

MODELO BIODINÂMICO PARA MEDIÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE ASSENTO-MÃO DA VIBRAÇÃO DE CORPO INTEIRO

Herbert Câmara Nick, hcn.nick@gmail.com¹
Maria Lúcia Machado Duarte, mlmduarte@ufmg.br¹
Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@demec.ufmg.br¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, CEP 31270-901.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo biodinâmico no software Altair® Motion View representativo de quatro graus de liberdade do corpo humano sentado em uma plataforma vibratória de testes de vibrações humanas para se obter a transmissibilidade assento-mão no sentido vertical do eixo z ou na direção longitudinal. Como conduta para validar o modelo biodinâmico proposto, realizou-se, a priori, a utilização da plataforma vibratória com o intuito de submeter um grupo de indivíduos à exposição à VCI a 0,7 m/s² de amplitude e a 5 Hz de frequência, no sentido vertical do eixo z ou na direção longitudinal, na plataforma vibratória durante um período de 5 minutos para obter os dados de transmissibilidade do assento à mão, de forma experimental, conforme as instruções da norma internacional ISO 2631-1 utilizando-se um acelerômetro tri-axial posicionado no assento; e um outro acelerômetro tri-axial, na mão, para posteriormente utilizar a curva gerada em prol do modelo a ser proposto. Um modelo linear de quatro graus de liberdade foi desenvolvido para representar o comportamento biodinâmico de indivíduos submetidos à aceleração de 0,7m/s² de amplitude e 5 Hz de frequência no sentido vertical do eixo z ou na direção longitudinal e nas condições apresentadas de um corpo humano sentado na plataforma de vibração. O modelo responde simultaneamente aos dados de entrada (input) da vibração forçada obtidos experimentalmente. Os resultados obtidos com os dados de saída (output) indicaram uma instabilidade nos primeiros 60 segundos devido à estabilização necessária do sistema de controle da plataforma vibratória nos dados experimentais. Após esse período de tempo em que ocorre o processo de estabilização do sistema, os valores gerados da curva do modelo e da curva do experimento convergem para valores similares ou até idênticos, o que significa a representação de um ajuste significativo entre as duas curvas. Com isso, conclui-se que utilizar modelos biodinâmicos simplificados representativos do corpo humano podem representar, com resultados relevantes, situações reais de experimentos.

Palavras-chave: vibração de corpo inteiro, modelo biomecânico, bioengenharia.

1. INTRODUÇÃO

O corpo humano está exposto à vibração durante diversas atividades no cotidiano, como durante deslocamentos pela utilização de veículos ou em algumas atividades laborais como, por exemplo, pela utilização de maquinários, equipamentos e/ou ferramentas. Com isso, a exposição à vibração pode ser incômoda, emocionante, nauseante, estimulante ou mesmo fonte de problemas de saúde. Por isso, a vibração é considerada um problema de engenharia e de saúde, ou seja, de bioengenharia (GRIFFIN, 1996). De fato, constata-se que a vibração humana é um assunto multidisciplinar à qual envolve conhecimento de diversas áreas, tais como a engenharia, ergonomia, matemática, medicina, física, fisiologia, biologia, psicologia, estatística.

As abordagens sobre os malefícios da exposição à Vibração de Corpo Inteiro (VCI) têm estudos com foco ocupacional para contemplar os anseios da especialidade de saúde e segurança no trabalho. Assim, conforme Saliba (2018), a comunidade científica buscou estabelecer critérios para a caracterização das condições de trabalho insalubres da exposição de seres humanos às vibrações.

A necessidade de propor modelos computacionais os quais representem fenômenos físicos que ocorrem no nosso cotidiano é um anseio da engenharia para reduzir custos e tempo em determinadas análises sistêmicas.

A modelagem consiste em obter as equações governantes que regem o comportamento do sistema que se pretende estudar. Ao efetuar a modelagem de um determinado sistema, o objetivo é verificar se o modelo matemático ou computacional proposto é capaz de representar de forma precisa o comportamento de um sistema em situação real.

Por sistema, segundo Ogata (2010), entende-se uma combinação de componentes os quais atuam conjuntamente a fim de realizarem determinado objetivo. Essa combinação pode ser aplicada a fenômenos de natureza física ou econômica. Este trabalho está perante ao estudo de sistemas dinâmicos, isto é, que apresentam uma dependência do tempo ou uma evolução com o tempo. Destes citados, destaca-se os sistemas lineares, como é o caso do sistema composto por elementos de inércia, rigidez e amortecimento para a construção de modelos que possuem propriedades lineares.

É fato que na literatura encontra-se as diferentes frequências de ressonância ou vibração natural que uma parte do corpo humano pode absorver determinada energia vibratória, ou seja, já se mapeou que cada parte do corpo humano possui diferentes frequências de ressonância, estabelecendo-se a sensibilidade para cada órgão (SALIBA, 2018).

