

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação dos níveis de vibração de tratores agrícolas utilizando  
modelos mistos**

**Ricardo Gonçalves Rosa**

Tese apresentada para a obtenção do título de  
Doutor em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba  
2023**

**Ricardo Gonçalves Rosa**  
**Engenheiro de Biosistemas**

**Avaliação dos níveis de vibração de tratores agrícolas utilizando modelos mistos**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **MURILO MESQUITA BAESSO**

Tese apresentada para a obtenção do título de  
Doutor em Ciências. Área de Concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba**  
**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Rosa, Ricardo Gonçalves

Avaliação dos níveis de vibração de tratores agrícolas utilizando modelos mistos / Ricardo Gonçalves Rosa. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

68 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. ANOVA 2. Software 3. Frequência 4. Operador I. Título

## **DEDICATÓRIA**

A minha família e amigos, pelo suporte diário em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade de São Paulo, a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos pelo conhecimento adquirido.

Aos meus pais responsáveis por minha educação e capacitação para enfrentar os desafios da vida.

Aos meus irmãos, Bruna, Diego e Freddy, por todo o carinho no meu dia a dia.

Aos meus amigos por todo o carinho e ajuda em minha trajetória.

Ao Professor Murilo Mesquita Baesso, por toda dedicação e sabedoria que me transmitiu durante a graduação e pós-graduação.

Aos integrantes do Laboratório de Máquinas Agrícolas e Agricultura de Precisão, por toda a ajuda que me propiciaram a fazer este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por fomentar a bolsa de pesquisa vinculada a este trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Não existe verdadeira inteligência sem bondade.”*

- Ludwig van Beethoven

## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1. Ergonomia em tratores agrícolas.....	15
2.2. O corpo humano e a vibração.....	15
2.3. Legislação e normas sobre vibração em operadores de tratores agrícolas.....	17
2.4. Análise Quantitativa .....	18
2.5. Modelos Mistos.....	18
2.6. Survey.....	19
3. METODOLOGIA .....	21
3.1. Área de estudo .....	21
3.2. Tratores estudados .....	22
3.3. Avaliação da vibração.....	22
3.4. Modelos mistos.....	28
3.5. Estrutura do survey.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
5. CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS .....	53
ANEXOS.....	57

## RESUMO

### **Avaliação dos níveis de vibração de tratores agrícolas utilizando modelos mistos**

O setor agrícola nas últimas décadas teve um grande salto tecnológico, no entanto, quando se trata de máquinas agrícolas, ainda vemos em estudos recentes, tratores que não chegam em um nível aceitável de vibração, não respeitando até mesmo as normas de padronização internacionais recomendadas. A norma ISO 2631 (1978) pede para que os tratores respeitem três parâmetros e os classifica como: Nível de Conforto Reduzido, Nível de Eficiência Reduzida e Limite de Exposição. O projeto foi realizado na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), localizada no município de Pirassununga, e em sua metodologia foram avaliados sete tratores, denominados A, B, C, D, E, F e G, sendo eles de mesma marca, com potências que variam de 75 cv até 215 cv, com o tempo total de aquisição de dados sendo de 20 minutos e com os tratores operando em condições semelhantes, sendo realizadas cinco repetições em cada tratamento (trator x terreno), todos os tratores foram alocados na Prefeitura Administrativa do Campus USP Fernando Costa de Pirassununga. O estudo propôs analisar dados relacionados a ergonomia por duas visões que se complementavam, a primeira seria uma análise e criação de um modelo estatístico sobre os dados e a outra seria um survey que corroboraria com entendimento dos dados coletados e trabalhados de maneira experimental. Após coletado os dados, foi utilizado o programa estatístico R Studio para a análise estatística, sendo aplicado o modelo linear misto, este modelo foi usado primeiramente para identificarmos quais variáveis do nosso estudo eram significativas e impactavam na aceleração, e como resultado, tivemos que quase todas as variáveis eram significativas. E em seguida foi obtido um modelo estatístico com alto grau de estimação, que nos permite fazer novas e futuras estimações de vibração, para outros tratores de mesma marca, e potências, peso ou horas trabalhadas semelhantes. Além disso esse estudo por ter alto grau de replicação, espera inspirar novas pesquisas no campo de ergonomia, a fim de agregar mais conhecimento a essa área de estudo.

Palavras-chave: ANOVA, Software, Frequência, Operador



## ABSTRACT

### **Evaluation of vibration levels by agricultural tractors using mixed models**

The agricultural sector in recent decades has had a big technological leap, however, when it comes to agricultural machines, we still see in recent studies, tractors that do not reach an acceptable level of vibration, not even respecting the recommended international standardization standards. The ISO 2631 (1978) standard requires that tractors respect three parameters and classifies them as: Reduced Comfort Level, Reduced Efficiency Level and Exposure Limit. The project was done at the Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), located in the city of Pirassununga, and in its methodology, seven tractors, designated A, B, C, D, E, F and G, were evaluated, all of the same brand, with power ranging from 75 hp to 215 hp, the total time of data acquisition was 20 minutes and with the tractors operating under similar conditions, with five replications in each treatment (tractor x terrain), all the tractors were allocated on the administrative campus hall at USP-Pirassununga. The study proposed to analyze data related to ergonomics from two complementary perspectives. The first one involved the analysis and creation of a statistical model based on the data, while the second one involved a survey that would support the understanding of the collected and experimentally processed data. After collecting the data, the statistical program R Studio was used for the statistical analysis, applying the mixed linear model. This model was initially used to identify which variables in our study were significant and had an impact on acceleration, and as a result, we found that almost all variables were significant. Subsequently, a statistical model with a high degree of estimation was obtained, which allows us to make new and future estimations of vibration for other tractors of the same brand and with similar power, weight, or working hours. Additionally, due to its high degree of replicability, this study aims to inspire new research in the field of ergonomics, with the goal of contributing further knowledge to this area of study.

Keywords: ANOVA, Software, Frequency, Operator

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos. ....	16
Figura 2. Imagem de satélite da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA). Imagem: Google Earth, acessado em 30/06/2019. ....	21
Figura 3. Localização da cidade de Pirassununga em relação ao estado de São Paulo. Imagem: Raphael Lorenzeto de Abreu, ( <a href="https://commons.wikimedia.org">https://commons.wikimedia.org</a> ), acessado em 30/06/2019.....	21
Figura 4. Analisador de vibração modelo HD-2030HA-WB. ....	23
Figura 5. Acelerômetro em formato de assento, modelo 356B41, PCB Piezotronics. ....	23
Figura 6. Limite de aceleração transversal (eixos x e y) como função da frequência e tempo de exposição para nível de eficiência reduzida. ....	24
Figura 7. Limite de aceleração longitudinal (eixo z) como função da frequência e tempo de exposição para nível de eficiência reduzida.....	25
Figura 8. Programação na Linguagem R da modelagem por métodos mistos do estudo da vibração em tratores agrícolas. ....	29
Figura 9. Valores preditos versus resíduos do modelo de regressão linear. ....	34
Figura 10. Modelo misto estimado para o eixo x. ....	35
Figura 11. Modelo misto estimado para o eixo x sem a variável peso.....	36
Figura 12. Análise de diagnóstico “resíduos x valores preditos” do modelo misto ajustado para a aceleração no eixo x. ....	36
Figura 13. Comparação de curvas entre o Trator A e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Asfalto) .....	39
Figura 14. Comparação de curvas entre o Trator B e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Terra).....	40
Figura 15. Comparação de curvas entre o Trator C e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Campo).....	41
Figura 16. Comparação de curvas entre o Trator D e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Asfalto). ....	42
Figura 17. Comparação de curvas entre o Trator E e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Terra).....	43
Figura 18. Comparação de curvas entre o Trator F e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Campo).....	44

Figura 19. Comparação de curvas entre o Trator G e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Asfalto). .....	45
Figura 20. Comparação de curvas entre o Trator A e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Terra). .....	46
Figura 21. Comparação de curvas entre o Trator B e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Campo). .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos tratores utilizados no estudo. ....	22
Tabela 2. Valores numéricos de “nível de eficiência reduzida” para aceleração da vibração na direção longitudinal (eixo z). ....	26
Tabela 3. Valores numéricos de “nível de eficiência reduzida” para aceleração de vibração na direção transversa (eixos x e y). ....	27
Tabela 4. Valores de $\beta$ estimados para cada eixo.....	37
Tabela 5. Respostas obtidas para a pergunta I do questionário: “Na sua opinião, qual o nível de influência que um terreno tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?”. ....	48
Tabela 6. Respostas obtidas para a pergunta II do questionário: “Na sua opinião, qual o nível de influência que características específicas (marca, peso, potência, horas trabalhadas) de um trator tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?”.....	48
Tabela 7. Respostas obtidas para a pergunta III do questionário: “Na sua opinião, qual é o nível de ergonomia que um operador de trator agrícola tem durante sua jornada diária de trabalho?”. ....	48

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>FZEA</b>	Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LAMAP</b>	Laboratório de Máquinas Agrícolas e Agricultura de Precisão
<b>LE</b>	Limite de Exposição
<b>NCR</b>	Nível de Conforto Reduzido
<b>NER</b>	Nível de Eficiência Reduzida
<b>RMS</b>	Raiz do Valor Médio Quadrático ( <i>Root Mean Square</i> )
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia no meio agrícola, é comum pensarmos que se evolua no mesmo ritmo a ergonomia aplicada em máquinas agrícolas, no entanto, tratores agrícolas ainda apresentam problemas de conforto e segurança, resultando em diminuição da capacidade operacional e acidentes durante atividades de trabalho. A maioria dos estudos relacionados a vibração em tratores agrícolas estão ligados diretamente a ergonomia, que tem como definição o estudo da eficiência de trabalho entre homem e máquina, e também a preocupação com o seu conforto, segurança e saúde do seu operador (ISO 9241-210, 2009). Quando seu operador apresenta desconforto e sintomas médicos, isso é resultante de uma exposição a vibração além do recomendado (PARK et al., 2019).

Em relação ao estudo de tais vibrações, métodos experimentais normalmente mostram resultados satisfatórios e com um alto grau de confiança, porém, em alguns casos, somente esses métodos não são o suficiente para termos um completo entendimento dos seus resultados, assim, se torna atraente abordar o assunto de outras formas. Uma estratégia para alcançar esse objetivo é por meio de uma análise estatística intensiva dos dados, utilizando o modelo linear misto. E a partir dessa análise estatística, é oferecida uma solução robusta, flexível e altamente replicável, com ênfase na análise minuciosa das variáveis envolvidas e na sua adequabilidade para descrever o comportamento de dados longitudinais ou medidas repetidas (VERBEK et al., 2009).

A pesquisa quantitativa geralmente envolve a seleção de uma amostra representativa da população-alvo, a fim de obter resultados que possam ser generalizados para um grupo maior. Dentro da pesquisa quantitativa, além dos experimentos controlados e da análise estatística, também pode ser usado o formato de questionários estruturados para entender melhor os fenômenos do estudo e obter conclusões objetivas em relação a ele (WATSON, 2015).

Considerando essas perspectivas, e levando em conta que o estudo da ergonomia tem uma grande importância no cenário brasileiro e mundial, influenciando desde a produção obtida no campo até os efeitos nocivos gerados pela vibração excessiva de suas máquinas aos operadores, este estudo tem como objetivo um melhor entendimento das variáveis presentes em um estudo vibracional de tratores, além disso, também tem como objetivo a criação de um modelo estatístico, e a partir desse modelo, entender qual é a importância de suas principais variáveis e gerar uma metodologia e modelo replicáveis em estudos futuros.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Ergonomia em tratores agrícolas**

Ergonomia é a ciência que estuda a relação entre os seres humanos e seu ambiente de trabalho, visando projetar os equipamentos, sistemas e ambientes de trabalho para serem seguros, confortáveis e eficientes. Ela é aplicada para melhorar a qualidade de vida no trabalho e reduzir o risco de lesões e doenças relacionadas a ele. Ao operar uma máquina agrícola, seu condutor pode sofrer desgastes físicos e mentais, isso se deve a fatores interligados a sua jornada de trabalho com seu trator, sendo exposto constantemente a ruídos e vibrações (CUTINI et al., PERUZZINI et al., 2019).

Essas vibrações são normalmente chamadas de whole-body vibration (WBV), ou vibrações de corpo inteiro, esse tipo de vibração tem esse nome pois acontece nos três eixos do corpo humano, e na maioria dos casos, principalmente quando se trata de máquinas agrícolas, são vibrações que põe em risco o conforto e a saúde de quem trabalha junto a elas (SINGH et al., 2021). Exposições continuas a vibrações excessivas podem causar inúmeros efeitos nocivos a saúde de seu operador, desde fadiga, falta de concentração e sonolência, a até mesmos patologias mais sérias como distúrbios na coluna vertebral, problemas no sistema circulatório e cardíaco (GRIFFIN, 2007; LOUSTRIDIS et al., 2011; GOGLIA et al., 2003).

A otimização do assento e a postura correta do operador enquanto em serviço, impacta diretamente em seu conforto, eficiência e na prevenção de futuras doenças que possam ocorrer devido a vibração (FETHKE et al., 2018; ROMANO et al., 2020; QUIN et al., 2021; WANG et al., 2022), visto que praticamente todas as ações exercidas no seu trabalho diário o expõe aos efeitos nocivos provenientes do excesso de vibrações referentes aos tratores agrícolas (BENOS & TSAOPOULOS & BOCHTIS, 2020).

### **2.2. O corpo humano e a vibração**

Segundo a Norma ISO 2631 (1978), referente a avaliação da exposição humana à vibrações de corpo inteiro, o corpo humano pode receber as vibrações de três maneiras distintas, atingindo o corpo inteiro ou partes substanciais do mesmo, vibrações transmitidas por meio de superfícies de sustentação, tais como pés, nádegas e costas, e, por fim, as que atingem partes específicas do corpo, como mãos, cabeça e pernas. Nos tratores agrícolas, o operador recebe as vibrações através do assento, do piso, dos comandos manuais e dos pedais.

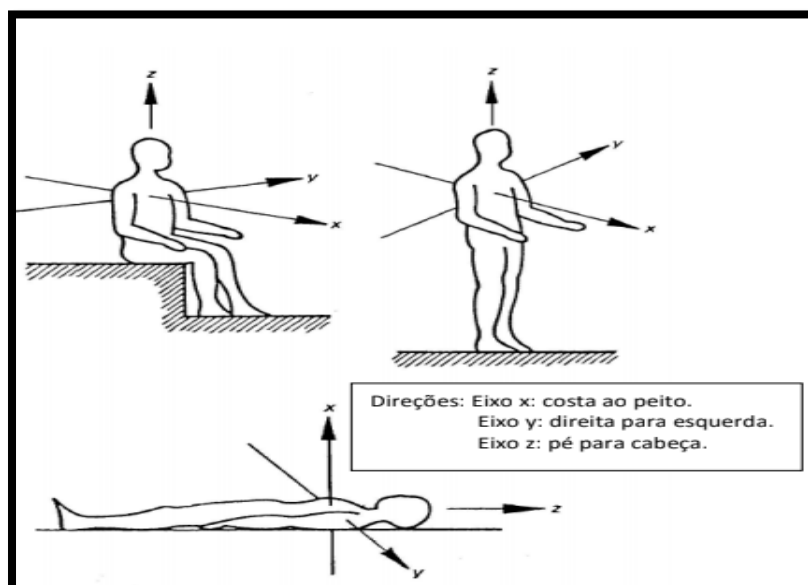
A exposição em longo prazo a vibrações cuja intensidade está acima do limite pode comprometer a saúde humana. Alcançar uma solução adequada para esse problema ainda é uma das tarefas mais importantes no desenvolvimento de tratores (SCARLETT et al., 2005; KYUHYUN et al., 2017).



Boshuizen (1990) e Mandapuram (2015) afirmam que vibração pode impor um grande risco à saúde do operador e em virtude das influências combinadas de vibrações e outros riscos à saúde ocupacional, nem sempre é possível estabelecer a correlação entre o efeito das vibrações e a doença do condutor. Estudos apontam que a exposição prolongada a vibrações de alto nível pode levar a lesões na coluna lombar, doenças do sistema digestivo e problemas cardiovasculares.

Rauser e Williams (2014), citam que os operadores de tratores agrícolas possuem uma alta tendência em apresentar distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho, e dentro desses distúrbios a lombalgia é a doença predominante desses operadores (Kim et al., 2016). Burstrom et al. (2015) também afirmam que a lombalgia sofrida por operadores de tratores agrícolas tem como principal causa as vibrações de corpo inteiro.

