

SERGIO PAULO PACKER

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE
TAREFAS DE PILOTOS DE AERONAVES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

SERGIO PAULO PACKER

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE
TAREFAS DE PILOTOS DE AERONAVES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Energia de
Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de novembro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Packer, Sergio Paulo

Estudo sobre a influência da vibração na execução de tarefas de pilotos de aeronaves / S.P. Packer. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

78 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Vibrações de aeronaves (Influência do homem; serviços)
2.Aviação (Serviços) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

Dedico esse trabalho a meus pais, por
todo o suporte e carinho desde a minha
infância.

À Alessandra, por tudo que representa na
minha vida.

Pai, este mestrado também é seu. Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Gilberto, pelas valiosas contribuições a este trabalho, tanto na fase de qualificação quanto na defesa.

Ao Professor Sylvio, pela ajuda nos momentos difíceis.

Ao amigo Sideto, pela colaboração direta no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho visa estudar a influência da vibração no desempenho de tarefas de pilotos de aeronaves. Para o seu desenvolvimento, foi montada uma bancada usando um assento de aeronave para avaliar a transmissibilidade da vibração vertical para os pilotos e verificar se níveis elevados de aceleração, como no caso de falha da turbina, podem prejudicar sua habilidade em desempenhar tarefas de leitura, escrita e digitação. Todos os experimentos foram realizados com sucesso, comprovando grande parte dos estudos anteriores sobre o assunto. Ainda são apresentadas comparações relacionando os mesmos níveis de aceleração usados no teste de transmissibilidade, com as normas ISO 2631-1 e ANSI S3.18 para avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro, que são as mais apropriadas para a correlação com o mundo aeronáutico.

Palavras-chave: Vibração. Execução de tarefas. Transmissibilidade. Exposição humana à vibração de corpo inteiro.

ABSTRACT

This work aims to study the influence of vibration in aircraft pilots' task performance. For the study development, it was assembled a rig test using an aircraft pilot seat, in order to evaluate the transmissibility of vertical vibration to the pilots and to verify if high acceleration levels, as in the case of engine failure, are of significance to the pilot's ability in performing tasks such as reading, writing and typing. All the experiments were accomplished successfully, confirming most of early studies about the subject. Comparisons are also presented, relating the same acceleration levels used in the transmissibility test with ISO 2631-1 and ANSI S3.18 standards for evaluation of human exposure to whole-body vibration which are the most appropriated for correlation with the aeronautical world.

Key-words: Vibration. Task performance. Transmissibility. Human exposure to whole-body vibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Manequim Hybrid III projetado para o uso em testes de colisão frontal em veículos. (<i>AGARDAR-330</i>). Harris e Piersol (2002)	19
Figura 2 – Modelo paramétrico biodinâmico para uma pessoa sentada ou em pé, para o cálculo das respostas do corpo humano às vibrações de baixa frequência. (f_0 é a frequência natural do sistema) Harris e Piersol (2002)	22
Figura 3 – Impedâncias mecânicas de uma pessoa sentada e em pé, vibrando ao longo do seu eixo longitudinal em função da frequência. Adaptado de Harris e Piersol (2002)	23
Figura 4 – Curvas de respostas típicas do sistema tórax-abdome do ser humano exposto a vibrações longitudinais. Harris e Piersol (2002)	25
Figura 5 – Modelo de três graus de liberdade para representar a porção do homem sentado. Boileau et al. (2002)	27
Figura 6 - Comparação dos valores idealizados de transmissibilidade de vibração do assento para cabeça estipulados pela norma (<i>ISO 5982.8</i>) com os valores calculados pelo modelo da Figura 2.6. Boileau et al. (2002)	28
Figura 7 – Respostas à estímulos com diversos ângulos de encosto de assento. Arrowsmith et al. (2005) apud Mansfield (2006)	31
Figura 8 - Acelerações de pico em várias frequências em que os sujeitos se recusaram a continuar a exposição à vibração vertical. Harris e Piersol (2002) ..	33
Figura 9 – Comparação das transmissibilidades de um assento rígido, assento com espuma e um assento com suspensão. Griffin (1990)	39
Figura 10 – Eixos basicêntricos do corpo humano para vibração de corpo inteiro translacional (X, Y e Z) e rotacional (Rx, Ry, e Rz). ISO 2631-1	42
Figura 11 - Zona de precaução de saúde para vibração de corpo inteiro (zona sombreada). ISO 2631-1	44
Figura 12 – Componentes da bancada de teste	47
Figura 13 – Esquema de excitação da bancada no eixo Z	48
Figura 14 – Questionário aplicado aos participantes do teste	49
Figura 15 – Médias dos níveis de aceleração aplicados no teste	50
Figura 16 – Esquema de Transmissibilidade	52
Figura 17 – Médias das transmissibilidades dos participantes no eixo Z	53

Figura 18 - Efeito da transmissibilidade da vibração no assento do piloto, aplicado às acelerações.....	54
Figura 19 – Sistema de coordenadas da aeronave.....	63
Figura 20 – Limites de aceleração longitudinal em função da freqüência e tempo de exposição; FDPB	70
Figura 21 - Comparação dos valores de aceleração com os estabelecidos pela norma ANSI S3.18 para FDPB.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Aplicabilidade das ponderações das vibrações de corpo inteiro W_k e W_d , para as direções de vibração X, Y, Z, R_x , R_y e R_z , mostradas na Figura 9 - (ISO 2631-1)	41
Tabela 3-1 – Média dos níveis de aceleração aplicados durante o teste	51
Tabela 3-2 – Participantes do teste - júri	51
Tabela 4-1 - Valores médios das transmissibilidades dos participantes	53
Tabela 4-2 – Avaliação de digitação dos participantes do teste	59
Tabela 4-3 - Avaliação de leitura dos participantes do teste	59
Tabela 4-4 - Avaliação de escrita dos participantes do teste	59
Tabela 4-5 – Conceitos aplicados pelos participantes do teste	60
Tabela 5-1 – Perfil de vôo	64
Tabela 5-2 – Limites de banda de freqüência de 1/3 de oitava	65
Tabela 5-3 – Níveis de aceleração na bancada em bandas de freqüência de 1/3 de oitava	65
Tabela 5-4 - Fatores de ponderação adotados pela norma ISO 2631-1	66
Tabela 5-5 – Avaliação para o eixo Z de acordo com a norma ISO 2631-1	67
Tabela 5-6 – Escala de ponderação para amplitude de aceleração com relação ao conforto de acordo com a norma ISO 2631-1	68
Tabela 5-7 – Fatores de ponderação adotados pela norma ANSI S3.18	71
Tabela 5-8 – Avaliação pela norma ANSI S3.18	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADAM	Advanced Dynamic Anthropomorphic Manikin
ANSI	American National Standard Institute
CAS	Crew Alerting System
EICAS	Engine Indication and Crew Alerting System
EL	Exposure Level
EET	Equivalent Exposure Time
FDPB	Fatigue Decrease Proficiency Boundary
ISO	International Standard Organization
KIAS	Knots Indicated Airspeed
LCD	Liquid Crystal Display
MCDU	Multifunction Control Display Unit
PFD	Primary Flight Display
RMS	Root Mean Square
TVAP	Transmissibilidade de Vibração em um Assento de Piloto
VDV	Valor de Dose de Vibração

LISTA DE SÍMBOLOS

$T(f)$	transmissibilidade do ponto 2 para o ponto 1
a_1 e a_2	acelerações nos pontos 1 e 2
Hz	Hertz (unidade de frequência)
Z_m	impedância mecânica
F	força atuante no sistema
V	velocidade resultante do sistema
m/s^2	metros por segundo ao quadrado (unidade de aceleração)
kg	quilograma (unidade de massa)
g	aceleração da gravidade
m_0, m_1, m_2 e m_3	massas do modelo de três graus de liberdade
x_0, x_1, x_2 e x_3	coordenadas de deslocamento das três massas do modelo
c_i	coeficientes de amortecimento do modelo
k_i	coeficientes de rigidez do modelo
$a_w(t)$	aceleração instantânea ponderada com o tempo t
T	duração da medida
rad/s^2	radianos por segundo ao quadrado (unidade de aceleração)
W_d e W_k	ponderações de vibração de corpo inteiro
X, Y, Z	direções do sistema de coordenadas
R_x, R_y e R_z	vibração rotacional
τ	tempo de integração pequeno
t	tempo de exposição
t_0	tempo de observação (tempo instantâneo)
a_{wx}, a_{wy} , e a_{wz}	acelerações ponderadas em cada eixo ortogonal de translação
n	índice na eq.(9), que varia de 2 a 4
Φ	amplitude física do estímulo
h	horas (unidade de tempo)
$(a_w)_i$	amplitude da aceleração equivalente
a_{weq}	amplitude da aceleração equivalente correspondente ao tempo total de exposição
Σ	somatório

a_{w_total}	soma das acelerações ponderadas em cada eixo ortogonal de translação
m	metros (unidade de distância)
ft	feet (unidade de distância)
$\overline{T(f)}$	transmissibilidade média do piso da bancada ao assento do piloto em banda estreita
#	número
s	segundos (unidade de tempo)
a(f)	magnitude de aceleração em banda estreita
n_f	número de freqüências dentro da banda de 1/3 de oitava
W_i	fator de ponderação para o cálculo da aceleração ponderada
a_v	valor total de vibração
a_{ex}, a_{ey}, a_{ez}	acelerações equivalentes em cada um dos três eixos ortogonais x, y e z
k_x, k_y, k_z	fatores multiplicadores para o cálculo da aceleração ponderada
dB	decibel (medida da razão entre duas quantidades)
A_i	amplitude de vibração
A'	valor de aceleração de referência
(τ')	tempo permissível correspondente para uso da norma ANSI S3.18
t'	tempos de exposição equivalentes para uso da norma ANSI S3.18
T'	tempos equivalentes efetivos para uso da norma ANSI S3.18
σ	desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	17
2	SERES HUMANOS EXPOSTOS À VIBRAÇÃO	18
2.1	SIMULAÇÃO DE SERES HUMANOS USANDO MANEQUINS.....	18
2.2	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DAS PARTES DO CORPO HUMANO	21
2.3	SUJEITOS EXPOSTOS A VIBRAÇÕES NA DIREÇÃO VERTICAL.....	22
2.4	MODELO MATEMÁTICO REPRESENTANDO UM HOMEM SENTADO PARA TESTES DE VIBRAÇÃO EM ASSENTOS.....	26
2.5	EFEITOS DA VIBRAÇÃO MECÂNICA.....	29
2.6	EFEITOS DA VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE TAREFAS.....	34
2.6.1	Efeitos da vibração em tarefas manuais	35
2.6.2	Efeitos da vibração em atividades de leitura	36
2.7	PROTEÇÃO CONTRA VIBRAÇÕES.....	38
2.8	CRITÉRIO DE TOLERÂNCIA HUMANA A EXPOSIÇÃO DE VIBRAÇÃO DE CORPO INTEIRO	40
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.1	DESCRIÇÃO DA BANCADA.....	46
3.2	DESCRIÇÃO DO TESTE	47
3.3	PARTICIPANTES DO TESTE - JÚRI	51
4	RESULTADOS	52
4.1	TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO NO ASSENTO DO PILOTO	52
4.2	AVALIAÇÃO DOS PARTICIPANTES NO TESTE.....	54
4.2.1	Resumo das tarefas executadas.....	59
4.2.2	Resumo dos conceitos aplicados pelos participantes	60
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COMPARADOS COM A LITERATURA	61
5.1	COMPARAÇÃO DAS ACELERAÇÕES COM AS NORMAS PARA EXPOSIÇÃO DE VIBRAÇÃO NO CORPO INTEIRO	62

5.2	AVALIAÇÃO DAS ACELERAÇÕES PELA NORMA ISO 2631-1	66
5.3	AVALIAÇÃO DAS ACELERAÇÕES PELA NORMA ANSI S3.18	69
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS COMPARADOS COM SITUAÇÕES DE VÔO.....	74
6	CONCLUSÕES.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Vibração é o movimento periódico, ou aleatório, de um elemento estrutural ou peça de uma máquina: movimento repetitivo a partir de uma posição de repouso.

Embora praticamente inevitável e algumas vezes até necessária, ela pode causar problemas de saúde para quem sofre seus efeitos. Estes problemas podem ir desde a sensação de enjôo, quando se viaja de navio ou avião, até a trepidação incômoda de britadeiras ar comprimido.

É sabido que a vibração pode danificar máquinas e estruturas, e por isto mesmo ela deve ser controlada e/ou isolada.

Da mesma forma, o corpo humano também pode ser afetado – daí a necessidade de medir e estabelecer limites para a vibração, como agente de insalubridade no trabalho.

A preocupação com fatores humanos, ligados ao controle de vibração no meio aeronáutico começou a ficar evidente quando em Janeiro de 1989, um Boeing 737-400 da empresa British Midland Airways colidiu com a pista, matando 47 pessoas.

Notícias sobre o caso (informações da Internet)¹ relatam que instantes após a decolagem da aeronave, foram percebidos pela tripulação um nível de vibração de moderado a severo, além de cheiro de fumaça dentro do cockpit.

De acordo com os relatos, o co-piloto monitorou os instrumentos que mostravam o estado dos motores e quando perguntado sobre qual motor estava causando o problema, começou dizendo que era o esquerdo, mas logo depois mudou de opinião e disse que era o direito.

Baseado nessa informação, o comandante deu ordem para que ele reduzisse a potência do motor direito, o qual esperava que fosse o defeituoso. Tragicamente, ele estava errado e como o avião já se encaminhava para a descida de emergência, era tarde demais para tentar reiniciar o motor que estava operando normalmente.

De acordo com as mesmas fontes, análises feitas posteriormente provaram que os instrumentos estavam mostrando corretamente qual motor estava sofrendo um nível de vibração anormal, mas o co-piloto simplesmente não lembrava o que de fato ele tinha visto nos instrumentos e que o fez mudar de idéia.

O relatório final especula que a hesitação entre direito e esquerdo poderia ter sido

¹<http://www.newscientist.com/article/mg12817432.600-human-error-in-the-air-the-report-on-the-m1->

causada por uma dificuldade na leitura dos instrumentos, devido à vibração excessiva no cockpit.

A preocupação com fatores humanos também é evidente no caso de aviões militares. Segundo Smith et al. (2007), pilotos de aviões militares, especialmente os de motor à hélice, podem estar sujeitos a níveis de vibração mais altos e por um período prolongado. O aumento de queixas de desconforto, irritação, fadiga e mesmo dores nas costas tem sido associadas a níveis de vibração cada vez maiores, devido ao aumento da potência dos motores e a períodos maiores de exposição, em missões cada vez mais extensas.

Assentos acolchoados para esse tipo de aeronave têm sido considerados como uma estratégia de baixo custo para melhorar o conforto e reduzir os efeitos da vibração, particularmente para exposições prolongadas. Entretanto, esse recurso se mostra ineficiente para vibração de baixa frequência na direção vertical, o que seria a principal causa dos incômodos relatados por pilotos comerciais e militares e que é o principal foco de estudos atualmente.

Durante o trabalho, visou-se estudar a vibração transmitida ao corpo inteiro, com a preocupação de mostrar como a vibração de baixa frequência na direção vertical interfere no desempenho das tarefas que pilotos devem executar durante o vôo.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho são mostrar como a vibração de baixa frequência na direção vertical interfere no desempenho das tarefas de leitura, escrita e digitação, através de testes em uma bancada especialmente montada para esse propósito e fazer uma comparação das acelerações aplicadas nesses testes com as normas ISO 2631-1 e ANSI S3.18, que são as mais apropriadas para a correlação com o mundo aeronáutico.

2 SERES HUMANOS EXPOSTOS À VIBRAÇÃO

A exposição de seres humanos à vibração é um tema muito estudado por diversos autores em todo o mundo devido à grande abrangência do assunto.

Entretanto, trabalhos específicos relacionados com o mundo aeronáutico, como o apresentado por Osmond e Goulain (2001) e que foi desenvolvido no centro de testes da fabricante de aeronaves Airbus, não são freqüentes.

Dentro desse tópico, serão apresentados alguns estudos sobre o tema, assim como algumas características principais que devem ser abordadas no estudo de seres humanos expostos à vibração.

2.1 SIMULAÇÃO DE SERES HUMANOS USANDO MANEQUINS

Muitos processos cinemáticos, carregamentos físicos e efeitos destrutivos na anatomia macroscópica podem ser estudados em manequins que se aproximam de um ser humano em tamanho, forma, mobilidade, peso total e distribuição de massa nos segmentos do corpo.

Em contraste aos usados apenas para o propósito de carga, existem manequins simulando propriedades dinâmicas e estáticas básicas, os chamados manequins antropométricos ou antropomórficos.

Muitos desses manequins são projetados para simulações específicas. Segundo Harris e Piersol (2002), para colisões frontais com automóveis, o manequim Hybrid III mostrado na Figura 1 se tornou o boneco padrão, e é usado nos Estados Unidos e Europa para simular ocupantes em testes de colisão e testes de sistemas de freio. O manequim original foi construído para corresponder ao percentil 50 do homem americano em peso e altura. Ele possui um “esqueleto” de metal coberto com uma pele de vinil e espuma para produzir a forma externa apropriada, com uma coluna lombar de borracha curvada para imitar a postura de uma pessoa sentada e uma estrutura de ombro capaz de suportar as cargas de um cinto de segurança. As respostas da cabeça, do pescoço, do tórax e joelho do Hybrid III são projetadas para imitarem respostas humanas, isto é, a aceleração da cabeça resultante do impacto

das partes frontal e lateral, o balanço lateral e ântero-posterior do pescoço, a deflexão do tórax para forças distribuídas no esterno e os impactos no joelho.