Posto isso, faz-se o seguinte questionamento: existe um modelo computacional biodinâmico que possa ser utilizado como representação da resposta do sistema físico quando o corpo humano é sujeito à vibração de corpo inteiro (VCI) oriunda de uma plataforma vibratória, como no caso daquela existente no laboratório de vibrações do Grupo de Acústica e Vibrações em Seres Humanos (GRAVISH)?

1.1. Relevância da pesquisa

Esta pesquisa é relevante, haja vista que o corpo humano pode ser representado por um modelo computacional de massa-mola-amortecedor com vários graus de liberdade. Porém, é importante considerar que o sujeito, quanto ao seu corpo humano, é único, e suas funções são individualizadas como sujeito e, por isso, deve-se analisar na literatura as propriedades mecânicas diferentes de pessoa para pessoa (CHAFFIN; et al., 2006).

Segundo (GRIFFIN, 1996), a evolução do conhecimento sobre o comportamento dinâmico do corpo humano ainda depende, em larga escala, da realização de pesquisas e trabalhos experimentais, isto porque o corpo exposto às vibrações suporta tensões que têm um efeito mecânico sobre si, benéfico ou não, dependendo de suas propriedades dinâmicas. Com isso, tem-se que a criação do modelo biomecânico do sistema é capaz de prever as vibrações resultantes das excitações impostas e/ou causadas ao sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Vibração

Segundo Mansfield (2005), define-se vibração como o movimento mecânico oscilatório de um corpo em torno de um ponto referencial provocado por forças externas de excitação, que podem ser forças desequilibradas de componentes rotativos e/ou movimentos alternados de máquinas ou equipamentos.

Mansfield (2005) afirma que a vibração precisa de uma estrutura mecânica por meio da qual possa ser transmitida, ou seja, uma estrutura para que a vibração possa se propagar, podendo essa estrutura ser parte de uma máquina, veículo, ferramenta ou mesmo um ser humano.

Ressalta-se que Griffin (1996) classifica vibração de corpo inteiro como a vibração transmitida pelo corpo quando uma parte ou o todo deste corpo está em contato com uma superfície vibratória. Essa transmissão da vibração é oriunda da vibração transmitida por meio das nádegas de um sujeito sentado em um assento vibratório, pela planta dos pés apoiados em uma superfície vibratória ou pelo dorso do corpo apoiado na superfície vibratória. A mesma denominação é dada pela norma internacional ISO 2631-1 (1997) que é a que rege a vibração de corpo inteiro a qual será, a partir de agora, denominada de VCI.

As vibrações transmitidas ao ser humano devem ser medidas nas direções corretas de um sistema ortogonal de coordenadas estabelecidas pela norma internacional ISO 2631-1 (1997) e devem ter suas origens conforme a coordenada de eixos mostrados na Figura 1. O adendo do ano de 2010 dessa norma ISO 2631-1 corrigiu o sentido do eixo r_y .

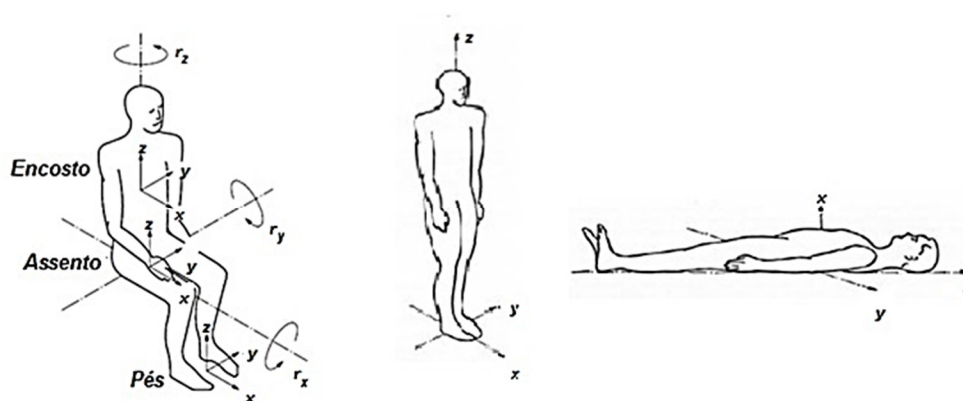


Figura 1. Eixos basicêntricos do corpo humano.

Fonte: Norma Internacional ISO 2631-1 (1997) e (2010)

O corpo humano é exposto à VCI durante as atividades do cotidiano quando, por exemplo, se locomove em um carro ou ônibus. A exposição à VCI pode ser incômoda, emocionante, nauseante, estimulante ou mesmo fonte de problemas de saúde. A vibração humana é um assunto multidisciplinar a qual envolve conhecimentos significativos nas áreas da engenharia, ergonomia, matemática, medicina, física, fisiologia, psicologia e estatística (GRIFFIN, 1996).