A ISO 2631 (1978) estabelece um sistema de coordenadas ortogonais para estudos do efeito da magnitude em diferentes direções. Na Figura 1 são apresentadas as direções de medição da vibração no corpo humano. O corpo humano reage às vibrações de diversas maneiras. A sensibilidade às vibrações longitudinais é distinta da sensibilidade transversal. Frequências com menos 1 Hz podem causar enjoos, enquanto as frequências entre 5 Hz e 8 Hz podem prejudicar a parte intestinal do indivíduo assim como também a coluna vertebral e as frequências entre 15 Hz e 24 Hz podem causar problemas de vista, reduzindo o foco e a detecção do estímulo luminoso (BERASATEGUI, 2000). Como é possível observar na Figura 1, no corpo humano, a vibração pode ser medida por meio dos três eixos ortogonais (x, y e z).



**Figura 1.** Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos.

Fonte: adaptado de ISO 2631 (1978).

Os veículos que circulam nas estradas, possuem predominantemente as vibrações de corpo inteiro no eixo vertical (z), no entanto os veículos como tratores agrícolas, tendem a apresentar essas vibrações em torno dos seus três eixos ortogonais (x, y e z) (JOHNSON et al., 2015). A análise dessas vibrações se torna ainda mais complexa, pois no ambiente agrícola temos uma grande gama de fatores que influenciam nessas análises, como: variedade e irregularidade de relevos, diferentes configurações de tratores, comportamento do operador e compactação do solo, que causam uma grande faixa de imprevisibilidade nos resultados analisados (ZHAO & SCHINDLER, 2014).

### **2.3. Legislação e normas sobre vibração em operadores de tratores agrícolas**

A ISO 2631 publicou e disponibilizou a sua primeira versão em 1974, sendo mais tarde reproduzida com alterações e melhorias em 1978, 1982, 1985, 1997 e 2010. De acordo com estas normas, deve-se medir a vibração na estrutura ou ponto pelo qual a mesma será transmitida ao corpo inteiro. Em 1982 uma emenda foi adicionada a Norma ISO 2631 (1978), definindo o valor ponderado global de vibração através da combinação dos três eixos x, y e z (FRANCHINI, 2007).

Avaliando essa norma, três pontos devem ser levados em conta para a análise vibracional: a conservação da eficiência de seu trabalho, a preservação do bem-estar e saúde do operador, e a manutenção de seu conforto. Para tanto, foram estipulados níveis ideais para cada uma das preocupações demonstradas. São elas, respectivamente, nível de eficiência reduzida (NER), limite de exposição (LE) e nível de conforto reduzido (NCR).

Entende-se por nível de eficiência reduzida (NER) os valores que quando ultrapassados afetarão a eficiência do trabalho realizado, mais especificamente os dependentes do tempo, gerando fadiga ao operador. Limite de exposição (LE) é um parâmetro que quando não respeitado, origina uma série de efeitos nocivos à saúde de quem opera a máquina agrícola em questão, podendo causar desde tonturas até problemas digestivos, cardiovasculares, na coluna vertebral e inclusive problemas relacionados a visão. Quanto ao Nível de Conforto Reduzido (NCR), ele caracteriza o nível onde ocorre a perda do estado do conforto no qual o operador esteja trabalhando em sua máquina agrícola. Para tais análises existem padrões pré-estipulados de curvas em função do tempo de exposição à vibração, plotados em gráficos do tipo frequência (Hz) x aceleração ( $ms^{-2}$ ), para cada um dos diferentes níveis ou limites avaliados, assim como para cada uma das direções de atuação (x, y, z).

## 2.4. Análise Quantitativa

De acordo com Watson (2015), a análise quantitativa é uma abordagem de pesquisa que se baseia em dados numéricos e estatísticos para compreender fenômenos, estabelecer relações e identificar padrões. Nesse tipo de pesquisa, são utilizados métodos objetivos e estruturados, como questionários padronizados, escalas de medição e análise estatística, para coleta e análise dos dados.

Através dessa análise, a pesquisa quantitativa desempenha um papel crucial em estudos, pois oferece uma série de vantagens e contribuições significativas. Em primeiro lugar, a pesquisa quantitativa permite a mensuração objetiva e precisa de variáveis, possibilitando a obtenção de dados quantificáveis que podem ser analisados estatisticamente. Isso oferece uma base sólida para inferências e generalizações, proporcionando maior confiabilidade e validade aos resultados obtidos.

Além disso, a pesquisa quantitativa permite a identificação de padrões e tendências através de análises estatísticas, possibilitando a detecção de relações de causa e efeito entre variáveis. Essa abordagem também permite a comparação e a generalização dos resultados para uma população maior, fornecendo uma visão mais abrangente do fenômeno estudado. Por fim, a pesquisa quantitativa oferece a possibilidade de replicação, permitindo que outros pesquisadores realizem estudos semelhantes e comparem seus resultados, contribuindo para a construção do conhecimento científico de forma progressiva e cumulativa.

## 2.5. Modelos Mistos

O método de modelos mistos lineares são modelos estatísticos de regressão que possuem tanto efeitos fixos como aleatórios, os efeitos fixos possuem parâmetro desconhecido, porém possui o mesmo valor para cada observação da amostra, já os efeitos aleatórios podem assumir valores diferentes para diferentes observações da amostra. Normalmente se usa os modelos mistos com dados que possuem medidas repetidas ou longitudinais, e também em dados que possuem heterocedasticidade. Não existe uma regra clara para a definição das escolhas dos seus efeitos fixos ou aleatórios (BRAUER & CURTIN, 2018; MATUSCHEK ET AL., 2017), porém uma sugestão a se fazer seria de colocar efeitos fixos para covariáveis que tenham o mesmo efeito para toda a amostra e escolher como efeitos aleatórios, as covariáveis cujos efeitos devem variar entre as unidades amostrais. Porém, normalmente o critério de seleção da escolha desses efeitos vai de testes por tentativa e erro de quem os manuseia. Além disso, uma das flexibilidades do modelo linear misto é que se pode fazer o seu uso mesmo durante o andamento do seu experimento e ainda sim obter resultados relevantes (WINTER & WIELING, 2016).

O modelo misto é definido por:

$$Y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \epsilon_i, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

Sendo  $b_i \sim \text{Normal}(\mathbf{0}, \mathbf{G})$  e  $\epsilon_i \sim \text{Normal}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_i)$ . Se considerarmos  $b_i$  e  $\epsilon_i$  independentes, temos  $E(Y_i) = X_i\beta$  e  $\text{Var}(Y_i) = V_i = Z_i\mathbf{G}Z_i^T + \mathbf{R}_i$ , em que:

$Y_i$  é o vetor de variáveis respostas da  $i$ -ésima unidade experimental;

$\beta$  é o vetor paramétrico com efeitos fixos do modelo com dimensão  $(t \times 1)$ ;

$X_i$  é a matriz de planejamento não aleatório  $\beta$  com dimensão  $(p_i \times t)$ ;

$b_i$  é o vetor de efeitos aleatórios relacionados à  $i$ -ésima unidade experimental do modelo com dimensão  $(q \times 1)$ ;

$Z_i$  é a matriz de planejamento não aleatória de  $b_i$ , com dimensão  $(p_i \times q)$ ;

$\epsilon_i$  é o vetor de erros aleatórios associado à  $i$ -ésima unidade experimental com dimensão  $(p_i \times 1)$ ;

$\mathbf{G}$  é a matriz de variância e covariância dos efeitos aleatórios com dimensão  $(q \times q)$ ;

$\mathbf{R}_i$  é a matriz de variância e covariância do  $i$ -ésimo erro aleatório com dimensão  $(p_i \times p_i)$ ;

$\mathbf{0}$  é o vetor de zeros com dimensão  $(q \times 1)$ .

## 2.6. Survey

Um survey é uma técnica de pesquisa que visa coletar dados por meio de questionários, entrevistas ou observações sistemáticas (DÖRNYEI & TAGUCHI, 2022). É uma forma de coletar informações de um grupo de pessoas, geralmente representativo de uma população-alvo, para se aprofundar sobre suas opiniões, comportamentos, características demográficas e outros aspectos relevantes (VEHOVAR & MANFREDA, 2017). Os surveys podem ser realizados de maneira presencial, por telefone, ou internet e são amplamente utilizados em diversas áreas, como ciências sociais, marketing, saúde, educação e pesquisas acadêmicas (VEHOVAR & MANFREDA, 2017).

A utilização de surveys como instrumento de coleta de dados é uma valiosa ferramenta. No entanto, para garantir a validade dos resultados obtidos, é essencial que os questionários sejam cuidadosamente elaborados. Embora esse método seja econômico e rápido, é importante considerar a possibilidade de viés, pois as respostas dadas ao survey podem ser influenciadas por diversos fatores. Uma outra característica do survey, é a sua flexibilidade, que permite a adaptação dos questionários de acordo com os objetivos da pesquisa, tornando-os uma ferramenta valiosa para estudos descritivos, comparativos e exploratórios. Além disso, a utilização de surveys pode oferecer uma visão longitudinal ao

acompanhar mudanças e tendências ao longo do tempo (CHRISTENSEN et al., 2011).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) ilustrada na Figura 2, da Universidade de São Paulo (USP), localizada no município paulista de Pirassununga visualizada na Figura 3, em área cedida pela Prefeitura Administrativa do Campus USP Fernando Costa. A localização geográfica do campus é 21°59' de latitude Sul e 47°26' de longitude Oeste e altitude média de 635 metros.



**Figura 2.** Imagem de satélite da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA). Imagem: Google Earth, acessado em 30/06/2019.



**Figura 3.** Localização da cidade de Pirassununga em relação ao estado de São Paulo. Imagem: Raphael Lorenzeto de Abreu, (<https://commons.wikimedia.org>), acessado em 30/06/2019.

### 3.2. Tratores estudados

O estudo foi realizado com sete tratores da mesma fabricante e de modelos diferentes, na Tabela 1 são descritas as suas características.

**Tabela 1.** Características dos tratores utilizados no estudo.

Tratores	Potência (a 2200 rpm)	Ano de Fabricação	Horas Trabalhadas	Tração	Pneus	Peso (Kg)
A	75 cv	1996	6540	4x2	Diagonais	2766
B	86 cv	2005	1217	4x4	Diagonais	2463
C	120 cv	2005	7834	4x4	Diagonais	3800
D	173 cv	1997	7472	4x4	Diagonais	4502
E	75 cv	2011	701	4x4	Diagonais	3748
F	110 cv	2011	907	4x4	Diagonais	4105
G	215 cv	2012	161	4x4	Diagonais	6729

Foi utilizado o assento original de fábrica para todos os tratores, antes do início do ensaio, foram ajustados os assentos para o peso e altura do operador.

### 3.3. Avaliação da vibração

No que diz respeito à avaliação de vibração, a grandeza primária usada foi à aceleração, expressa em  $ms^{-2}$ , estabelecida na norma ISO 2631 (ISO, 1978). Para que se avaliassem as vibrações transmitidas pelo corpo inteiro com filtro de passa-banda utilizou-se um analisador de vibração modelo HD-2030HA-WB, ilustrado na Figura 4, marca Delta Ohm, número de série 12062930149 (Especificações técnicas em ANEXO A e Calibragem em ANEXO B), de responsabilidade do Laboratório de Máquinas Agrícolas e Agricultura de Precisão (LAMAP). O aparelho para aquisição de dados foi regulado para leitura de acelerações no corpo inteiro, com armazenamento a cada segundo.



**Figura 4.** Analisador de vibração modelo HD-2030HA-WB.

Em conjunto com o medidor de vibração foi utilizado um acelerômetro em formato de assento, ilustrado na Figura 5, modelo 356B41, marca PCB Piezotronics, número de série LW145553 (Especificações técnicas ANEXO C e Calibragem em ANEXO D), de análise tri-axial, também de responsabilidade do LAMAP. Ambos os equipamentos citados trabalham em conjunto, sendo estabelecido o contato entre o sensor e analisador de vibração, via cabo, para a aquisição e armazenamento dos dados coletados.



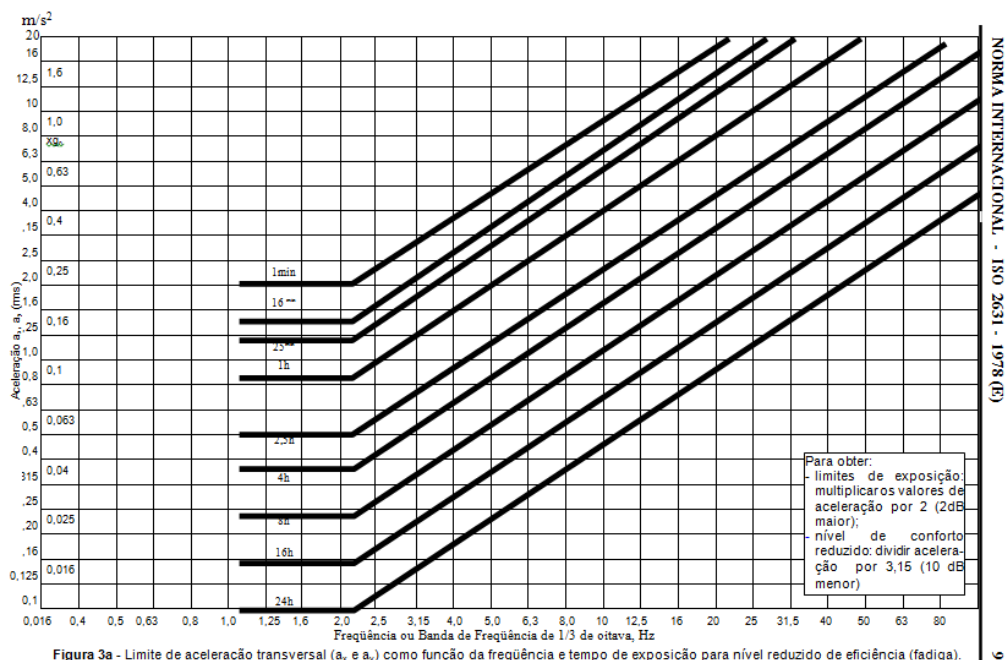
**Figura 5.** Acelerômetro em formato de assento, modelo 356B41, PCB Piezotronics.

O sensor de vibração foi posicionado entre o assento do trator e o operador, sentando este último sobre o sensor descrito, com o objetivo de coletar os dados nas mesmas condições as quais o operador está exposto diariamente. Para fidelizar as condições encontradas diariamente na operação de máquinas agrícolas, os ensaios foram tomados em três diferentes terrenos: asfalto, terra e campo. Para as análises em terra, utilizou-se de estradas de comum uso diário dos tratores para locomoção aos campos, caracterizada por sua compactação. Quanto ao ensaio em asfalto, consideraram-se as



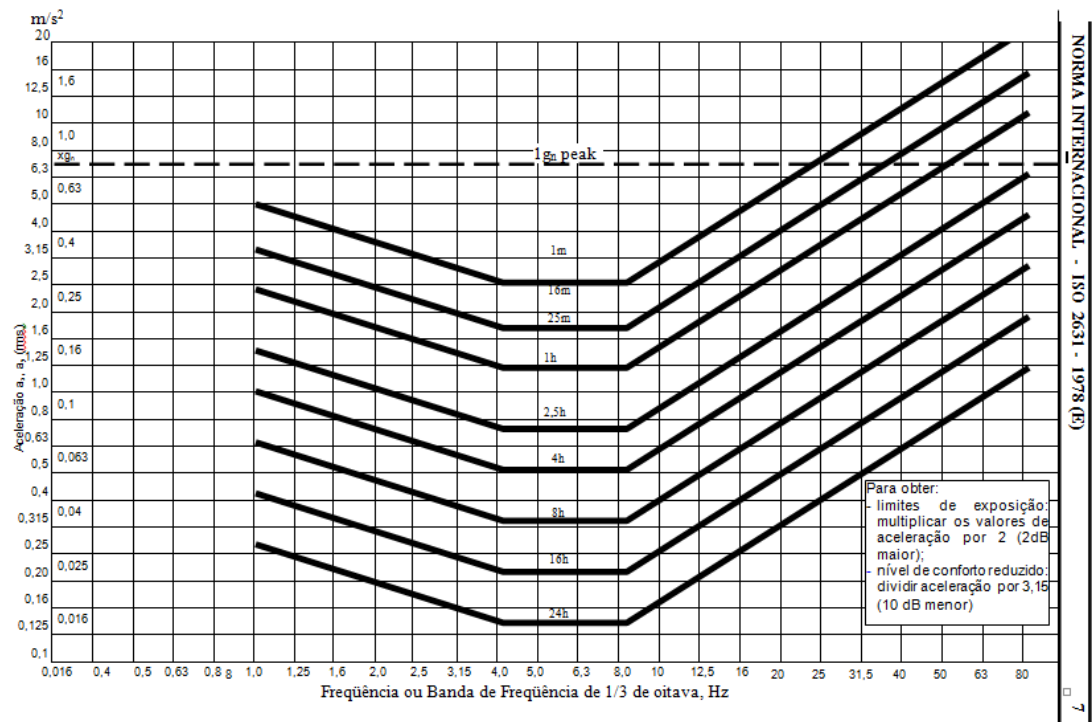
pistas e ruas existentes entre o galpão onde se localizam as máquinas e a área de trabalho (campo). Por último, a condição de campo entendeu-se pela característica de solo mobilizado utilizado para cultivos em geral, onde a máquina permanece trabalhando diretamente. Para todos os tratores os percursos utilizados para as análises foram os mesmos, atentando-se ao fato de nenhum dos tratores estarem operando implementos no momento do ensaio, apresentando apenas deslocamento pelos terrenos em questão.