Um manequim avançado, ADAM (Advanced Dynamic Anthropomorphic Manikin), foi desenvolvido para uso em ejeção de assentos aeronáuticos e testes de pára-quedas.

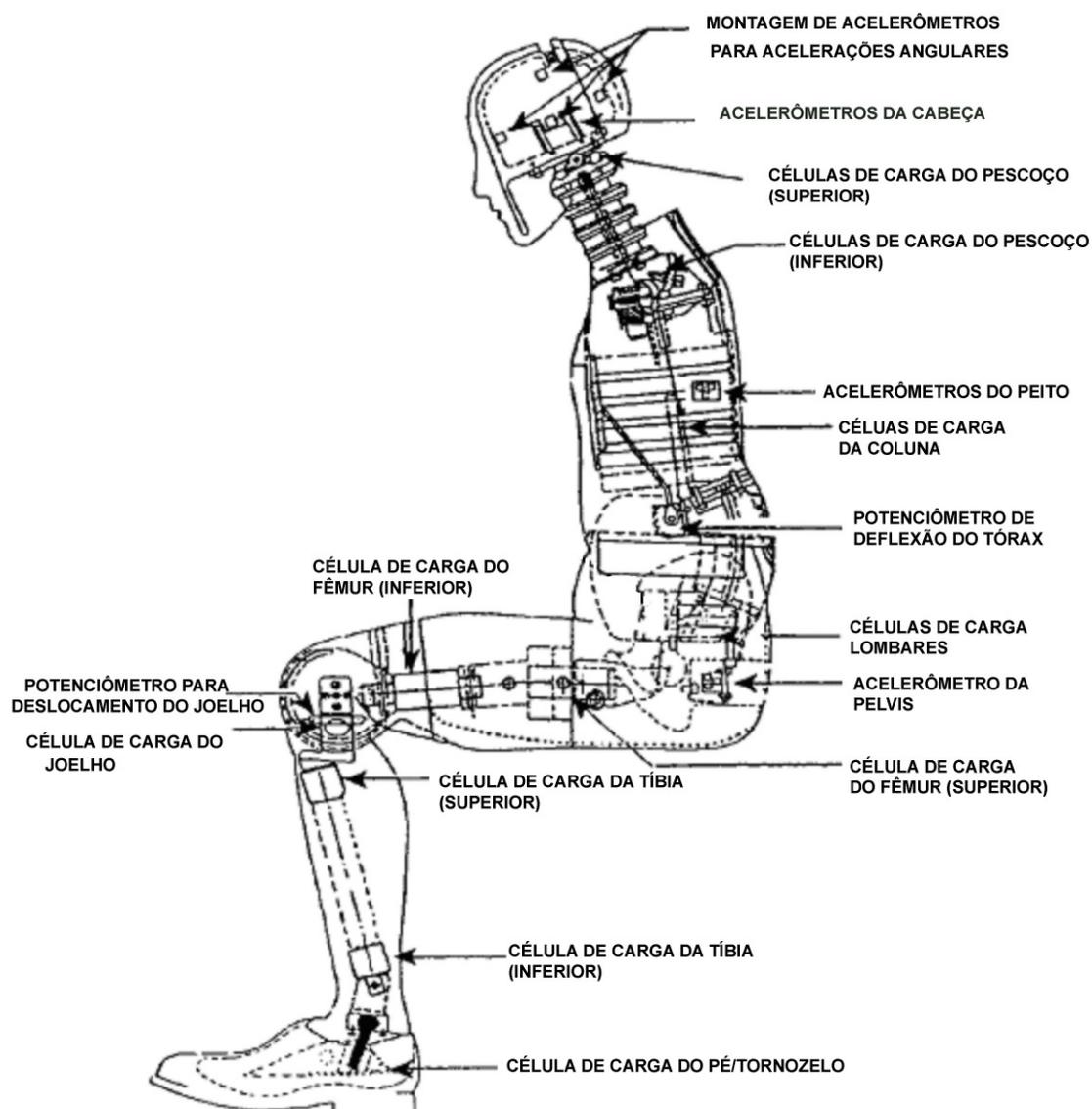


Figura 1 - Manequim Hybrid III projetado para o uso em testes de colisão frontal em veículos. (AGARDAR-330). Harris e Piersol (2002)

Segundo Griffin (2001) apud Mansfield (2006), o desenvolvimento de um modelo biodinâmico é uma tarefa desafiadora, pelas seguintes razões:

- i. O corpo humano é uma estrutura complexa
- ii. As respostas aos estímulos em sua maioria não são lineares
- iii. Influência da atividade voluntária e involuntária do controle muscular na postura corporal humana
- iv. Dificuldade da obtenção de dados empíricos necessários para uso nos parâmetros do modelo
- v. Dificuldades nas medidas dos movimentos e forças no corpo
- vi. Entendimento incompleto dos modos de movimento do corpo

Ainda segundo o mesmo autor, sete aplicações principais dos modelos biodinâmicos podem ser listadas como abaixo:

- i. Prever o movimento ou forças causadas por situações muito danosas para uma determinação experimental com pessoas
- ii. Prever o movimento ou forças causadas por muitas situações simultâneas ou variadas para determinação experimental
- iii. Entender a natureza dos movimentos do corpo humano
- iv. Fornecer informação necessária para a otimização de sistemas de isolamento e a dinâmica de outros sistemas acoplados ao corpo
- v. Determinar as condições de impedância padrão para os testes de vibração usados no homem
- vi. Fornecer um método conveniente para resumir dados experimentais biodinâmicos
- vii. Prever a influência de variáveis que afetam as respostas biodinâmicas

2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DAS PARTES DO CORPO HUMANO

Segundo Beranek e Vér (1992), a transmissibilidade representa a resposta da razão de amplitudes do sistema entre dois pontos (eq.(1)).

$$T(f) = \frac{a_1(f)}{a_2(f)} \quad (1)$$

onde a_1 e a_2 são as acelerações nos pontos 1 e 2 respectivamente.

De acordo com Seagull e Wickens (2006), em uma locomoção normal, como caminhando, o sistema músculo-esquelético amortece os efeitos dos movimentos corporais que possam ser estranhos à cabeça. As pernas, o dorso, e o pescoço são responsáveis por absorver o choque e limitar a quantidade de movimento que é transmitida para a cabeça.

Entretanto, quando existe um ambiente vibratório, estas mesmas partes do corpo podem ressonar. Há ressonância quando ocorre transferência de energia de um sistema oscilante para outro, sempre que a frequência do primeiro coincide com uma das frequências próprias do segundo.

Os componentes do corpo de principal interesse em pesquisas de vibração são a cabeça, o dorso e braços, já que outras partes do corpo também podem ressonar em determinadas frequências, mas seus efeitos não são tão relevantes para o desempenho de tarefas visuais ou manuais. Segundo Griffin (1990), as frequências do corpo que podem afetar essas tarefas têm o limite superior em torno de 20 Hz para vibrações verticais.

Por esta razão, as pesquisas de vibração relacionadas ao desempenho de tarefas manuais e visuais são focadas em frequências abaixo da faixa 20 Hz e a maior parte delas abaixo de 10 Hz.

Sistemas mecânicos simples, como o mostrado na Figura 2, usados para descrever uma pessoa sentada ou em pé, segundo Harris e Piersol (2002), são usualmente suficientes para descrever e entender as características mais importantes das respostas do corpo humano às vibrações de baixa frequência. Entretanto, é difícil estipular valores numéricos para os elementos do modelo, já que eles dependem

criticamente do tipo de excitação, do tipo de corpo do indivíduo e da sua postura e tônus muscular.

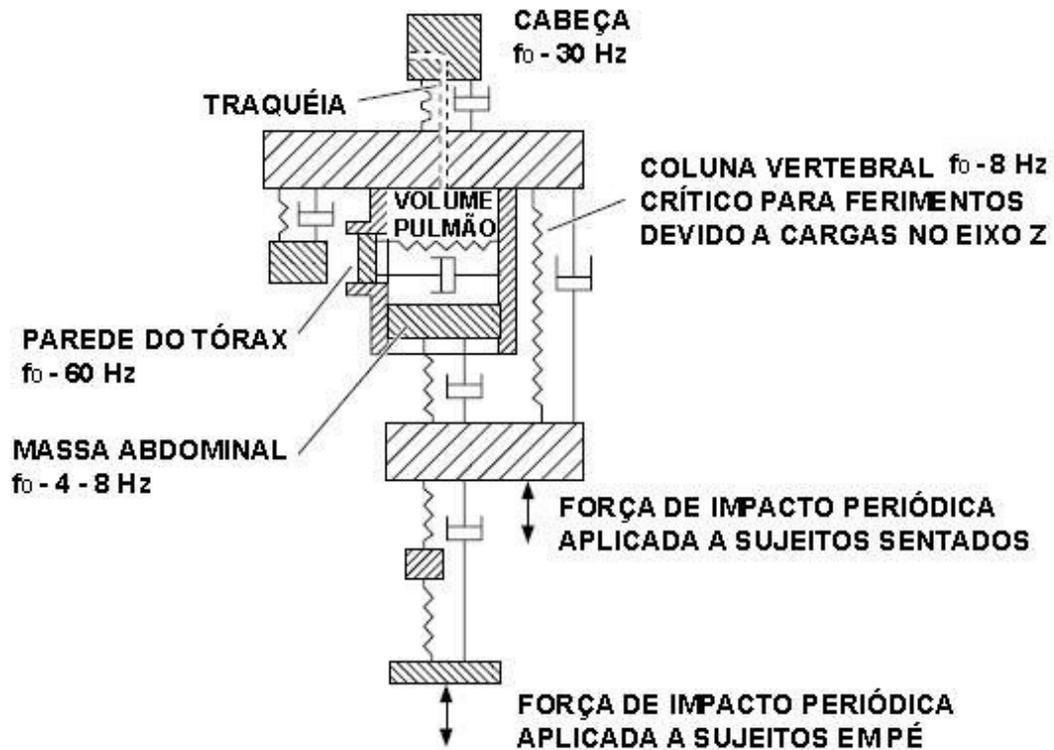


Figura 2 – Modelo paramétrico biodinâmico para uma pessoa sentada ou em pé, para o cálculo das respostas do corpo humano às vibrações de baixa frequência. (f_0 é a frequência natural do sistema) Harris e Piersol (2002)

2.3 SUJEITOS EXPOSTOS A VIBRAÇÕES NA DIREÇÃO VERTICAL

A impedância mecânica é definida por:

$$Z_m = \frac{F}{V} \quad (2)$$

Onde:

Z_m = impedância mecânica

F= força atuante no sistema

V= velocidade resultante do sistema

As impedâncias mecânicas de uma pessoa sentada e em pé, vibrando ao longo do seu eixo longitudinal em função da frequência são mostradas na Figura 3.

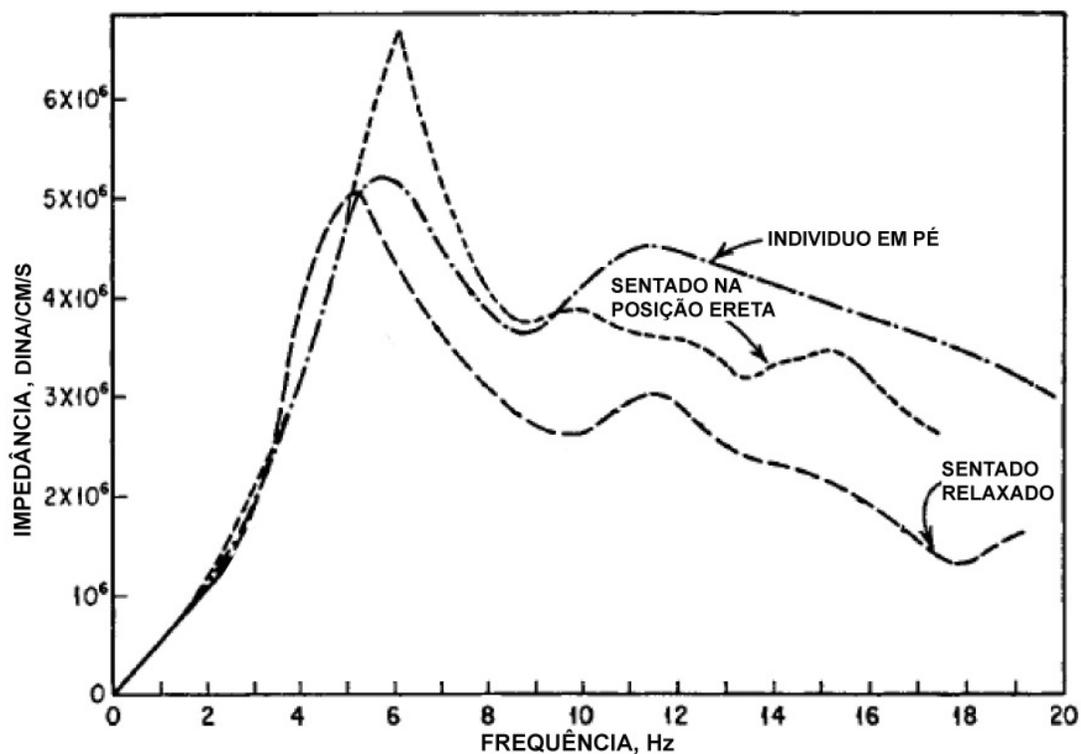


Figura 3 – Impedâncias mecânicas de uma pessoa sentada e em pé, vibrando ao longo do seu eixo longitudinal em função da frequência. Adaptado de Harris e Piersol (2002)

Abaixo de aproximadamente 2 Hz, o corpo age como uma massa pontual. Para um indivíduo sentado, a primeira ressonância está entre 4 e 6 Hz; para um indivíduo em pé, os picos de ressonância ocorrem entre aproximadamente 6 e 12 Hz.

As ressonâncias entre 4 e 6 Hz e 10 e 14 Hz são sugestivas de combinações massa-mola do tronco todo com a parte de baixo da coluna e pélvis e da parte de cima do tronco com os movimentos de flexão para frente da parte superior da coluna vertebral.

Como o centro de gravidade da parte superior do tronco está consideravelmente à frente da coluna, o movimento de flexão ocorrerá mesmo se a força for aplicada paralelamente ao eixo da coluna. Uma mudança na direção da força, para que esta seja aplicada em um ângulo com relação à coluna (por exemplo, inclinando o tronco para frente) influenciará este movimento de flexão consideravelmente.

Similarmente, o centro de gravidade da cabeça pode estar consideravelmente à frente da junção com o pescoço, o que permite seu movimento para frente e para trás, em vez de um movimento puramente vertical.

Como mostrado na Figura 2, a cabeça apresenta sua ressonância mecânica em 30 Hz. Quando sujeita à vibração próxima dessa faixa, a amplitude de movimento da cabeça pode exceder a amplitude do ombro em até três vezes. Essa ressonância é importante na conexão com a deterioração da acuidade visual sob influência de vibração. Outra faixa de frequência perturbadora está entre 60 e 90 Hz e sugere ressonância do globo ocular.

Um dos mais importantes subsistemas do corpo, que é excitado nas posições sentado e em pé, assim com na posição deitada, é o sistema tórax-abdome.

As vísceras abdominais têm uma alta mobilidade devido à rigidez muito baixa do diafragma e do volume de ar dos pulmões e da caixa torácica acima delas.

Sob influência da vibração longitudinal e transversal do tronco, a massa abdominal vibra para dentro e para fora da caixa torácica. Durante a fase do ciclo em que o conteúdo abdominal se move em direção às costelas, a parede abdominal é comprimida na direção contrária e o abdome parece maior em volume; ao mesmo tempo, a deflexão para baixo do diafragma causa uma diminuição na circunferência do peito.

Esse deslocamento periódico das vísceras abdominais tem a sua ressonância entre 3 e 3.5 Hz.

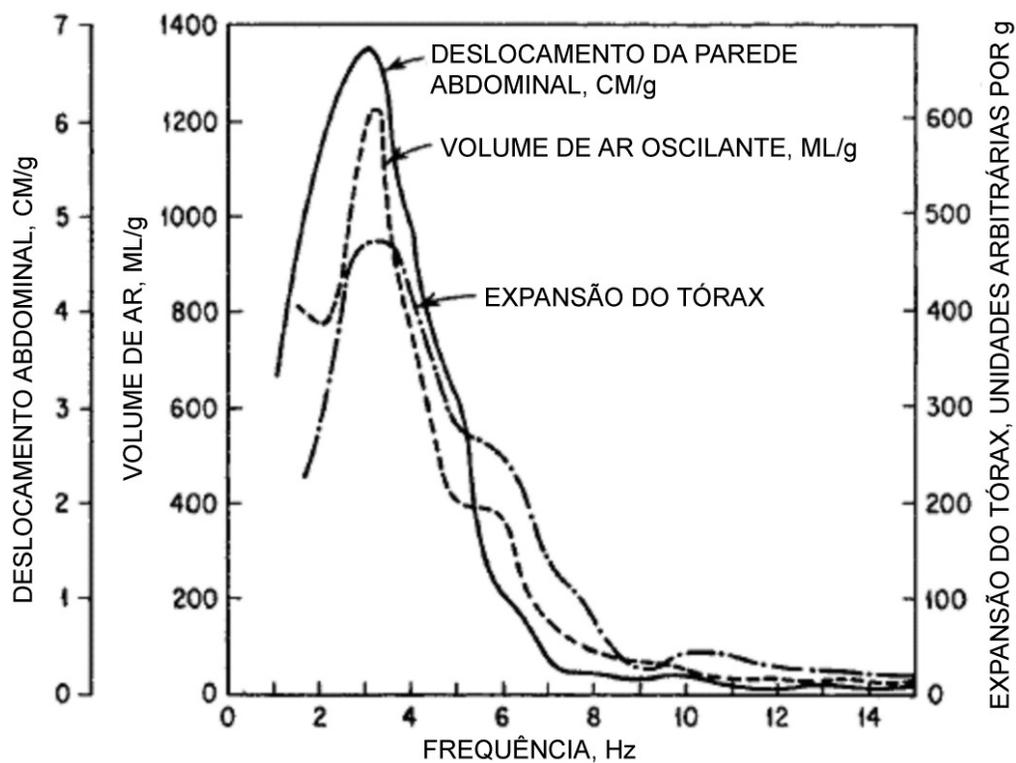


Figura 4 – Curvas de respostas típicas do sistema tórax-abdome do ser humano exposto a vibrações longitudinais. Harris e Piersol (2002)

As oscilações da massa abdominal estão acopladas com as oscilações do sistema boca-peito. Medidas de impedância desse sistema na boca (aplicando-se pressões oscilantes de ar para dentro da boca) mostram que a parede abdominal e a parede anterior do peito respondem a essa pressão. A parede abdominal, assim como a parede anterior do tórax tem uma resposta máxima entre 3 e 5 Hz. A vibração do sistema abdominal como resultado da exposição de um sujeito sentado ou em pé é detectada como uma modulação da velocidade do fluxo de ar através da boca. Por essa razão, para grandes amplitudes de vibração, a fala pode ser modulada na frequência de exposição.