2.2. Transmissibilidade

Mansfield (2005) define transmissibilidade $[Tr]$ como a razão entre a força transmitida e a força excitante, como a razão entre a vibração na superfície do assento e a vibração na base do assento em função da frequência ou ainda como sendo a razão entre as amplitudes das forças transmitidas e de excitação. A transmissibilidade é dependente da frequência natural de vibração, da frequência imposta e do fator de perda do material.

Já Viana (2019) afirma que transmissibilidade é o parâmetro usado para indicar o nível relativo de vibração entre dois pontos, e expressa a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada. Se o sistema exposto à vibração for totalmente rígido, a transmissibilidade valerá um; caso o sistema seja isolador a transmissibilidade será menor que um; por último, se for amplificador ela será maior que um.

Griffin (1996) afirma que os efeitos adversos da vibração podem ser previstos a partir de medições da vibração transmitida ao corpo (via medições de impedância) ou da vibração transmitida através do corpo (via medições de transmissibilidade). Portanto, a força que entra no corpo ou a aceleração que ocorre em um ponto do corpo definem a importância relativa às diferentes frequências de vibração.

2.3. Biomecânica

A biomecânica, segundo Hall (2016), é uma ciência multidisciplinar a qual abrange o estudo da ação das forças na aplicação de princípios mecânicos no campo das estruturas e funções dos organismos vivos, sendo o corpo humano o organismo vivo mais estudado na biomecânica, abordando um variado espectro de problemas e questões.

Pereira (2005) define biomecânica como “o conjunto de métodos e técnicas que objetivam a análise quantitativa do movimento humano e denominado de análise do movimento”.

Segundo Hall (2006), “a capacidade de analisar o movimento humano também requer o conhecimento das características do movimento desejado e a aptidão para observar e determinar se um dado desempenho as incorpora”. Para isso, é de suma importância a observação visual da análise qualitativa mecânica do movimento por meio de um modelo biomecânico do corpo humano.

Rao (2011) explica que um sistema dinâmico vibracional envolve um conjunto de elementos que podem ser representados de forma simplificada por um modelo composto de conjuntos de massa, mola e amortecedor. Tais elementos são usados para representar, respectivamente, a inércia, a rigidez e o amortecimento correspondentes ao do sistema. Este sistema dinâmico pode, também, ser submetido a uma excitação externa que pode ser uma força ou um deslocamento oscilante.

Griffin (2001) conceitua modelar como o ato de fazer hipóteses, sendo que uma vez definidos o modelo ou as hipóteses, esse será capaz de fazer um conjunto de previsões, verificáveis e validáveis com os dados experimentais reais. Sendo assim, um modelo biodinâmico (biomecânico) deve ser a representação confiável de algum aspecto de como o corpo humano responde a uma força de excitação ou movimento imposto a esse corpo. O autor lista razões para o interesse no desenvolvimento de modelos biodinâmicos (biomecânicos), a saber: representar o conhecimento sobre a natureza dos movimentos do corpo; prever a influência de variáveis que afetam a resposta biomecânica; oferecer um método conveniente para apresentar dados experimentais biodinâmicos (ou biomecânicos) médios; prever movimentos e forças causadas por situações demasiadamente numerosas e variadas para determinação experimental; prever movimentos e forças causadas por situações demasiadamente perigosas para determinação experimental; fornecer as informações necessárias para a otimização de sistemas de isolamentos e a dinâmica de outros sistemas acoplados ao corpo; determinar condições de impedância padrão para o teste de vibração de sistemas usados por seres humanos.

Griffin (1996) afirma que diversos autores da área de estudo da biomecânica visam o desenvolvimento de um modelo de engenharia que forneça respostas mecânicas do corpo humano. Todavia, o autor alerta que conhecer os movimentos e a resposta mecânica a forças externas de excitação do corpo é apenas o passo inicial para a determinação de outros efeitos, como os psicológicos (ou cognitivos) e do processo de percepção de um determinado movimento.

2.4. Modelos biodinâmicos na literatura

Kumbhar; Xu e Yang (2013) afirmam que um modelo biodinâmico humano válido é muito útil para estudar a resposta do corpo humano à exposição à vibração do corpo inteiro. Segundo esses autores, a postura da posição sentada é a posição mais utilizada em automóveis e, por isso, o estudo da resposta do corpo humano na posição sentada tem atraído muita atenção da comunidade acadêmica, haja vista que nessa posição o corpo humano está em contato direto com o assento, sendo que o design do assento tem um desempenho preponderante na transmissibilidade da vibração.

Posto isso, Kumbhar; Xu e Yang (2013) propuseram um modelo biodinâmico, de multicorpos, linear de 14 graus de liberdade (*DOF – degree of freedom*) composto por uma massa total de 71,32 kg, com 5 segmentos corporais e com três diferentes tipos de assentos, sendo o primeiro com assento rígido e duro, o segundo com apenas almofada e um terceiro com assento almofadado e uma suspensão para comparar a resposta do corpo humano às vibrações em diferentes tipos de assentos na posição sentada, com um ângulo de encosto de 21° com o plano vertical. O apoio do encosto e o contato dos pés estão incluídos neste modelo porque uma quantidade considerável de vibrações é transferida através dele, como cita os autores.

