador está submetido, bem como, a jornada diária adequada para a aceleração sofrida segundo critérios previstos na Norma de Higiene Ocupacional (NHO-09:2013). A resolução do problema envolve a solução das equações do movimento pelo método de Newmark e a modelagem do perfil de irregularidades das pistas segundo critérios da ISO 8608:2016. Com isso realiza-se a ponderação em frequência das acelerações no assento do motorista conforme ISO 2631-1:1997 para 5 condições distintas de classe de pista e velocidade de tráfego. Os resultados indicam forte dependência do nível de irregularidades das pistas, bem como, a exposição a níveis superiores de vibração previstos em normas de saúde ocupacional.

PALAVRAS-CHAVE: Vibração de Corpo Inteiro, saúde, conforto, Newmark, ISO 2631-1.

SILVA, Rafael Neponuceno da. **Numerical study of the occupational conditions of a cargo vehicle with non-linear damping forces**. 2022. 33p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Studies focusing on the occupational conditions of freight vehicle drivers have shown the relationship between whole-body vibration and the development of musculoskeletal diseases. Thus, the work in question seeks to numerically analyze a model of a six-axle, 13-degree-of-freedom freight vehicle containing nonlinear damping forces in the cabin and chassis. Thus, we seek to quantify the level of health and comfort that the worker is subjected to, as well as the adequate daily workday for the acceleration suffered according to criteria provided by Occupational Hygiene Standard (NHO-09:2013). Solving the problem involves the equations of motion using the Newmark method and the modeling of the road irregularity profile according to ISO 8608:2016 criteria. So then, the frequency weighting of the accelerations in the driver's seat is carried out according to ISO 2631-1:1997 for 5 different conditions of road class and traffic speed. The results indicate a strong dependence on the level of irregularities of the tracks, as well as, the exposure to higher levels of vibration foreseen in occupational health standards.

KEYWORDS: whole-body vibration, health, comfort, Newmark, ISO 2631-1.

NOMENCLATURA

Símbolos

M	Matriz de massa	[kg]
C	Matriz de amortecimento	[Ns/m]
K	Matriz de rigidez	[N/m]
F	Vetor de forças externas	[N]
\ddot{x}	Vetor aceleração	[m/s ²]
x	Vetor deslocamento	[m]
\dot{x}	Vetor velocidade	[m/s]
$a_0, a_1, a_2, a_5, a_6, a_7$	Constantes de integração do método de Newmark	[-]
a_{wj}	Aceleração instantânea ponderada em frequência na direção j	[m/s ²]
a_w	Aceleração RMS ponderada em frequência	[m/s ²]
VDV_j	Valor de dose de vibração da coordenada j	[m/s ^{1.75}]
are	Aceleração resultante da exposição	[m/s ²]
$aren$	Aceleração resultante da exposição normalizada	[m/s ²]
$VDVR$	Valor de dose de vibração resultante	[m/s ^{1.75}]
t	Instante de tempo	[s]
T	Tempo de amostragem/Tempo da jornada de trabalho	[s]
T_0	Tempo da jornada de trabalho de referência	[s]
w_k	Fator de ponderação - ISO 2631-1	[-]
w_d	Fator de ponderação - ISO 2631-1	[-]
k	Fator multiplicador - ISO 2631-1	[-]
x_p	Deslocamento vertical do assento	[m]
x_c	Deslocamento vertical do CG da cabine	[m]
x_b	Deslocamento vertical do CG do chassi do cavalo mecânico	[m]
x_1	Deslocamento vertical do primeiro eixo	[m]
x_e	Deslocamento vertical da suspensão equivalente	[m]
x_t	Deslocamento vertical do CG do semirreboque	[m]
x_4	Deslocamento vertical do quarto eixo	[m]
x_5	Deslocamento vertical do quinto eixo	[m]
x_6	Deslocamento vertical do sexto eixo	[m]
\dot{x}_p	Velocidade do assento	[m/s]
\dot{x}_c	Velocidade associada ao CG da cabine	[m/s]
\dot{x}_b	Velocidade associada ao CG do chassi do cavalo mecânico	[m/s]
\dot{x}_1	Velocidade associada ao primeiro eixo	[m/s]
\dot{x}_e	Velocidade associada a suspensão equivalente	[m/s]
\dot{x}_t	Velocidade associada ao CG do semirreboque	[m/s]
\dot{x}_4	Velocidade associada ao quarto eixo	[m/s]
\dot{x}_5	Velocidade associada ao quinto eixo	[m/s]
\dot{x}_6	Velocidade associada ao sexto eixo	[m/s]
\ddot{x}_p	Aceleração do assento	[m/s ²]
\ddot{x}_c	Aceleração associada ao CG da cabine	[m/s ²]
\ddot{x}_b	Aceleração associada ao CG do chassi	[m/s ²]

\ddot{x}_1	Aceleração associada ao primeiro eixo	[m/s ²]
\ddot{x}_e	Aceleração associada a suspensão equivalente	[m/s ²]
\ddot{x}_t	Aceleração associada ao CG do semirreboque	[m/s ²]
\ddot{x}_4	Aceleração associada ao quarto eixo	[m/s ²]
\ddot{x}_5	Aceleração associada ao quinto eixo	[m/s ²]
\ddot{x}_6	Aceleração associada ao sexto eixo	[m/s ²]
F_{rci}	Força de amortecimento na suspensão traseira da cabine	[N]
F_{c2}	Força de amortecimento chassis-amortecedor c_2	[N]
F_{c3}	Força de amortecimento chassis-amortecedor c_3	[N]
q_1	Deslocamento do pneu 1	[m]
q_2	Deslocamento do pneu 2	[m]
q_3	Deslocamento do pneu 3	[m]
q_4	Deslocamento do pneu 4	[m]
q_5	Deslocamento do pneu 5	[m]
q_6	Deslocamento do pneu 6	[m]
m_p	Massa do assento e do motorista	[kg]
m_c	Massa da cabine	[kg]
m_b	Massa suspensa (chassis do cavalo mecânico)	[kg]
m_1	Massa do primeiro eixo/massa do sistema 1 GDL	[kg]
m_2	Massa do segundo eixo	[kg]
m_3	Massa do terceiro eixo	[kg]
m_4	Massa do quarto eixo	[kg]
m_5	Massa do quinto eixo	[kg]
m_6	Massa do sexto eixo	[kg]
m_e	Massa do eixo equivalente	[kg]
m_t	Massa suspensa do semirreboque	[kg]
J_c	Inércia rotacional da massa cabine	[kg.m ²]
J_b	Inércia rotacional do chassis do cavalo mecânico	[kg.m ²]
J_e	Inércia rotacional da suspensão equivalente	[kg.m ²]
J_t	Inércia rotacional da massa suspensa do semirreboque	[kg.m ²]
k_p	Rigidez do assento	[N/m]
k_f	Rigidez da suspensão frontal da cabine	[N/m]
k_r	Rigidez da suspensão traseira da cabine	[N/m]
k_s	Rigidez da quinta roda	[N/m]
k_1	Rigidez da suspensão frontal do cavalo mecânico/rigidez do modelo de 1 GDL	[N/m]
k_2	Rigidez da suspensão equivalente	[N/m]
k_4	Rigidez da suspensão do quarto eixo	[N/m]
k_5	Rigidez da suspensão do quinto eixo	[N/m]
k_6	Rigidez da suspensão do sexto eixo	[N/m]
k_7	Rigidez do primeiro pneu	[N/m]
k_8	Rigidez do segundo pneu	[N/m]
k_9	Rigidez do terceiro pneu	[N/m]
k_{10}	Rigidez do quarto pneu	[N/m]
k_{11}	Rigidez do quinto pneu	[N/m]
k_{12}	Rigidez do sexto pneu	[N/m]
c_p	Amortecimento do assento	[Ns/m]
c_f	Amortecimento da suspensão frontal da cabine	[Ns/m]

c_r	Amortecimento da suspensão traseira da cabine	[Ns/m]
c_s	Amortecimento da quinta roda	[Ns/m]
c_1	Amortecimento da suspensão do primeiro eixo/Amortecedor do sistema de 1 GDL	[Ns/m]
c_2	Amortecimento da suspensão do segundo eixo	[Ns/m]
c_3	Amortecimento da suspensão do terceiro eixo	[Ns/m]
c_4	Amortecimento da suspensão do quarto eixo	[Ns/m]
c_5	Amortecimento da suspensão do quinto eixo	[Ns/m]
c_6	Amortecimento da suspensão do sexto eixo	[Ns/m]
l_1	Distância entre a suspensão do primeiro eixo e o CG do chassis do cavalo mecânico	[m]
l_2	Distância entre o CG do chasis do cavalo mecânico e o eixo equivalente	[m]
l_3	Distância entre o segundo eixo e o eixo equivalente	[m]
l_4	Distância entre o terceiro eixo e o eixo equivalente	[m]
l_5	Distância entre o CG do chassis do cavalo mecânico e o CG da cabine	[m]
l_6	Distância entre o CG da cabine e a suspensão frontal da cabine	[m]
l_7	Distância entre o CG da cabine e a suspensão traseira da cabine	[m]
l_8	Distância entre o CG da cabine e o assento	[m]
l_9	Distância entre o CG do chassis do cavalo mecânico e a quinta roda	[m]
l_{10}	Distância entre o CG do semirreboque e a quinta roda	[m]
l_{11}	Distância entre o CG do semirreboque e o quinto eixo	[m]
l_{12}	Distância entre o quarto e quinto eixo	[m]
l_{13}	Distância entre o quinto e sexto eixo	[m]
n_{c2}	Índice característico de amortecimento do amortecedor c_2	[-]
n_{c3}	Índice característico de amortecimento do amortecedor c_3	[-]
n_{r1}	Índice característico de amortecimento traseiro da cabine - 1	[-]
n_{r2}	Índice característico de amortecimento traseiro da cabine - 2	[-]
G_d	Densidade espectral de potência do deslocamento	[m ³]
n	Frequência espacial	[ciclos/m]
n_0	Frequência espacial de referência	[ciclos/m]
w	Expoente de forma da PSD	[-]
f_k	Frequência da densidade espectral	[Hz]
Δf_k	Diferencial em frequência da densidade espectral	[Hz]
ne	Número de linhas espectrais	[-]
r	Razão entre frequência natural e frequência de excitação	[-]
Z	Excitação harmônica	[m]
Z_0	Amplitude da excitação harmônica	[m]
VAE	Valor limite de ação	[h]
VLE	Valor limite de exposição	[h]