2.4 MODELO MATEMÁTICO REPRESENTANDO UM HOMEM SENTADO PARA TESTES DE VIBRAÇÃO EM ASSENTOS

Recentemente, as aplicações envolvendo as características biodinâmicas de resposta do corpo humano, têm sido particularmente evidenciadas na área de testes de vibração em assentos.

Segundo Boileau et al. (2002), as respostas biodinâmicas características de pessoas sentadas é influenciada por vários fatores, dentre os quais a postura, peso, o tipo de excitação e a amplitude.

Ainda segundo o mesmo autor, a grande quantidade de variações observadas pelos pesquisadores para a massa aparente, impedância mecânica e transmissibilidade do assento para cabeça são um indicativo da influência que esses parâmetros podem ter nas suas funções de resposta.

Estreitando-se a quantidade de condições experimentais usadas pelos diferentes pesquisadores, é possível mostrar que o espalhamento dos dados pode ser reduzido significativamente.

Baseado na análise de vários modelos mecânicos reportados, um modelo base, de 3 graus de liberdade com a estrutura mostrada na Figura 5 é então proposto por Boileau et al. (2002), para representar uma pessoa sentada em um assento. Esse modelo, derivado da norma ISO 5982.8, se distingue da maioria dos outros modelos, por satisfazer simultaneamente a massa aparente, impedância mecânica e os dados de transmissibilidade do assento para a cabeça, minimizando o número de parâmetros necessários para descrevê-lo.

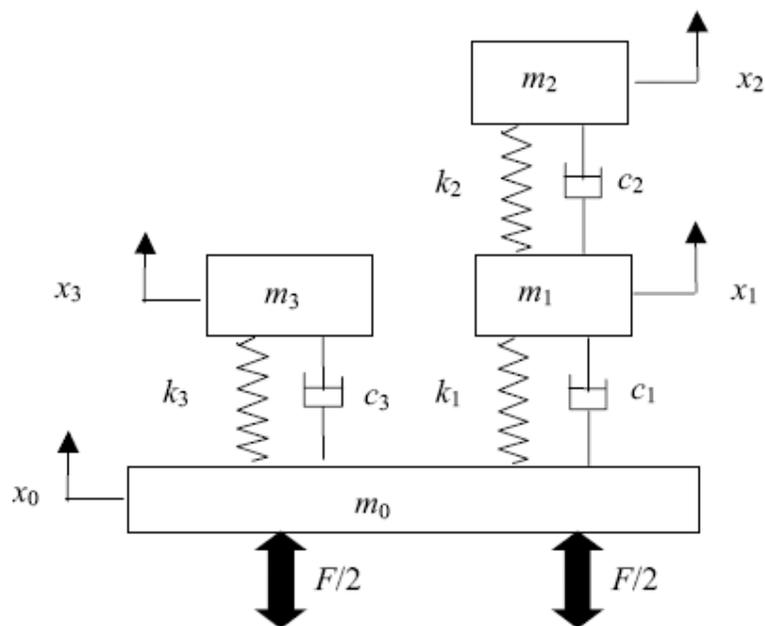


Figura 5 – Modelo de três graus de liberdade para representar a porção do homem sentado. Boileau et al. (2002)

No modelo, as massas m_1 , m_2 e m_3 são introduzidas em razão do pico observado na resposta fornecida pela norma ISO 5982.8 na frequência próxima de 4 Hz, conforme observado na Figura 6. A massa m_0 é introduzida para dar maior flexibilidade ao modelo, sem a necessidade de aumentar o número de graus de liberdade.

As massas m_1 e m_2 são introduzidas para permitir a amplitude desejada de transmissão de vibração através do corpo. Embora os componentes do modelo não correspondam às partes identificáveis do corpo, o movimento da massa m_2 é tomado para representar o movimento da cabeça para o cálculo da transmissibilidade do assento para cabeça.

A soma das massas é tomada para corresponder à massa corporal suportada pelo assento.

As equações de movimento para o modelo são formuladas como segue:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_1(x_1 - x_0) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) &= 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) + k_3(x_3 - x_0) &= 0 \end{aligned}$$

(3)

Onde m_i , c_i e k_i ($i = 1, 2, 3$) são as massas, coeficientes de amortecimento e coeficientes de rigidez respectivamente do modelo, como mostrado na Figura 5. X_0 é o deslocamento do ponto de contato, e x_1 , x_2 e x_3 são as coordenadas de deslocamento das três massas do modelo.

Os envelopes que são mostrados pelas linhas espessas e contínuas na Figura 6 definem uma gama de valores idealizados de transmissibilidade de vibração do assento para cabeça estipulados pela norma ISO 5982.8, que trata das características mecânicas do corpo na forma de impedância mecânica. As informações dessa norma são restritas a faixa de frequência de 0.5 a 30 Hz e para um número limitado de posições do corpo.

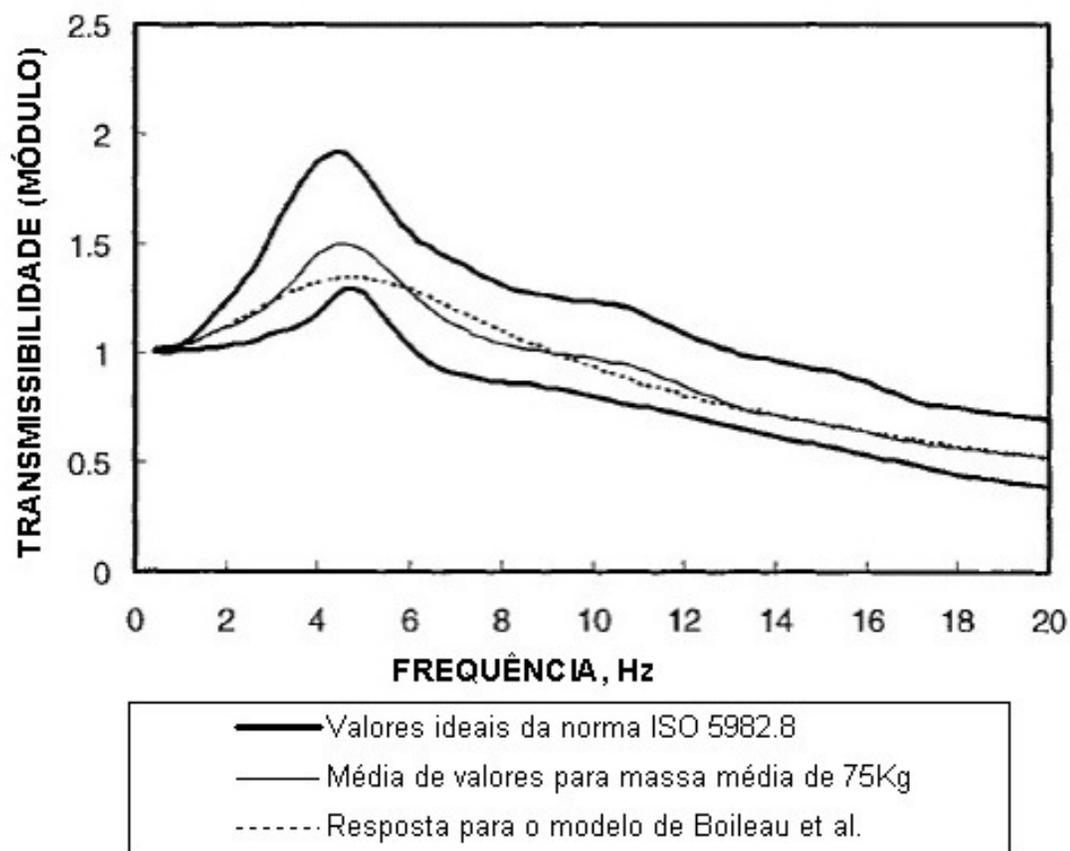


Figura 6 - Comparação dos valores idealizados de transmissibilidade de vibração do assento para cabeça estipulados pela norma (ISO 5982.8) com os valores calculados pelo modelo da Figura 2.6. Boileau et al. (2002)

A média dos valores de resposta para uma população com a massa média próxima de 75 kg é mostrada pela linha fina e contínua nesse gráfico e serve como uma meta para aplicações como a simulação mecânica da resposta à vibração vertical em pessoas sentadas, ou desenvolvimento de assentos para reduzir os impactos transmitidos ao corpo. A linha pontilhada na mesma figura mostra os valores calculados usando-se o modelo biodinâmico mostrado na Figura 5 e que caracterizam a resposta biodinâmica de uma pessoa sentada, com a sua massa variando de 49-93 kg, quando suas costas não estão apoiadas e os pés estão descansando numa superfície que suporta um assento rígido, expostos a acelerações menores ou iguais a 5 m/s^2 rms.

2.5 EFEITOS DA VIBRAÇÃO MECÂNICA

a) Vibração de corpo inteiro

Segundo Seagull e Wickens (2006), quando a vibração de corpo inteiro é examinada, podem-se entender as limitações das pesquisas de vibração – limitações baseadas na variabilidade inerente entre pessoas e entre ambientes. Podem-se examinar pesquisas experimentais relacionando respostas médias de pessoas expostas à vibração em ambientes específicos, mas sempre é enfatizado que as diferenças individuais são significativas.

b) Diferenças individuais

Segundo Seagull e Wickens (2006), a literatura esclarece que as diferenças nos indivíduos podem ter efeitos dramáticos no desempenho de tarefas. A massa corporal, assim como outras considerações antropométricas podem fazer as frequências de ressonância de uma determinada pessoa variarem muito com relação a valores presumidos. Ou seja, pode-se presumir que os valores apresentados na literatura são apenas tendências.

c) Postura

A postura também pode ter efeitos profundos na transmissão de vibração.

Griffin (1990) mostra que quando o assento é a fonte da vibração, a transmissão de vibração para o corpo é maior quando as pessoas estão sentadas com as costas apoiadas. Esses experimentos são baseados em um assento que não amplifica e nem atenua a vibração (isto é, transmissibilidade de 1.0).

Jex e Magdaleno (1979) apud Seagull e Wickens (2006), em outra pesquisa, observaram que quando uma pessoa sente interferência em tarefas devido à ressonância do corpo, ela muda o ângulo da sua pélvis em alguns graus, mudando então a sua frequência de ressonância. Os autores mostram ainda que a postura, na maioria dos estudos de vibração, é gravada impropriamente.

Arrowsmith et al. (2005) apud Mansfield (2006), examinaram o desconforto causado pela vibração em um número bem grande de assentos com vários ângulos de encosto (desde horizontal até vertical). Eles constataram que o desconforto induzido pela vibração aumentava com a diminuição do ângulo do encosto do assento para variações entre 0 e 67.5 graus (isto é, 0 grau, posição deitada foi considerada mais desconfortável do que a posição a 67.5 graus). Foi notado que existe uma transição suave da posição de 0 grau até a posição a 67.5 graus e que existe um máximo nível de desconforto na frequência de excitação em 8 Hz.

Os resultados para um ângulo de 90 graus (com as costas eretas) são um pouco diferentes, pois mostram um nível maior de desconforto nessa posição do que nas posições em 67.5 e 45 graus, isto devido à postura não natural que é reforçada quando sentamos em um assento rígido com um ângulo de 90 graus de encosto – a maioria dos assentos têm o ângulo de encosto em torno de 80 graus. Considera-se também a resposta na região mais próxima de 4Hz, conforme mostrado na Figura 7, e que torna a percepção mais desagradável.

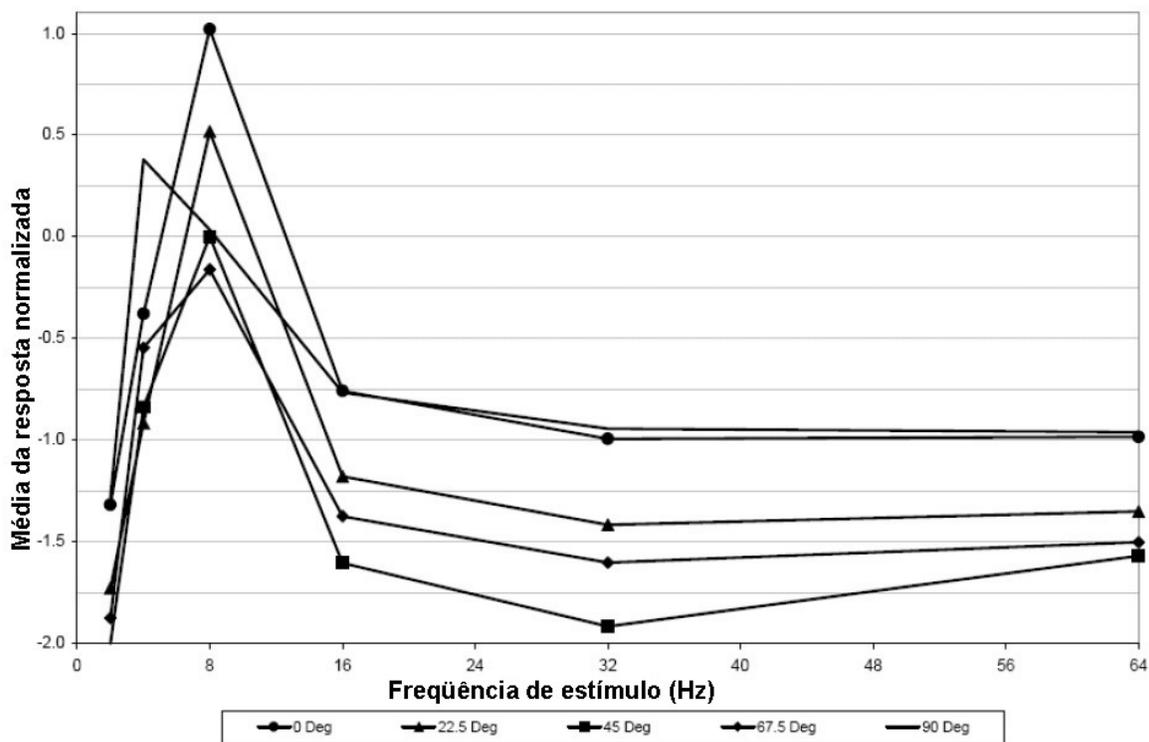


Figura 7 – Respostas a estímulos com diversos ângulos de encosto de assento. Arrowsmith et al. (2005) apud Mansfield (2006).

d) Respostas fisiológicas

A vibração pode induzir respostas fisiológicas nos sistemas cardiovascular, respiratório, esquelético, endócrino e metabólico, além de músculos e nervos. Griffin (1990), descreve que as mudanças cardiovasculares na resposta a vibrações verticais intensas, na faixa de 2 a 20 Hz são similares às que acompanham exercícios moderados, como o aumento dos batimentos cardíacos, da respiração e da pressão sanguínea.

Segundo Murray et al. (1966) apud Mansfield (2006), esse mesmo tipo de resposta do corpo também é esperada no caso de stress psicológico ou quando há aumento das atividades metabólicas causadas por cargas mais altas de atividade muscular. Ocorre principalmente em freqüências próximas das principais freqüências do corpo e aumentam quando a intensidade da vibração também é aumentada. Essas respostas fisiológicas acontecem nos momentos próximos da exposição à vibração e não estão presentes em exames posteriores.

Com relação às respostas respiratórias, baseado em um estudo em que vibrações senoidais na faixa de freqüência de 1.7 a 9.5 Hz e amplitudes até 1g foram

consideradas, Ernsting (1979) apud Mansfield (2006) relatou que em frequências mais altas, a vibração causou um aumento no consumo de oxigênio, além de hiperventilação.

Acima da faixa de 2-10 Hz Dupuis (1969) apud Mansfield (2006), relatou que 5 minutos de exposição a vibrações verticais com amplitude de 1.25 m/s^2 rms causaram uma diminuição na frequência respiratória, mas um aumento no volume respiratório.

e) Respostas subjetivas

A opinião subjetiva da vibração depende da amplitude relativa ao limite de percepção da pessoa, e, portanto, se torna necessário quantificar esse limite. Griffin et al. (1982a), Griffin et al. (1982b), Parsons et al. (1982) apud Mansfield (2006), publicaram uma série de artigos sobre a detecção desse limite de percepção.