Kumbhar; Xu e Yang (2013) concluíram que no primeiro caso todas as vibrações foram transferidas ao corpo, sendo que a transmissibilidade do caso 1 foi maior que para os casos 2 e 3. Para o Caso 2, a frequência foi reduzida, e a magnitude diminuiu devido à rigidez e ao amortecimento das almofadas do assento e do encosto. Já no caso 3, tem-se a melhor configuração para isolamento de vibração. O estudo também mostrou que dependendo do design do encosto, da almofada e da suspensão do assento, esse pode melhorar o conforto de deslocamento horizontal do corpo humano.

Para Desai; Guha e Seshu (2018), a modelagem e medição da resposta biomecânica do corpo humano é um importante tópico de pesquisa a ser estudado, pois esse assunto possui aplicações em ergonomia, tecnologias de sistemas de controle de suspensão passiva ou ativa, efeitos adversos no corpo humano que causam desconforto e nos efeitos à saúde do ser humano. Os autores explicam que o risco de exposição à VCI depende de três fatores diferentes, que são o intervalo de tempo, a amplitude e a frequência da vibração transmitida. Para analisar essa influência da VCI no corpo humano foi proposto um modelo biomecânico bidimensional multicorpos do corpo humano com postura sentada composto por 20 graus de liberdade e para representar os resultados experimentais de transmissibilidade assento-cabeça e massa aparente. Segundo os autores, o modelo apresentado pode fornecer a compreensão detalhada de como o corpo humano responde a excitações externas e forças que são transmitidas no joelho, pescoço ou coluna. O modelo pode ser acoplado ao modelo do veículo para encontrar a almofada do assento, parâmetros de suspensão do assento e para analisar a resposta do corpo humano em condições de estrada diferentes.

Liu e Qiu (2020) afirmam que a modelagem biomecânica fornece informações sobre o efeito de cada parâmetro da dinâmica do sistema pela contribuição de partes individuais do corpo na não linearidade da frequência de ressonância principal diminuindo com o aumento da magnitude da vibração em um corpo humano sentado exposto à VCI no sentido vertical do eixo “z” ou longitudinal. Para isso, os autores desenvolveram um modelo dinâmico multicorpos do corpo humano sentado o qual pode representar as forças dinâmicas sobre a área de contato local abaixo das tuberosidades isquiáticas (proeminências ósseas mais próximas ao assento, sendo as partes da pelve submetidas a maior pressão na postura sentada) e coxas. O modelo desenvolvido neste estudo continha seis corpos rígidos representando tronco superior, tronco inferior, pelve, coxas, pernas e vísceras do corpo, interligados por molas rotacionais lineares e amortecedores. Os autores verificaram que à medida que a magnitude da vibração aumentava, a rigidez vertical abaixo das tuberosidades isquiáticas, as coxas médias e as coxas dianteiras, a rigidez das vísceras, a rigidez da articulação torácica inferior e o amortecimento vertical abaixo das tuberosidades isquiáticas diminuía significativamente. Sendo assim, os autores concluíram que os tecidos moles abaixo das tuberosidades isquiáticas, coxas e as vísceras são as principais partes causadoras da não linearidade observada nas massas aparentes do corpo humano.

Segundo Lucas e Ko (2020), muitos estudos foram realizados para estudar as respostas de vibração e desenvolver a modelagem matemática na posição vertical sentada e em pé e estudos mostraram que as frequências de ressonância do corpo humano foram identificadas na faixa de 4-6 Hz e 8-12 Hz na posição vertical. Os autores propuseram um modelo matemático com 9 graus de liberdade para identificar a resposta quando um corpo humano é submetido a VCI. A frequência de ressonância geral do corpo foi de 1,4 Hz. Enquanto isso, a cabeça e o pescoço tinham duas frequências de ressonância, que eram 1,3 e 3,28 Hz para a cabeça e 1,4 e 3,4 Hz para o pescoço. O modelo matemático desenvolvido pelos autores pode ser usado como um modelo fundamental para prever a resposta de qualquer VCI reclinada.

Rosen e Arcan (2003) estudaram as características dinâmicas de um sistema corpo/assento representando o corpo humano sentado em um ambiente exposto à vibração. O modelo com vários graus de liberdade e seus parâmetros propostos descreveram com sucesso os principais efeitos do fenômeno de massa aparente em comparação com dados experimentais documentados na literatura. Os autores também concluíram que o uso de um baixo número de graus de liberdade foi suficiente para simular o principal efeito de massa aparente global de um corpo humano sentado.