Símbolos gregos

α_N	Parâmetro do método de Newmark	[-]
β_N	Parâmetro do método de Newmark	[-]
Δt	Passo de tempo	[s]
θ_c	Arfagem do CG da cabine	[rad]
θ_b	Arfagem do CG do chassis do cavalo mecânico	[rad]
θ_e	Arfagem do eixo equivalente	[rad]
θ_t	Arfagem do CG do semirreboque	[rad]
$\dot{\theta}_c$	Velocidade de giro do CG da cabine	[rad/s]
$\dot{\theta}_b$	Velocidade de giro do CG do chassis do cavalo mecânico	[rad/s]
$\dot{\theta}_e$	Velocidade de giro do eixo equivalente	[rad/s]
$\dot{\theta}_t$	Velocidade de giro do CG do semirreboque	[rad/s]
$\ddot{\theta}_c$	Aceleração do giro do CG da cabine	[rad/s ²]
$\ddot{\theta}_b$	Aceleração do giro do CG do chassis	[rad/s ²]
$\ddot{\theta}_e$	Aceleração do giro do eixo equivalente	[rad/s ²]
$\ddot{\theta}_t$	Aceleração do giro do CG do semirreboque	[rad/s ²]
λ_{c2}	Fator de escala do amortecedor c_2	[-]
λ_{c3}	Fator de escala do amortecedor c_3	[-]
λ_{r1}	Fator de escala do amortecedor traseiro da cabine - 1	[-]
λ_{r2}	Fator de escala do amortecedor traseiro da cabine - 2	[-]
η_{c2}	Coeficiente de assimetria do amortecedor c_2	[-]
η_{c3}	Coeficiente de assimetria do amortecedor c_3	[-]
η_{r1}	Coeficiente de assimetria do amortecedor traseiro da cabine - 1	[-]
η_{r2}	Coeficiente de assimetria do amortecedor traseiro da cabine - 2	[-]
α	Ângulo de instalação da cabine – 1	[rad]
β	Ângulo de instalação da cabine - 2	[rad]
φ_k	Ângulo de fase do método de Shinozuka	[rad]
ω	Frequência angular	[rad/s]
χ	Amplitude do deslocamento	[m]
γ	Ângulo de fase para o deslocamento	[rad]
ζ	Razão de amortecimento	[-]

Abreviaturas e acrônimos

CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CNT	Confederação Nacional do Transporte
FC	Fator de crista
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
GDL	Grau de liberdade
ISO	International Organization for Standardization
NHO	Norma de Higiene Ocupacional
NR	Norma regulamentadora
PSO	Particle swarm optimization

RMS
VCI

Root mean square
Vibração de corpo inteiro

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
EPIGRAFE	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
NOMENCLATURA.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Motivação	1
1.3 Revisão bibliográfica	1
1.3.1 Dinâmica veicular	1
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo geral	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Equação dinâmica do movimento.....	2
2.2 Integração numérica das equações de movimento.....	3
2.2.1 Método de Newmark	3
2.3 Normas.....	3
2.3.1 Normas de avaliação ocupacional	3
3 METODOLOGIA	7
3.1 Modelo multicorpo de um semirreboque.....	7
3.1.1 Não linearidades na suspensão da cabine e chassis	8
3.2 Considerações e hipóteses do modelo	9
3.3 Formulação das pistas para análise numérica	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
4.1 Validação da rotina desenvolvida para o Método de Newmark	11
4.2 Validação dos perfis de estradas gerados	12
4.3 Comparação entre os modelos multicorpos com não linearidades	13
4.4 Avaliação numérica das condições ocupacionais segundo diferentes classes de pistas .	13
5 CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXO	17
APÊNDICE	19

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Em um país com uma rede de transportes estruturada sobre cinco modais, porém com participação majoritária do modal rodoviário, como é o caso do Brasil, torna-se essencial uma infraestrutura rodoviária adequada. Dados apresentados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) indicam que aproximadamente 61% das movimentações de cargas dependem do modal rodoviário, no entanto, conforme estudo da CNT (2021), 78,5% das rodovias brasileiras não apresentam pavimentação e 61,9% exibem alguma irregularidade no seu estado geral (pavimento, sinalização e geometria).

A partir desse contexto, uma série de consequências indesejáveis pode surgir, as quais implicam em maiores custos com manutenção de frota, atrasos em entregas e mesmo problemas relacionados a doenças ocupacionais de motoristas de veículos de carga. De acordo com Robb e Mansfield (2007) foram observados fortes indícios entre doenças de natureza musculoesqueléticas e a atividade laboral de motoristas de caminhões, devido a vibrações de corpo inteiro (VCI), em um estudo que envolveu 192 pessoas. Além de doenças relacionadas ao sistema nervoso, Brüel e Kjaer (1989) indicaram possíveis modificações no sistema circulatório e problemas no sistema urológico, os quais podem ser desenvolvidos de acordo com a magnitude e o tempo de exposição à Vibração de Corpo Inteiro (VCI).

1.2 Motivação

A presença de vibrações no âmbito ocupacional, e mais precisamente de VCI em trabalhadores da área de transporte de cargas tende a produzir lesões agudas conforme verificou Kim et al (2016) e dependendo do tempo de exposição problemas crônicos. Segundo Griffin (1990), a exposição à VCI pode gerar uma série de problemas fisiológicos que envolvem alterações cardiovasculares, respiratórias, endócrinas, metabólicas, sensoriais e esqueléticas, as quais sofrem influências de predisposições humanas. Adicionalmente, dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI) indicaram investimentos na ordem de 0.4% do PIB em 2021, sendo necessários 2% do PIB para atender as demandas de infraestrutura segundo estudos da CNI (2022) apresentados na Figura A.1 do Anexo.

Essa redução contínua nos investimentos em infraestrutura, e o potencial dano a saúde resultante de uma jornada média de 11,5 horas diárias, deslocamento médio mensal de 8.561,3 km e tempo de profissão de 18,8 anos conforme a CNT (2019) fazem dessa ocupação um problema de saúde pública. Assim, este trabalho irá desenvolver uma análise numérica sobre o fenômeno da vibração com foco na saúde e conforto de motoristas de veículos de carga.

1.3 Revisão bibliográfica

1.3.1 Dinâmica veicular

No campo da Dinâmica de Veículos, diversos modelos lineares vêm sendo desenvolvidos, seja pela sua simplicidade, como também pela sua capacidade de fornecer resultados significativos. Drehmer (2012) propôs a modelagem de dois modelos veiculares com dois e oito graus de liberdade (GDL), a fim de otimizar a aceleração transmitida ao motorista considerando o algoritmo de enxame de partículas (PSO). Os resultados obtidos com a otimização da rigidez e amortecimento permitiram reduzir em até 35,3% a aceleração vertical RMS. Guo e Zhang (2017) estudaram diferentes métodos numéricos de integração para resolução de equações para modelos veiculares com parâmetros lineares e diferentes GDL, a fim de verificar o ganho com conforto veicular.

Alternativamente, Chen et al (2020) desenvolveram um modelo dinâmico bidimensional para um caminhão de 6 eixos e 13 graus de liberdade (GDL) com o propósito de analisar não linearidades da suspensão. Considerando o algoritmo genético (GA) na otimização de 17 variáveis de projeto, os autores conseguiram reduzir a aceleração vertical RMS do assento do motorista, o curso da suspensão dianteira e traseira em 19,7%, 17,8% e 12%, respectivamente. Utilizando como referência o modelo dinâmico anterior, Flores (2021) realizou um estudo para avaliar o nível de aceleração no assento do motorista e no CG da cabine do cavalo mecânico considerando uma pista de classe A. Os resultados indicaram que o modelo linear apresenta nível de aceleração conservativos se comparado com o modelo não linear de suspensão.

Com uma proposta experimental, Picoral Filho (2018) desenvolveu uma análise voltada a identificar as intensidades e frequências de vibrações em cabines de diferentes caminhões a fim de inferir o grau de conforto dos motoristas dos veículos de carga. Através de medições nas três direções, com a posterior obtenção dos valores de aceleração resultante de exposição normalizada ($A_{(8)}$) e valor de dose de vibração (VDV), observou-se a forte dependência do sistema de suspensão, velocidade de tráfego e tipo de pavimento.

Kim et al (2015) desenvolveram um trabalho mais abrangente que o anterior, além de considerar diferentes tipos de pavimento e modelos de caminhões, também consideraram tipos de assentos, ano de fabricação do veículo e o fator humano através de um grupo de 98 motoristas. Os resultados comparados com a norma ISO 2631-1:1997 e a diretiva Europeia 2002/44/EC mostraram que um tipo de assento apresentou um valor de aceleração resultante de exposição normalizada ($A_{(8)}$) 24% superior ao outro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho visa analisar numericamente o modelo dinâmico bidimensional de um caminhão com 13 GDL, a fim de avaliar as condições ocupacionais, ou seja, saúde e conforto segundo critérios normativos.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Avaliação das condições ocupacionais para diferentes classes de pista, baseando-se nas normas ISO 2631:1997, NHO-09:2013 e ISO 8608:2016;
- b) Determinar a duração das jornadas de trabalho para os casos estudados segundo recomendações normativas de exposição segura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Equação dinâmica do movimento

Segundo Inmann (2014), o número de GDL de um sistema indica a quantidade mínima de coordenadas necessárias para descrever a posição das massas para qualquer instante.

