MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

USO DE SUSPENSÃO ATIVA NA REDUÇÃO DA VIBRAÇÃO OCUPACIONAL TRANSMITIDA A OPERADORES DE TRATOR AGRÍCOLA ATRAVÉS DO ASSENTO

por

Jéssica da Silva Fernandes

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, Dezembro de 2017.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

USO DE SUSPENSÃO ATIVA NA REDUÇÃO DA VIBRAÇÃO OCUPACIONAL TRANSMITIDA A OPERADORES DE TRATOR AGRÍCOLA ATRAVÉS DO ASSENTO

por

Jéssica da Silva Fernandes

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 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profª. Dr.ª Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof.ª Dr.ª Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof.ª Dr.ª Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Daniel de Leon

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 04 de dezembro de 2017.

Aos meus pais Antônio e Carmem.

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Mecânico Ilmar Benatti, por toda a ajuda e suporte na realização do procedimento experimental.

Ao Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS pelo empréstimo do equipamento de medição.

A minha orientadora Prof.ª Dr.ª Letícia Fleck Fadel Miguel, pela orientação e atenção no desenvolvimento deste trabalho.

FERNANDES, J. S. **Uso de suspensão ativa na redução da vibração ocupacional transmitida a operadores de trator agrícola através do assento**. 2017. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O presente trabalho consiste em avaliar a vibração de corpo inteiro transmitida a operadores de trator agrícola durante sua jornada de trabalho e determinar o quanto o sistema de amortecimento presente nos assentos influencia na transmissibilidade desta vibração. Os principais objetivos deste estudo foram (1) quantificar os níveis de vibrações verticais em dois assentos de trator, um assento com suspensão ativa e outro com suspensão passiva, (2) determinar a influência da suspensão ativa na transmissibilidade da vibração até o operador, (3) determinar os valores de transmissibilidade em ambos os assentos, (4) comparar os resultados encontrados com os valores exigidos pelas normas ISO 2631-1 e a norma brasileira NR15. A obtenção dos resultados foi feita de forma experimental, utilizando um único veículo e dois assentos com diferentes sistemas de amortecimento, o trator percorreu o mesmo trajeto sob uma pista de testes variando a velocidade entre 5 e 10km/h. Os resultados revelaram que o assento com suspensão ativa transmite em média 30% menos vibrações que o assento com suspensão passiva, ficando dentro dos limites das normas em quase todas as velocidades testadas. Enquanto o assento com suspensão passiva ultrapassa os limites previstos por norma para uma jornada de 8h de trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Vibração de corpo inteiro, assentos de trator, suspensão, transmissibilidade.

FERNANDES, J. S. **Use of active suspension in reducing occupational vibration transmitted to agricultural tractor operators through the seat**. 2017. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The present work consists in evaluating the whole body vibration transmitted to agricultural tractor operators during their working day and determining how much the damping system present in the seats influences the transmissibility of this vibration. The main objectives of this study were (1) to quantify the vertical vibration levels in two tractor seats, one with active suspension and another with passive suspension, (2) determine the influence of the active suspension on the transmissibility of vibration to the operator, (3) determine the values of transmissibility in both seats, (4) compare the results found with the values required by ISO 2631-1 and Brazilian standard NR15. Results were obtained experimentally, using a single vehicle and two seats with different damping systems, the tractor traveled the same route under a test track varying the speed between 5 and 10km/h. The results revealed that the seat with active suspension transmits on average 30% less vibration than the seat with passive suspension, staying within the limits of the standards in almost all speeds tested. While the passive suspension seat exceeds the standard limits for an 8-hour working day.

KEYWORDS: Whole body vibration, tractor seats, suspension, transmissibility.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS GERAIS 1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2
2.1 VIBRAÇÕES EM TRATORES 2
2.2 VIBRAÇÃO OCUPACIONAL DE CORPO INTEIRO 2
2.3 NORMAS VIGENTES 4
2.3.1 ISO 2631 (1997) 4
2.3.2 ALTERAÇÃO DO ANEXO 8 DA NR15 6
2.4 TRANSMISSIBILIDADE 6
2.5 AMORTECIMENTO 7
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 8
3.1 VEÍCULO 8
3.2 POLTRONA DO MOTORISTA 9
3.3 INSTRUMENTAÇÃO 9
3.3.1 EQUIPAMENTOS 10
3.4 MOTORISTA 10
3.5 PISTA DE TESTE 10
4. RESULTADOS E ANÁLISES 11
4.1 NÍVEL DE VIBRAÇÃO VERTICAL NO ASSENTO. 11
4.2 TRANSMISSIBILIDADE DA BASE PARA O ASSENTO 12
4.3 AVALIAÇÃO DA VIBRAÇÃO RELATIVA À SAÚDE 12
5. CONCLUSÃO 14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 14
ANEXO I – Ficha de especificação técnica do acelerômetro. 16
ANEXO II – Certificado de calibração do acelerômetro *seat pad*. 18
ANEXO III – Declaração de conformidade do medidor VI-400Pro 19

1. INTRODUÇÃO

Desde que as máquinas passaram a fazer parte da realidade do campo, este nunca mais foi o mesmo. A chamada Mecanização do Campo se deu, sobretudo quando foram inventadas máquinas capazes de potencializar o processo produtivo, esta mecanização possibilitou expandir a agricultura para grandes áreas. No começo os projetos dos tratores estavam mais voltados ao aumento da produtividade e a redução de custos, mas hoje, passou-se a buscar uma maior durabilidade e conforto operacional do maquinário.

Os tratores agrícolas são considerados a base para a agricultura moderna, já que a maioria das operações de campo é mecanizada, o que confere uma particular importância ao posto de operação (BERASATEGUI, 2000). Quando a operação de tratores agrícolas não se constituir em um sistema homem-máquina eficaz, o operador é exposto a uma elevada carga física e mental. Isto resulta numa redução da eficiência do mesmo (produtividade e qualidade do trabalho), aumentando a ocorrência de erros, acidentes e o desenvolvimento de doenças ocupacionais (MÁRQUEZ, 1990).

Estudos realizados por Kalhil & Gamero (1997), mostram que o operador de trator agrícola está exposto a problemas de ruído, vibrações, calor, esforços físicos, entre outros que o tornam susceptível a sofrer acidentes. Destaca-se que existem diversos fatores que influenciam na transmissão de vibração do veículo para o corpo. Além disso, estudos realizados na área apontam fortes relações entre a vibração de corpo inteiro (VCI) e fatores como: assento do motorista, tipo de pavimento sobre o qual o veículo se desloca, diferenças físicas e do modo de dirigir entre os motoristas, sistema de suspensão, entre outros. (Andrusaitis, 2004).

As características do assento do operador são de grande importância, o desconforto do assento é a principal causa de problemas de coluna entre os operadores, somados a este problema há também a exposição às vibrações ocupacionais (DHINGRA et al., 2003). Pensando nisso, tem-se introduzido o uso de suspensão ativa, como recurso na redução dos movimentos verticais do assento, proporcionando mais ergonomia e conforto ao operador.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal deste trabalho foi determinar qual a influência que o sistema de amortecimento do assento de um trator agrícola exerce na transmissibilidade da vibração ocupacional que chega até o operador.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Frente à importância da busca por melhores soluções ergonômicas e de conforto e a importância do estudo das vibrações ocupacionais, foram elaborados os seguintes objetivos:

- Quantificar os níveis de vibrações verticais em dois assentos, com diferentes sistemas de amortecimento, de um trator agrícola, sob as mesmas condições de contorno em uma pista de testes;
- Determinar a influência do uso do sistema de suspensão ativa, presente em um dos assentos, nas vibrações transmitidas ao operador;
- Determinar os valores da transmissibilidade entre o suporte dos assentos e a interface entre o operador e o assento;
- Comparar, os resultados encontrados, com os valores exigidos pelas principais normas vigentes;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VIBRAÇÕES EM TRATORES

As vibrações mecânicas, que ocorrem em tratores, são descritas como senoidais e aleatórias (PRASAD et al., 1995). “As vibrações senoidais e regulares são possíveis de predizer, enquanto as aleatórias e irregulares não possibilitam essa predição” (SANTOS, 2002, p. 5).