Smith (2000) explica que modelos matemáticos podem ser uma ferramenta útil para o desenvolvimento e avaliação de sistemas de assento para mitigação de vibrações. Para isso, o autor propôs em seu estudo um modelo de 5 graus de liberdade formulado com base na impedância do ponto de condução medido e transmissibilidades das principais estruturas anatômicas que contribuem para os comportamentos de ressonância observados. O modelo de parâmetro agrupado modificado melhorou as simulações de transmissibilidade de pico de tórax e coluna. O modelo foi eficaz em simular tanto o pico de impedância inferior observado na região de ressonância primária (4-8 Hz) quanto o pico de impedância prevalente observado na segunda região de ressonância (7-10 Hz) nos indivíduos menores. No entanto, o modelo não foi eficaz em prever o amortecimento observado no segundo pico de ressonância com o uso de almofadas.

Arslan (2015) analisou quantitativamente modelos biodinâmicos do corpo humano apresentados na literatura os quais foram projetados para caracterizar a resposta do corpo humano real exposto à VCI. Para tanto, foram realizadas medições diretas das acelerações de vibração obtidas de diferentes segmentos do corpo humano e do assento do veículo durante a condução em estradas com diferentes níveis de desnível. De acordo com os resultados da comparação, o modelo biodinâmico proposto por Boileau e Rakheja (1998, *apud* ARSLAN 2015) mostrou a melhor correlação com os dados de aceleração experimental.

Kim, Fard e Kato (2020) apresentaram um estudo de um modelo de Elementos Finitos do corpo humano sentado de baixa ordem desenvolvido para prever a transmissibilidade de vibração do sistema humano-assento em frequências de até 30 Hz. Ao longo do processo de otimização, os parâmetros do modelo foram obtidos e comparados às transmissibilidades medidas do sistema de assentos de veículos ocupados. Os resultados mostraram que dois modos de vibração do corpo humano acoplados com espuma foram observados abaixo de 10 Hz, e dois modos acoplados humanos e de estrutura de assento foram observados em torno de 20,1 Hz e 21,9 Hz. A transmissibilidade dianteira-posterior do modelo em vários

locais de contato forneceu correlação razoável com os dados medidos. O modelo humano de baixa ordem desenvolvido permite a previsão da transmissibilidade frente-atrás em vários locais de contato do encosto em até 30 Hz.

Ji; Zhou e Zhang (2012) buscaram estudar modelos qualitativamente precisos para um corpo humano em pé, em vibração vertical. Esses modelos são derivados de um estudo da interação humano-estrutura., e para verificação do estudo, um modelo de corpo em pé e os dois modelos de corpo humano discretos foram colocados em uma estrutura simples, e uma análise de autovalor foi realizada. A estreita correspondência entre as frequências naturais dos modelos valida a derivação, o padrão e as definições dos dois modelos discretos do corpo humano em vibração estrutural vertical.

3. METODOLOGIA

Em um primeiro momento, utilizou-se a plataforma de vibração descrita por Donadon; Duarte e Galvez (2012) como sendo uma plataforma de estudos dos efeitos da vibração de corpo inteiro no corpo humano a partir de um voluntário colocado em uma cadeira a qual possui uma placa apoiada por quatro molas de compressão, excitadas na base por meio de um excitador eletrodinâmico, como mostra a Figura 2. A plataforma é construída para suportar a capacidade de 50 a 95 kg de peso de uma pessoa, pois está condicionada ao limite de compressão das molas.

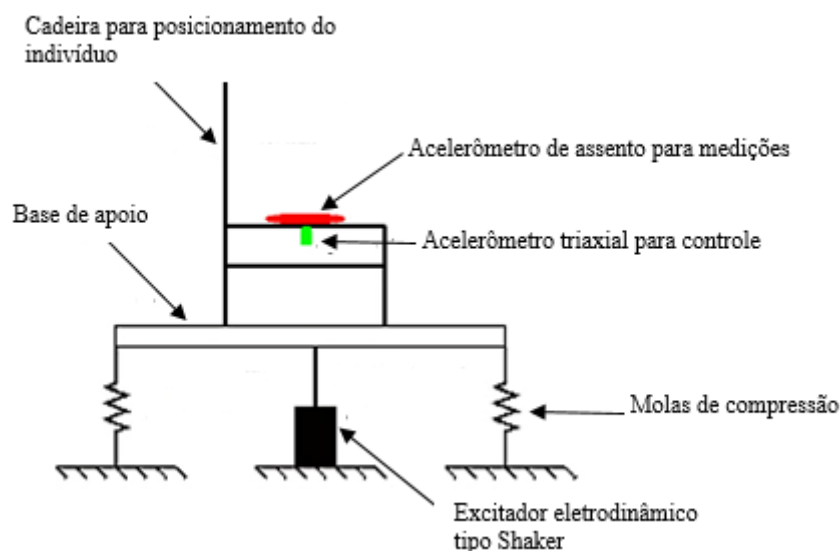


Figura 2. Esquema da plataforma vibratória.

Fonte: Donadon; Duarte e Galvez (2012)

A utilização dessa plataforma teve o intuito de submeter um grupo de indivíduos à exposição à VCI a $0,7 \text{ m/s}^2$ de amplitude e a 5 Hz de frequência na plataforma vibratória durante um período de 5 minutos para obter os 300 pontos de dados da curva de transmissibilidade do assento à mão, de forma experimental, para posteriormente utilizar a curva gerada em prol do modelo a ser proposto.