Para um sistema com múltiplos graus de liberdade, torna-se fundamental no tratamento numérico a escrita na forma matricial das equações do movimento obtidas através da 2ª Lei de Newton conforme propõe a Equação 1:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

onde \mathbf{M} representa a matriz de massa (kg), diagonal, quadrada com dimensão proporcional ao número de GDL. Já as matrizes \mathbf{C} e \mathbf{K} , compreendem o amortecimento (Ns/m) e a rigidez do sistema (N/m), ou seja, o termo dissipativo e potencial elástico, respectivamente.

2.2 Integração numérica das equações de movimento

De acordo com Toledo (1983), os métodos de integração direta compreendem uma técnica, a qual não exige antecipadamente transformações no sistema de equações de equilíbrio dinâmico, diferentemente do que ocorre com o método de superposição modal. Eles podem se dividir em métodos de integração implícitos e explícitos. Os métodos explícitos baseiam-se na equação do movimento no instante t atual para calcular o valor em um instante posterior $t + \Delta t$, enquanto os métodos implícitos utilizam a informação tanto no tempo atual, quanto no posterior. O método de Newmark representa um dos principais métodos implícitos, e será utilizado para obtenção da resposta dinâmica no modelo estudado.

2.2.1 Método de Newmark

Segundo Rao (2018), o método de Newmark baseia-se na hipótese de que a aceleração varia de forma linear entre dois instantes de tempo. Esse método utiliza os parâmetros α_N e β_N , que indicam qual a influência da aceleração na equação do movimento para posição e velocidade em um dado intervalo de tempo Δt .

As equações que descrevem o movimento para um tempo t_{i+1} na forma vetorial para deslocamento, velocidade e aceleração, podem ser verificadas a partir das Equações 2, 3, 4, respectivamente:

$$\mathbf{x}(t_{i+1}) = (\mathbf{a}_0 \mathbf{M} + \mathbf{a}_5 \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F}(t_{i+1}) + \mathbf{M} [a_0 \mathbf{x}(t_i) + a_1 \dot{\mathbf{x}}(t_i) + a_2 \ddot{\mathbf{x}}(t_i)] + \\ \mathbf{C} [a_5 \mathbf{x}(t_i) + a_6 \dot{\mathbf{x}}(t_i) + a_7 \ddot{\mathbf{x}}(t_i)] \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t_{i+1}) = \dot{\mathbf{x}}(t_i) + \Delta t(1 - \beta) \ddot{\mathbf{x}}(t_i) + \Delta t \beta \ddot{\mathbf{x}}(t_{i+1}) \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}(t_{i+1}) = a_0 [\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)] - a_1 \dot{\mathbf{x}}(t_i) - a_2 \ddot{\mathbf{x}}(t_i) \quad (4)$$

onde as constantes a_0, a_1, a_2, a_5, a_6 e a_7 das equações anteriores são apresentadas na Equação 5:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha_N \Delta t^2}; a_1 = \frac{1}{\alpha_N \Delta t}; a_2 = \left(\frac{1}{2\alpha_N} - 1 \right); a_5 = \frac{\beta_N}{\alpha_N \Delta t}; a_6 = \left(\frac{\beta_N}{\alpha_N} - 1 \right); a_7 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\beta_N}{\alpha_N} - 2 \right) \quad (5)$$

2.3 Normas

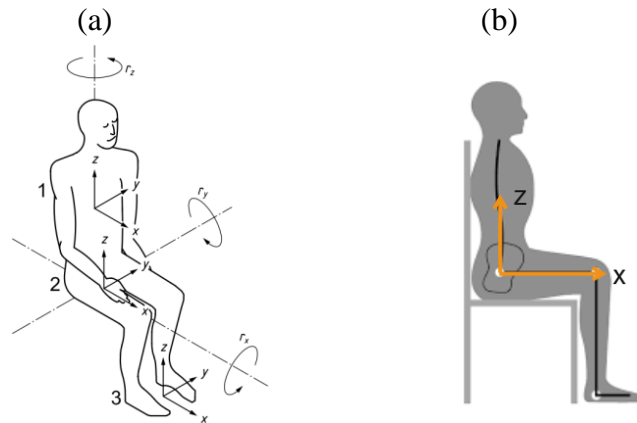
A avaliação da dinâmica veicular quanto a influência nas condições ocupacionais (saúde e conforto) passam essencialmente pela análise de uma série de normas pertinentes. Para avaliação das condições impostas ao trabalhador, a ISO 2631-1 e a NHO-09 definem métodos de aferição e limites de exposição frente as acelerações desenvolvidas, respectivamente. A seguir será apresentado o tratamento adotado por essas normas de avaliação ocupacional à VCI.

2.3.1 Normas de avaliação ocupacional

A norma ISO 2631-1 (1997) que trata de vibrações mecânicas e choques, tem como objetivo principal a quantificação da VCI por meio da aferição das acelerações segundo o seu

respectivo efeito sobre saúde, conforto e percepção, e mal do movimento (*motion sickness*). Essa norma primeiramente define um conjunto de eixos ortogonais com posições associadas a diferentes pontos de entrada de VCI. A Figura 1 mostra a disposição dos eixos para o caso geral de avaliação tridimensional de uma pessoa sentada, bem como, a representação bidimensional.

Figura 1 – Convenção dos eixos para uma pessoa em posição sentada. (a) ISO 2631-1:1997, (b) Bidimensional adotada no trabalho.



A norma em questão, considera acelerações com frequências em um intervalo de 0,5 a 80 Hz, com exceção do caso particular para mal do movimento (entre 0,1 e 0,5 Hz) para avaliar VCI. Seu método consiste em ponderar as acelerações medidas para cada eixo ortogonal em função da frequência associada ao movimento. Essa ideia está intimamente relacionada a complexidade do corpo humano, o qual pode ser idealizado como um sistema de múltiplos GDL e conseqüentemente, composto de diversas frequências naturais, conforme abordou Chaffin (1999).

A Equação 6 apresenta o método básico de avaliação da aceleração RMS ponderada (a_w) proposto pela norma:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{wj}^2(t) dt} \quad (6)$$

onde a_{wj} compreende a aceleração instantânea ponderada pela frequência (m/s^2) e T indica o tempo decorrido da medição (s).

Os fatores de ponderação em frequência (W) são convencionados de acordo com a posição do ser humano, e também de acordo com o tipo de efeito a ser analisado (saúde, conforto e percepção, mal do movimento). Para estudo em dinâmica veicular de uma pessoa sentada, são utilizados os fatores W_k relacionado com o eixo z, e W_d para os eixos x e y independente do efeito estudado. A Figura 2 permite observar esses fatores de ponderação em frequência.

A norma ainda sugere dois métodos adicionais em função do valor do Fator de Crista (FC), o qual relaciona o módulo da razão entre o valor instantâneo máximo da aceleração e o valor de aceleração RMS com ambas ponderadas em frequência. A Equação 7 apresenta o conceito do FC:

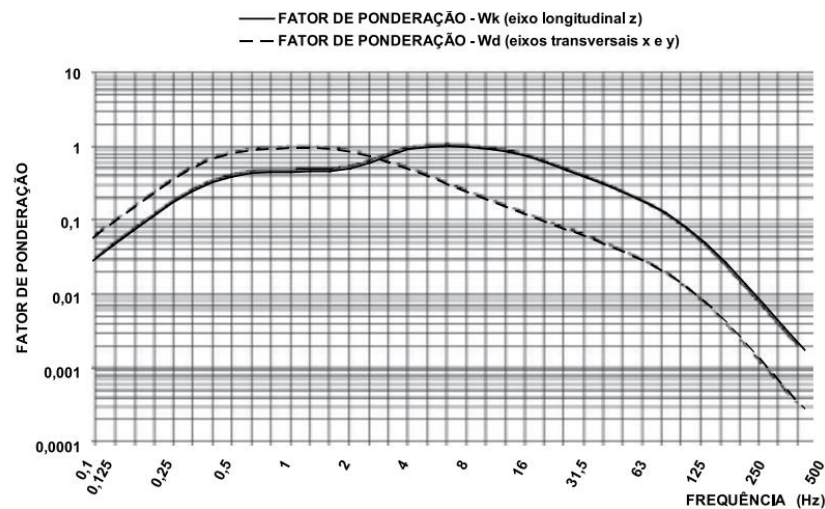
$$FC = \frac{|\max(a_w(t))|}{a_{w_rms}(t)} \quad (7)$$

Para FC maior que 9, ou situações de choques ocasionais e mesmo vibrações transientes utiliza-se o método *Running RMS* (m/s^2) ou o método de Valor da Dose de Vibração (VDV) ($m/s^{1,75}$), sendo este último mais difundido por normas complementares e trabalhos científicos. A seguir, a Equação 8 apresenta a sua definição:

$$VDV_j = \sqrt[4]{\int_0^T [a_{wj}(t)]^4 dt} \quad (8)$$

Esse método é muito empregado devido a sua sensibilidade aos picos de aceleração, resultantes da consideração de uma função de quarta potência.

Figura 2 – Fatores de ponderação conforme ISO 2631-1:1997



Fonte: NHO-09:2013.

Além do fator de ponderação, a norma propõe um fator multiplicador (k) que pondera as componentes de aceleração em cada um dos eixos ortogonais de acordo com a sua implicação no ser humano. Ainda, o fator k é dependente do efeito ocupacional avaliado, sendo a sua utilização fundamental na determinação da aceleração resultante da exposição (are). A Equação 9 apresenta a definição dessa aceleração:

$$are = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (9)$$

onde a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} representam a aceleração RMS ponderada (m/s^2) e k_x , k_y , k_z o fator multiplicador, ambos nas direções dos eixos ortogonais x, y e z, respectivamente.