O tempo de aquisição foi de 20 minutos, com os tratores operando em condições semelhantes, sendo realizadas cinco repetições em cada tratamento (trator x terreno). Os sinais foram transformados para o domínio da frequência, utilizando-se a função FFT (amplitude e fase), sendo filtrados digitalmente em bandas de 1/3 de oitava para obtenção da aceleração eficaz. Os valores máximos obtidos em cada banda foram multiplicados por fatores de ponderação, gerando as acelerações ponderadas. A análise da aceleração eficaz ponderada global foi realizada na faixa entre 1 e 80 Hz. Segundo Berasategui (2000), doenças relacionadas ao trato estomacal e à coluna vertebral são causadas por frequências entre 5 e 8 Hz. A seguir constam as Figuras 6 e 7 referentes aos limites estabelecidos para nível de eficiência reduzida pela norma ISO 2631 (1978) para a avaliação da vibração de corpo inteiro para os eixos x e y e para o eixo z, respectivamente.



**Figura 6.** Limite de aceleração transversal (eixos x e y) como função da frequência e tempo de exposição para nível de eficiência reduzida.

Fonte: Adaptado de (ISO, 1978).



**Figura 7.** Limite de aceleração longitudinal (eixo z) como função da frequência e tempo de exposição para nível de eficiência reduzida.

Fonte: Adaptado de (ISO, 1978).

A seguir, nas Tabelas 2 e 3, constam os valores numéricos para os gráficos apresentados anteriormente, com os quais foi possível gerar as curvas referentes à exposição diária de 8 horas, considerada a jornada de trabalho. Esses dados foram retirados da ISO 2631 (1978) e tiveram seu formato adaptado às Tabelas 2 e 3, com as devidas traduções de termos. Na Tabela 2 observamos os valores numéricos referentes ao limite de NER, especificamente para o eixo z, e na Tabela 3 temos os valores numéricos de NER para os eixos x e y.

**Tabela 2.** Valores numéricos de “nível de eficiência reduzida” para aceleração da vibração na direção longitudinal (eixo z).

Frequência (centro da banda de 1/3 de oitava)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )								
	Tempo de Exposição								
	24 h	16 h	8 h	4 h	2,5 h	1 h	25 min	16 min	1 min
1	0,28	0,425	0,63	1,06	1,4	2,36	3,55	4,25	5,6
1,25	0,25	0,375	0,56	0,95	1,26	2,12	3,15	3,75	5
1,6	0,224	0,335	0,50	0,85	1,12	1,9	2,8	3,35	4,5
2	0,2	0,3	0,45	0,75	1	1,7	2,5	3	4
2,5	0,18	0,265	0,40	0,67	0,9	1,5	2,24	2,65	3,55
3,15	0,16	0,235	0,35	0,6	0,8	1,32	2	2,35	3,15
4	0,14	0,212	0,31	0,53	0,71	1,18	1,8	2,12	2,8
5	0,14	0,212	0,31	0,53	0,71	1,18	1,8	2,12	2,8
6,3	0,14	0,212	0,31	0,53	0,71	1,18	1,8	2,12	2,8
8	0,14	0,212	0,31	0,53	0,71	1,18	1,8	2,12	2,8
10	0,18	0,265	0,40	0,67	0,9	1,5	2,24	2,65	3,55
12,5	0,224	0,335	0,50	0,85	1,12	1,9	2,8	3,35	4,5
16	0,28	0,425	0,63	1,06	1,4	2,36	3,55	4,25	5,6
20	0,355	0,53	0,80	1,32	1,8	3	4,5	5,3	7,1
25	0,45	0,67	1,00	1,7	2,24	3,75	5,6	6,7	9
31,5	0,56	0,85	1,25	2,12	2,8	4,75	7,1	8,5	11,2
40	0,71	1,06	1,60	2,65	3,55	6	9	10,6	14
50	0,9	1,32	2,00	3,35	4,5	7,5	11,2	13,2	18
63	1,12	1,7	2,50	4,25	5,6	9,5	14	17	22,4
80	1,4	2,12	3,15	5,3	7,1	11,8	18	21,2	28

Os valores acima definem o limite em termos de valor eficaz (RMS) da vibração de frequência simples (senoidal) ou valor eficaz na banda de um terço de oitava para a vibração distribuída.

Fonte: Adaptado de (ISO, 1978).

Legenda: Faixa utilizada no estudo ( )

**Tabela 3.** Valores numéricos de “nível de eficiência reduzida” para aceleração de vibração na direção transversa (eixos x e y).

Frequência (centro da banda de 1/3 de oitava)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )								
	Tempo de Exposição								
	24 h	16 h	8 h	4 h	2,5 h	1 h	25 min	16 min	1 min
1	0,1	0,15	0,22	0,355	0,5	0,85	1,25	1,5	2
1,25	0,1	0,15	0,22	0,355	0,5	0,85	1,25	1,5	2
1,6	0,1	0,15	0,22	0,355	0,5	0,85	1,25	1,5	2
2	0,1	0,15	0,22	0,355	0,5	0,85	1,25	1,5	2
2,5	0,125	0,19	0,28	0,45	0,63	1,06	1,6	1,9	2,5
3,15	0,16	0,236	0,35	0,56	0,8	1,32	2	2,36	3,15
4	0,2	0,3	0,45	0,71	1	1,7	2,5	3	4
5	0,25	0,375	0,56	0,9	1,25	2,12	3,15	3,75	5
6,3	0,315	0,475	0,71	1,12	1,6	2,65	4	4,75	6,3
8	0,4	0,6	0,90	1,4	2	3,35	5	6	8
10	0,5	0,75	1,12	1,8	2,5	4,25	6,3	7,5	10
12,5	0,63	0,95	1,40	2,24	3,15	5,3	8	9,5	12,5
16	0,8	1,18	1,80	2,8	4	6,7	10	11,8	16
20	1	1,5	2,24	3,55	5	8,5	12,5	15	20
25	1,25	1,9	2,80	4,5	6,3	10,6	16	19	25
31,5	1,6	2,36	3,55	5,6	8	13,2	20	23,6	31,5
40	2	3	4,50	7,1	10	17	25	30	40
50	2,5	3,75	5,60	9	12,5	21,2	31,5	37,5	50
63	3,15	4,75	7,10	11,2	16	26,5	40	45,7	63
80	4	6	9,00	14	20	33,5	50	60	80

Fonte: Adaptado de (ISO, 1978)

Legenda: Faixa utilizada no estudo ( )

Para geração dos demais gráficos, os valores de nível de eficiência reduzida (NER) apresentados nas Tabelas 2 e 3 foram divididos por 3,15, para a confecção da curva de NCR, e multiplicados por 2, para LE, gerando então os limites de tais especificações.

Os resultados foram comparados aos valores recomendados pela norma ISO 2631 (ISO, 1978), para os valores de limite de exposição (LE), nível de conforto reduzido (NCR) e nível de eficiência reduzida (NER), ambos considerando o período diário de trabalho de oito horas.

### 3.4. Modelos mistos

Os dados vindos dos tratores são encaminhados para o Excel, e é gerada uma planilha para cada um dos três eixos contendo cada eixo os três terrenos estudados, ou seja, são geradas 9 planilhas de Excel. Para esse estudo os dados foram rearranjados para somente 3 planilhas, em que cada uma das planilhas representava um eixo diferente x, y ou z.

Os dados referentes aos 7 tratores (aceleração, potência, horas e peso), foram realocados um abaixo do outro, de forma que os dados se disponibilizassem de forma longitudinal.

As 8 colunas presentes do arquivo de Excel estudado foram na sequência:

- amostra (número da ensaio realizado)
- freq (frequência em Hz)
- aceleracao (aceleração em  $\text{ms}^{-2}$ )
- asfalto (terreno de estudo)
- terra (terreno de estudo)
- potência (potência do trator em cv)
- horas (unidade de medida de tempo)
- peso (medido em Kg, unidade de medida de massa).

A variável campo não foi criada, pois ela serviu de referência para os demais dois terrenos (asfalto e terra), assim não havendo a necessidade de criar mais uma variável. O arquivo de Excel gerado com essas 8 tabelas agora é salvo em .CSV (separado por vírgulas).

Para a aplicação dos modelos mistos e o uso do nosso dado gerado em .CSV, tivemos que criar uma programação na linguagem R, para que os dados fossem lidos, e assim como mostrado a Figura 8 abaixo, fosse desenvolvida uma programação para a utilização dos modelos mistos.

```

1 #####FINAL
2 #####EIXO X , Y , Z
3 #####FINAL
4
5 caminho<-"c:\\Users\\windows\\Desktop\\DOUTORADO TESE\\R\\" #reconhecer diretório do arquivo
6 dados<-read.table(paste(caminho,"FINAL_EIXO_X_FINAL.csv",sep=""),h=T,sep=",") #abrir o arquivo
7 options(max.print = .Machine$integer.max) #maximizar o número de linhas que aparecem no R
8 dados[1:15,] #mostrar parte dos dados estudados
9 dim(dados) #dimensionar os dados
10 attach(dados) #anexar os dados
11
12 #
13 #
14 indiv<-as.numeric(dados[,1]) #Colocar a variável resposta Y, como a variável aceleracao
15 m=length(table(indiv)) #número de unidades experimentais
16 repl=table(indiv) #número de replicações para cada unidade experimental em um único eixo
17 n=length(indiv) # total de medições em cada eixo
18 n
19 #
20
21 freq2<-freq^2 #Gerar uma nova variável, que será o quadrado da frequência atual
22
23
24 mod1<-lm(acceleracao~freq+asfalto+terra+potencia+horas+freq2+peso) #Rodar o modelo numa regressão linear padrão
25 summary(mod1) #abrir o modelo
26 plot(fitted.values(mod1),residuals(mod1)) #plotar seu gráfico
27
28 #####
29 ##### ajustando um modelo linear misto
30 #####
31 #
32 #####
33 #
34 library(nlme) #biblioteca referente ao modelo linear misto
35 #
36 #
37 modelo<-nlme(acceleracao~freq+asfalto+terra+potencia+horas+freq2+peso, random = ~ freq-1 | amostra, method="ML",
38 summary(modelo)
39 plot(fitted.values(modelo),residuals(modelo))
40 #
41 beta<-round(modelo[[4]]$fixed,3) # estimativa dos efeitos fixos
42 beta
43 b<-round(modelo[[4]]$random$amostra,3) # estimativa dos efeitos aleatórios para cada curva
44 b

```

**Figura 8.** Programação na Linguagem R da modelagem por métodos mistos do estudo da vibração em tratores agrícolas.

Os pontos chaves da programação acima foi criar a variável `freq2`, que na verdade são os valores da frequência normal elevados ao quadrado. Isso foi feito pois a curva dos pontos plotados da frequência é uma parábola, já que se comporta de maneira similar a uma progressão geométrica, então foi necessária a criação dessa nova “coluna” no banco de dados, pois sem ela o modelo teria muita dificuldade de convergir.

Logo após foi feita uma regressão linear padrão com todas as covariáveis, para identificar e comprovar que métodos mais tradicionais de estatística não conseguiriam trabalhar com esses dados, e isso foi visto pelo gráfico de seus resíduos.

Em seguida foi requisitada a biblioteca (`nlme`), que é a biblioteca responsável por trabalhar com modelos lineares mistos, e para rodar o modelo a disposição de nossas variáveis ficou da seguinte forma:

Variável Resposta Y: aceleração

Variáveis de Efeito Fixo: frequência, asfalto, terra, potência, horas, `freq.2` e peso

Variáveis de Efeito Aleatório: frequência.

Não é um problema a variável frequência ser correspondente nos efeitos aleatórios e também nos fixos, na verdade isso é uma prática comum. Além disso, como só foi escolhido um efeito aleatório, toda a modelagem ficou mais simples, ou seja, quanto mais efeitos aleatórios, além de ser mais difícil de convergir, maior é a complexidade dos cálculos feitos.

Após rodar o comando “summary”, é visto várias informações sobre o delineamento em modelos mistos dos dados trabalhados, mas o principal deles é o p-valor, esta probabilidade se refere ao grau de significância da covariável analisada para com o modelo, nesse estudo foi usado o nível de significância de até 5%.

Se alguma covariável encontrada não for significativa, ela sai do modelo para que o modelo seja melhor dimensionado sem ela. E é rodado o lme novamente, e então produzindo seu gráfico. E chegando ao fim, é calculado tanto o  $\beta$  quanto o  $b_i$ . Tendo em mãos esses dados é possível fazer qualquer curva preditiva do sistema, lembrando que foram feitas três programações, uma para cada eixo.

### 3.5. Estrutura do survey

Foi realizado um survey para o experimento, a fim de analisar a ergonomia envolvendo tratores, pela visão de quem tem o trabalho relacionado ao meio agrícola, em três diferentes visões. Após ser decidido que as pessoas que participariam dessa pesquisa seriam do meio agrícola, elas foram separadas em três grupos: Grupo 1 – Operadores de máquinas agrícolas; Grupo 2 – Professores Universitários que tem como área de estudo máquinas agrícolas e Grupo 3 – Profissionais do meio agrícola que trabalham no setor privado na área de máquinas agrícolas.

O formato abordagem para esses três grupos foi: Grupo 1 – Entrevista pessoal; Grupo 2 – Questionário Online e Grupo 3 – Questionário Online. Os tipos de abordagem foram escolhidos a fim de facilitar o acesso do entrevistado as perguntas propostas. O número escolhido de participantes foi de 10 pessoas para cada grupo.

Foram feitas 3 perguntas aos entrevistados, relacionadas a vibração e ergonomia, foram elas:

Pergunta 1 – Na sua opinião, qual o nível de influência que um terreno tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?

- a. Alta
- b. Média
- c. Baixa

Pergunta II – Na sua opinião, qual o nível de influência que características específicas (marca, peso, potência, horas trabalhadas) de um trator tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?

- a. Alta
- b. Média
- c. Baixa

Pergunta III – Na sua opinião, qual é o nível de ergonomia que um operador de trator agrícola tem durante sua jornada diária de trabalho?