Em geral, os tratores e máquinas agrícolas produzem vibrações de baixa frequência, as quais podem provocar deslocamentos altos, e, por consequência irritabilidade, enjoos, problemas de visão, digestivos e lombares. Para amortecer e amenizar essas vibrações de baixa frequência tem-se estudado várias alternativas de implantação de sistemas de amortecimento mais eficientes no posto do operador.

Em sua grande maioria, as vibrações de baixa frequência são manifestações das características dinâmicas da interação principalmente entre o solo, pneus, suspensões, flexibilidade do chassi, massa suspensa e não suspensa, sendo que o estudo desta iteração é um dos importantes temas incluídos na dinâmica veicular.

Existem várias fontes excitadoras aplicadas nos veículos, geralmente estas fontes caem em duas categorias: (1) Rugosidade do terreno que excita o sistema através dos pneus e (2) Fontes internas provenientes do conjunto roda/pneus, sistema de transmissão e motor (Piette e Malchaire, 1992).

Partindo de tal ideia, Santos (2002) realizou um ensaio com um trator de 75cv tracionando uma grade destorroadora-niveladora com 28 discos de 20 polegadas x 3,5 milímetros e peso aproximado de 6600 N. As velocidades utilizadas correspondem à primeira, à segunda e à terceira marchas do trator. O autor concluiu que todas as velocidades estudadas apresentaram o maior pico de aceleração na mesma banda de frequência (3,15 Hz), o que caracterizou a independência da frequência dominante, em relação à variação da velocidade. Com base nos resultados adquiridos, concluiu-se que os níveis de aceleração encontrados no assento foram inferiores aos níveis da base do assento para as velocidades de trabalho. A faixa de frequência que apresentou os maiores picos de vibração vertical foi entre 2 e 4 Hz; os valores de aceleração ponderada encontraram-se bem acima dos limites definidos pela norma ISO 2631 para um período de 8 horas de trabalho.

2.2 VIBRAÇÃO OCUPACIONAL DE CORPO INTEIRO

Vibrações de corpo inteiro são vibrações transmitidas ao corpo como um todo, tais como pé, costas e nádegas de um homem sentado ou na área de suporte de um homem inclinado (Saliba et al. 2002, p. 46). Segundo (IIDA 1990) cada parte do corpo humano pode tanto absorver quanto amplificar as ondas mecânicas, em virtude da sua complexidade estrutural, ou seja, é composta por diversos ossos, articulações, músculos e outros órgãos. As reações desse sistema às vibrações mecânicas não ocorrem de maneira uniforme, pois essas partes do corpo podem vibrar na mesma frequência, caracterizando o fenômeno da ressonância. O corpo humano pode ser considerado como um sistema mecânico complexo, de múltiplos graus de liberdade, que pode ser representado pelo sistema mola-amortecedor (Saliba et al., 2002). As frequências produzidas pelo trator no eixo vertical encontram-se na faixa de 4 a 8 Hz, proporcionando um efeito de ressonância no corpo humano, segundo Goldman (1960, apud BERASATEGUI, 2000). A Figura 2.1 mostra as frequências naturais de cada parte do corpo humano.

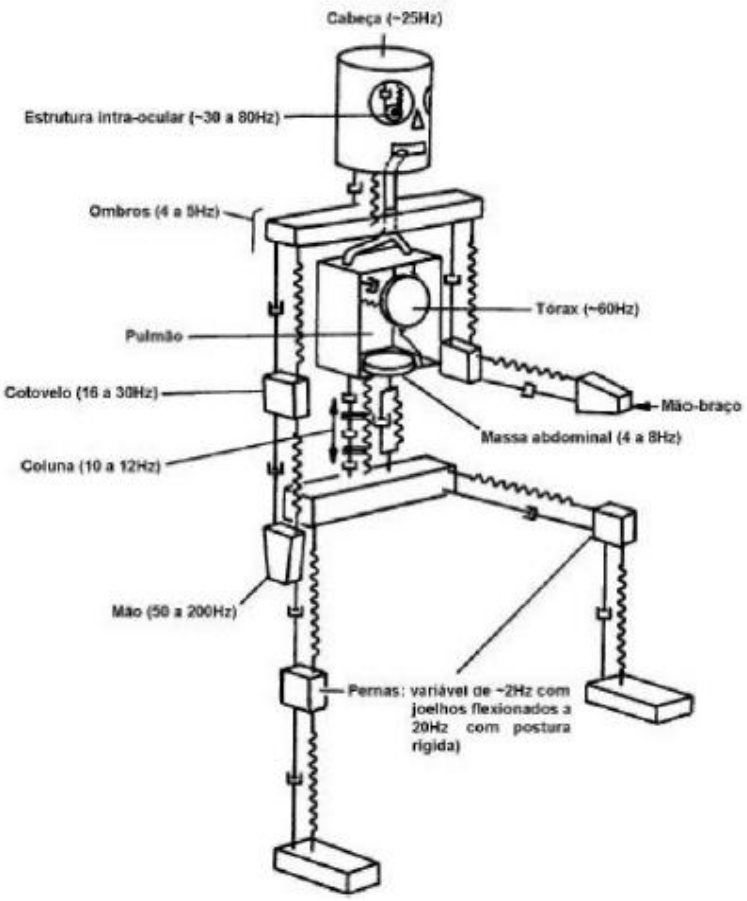


Figura 2.1 - Frequências naturais de cada parte do corpo humano.
Fonte: Brüel&Kajaer, 2000.

Os efeitos, causados por vibrações ocupacionais ao corpo humano, dependem da frequência de excitação, do deslocamento, da velocidade e da aceleração, sendo que, as principais frequências de excitação a que o corpo humano é exposto durante a sua jornada de trabalho, ocorrem na faixa de frequência que varia de 0,5 a 80 Hz (Alonço, 2004). Segundo Márquez (1990), é comprovado, experimentalmente, que o tratorista que se encontra trabalhando de forma incômoda, devido às vibrações de baixa frequência que chegam ao posto de condução, reduz a velocidade de avanço, e, com ela, a quantidade de trabalho que desenvolve durante a jornada.

As vibrações ocupacionais de corpo inteiro levam a consequências, sobretudo, no nível da coluna vertebral como o aparecimento de hérnias e lombalgias. Estudos realizados por (SELL, 2002), mostram que as vibrações que atingem as pessoas, verticalmente pelos pés e pelas nádegas, causam desgaste precoce na coluna vertebral, tais como, degeneração dos discos intervertebrais e o desenvolvimento de artrose, além de perturbações no sistema digestivo. Na Figura 2.2 algumas reclamações de tratoristas em função do número de horas/ano trabalhadas.