Para avaliação dos níveis de aceleração submetidos ao trabalhador em relação ao quesito saúde, será seguida as orientações da Norma de Higiene Ocupacional (NHO) proposta pela FUNDACENTRO. Mais especificamente, a NHO-09 (2013) que propõe uma metodologia e limites de exposição para VCI fundamentados nos conceitos da ISO 2631-1.

De forma conservativa, a NHO-09 (2013) propõe a aferição da VCI a partir da determinação de dois parâmetros independente do FC. Esses valores representam a aceleração resultante da exposição normalizada ($aren$) (m/s^2) e o valor de dose de vibração resultante (VDVR) ($m/s^{1,75}$), como propunha a avaliação básica e adicional da ISO 2631-1. A Equação 10 e a Equação 11 apresentam esses parâmetros:

$$aren = are \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (10)$$

$$VDVR = \left[\sum_j (VDV_{exp_j})^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

onde *are* é a aceleração resultante da exposição (m/s²) para diversas componentes de exposição e ponderada para todos os eixos ortogonais, *T* o tempo da jornada diária (h), *T*₀ a jornada de referência (8 h), já *VDV*_{exp_j} compreende o valor de dose de vibração da exposição (m/s^{1.75}) para todos os eixos ortogonais.

A NHO-09 define dois patamares de ação de acordo com a magnitude da aceleração aferida. O nível de ação que define uma referência para adoção de medidas preventivas capazes de minimizar possíveis danos à saúde do trabalhador, e o limite de exposição ocupacional que orienta a aplicação de medidas corretivas capazes de eliminar potenciais danos à saúde do trabalhador. Na Tabela 1, pode-se observar os limites definidos pela NHO:

Tabela 1 – Parâmetros de referência para aceleração ponderada segundo a NHO-09

	<i>aren</i> (m/s ²)	VDVR (m/s ^{1.75})
Nível de ação	0,5	9,1
Limite de exposição	1,1	21

Fonte: NHO-09:2013

Alternativamente, a ISO 2631-1 (1997) define uma relação entre o valor de aceleração ponderada RMS e o tempo de exposição diária. Através dessa associação e considerando os limites da Tabela 1 para o *aren*, pode-se definir o Valor limite de ação (VAE) e o Valor limite de Exposição (VLE) como os limites para medidas preventivas e corretivas, respectivamente. A Equação 12 mostra a relação considerada pela norma.

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/2} = a_{w2} \cdot T_2^{1/2} \quad (12)$$

Para conforto e percepção, a norma ISO 2631-1 apresenta alguns valores de referência para determinação da satisfação de pessoas submetidas à VCI. Como consta na norma, a noção de satisfação envolve diversos critérios e muitos deles subjetivos, os quais envolvem o tipo de atividade e mesmo fatores externos como ruído e calor. Na Tabela 2 são apresentados valores de aceleração com as respectivas percepções associadas:

Tabela 2 – Percepção humana de conforto segundo a ISO 2631-1

Conforto ISO 2631-1 (1997)	Aceleração (<i>a_{w,RMS}</i>) [m/s ²]
Confortável	< 0,315
Levemente Confortável	0,63
Pouco Desconfortável	1
Desconfortável	1,6
Muito Desconfortável	2,5
Extremamente Desconfortável	> 2,5

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo multicorpo de um semirreboque

A análise apresentada neste trabalho baseia-se no modelo proposto inicialmente por Chen et al (2020). O modelo de meio veículo é composto por um cavalo mecânico e um semirreboque com um total de seis eixos e representado por um total de 13 GDL (nove deles para movimento vertical e quatro para arfagem). A Figura 3 apresenta o modelo em questão com a representação de todos os elementos inerciais, elásticos e dissipativos.

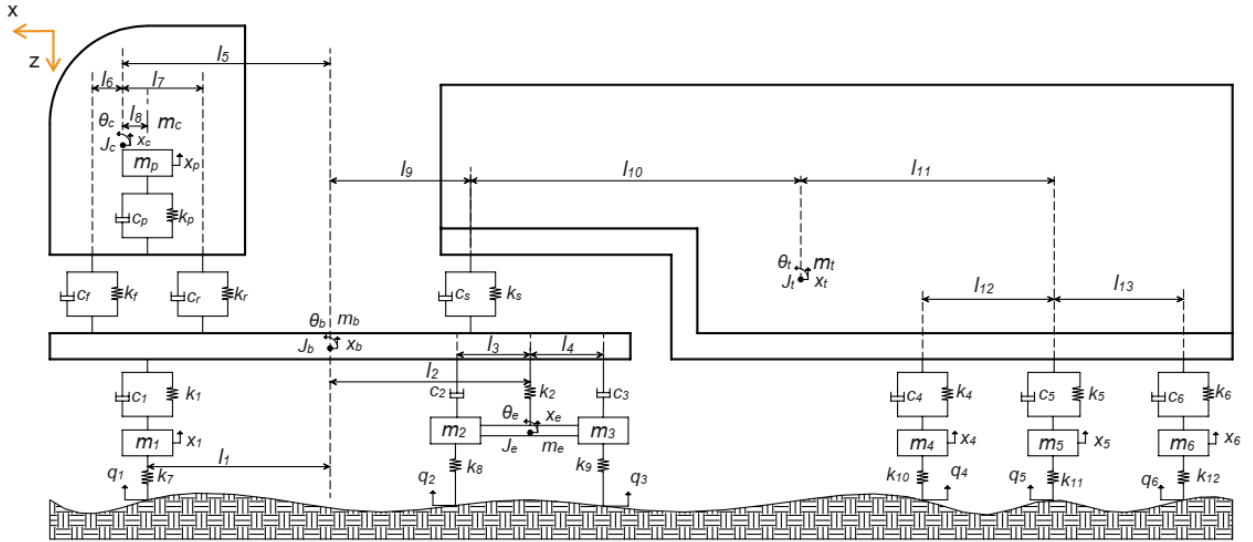


Figura 3 – Modelo de um veículo de carga com parâmetros não lineares na suspensão.

Fonte: Adaptado de CHEN (2020).

Pela figura anterior, nota-se que a suspensão traseira do cavalo mecânico é idealizada a fim de garantir a influência entre os amortecedores com diferentes velocidades e sujeitos a irregularidades das pistas de forma não solidária, como ocorre em diversos veículos comerciais. Os valores dos parâmetros que constituem o modelo pode ser verificado na Tabela A.1 do Anexo. Na Equação 13 é apresentado o vetor com todos os GDL do sistema.

$$x = \left(x_p, x_c, \theta_c, x_b, \theta_b, x_1, x_e, \theta_e, x_t, \theta_t, x_4, x_5, x_6 \right)^T \quad (13)$$

A seguir, temos as equações do movimento, em especial, são apresentados nas Equações 14 à 19 os GDL associado aos termos com forças não lineares que estão relacionados com a cabine, chassi e eixo equivalente, para movimento vertical e de arfagem, respectivamente. As demais equações podem ser verificadas no Anexo.

$$m_c \ddot{x}_c = k_p (x_p - x_c - l_8 \theta_c) + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_c - l_8 \dot{\theta}_c) - k_f (x_c - x_b - l_6 \theta_c + (l_5 + l_6) \theta_b) - c_f (\dot{x}_c - \dot{x}_b - l_6 \dot{\theta}_c + (l_5 + l_6) \dot{\theta}_b) - k_r (x_c - x_b + l_7 \theta_c + (l_5 - l_7) \theta_b) - F_{rci} \quad (14)$$

$$J_c \ddot{\theta}_c = \left(k_f (x_c - x_b - l_6 \theta_c + (l_5 + l_6) \theta_b) + c_f (\dot{x}_c - \dot{x}_b - l_6 \dot{\theta}_c + (l_5 + l_6) \dot{\theta}_b) \right) l_6 + \left(k_p (x_p - x_c - l_8 \theta_c) + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_c - l_8 \dot{\theta}_c) \right) l_8 - \left(k_r (x_c - x_b + l_7 \theta_c + (l_5 - l_7) \theta_b) + F_{rci} \right) l_7 \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
m_b \ddot{x}_b &= k_f (x_c - x_b - l_6 \theta_c + (l_5 + l_6) \theta_b) + c_f (\dot{x}_c - \dot{x}_b - l_6 \dot{\theta}_c + (l_5 + l_6) \dot{\theta}_b) \\
&+ k_r (x_c - x_b + l_7 \theta_c + (l_5 - l_7) \theta_b) + k_s (x_t - x_b - l_{10} \theta_t - l_9 \theta_b) + c_s (\dot{x}_t - \dot{x}_b - l_{10} \dot{\theta}_t - l_9 \dot{\theta}_b) \\
&- k_1 (x_b - x_1 - l_1 \theta_b) - c_1 (\dot{x}_b - \dot{x}_1 - l_1 \dot{\theta}_b) - k_2 (x_b - x_e + l_2 \theta_b) + F_{rci} - F_{c2} - F_{c3}
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
J_b \ddot{\theta}_b &= (k_1 (x_b - x_1 - l_1 \theta_b) + c_1 (\dot{x}_b - \dot{x}_1 - l_1 \dot{\theta}_b)) l_1 \\
&+ (k_s (x_t - x_b - l_{10} \theta_t - l_9 \theta_b) + c_s (\dot{x}_t - \dot{x}_b - l_{10} \dot{\theta}_t - l_9 \dot{\theta}_b)) l_9 \\
&- (k_f (x_c - x_b - l_6 \theta_c + (l_5 + l_6) \theta_b) + c_f (\dot{x}_c - \dot{x}_b - l_6 \dot{\theta}_c + (l_5 + l_6) \dot{\theta}_b)) (l_5 + l_6) \\
&- (k_r (x_c - x_b + l_7 \theta_c + (l_5 - l_7) \theta_b) + F_{rci}) (l_5 - l_7) \\
&- k_2 (x_b - x_e + l_2 \theta_b) l_2 - F_{c2} (l_2 - l_3) - F_{c3} (l_2 - l_4)
\end{aligned} \tag{17}$$

$$m_e \ddot{x}_e = k_2 (x_b - x_e + l_2 \theta_b) + F_{c2} + F_{c3} - k_8 (x_e - q_2 - l_3 \theta_e) - k_9 (x_e - q_3 + l_4 \theta_e) \tag{18}$$

$$J_e \ddot{\theta}_e = k_8 (x_e - q_2 - l_3 \theta_e) l_3 + F_{c3} l_4 - k_9 (x_e - q_3 + l_4 \theta_e) l_4 - F_{c2} l_3 \tag{19}$$

3.1.1 Não linearidades na suspensão da cabine e chassis

Como mencionado na seção anterior, as não linearidades associadas a suspensão traseira do cavalo mecânico tentam representar as forças geradas no chassis pela velocidade relativa entre o segundo e o terceiro eixo resultante da excitação da estrada e a inércia rotacional do conjunto conforme é apresentado na Figura 4. Estudos experimentais já demonstraram a não linearidade entre a velocidade e a força de amortecimento, logo o trabalho considerará o equacionamento de Chen et al (2020) para aferir a influência da força de amortecimento no chassi do veículo sobre condições ocupacionais. As Equações 20 e 21 apresentam a formulação dessas forças para os amortecedores c_2 e c_3 , os valores dos parâmetros característicos encontram-se na Tabela A1 do ANEXO.