- a. Alto
- b. Médio
- c. Baixo





#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de dados analisados no estudo tem a seguinte descrição:

- Os eixos (x, y e z) foram analisados separadamente para uma maior clareza de resultados.
- As frequências ( $f_i$ ) se estendem num intervalo de 1 a 80 Hz, em que  $i = 1; 1.25; 1.6; 2; 2.5; 3.15; 4; 5; 6.3; 8; 10; 12.5; 16; 20; 25; 31.5; 40; 50; 63; 80$ .
- Foi assumido em todos os modelos que a variável resposta  $Y_i$  eram os valores de aceleração.
- Foi criada uma variável derivada da frequência, chamada "freq2", ela eleva ao quadrado todos os valores de  $f_i$ . Essa variável descreve melhor a relação funcional entre frequência e aceleração, já que essa relação não é linear e sim no formato de parábola.
- Foi escolhido como único efeito aleatório do modelo a variável freq (Frequência), ela foi escolhida por ser a única que tem uma relação direta com a aceleração, porém, diversas covariáveis e combinações de covariáveis foram utilizadas, mas o modelo que apresentou uma melhor estimação dos dados, com os menores resíduos foi o que utilizou apenas a freq como efeito aleatório. Contudo a combinação de freq e freq2 se mostrou um modelo tão bom quando o anterior, quando ambas são utilizadas como efeito aleatório. Porém foi decidido apenas adotar a freq como efeito aleatório para a realização de cálculos mais simples.
- A variável trator não existe nas equações, pois o trator já está representado pelas variáveis que retratam suas características como: potência, horas trabalhadas e peso.
- Os três terrenos foram retratos apenas como dois (asfalto e terra), pois o terreno campo foi utilizado como referência na manipulação dos dados. O terreno por ser uma variável categórica, ou seja, não quantitativa, ele aparece no formato de [0,1] quando montadas as colunas de dados no Excel, ou seja, foi criada a coluna "asfalto" e a coluna "terra", quando a amostra era relacionada ao asfalto (Coluna asfalto: 1 | Coluna terra: 0); quando a amostra relacionada era na terra (Coluna asfalto: 0 | Coluna terra: 1) e quando a amostra relacionada era no campo (Coluna asfalto: 0 | Coluna terra: 0), fazendo assim o entendimento da nossa variável para o computador.
- O total de observações para cada eixo foi de ( $N = 2100$ ), sendo  $N = (m \cdot \text{repl}) = 420 \cdot 5$   
 $m = \text{número de unidades experimentais} = 420$   
 $\text{repl} = \text{número de replicações por unidade experimental} = 5$ .
- As variáveis foram todas escritas sem possuírem acento ou cedilha, e ficaram dessa forma:

Nome real | Nome na programação

Aceleração | aceleracao

Frequência | freq

Amostra | amostra

Asfalto | asfalto

Terra | terra

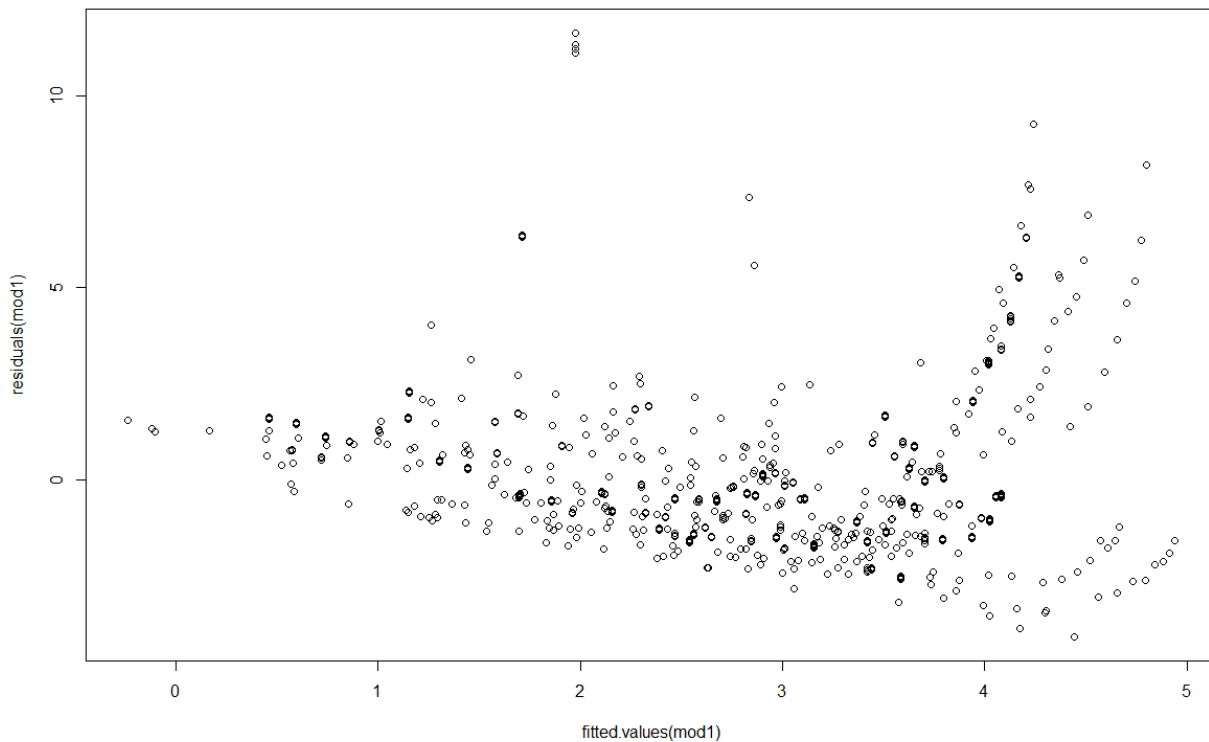
Potência | potencia

Horas | horas

Peso | peso

Frequência ao quadrado | freq2.

Primeiramente foi feita uma análise de regressão padrão ajustando o modelo linear, assumindo independência entre todas as observações e a homoscedasticidade entre seus erros. A Figura 9 representa a sua análise de diagnóstico dos seus valores preditos pelos seus resíduos.



**Figura 9.** Valores preditos versus resíduos do modelo de regressão linear.

Analisando o gráfico de “resíduos x preditos”, concluímos que é inviável assumir independência entre os dados, pois analisando sua distribuição, se nota um aumento no

valor absoluto dos resíduos conforme os dados preditos vão crescendo, ou seja, para valores preditos maiores, o modelo tende a ter resíduos mais variáveis, fato que expressa menor incerteza na predição desses pontos. Portanto, o modelo linear se mostra inadequado para essa análise de dados, o que pode sugerir, que o modelo que melhor se adequa a essa análise pode ser o modelo linear misto, representado na Figura 10 abaixo, que analisou o modelo misto pelo eixo x.

```
Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood
Data: NULL
      AIC      BIC    logLik
-5351.293 -5294.796 2685.646

Random effects:
Formula: ~freq - 1 | amostra
      freq  Residual
stdDev: 0.9387419 0.01649637

Fixed effects:  aceleracao ~ freq + asfalto + terra + potencia + horas + freq2 +      peso
              Value Std.Error   DF   t-value p-value
(Intercept)  8.174468 0.4520541 1679  18.082944 0.0000
freq         -0.585897 0.0982036  413  -5.966139 0.0000
asfalto      -0.717443 0.3053084  413  -2.349895 0.0192
terra        -3.472559 0.3053082  413 -11.373945 0.0000
potencia      0.005804 0.0025738  413   2.254904 0.0247
horas        -0.000386 0.0000427  413  -9.038794 0.0000
freq2         0.009408 0.0025475  413   3.692838 0.0003
peso          0.000003 0.0000214 1679   0.134401 0.8931
```

**Figura 10.** Modelo misto estimado para o eixo x.

Analisando o modelo misto, notamos que todas as covariáveis apresentaram um p-valor significativo a 5%, com a exceção da variável “peso”. Portanto, para um aprimoramento do modelo, decide-se tirar a variável peso da equação, já que ela não é significativa e repetir a aplicação do modelo linear misto aos dados. E com isso temos os dados representados na Figura 11.

Além disso, na Figura 11 podem ser ressaltadas algumas informações como o AIC (Critério de Informação de Akaike) e o BIC (Critério de Informação Bayesiano) que são medidas usadas para comparar modelos estatísticos. Ambos os critérios são amplamente utilizados na seleção de modelos, especialmente em análise de regressão e modelagem estatística. Quanto menor o AIC e BIC, melhor é o ajuste do modelo aos dados, e para esse estudo, após várias tentativas de modelagem, a modelagem que obteve o menor valor de AIC e BIC foi a que está representada na Figura 11, ou seja, chegamos à conclusão que este é o modelo mais ajustado.

```

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood
Data: NULL
      AIC      BIC    logLik
-5353.275 -5302.427 2685.637

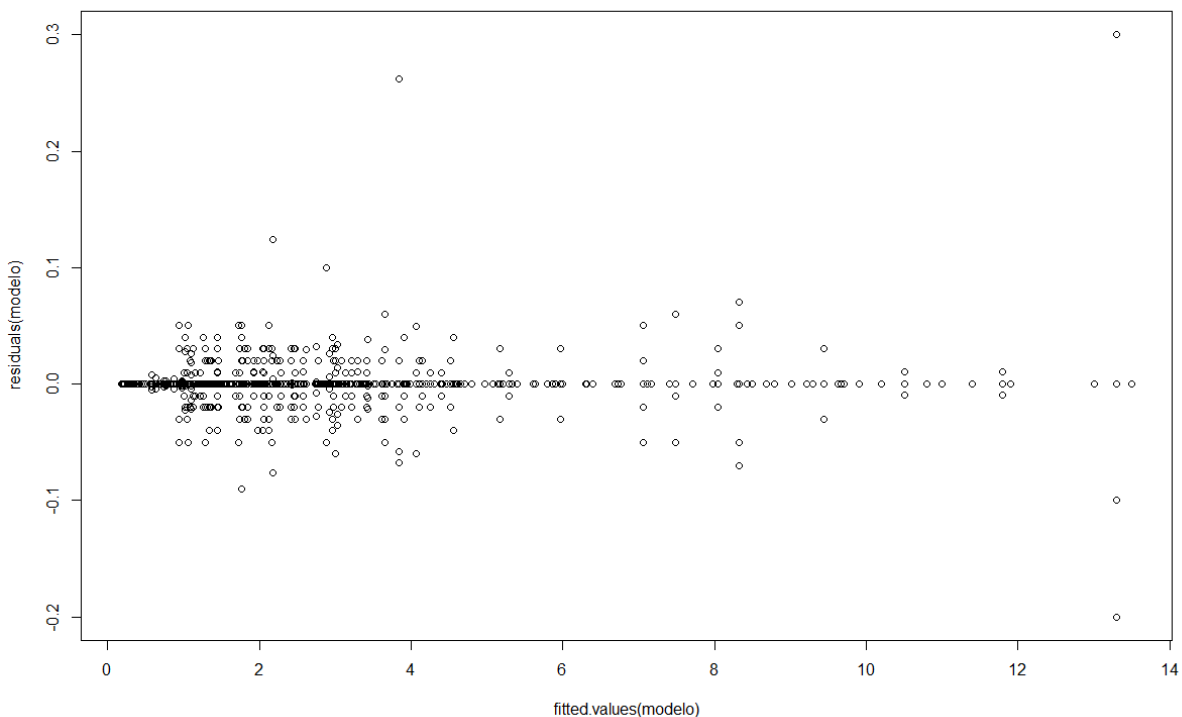
Random effects:
Formula: ~freq - 1 | amostra
      freq Residual
StdDev: 0.9387823 0.01649628

Fixed effects:  aceleracao ~ freq + asfalto + terra + potencia + horas + freq2
              Value Std.Error   DF   t-value p-value
(Intercept)  8.179020 0.4506953 1680  18.147561 0.0000
freq         -0.585891 0.0981844  413  -5.967250 0.0000
asfalto      -0.717485 0.3052484  413  -2.350496 0.0192
terra        -3.472559 0.3052484  413 -11.376174 0.0000
potencia      0.005870 0.0025251  413   2.324736 0.0206
horas        -0.000386 0.0000427  413  -9.057842 0.0000
freq2        0.009407 0.0025470  413   3.693522 0.0003

```

**Figura 11.** Modelo misto estimado para o eixo x sem a variável peso.

Sua análise de resíduos está representada na Figura 12 abaixo.



**Figura 12.** Análise de diagnóstico “resíduos x valores preditos” do modelo misto ajustado para a aceleração no eixo x.

Como dito anteriormente, usando somente a freq como contendo efeito aleatório se obteve a melhor curva de dados, obtendo um modelo com alto grau de predição. Analisando o gráfico acima vemos que os resíduos variam muito pouco em relação a tendência principal

do modelo predito, havendo também um número bem pequeno de outliers. Foram obtidos resultados muito semelhantes quando feita a análise para o eixo y e z.

É notado também que das sete covariáveis estudadas, foi visto que seis delas são significativas, ou seja, elas têm um impacto relevante, no valor médio da vibração, além disso, se os dois terrenos analisados (asfalto e terra) foram significativos, é possível dizer que a nossa referência, que seria o terreno de campo também é uma variável significativa. Fazendo uma análise dos  $\beta$ 's do modelo predito, podemos também fazer algumas estimações sobre a relação dos  $\beta$ 's com a variável asfalto e terra como visto na Tabela 4.

Como dito na revisão sobre modelos mistos, a fórmula utilizada para se chegar num modelo estruturado é:

$$Y_i = X\beta + Zb_i + \epsilon_i, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Com base nos dados do estudo temos 6  $\beta$  além do intercepto, ou seja, temos 6 efeitos fixos,  $\beta = \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ . Os valores de  $\beta$  encontrados aplicando os três modelos estão demonstrados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Valores de  $\beta$  estimados para cada eixo.

	eixo x	eixo y	eixo z	
$\beta_1$	- 0.586	- 0,489	- 0.913	freq.
$\beta_2$	- 0.717	- 0. 659	- 0.37	asfalto
$\beta_3$	- 3.473	- 4.231	-1.911	terra
$\beta_4$	0.006	0.009	0.008	potencia
$\beta_5$	- 0.0003	- 0.003	- 0.005	horas
$\beta_6$	0.009	0.011	0.017	freq2

Fonte: Próprio autor

Analisando a tabela é possível dizer também que tanto o terreno do asfalto, quanto o terreno de terra, possuem  $\beta$  negativos, isso significa que eles são negativos em relação a referência “campo”, ou seja, o valor da aceleração dos tratores no terreno de terra e asfalto são maiores. Pela Tabela 4 notamos que a superfície de asfalto possui um  $\beta$  maior que a superfície de terra, isto é, quando os tratores estão se deslocando pelo asfalto, o operador está exposto a uma maior carga vibração, esta situação pode parecer um pouco incoerente, visto que, normalmente temos superfícies mais irregulares em terrenos de terra do que quando comparadas com terrenos de asfalto, porém, isso pode ser explicado pelas algumas lombadas que existem no lugar em que foi feito o experimento, e por haver lombadas no trajeto em que foi feito o estudo, explica-se os valores de vibração no asfalto serem maiores do que os valores de vibração no terreno de terra.

Com todas os efeitos do modelo calculados, é possível usar o modelo predito, e comparar o quão bem ele prediz as curvas de vibração. Para isso, foram analisados alguns valores, em todos os terrenos, utilizando no mínimo uma vez todos os tratores. Os resultados abaixo mostram as duas curvas, tanto a da amostra em si, quanto a curva predita, quase se sobrepondo, isso mostra que o modelo está muito bem ajustado e pode até mesmo ser usado para a análise de futuros tratores, e obter resultados de seu comportamento, sem nem mesmo colocar esses tratores para trabalhar.