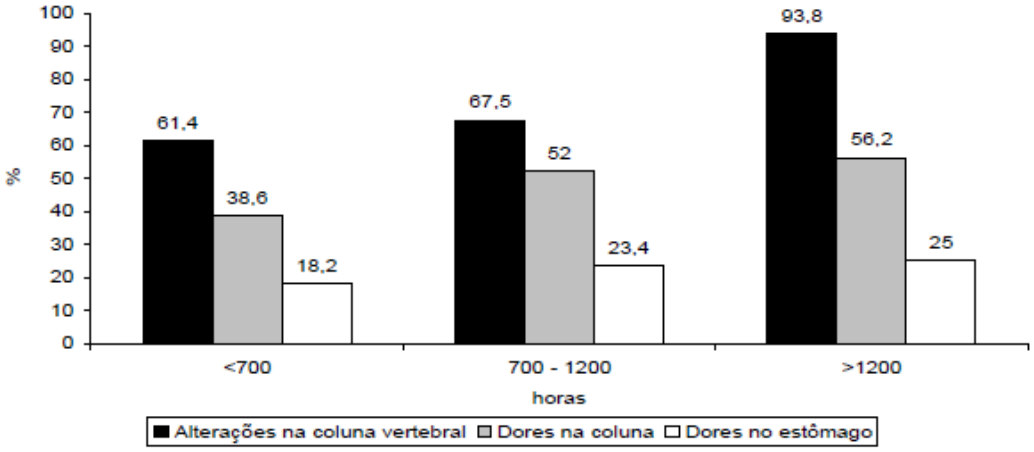


Figura 2.2 - Reclamações dos tratoristas em função de horas/ano trabalhadas.
Fonte: Sell, 2002.

2.3 NORMAS VIGENTES

2.3.1 ISO 2631 (1997)

A norma internacional ISO 2631 (1997) tem como objetivo facilitar a avaliação e comparação de dados referentes aos níveis de vibração de corpo inteiro, não apresentando limites de exposição à vibração, a norma limita-se a definir um método de avaliação da vibração de corpo inteiro em relação à saúde e ao conforto humano. A primeira parte da norma definida como ISO 2631-1, caracteriza os métodos de medição de vibrações mecânicas periódicas, aleatórias e transientes que provocam vibrações de corpo inteiro em pessoas. Conforme esta norma existe três tipos de exposição humana à vibração:

- Vibrações transmitidas simultaneamente à superfície do corpo e/ou partes substanciais dele;
- Vibrações transmitidas ao corpo através de superfícies de sustentação; e;
- Vibrações aplicadas a partes específicas do corpo, como cabeça e membros.

Os métodos de quantificação de vibração humana apresentados pela norma podem ser utilizados para avaliar vibrações geradas por veículos (ar, terra, água) e máquinas (da indústria e da agricultura) onde pessoas estão expostas às vibrações mecânicas que podem interferir no conforto, na eficiência do seu trabalho e, em algumas situações, na saúde e segurança (ISO 2631-1: 1997).

Os principais parâmetros para a medição de vibração segundo a ISO 2631-1 (1997) são:

a) Sistema de coordenadas de medição: mede-se a vibração de acordo com um sistema de coordenadas originado em um ponto em que a vibração está entrando no corpo. Conforme a posição em que o indivíduo se encontra, os eixos são direcionados de acordo com a Figura 2.3;
b) Os transdutores para medição de vibração devem ser posicionados o mais próximo possível da interface entre o corpo humano e a fonte de vibração;
c) O parâmetro para avaliação da magnitude da vibração é a aceleração rms (*root-mean-square*), que deve ser expressa em m/s^2;
d) Dependendo da aplicação e da postura da pessoa, a aceleração rms deve ser compensada (ou ponderada). O valor de compensação para cada frequência esta mostrado na Tabela 1.
e) Podem ser feitas medições em faixas de um terço de oitava;
f) A aceleração eficaz rms é calculada de acordo com a equação 2.1.

$$a_i = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_i^{\,2}(t)dt \right]^2 \qquad (2.1)$$

onde $a_i(t)$ é a aceleração eficaz rms em função do tempo, em m/s², e T é a duração da medição, em segundos;

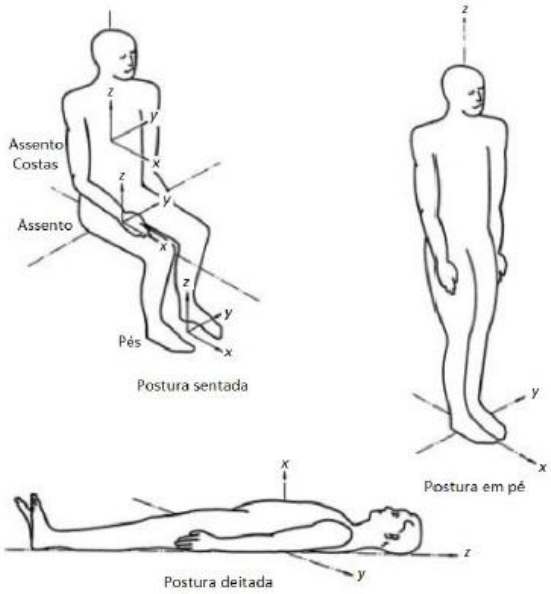


Figura 2.3 - Sistemas de coordenadas de medição no corpo humano.
Fonte: ISO 2631-1 (1997).

Tabela 1 - Valores de ponderação para cada faixa de frequência.
Fonte: ISO 2631-1 (1997).

freqüência f [Hz]	W_k $(x10^3)$	W_d $(x10^3)$	*freqüência f [Hz]*	W_k $(x10^3)$	W_d $(x10^3)$
1	482	1011	**10**	988	212
1,25	484	1008	**12,5**	902	161
1,6	494	968	**16**	768	125
2	531	890	**20**	636	100
2,5	631	776	**25**	513	80,0
3,15	804	642	**31,5**	405	63,2
4	967	512	**40**	314	49,4
5	1039	409	**50**	246	38,8
6,3	1054	323	**63**	186	29,5
8	1036	253	**80**	132	21,1

g) Para quantificar a VCI a que o trabalhador está exposto, é utilizada uma grandeza indicada pela aceleração ponderada, dada pela equação 2.2;

$$a_w = \left[\sum_i (W_i . a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

onde a_w é a aceleração ponderada, em m/s², W_i é o fator de ponderação e a_i é a aceleração rms para as frequências em bandas de 1/3 de oitava mostradas na Tabela 2.1.

Para acelerações medidas nos três eixos (x, y e z) utiliza-se a equação 2.3 para calcular a aceleração eficaz ponderada total, que representa a soma vetorial das acelerações dos eixos ortogonais.

$$a_{xyz} = \left((k_x . a_{wx})^2 + (k_y . a_{wy})^2 + (k_z . a_{wz})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

onde:

a_{xyz} = aceleração eficaz ponderada total em m/s²;

a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} = aceleração eficaz rms ponderada dos eixos ortogonais x, y e z, respectivamente em m/s²;

k_x, k_y, k_z = fatores de multiplicação quem têm os valores de 1,4; 1,4 e 1 respectivamente, para o critério de saúde [adimensional].

Com relação à saúde das pessoas, a ISO 2631-1 (1997) é aplicável para uma faixa de frequência que vai de 0,5 Hz até 80 Hz. Se durante a aplicação da norma ficar estabelecido que frequências abaixo de 1 Hz não sejam relevantes, a faixa de frequência considerada pode ser de 1,0 Hz a 80 Hz. A avaliação da vibração deve ser feita para o eixo que apresente os maiores níveis de aceleração ponderada, que para o caso de pessoas sentadas em veículos, como o tratorista, ocorre no eixo z.