Eles examinaram os limites de vibração para participantes sentados (sem apoio), em pé e deitados de costas usando vibração do tipo senoidal. Os participantes que estavam deitados não usavam nenhum apoio adicional. Os autores também consideraram parâmetros como a complexidade e duração da vibração. Os participantes eram questionados se eles podiam sentir um determinado nível de vibração.

Nenhuma diferença significativa foi encontrada entre participantes homens e mulheres com relação ao estímulo de vibração vertical. Entretanto, diferenças significativas foram encontradas nos limites de percepção para os participantes sentados, em pé e deitados. Foi concluído que os participantes tendem a serem mais sensíveis quando estão deitados em comparação aos participantes sentados ou em pé.

Sensações de desconforto e apreensão podem ser associadas com a exposição a vibrações de corpo inteiro e a vibrações nas mãos e braços quando o estímulo é percebido. A extensão do desconforto depende da intensidade, frequência, direção e duração da exposição e à postura e orientação do corpo, assim como do ponto de contato com o estímulo.

A resposta é também influenciada pelo ambiente no qual o movimento é experimentado. A faixa de resposta de indivíduos diferentes a um dado estímulo é bem larga.

Em geral, respostas subjetivas à vibração podem ser subdivididas em três grandes categorias: o limite de percepção, o início de sensações desagradáveis e o limite da tolerância.

Nas situações em que a “percepção” da vibração é considerada como inaceitável, o limite entre exposições aceitáveis e inaceitáveis será relacionado com a amplitude física do estímulo correspondente ao limite de percepção, e não dependerá de sua duração.

Os resultados de um experimento realizado por Ziegenruecker e Magid (1959) apud Harris e Piersol (2002), para estabelecer os limites de tolerância à vibração vertical para exposições de curta duração (menos que 5 minutos) são mostrados na Figura 8.

As acelerações de pico em que 10 pessoas se recusaram a continuar a exposição podem ser vistas como dependentes da frequência.

As pessoas reportaram como a razão para não suportarem a exposição, tanto o desconforto geral como em faixas de frequência restritas, dificuldades para respirarem (1 a 4 Hz) ou dores torácicas ou abdominais (3 a 9 Hz).

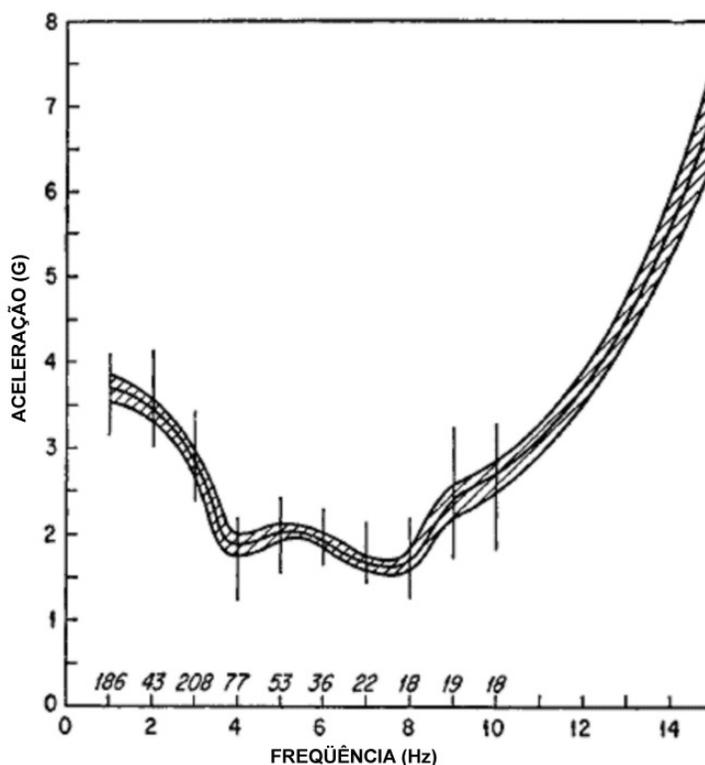


Figura 8 - Acelerações de pico em várias frequências em que os sujeitos se recusaram a continuar a exposição à vibração vertical. Harris e Piersol (2002)

Na figura anterior, a abscissa indica o tempo de exposição em segundos em sua frequência correspondente. A área sombreada tem a largura de um desvio padrão em cada lado da média (10 pessoas).

2.6 EFEITOS DA VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE TAREFAS

Segundo Harris e Piersol (2002), o desempenho de tarefas que requerem resposta física para alguns estímulos envolve processos neurológicos periféricos (percepção e motor) e centrais, com múltiplas características de retorno e um sistema de controle sofisticado.

Cada um desses processos é complexo, é mais, ou menos desenvolvido em indivíduos diferentes e pode ser influenciado por treinamento e pelo estado geral de saúde.

Conseqüentemente, não se deve generalizar o resultado de uma tarefa particular e sob uma condição de vibração também particular.

Segundo Mansfield (2006), os estudos experimentais das atividades humanas sob vibração, podem tipicamente ser categorizados em duas diferentes aproximações principais, cada uma com suas vantagens e desvantagens próprias:

- O estudo de respostas humanas à vibração em situações muito bem controladas;
- O estudo de respostas humanas à vibração em situações reais.

Independente do método de medida, ainda segundo o mesmo autor, é sabido que os seres humanos tendem a apresentar respostas a vibrações muito individuais. Haverá grandes diferenças nas respostas de todos os indivíduos (inter-subject variability), mas também nas respostas de certos indivíduos em ocasiões diferentes (intra-subject variability). Em geral, quando se trata de técnicas experimentais com seres humanos envolvidos, existem vários fatores que tendem a divergir os resultados, o que torna o planejamento das medições muito importante e o entendimento das

limitações inerentes crucial. É, portanto, importante perceber que os resultados dos experimentos são influenciados principalmente pela técnica experimental utilizada.

2.6.1 Efeitos da vibração em tarefas manuais

A vibração pode interferir no desempenho de sistemas controlados manualmente. Segundo Harris e Piersol (2002), a extensão do efeito depende do movimento manual, da dinâmica do controle e do sistema controlado. Um controle que responde pelo deslocamento das mãos pode ser interrompido pela vibração vertical em frequências entre 2 e 6 Hz.

O efeito da duração da exposição também pode degradar o seu desempenho ao longo do tempo.

Segundo os mesmos autores, a exposição das mãos à vibração pode levar a uma disfunção sensoneural suficiente para reduzir a habilidade de executar tarefas manuais refinadas, como abotoar uma roupa.

A maioria das investigações de vibração examina seus efeitos em tarefas envolvendo monitores de computadores ou tarefas de controle manual associadas com atividades industriais ou militares. (Seagull e Wickens (2006))

Essas investigações incluem a operação de controladores manuais discretos, como botões e alavancas, mas também de controles manuais contínuos, como volantes ou sintonizadores manuais.

Corbridge e Griffin (1991) apud Seagull e Wickens (2006) também investigaram a influência da vibração de corpo inteiro em atividades executadas por passageiros de transportes públicos, como a escrita e a tentativa de tomar líquido ou segurar uma xícara de café.

Os resultados revelaram que vibrações em bandas de frequência centradas em 4 Hz fizeram com que 85% das pessoas derramassem líquido, mesmo na amplitude mais baixa de vibração. No mesmo experimento, apenas 10% das pessoas derramou líquido em frequências menores que 3 Hz ou acima de 5 Hz.

Griffin e McLeod (1986) apud Seagull e Wickens (2006) dividiram as tarefas manuais em três tipos, para melhorar o entendimento da vibração nessas tarefas.

Os três tipos de tarefas incluem:

Tipo A: Manipulação contínua da mão no espaço sem suporte, como procurando ou localizando um objeto no espaço, segurando um objeto solto ou apontando.

Tipo B: Manipulação contínua de um objeto fixo no espaço. Joysticks, teclados e volantes de direção fazem parte dessa categoria.

Tipo C: Operação discreta de um objeto fixo no espaço. Essa categoria inclui o pressionamento de botões e a manipulação de alavancas.

As tarefas manuais do Tipo A e B geralmente mostram uma relação linear entre a amplitude da vibração ou aceleração com o não cumprimento da tarefa. As tarefas do Tipo B são menos afetadas pela vibração do que as do Tipo A.

Entretanto, nas tarefas do Tipo B, a orientação do objeto manipulado pode mudar a relação com a interferência: o desempenho é pior quando o objeto é manipulado no mesmo eixo em que a vibração é aplicada do que quando a vibração é aplicada em um dos eixos ortogonais. Por esta razão, é recomendável que os controladores como joysticks sejam manipulados no eixo ortogonal ao eixo principal de vibração. A fixação dos controladores também é recomendável para ajudar a estabilizar a mão e o braço, o que às vezes pode mudar uma tarefa do Tipo A para o Tipo B.

Os mesmos autores também mostram que o mesmo nível de aceleração, quando aplicado em mais de um eixo simultaneamente, causa um pior desempenho na execução da tarefa, quando comparada com a aceleração em apenas um dos eixos. As tarefas do Tipo C, discretas e aplicadas a objetos fixos, são pouco afetadas pela vibração.

2.6.2 Efeitos da vibração em atividades de leitura

Segundo Mansfield (2006), a visão, assim como a habilidade de leitura é afetada pela vibração dos mostradores, vibração do observador, pela frequência da vibração, amplitude, tamanho dos caracteres, distância visual, iluminação, contraste e postura corporal.

Considerando os mecanismos fundamentais do olho, um valor estimado do limite da amplitude da vibração que causa dificuldade na visão deve ser determinado.

Em geral, são necessários valores altos de amplitude em alta frequência para causarem problemas na leitura.

Moseley e Griffin (1986) apud Seagull e Wickens (2006), relataram em seus estudos um aumento aproximadamente linear dos erros de leitura associados com o aumento da amplitude de vibração. Em geral, vibrações mais altas tendem a produzir uma dificuldade maior na leitura, mas essa dependência da amplitude pode variar em cada situação.

Assim como em tarefas manuais, a vibração em mais de um eixo consecutivamente também causa um pior desempenho na tarefa de leitura, quando comparada à vibração em apenas um dos eixos separadamente, onde a vibração vertical se mostrou mais severa que nos outros eixos em sujeitos sentados em um assento rígido e reto, sem encosto.

A tarefa de leitura pode ser estudada em três tipos de situações distintas:

- Vibração do campo visual (vibração do mostrador),
- Vibração dos olhos (vibração do observador),
- Vibração de ambos (vibração simultânea).

Poucos estudos compararam diretamente os efeitos da vibração simultânea com os efeitos da vibração apenas do mostrador ou apenas do observador. Um desses estudos indica que a vibração apenas do observador é mais degradante para a tarefa de leitura de mostradores quando comparada com a vibração de ambos, e que a vibração apenas do mostrador leva a um desempenho pior que todos os outros (Moseley e Griffin (1986) apud Mansfield (2006)).

Essa relação se aplica a frequências entre 0.5 e 5 Hz durante a tarefa de leitura sob vibração vertical de várias amplitudes. Esse resultado é importante, já que a vibração apenas do mostrador é a mais simples de ser implementada em laboratório. Alguns estudos sobre legibilidade, como os realizados por Meddick e Griffin (1976) apud Mansfield (2006) levam em consideração os casos em que apenas o mostrador vibra, enquanto o observador fica parado. Os resultados são marginalmente diferentes quando comparados com testes em ambientes livres de vibração, com exceção da recomendação de espaçamentos verticais maiores no texto.

Em outro experimento realizado por Kahn (2006) apud Mansfield (2006), foi relatado que a leitura de materiais apenas com o auxílio das mãos e sem apoio, como no caso de jornais, em um ambiente vibratório (como a bordo de trens) pode causar problemas pela combinação dos movimentos da mão e da cabeça, mas a dificuldade de leitura foi menor quando a tarefa foi executada com o auxílio dos joelhos em vez de uma mesa. Essa dificuldade se torna maior em ambientes com freqüência na faixa de 2 a 5 Hz, devido aos maiores deslocamentos das mãos.

2.7 PROTEÇÃO CONTRA VIBRAÇÕES

A transmissão de vibração de um veículo ou plataforma para o homem é reduzida quando este está sobre uma mola ou uma outra bancada de isolamento similar, como um amortecedor elástico.

De acordo com Griffin (1990), o grau de isolamento possível da vibração, dentro da faixa de freqüência de ressonância de um homem sentado é teoricamente limitado pelo fato de que grandes deflexões estáticas do homem em relação ao assento são indesejáveis. Um grande movimento relativo entre o operador e os controles do veículo interfere no desempenho de suas tarefas em muitas situações.

As almofadas, primeiramente usadas para conforto estático, poderiam também ser usadas na diminuição da transmissão de vibração, porém, elas são efetivas apenas na região acima da faixa de ressonância do homem.

Dentro de sua faixa de ressonância, as almofadas não são efetivas, e ainda podem até mesmo amplificar a vibração na faixa abaixo da ressonância.

Ainda segundo Griffin (1990), para se conseguir um amortecimento efetivo nas faixas de 2 a 5 Hz, a freqüência natural do sistema homem-assento deveria ser reduzida para 1 Hz, isto é, sua freqüência natural deveria ser pequena comparada com a freqüência de excitação.

Para vibrações severas, próximas aos limites normais de tolerância, como os que podem ocorrer em operações militares com aeronaves ou veículos terrestres, assentos especiais e mesmo restritores (como cintos de segurança) podem ser empregados para prover um maior suporte para o sujeito em todas as direções

críticas. Por outro lado, dados sugerem que quando o operador está mais preso ao assento, a transmissão da vibração para o operador geralmente pode aumentar.

Um assento projetado para se mover apenas em uma direção linear parece ser mais confortável do que o assento que é simplesmente pivotado e pode exercer um movimento de rotação. Essa última situação produz um movimento desconfortável e fatigante.

A suspensão dos assentos pode ser construída de acordo com o peso do operador, podendo assim manter a posição estática do assento e a frequência natural do sistema no seu valor desejado. As suspensões que estão disponíveis atualmente em tratores e veículos similares são capazes de reduzir a frequência de ressonância do sistema homem-assento de aproximadamente 4 para 2 Hz. Isso pode ser visto na comparação da transmissibilidade de um assento rígido, de um assento de caminhão com suspensão e um assento com espuma tradicional usado em automóveis, como mostrado na Figura 9.

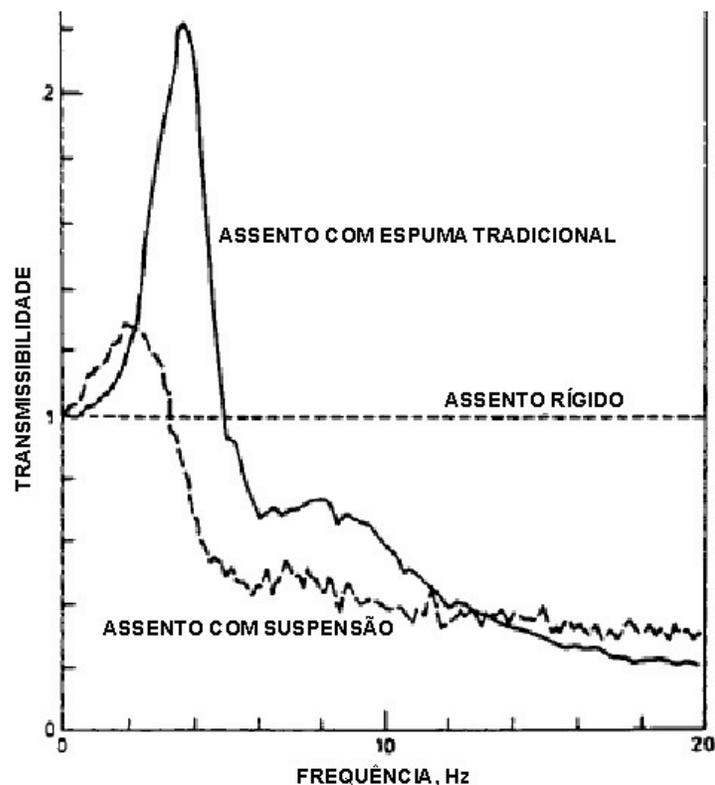


Figura 9 – Comparação das transmissibilidades de um assento rígido, assento com espuma e um assento com suspensão. Griffin (1990).

A transmissibilidade do assento de automóvel é amplificada em mais de 2 vezes na sua frequência de ressonância (4 Hz). Em contraste, a amplificação introduzida pelo assento com suspensão é da ordem de 1.3 na frequência de ressonância (2 Hz), mas a atenuação é aumentada na faixa de frequência de 4 a 12 Hz. Nas frequências abaixo de 2 Hz e acima de 12 Hz, uma vibração menor é transmitida ao sujeito pela espuma e pelo assento com suspensão.

2.8 CRITÉRIO DE TOLERÂNCIA HUMANA A EXPOSIÇÃO DE VIBRAÇÃO DE CORPO INTEIRO

A norma internacional ISO 2631-1 define os métodos para a medida de vibrações periódicas, aleatórias e transientes de corpo inteiro. A norma também descreve os fatores principais, que combinados determinam a aceitabilidade de uma exposição à vibração e sugere os seus possíveis efeitos, reconhecendo a grande variação nas respostas entre os indivíduos.