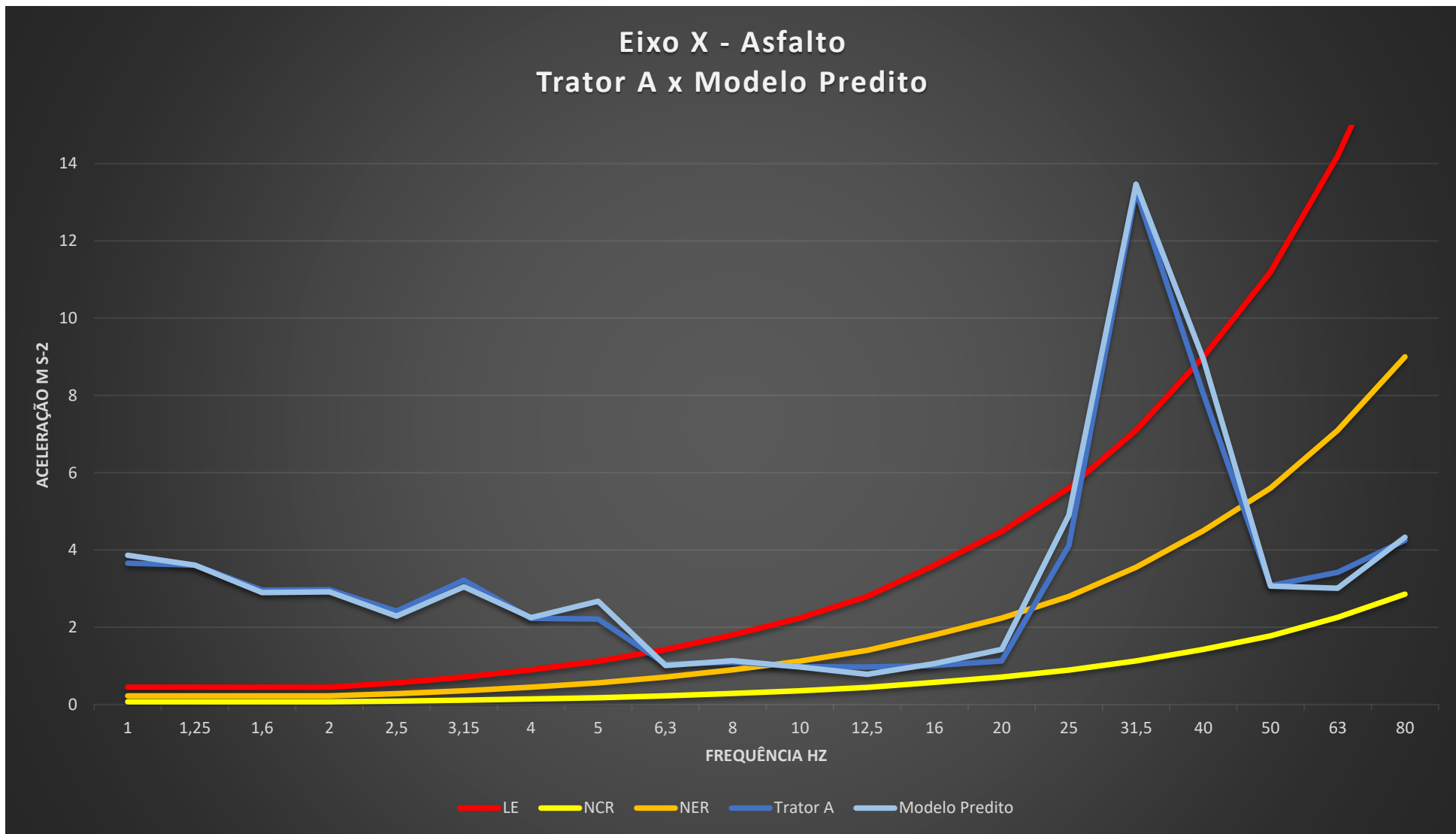
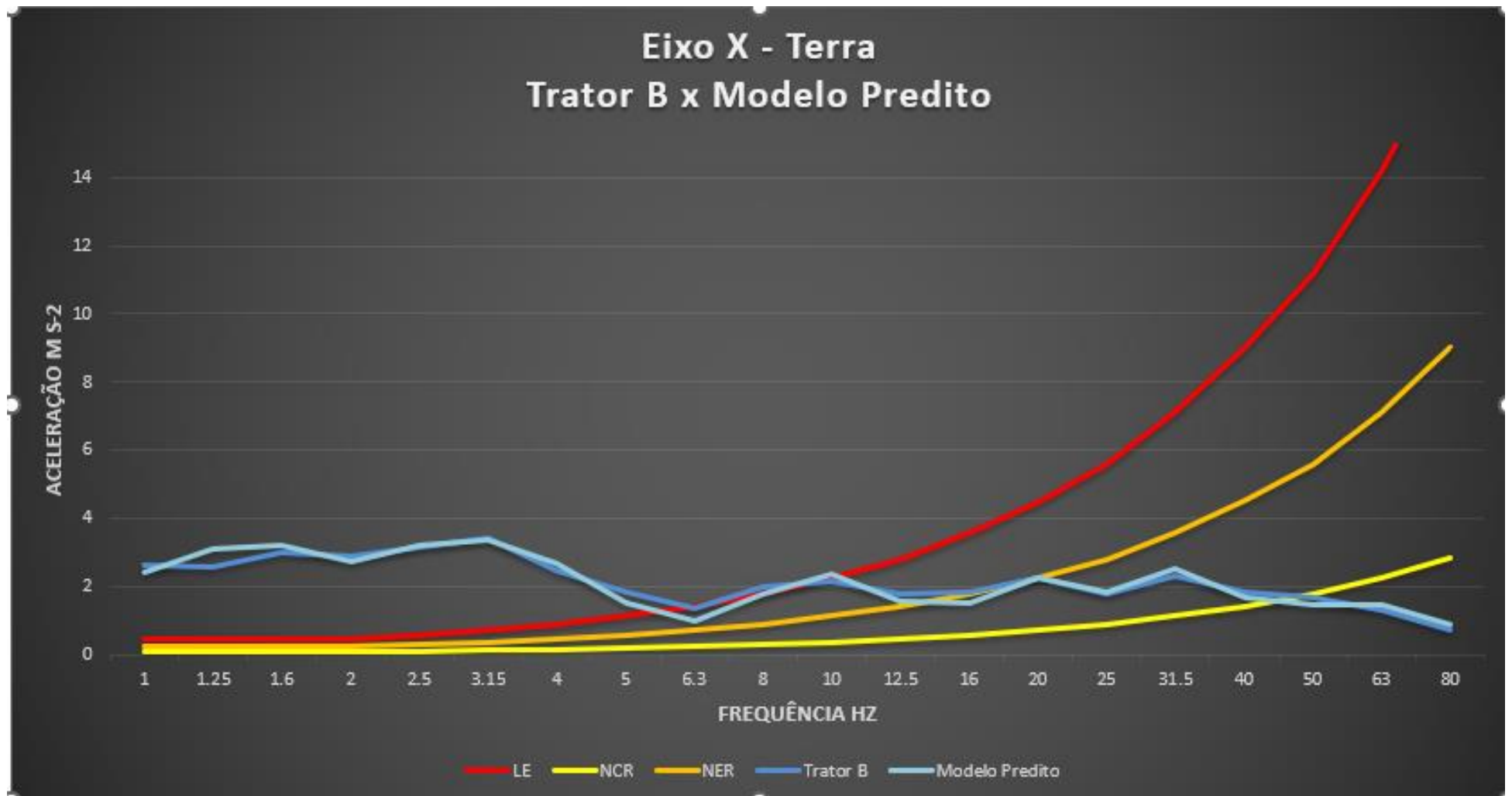
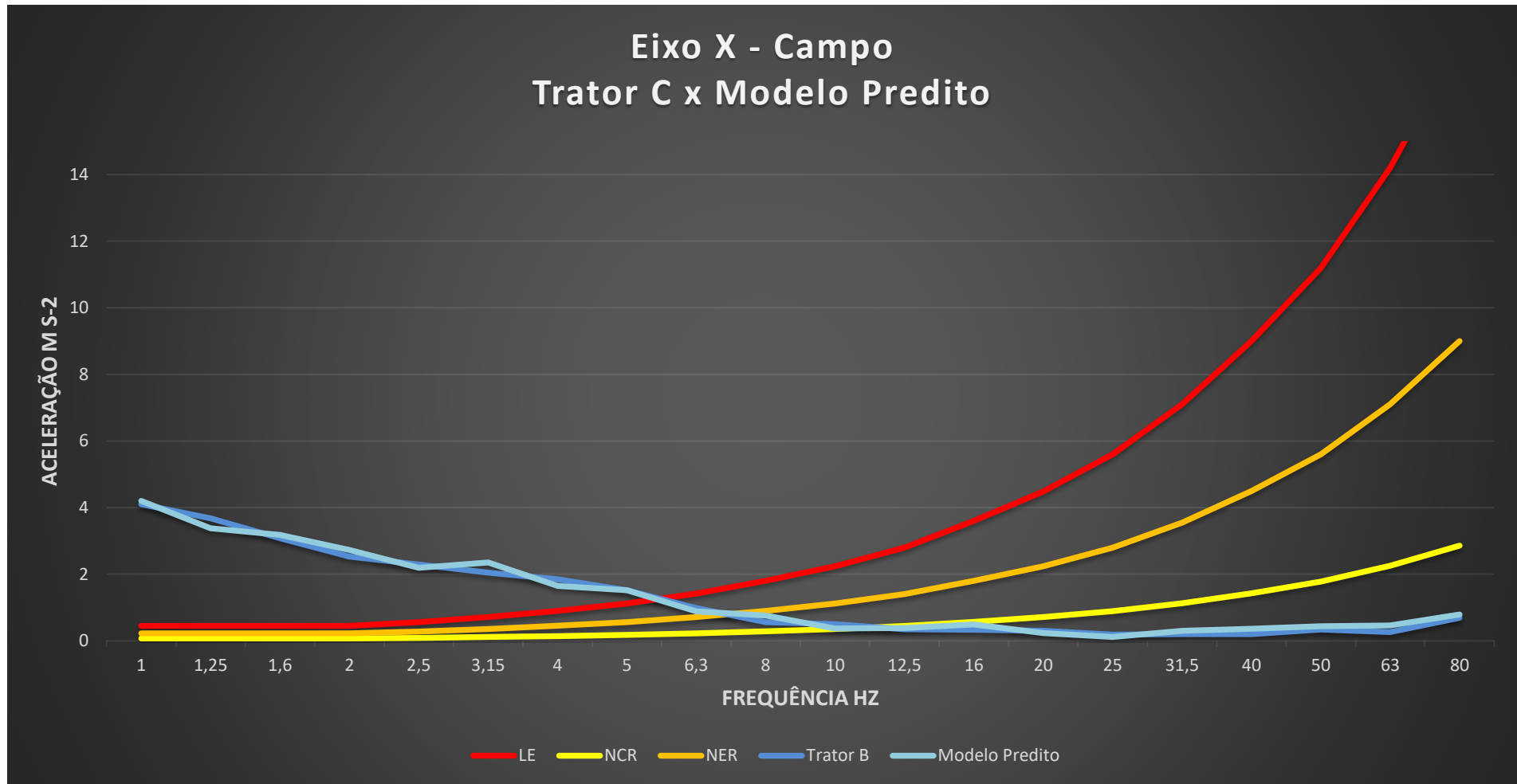


Figura 13. Comparação de curvas entre o Trator A e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Asfalto)

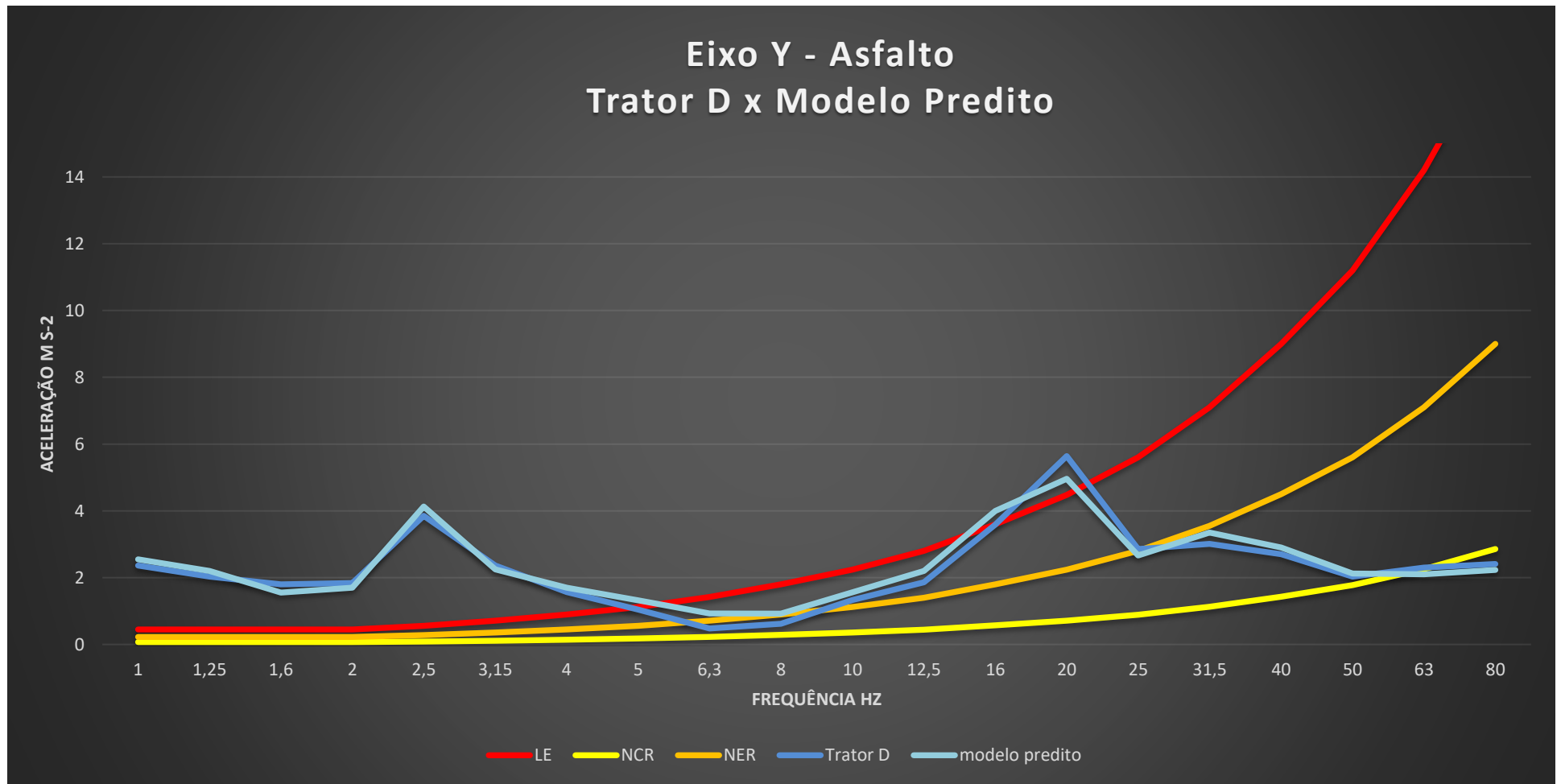




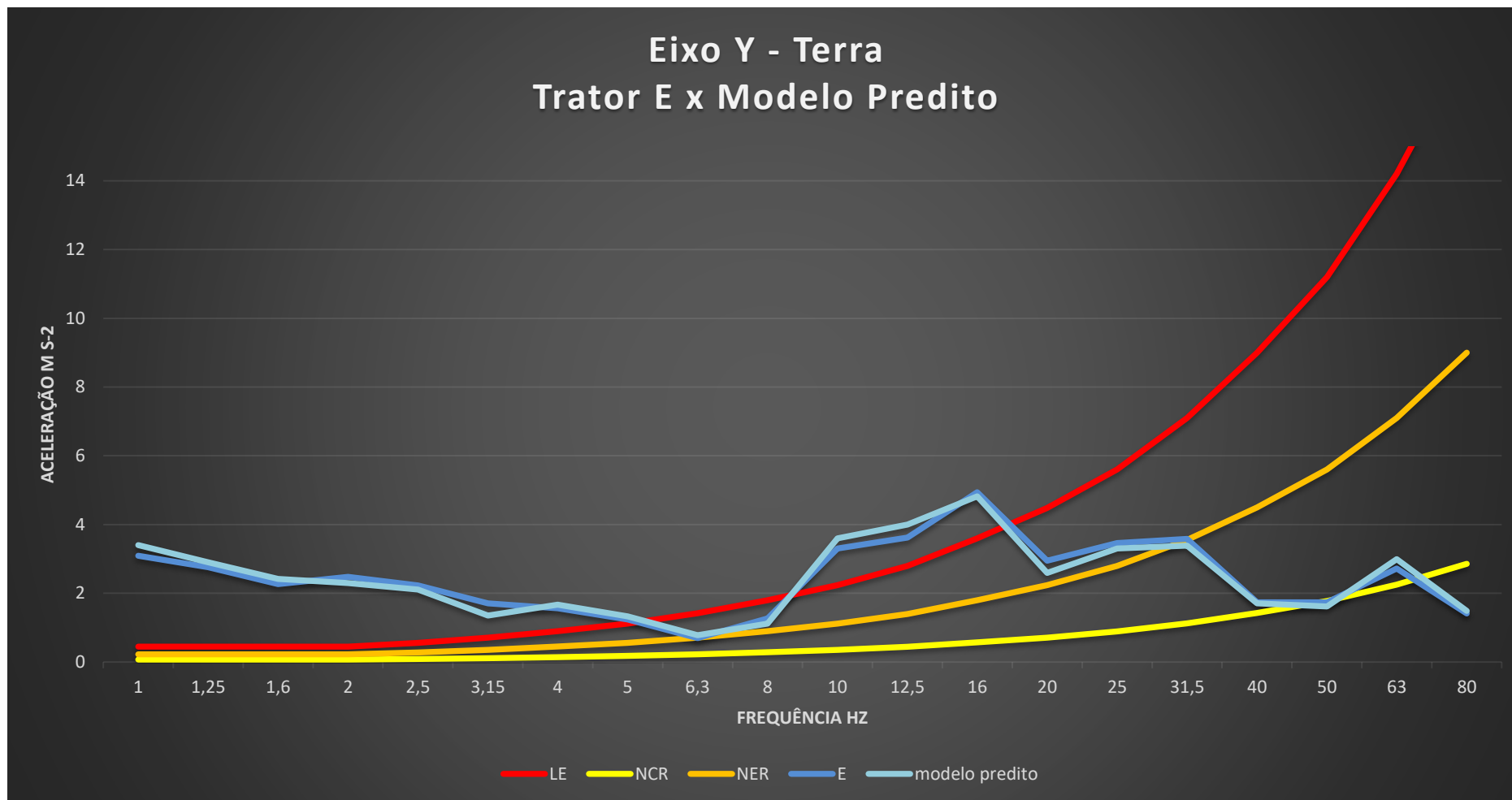
**Figura 14.** Comparação de curvas entre o Trator B e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Terra).