3.1. Materiais

Utilizou-se os seguintes materiais para a medição experimental:

- Acelerômetro tri-axial de assento padronizado SAE – *Seat Pad*, modelo AP2083 do fabricante APTECHNOLOGY com sensibilidade $a_x = 10,2 \text{ mV/g}$; $a_y = 9,9 \text{ mV/g}$; $a_z = 10,0 \text{ mV/g}$.
- Acelerômetro tri-axial de mão, modelo DeltaTron 4524-B-001 do fabricante Brüel & Kjaer com sensibilidade $a_x = 9,782 \text{ mV/g}$; $a_y = 9,994 \text{ mV/g}$; $a_z = 9,927 \text{ mV/g}$.
- Medido de vibração humana Maestro 01dB-steel.
- Analisador de sinal dinâmico Photon II LDS.

Para o desenvolvimento do modelo biomecânico utilizou-se o software Altair® MotionView.

3.2. Métodos

Está sendo proposto um modelo de 4 graus de liberdade representando o comportamento biomecânico de indivíduo exposto à vibração de corpo inteiro na plataforma vibratória para uma faixa de frequência de 5 a 30 Hz.

Os 4 graus de liberdade são divididos da seguinte forma, conforme mostra a Figura 3:

m_1 = massa do banco

m_2 = massa referente às coxas e pelve

m_3 = massa referente ao tronco e braços

m_4 = massa referente à cabeça

As propriedades elásticas $[k]$ e de amortecimento $[c]$ são:

k_1 = constante de rigidez do banco assento

k_2 = constante de rigidez das coxas e pelve

k_3 = constante de rigidez do tronco

k_4 = constante de rigidez do pescoço

c_1 = constante de amortecimento do banco assento

c_2 = constante de amortecimento do quadril

c_3 = constante de amortecimento do tronco

c_4 = constante de amortecimento do pescoço

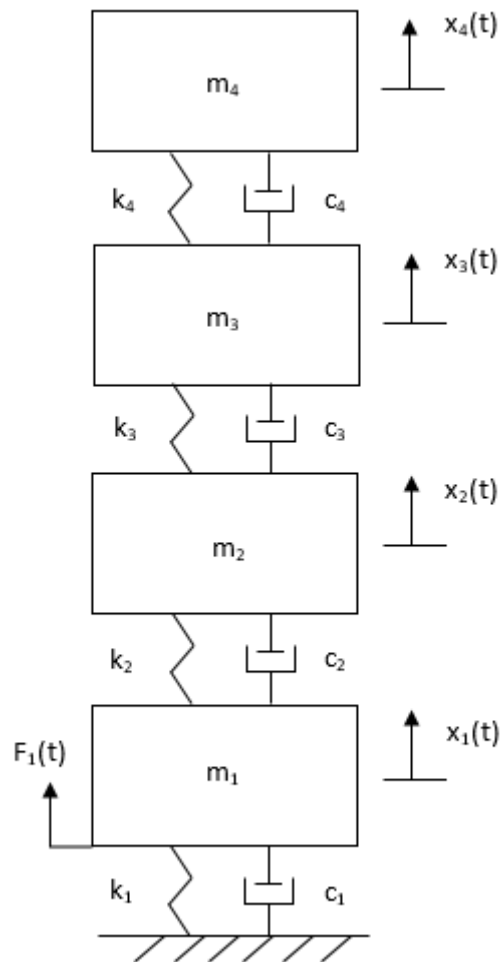


Figura 3. Diagrama de blocos do modelo de 4 graus de liberdade.

Tendo a definição do modelo, afirma-se as seguintes premissas:

- i. O modelo é considerado linear.
- ii. As massas das pernas e pés são desconsideradas no modelo, visto que essas massas vibram em fase com o piso.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um modelo de 4 graus de liberdade linear representando o corpo humano foi proposto desenvolvido no software Altair® MotionView conforme mostra a Figura 4.