Esses fatores serão descritos a seguir:

a) Medida

A vibração de corpo inteiro deve ser medida na principal interface entre o corpo humano e a fonte de vibração. Para pessoas sentadas, é mais provável que esta interface esteja na superfície do assento ou no seu encosto, ou seja, as superfícies de contato com a pélvis, dorso, e cabeça. Já para pessoas em pé, a principal superfície de contato estaria nos pés.

Quando a vibração é transmitida ao corpo através de uma superfície que não seja rígida (a almofada de um assento), o transdutor de medida deve ser montado em contato com o corpo, de modo a minimizar a mudança na distribuição de pressão com o material em questão.

A medida deve ter uma duração suficiente para garantir que os dados sejam representativos da exposição que está sendo medida e, para sinais aleatórios, conter uma precisão estatística aceitável.

b) Aceleração ponderada

A amplitude da exposição é caracterizada pela aceleração ponderada em rms e calculada pela eq.(4) ou sua equivalente no domínio da freqüência:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (4)$$

onde $a_w(t)$ é a aceleração ponderada com o tempo t , expressa em metros por segundo ao quadrado (m/s^2), ou radianos por segundo ao quadrado (rad/s^2); e T é a duração da medida em segundos. A ponderação empregada para diferentes aplicações está resumida na Tabela 2-1. O sistema de coordenadas para as direções de movimento referenciadas nessa tabela estão mostradas na Figura 10. As ponderações de freqüência W_d e W_k são as ponderações principais para a garantia dos efeitos da vibração na saúde, conforto e percepção.

Tabela 2-1 – Aplicabilidade das ponderações das vibrações de corpo inteiro W_k e W_d , para as direções de vibração X, Y, Z, R_x , R_y e R_z , mostradas na Figura 10 - (ISO 2631-1)

Fator de ponderação	Efeito na(o)					
	Saúde		Conforto		Percepção (fadiga)	
	eixos	postura	eixos	postura	eixos	postura
W_k	z	sentado	z	sentado	z	sentado
			z	em pé	z	em pé
W_d	x e y	sentado	x e y	sentado	x e y	sentado
			x e y	em pé	x e y	em pé

A aplicação da ponderação de freqüência selecionada de acordo com essas referências para um componente da vibração transmitida ao corpo resulta na componente de aceleração ponderada naquela direção de movimento e resposta

humana. A eq.(4) caracteriza as vibrações para um fator de pico menor que 9, onde o fator de pico é a amplitude da razão entre o valor de pico da aceleração ponderada e do seu valor rms.

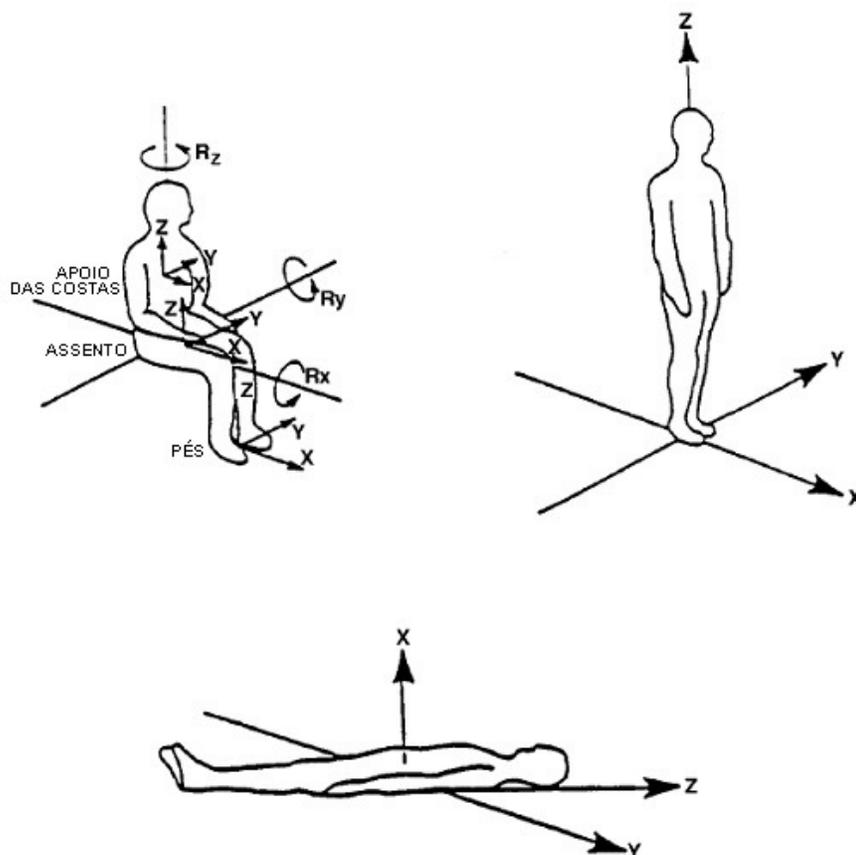


Figura 10 – Eixos basicêntricos do corpo humano para vibração de corpo inteiro translacional (X, Y e Z) e rotacional (Rx, Ry, e Rz). ISO 2631-1

c) Vibração contendo eventos transientes

Para exposições de vibração de corpo inteiro contendo valores transientes com fator de pico maior do que 9, tanto o valor rms ou o valor de dose de vibração, ou ambos, podem ser usados em conjunto com o valor da aceleração ponderada em rms para garantir que os efeitos da vibração transiente não serão subestimados. O valor rms é calculado para um tempo de integração pequeno τ terminando em t_0 , como segue:

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{(t_0 - \tau)}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (5)$$

O valor de dose de vibração VDV é definido por:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (6)$$

Se a exposição total consiste de i exposições, com diferentes valores de dose de vibração $(VDV)_i$, então:

$$VDV_{total} = \left[\sum_i (VDV)_i^4 \right]^{1/4} \quad (7)$$

O uso do valor de dose de vibração em adição à aceleração ponderada rms é recomendável quando:

$$VDV_{total} > 1.75 a_w T^{1/4} \quad (8)$$

d) Saúde

O guia sobre o efeito da vibração de corpo inteiro na saúde está contido na norma ISO 2631-1 para vibrações transmitidas através do assento, para a faixa de vibração de 0.5 a 80 Hz. A avaliação é baseada na maior componente translacional medida da aceleração ponderada (vide Figura 10 e Tabela 2-1).

Se o movimento contiver eventos transientes que satisfaçam a condição contida na eq.(8), então, uma avaliação adicional pode ser feita usando-se o valor de dose de vibração. As ponderações que serão aplicadas, W_d e W_k , serão multiplicadas por fatores unitários para vibração na direção Z e 1.4 para as direções X e Y do sistema de coordenadas. A maior componente da aceleração ponderada deve ser comparada no tempo de exposição diária com a zona sombreada de precaução de

saúde da Figura 11. As linhas tracejadas nesse diagrama correspondem à relação entre a amplitude física do estímulo e o tempo de exposição com o índice $n = 2$ na eq.(9), enquanto as linhas pontilhadas correspondem ao índice $n = 4$ nessa mesma equação, onde Φ , é relacionado com a amplitude física do estímulo, t é o tempo de exposição e o índice n varia de 2 a 4.

$$\Phi^n t = constante \quad (9)$$

Para exposições abaixo da área sombreada, os efeitos danosos na saúde não foram observados; para uma exposição dentro da área sombreada os mesmos efeitos potenciais na saúde aumentam; para exposições acima da área sombreada, esses efeitos na saúde provavelmente ocorram.

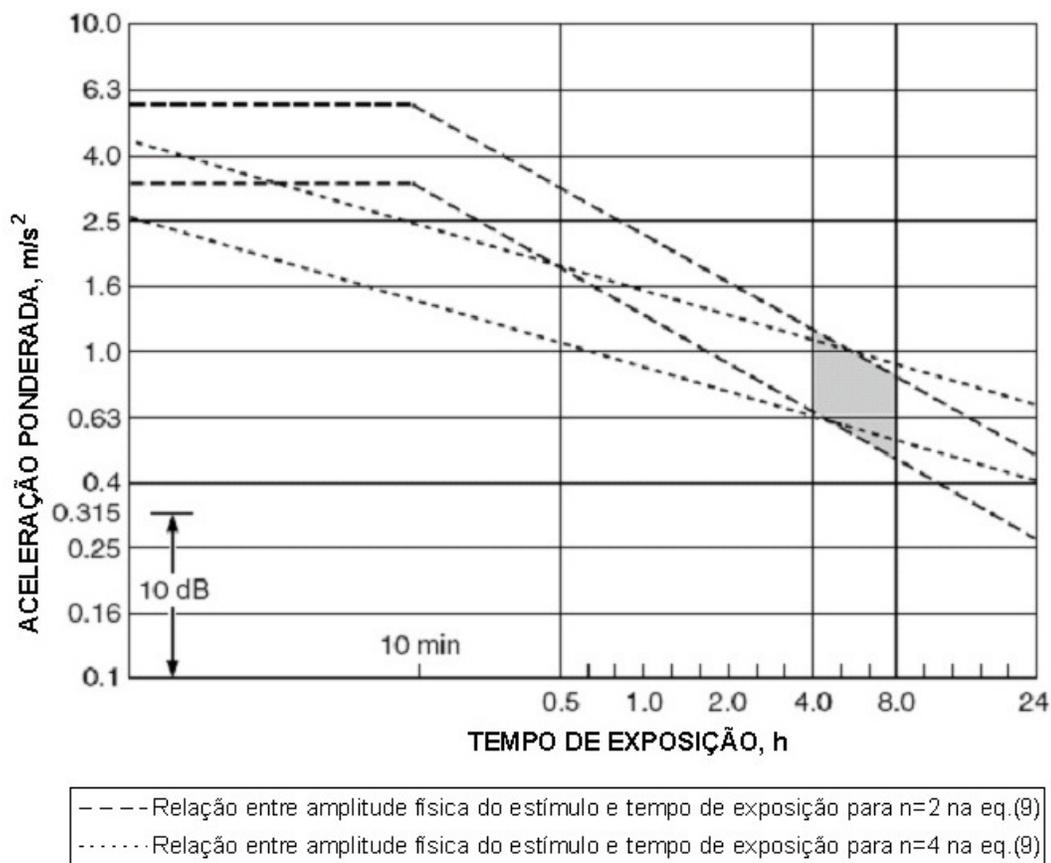


Figura 11 - Zona de precaução de saúde para vibração de corpo inteiro (zona sombreada). ISO 2631-

Se a exposição diária total é composta de várias exposições para tempos t_i e diferentes acelerações ponderadas $(a_w)_i$, então, a amplitude da aceleração equivalente correspondente ao tempo total de exposição a_{weq} pode ser construída usando a seguinte relação:

$$a_{weq} = \left(\frac{\sum_i (a_w)_i^2 t_i}{\sum_i t_i} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Para se caracterizar a exposição ocupacional à vibração de corpo inteiro, as componentes da aceleração ponderada para 8 horas devem ser medidas de acordo com a eq.(4) com $T = 28.800$ segundos. O valor de dose de vibração diário total é construído usando-se a eq.(7).

e) Desconforto

Um guia para avaliação do conforto e percepção da vibração também é descrito na norma ISO 2631-1 para a exposição de pessoas sentadas, em pé e deitadas. O guia trata de vibrações translacionais e rotacionais na faixa de frequência de 0.5 a 80 Hz, que entram no corpo nos locais e direções listadas na Tabela 2-1. A validação é formada por componentes de aceleração em rms.

Essas componentes devem ser combinadas através da soma das acelerações ponderadas em cada eixo ortogonal de translação a_{wx} , a_{wy} , e a_{wz} , como segue:

$$a_{w_total} = \left[a_{wx}^2 + a_{wy}^2 + a_{wz}^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA

A bancada mostrada na Figura 12 foi preparada para o teste, baseada no estudo apresentado por Osmond e Goulain (2001) e que foi desenvolvido no centro de testes da fabricante de aeronaves Airbus.

A bancada é composta por um assento de piloto preso em trilhos, um MCDU representativo de uma aeronave, um monitor LCD simulando o mostrador de um cockpit (Modelo: Samsung 151BM) e um controlador manual.

Na Figura 12 também é indicado um botão de emergência que foi incorporado à bancada, para possibilitar que o participante pudesse parar o teste a qualquer momento. Um botão semelhante estava sob responsabilidade de uma testemunha, que também poderia parar o teste no caso de qualquer eventualidade.

O teste foi monitorado usando-se um analisador da marca Hewlett Packard (modelo: HP 3569A), um acelerômetro PCB (modelo: 353B14) para medir os níveis de aceleração na base do assento e um acelerômetro tri-axial no assento (modelo: 4322). Os níveis de vibração foram monitorados e gravados em todas as fases do teste.

As excitações da bancada foram produzidas a partir de um atuador hidráulico (MTS247), como pode ser visto na Figura 13.

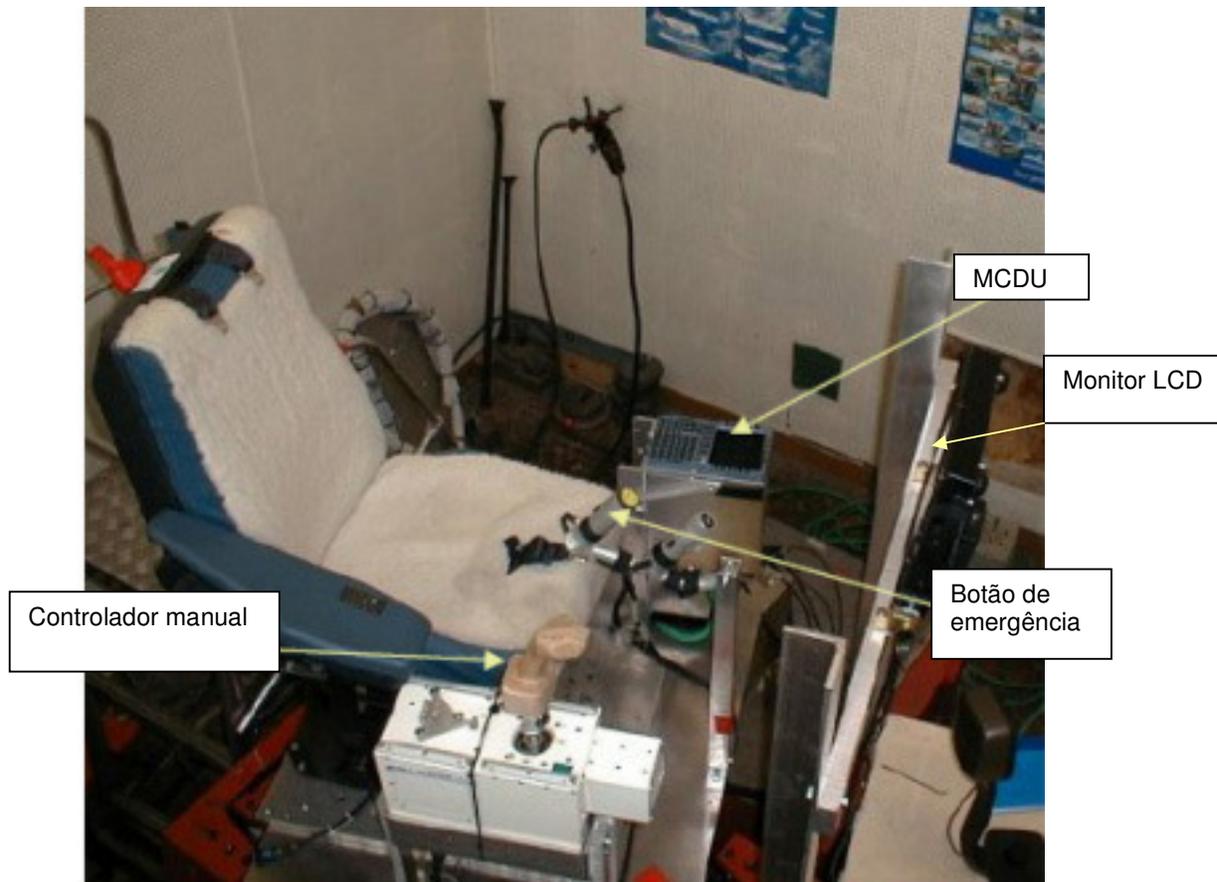


Figura 12 – Componentes da bancada de teste

3.2 DESCRIÇÃO DO TESTE

O objetivo do teste era o de simular uma determinada condição de voo específica, que ocorre quando o motor da aeronave falha, causando desbalanceamento de suas pás e conseqüente vibração em toda a aeronave. Instantes após a falha, o motor passa a girar apenas devido às forças aerodinâmicas (windmilling).

O grupo que participou do teste era composto por sete pessoas. Cada uma delas foi requisitada a cumprir tarefas relacionadas com leitura, digitação e escrita, com o propósito de avaliar a habilidade do piloto em continuar um voo qualquer em um ambiente vibratório sugestivo da ocorrência dessa falha, de uma maneira segura até o pouso.

As pessoas foram submetidas a níveis de vibração no eixo vertical (z), conforme descrito na Figura 13. A vibração é caracterizada como simultânea, ou seja, o observador e o monitor vibram ao mesmo tempo.

Adicionalmente, foi medida a transmissibilidade de vibração em um assento de piloto (TVAP) do piso da bancada até o corpo do participante.

Os resultados apresentados conterão somente a média da transmissibilidade dos sete participantes em cada frequência, com o respectivo desvio padrão. A determinação da TVAP é de suma importância na comparação com as normas ISO 2631-1 e ANSI S3.18 que caracterizam a avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro.