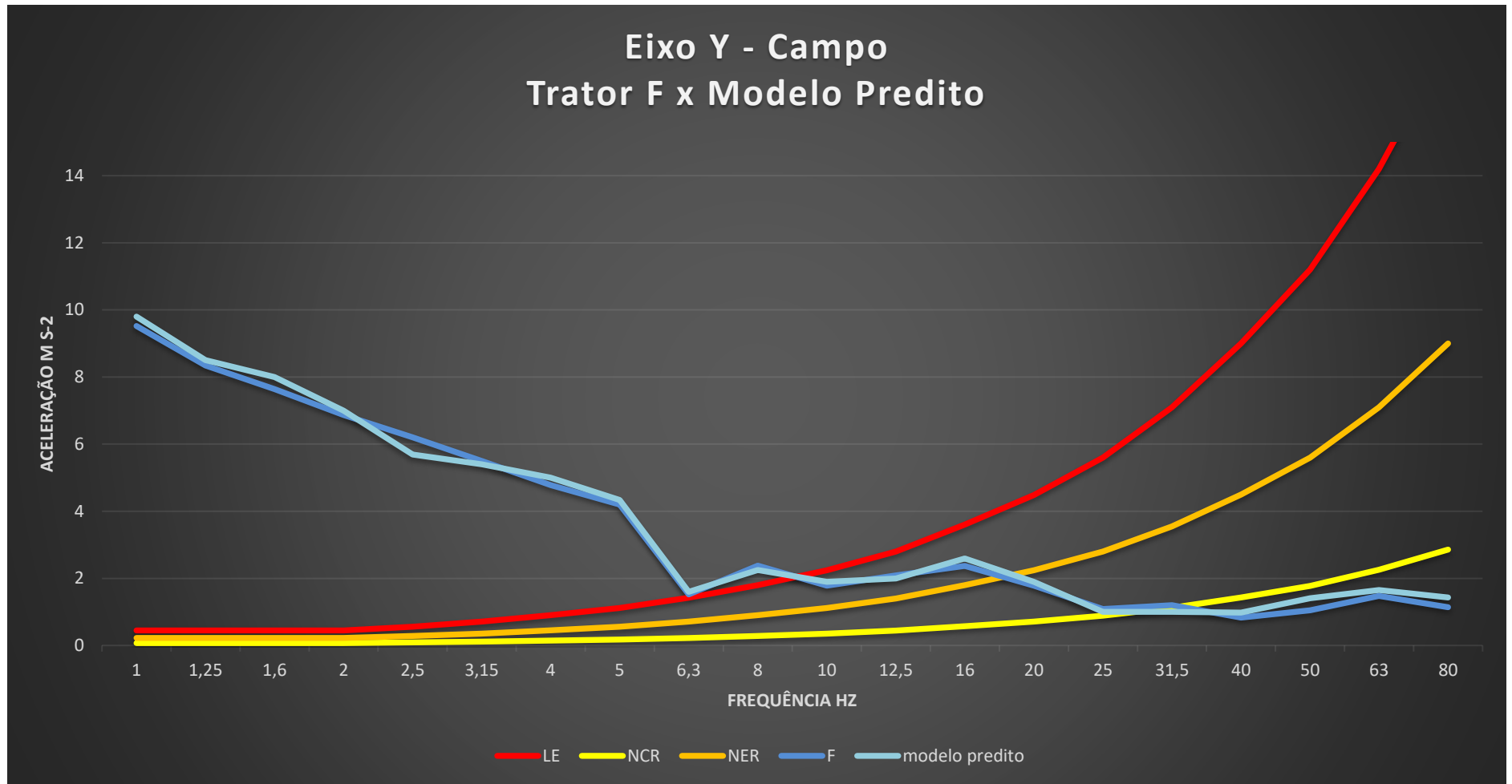
**Figura 15.** Comparação de curvas entre o Trator C e o Modelo Predito (Eixo: X, Superfície Campo).



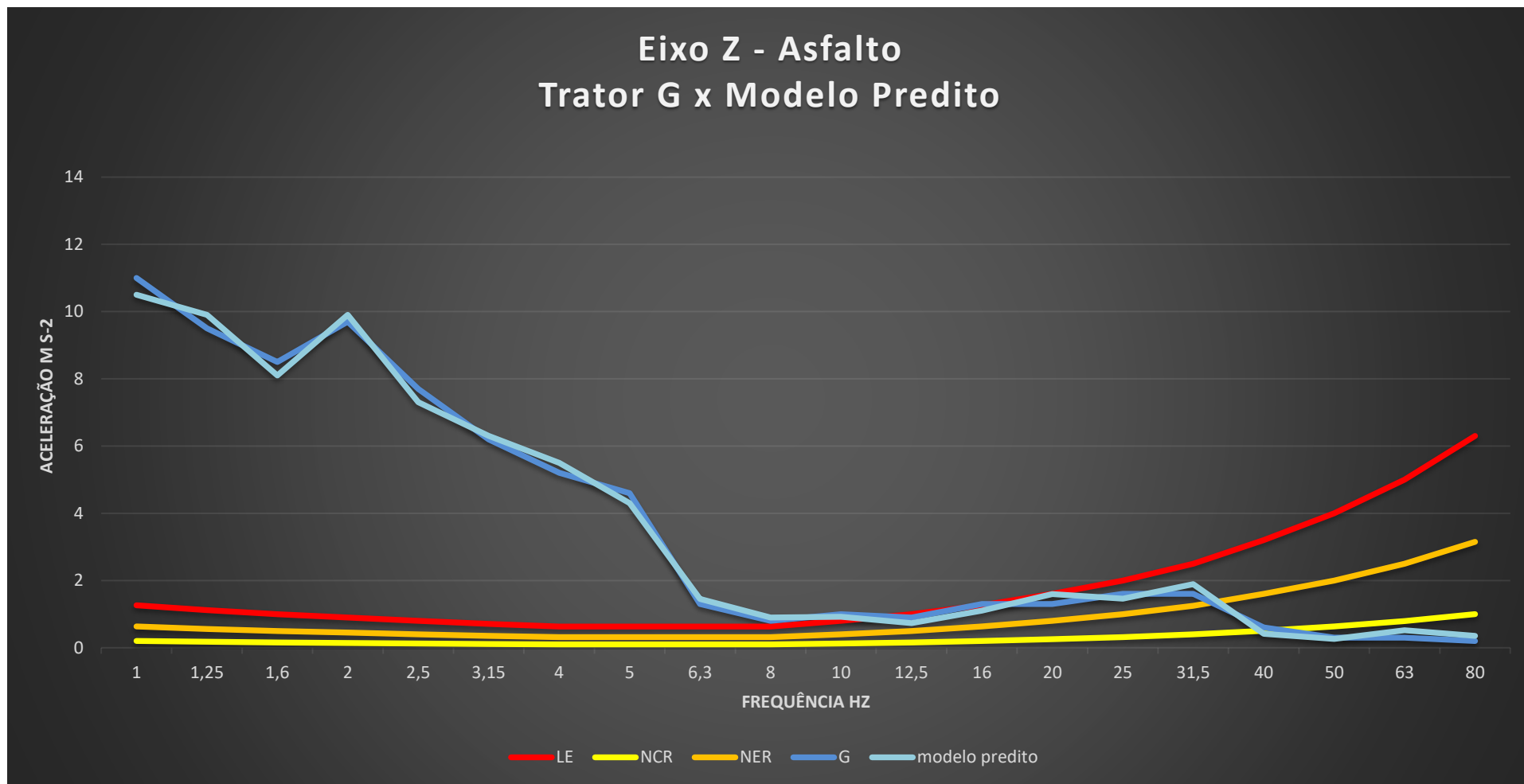
**Figura 16.** Comparação de curvas entre o Trator D e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Asfalto).



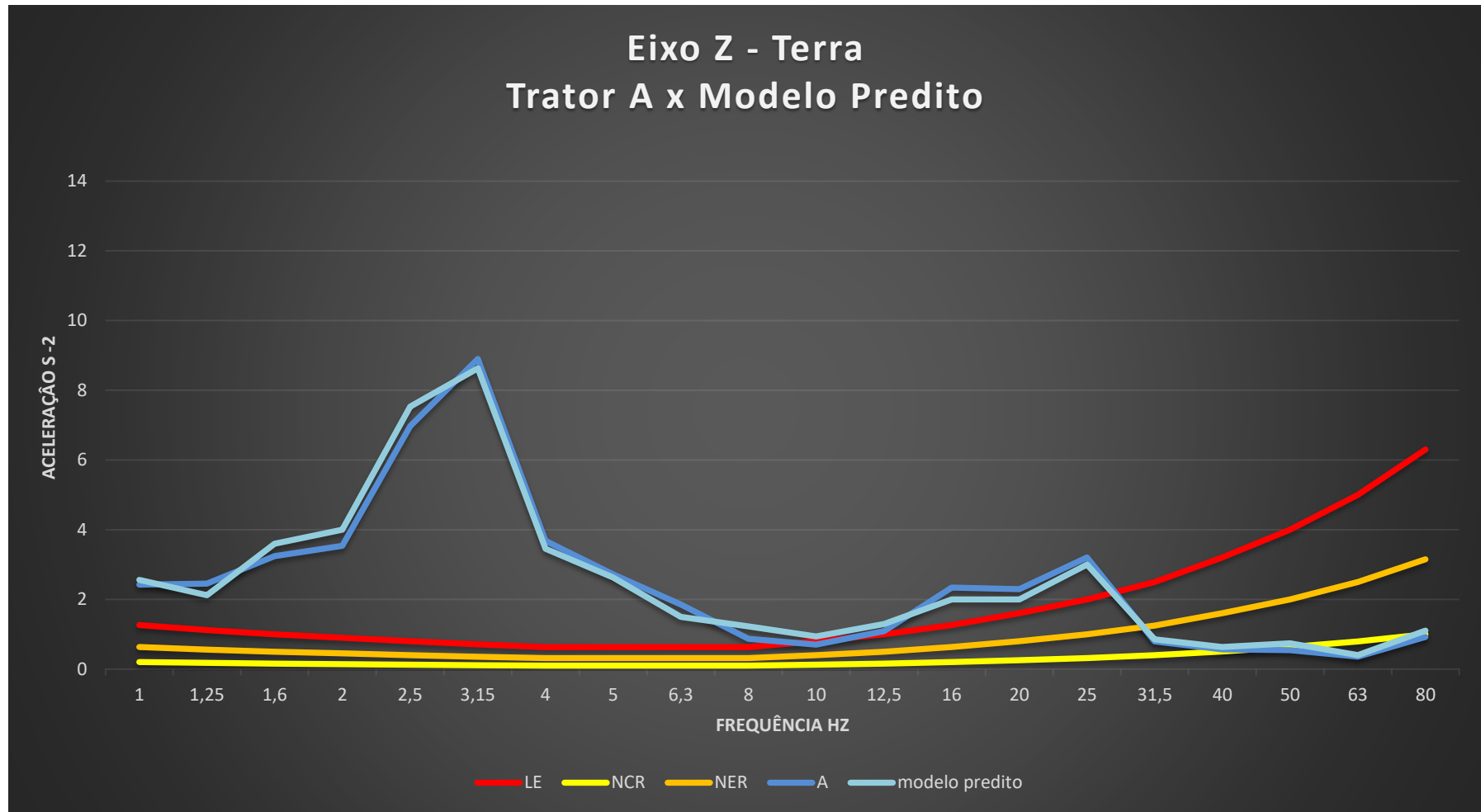
**Figura 17.** Comparação de curvas entre o Trator E e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Terra).



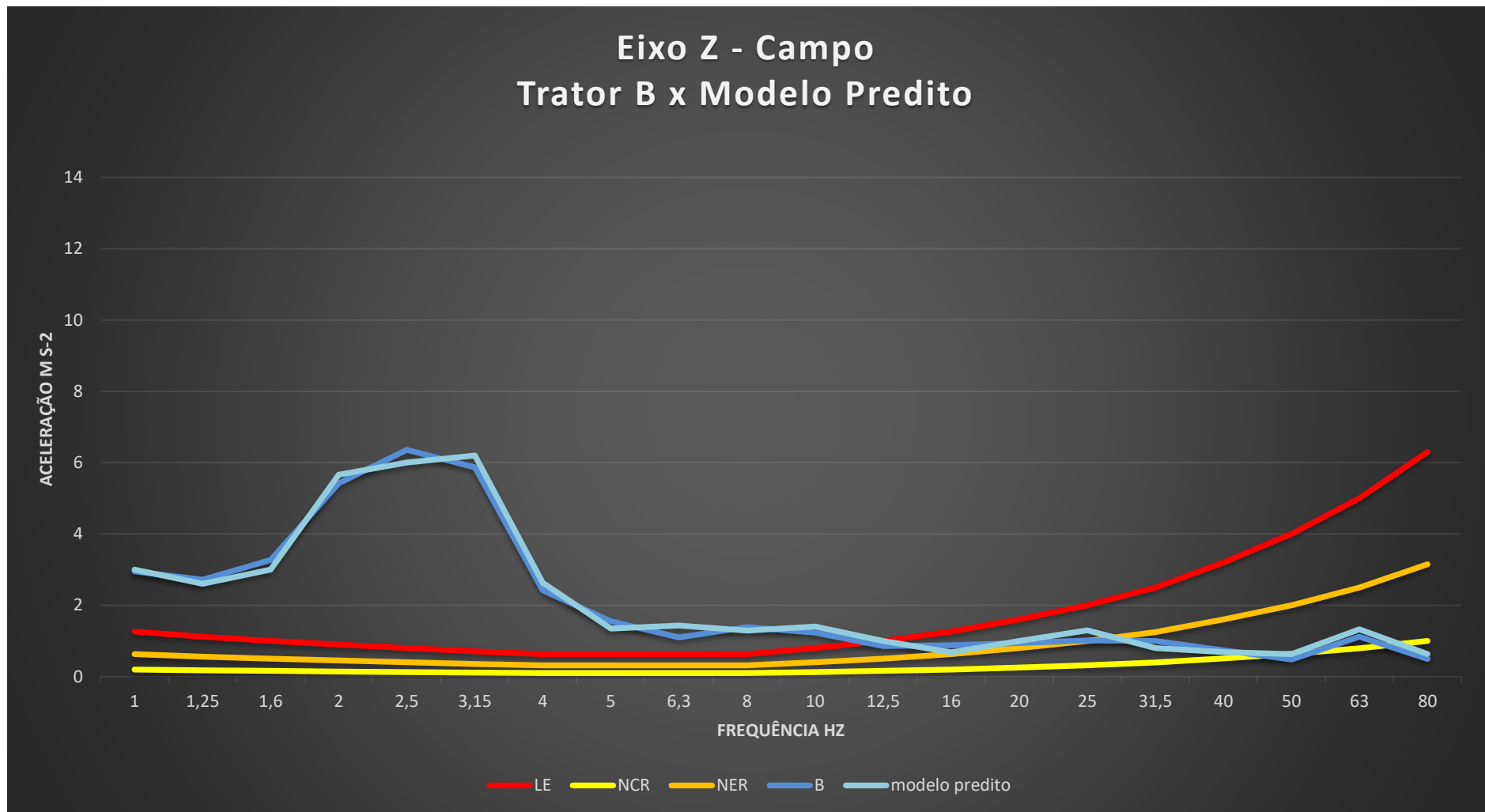
**Figura 18.** Comparação de curvas entre o Trator F e o Modelo Predito (Eixo: Y, Superfície Campo).



**Figura 19.** Comparação de curvas entre o Trator G e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Asfalto).



**Figura 20.** Comparação de curvas entre o Trator A e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Terra).



**Figura 21.** Comparação de curvas entre o Trator B e o Modelo Predito (Eixo: Z, Superfície Campo).



Em relação ao survey realizado, foram obtidos os seguintes resultados.

**Tabela 5.** Respostas obtidas para a pergunta I do questionário: “Na sua opinião, qual o nível de influência que um terreno tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?”.