Figura 4 – Suspensão de um típico veículo de carga comercial.



Fonte: For Construction Pros (2021)

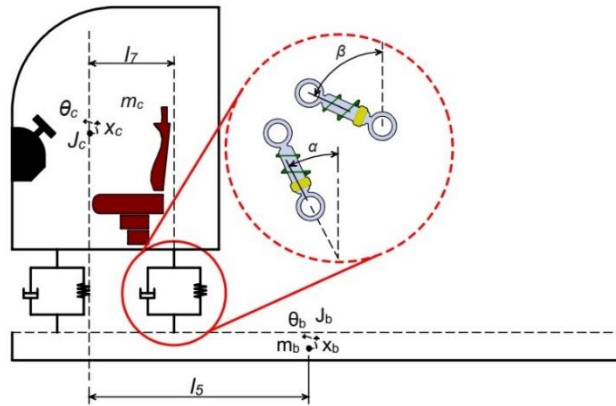
$$F_{c2} = \lambda_{c2} \left[1 + \eta_{c2} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_e + l_2 \dot{\theta}_b + l_3 \dot{\theta}_e) \right] \cdot |\dot{x}_b - \dot{x}_e + l_2 \dot{\theta}_b + l_3 \dot{\theta}_e|^{n_{c2}} \tag{20}$$

$$F_{c3} = \lambda_{c3} \left[1 + \eta_{c3} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_e + l_2 \dot{\theta}_b - l_4 \dot{\theta}_e) \right] \cdot |\dot{x}_b - \dot{x}_e + l_2 \dot{\theta}_b - l_4 \dot{\theta}_e|^{n_{c3}} \tag{21}$$

onde λ compreende o fator de escala, η o coeficiente de assimetria e n o índice característico de amortecimento.

Consecutivamente, para garantir maior fidelidade com a situação real, o modelo considerará a disposição dos amortecedores traseiros da cabine. A Figura 5 identifica de forma mais objetiva essa característica, como também pela Equação 22 temos a formulação das forças de amortecimento desse elemento do modelo:

Figura 5 – Modelo esquemático da suspensão traseira da cabine do cavalo mecânico.



Fonte: O Autor

$$\begin{aligned}
 F_{rci} = & \lambda_{r1} \left[1 + \eta_{r1} \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{\dot{x}_c - \dot{x}_b + l_7 \dot{\theta}_c - (l_5 - l_7) \dot{\theta}_b}{\cos \alpha} \right) \right] \left| \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_b + l_7 \dot{\theta}_c - (l_5 - l_7) \dot{\theta}_b}{\cos \alpha} \right|^{n_{r1}} \cos \alpha \\
 & + \lambda_{r2} \left[1 + \eta_{r2} \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{\dot{x}_c - \dot{x}_b + l_7 \dot{\theta}_c - (l_5 - l_7) \dot{\theta}_b}{\cos \beta} \right) \right] \left| \frac{\dot{x}_c - \dot{x}_b + l_7 \dot{\theta}_c - (l_5 - l_7) \dot{\theta}_b}{\cos \alpha} \right|^{n_{r2}} \cos \beta
 \end{aligned} \quad (22)$$

3.2 Considerações e hipóteses do modelo

Por mais que o modelo tente ser abrangente e representativo de condições reais, ele não está isento de simplificações físicas e matemáticas. Assim, torna-se essencial a apresentação dessas particularidades a fim de definir a abrangência do estudo e sua aplicabilidade com casos reais. As considerações são as seguintes:

- 1) o veículo desloca-se em trajetória retilínea;
- 2) a modelagem não prevê descolamento do pneu em relação a estrada;
- 3) o contato pneu-estrada dá-se de forma pontual;
- 4) os movimentos de guinada e rolagem são desconsiderados;
- 5) as condições ocupacionais são aferidas através das acelerações exclusivamente no assento do motorista;
- 6) considera-se uma jornada diária de 11,5 h conforme dados da CNT (2019).

3.3 Formulação das pistas para análise numérica

A análise de dinâmica veicular passa essencialmente pela definição do perfil da pista, uma vez que, as irregularidades possuem caráter mandatório no conforto veicular. A norma ISO 8608 (2016) representa a principal referência na modelagem e normatização das irregularidades presentes em estradas.

Essa norma utiliza a função de densidade espectral de potência (PSD, *Power Spectral Density*) para reconstruir o sinal representativo do perfil da estrada. Essa modelagem ocorre como um processo estocástico que relaciona a PSD do deslocamento a determinado número de

onda. A Equação 23 apresenta a definição da função densidade espectral de potência para o deslocamento:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (23)$$

onde $G_d(n_0)$ é o grau de rugosidade representado pelo valor médio do PSD do deslocamento (m^3) de determinada classe de pista, n_0 a frequência espacial de referência (ciclos/m) com valor de referência igual a 0,1 ciclos/m, e w expoente de forma da PSD com valor igual 2 assumindo velocidade constante.

Essa norma classifica as pistas em classes de A até H, sendo as classes de A até D para pistas asfaltadas, e as demais para pistas sem pavimentação, sendo a severidade dada em ordem alfabética crescente. Para este trabalho são consideradas as classes de pista A, B, C, D e E.

A geração das pistas para os diferentes perfis em função do tempo é obtido considerando o método proposto por Shinozuka e Jan (1972), o qual permite a soma de respostas estocásticas correspondentes a cada componente de frequência constante da PSD. A Equação 24 representa a forma para a obtenção do perfil da estrada pela associação entre as diversas linhas espectrais, e as respectivas PSD de deslocamento:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{ne} \sqrt{2G_d(f_k)\Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (24)$$

sendo ne o número de linhas espectrais considerado, o φ ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π , f_k as frequências da densidade espectral e Δf_k a variação das frequências da densidade espectral.

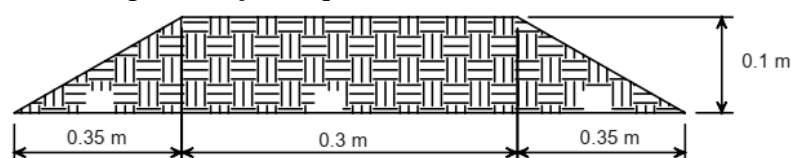
A saúde e o conforto ao qual é submetido o motorista está intimamente relacionada a velocidade de tráfego, no entanto, considerar uma única velocidade ou diferentes magnitudes para simulação em diferentes pistas não são representativas da realidade. Portanto, considerando as recomendações de MÚČKA (2018) e usando as restrições normativas da Lei 9.503 (1997) que institui o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) são apresentadas na Tabela 3 as condições analisadas que são definidas em função de uma determinada classe de pista e uma velocidade para análise do modelo.

Tabela 3 – Velocidade de tráfego segundo MÚČKA (2018)

Condição	Classe	Velocidade de tráfego [km/h]
1	Classe A	90
2	Classe B	90
3	Classe C	60
4	Classe D	15
5	Classe E	15

Além da modelagem das pistas de acordo com a norma, o estudo da dinâmica vertical do modelo numérico levará em consideração a aceleração vertical produzida por uma lombada de dimensões conforme Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática da lombada analisada.



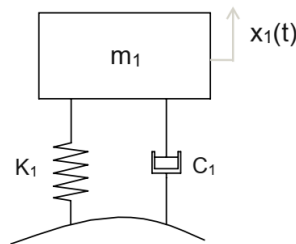
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação da rotina desenvolvida para o Método de Newmark

A verificação do método de Newmark baseou-se na análise comparativa de um problema com solução analítica. Em particular, avaliou-se um sistema massa-mola-amortecedor de 1 GDL submetido a uma excitação harmônica. Na Equação 25, pode-se observar o deslocamento adotado, bem como na Figura 7 a representação do sistema estudado:

$$Z = Z_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (25)$$

Figura 7 – Sistema de 1 GDL.