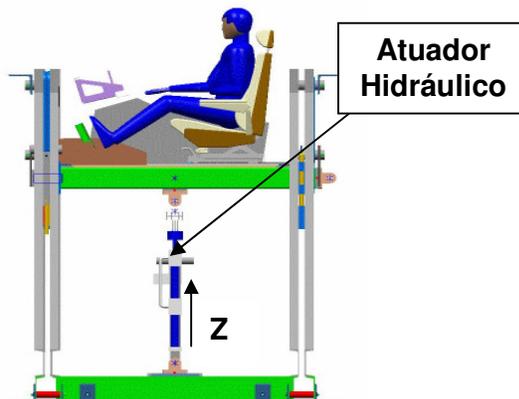


Figura 13 – Esquema de excitação da bancada no eixo Z

Uma avaliação médica foi realizada antes do início do teste, e um médico estava presente no local.

Durante o teste, as instruções foram fornecidas através de uma apresentação mostrada no monitor LCD, antes da execução de cada tarefa, utilizando-se imagens em formato bitmap do EICAS e PFD de uma determinada aeronave, com as mesmas cores e tamanhos.

Para as tarefas de leitura no monitor, a pessoa deveria identificar vários parâmetros da aeronave, como velocidade, altitude, posição da antena de glide slope e a posição do reverso do motor. Para as tarefas de leitura de procedimentos, um manual real de uma aeronave foi utilizado.

A tarefa de digitação foi realizada com o auxílio de um MCDU representativo, através da digitação de números correspondentes à altitude da aeronave.

Para a tarefa de escrita, foram utilizados um pedaço de papel e uma caneta. O participante deveria escrever a informação solicitada de uma maneira correta e legível.

Para a avaliação das tarefas, foi preparado um questionário que era respondido por todos, para cada situação específica, em todas as frequências de interesse. O questionário está ilustrado na Figura 14.

TESTE PARA AVALIAR A TRANSMISSIBILIDADE DO ASSENTO DO PILOTO E AVALIAÇÃO DE FATORES HUMANOS			
DATA:		HORÁRIO:	
RESPONSÁVEL:			
PILOTO:			

Comentários:

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO SUBJETIVA:

COMO VOCÊ AVALIA O CUMPRIMENTO DAS TAREFAS?

IMPOSSÍVEL DIFÍCIL SATISFATÓRIO FÁCIL MUITO FÁCIL

NÚM DO TESTE :		FREQ:		EIXO:	
----------------	--	-------	--	-------	--

Figura 14 – Questionário aplicado aos participantes do teste

Durante a avaliação, os participantes deveriam permanecer sentados no assento preso à bancada, ficando submetidos a níveis de aceleração controlados. Esses níveis foram aplicados de maneira progressiva, nas frequências de interesse para quantificar os efeitos da vibração em seres humanos.

Apesar desses estudos considerarem uma faixa de frequência mais ampla, que vai de 0.5 a 80 Hz, a faixa de interesse para a simulação desse tipo de falha de turbina começa em aproximadamente 21Hz e vai até 3Hz.

Os limites máximos de aceleração foram estabelecidos de acordo com o não cumprimento da tarefa solicitada, o que foi muito variado, devido a diferenças no peso e postura dos mesmos.

A média dos valores das acelerações aplicadas aos sete participantes em cada frequência durante o teste são apresentados na Figura 15 e descritos na Tabela 3-1.

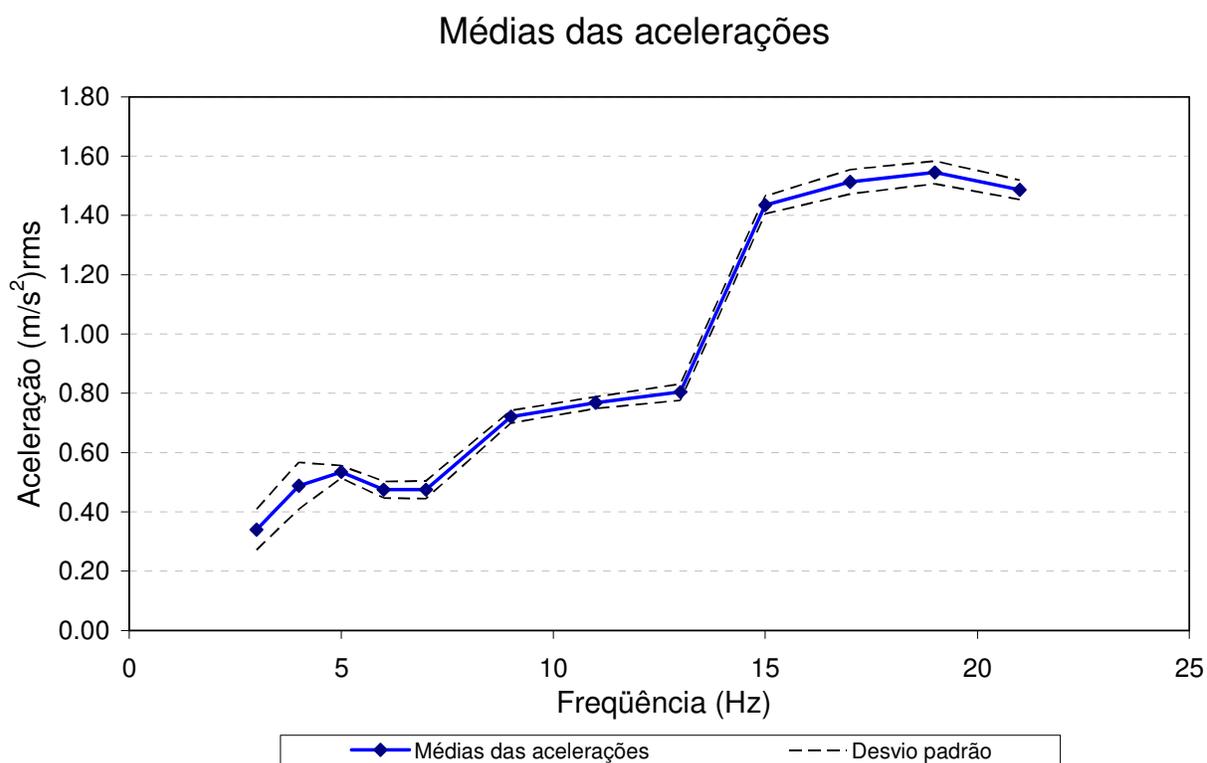


Figura 15 – Médias dos níveis de aceleração aplicados no teste

Tabela 3-1 – Média dos níveis de aceleração aplicados durante o teste

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Média dos valores das acelerações (m/s²)rms</i>	<i>Desvio Padrão σ</i>
3	0.340	0.0686
4	0.488	0.0792
5	0.535	0.0213
6	0.475	0.0277
7	0.475	0.0299
9	0.721	0.0214
11	0.768	0.0197
13	0.804	0.0273
15	1.435	0.0299
17	1.514	0.0409
19	1.545	0.0385
21	1.487	0.0328

3.3 PARTICIPANTES DO TESTE - JÚRI

Na Tabela 3-2 estão descritas as características relevantes dos participantes do teste:

Tabela 3-2 – Participantes do teste - júri

<i>Nome</i>	<i>Gênero</i>	<i>Idade</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Função</i>
1	Masculino	39	76	1.73	Piloto
2	Feminino	27	65	1.75	Engenheira de ensaios
3	Masculino	39	85	1.78	Piloto
4	Masculino	58	70	1.65	Piloto
5	Masculino	47	66	1.80	Piloto
6	Masculino	38	65	1.68	Piloto
7	Masculino	44	73	1.78	Piloto

4 RESULTADOS

4.1 TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO NO ASSENTO DO PILOTO

Durante o teste, os níveis de vibração foram monitorados por acelerômetros instalados em dois pontos da bancada a_1 e a_2 , conforme eq. (1) e mostrado na Figura 16.

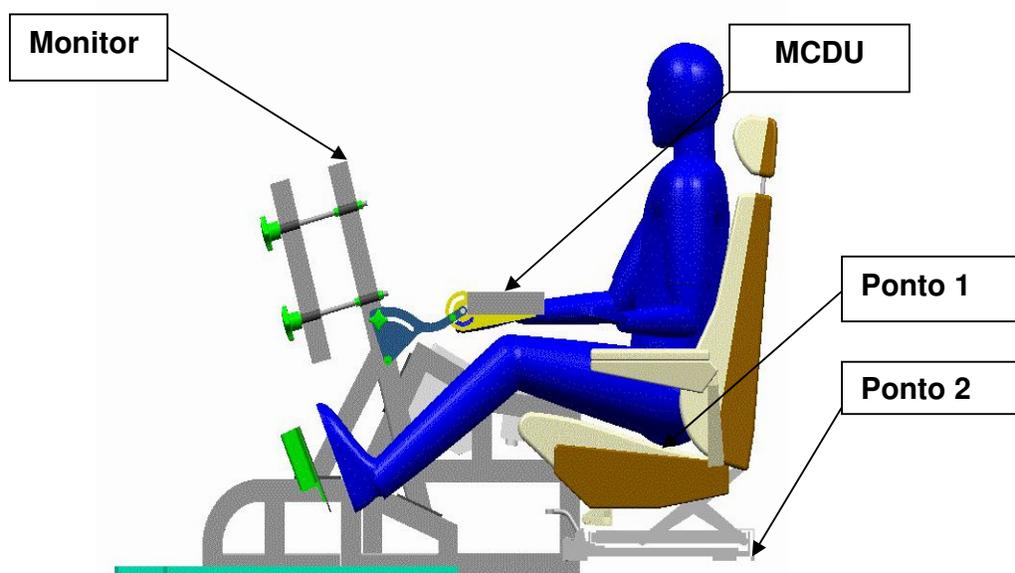


Figura 16 – Esquema de Transmissibilidade

A transmissibilidade da vibração no eixo z foi medida para cada pessoa, sendo considerado o valor médio das sete medidas em cada frequência.

As médias estão ilustradas na Figura 17 e os valores apresentados na Tabela 4-1.

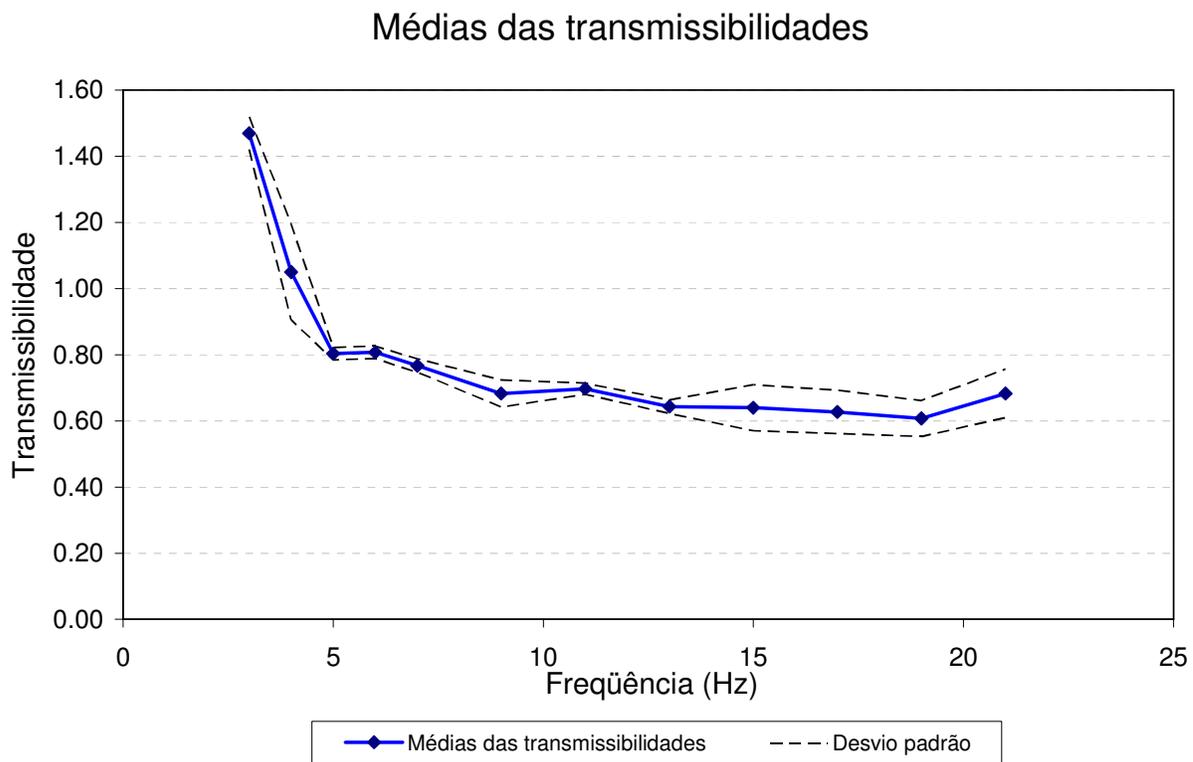


Figura 17 – Médias das transmissibilidades dos participantes no eixo Z

Tabela 4-1 - Valores médios das transmissibilidades dos participantes

<i>Freq (Hz)</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão σ</i>
3	1.470	0.0490
4	1.050	0.1445
5	0.803	0.0189
6	0.807	0.0189
7	0.767	0.0205
9	0.683	0.0411
11	0.697	0.0170
13	0.643	0.0205
15	0.640	0.0698
17	0.627	0.0655
19	0.607	0.0544
21	0.683	0.0732

Na Figura 18 pode-se observar o efeito da transmissibilidade da vibração no assento do piloto, aplicado às acelerações de entrada. Pode-se perceber que, para

freqüências abaixo de 4 Hz, o assento amplifica essa vibração, o que comprova os resultados apresentados por Griffin (1990) e demonstrados na Figura 9

Efeito da transmissibilidade nas médias das acelerações

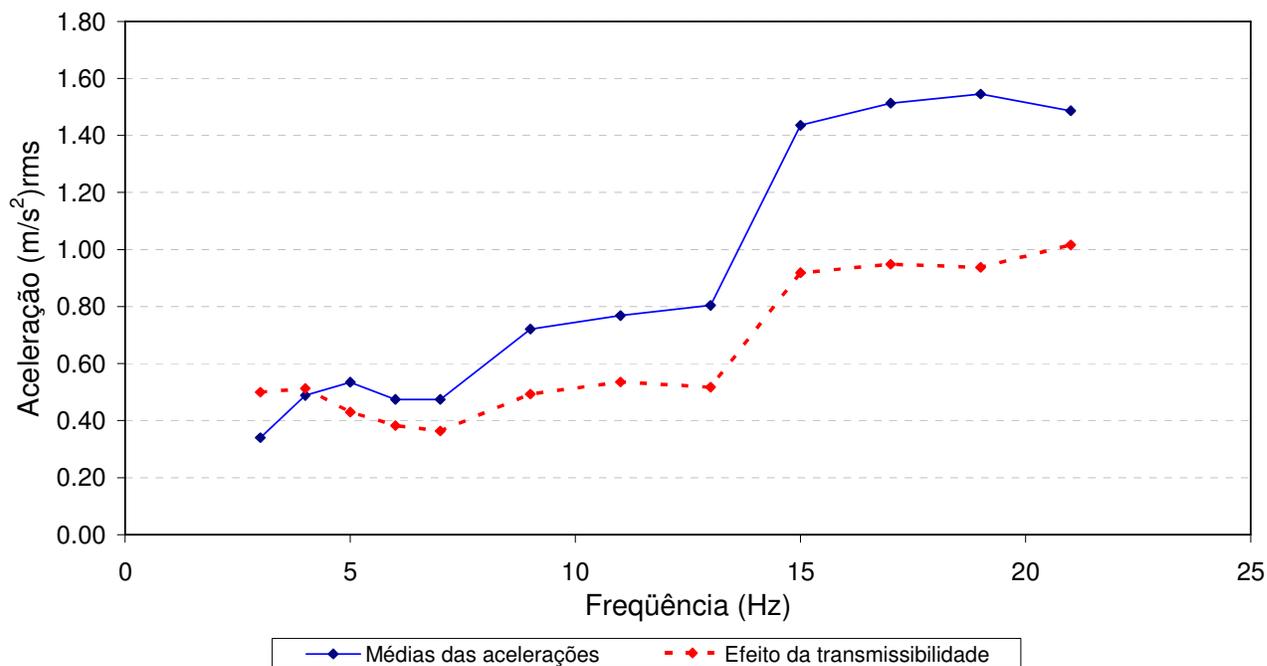


Figura 18 - Efeito da transmissibilidade da vibração no assento do piloto, aplicado às acelerações

4.2 AVALIAÇÃO DOS PARTICIPANTES NO TESTE

A avaliação do questionário mostrado na Figura 14 está apresentada nas páginas seguintes. Nas próximas seções, as seguintes definições serão usadas:

I	Impossível	D	Difícil	S	Satisfatório	F	Fácil	M	Muito Fácil
---	------------	---	---------	---	--------------	---	-------	---	-------------

Por se tratarem de avaliações subjetivas, as respostas variam de acordo com a percepção de cada pessoa.

Os resultados serão apresentados para cada freqüência específica.

Em primeiro lugar, será descrita a tarefa que cada pessoa deveria executar, seguida pela classificação apresentada por elas.

As outras duas colunas das tabelas foram preenchidas pelos observadores e se referem ao cumprimento ou não da tarefa e dos comentários pertinentes.

A tarefa requerida para cada participante nem sempre era a mesma.

a) Frequência de 21 Hz

Tarefa: Digite o seguinte número no MCDU

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	150 digitado
2	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	150 digitado
3	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	983 digitado

b) Frequência de 19 Hz

Tarefa: Leia a seguinte lista de tarefas e informe ao observador:

- Velocidade na tela
- O procedimento para fogo na turbina, a partir do manual.