2.3.2 ALTERAÇÃO DO ANEXO 8 DA NR15

Anteriormente à publicação da portaria MTE n.° 1.297, de 13 de agosto de 2014 feita pelo Ministério do Trabalho e Emprego, alterando o texto do anexo 8 da NR 15, citava com relação a vibrações no corpo humano tomar por base os limites de tolerância definidos pela Organização Internacional para a Normalização – ISO, em suas normas ISO 2631 e ISO/DIS 5349 ou suas substitutas. Com a alteração do conteúdo, o anexo 8 da NR 15 passa a mencionar no próprio texto que o valor da aceleração resultante normalizada deve ser de 1,1 m/s² e cita a Norma de Higiene Ocupacional (NHO 09) como referência para avaliação da exposição.

2.4 TRANSMISSIBILIDADE

Segundo Mansfiel (2005), a transmissibilidade pode ser definida como sendo a razão entre a energia medida no ponto de entrada pela energia medida no ponto de saída com mesma direção. O método mais usado para a determinação da transmissibilidade é fornecido pela ISO 2631 e é conhecido como SEAT%. Este fornece um método numérico simples para avaliar a capacidade de isolamento do assento, comparando a aceleração em dois pontos: um no assento e outro no assoalho onde o assento é fixado. Assim o fator SEAT% pode ser expresso pela equação 2.4.

$$SEAT\% = \frac{a_{wseat}}{a_{wfloor}} x100 \quad (2.4)$$

onde: SEAT% - *Seat Effective Amplitude Transmissibility*, a_{wseat} é aceleração ponderada no assento e a_{wfloor} é a aceleração ponderada na base em m/s².

Pela equação pode-se observar que o valor SEAT possui uma variação de 0 a 100%. Assim, valores entre 0 e 100% indicam que o assento está gerando um efeito de amortecimento na vibração que é transmitida do assoalho até o motorista. Em alguns casos, pode ocorrer que o fator SEAT% seja maior que 100%, isso significa que o sinal de saída do sistema é maior que o sinal de entrada, nestes casos ocorre o fenômeno de amplificação de sinal.

2.5 AMORTECIMENTO

Segundo Tavares (2017, p.36), amortecimento é um fenômeno intrínseco aos materiais, inclusive aos elementos orgânicos de máquinas agrícolas, impedindo através de forças de coesão atômica e atritos moleculares que o material vibre indefinidamente. Historicamente, o amortecimento de assentos para tratores agrícolas vem se desenvolvendo e aumentando seu efeito de isolamento das vibrações. Na Figura 2.4, Hauck (2001) representa o desenvolvimento histórico do amortecimento dos assentos, desde os constituídos somente por molas, utilizados nos primeiros tratores, até uma última etapa onde são usados sensores e atuadores para realizar o amortecimento das vibrações, tanto verticais quanto horizontais.

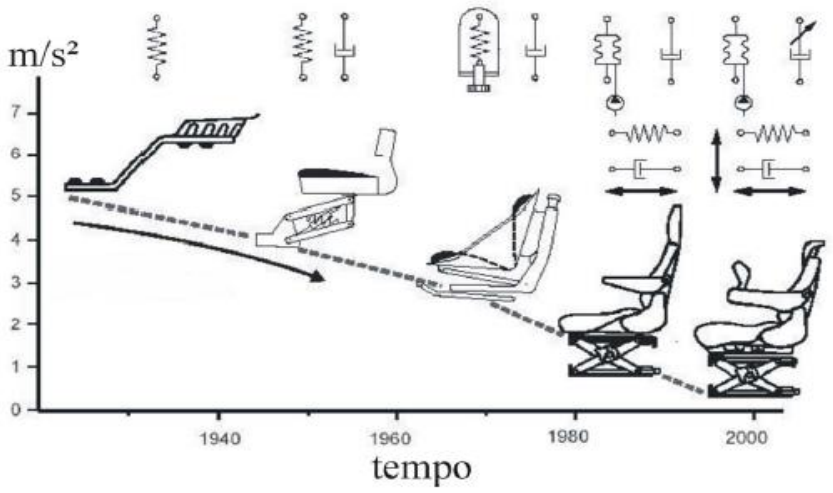


Figura 2.4 Evolução do amortecimento dos assentos historicamente.
Fonte: Hauck (2001)

Fernando Filho (2002, p.15) diz que os sistemas de suspensão de assento podem ser ativos ou passivos, sendo que, para o sistema ativo é necessária a presença de sensores que reconheçam a vibração no assento e enviem um sinal para as válvulas de comando hidráulico ou pneumático, acionando, assim os atuadores. Já o sistema passivo de suspensão é constituído de molas e amortecedores que atenuam as vibrações geradas pela base do assento. Atualmente muito se tem estudado a respeito do uso de suspensão ativa, esta já esteve presente em sistemas de suspensão de veículos e projetos para elevadores, podendo também ser aplicado na suspensão dos assentos. O sistema ativo tem a capacidade de variar seus parâmetros conforme as condições de operação enquanto a suspensão passiva tem seus parâmetros previamente determinados, não atingindo um desempenho tão satisfatório.

Bouazara et al. (2006) formulam um modelo não linear generalizado para análise dinâmica de assentos com suspensões de amortecimento passivo, semi-ativo e ativo. O modelo incorpora o atrito de Coulomb devido às ligações e buchas da suspensão, forças ascendentes das interações com as paradas do limite elástico, uma mola de suspensão linear e uma força de amortecimento não linear para amortecedor passivo, semi-ativo e ativo, enquanto que a contribuição devida á biodinâmica de um operador humano é desconsiderada.

Duas suspensões diferentes de assentos são avaliadas experimentalmente em laboratório sobre excitações randômicas e senoidais decorrentes de um ônibus urbano, e os dados medidos são usados para demonstrar a validade do modelo proposto. Os resultados mostram uma concordância relativamente boa entre os resultados do modelo e os dados medidos. As características de desempenho de conforto e segurança de uma suspensão ótima para assentos com amortecedores semi-ativos e ativos são avaliadas em ambas as excitações senoidais e randômicas com base nas diretrizes fornecidas pela ISO 2631. Logo, conclui-se que o desempenho do conforto de um assento de suspensão com amortecedores semi-ativo e ativo pode ser aumentado de 20 a 30%.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 VEÍCULO

Tendo como objetivo principal a comparação entre os tipos de assento e a influência que estes causam na vibração de corpo inteiro do motorista, um único veículo foi utilizado. O intuito foi de eliminar qualquer variável decorrente da diferença entre os veículos, o que inclui o motor, desgastes, suspensão e configurações gerais.

O veículo em questão foi o modelo 7230J de trator, mostrado na Figura 3.1, da marca John Deere®, pertencente à linha 7J que se caracteriza por ser uma linha de tratores de grande porte e alta potência. O trator apresentou as seguintes características como as principais:

- Motor diesel com 6 cilindros em linha e 24 válvulas;
- Potência nominal: 169kW (230cv);
- Capacidade do tanque de combustível 390L;
- Eixo dianteiro 4x4;
- Eixo traseiro P&C pinhão e cremalheira;
- Tomada de potência independente com acionamento eletro-hidráulico;
- Rodados: 600/65R28 R1 e 710/70 R38 R1 (aro 28 dianteiro e 38 traseiro);
- Pressão dos pneus: 16Psi (dianteiro) e 12Psi (traseiro);
- Peso máximo com lastro: 12.650kg

Figura 3. 1 - Veículo utilizado nos testes. Fonte: Próprio Autor.