Pela sua simplicidade, o sistema em questão apresenta solução analítica o que permite validar o resultado numérico. Na Equação 26 temos a equação do movimento que descreve esse tipo de sistema, da mesma forma que, na Equação 27 a solução analítica do mesmo:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c \cdot \omega \cdot Z_0 \cdot \cos(\omega t) + k \cdot Z_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (26)$$

$$x(t) = \chi \cdot \text{sen}(\omega t - \gamma) \quad (27)$$

onde χ e γ são constantes obtidas através das Equações 28 e 29:

$$\chi = Z_0 \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (28)$$

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2\zeta r^3}{1 + (4\zeta^2 - 1)r^2} \right) \quad (29)$$

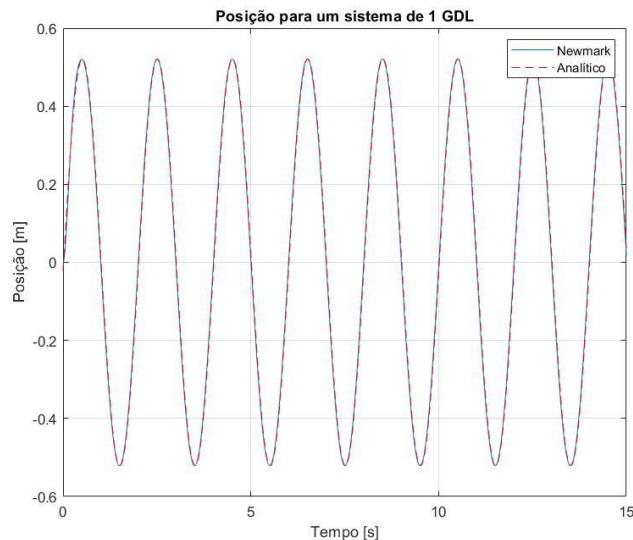
onde r representa a razão entre a frequência natural do sistema e a frequência de excitação do sistema, ζ compreende a razão de amortecimento do sistema. Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros considerados para o modelo.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema de 1 GDL.

Parâmetro	Valor
Z_0 [m]	0,5
ω [rad/s]	3,14
m_I [kg]	1200
k_I [N/m]	280000
ζ	0,5
$c_1 = 2\zeta\sqrt{k_1 m_1}$ [Ns/m]	18330,30

A Figura 8 apresenta a solução do sistema para as duas abordagens. A solução por Newmark considerou α_N e β_N iguais a 0,25 e 0,5, respectivamente. Nota-se que as soluções se sobrepõem o que indica a efetividade da rotina implementada.

Figura 8 – Comparativo das soluções analítica e pelo Método de Newmark.



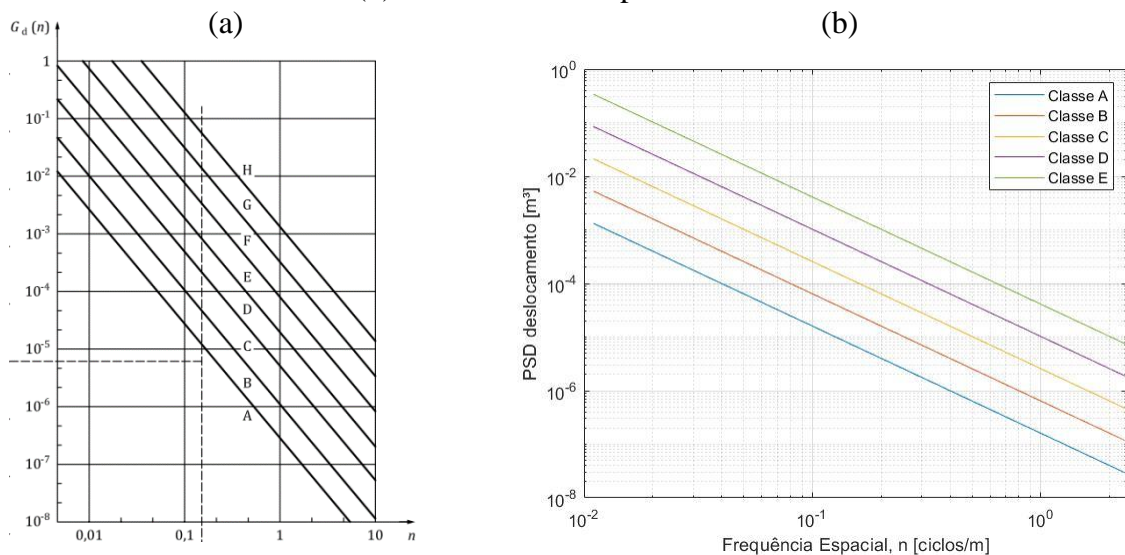
4.2 Validação dos perfis de estradas gerados

Como apresentado na subseção 3.3, a norma ISO 8608 (2016) busca representar as irregularidades das pistas a partir de uma função de densidade espectral de potência. A fim de verificar o código implementado em MATLAB, a Figura 9 apresenta um gráfico em escala logarítmica que relaciona a densidade espectral de potência com a frequência espacial considerando o coeficiente de ajuste (w) igual a 2 para as 5 classes de pista analisadas.

Comparando graficamente os valores obtidos através da avaliação numérica com os valores da norma pode-se verificar a similaridade das retas. Essencialmente a diferença consta do intervalo de frequência espacial considerado que vai de 0,01 até 2,83 [ciclos/m] conforme indica a norma.

Na Figura A.1 do Apêndice, pode-se verificar os perfis das estradas gerados no domínio do tempo.

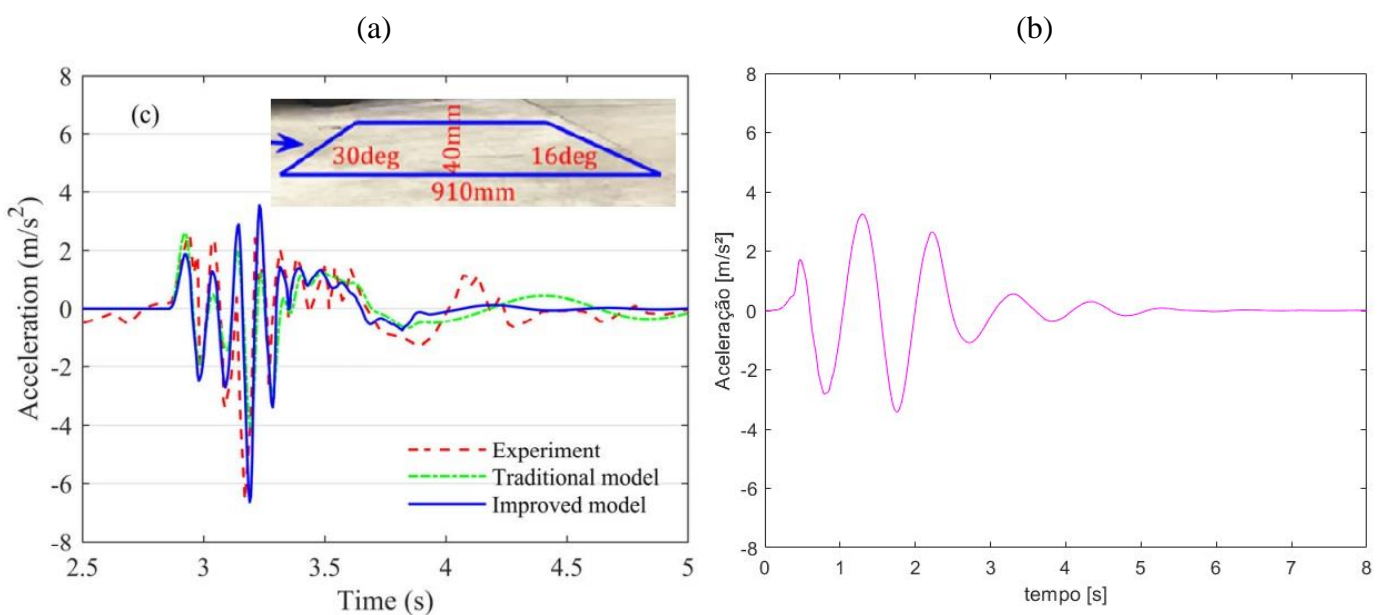
Figura 9 – Densidade Espectral de Potência dos perfis de pistas. (a) Valor da ISO 8608:2016. (b) Valor da PSD implementados.



4.3 Comparação entre os modelos multicorpos com não linearidades

A fim de comparar a resposta dinâmica entre o modelo proposto por Chen et. al (2020) e o implementado neste trabalho são comparados os níveis de aceleração no assento do motorista. A análise baseia-se em considerar uma pista de classe C da norma ISO 8608 (2016) e velocidade constante de 50 [km/h]. Qualitativamente, a partir da Figura 10 verifica-se a semelhança entre os resultados obtidos que diferem essencialmente pelo tempo de amortecimento, no entanto, o autor apenas fornece os parâmetros de um dos amortecedores traseiros da cabine, por simplicidade, adota-se os mesmos parâmetros para o outro, sendo α igual a 10° e β é assumido como sendo 80° .

Figura 10 – Aceleração do assento do motorista. (a) Chen et. al (2020); (b) Modelo dinâmico implementado



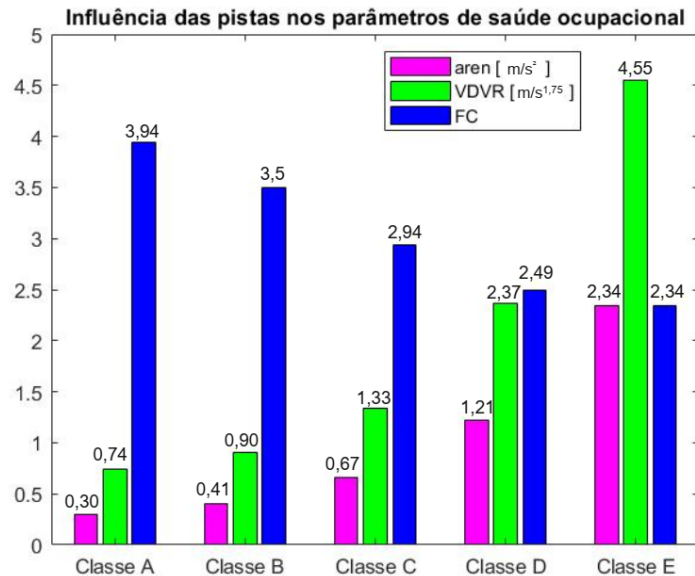
4.4 Avaliação numérica das condições ocupacionais segundo diferentes classes de pistas

A fim de verificar a influência das classes de pistas sobre as condições ocupacionais, faz-se inicialmente a análise quanto a saúde do trabalhador considerando uma velocidade padrão de 60 [km/h] para todas as classes de pista. Na Figura 11 são apresentados os parâmetros *aren* e *VDVR*, assim como, o fator de crista (FC). Pode-se verificar que os parâmetros *aren* e *VDVR* aumentam consideravelmente conforme avalia-se uma pista de maior irregularidade.