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok
2	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok
3	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok

c) Frequência de 17 Hz

Tarefa: Leia a mensagem no CAS e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leitura ok
2	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leitura ok
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leitura ok

d) Frequência de 15 Hz

Tarefa: Escreva seu nome do meio em uma folha de papel e entregue ao observador. A seguir, escreva seu último nome em uma folha de papel e entregue ao observador.

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nome escrito e legível
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nome escrito e legível
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nome escrito e legível

e) Frequência de 13 Hz

Tarefa: Leia a altitude na tela e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	2500 ft informado
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	2520 ft informado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	2020 ft informado

f) Frequência de 11 Hz

Tarefa: Leia a posição do trem de pouso e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Trem de pouso abaixado informado
2	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Trem de pouso abaixado informado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Trem de pouso levantado informado

g) Frequência de 9 Hz

Tarefa: Digite o seguinte número no MCDU

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	568 digitado
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	568 digitado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	564 digitado (muito difícil)

h) Frequência de 7 Hz

Tarefa: Leia a seguinte lista de tarefas e informe ao observador:

- Identifique a posição da antena de glide slope
- O procedimento efetuado antes do pouso, a partir do manual

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok
3	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Leituras ok

i) Frequência de 6 Hz

Tarefa: Leia a altitude na tela e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	3300 ft informado
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	3300 ft informado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	2040 ft informado

j) Frequência de 5 Hz

Tarefa: Leia a condição do reverso do motor e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Reverso Estendido informado
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Reverso Estendido informado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Reverso Estendido informado

k) Frequência de 4 Hz

Tarefa: Leia a altitude na tela e informe ao observador

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	1940 ft informado
2	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	1940 ft informado 3200 ft informado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	(muito difícil-estimado)

l) Frequência de 3 Hz

Tarefa: Digite o seguinte número no MCDU

<i>Participante</i>	<i>Classificação</i>	<i>Cumprimento da tarefa</i>	<i>Comentários</i>
1	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input checked="" type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	635 digitado
2	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	635 digitado
3	<input type="checkbox"/> I <input checked="" type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> M	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	300 digitado

4.2.1 Resumo das tarefas executadas

As avaliações das tarefas executadas pelos participantes estão resumidas nas tabelas seguintes.

Tabela 4-2 – Avaliação de digitação dos participantes do teste

<i>Freq (Hz)</i>	<i>Correto</i>	<i>Participante #1</i>	<i>Participante #2</i>	<i>Correto</i>	<i>Participante #3</i>
21	150	150	150	983	983
9	568	568	568	564	564
3	635	635	635	300	300

Todos os valores foram digitados corretamente, apesar da dificuldade relatada durante a vibração na frequência de 9 Hz pelo participante #3.

Tabela 4-3 - Avaliação de leitura dos participantes do teste

<i>Freq (Hz)</i>	<i>Participante #1</i>	<i>Participante #2</i>	<i>Participante #3</i>
19	Correto	Correto	Correto
17	Correto	Correto	Correto
13	Correto	Correto	Correto
11	Correto	Correto	Correto
7	Correto	Correto	Correto
6	Correto	Correto	Correto
5	Correto	Correto	Correto
4	Correto	Correto	Correto

Tabela 4-4 - Avaliação de escrita dos participantes do teste

<i>Freq (Hz)</i>	<i>Participante #1</i>	<i>Participante #2</i>	<i>Participante #3</i>
15	Correto	Correto	Correto

4.2.2 Resumo dos conceitos aplicados pelos participantes

A Tabela 4-5 apresenta um resumo dos conceitos aplicados pelos participantes em cada tarefa. O número na tabela indica quantas vezes o conceito foi atribuído por cada um.

Tabela 4-5 – Conceitos aplicados pelos participantes do teste

<i>Avaliação</i>	<i>Participante #1</i>	<i>Participante #2</i>	<i>Participante #3</i>
I	0	0	0
D	3	7	9
S	4	4	3
F	5	1	0
M	0	0	0

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COMPARADOS COM A LITERATURA

A influência da vibração no desempenho de tarefas relacionadas com a aviação foi avaliada através de um teste que constituiu em um estudo para verificar se níveis elevados de aceleração, como no caso de falha de motor, poderiam prejudicar a habilidade do piloto em desempenhar tarefas de leitura, escrita e digitação.

O estudo foi baseado em respostas humanas à vibração em situações muito bem controladas, conforme sugere Mansfield (2006) em seus estudos.

Foram percebidas diferenças nas respostas de todos os indivíduos (inter-subject variability), mas também nas respostas de certos indivíduos em ocasiões diferentes (intra-subject variability), conforme sugere o mesmo autor.

Apesar dessas diferenças, todas as tarefas foram concluídas com sucesso por todos os participantes do teste (júri).

Pôde-se notar um esforço grande por parte dos participantes, pelo fato de serem aplicados valores de aceleração bem acima dos usualmente empregados nesse tipo de teste, para efeito da simulação da falha de motor.

As piores freqüências para o cumprimento de tarefas são àquelas inferiores a 9 Hz, mesmo quando se aplicam níveis de aceleração mais baixos. Esse fenômeno é explicado pela proximidade dessas freqüências com as ressonâncias do corpo humano. Conforme já relatado, segundo Harris e Piersol (2002), para um indivíduo sentado, a primeira ressonância está entre 4 e 6 Hz. O autor ainda mostra que a parede abdominal, assim como a parede anterior do tórax tem uma resposta máxima entre 3 e 5 Hz

A postura, outro fator também relevante na transmissão de vibração, não foi controlada durante o teste.

Especificamente com relação às tarefas manuais (digitação e escrita), nas freqüências de 9 Hz e 15 Hz, contrariando os resultados dos estudos de Corbridge e Griffin (1991) apud Seagull e Wickens (2006), em que apenas 10% das pessoas tiveram dificuldades com essas tarefas em freqüências acima de 5 Hz, a maioria dos participantes atribuiu o conceito difícil, o que não era esperado. Já para a freqüência de 21 Hz, os resultados se comprovaram, e a tarefa foi mais fácil de ser realizada.

Com relação à leitura, Moseley e Griffin (1986) apud Seagull e Wickens (2006), relataram em seus estudos um aumento aproximadamente linear dos erros associados com o aumento da amplitude de vibração.

Esses resultados se comprovaram, e o conceito difícil foi relatado por pelo menos um dos participantes em todas as freqüências abaixo de 17 Hz.

Apesar dessas dificuldades, todas as tarefas foram executadas corretamente.

A identificação dos números foi mais difícil quando o seu formato era parecido (3, 6, 9, 0 e 8) e foi avaliada como difícil por todos os participantes apenas nas freqüências de 4 Hz e 13 Hz.

5.1 COMPARAÇÃO DAS ACELERAÇÕES COM AS NORMAS PARA EXPOSIÇÃO DE VIBRAÇÃO NO CORPO INTEIRO

Existem quatro fatores físicos de importância primária na determinação da resposta humana à vibração, que são intensidade, freqüência, direção e duração (tempo de exposição) da vibração.

Esses fatores são definidos a seguir:

- Intensidade – A intensidade da vibração deverá ser descrita em termos de aceleração em (m/s^2) rms. Quando valores de pico são medidos, esses devem ser convertidos para rms.
- Freqüência – As normas apresentam valores numéricos para comparação das vibrações nas freqüências entre 1 e 80 Hz. Para permitir a caracterização do ambiente vibracional relativo ao ser humano e simplificar as medidas nos casos em que a análise espectral é difícil ou inconveniente, as acelerações medidas devem ser transformadas de banda estreita para bandas de 1/3 de oitava.

Para a comparação das acelerações com as normas de avaliação à exposição de corpo inteiro (ANSI S3.18 e ISO 2631-1), que são as mais apropriadas para a correlação com o mundo aeronáutico, faz-se necessário relacionar os níveis de aceleração com uma faixa de freqüência adequada.

- Direção - Os padrões são baseados em vibrações transmitidas linearmente para o corpo, avaliados nas direções apropriadas de um sistema de coordenadas ortogonal, conforme ilustrado na Figura 10.

O avião apresenta o mesmo sistema de coordenadas do corpo, como ilustrado na Figura 19. Portanto, a transformação sobre os níveis de aceleração não é necessária.

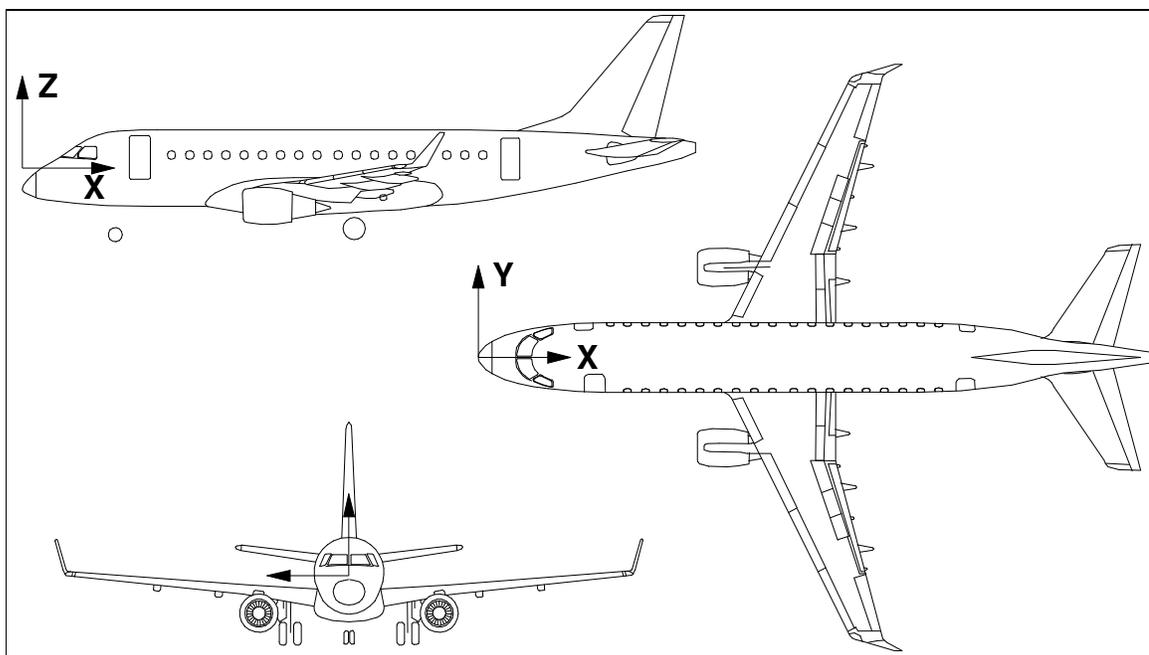


Figura 19 – Sistema de coordenadas da aeronave

- Duração – A história temporal detalhada das medidas deve ser reportada sempre que houver variação em intensidade ou descontinuidade das medidas.

Para determinação da duração e da frequência, é necessária a apresentação de um perfil de vôo característico do tipo de falha de motor estudada. Para facilitar a sua análise, esse perfil será dividido em nove fases contendo faixas de frequência e durações específicas, como apresentado na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Perfil de vôo

<i>Fase de vôo</i>	<i>Freq. (Hz)</i>	<i>Δt (s)</i>
A	18.2 a 20.8	246
B	16.4 a 19.0	246
C	15.0 a 17.2	2190
D	13.4 a 15.6	339
E	12.2 a 14.0	339
F	9.6 a 12.8	78
G	8.0 a 9.2	78
H	5.8 a 8.6	60
I	4.0 a 5.8	24

As acelerações utilizadas para comparação com as normas para exposição de vibração de corpo inteiro serão as mesmas já utilizadas durante os estudos de transmissibilidade e execução de tarefas, conforme apresentadas na Figura 15 e descritas na Tabela 3-1.

Para utilização dessas normas é necessário que as acelerações medidas sejam transformadas de banda estreita para bandas de 1/3 de oitava, conforme discutido anteriormente.

O cálculo para essa transformação, considerando-se a transmissibilidade do assento é dado por:

$$a_i = \left[\sum_1^{n_f} (\overline{T(f)} a(f))^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Onde n_f é o número de freqüências estudadas que estão dentro da banda de 1/3 de oitava, $a(f)$ são as magnitudes de aceleração em banda estreita e $\overline{T(f)}$ é a transmissibilidade média do piso da bancada ao assento do piloto também em banda estreita.

Os limites das bandas de freqüência de 1/3 de oitava para determinação de n_f estão definidos na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Limites de banda de freqüência de 1/3 de oitava

<i>Limite inferior da banda (Hz)</i>	<i>Freqüência central da banda de 1/3 de oitava (Hz)</i>	<i>Limite superior da banda (Hz)</i>
3.25	4.00	4.47
4.47	5.00	5.62
5.62	6.30	7.08
7.08	8.00	8.91
8.91	10.00	11.20
11.20	12.50	14.10
14.10	16.00	17.80
17.80	20.00	22.40

A Tabela 5-3 apresenta os níveis de aceleração utilizados durante os estudos de transmissibilidade e execução de tarefas, transformados em bandas de freqüência de 1/3 de oitava, conforme eq.(12).

Tabela 5-3 – Níveis de aceleração na bancada em bandas de freqüência de 1/3 de oitava

<i>Banda de freqüência de 1/3 de oitava (Hz)</i>	<i>n_f</i>	<i>Aceleração (m/s^2) rms</i>
4	1	0.513
5	1	0.430
6.3	2	0.528
8	1	0.492
10	2	0.727
12.5	1	0.517
16	2	1.320
20	2	1.382

5.2 AVALIAÇÃO DAS ACELERAÇÕES PELA NORMA ISO 2631-1

A norma ISO 2631-1 define os fatores principais, que combinados determinam os limites de exposição à vibração que serão aceitáveis. Ela também define métodos para a medida de vibrações.

O perfil de vôo apresentado na Tabela 5-1 consiste em diferentes períodos de exposição para cada banda de freqüência específica, que serão relacionados com acelerações de diferentes amplitudes. Portanto, os níveis de aceleração equivalentes que correspondem à duração total de exposição à vibração podem ser avaliados de acordo com:

$$a_{weq} = \left(\frac{\sum_i a_w^2 t_i}{\sum_i t_i} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Onde: a_w é a aceleração ponderada, definida por $a_w = W_i a_i$; a_i é a aceleração aplicada no estudo e W_i é o fator de ponderação indicado na Tabela 5-4; t_i é o tempo de exposição em segundos.

Tabela 5-4 - Fatores de ponderação adotados pela norma ISO 2631-1

Freqüência central [Hz]	W_k (eixo z)	W_d (eixos x e y)
4.00	0.967	0.512
5.00	1.039	0.409
6.30	1.054	0.323
8.00	1.036	0.253
10.00	0.988	0.212
12.50	0.902	0.161
16.00	0.768	0.125
20.00	0.636	0.100

Segundo essa norma, o valor total de vibração a_v deverá ser calculado considerando a aceleração ponderada nos três eixos ortogonais, conforme abaixo:

$$a_v = \left(k_x^2 a_{ex}^2 + k_y^2 a_{ey}^2 + k_z^2 a_{ez}^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

onde:

a_{ex}, a_{ey}, a_{ez} - são as acelerações equivalentes em cada um dos três eixos ortogonais x, y e z respectivamente.

k_x, k_y, k_z são fatores multiplicadores. Para uma pessoa sentada, os seus valores são iguais a 1.

Como o estudo leva em consideração apenas acelerações no eixo z, o valor total de aceleração analisado também levará em consideração apenas esse eixo, ou seja, o valor total de vibração a_v será igual ao próprio a_{ez} .

Os valores aplicados para o cálculo estão detalhados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Avaliação para o eixo Z de acordo com a norma ISO 2631-1

Freq (Hz)	Aceleração (m/s²) rms	Fator de ponderação	Aceleração ponderada [a_w (m/s²)]	Duração [t (s)]	a_w².t
4.00	0.513	0.967	0.496	24	5.895
5.00	0.430	1.039	0.446	24	4.782
6.30	0.528	1.054	0.557	60	7.437
8.00	0.492	1.036	0.510	138	35.921
10.00	0.727	0.988	0.719	156	80.562
12.50	0.517	0.902	0.467	756	164.579
16.00	1.320	0.768	1.014	2775	2853.875
20.00	1.382	0.636	0.879	492	380.231
			Soma	4425	3544.438

A duração de cada banda de freqüência é tomada somando-se os valores individuais de cada fase de vôo que estiver contida na banda.

Por exemplo, para a banda de freqüência de 8 Hz, que vai de 7.08 a 8.91 Hz, deve-se somar os tempos das fases H e G, e assim respectivamente.

Portanto, o valor total de vibração a_{ez} pode ser escrito como:

$$a_{ez} = \left(\frac{\sum a_w^2 t_i}{\sum t_i} \right)^{1/2} = \left(\frac{3544.438}{4425} \right)^{1/2} = 0.895 m/s^2$$

A escala de ponderação para a amplitude da aceleração com relação a conforto está definida na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 – Escala de ponderação para amplitude de aceleração com relação ao conforto de acordo com a norma ISO 2631-1

Menor que 0.315 m/s ²	Não desconfortável
0.315 a 0.63 m/s ²	Um pouco desconfortável
0.5 a 1 m/s ²	Razoavelmente desconfortável
0.8 a 1.6 m/s ²	Desconfortável
1.25 a 2,5 m/s ²	Muito desconfortável
Maior que 2 m/s ²	Extremamente desconfortável

Baseado nessa escala de ponderação pode-se dizer que o valor total de vibração (a_v) obtido está classificado entre razoavelmente desconfortável e desconfortável.