3.2 POLTRONA DO MOTORISTA

Para fins de comparação utilizaram-se dois diferentes assentos na estação do operador, que foram nomeados neste trabalho como assento 1 e assento 2. O assento 1 possui suspensão ativa, o mesmo é suspenso a ar e envolve tecnologia eletro-hidráulica em combinação com a suspensão pneumática. O sistema funciona da seguinte forma: dois sensores, um de posição e um acelerômetro, medem 200 vezes por segundo a posição e aceleração do assento. Um programa de computador faz a leitura dos dados coletados pelos sensores e controla o cilindro hidráulico neutralizando os movimentos verticais. O assento também é horizontalmente suspenso em ambos os sentidos.

O assento 2 é um assento pneumático muito parecido com o assento 1, porém sem a tecnologia eletro-hidráulica, atuando pneumaticamente com um amortecimento passivo. A Figura 3.2 mostra o assento 1.

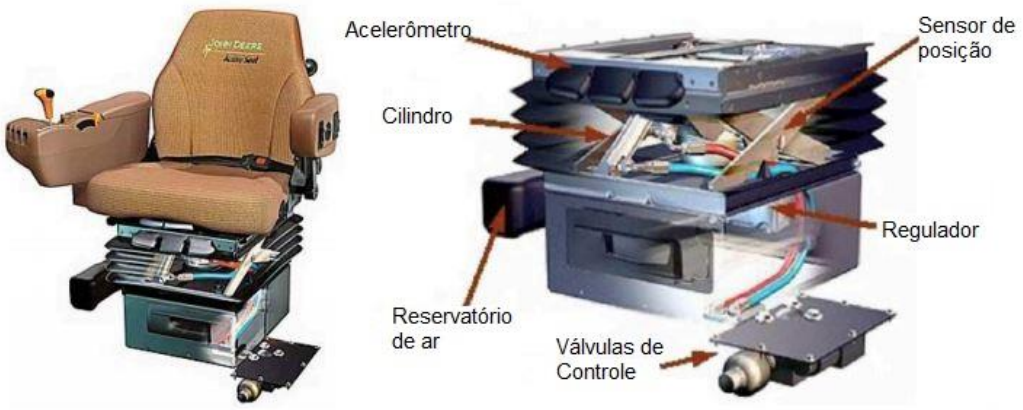


Figura 3.2 - Assento 1 com amortecimento ativo. Fonte: Manual do operador.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Para este trabalho o trator foi instrumentado com dois transdutores piezoelétricos, um tri-axial do tipo *seat pad* e outro uniaxial, ambos os acelerômetros, utilizam a vibração para gerar uma tensão elétrica proporcional à aceleração do movimento vibratório. Com o uso de uma técnica conhecida como acelerometria foi possível fazer a coleta dos dados.

O acelerômetro uniaxial utilizado foi do tipo IEPE (*Integrated Eletronics Piezo Eletric*) modelo SAPE-HLS 1100 do fabricante SoMat, trata-se de um acelerômetro pequeno e leve que permite trabalhar com variação de temperatura. O mesmo possui uma faixa de operação que varia de 0,5 a 10.000Hz com sensibilidade de 100mV/g (Figura 3.3 A). O tri-axial *seat pad*, em formato de disco flexível, possui sensibilidade de 100mV/g no eixo X, 98.3mV/g no eixo Y e 101.4mV/g no eixo Z (Figura 3.3 B). Este é ligado ao medidor QUEST VI400-Pro, um analisador de vibração portátil o qual indica o nível *rms* da aceleração ponderada.

Fez-se a fixação dos acelerômetros, com o auxílio de cola e fita adesiva, em dois pontos. Fixou-se o primeiro a base da cabine do trator e o segundo ao assento. Ambos os acelerômetros coletando dados de forma simultânea na base e no assento permitem a determinação da transmissibilidade envolvida na poltrona.

(A) (B)

Figura 3.3 - (A) Acelerômetro uniaxial fixo à base; (B) Acelerômetro *seat pad* fixo ao assento.
Fonte: Próprio Autor.

3.3.1 EQUIPAMENTOS

O equipamento para coleta de dados, também do fabricante SoMat, foi o módulo eDAQlite. Este módulo permite configurações variáveis de acordo com o número de canais que se deseja usar. Sistema selado suporta variações de temperaturas, possui memória e bateria interna e taxa de amostragem de 0,1Hz a 100.000Hz. Foram utilizados condicionadores de sinal ICP para comunicação dos acelerômetros com o aquisitor de dados. Para o pós-processamento dos dados coletados utilizou-se um *software* de análise, Infield, projetado para melhorar a coleta e o processo de visualização de dados.

A coleta dos dados realizou-se de forma simultânea nos dois pontos de fixação, com o objetivo de avaliar a transmissibilidade e os picos de acelerações entre a base e o assento da poltrona. A taxa de amostragem utilizada para a coleta de dados foi de 1000HZ.

3.4 MOTORISTA

A massa do operador do trator foi de 73kg. O registro da massa do operador foi feito, pois poderia interferir nas medições de vibrações.

3.5 PISTA DE TESTE

Os testes foram realizados em uma pista com obstáculos, como se pode ver na Figura 3.4. A pista tem comprimento total de 33 metros, localizada nos fundos da fábrica. Os obstáculos consistem em 55 pares de placas retangulares (Figura 3.5) com comprimento de 131cm, largura de 31cm e espessura de 2,5cm dispostas paralelamente ao longo dos 33m. Fez-se os testes variando a velocidade entre 5 e 10km/h, abrangendo as velocidades usuais de trabalho de um trator.

Figura 3.4 - Pista de testes.
Fonte: Próprio Autor.

Figura 3.5 - Dimensão da placa obstáculo.
Fonte: Próprio Autor.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 NÍVEL DE VIBRAÇÃO VERTICAL NO ASSENTO.

De acordo com a Figura 4.1, pode-se observar os níveis de aceleração ponderada obtida experimentalmente em ambos os assentos testados. Os gráficos representam o nível de vibração vertical (a_w) que chega a cada assento em função da frequência tendo seus pontos máximos alcançados em 2,3Hz, ponto onde ocorre ressonância com a cabine.