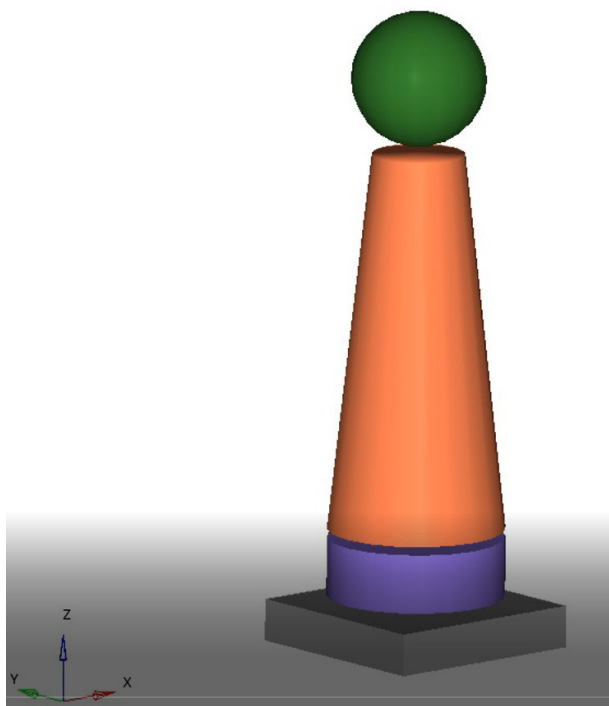


Figura 4. **Modelo de 4 graus de liberdade.**

Ao executar a simulação do software, gerou-se as curvas de entrada obtidas experimentalmente pelo excitador da plataforma de vibração e pela curva de saída gerada pelo modelo, sendo a representatividade da transmissibilidade assento-mão.

Observa-se que o modelo obteve um comportamento satisfatório, haja vista que a transmissibilidade do modelo (saída - output, em azul) converge para a curva de transmissibilidade experimental (entrada - input, em vermelho), como mostra a Figura 5.

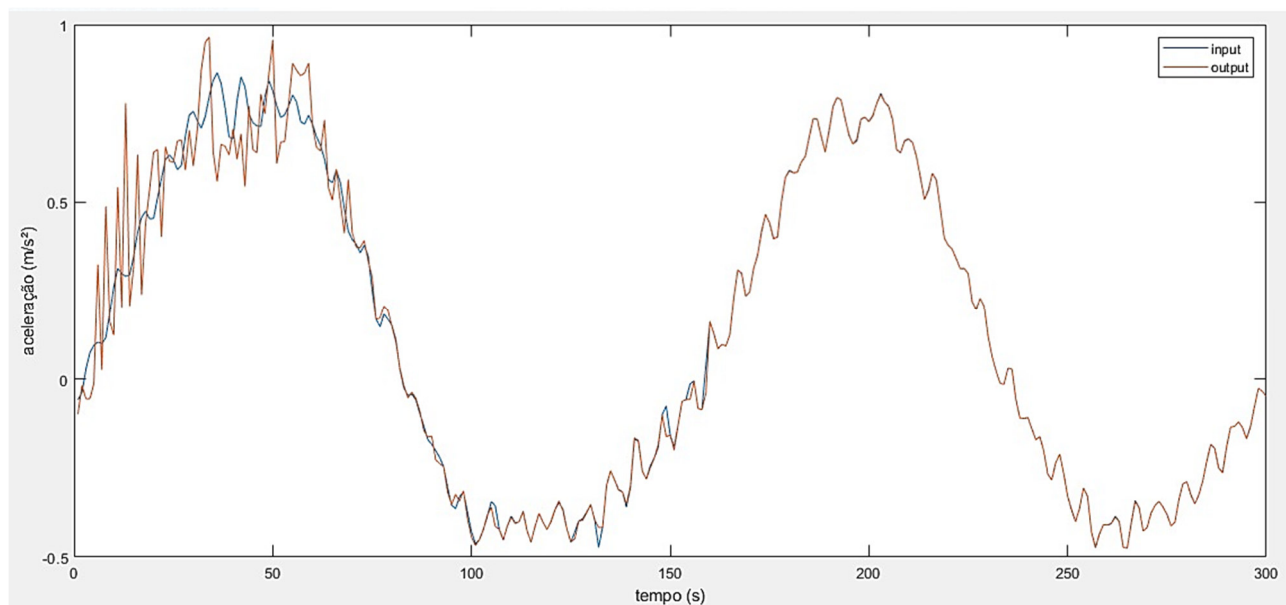


Figura 5. **Transmissibilidade experimental versus da simulação do modelo**

Ressalta-se que nos primeiros 60 segundos, as curvas apresentam uma instabilidade a qual é devida ao transiente do sistema da plataforma vibratória, ou seja, o sistema de controle da plataforma vibratória leva em torno de 60 segundos para estabilizar na onda de oscilação, e isso refletiu também na simulação do modelo, o que corrobora para a correlação de que o modelo proposto apresenta resultados semelhantes aos medidos.

5. CONCLUSÃO

A fundamentação teórica serviu como importante ferramenta para orientação do desenvolvimento do modelo de 4 graus de liberdade proposto. Por meio da revisão bibliográfica, conheceu-se os parâmetros corpóreos a serem utilizados, como massa, rigidez e amortecimento, assim como os parâmetros de momento de inércia.

O modelo computacional de 4 graus de liberdades desenvolvido para representar o comportamento dinâmico do corpo humano, por meio de uma excitação externa forçada, massa aparente, impedância mecânica e transmissibilidade de vibração e que considera o sistema corpo humano na posição sentada provenientes de experimentos reais na plataforma vibratória resultaram em curvas de transmissibilidade geradas pelo modelo aparentemente concordantes às curvas medidas experimentalmente, o que sugere a validação do modelo de forma satisfatória. Portanto, valores unitários calculados indicam que existe uma satisfatória correlação entre as curvas de entrada obtida experimentalmente e a curva de saída obtida a partir do modelo de 4 graus de liberdade desenvolvido neste trabalho.