5.3 AVALIAÇÃO DAS ACELERAÇÕES PELA NORMA ANSI S3.18

A norma ANSI S3.18, um guia para avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro, dá valores numéricos para os limites de vibração na faixa de frequência de 1 a 80 Hz. Os limites apresentados nessa norma são usados de acordo com os três critérios reconhecidos de preservação do conforto, eficiência do trabalho e segurança ou saúde.

O critério de Eficiência do Trabalho é chamado nessa norma de “fatigue-decrease proficiency boundary” (FDPB).

Os limites especificados com respeito à fadiga, competência nas tarefas e conforto são baseados em estudos com pessoal de tripulação aérea, motoristas de veículos e passageiros de avião e trem.

Uma análise para avaliar a severidade de cada banda de frequência de 1/3 de oitava será efetuada, estabelecendo-se tempos de exposição permissíveis para cada banda de frequência.

Esses tempos de exposição permissíveis serão comparados com o Limite de Exposição (EL) e com o FDPB.

Os limites de aceleração para FDPB para o eixo z estão ilustrados na Figura 20.

Para se obter os valores do limite de exposição (EL), os valores limites de FDPB deverão ser multiplicados por 2 (6 dB acima).

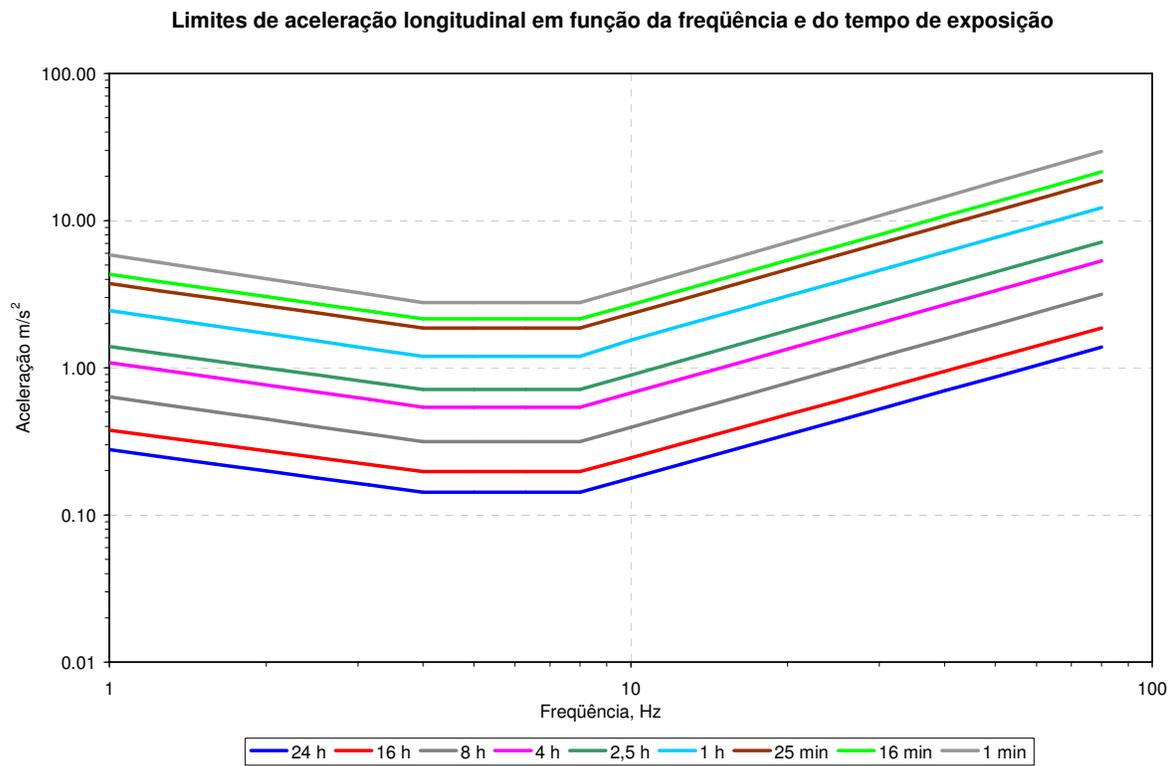


Figura 20 – Limites de aceleração longitudinal em função da frequência e tempo de exposição; FDPB

Os níveis de vibração para as diferentes bandas de freqüência de 1/3 de oitava serão ponderados de acordo com os valores descritos na Tabela 5-7.

Tabela 5-7 – Fatores de ponderação adotados pela norma ANSI S3.18

<i>Fator de ponderação para</i>		
Freqüência (Hz)	Vibrações longitudinais (a_z)	Vibrações transversais (a_x, a_y)
4.00	1.00 (0 dB)	0.5 (-6 dB)
5.00	1.00 (0 dB)	0.4 (-8 dB)
6.30	1.00 (0 dB)	0.315 (-10 dB)
8.00	1.00 (0 dB)	0.25 (-12 dB)
10.00	0.80 (-2 dB)	0.2 (-14 dB)
12.50	0.63 (-4 dB)	0.16 (-16 dB)
16.00	0.50 (-6 dB)	0.125 (-18 dB)
20.00	0.40 (-8 dB)	0.1 (-20 dB)

Como base para avaliação do tempo de exposição, e levando em consideração que os limites de aceleração diminuem quando o tempo de exposição aumenta, conforme visto na Figura 20, um método conveniente para exposições de até 8 horas será utilizado.

O perfil de vôo considerado é composto de um conjunto de valores de vibração com durações diferentes (t_i) e amplitudes (A_i), conforme já apresentado. Então, o seguinte procedimento será usado:

Um valor de referência A' deverá ser escolhido entre os valores de aceleração (A_i), referindo-se ao seu valor de freqüência.

Então, um tempo permissível correspondente (τ') para o valor de A' é encontrado usando-se a Figura 20. O mesmo procedimento deve ser feito para cada valor de aceleração A_i , encontrando-se assim o valor τ_i correspondente.

Os tempos de exposição equivalentes EET (t') são então calculados com a seguinte relação:

$$t'_i = t_i \frac{\tau'}{\tau_i} \quad (15)$$

Os tempos equivalentes t'_i são então somados para obter o tempo de exposição equivalente total:

$$T' = \sum_i t'_i = \tau' \sum_i \frac{t_i}{\tau_i} \quad (16)$$

A razão τ'/T' é o fator decisivo no julgamento da permissibilidade de uma “exposição equivalente” calculada. Essa razão deve ser maior que uma unidade.

$$\frac{\tau'}{T'} > 1 \quad (17)$$

A avaliação será feita escolhendo A' como o valor de referência na banda de frequência de 1/3 de oitava de 16 Hz, obtendo-se os seguintes valores:

Tabela 5-8 – Avaliação pela norma ANSI S3.18

<i>Freq</i> (Hz)	<i>Aceleração</i> (m/s^2)	<i>Fator de</i> <i>ponderação</i>	<i>Aceleração</i> <i>ponderada</i> (m/s^2)	<i>Duração</i> (s)	<i>Tempo</i> <i>permitido</i> <i>FDPB</i> (s)	<i>Tempo</i> <i>permitido</i> <i>EL</i> (s)	<i>EET*</i> [t' (s)]
4.00	0.513	1.000	0.513	24	1.578E+04	4.458E+04	1.560E+01
5.00	0.430	1.000	0.430	24	2.112E+04	5.400E+04	1.166E+01
6.30	0.528	1.000	0.528	60	1.530E+04	4.080E+04	1.609E+01
8.00	0.492	1.000	0.492	138	1.710E+04	4.530E+04	8.280E+01
10.00	0.727	0.800	0.582	156	1.920E+04	4.860E+04	8.336E+01
12.50	0.517	0.630	0.326	756	5.430E+04	8.640E+04	1.428E+02
16.00	1.320	0.500	0.660	2775	2.880E+04	7.200E+04	2.775E+03
20.00	1.382	0.400	0.553	492	5.136E+04	8.640E+04	9.829E+01

* Tempo de Exposição Equivalente (EET) é igual para Fatigue-decreased Proficiency Boundary (FDPB) e para nível de exposição (EL).

A soma de EET (t') dá o tempo de exposição equivalente total (T') como segue:

$$T' = \sum_i t'_i = 3.832E + 03$$

Então comparando T' com os tempos permissíveis, encontra-se:

$$\frac{\tau'}{T'} = \frac{2.880E + 04}{3.832E + 03} = 7.516 \text{ _}[FDPB]$$

$$\frac{\tau'}{T'} = \frac{7.200E + 04}{3.832E + 03} = 18.790 \text{ _}[EL]$$

Pode-se concluir que a exposição equivalente total a que os participantes estão expostos é menor do que os seus respectivos tempos permissíveis.

A razão τ'/T' é maior que uma unidade para os dois casos.

A proficiência do piloto é garantida pela comparação dos níveis de aceleração utilizados no teste com a norma para FDPB. Pode ser visto pela Figura 21 que a proficiência do piloto está garantida por no mínimo quatro horas.

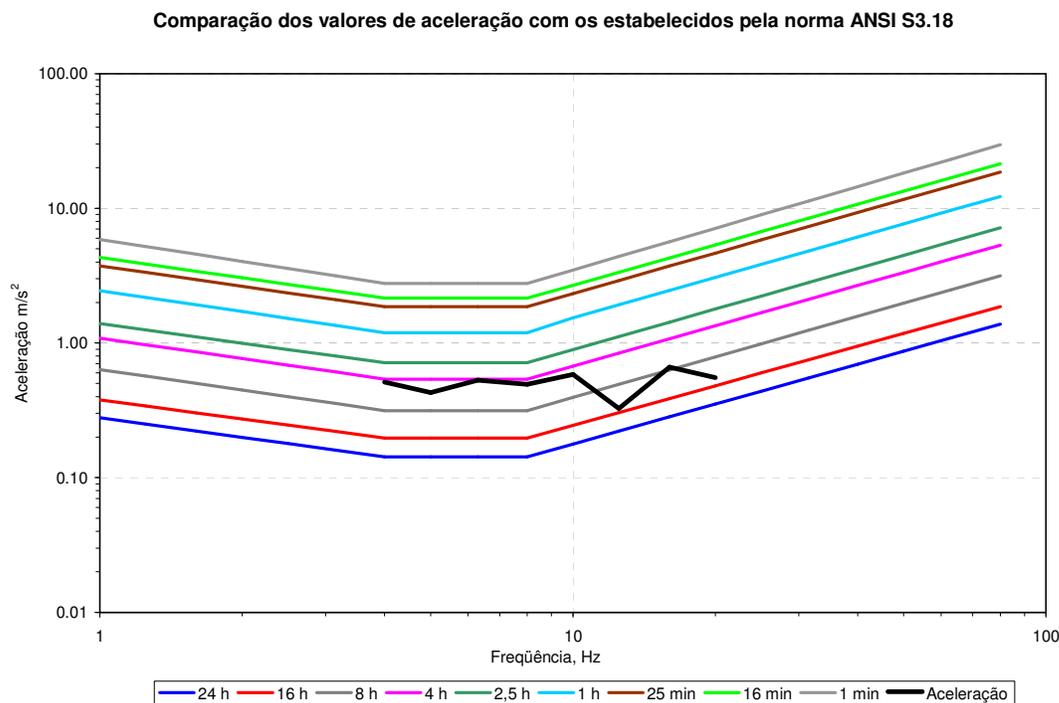


Figura 21 - Comparação dos valores de aceleração com os estabelecidos pela norma ANSI S3.18 para FDPB

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS COMPARADOS COM SITUAÇÕES DE VÔO

Os dados do perfil de vôo representam a situação de um vôo de emergência, com o tempo de 1 hora, o que é inferior ao tempo certificado para aeronaves em vôo monomotores em situação de emergência, de 3 horas.

Os testes realizados com a bancada tiveram um tempo inferior ao descrito no perfil de vôo por se tratarem de um experimento com alto custo financeiro e forte desgaste por parte dos participantes.

A comparação dos tempos e das condições em que cada situação ocorre, revela aspectos relevantes e preocupações, tais como:

- Pôde-se notar um esforço grande por parte dos participantes, pelo fato de serem aplicados valores de aceleração para efeito de simulação da falha de motor. Como o tempo de ensaio foi muito menor comparado com o tempo de um vôo real, não é possível prever o comportamento dos pilotos em uma situação de emergência, em que além do tempo de exposição maior, tem-se a agravante do stress psicológico.

- As piores freqüências para o cumprimento de tarefas são àquelas inferiores a 9 Hz, mesmo quando se aplicam níveis de aceleração mais baixos e a identificação dos números na sua leitura foi avaliada como difícil por todos os participantes na freqüência de 4 Hz.

Além disso, conforme já relatado por Harris e Piersol (2002), para um indivíduo sentado a freqüência de ressonância mais importante está entre 4 e 6 Hz. O autor ainda mostra que a parede abdominal, assim como a parede anterior do tórax tem uma resposta máxima entre 3 e 5 Hz.

A comparação com o perfil de vôo revela que as fases com freqüências abaixo de 9Hz correspondem à aproximação e pouso, as quais são as mais críticas em uma emergência. Quando aliadas a um tempo de exposição prolongado, tornam os resultados ainda mais preocupantes.

- Com relação às tarefas manuais (digitação e escrita), nas freqüências abaixo de 17 Hz o conceito difícil foi relatado por pelo menos um dos participantes, além da maioria deles ter atribuído o mesmo conceito para as freqüências de 9 Hz e 15 Hz. Já para a tarefa de leitura, a identificação dos números foi avaliada como difícil por todos os participantes na freqüência de 13 Hz.

A comparação com o perfil de vôo apresentado na Tabela 5-1 revela que as fases com freqüências entre 12 e 20 Hz tem uma duração maior do que as outras fases. Como a reprogramação dos parâmetros de vôo - tarefa necessária após a ocorrência de falha - são executados através de tarefas de digitação, a preocupação com os resultados se torna ainda mais evidente.

6 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que os objetivos pretendidos no início do trabalho foram alcançados com sucesso.

Foi demonstrado como a vibração de baixa frequência na direção vertical interfere no desempenho das tarefas de leitura, escrita e digitação através de testes em bancada. Durante esses testes, todas as tarefas foram concluídas com sucesso por todos os participantes do teste (júri).

As piores frequências para o cumprimento de tarefas foram àquelas inferiores a 9 Hz, mesmo quando foram aplicados níveis de aceleração mais baixos.

Especificamente com relação às tarefas manuais (digitação e escrita), nas frequências de 9 Hz e 15 Hz, a maioria dos participantes atribuiu o conceito difícil. Já para a frequência de 21 Hz, a tarefa foi mais fácil de ser realizada.

Com relação à leitura, todas as tarefas foram executadas corretamente.

A identificação dos números foi mais difícil quando o seu formato era parecido (3, 6, 9, 0 e 8) e foi avaliada como difícil por todos os participantes apenas nas frequências de 4 Hz e 13 Hz.

A comparação com a norma ISO 2631-1 mostrou que o valor total de vibração (a_v) obtido foi classificado entre razoavelmente desconfortável e desconfortável, quando comparado à escala de ponderação para amplitude de aceleração com relação ao conforto.

Já a comparação com a norma ANSI S3.18 mostrou que a tripulação seria capaz de suportar os níveis vibratórios usados durante o teste (de acordo com a eq.(17)), já que a exposição equivalente total a que os participantes estão expostos é menor do que os seus respectivos tempos permissíveis.

A proficiência do piloto está garantida por no mínimo quatro horas, pela comparação dos níveis de aceleração utilizados no teste com a norma para FDPB.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI S3.18. **Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration.** New York, 1979

BERANEK, L.L.; VÉR, I.L. **Noise and vibration control engineering.** John Wiley & Sons, Inc., 1992

BOILEAU, P.-É.; RAKHEJA, S.; WU, X. **A body mass dependent mechanical impedance model for applications in vibration seat testing.** Journal of Sound and Vibration (2002) 253(1), 243-264

BOILEAU, P.-É.; RAKHEJA, S.; WU, X. **Definition of a range of idealized values to characterize seated body biodynamic response under vertical vibration.** Journal of Sound and Vibration (1998) 215(4), 841-862

GRIFFIN, M. J. **Handbook of human vibration.** Academic Press, 1990

GRIFFIN, M. J. **The validation of biodynamic models.** Clinical Biomechanics (supplement 1), S81-S92, 2001

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' shock and vibration handbook.** 5. ed., McGraw-Hill Book Company, 2002

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 2631-1. **Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration.** Genève, 1997

MANSFIELD, N. J. **Literature review on low frequency vibration comfort.** Loughborough University, Loughborough. U.K., 2006

MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. **Dynamic response of the standing human body exposed to vertical vibration: influence of posture and vibration magnitude.** Journal of Sound and Vibration (1998) 212(1), 85-107

MATSUMOTO Y.; GRIFFIN, M. J. **Movement of the upper-body of seated subjects exposed to vertical whole-body vibration at the principal resonance frequency.** Journal of Sound and Vibration (1998) 215(4), 743-762

OSMOND, G.; GOULAIN, M. **Vibration tests for human factors purpose using cognilab** - Acoustic and Vibration Laboratory of TEST CENTER of AIRBUS France, 2001

SEAGULL, F. J.; WICKENS, C. D. **Vibration in command and control vehicles: visual performance, manual performance, and motion sickness: A review of the literature.** Human Factors Division, Institute of Aviation, University of Illinois, 2006

SMITH, J. A.; BOWDEN, D. R.; SMITH, S. D.; JURCSISN, J. G.; WALKER, A. Y. **Dynamic characteristics and human perception of vibration aboard a military propeller aircraft.** Biosciences and Protection Division Biomechanics Branch, 2007