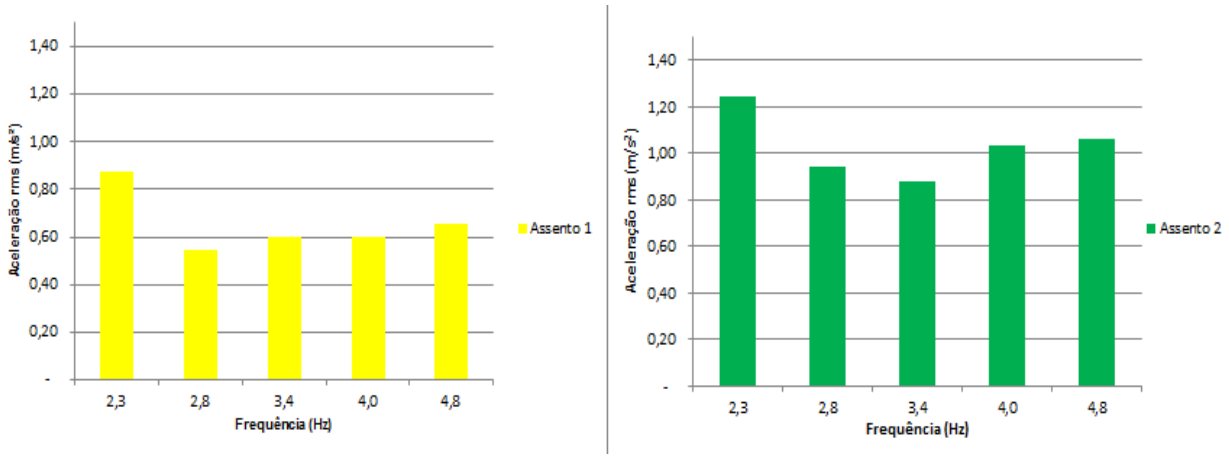


Figura 4.1 - Aceleração *rms* ponderada (a_w) nos diferentes assentos.
Fonte: Próprio Autor.

4.2 TRANSMISSIBILIDADE DA BASE PARA O ASSENTO

A transmissibilidade da vibração da base, suporte do assento, até a interface entre o operador e o assento foi calculada através da equação 2.4 resultando nos valores da Figura 4.2. Na comparação, o assento 1 representa o assento com amortecimento ativo e o assento 2 com amortecimento pneumático passivo, é possível ver nitidamente que o assento 1 transmite menos vibração que o assento 2, sendo em média 30% mais efetivo na redução da vibração que chega ao operador. O assento 2 mostrou-se pouco eficaz nas velocidades e frequências avaliadas chegando a ocorrer o fenômeno da amplificação de sinal quando atingiu 4Hz de frequência.

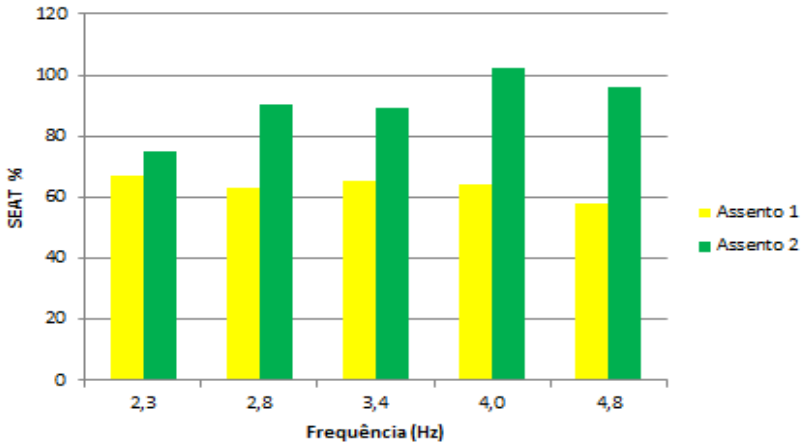


Figura 4.2 - Comparativo da transmissibilidade dos assentos.
Fonte: Próprio Autor.

4.3 AVALIAÇÃO DA VIBRAÇÃO RELATIVA À SAÚDE

A norma ISO 2631-1 em seu anexo B, disponibiliza um gráfico para avaliação dos efeitos da vibração à saúde. O gráfico em questão está separado em 3 zonas onde as zonas A, B e C representam respectivamente as zonas de segurança, precaução e risco à saúde em função da magnitude da vibração e o tempo de exposição (Figura 4.3). Considerando que o operador do trator está exposto a um período de 8h de trabalho nas condições testadas na pista. Os valores de aceleração obtidos para o assento 2 variam entre 0,88 e 1,24 m/s², ou

seja, todos ultrapassam o valor limite de exposição (VLE) para 8h . Já os valores de aceleração no assento 1 variam entre 0,60 e 0,87m/s², sendo que apenas um ponto está fora do limite de exposição.

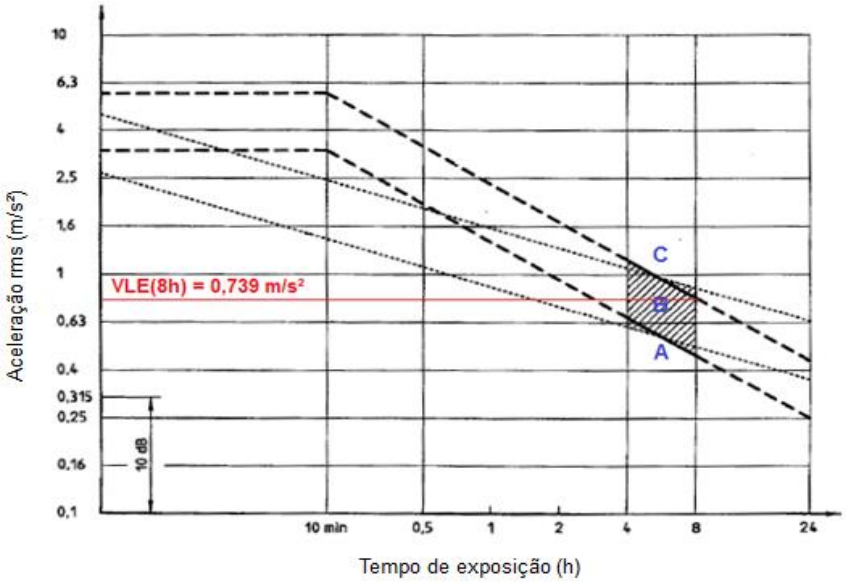


Figura 4.3 – Zonas de precaução quanto à saúde.
Fonte: ISO 2631-1 (1997)

Com relação à NR15, esta estabelece um limite de que o valor da aceleração resultante não deve ultrapassar de 1,1m/s². Dos valores encontrados para os assentos, no assento 1 com suspensão ativa, apenas um ponto ultrapassa um pouco do limite estabelecido, atingindo o valor de 1,24 m/s² em 2,3Hz. Já o assento 2 com suspensão passiva, quatro dos cinco pontos ultrapassaram o limite estabelecido pela norma, ficando abaixo apenas na frequência de 3,4Hz com 0,97m/s². A Figura 4.4 mostra a vibração resultante em ambos os assentos e o limite estabelecido pela NR15.

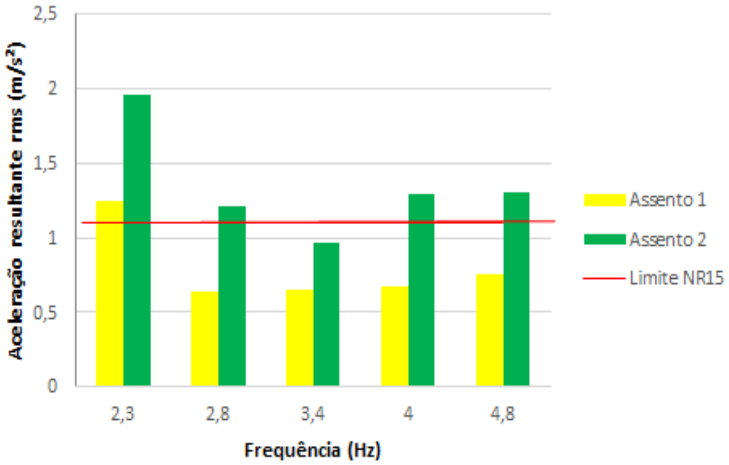


Figura 4.4 – Acelerações e limites NR15

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos de forma experimental para o presente trabalho mostraram o quão influente é o sistema de amortecimento do assento de um trator agrícola, quanto à transmissibilidade de vibração até o operador. A condição considerada para a análise foi de que o operador estaria exposto durante toda a sua jornada de trabalho aos níveis de vibração obtidos na pista, sendo que a pista na qual o trator foi testado impôs a este, condições severas de vibração, o que normalmente não ocorreria em campo, em uma situação real de trabalho de campo o operador não estaria exposto tanto tempo a níveis como os obtidos.