Pergunta 1	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Alta	100%	60%	80%
Média	0%	20%	10%
Baixa	0%	20%	10%

Fonte: próprio autor

**Tabela 6.** Respostas obtidas para a pergunta II do questionário: “Na sua opinião, qual o nível de influência que características específicas (marca, peso, potência, horas trabalhadas) de um trator tem, na vibração que um operador de trator sofre durante o trabalho?”.

Pergunta 2	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Alta	90%	70%	90%
Média	10%	10%	0%
Baixa	0%	20%	10%

Fonte: próprio autor

**Tabela 7.** Respostas obtidas para a pergunta III do questionário: “Na sua opinião, qual é o nível de ergonomia que um operador de trator agrícola tem durante sua jornada diária de trabalho?”.

Pergunta 3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Alta	0%	0%	10%
Média	0%	10%	30%
Baixa	100%	90%	60%

Fonte: próprio autor

Em relação as perguntas I e II, as respostas obtidas pelos três grupos foram ao encontro dos resultados obtidos na análise estatística dos sete tratores que participaram do presente estudo. Esta correspondência de ambas as análises relacionadas a vibração em tratores agrícolas, tanto pelo estudo em campo através dos tratores agrícolas quanto pelas

entrevistas feitas, faz com que o estudo como um todo tenha uma maior validação quanto aos seus resultados, visto que as respostas de dois tipos distintos de análises quantitativas obtiveram resultados semelhantes.

No que se refere a pergunta III, também obtivemos pelo survey, um resultado semelhante aos resultados observados pelos gráficos gerados por este estudo, mais precisamente, os gráficos representados pelas Figuras de 13 a 21 acima. E se nota que tanto pelos resultados gráficos quanto pelos resultados obtidos nas entrevistas, convergimos a mesma conclusão que os operadores de máquinas agrícolas em sua maior parte do tempo não trabalham de maneira ergonômica.

Além disso, é observado que dentre os três grupos, o Grupo 1, formado pelos operadores de tratores agrícolas, foi o grupo em que houve a maior concentração em percentual em relação as respostas das três perguntas do questionário, respostas estas, que têm uma correlação maior com os resultados obtidos em campo pela análise dos sete tratores em estudo. Provavelmente, isso ocorreu porque, entre todas as pessoas envolvidas nos três grupos de estudo, os operadores de máquinas agrícolas são os que mais interagem com tratores, ou seja, possivelmente o Grupo 1 deveria mesmo ter as respostas que mais se assemelham, em termos percentuais, aos resultados obtidos por este estudo.



## 5. CONCLUSÕES

A análise dos dados a partir do método de modelos mistos se provou uma ferramenta ideal para este tipo de estudo, pois com ela permite-se uma análise mais individual e desenvolvida de suas variáveis, e com isso se tem uma visão maior sobre os impactos das vibrações em tratores agrícolas e assim, proporcionar análises mais detalhadas sobre o tema.

Complementando essa análise, foi realizado um survey com perguntas relacionadas a vibração e ergonomia relacionadas a vibração e ergonomia em tratores agrícolas, e notou-se que houve uma grande semelhança nas respostas geradas entre todos os grupos, e o grupo formado por operadores de máquinas agrícolas foi o que teve as respostas mais similares com os resultados obtidos neste estudo, uma possível razão para isso, é a proximidade dessas pessoas com o trabalho direto com tratores agrícolas em relação aos demais grupos.

Além disso, também foi criado um modelo estatístico para o estudo que obteve um grau de estimação alto, o que nos permite fazer novas e futuras estimações de vibração, para tratores de mesma marca, e com potência, peso e horas trabalhadas semelhantes. Por fim, esse estudo por ter alto grau de replicação, espera inspirar novas pesquisas no campo da ergonomia, a fim de agregar mais conhecimento a essa área de estudo.



## REFERÊNCIAS

- BENOS, L., TSAOPOULOS, D., BOCHTIS, D., **A review on ergonomics in agriculture. Part I: Manual operations Applied Sciences**, 10 (6), p. 190, 2020.
- BERASATEGUI, M. B. R. **Modelización y simulación del comportamiento de um sistema mecánico com suspensión aplicado a los asientos de los tractores agrícolas**. 264 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2000.
- BOSHUIZEN, H.C.; BONGERS, P.M.; HULSHOF, C.T.. **Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration**. *Int Arch Occup Environ Health*; 62: p. 109–115, 1990.
- BRAUER, M., CURTIN, J.J., **Linear mixed-effects models and the analysis of nonindependent data: a unified framework to analyze categorical and continuous independent variables that vary within-subjects and/or within-items Psychol. Methods**, 23 (3), pp. 389-411, 2018.
- BURSTROM, L., NILSSON, T., WAHLSTROM, J. **Whole-body vibration and the risk of low back pain and sciatica: a systematic review and meta-analysis**. *Int. Archives Occup. Environ. Health* 88 (4), p. 403–418, 2015.
- CHRISTENSEN, L. et al. **Research methods, design, and analysis**. 2011.
- DÖRNYEI, Z.; DEWAELE, J. **Questionnaires in second language research: Construction, administration, and processing**. Taylor & Francis, 2022.
- FETHKE, NATHAN, B. et al. **Whole-body vibration and trunk posture during operation of agricultural machinery**. *Annals of work exposures and health*, v. 62, n. 9, p. 1123-1133, 2018.
- FRANCHINI, D. **Análise do nível de vibrações verticais no assento de um trator agrícola**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- GRIFFIN, M.J. **Discomfort from feeling vehicle vibration**. *Syst. Dyn.*, 45, pp. 679-698, 2007.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631: Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration**. 2. ed. Geneva: ISO, 1978.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9241:210 Ergonomics of human system interaction - Part 210: Human-centered design for interactive systems**. 2. ed. Geneva: ISO, 2009.
- JOHNSON, P.W., Dennerlein, J.T., Ramirez, L.M., Arias, C., Escallón, A.C.R., Aulck, L., Piedrahita, H., Barrero, L.H. **Assessment of continuous and impulsive whole body vibration exposures in heavy equipment mining vehicles**. In: *Proceedings of the 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, Melbourne, Australia, 2015.

- KIM, J.H., ZIGMAN, M., AULCK, L.S., IBBOTSON, J.A., DENNERLEIN, J.T., JOHNSON, P.W. **Whole body vibration exposures and health status among professional truck drivers: a cross-sectional analysis.** *Ann. Occup. Hyg.* 60 (8), p. 936–948, 2016.
- KYUHYUN, S.; HWAYOUNG, L.; YOON, J. W.; CHANHO, C.; HWANG, S. H. **Effectiveness evaluation of hydro-pneumatic and semi-active cab suspension for the improvement of ride comfort of agricultural tractors.** *Journal of terramechanics*, v. 69, n. 1, p. 23-32, 2017.
- LOUTRIDIS, S., GIALAMAS, T., GRAVALOS, I., MOSHOU, D., KATERIS, D. XYRADAKIS, P., TSIROPOULOS, Z. **A study on the effect of electronic engine speed regulator on agricultural tractor ride vibration behavior.** 2003.
- MANDAPURAM, S.; PAKHEJA, S.; BOILEAU, P.E., et al. **Energy absorption of seated body exposed to single and three-axis whole body vibration.** *J Low Freq Noise Vib Active Control*, 34: p. 21–38, 2015.
- MATUSCHEK, H., KLIEGL, R., VASISHTH, S., BAAVEN, H., BATES, D., **Balancing Type I error and power in linear mixed models** *J. Mem. Lang.*, 94, pp. 305-315, 2017.
- PARK, D. J., CHOI, J.T., SONG, S.J. **Attention decrease of drivers exposed to vibration from military vehicles when driving in terrain conditions** *Int. J. Ind. Ergon.*, 72, pp. 363-371, 2019.
- PERUZZINI, M., GRANDI, F., PELLICCIARI, M., CAMPANELLA, C.E., **User Experience Analysis Based on Physiological Data Monitoring and Mixed Prototyping to Support Human-Centred Product Design.** In: Rebelo F., Soares M. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 77, pp. 401–412, 2019.
- RAUSER, E.S.C., WILLIAMS, J. **Trucking Industry: Examining Injuries for Prevention, 2006-2012.** Washington State Department of Labor & Industries, 2014.
- ROMANO, ELIO et al. **Assessment of comfort variation among different types of driving agricultural tractors: traditional, satellite-assisted and semi-automatic.** *International journal of environmental research and public health*, v. 17, n. 23, p. 8836, 2020.
- SCARLETT, A.; PRICE, J.; SEMPLE, D.; STAYNER, R. **Whole-body vibration on agricultural vehicles.** Research report, Silsoe Research Institute and RMS Vibration Test Laboratory for the Health and Safety Executive, 2005.
- SINGH, A., SAMUEL, S., SINGH, H., KUMAR, Y., PRAKASH, C., **Evaluation and analysis of whole-body vibration exposure during soil tillage operation** *Safety*, 7, p. 61, 2021.
- VEHOVAR, V., MANFREDA, K. Overview: online surveys. **The SAGE handbook of online research methods**, p. 143-161, 2017.
- WANG, Q., HUO, Z., XU, ZHANG, W., SHANG, Y., XU, H., **Effects of backrest and seat-pan inclination of tractor seat on biomechanical characteristics of lumbar, abdomen, leg and spine** *Comput Method Biomec*, 1–14 (2022).
- WATSON, R. **Quantitative research.** *Nursing standard*, v. 29, n. 31, 2015.

WINTER, B., WIELING, M., **How to analyze linguistic change using mixed models, growth curve analysis and generalized additive modeling** Journal of Language Evolution, 1 (1), pp. 7-18, 2016.

ZHAO, X., SCHINDLER, C. **Evaluation of whole-body vibration exposure experienced by operators of a compact wheel loader according to ISO 2631-1:1997 and ISO 2631-5:2004.** Ind. Ergon. J. 44 (6), p. 840-850, 2014.





## ANEXOS

### ANEXO A - Analisador de vibração modelo HD-2030HA-WB (Especificações Técnicas)

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS

The HD2030 vibrations analyzer is able to detect the accelerations in four axis. The sensors that can be connected are IEPE type with amplifying integrated electronics, triaxial or monoaxial type. Three axes are grouped in the right channel that supports triaxial or monoaxial type accelerometers; the fourth axis is associated with the left channel that supports monoaxial accelerometers. The instrument analyzes the signal provided by the accelerometers and elaborates the four axes data at the same time. The instrument perform octave or third-octave bands spectrum analysis and statistical analysis.

For Whole-Body measurements, the detected values are indicated in the following tables:

WHOLE BODY											
Weightings [uV]	Fz	Fa	Wb	Wc	Wd	We	Wj	Wk			
	21	14	8	13	13	11	10	9			
Central Frequency octave bands [Hz]	0.5	1	2	4	8	16	32	63	125	250	
Self generated Noise [uV]	8	6	5	3	5	2	2	3	3	3	
Central Frequency third-octave bands [Hz]	0.32	0.4	0.5	0.63	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	
Self generated Noise [uV]	5	5	4	4	4	4	3	3	3	2	
Central Frequency third-octave bands [Hz]	3.2	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	
Self generated Noise [uV]	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
Central Frequency third-octave bands [Hz]	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Self generated Noise [uV]	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2

#### Linearity range

The linearity range is independent from the frequency and it is equal to **80dB**. The maximum measurable level depends on the gain of the input amplifier as indicated in the following table:

Gain [dB]	Lower Limit [mVrms]	Upper Limit [Vrms]
0	0.7	7
10	0.22	2.24
20	0.07	0.7

As an example, following are indicated the linear ranges for two different sensitivity of the accelerometer.

Gain [dB]	Linear range with accelerometer			
	Sensitivity 10mV/g ~ 1mV/m/s <sup>2</sup>		Sensitivity 1V/g ~ 100mV/m/s <sup>2</sup>	
0	0.7 ÷ 7000 m/s <sup>2</sup>	117 ÷ 197 dB	0.7 cm/s <sup>2</sup> ÷ 70 m/s <sup>2</sup>	77 ÷ 157 dB
10	0.22 ÷ 2240 m/s <sup>2</sup>	107 ÷ 187 dB	0.22 cm/s <sup>2</sup> ÷ 22.4 m/s <sup>2</sup>	67 ÷ 147 dB
20	0.07 ÷ 700 m/s <sup>2</sup>	97 ÷ 177 dB	0.07 cm/s <sup>2</sup> ÷ 7 m/s <sup>2</sup>	57 ÷ 137 dB

**Integration Time**

The integration time can be set from a minimum of 1s to a maximum of 99 hours.

**Crosstalk**

The crosstalk between channels is <100dB@1kHz.

**Reference conditions**

- The measure range is the one with input gain equal to 10dB.
- The level is equal to 10mV corresponding to 140dB or 10m/s<sup>2</sup> for an accelerometer with a sensitivity equal to 10mV/g.

**Operating conditions**

- Storage temperature: -25 ÷ 70°C.
- Working temperature: -10 ÷ 50°C.
- Protection Degree: IP64.

**Drift**

- Temperature: ± 0.3dB over the range -10 ÷ 50°C.

**ELECTRICAL FEATURES****Pre-heating time**

Less than 1 minute.

**Power supply**

- Internal batteries: 4 x 1.5 V alkaline or NiMH rechargeable batteries type AA. The instrument does not charge the batteries.
- Autonomy: > 10 hours in acquisition (RUN) mode with good quality alkaline batteries.
- External batteries: it is possible to connect an external battery pack to the instrument through the male connector for external power supply (∅ 5.5mm-2.1mm pin). The positive pole has to be connected to the central pin. The battery has to supply 9÷12V with at least 300mA/h. The maximum limit for external supply is 15V.
- Mains: mains adaptor with 9÷12Vdc/300mA direct voltage.
- Switching off: automatic, it can be disabled.

When the batteries voltage is less than 3.8V, the instrument is not able to measure. However, it is still possible to view and download the memorized data. Under 3.5V the instrument switches itself off automatically. The memorized data, the configuration and the calibration parameters are kept also without power supply.

**Maximum input levels**

The input signal must be in the range 0V÷25V.

**LINE outputs**

- Multi-pole circular connector (LEMO)
- Pre-amplified signal not pondered with an gain equal to 0.1V/V.
- Linearity: 110dB with maximum output level equal to 1.5Vrms.
- Series impedance: 1kΩ
- Typical load: 100kΩ

**TRGOUT output**

- Jack stereo socket ∅ 3.5mm
- Digital output 0 ÷ 3.3V short-circuit protected
- Pull-up impedance : 1kΩ
- Pull-down impedance: 30Ω

**TRGIN input (Advanced Analyzer option)**

- Jack stereo socket  $\varnothing$  3.5mm
- Current input: threshold 0.5mA max 20mA
- Voltage input: threshold 2V max 10V
- Series impedance: 470  $\Omega$

**RS232 Serial Interface:**

- Socket: MiniDin 8 poles.
- Type: RS232C (EIA/TIA574) not isolated
- Baud rate: from 300 to 115200baud
- Data bit: 8
- Parity: None
- Stop Bit: 1
- Flow Control: Hardware
- Cable length: max 15m

**USB Serial Interface:**

- Socket: USB-B
- Type: USB 1.1 o 2.0 with 500mA


**STATISTIC ANALYSIS**

1s sampling.  
1dB classes.

**Calculation and visualization of the statistical graphs.**

Graph of the probability distribution of the levels.  
Graph of the percentile levels from  $L_1$  to  $L_{99}$ .

## ANEXO B - Laudo de calibração do analisador de vibração humana HD-2030HA-WB

 <b>LABORATORI METROLOGICI</b>	Delta OHM S.r.l. 35030 Caselle di Selvazzano (PD) Via Marconi 5 - ITALY Tel. 0039-0498977150 Fax 0039-049635596 - e-mail: : info@deltaohm.com Web Site: www.deltaohm.com
	Pagina 1 di 9 Page 1 of 9

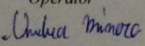
RAPPORTO DI TARATURA N. 20130130V  
*Calibration Report No.*  
**Analizzatore di vibrazioni**

Si riferisce a  
*Referring to*

- Data di emissione <i>date of issue</i>	2013/10/7
- destinatario <i>addressee</i>	Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda - 02911 - 060 Sao Paulo (Brazil)
- richiesta <i>application</i>	017776
- in data <i>Date</i>	2013/09/02
- registro di laboratorio <i>laboratory reference</i>	1030
- data delle misure <i>date of measurements</i>	2012/6/29
- costruttore <i>manufacturer</i>	Delta Ohm S.r.l.
- modello <i>model</i>	HD2030
- matricola <i>serial number</i>	12062930149

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando le procedure citate alla pagina seguente, dove sono specificati anche i campioni di prima linea da cui inizia la catena di riferibilità del Centro e i rispettivi certificati di taratura, in corso di validità. Essi si riferiscono esclusivamente all'oggetto in taratura e sono validi nel momento e nelle condizioni di taratura, salvo diversamente specificato.  
*The measurement results reported in this Certificate were obtained following the procedures given in the following page, where the reference standards are indicated as well, from which starts the traceability chain of the laboratory, and the related calibration certificates in their course of validity. They relate only to the calibrated item and they are valid for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified.*

Le incertezze di misura dichiarate in questo documento sono state determinate conformemente al documento EA-4/02 e sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura  $k$  corrispondente ad livello di fiducia di circa il 95%. Normalmente tale fattore  $k$  vale 2.  
*The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to EA-4/02. They were estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k$  corresponding to a confidence level of about 95%. Normally, this factor  $k$  is 2.*

Lo sperimentatore  
*Operator*  



 Rapporto di taratura n. 20130130V  
 Report of calibration no

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando le procedure N. DHLV - E - 01, per la verifica della conformità del misuratore di vibrazioni alla normativa internazionale ISO 8041:2005.  
 The measurement results reported in this Certificate were obtained following procedures No. DHLV - E - 01, for compliance verification of vibration measuring instrumentation with international standard ISO 8041:2005.