As condições 1 e 2 para pistas de classe A e B, respectivamente, apresentam parâmetros abaixo do nível de ação e apenas exigiriam a manutenção das condições operacionais. A condição 3 apresenta-se acima do nível de ação e portanto numa zona de transição que merece a adoção de medidas preventivas.

Ainda, as condições 4 e 5 apresentam valor de *aren* superior ao limite de exposição o que torna-se um fator potencial no desenvolvimento de doenças de natureza muscoesqueléticas. De modo geral, a Figura 11 mostra que o limite para *VDVR* não chega a ser alcançado para nenhum dos casos, o que está de acordo com a ISO 2631-1 (1997) que exige a consideração deste parâmetro para FC maiores que 9.

Figura 11 – Avaliação da saúde ocupacional segundo a NHO-09 para diferentes classes de pistas da ISO 8608 (2016) e velocidade 60 [km/h].



Posteriormente, considerando as recomendações de MÚČKA (2018) apresentadas na Tabela 3, são avaliadas as mesmas condições para obtenção dos parâmetros *aren*, *VDVR* e *FC*. Na Tabela 5 nota-se que novamente as condições 1 e 2 apresentam exposições salubres pelas recomendações da NHO-09, assim como, as condições 3 e 4 apresentam nível de aceleração normalizada acima do nível de ação, sendo apenas a condição 5 uma situação com valor acima do limite de exposição.

Tabela 5 – Dados quantitativos de saúde ocupacional segundo a NHO-09 (2013).

Condição	<i>aren</i> [m/s ²]	<i>VDVR</i> [m/s ^{1,75}]	<i>FC</i>	Tempo para atingir VAE [h]	Tempo para atingir VLE [h]
1	0,25	0,53	3,02	> 24	> 24
2	0,41	0,80	2,38	11,82	> 24
3	0,67	1,23	2,94	4,51	21,84
4	0,96	2,32	3,97	2,16	10,43
5	1,25	2,72	3,36	1,28	6,20

Condição 1 – pista classe A, Vel. 90 [km/h]; Condição 2 – pista classe B, Vel. 90 [km/h]; Condição 3 – pista classe C, Vel. 60 [km/h]; Condição 4 – pista classe D, Vel. 15 [km/h]; Condição 5 – pista classe E, Vel. 15 [km/h].

Ainda, pelo tempo para VAE e VLE nota-se que mesmo uma pista pavimentada de condição intermediária, conforme estudada na condição 3, pode-se alcançar magnitudes de aceleração no assento que alcançam o nível de ação para uma jornada equivalente a aproximadamente 4,51 [h] da jornada diária média de um motorista. Para as condições 4 e 5 a situação torna-se mais crítica, uma vez que o nível de ação é alcançado com 2,16 e 1,28 [h] da jornada diária média de um trabalhador, respectivamente. O VLE torna-se um parâmetro decisivo apenas para a condição 5 por alcançar o limite de exposição com 6,2 [h] de exposição. Na Figura A.2 do Apêndice, pode-se conferir a distribuição das condições dentro da zona de saúde da ISO 2631-1.

As condições analisadas para saúde na tabela anterior, são avaliadas também para o conforto do trabalhador na Tabela 6. Os valores de aceleração avaliados remetem

exclusivamente ao valor ponderado em frequência e o respectivo fator multiplicador. Pode-se verificar que, mesmo para baixas velocidades, a exposição para a jornada de trabalho avaliada torna-se desconfortável para trabalhadores que estão submetidos à condição 5.

Tabela 6 – Nível de conforto para diferentes condições de tráfego segundo a ISO 2631-1.

Condição	a_{w_RMS} [m/s ²]	Grau de conforto
1	0,21	Confortável
2	0,34	Levemente Desconfortável
3	0,56	Levemente Desconfortável
4	0,80	Pouco Desconfortável
5	1,04	Desconfortável

Condição 1 – pista classe A, Vel. 90 [km/h]; Condição 2 – pista classe B, Vel. 90 [km/h]; Condição 3 – pista classe C, Vel. 60 [km/h]; Condição 4 – pista classe D, Vel. 15 [km/h]; Condição 5 – pista classe E, Vel. 15 [km/h].

5 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado pode-se avaliar numericamente as condições ocupacionais de um semirreboque contendo forças de amortecimento não lineares no chassis e cabine do cavalo mecânico para diferentes condições de operação. De modo geral, nota-se que as classes das pistas exercem forte influência sobre o nível de conforto e saúde dos trabalhadores. Da mesma forma que, pelos baixos valores do FC, a avaliação do VDVR mostrou magnitudes bem inferiores aos limites propostos pela NHO-09, e conseqüentemente poderiam ser desconsiderados conforme recomendação da ISO 2631-1.

As condições 1 e 2 apresentaram níveis de conforto e saúde excelentes mesmo para jornadas de trabalho elevadas, como a considerada pelos dados estatísticos da CNT. No entanto, sabe-se que a realidade do trabalhador envolve a exposição a condições muitas vezes precárias que consecutivamente assemelham-se a classes de pistas de maior irregularidade, que como mostrado nas condições 3, 4 e 5 conseguem alcançar o VAE para 4,51; 2,16; 1,28 [h] da jornada diária média dos motoristas, respectivamente.

Em trabalhos futuros, a fim de dar continuidade a caracterização da influência ocupacional sobre os aspectos de conforto e saúde, torna-se essencial trabalhar com perfis característicos da exposição diária do trabalhador, os quais envolvam o tempo de exposição com diferentes níveis de irregularidades das pistas ao invés de considerar o ciclo de exposição como sendo exclusivamente de uma determinada classe. Outro ponto fundamental, envolve a consideração do veículo completo com todos os elementos de amortecimento e rigidezes a fim de garantir o estudo da dinâmica lateral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENNINK, C. Which Truck Suspension Meets Your Construction Truck Needs? **For Construction Pros**. 2021. Disponível em: <https://www.forconstructionpros.com/trucks/trucks-accessories/heavy-trucks-class-7-8/article/21563288/which-truck-suspension-meets-your-construction-truck-needs>

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm.

BRÜEL & KJAER. Human Vibration. **Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement A/S**. Denmark, 1989.

CHAFFIN, D. B.; Anderson, G. B. J.; Martin, B. J. **Occupational biomechanics**. Wiley-Interscience, USA, 1999.

CHEN, K., HE, S., XU, E., ZHENG, W., TANG, R. (2020). Ride Comfort Analysis and Multivariable Co-Optimization of the Commercial Vehicle Based on an Improved Nonlinear Model. **IEEE Access**, v. 8, p. 2732–2749, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962522>.

CNI. **Investimentos públicos e as rodovias federais no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/estatisticas/>. Acesso em 07/07/2022.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias**, 2021. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial>. Acesso em 07/07/2022.

CNT. **Pesquisa CNT perfil dos caminhoneiros**, 2019. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/perfil-dos-caminhoneiros>. Acesso em 08/07/2022.

DREHMER, L. R. C. **Otimização robusta multiobjetivo por análise de intervalo não probabilística: uma aplicação em conforto e segurança veicular sob dinâmica lateral e vertical acoplada**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

FLORES, M. B. **Estudo numérico da dinâmica vertical de veículos de carga considerando forças de amortecimento não lineares em suspensões**. 32f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London, UK: Academic Press, 1990.

GUO, P., ZHANG, J. H. Numerical model and multi-objective optimization analysis of vehicle vibration. **Applied Physics & Engineering**, v. 18(5), p. 393-412, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A1600124>.

INMANN, D. J. **Engineering Vibration**. 4th Edition, Pearson Education, Inc. pp. 2-13 2014.

ISO-2631-1: **Mechanical Vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements**. International Organization for Standardization. Europe, 1997.

ISO-8608: **Mechanical Vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data**. International Organization for Standardization. Europe, 2016.

KIM, J. H., AULCK, L., HUGHES, M., ZIGMAN, M., CAVALLARI, J., DENNERLEIN, J. T., JOHNSON, P. W. Whole body vibration exposures in long-haul truck drivers. **Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 59th Annual Meeting**. P. 1274-1278, 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1541931215591205>.

KIM, J. H.; JOHNSON, P. W.; HUGHES, M.; CAVALLARI, J.; SHELDON, A.; DON, M.; DENNERLEIN, J. T. Truck driver's exposures to whole body vibration and musculoskeletal health outcomes. **The Annals of Occupational Hygiene**, v. 60, n. 8, p. 936-948, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mew040>.

MÚČKA, P. Simulated road profiles according to ISO 8608 in vibration analysis. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p. 405-418, 2018.

NHO-09: **Avaliação da exposição ocupacional a vibrações de corpo inteiro**. FUNDACENTRO. São Paulo, Brasil, 2013.

PICORAL FILHO, J. G. **Análise do Conforto Quanto à Vibração Atuante em Caminhões de Carga**. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RAO, S. S. **Mechanical Vibration**. 6th Edition, Pearson Education, Inc., pp. 993-1025, 2018.