Como esperado, o sistema de suspensão ativa apresentou melhores resultados em relação ao sistema passivo que tem seus parâmetros previamente determinados. Os níveis de aceleração no assento foram inferiores aos níveis encontrados na base exceto no assento 2 onde em 4Hz ocorreu a amplificação do sinal, não sendo capaz de amortecer a vibração. A frequência que apresentou o maior pico de vibração foi a de 2,3Hz em ambos os assentos. Para o assento 2 os níveis de vibração ficaram bem acima dos exigidos por norma, tanto conforme a ISO 2631-1 quanto à NR15 para uma jornada de 8h de trabalho, principalmente na frequência de 4Hz onde entra em ressonância com a coluna vertebral do operador podendo a longo prazo causar o aparecimento de hérnias e lombalgias. Os resultados obtidos para o assento 1 com suspensão ativa se mostraram superiores na redução da vibração, transmitindo 30% menos vibração ao operador e mantendo-se dentro dos limites das normas na faixa de 3Hz a 5Hz mesmo nas condições extremas a qual o teste foi realizado. Assim, conclui-se que o amortecimento ativo possui vantagens sobre o amortecimento passivo proporcionando maior conforto e ergonomia, o que reflete em uma melhora na quantidade e na qualidade do trabalho realizado pelo tratorista durante sua jornada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONÇO, A. S. **Metodologia de projeto para a concepção de máquinas agrícolas seguras.** 2004. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ANDUSAITS, S, F. **Estudo da prevalência e fatores de risco da lombalgia em caminhoneiros do estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, faculdade de medicina universidade de São Paulo**. São Paulo, 2004.

BERASATEGUI, M.B.R. **Modelización y simulación del comportamiento de um sistema mecânico com suspensión a los asientos de los tractores agrícolas**. Tese de doutorado defendido no ano de 2000 pela Universidad Politécnica de Madrid, 264p.

BOUAZARA, M.; RICHARD, M.J. Na Optimization Method Designed to improve 3-D Vehicle Confort and Rooad Holding Capability Through the Use of Active and Semi-Active Suspensions, **European Journal of Mechanics**, v. 20, n.3, p. 509-520, 2001.

DHINGRA, H. S.; TEWARI, V. K.; SANTOKH, S. Disconfort, pressure did ibution and safety in operator's seat – a critical review. **Journal of Scientific Research and Development**. Silsoe, 2003. 16p.

HAUCK, M. **Geregelte Dämpfung für Traktor-fahrersitze**. 2001. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Berlin, Berlin, 2001.

IIDA, I. Ergonomia: Projeto e produção. São Paulo: Edgar Blücher, 1990. 451 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure of whole- body vibration:** General requirements. Geneva, 1997. 31p.

KAHIL, M. A.; GAMERO, C. A. Níveis de ruído: Avaliação ergonômica de alguns tratores e equipamentos agrícolas. Energia na agricultura, Botucatu, v. 12, 1997.

MANSFIELD, N. J. **Human response to vibration.** London: CRC Press, 2005. 227 p.

MÁRQUEZ, L. **Solo tractor'90: ergonomia y seguridade en los tractores.** Madri: Labore, 1990. 231 p

NR15. Norma Regulamentadora No.15. **Atividades e operações insalubres - Anexo Nº8 Vibrações.** 20014

PIETTE, A.J. e MALCHAIRE, T. **Technical characteristics of overhead cranes influencing the vibration exposure of the operators**. *Appl Ergonomics* 23:121-27. 1992.

PRASAD, N.; TEWARI, V. K.; YADAV, R. **Tractor ride vibration: a review.** Journal of Terramechanics, Silsoe, Pp 205-219. 1995;

SALIBA, T. M.; CORRÊA,M. A. C.; AMARAL, L S. **Higiene do trabalho:** Programa de prevenção de riscos ambientais. 3. Ed. São Paulo: Ltr, 2002. 262p.

SANTOS, P.F. **Avaliação dos níveis de ruído e vibração vertical no assento de um trator agrícola de pneus utilizando um sistema de aquisição automática de dados**. Viçosa - MG, 2002. 62p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Viçosa.

SELL, I. **Projeto do trabalho humano**: Melhorando as condições de trabalho. Florianópolis: UFSC, 2002. 470 p.

TAVARES, G. **Elementos orgânicos e fundamentais de máquinas e implementos agrícolas**. Londrina: 2 ed. Universidade Federal de Lavras – MG, 2017. 261p.

ANEXO I – Ficha de especificação técnica do acelerômetro.

IEPE Piezoelectric Accelerometers

SENSORS

Integrated Data Acquisition Solutions for SoMat Systems

Lightweight, Ceramic Shear Accelerometers for Modal and General Vibration Measurements

Overview

SoMat Sensors Series IEPE (Integrated Electronics Piezoelectric) Accelerometers (SAPE-HLS) are low-cost, lightweight, ceramic shear accelerometers for modal and general vibration measurements. Welded and hermetically sealed, they are designed for long term reliability in the harshest of environments. SAPE-HLS Accelerometers are available in both single and tri-axes models; single axis models have an option on the sensitivity.

IEPE transducers are piezoelectric sensors with built-in microelectronic signal conditioning circuitry. This circuitry requires a constant current excitation source that serves to convert the high-impedance charge signal into a low-impedance voltage signal. Signal conditioning for these type transducers is provided in SoMat eDAQ Systems through the High Level Layers (HLS) with the ICP-Type Signal Conditioning Module (EICP).

Each SAPE-HLS Accelerometer comes with everything needed to set it up with SoMat eDAQ systems; including all cabling and instructions. Additionally, the accelerometers also come with a case, mounting stud, adhesive mounting base, petro wax and NIST traceable calibrations certificates.

SAPE-HLS Accelerometers come with everything you need in the box; truly making them an integrated solution for SoMat Data Acquisition Systems.

Product Options

SAPE-HLS Accelerometers are available in both single and tri-axes models. Single axis models are additionally available in two sensitivity ranges; 10 mV/g and 100 mV/g.

Part Number Code

The following number scheme is used to identify the layer configuration.