**Incertezze**

Le incertezze di misura dichiarate in questo documento e riportate nella tabella successiva, sono espresse come due volte lo scarto tipo ( $2\sigma$ ), corrispondente, nel caso di distribuzione normale, ad un livello di confidenza di circa 95%.

Prova	Campo di misura [Vrms]	Frequenza di taratura [Hz]	Incertezza associata alla stima [%] e [dB]
- Sovraccarico - - Sottocampo - - Linearità - - Media temporale - - Vettore -	70uV ÷ 7V	Mano-Braccio: 80 Hz Corpo Intero ed Edifici: 16 Hz	2 % 0.17 dB
- Rumore autogenerato - - Risposta in frequenza - - Risposta ai treni d'onda -	10mV ÷ 7V	Mano-Braccio: 2 Hz ÷ 2 kHz Corpo Intero ed Edifici: 0.25 Hz ÷ 250 Hz	3 % 0.25 dB

**Campioni di riferimento**

Campioni di Prima linea	Costruttore	Modello	Numero di serie	Certificato Numero
Multimetro	HP	3458A	2823A21870	INRIM 10-0444-01



Campioni di seconda linea	Costruttore	Modello	Numero di serie
Multimetro	HP	3458A	2823A09516
Gen. Di funzioni	SRS	DS360	33960
Gen. Di funzioni	Agilent	33220A	MY44000238
Unità di commutazione	Agilent	34970A	MY41007306

**Strumentazione in taratura**

Strumento	Costruttore	Modello	Numero di serie
Misuratore di vibrazioni	Delta Ohm S.r.l.	HD2030	12062930149



**ANEXO C - Acelerômetro em formato de assento, modelo 356B41, PCB Piezotronics (Especificações Técnicas)**

Model Number 356B41	<b>TRIAx ICP® SEAT PAD ACCELEROMETER PER ISO 10326-1</b>		Revision: C ECN #: 47343
<b>Performance</b> Sensitivity(± 10 %) 10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> ) Measurement Range ± 98 m/s <sup>2</sup> pk Frequency Range(± 5 %) 0.5 to 1000 Hz [2] Resonant Frequency ≥ 27 kHz [1] Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz) 0.002 m/s <sup>2</sup> rms [3] Non-Linearity ≤ 1 % Transverse Sensitivity ≤ 5 %	<b>ENGLISH</b> 100 mV/g ± 10 g pk 0.5 to 1000 Hz ≥ 27 kHz 0.0002 g rms ≤ 1 % ≤ 5 % ± 2000 g pk -10 to 122 °F <0.10 %/°F	<b>SI</b> 10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> ) ± 98 m/s <sup>2</sup> pk 0.5 to 1000 Hz ≥ 27 kHz 0.002 m/s <sup>2</sup> rms ≤ 1 % ≤ 5 % ± 19,620 m/s <sup>2</sup> pk -23 to 50 °C <0.17 %/°C	<b>OPTIONAL VERSIONS</b> Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
<b>Environmental</b> Overload Limit(Shock) ± 2000 g pk Temperature Range -10 to 122 °F Temperature Response <0.10 %/°F	6.5 to 30 VDC 0.3 to 10 mA ≤ 500 Ohm 2.8 to 4.5 VDC 1 to 3 sec <20 sec 50 µg/√Hz 10 µg/√Hz 4 µg/√Hz 2 µg/√Hz	6.5 to 30 VDC 0.3 to 10 mA ≤ 500 Ohm 2.8 to 4.5 VDC 1 to 3 sec <20 sec 490 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz 98 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz 39 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz 20 (µm/sec <sup>2</sup> )/√Hz	<b>NOTES:</b> [1] Typical. [2] Standard calibration to 100 Hz with sensor in mounting pad. Special calibration above 100 Hz available with sensor outside mounting pad. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.
<b>Electrical</b> Excitation Voltage 6.5 to 30 VDC Constant Current Excitation 0.3 to 10 mA Output Impedance ≤ 500 Ohm Output Bias Voltage 2.8 to 4.5 VDC Discharge Time Constant 1 to 3 sec Settling Time(within 10% of bias) <20 sec Spectral Noise(1 Hz) 50 µg/√Hz Spectral Noise(10 Hz) 10 µg/√Hz Spectral Noise(100 Hz) 4 µg/√Hz Spectral Noise(1 kHz) 2 µg/√Hz	Ceramic Shear Titanium Hermetic 7.87 in x 0.472 in 9.6 oz Integral Cable Side 1/4-28 4-Pin Jack 5 ft 010 4-cond Shielded 5-40 Female	Ceramic Shear Titanium Hermetic 200 mm x 12 mm 272 gm Integral Cable Side 1/4-28 4-Pin Jack 1.5 m 010 4-cond Shielded 5-40 Female	<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b> Model 010G05 Cable (1) Model 081A90 Mounting stud, 10-32 to 5-40 (1) Model ACS-17 NIST Traceable amplitude and phase response calibration from 0.5 to 100 Hz.
<b>Physical</b> Sensing Element Ceramic Sensing Geometry Shear Housing Material Titanium Sealing Hermetic Size (Diameter x Width) 7.87 in x 0.472 in Weight 9.6 oz Electrical Connector Integral Cable Electrical Connection Position Side Cable Termination 1/4-28 4-Pin Jack Cable Length 5 ft Cable Type 010 4-cond Shielded Mounting Thread 5-40 Female	Entered: LK Date: 10/11/2017	Engineer: LM Date: 10/11/2017	Approved: BAM Date: 10/11/2017 Sales: WDC Date: 10/11/2017 Spec Number: 33518
		All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.	
 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043		Phone: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987 E-Mail: info@pcb.com	

**ANEXO D - Laudo de calibração do acelerômetro modelo 356B41, marca PCB Piezotronics.**

## ~ Calibration Certificate ~

Per ISO 16063-21

**Model Number:** 356B41/100-6981-40  
**Serial Number:** 148592 (x axis)  
**Description:** ICP® Triaxial Accelerometer  
**Manufacturer:** PCB      **Method:** Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

<b>Sensitivity @ 100 Hz</b>	<b>103.4 mV/g</b>	<b>Output Bias</b>	<b>4.2 VDC</b>
	<b>(10.54 mV/m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Transverse Sensitivity</b>	<b>3.1 %</b>

### Sensitivity Plot

Temperature: 72 °F (22 °C)      Relative Humidity: 44 %

Data Points					
Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
0.5	0.1	10	0.1	70	-0.5
1	0.9	15	-0.1	REF. FREQ.	0.0
2	0.8	20	-0.2		
5	0.4	30	-0.5		
7	0.2	50	-0.6		

Mounting Surface: Aluminum Fixture    Fastener: Steel    Fixture Orientation: Inverted Vertical  
 Acceleration Level (pk): 1.00 g (9.81 m/s<sup>2</sup>)  
 \*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.183 \* (freq)<sup>0.75</sup>. \*The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s<sup>2</sup>

### Condition of Unit

As Found: n/a  
 As Left: New Unit, In Tolerance

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following: PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 0.5-0.99 Hz; +/- 1.8%, 1-30 Hz; +/- 1.0%, 30.01-199 Hz; +/- 1.5%, 200-1 kHz; +/- 3.0%.

**Technician:** Mike Ferrio MAF      **Date:** 6/20/2013

CALIBRATION CERT #1862.01  
PAGE 1 of 2

3425 Walden Avenue    Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013    FAX: 716-685-3886    www.pcb.com

CAL26-34543/0711-703-0



## ~ Calibration Certificate ~

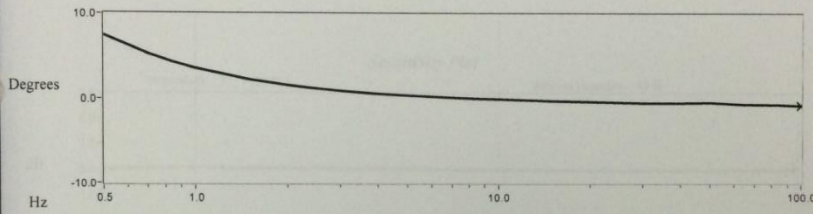
Per ISO 16063-21

Model Number: 356B41/100-6981-40  
 Serial Number: 148592 (x axis)  
 Description: ICP® Triaxial Accelerometer  
 Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz     103.4 mV/g     (10.54 mV/m/s<sup>2</sup>)

### Phase Plot



### Data Points

Frequency (Hz)	Phase (°)	Frequency (Hz)	Phase (°)
0.5	7.4	30	-0.6
1	3.5	50	-0.5
2	1.5	70	-0.7
5	0.3	REF. FREQ.	-0.9
7	0.1		
10	-0.1		
15	-0.3		
20	-0.4		

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following; PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.

Technician: Mike Ferrio MAF Date: 6/20/2013



3425 Walden Avenue     Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013     FAX: 716-685-3886     www.pcb.com



## ~ Calibration Certificate ~

Per ISO 16063-21

Model Number: 356B41/100-6981-40

Serial Number: 148592 (y axis)

Description: ICP® Triaxial Accelerometer

Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz    **105.6 mV/g**    Output Bias    3.6 VDC  
 (10.77 mV/m/s<sup>2</sup>)    Transverse Sensitivity    2.3 %

### Sensitivity Plot

Temperature: 72 °F (22 °C)    Relative Humidity: 43 %

Data Points					
Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
0.5	-0.1	10	-0.3	70	-0.4
1	0.5	15	-0.3	REF. FREQ.	0.0
2	0.4	20	-0.5		
5	0.0	30	-0.7		
7	-0.3	50	-0.8		

Mounting Surface: Aluminum Fixture    Fastener Stud: Fixture Orientation: Vertical  
 Acceleration Level (pk): 1.00 g (9.81 ms<sup>-2</sup>)  
 \*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.187 x (freq)<sup>1.7</sup>    \*\*The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 ms<sup>-2</sup>


### Condition of Unit


As Found: n/a  
 As Left: New Unit, In Tolerance

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following: PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 0.5-0.99 Hz; +/- 1.8%, 1-30 Hz; +/- 1.0%, 30.01-199 Hz; +/- 1.5%, 200-1 kHz; +/- 3.0%.

Technician: Mike Ferrio MAF Date: 6/20/2013

  
ACCREDITED  
CALIBRATION CERT #1822.01

  
**PCB PIEZOTRONICS**  
 VIBRATION DIVISION  
3425 Walden Avenue    Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013    FAX: 716-685-3886    www.pcb.com

CAL28-3454594196-211-06

ACQ-17

## ~ Calibration Certificate ~

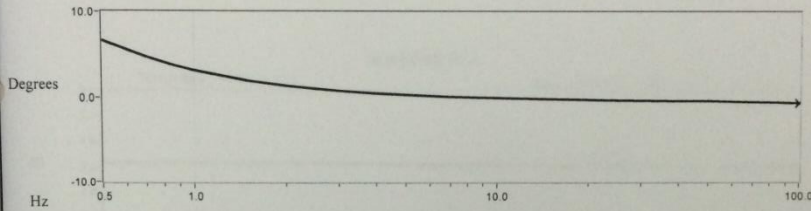
Per ISO 16063-21

Model Number: 356B41/100-6981-40  
 Serial Number: 148592 (y axis)  
 Description: ICP® Triaxial Accelerometer  
 Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz      105.6 mV/g      (10.77 mV/m/s<sup>2</sup>)

### Phase Plot



### Data Points

Frequency (Hz)	Phase (°)	Frequency (Hz)	Phase (°)
0.5	6.6	30	-0.4
1	3.1	50	-0.5
2	1.3	70	-0.6
5	0.3	REF. FREQ.	-0.8
7	0.0		
10	-0.1		
15	-0.2		
20	-0.3		

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following: PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.

Technician: Mike Ferrio MAF Date: 6/20/2013



3425 Walden Avenue      Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013      FAX: 716-685-3886      www.pcb.com





# ~ Calibration Certificate ~

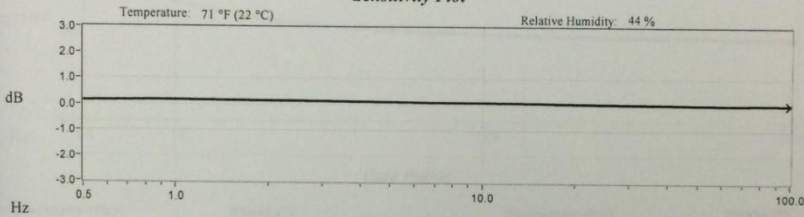
Per ISO 16063-21

Model Number: 356B41/100-6981-40  
 Serial Number: 148592 (z axis)  
 Description: ICP® Triaxial Accelerometer  
 Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz      103.9 mV/g      Output Bias      3.9 VDC  
    (10.59 mV/m/s²)      Transverse Sensitivity      2.1 %

### Sensitivity Plot



### Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
0.5	1.6	10	1.0	70	0.1
1	1.9	15	0.8	REF. FREQ.	0.0
2	1.7	20	0.6		
5	1.3	30	0.4		
7	1.0	50	0.1		

Mounting Surface: Aluminum Fixture    Fixture Stud    Fixture Orientation: Vertical  
 Acceleration Level (g): 1.00 g (9.81 m/s²)  
 \*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.183 \* √(freq)². †The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

### Condition of Unit

As Found: n/a  
 As Left: New Unit, In Tolerance

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following; PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 0.5-0.99 Hz; +/- 1.8%, 1-30 Hz; +/- 1.0%, 30.01-199 Hz; +/- 1.5%, 200-1 kHz; +/- 3.0%.

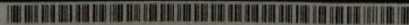
Technician: Mike Ferrio MAF Date: 6/20/2013



3425 Walden Avenue      Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013      FAX: 716-685-3886      www.pcb.com

ACS-17

CAL28-3454160220-448-V0



## ~ Calibration Certificate ~

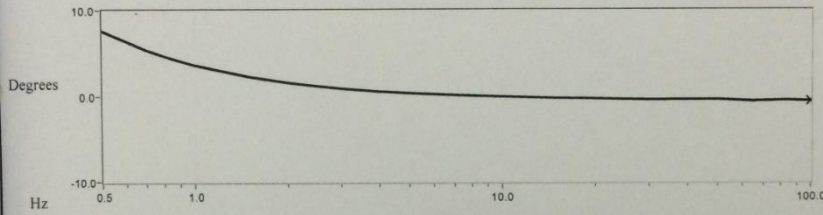
Per ISO 16063-21

Model Number: 356B41/100-6981-40  
 Serial Number: 148592 (z axis)  
 Description: ICP® Triaxial Accelerometer  
 Manufacturer: PCB Method: Back-to-Back Comparison AT401-12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz      103.9 mV/g      (10.59 mV/m/s<sup>2</sup>)

### Phase Plot



### Data Points

Frequency (Hz)	Phase (°)	Frequency (Hz)	Phase (°)
0.5	7.6	30	-0.4
1	3.6	50	-0.4
2	1.6	70	-0.6
5	0.3	REF. FREQ.	-0.6
7	0.1		
10	-0.1		
15	-0.3		
20	-0.3		

### Notes

1. Calibration is traceable to one or more of the following: PTB 10065, PTB 10066 and NIST 683/283498.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI Z540.3 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.

Technician: Mike Ferrio MAF Date: 6/20/2013



3425 Walden Avenue Depew, NY 14043  
 TEL: 888-684-0013 FAX: 716-685-3886 www.pcb.com