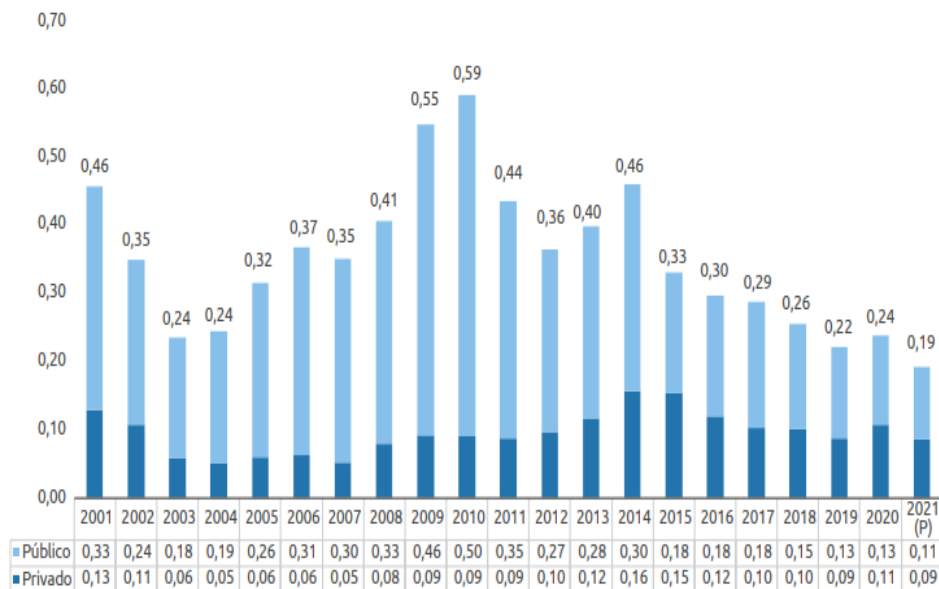
ROBB, M. J. M., MANSFIELD, N. J. Self-reported musculoskeletal problems amongst professional truck drivers. **Ergonomics**, v. 50(6), p. 814–827, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00140130701220341>.

SHINOZUKA, M.; JAN, C. M. Digital simulation of random process and its applications. **Journal of Sound and Vibration**, v. 25, p. 111-128, 1972.

TOLEDO, R. C. P. L. **Um estudo sobre métodos de integração direta para análise dinâmica não-linear de estruturas**. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

ANEXO

Figura A.1 – Investimentos em rodovias ao longo dos últimos 20 anos.



Fonte: CNI (2022).

Tabela A.1 – Parâmetros do modelo multicorpo – 13 GDL. Disponível em: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1V5AMjjAPTCRgoASfXu6nM8sFIrII8FGu/edit?usp=sharing&ouid=110540331858900075053&rtpof=true&sd=true>

Equações do movimento do modelo multicorpo (sem forças não lineares):

1º Grau de liberdade – assento do motorista:

$$m_p \ddot{x}_p = -k_p (x_p - x_c - l_8 \theta_c) - c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_c - l_8 \dot{\theta}_c)$$

6º Grau de liberdade – primeiro eixo:

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_1 (x_b - x_1 - l_1 \theta_b) + c_1 (\dot{x}_b - \dot{x}_1 - l_1 \dot{\theta}_b) - k_7 (x_1 - q_1)$$

9º Grau de liberdade – movimento vertical do semirreboque:

$$\begin{aligned} m_t \ddot{x}_t = & -k_s (x_t - x_b - l_{10} \theta_t - l_9 \theta_b) - c_s (\dot{x}_t - \dot{x}_b - l_{10} \dot{\theta}_t - l_9 \dot{\theta}_b) - k_4 (x_t - x_4 + (l_{11} - l_{12}) \theta_t) \\ & - c_4 (\dot{x}_t - \dot{x}_4 + (l_{11} - l_{12}) \dot{\theta}_t) - k_5 (x_t - x_5 + l_{11} \theta_t) - c_5 (\dot{x}_t - \dot{x}_5 + l_{11} \dot{\theta}_t) - k_6 (x_t - x_6 + (l_{11} + l_{13}) \theta_t) \\ & - c_6 (\dot{x}_t - \dot{x}_6 + (l_{11} + l_{13}) \dot{\theta}_t) \end{aligned}$$

10º Grau de liberdade – movimento de arfagem do semirreboque:

$$\begin{aligned} J_t \ddot{\theta}_t = & (k_s (x_t - x_b - l_{10} \theta_t - l_9 \theta_b) + c_s (\dot{x}_t - \dot{x}_b - l_{10} \dot{\theta}_t - l_9 \dot{\theta}_b)) l_{10} \\ & - (k_6 (x_t - x_6 + (l_{11} + l_{13}) \theta_t) + c_6 (\dot{x}_t - \dot{x}_6 + (l_{11} + l_{13}) \dot{\theta}_t)) (l_{11} + l_{13}) \theta_t (l_{11} + l_{13}) \\ & - (k_4 (x_t - x_4 + (l_{11} - l_{12}) \theta_t) + c_4 (\dot{x}_t - \dot{x}_4 + (l_{11} - l_{12}) \dot{\theta}_t)) (l_{11} - l_{12}) \\ & - (k_5 (x_t - x_5 + l_{11} \theta_t) + c_5 (\dot{x}_t - \dot{x}_5 + l_{11} \dot{\theta}_t)) l_{11} \end{aligned}$$

11º Grau de liberdade – quarto eixo:

$$m_4 \ddot{x}_4 = k_4 (x_t - x_4 + (l_{11} - l_{12}) \theta_t) + c_4 (\dot{x}_t - \dot{x}_4 + (l_{11} - l_{12}) \dot{\theta}_t) - k_{10} (x_4 - q_4)$$

12º Grau de liberdade – quinto eixo:

$$m_5 \ddot{x}_5 = k_5 (x_t - x_5 + l_{11} \theta_t) + c_5 (\dot{x}_t - \dot{x}_5 + l_{11} \dot{\theta}_t) - k_{11} (x_5 - q_5)$$

13º Grau de liberdade – sexto eixo:

$$m_6 \ddot{x}_6 = k_6 (x_t - x_6 + (l_{11} + l_{13}) \theta_t) + c_6 (\dot{x}_t - \dot{x}_6 + (l_{11} + l_{13}) \dot{\theta}_t) - k_{12} (x_6 - q_6)$$

APÊNDICE

Figura A.1 – Perfil das pistas analisadas

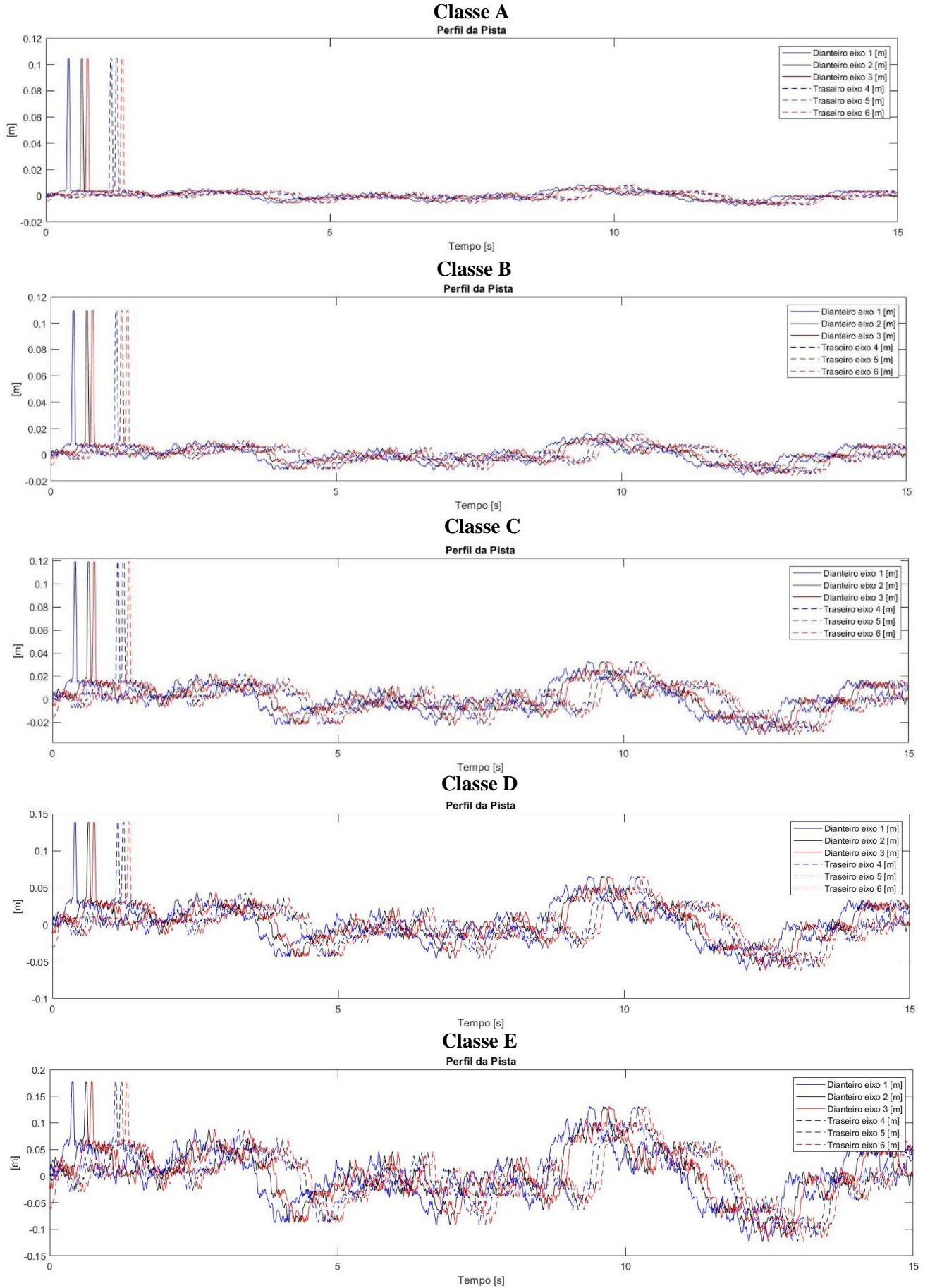


Figura A.2 – Zona de cuidado par saúde segundo ISO 2631-1