SAPE - HLS - X XXX

- Identifier
- Series
- Axis
- Mv/G Output

Part Number Definitions

Identifier	SAPE=SoMat Accelerometer Piezoelectric
Series	HLS=Compatible with SoMat High Level Layers and ICP-Type Signal Conditioners
Axis	1=Single Axis, 3=Tri-Axis
Mv/G Output	100, 010

SOMAT

Rugged, Mobile Data Acquisition

IEPE Piezoelectric Accelerometers

SENSORS

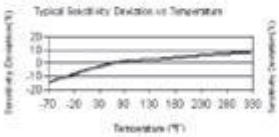
Product Specifications

	SAPE-HLS-1010	SAPE-HLS-1100	SAPE-HLS-3010
Performance			
Sensitivity (+/- 10%)	10 mV/g	100 mV/g	10 mV/g
Measurement Range	+/-500 g pk	+/-50 g pk	+/-500 g pk
Frequency Range (+/-5%)	0.5 to 10,000 Hz	0.5 to 10,000 Hz	-
Frequency Range (+/-10%)	0.3 to 15,000 Hz	0.3 to 15,000 Hz	-
Frequency Range (+/-5%) (Y & Z-axis)	-	-	2 to 10,000 Hz
Frequency Range (+/-5%) (X-axis)	-	-	2 to 7,000 Hz
Resonant Frequency	≥50 k Hz %	≥50 k Hz %	≥55 k Hz %
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.0005 g rms	0.00015 g rms	0.003 g rms
Non-Linearity	≤1 %	≤1 %	≤1 %
Transverse Sensitivity	≤5 %	≤5 %	≤5 %
Environmental			
Overload Limit (Shock)	+/-5000 g pk	+/-5000 g pk	+/-10000 g pk
Temperature Range (Operating)	-65 to +250 °F	-65 to +250 °F	-65 to +250 °F
Temperature Response	See Graph	See Graph	See Graph
Base Strain Sensitivity	0.003 g/με	0.003 g/με	-
Electrical			
Excitation Voltage	*18 to 30 VDC	*18 to 30 VDC	*18 to 30 VDC
Constant Current Excitation	*2 to 20 mA	*2 to 20 mA	*2 to 20 mA
Output Impedance	≤100 ohm	≤200 ohm	≤200 ohm
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC	7 to 11 VDC
Discharge Time Constant	1.0 to 2.5 sec	1.0 to 2.5 sec	0.3 to 1.0 sec
Settling Time (within 10% of bias)	<10 sec	<10 sec	<3 sec
Spectral Noise (1Hz)	110 μg/√Hz	39 μg/√Hz	1000 μg/√Hz
Spectral Noise (10 Hz)	25 μg/√Hz	11 μg/√Hz	300 μg/√Hz
Spectral Noise (100 Hz)	8 μg/√Hz	3.4 μg/√Hz	80 μg/√Hz
Spectral Noise (1 kHz)	4 μg/√Hz	1.4 μg/√Hz	25 μg/√Hz
Physical			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	Ceramic
Sensing Geometry	Shear	Shear	Shear
Housing Material	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic	Hermetic
Size (Hex x Height)	0.44"x0.62"	0.44"x0.62"	-
Size (Height x Length x Width)	-	-	0.4"x 0.77"x 0.4"
Weight	0.20 oz	0.20 oz	0.19 oz
Electrical Connector	10-32 Coaxial	10-32 Coaxial	1/4-28 4-Pin
Electrical Connector Position	Side	Side	Side
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female	5-40 Female
Mounting Torque	10 to 20 in-lb	10 to 20 in-lb	4 to 5 in-lb

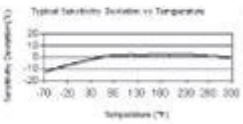
* Provided by SoMat ICP Conditioning Module

Temperature Response Graphs

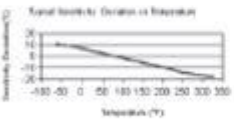
SAPE-HLS-1010



SAPE-HLS-1100



SAPE-HLS-3010



Cables & Accessories

SAPE Cable, Single Axis, 10', 10-32 to BNC
(SAC-EXT-SAPE-1)

SAPE Cable, Tri-Axis, 10', 10-32 to 3-BNC (X,Y,Z)
(SAC-EXT-SAPE-3)

ICP-Type Signal Conditioning Module
(EICP-B)

Extension Cables (0.4 m, 2 m, 5 m, 10 m and 15 m)
(SAC-EXT-MF-x)

SOMAT | nCode

SoMat Corporation
702 W. Killarney St., Urbana, IL 61801, USA
Phone: (800) 960-3273
(217) 328-5359
Fax: (217) 328-6576
Email: SoMatSales@somat.com
Web: www.somat.com

CE

Copyright© 2006 SoMat Corporation. SoMat is a registered trademark of SoMat Corporation. All other trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

200807

ANEXO II – Certificado de calibração do acelerômetro *seat pad*.

Certificate of Calibration

Certificate Number: 21185012430

Model: VI-400 **Date Issued:** 10-January-2008

S/N: 12430

Quest Technologies, Inc. certifies that the above listed product meets or exceeds the requirements of the following standard(s):

ISO 8041 - Human response to vibration

ISO 2631-1 - Whole-Body Vibration

ISO 5349 - Hand-Transmitted Vibration

ISO 10816 - Standard for Vibration Monitoring

IEC 61672-1 - Electroacoustics - Sound level meters

Test Procedure: S072-020

Subassemblies:

Dytran 3023A2 S/N: 4147

Dytran 5313M4 (VI-400)S/N: 647

Test Conditions:

Temperature: 18-25°C

Humidity: 20-80% R.H.

Barometric Pressure: 950-1050 mBar

Reference Standard(s):

Device	Cal Due Date	Uncertainty - Estimated at 95% Confidence Level (k=2)
Kistler 8076K	18-December-2008	+/- 1.8% Vibration
Fluke 45	19-March-2009	+/- 1.4% AC Voltage, +/-0.1% DC Voltage

Calibrated By: Linda Ostendorf Assembler

In order to maintain best instrument performance over time and in the event of inspection, audit or litigation, we recommend the instrument be recalibrated annually. Any number of factors may cause the calibration item to drift out of calibration before the recommended interval has expired.

All equipment used in this test is traceable to NIST, and applies only to the unit identified above.
This report must not be reproduced except in its entirety without the written approval of Quest Technologies, Inc.

QUEST TECHNOLOGIES, INC.

058-387 Rev E

Page 1 of 1

1060 CORPORATE CENTER DRIVE • OCONOMOWOC, WISCONSIN 53066-4828
800-245-0779 • 262-567-9157 • FAX 262-567-4047 • INTERNET ADDRESS: www.questtechnologies.com

An ISO 9001 Registered Company

ANEXO III – Declaração de conformidade do medidor VI-400Pro

Declaration of Conformity

Certificate Number: 21185012430

The Following Directives Are Covered By This Declaration:

89/336/EEC Electromagnetic Compatibility Directive, As Ammended
73/23/EEC Low Voltage Equipment Directive, Ammended by 93/68/EEC

The Following Product Is Covered By This Declaration:

Model: VI-400 **S/N:** 12430

The Basis On Which Conformity Is Being Declared:

The manufacturer hereby declares under his sole resposibility that the product identified above complies with the protection requirements of the EMC directive and with the principal elements of the safety objectives of the Low Voltage Equipment directive, and that the following standards have been applied:

EN50081-1 Electromagnetic Compatibility
EN50082-1 Electromagnetic Compatibility

Signed: _____ **Date:** 10-January-2008

Mike Wurm - Vice President of Engineering

Attention!

The attention of the specifier, purchaser, installer or user is drawn to special measures and limitations to use which must be observed when these products are taken into service to maintain compliance with the above directives.

Details of these special measures and limitations to use are available on request, and are also contained in the product manuals.

098-605 Rev A

QUEST TECHNOLOGIES, INC.

Page 1 of 1

1060 CORPORATE CENTER DRIVE • OCONOMOWOC, WISCONSIN 53066-4828
800.245.0779 • 262.567.9157 • FAX 262.567.4047 • INTERNET ADDRESS: www.quest-technologies.com

An ISO 9001 Registered Company