Fica evidente que o corpo humano é altamente sensível aos níveis de vibração, e quando elementos discretos são utilizados para a modelagem de um sistema físico, o sistema associado de equações pode ser estabelecido como um modelo simples ao invés de um modelo complexo, pois os parâmetros podem convergir a valores eficazes. Tais representações servem como referência para a solução de problemas práticos, além de proporcionar uma melhor compreensão do uso de ferramentas de análise de vibração de sistemas do corpo humano.

6. REFERÊNCIAS

- ARSLAN, Y. Z., 2015. Experimental assessment of lumped-parameter human body models exposed to whole-body vibration. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, v. 15, n. 3, p. 1550023_1-1550023_13.
- BOILEAU, P-É; RAKHEJA, S., 1998. Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver: Measurement and model development, *Int. J. Ind. Ergonom.* 22:449–472.
- CHAFFIN, D. B.; ANDERSSON, G. B. J.; MARTIN, B. J., 2006. *Occupational Biomechanics*, 4 ed. ISBN: 978-0-471-72343-1.
- DESAI, R.; GUHA, A.; SESHU, P., 2018. Multibody Biomechanical Modelling of Human Body Response to Direct and Cross Axis Vibration. *Procedia Computer Science*, v. 133, p. 494-501.
- GRIFFIN, M. J., 2001. The validation of biodynamic models. *Clinical Biomechanics*, v. 16, n. 1, p. S81-S92.
- GRIFFIN, M.J., 1996. *Handbook of Human Vibration*, 1st edition, London: Academic Press.
- HALL, S. J., 2016. *Biomecânica básica; revisão técnica Eliane Ferreira*. 7 ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan.
- ISO 2631-1, 1997. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements, 1997. ISO - ISO/TC 108/SC 4 - Human Exposure To Mechanical Vibration And Shock, Geneva, Switzerland: ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 2631-1, 2010. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements, 2010. ISO - ISO/TC 108/SC 4 - Human Exposure To Mechanical Vibration And Shock, Geneva, Switzerland: ISO - International Organization for Standardization.
- JI, T.; ZHOU, D.; ZHANG, Q., 2012. Models of a standing human body in vertical vibration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, v. 166, n. 7, p. 367-378.
- KIM, E.; FARD, M.; KATO, K., 2020. A seated human model for predicting the coupled human-seat transmissibility exposed to fore-aft whole-body vibration. *Applied Ergonomics*, v. 84, p. 102929_1-102929_9.
- KUMBHAR, P.; XU, P.; YANG, J., 2013. Evaluation of Human Body Response for Different Vehicle Seats Using a Multibody Biodynamic Model. In: *SAE 2013 World Congress & Exhibition*. SAE International: Detroit, Michigan, USA.
- LIU, C.; QIU, Y., 2020. Nonlinearity in the localised apparent masses of the seated human body exposed to vertical vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 135, p. 10639.
- LUCAS, L. K.; KO, Y. H., 2020. Modelling of the Human Body Under the Exposure to Recumbent Whole-body Vibration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 815, p. 012015.
- MANSFIELD, N. J., 2005. *Human response to vibration*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- OGATA, K., 2010. *Modern Control Engineering*. 5 ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- PEREIRA, P. C., 2005. Nova modelagem biomecânica do corpo humano aplicável na análise e controle da locomoção. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em Saúde, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- RAO, S., 2008. *Vibrações mecânicas*. 4 ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall.
- ROSEN, J.; ARCAN, M., 2003. Modeling the Human Body/Seat System in a Vibration Environment. *Journal of Biomechanical Engineering*, v. 125, n. 2, p. 223-231.
- SALIBA, T. M., 2018. Manual prático de avaliação e controle de vibração: PPRA; colaboradores Márcia Angelin Chaves Côrrea, Maria Beatriz de Freitas Lanza. 5 ed. São Paulo, SP: LTr.
- SMITH, S. D., 2000. Modeling differences in the vibration response characteristics of the human body. *Journal of Biomechanics*, v.33, p. 1513-1516.
- VIANA, P. A. X., 2019. Influência da transmissibilidade de vibração no desempenho cognitivo (foco, subárea atenção). Monografia de graduação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

BIODYNAMIC MODEL FOR MEASURING SEAT-HAND TRANSMISSIBILITY OF WHOLE-BODY VIBRATION

Herbert Câmara Nick, hcn.nick@gmail.com¹

Maria Lúcia Machado Duarte, mlmduarte@ufmg.br¹

Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@demec.ufmg.br¹

¹Postgraduate Program in Mechanical Engineering – Engineering Campus – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Avenue Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, ZIP CODE 31270-901.

Abstract. *This work aims to develop a biodynamic model in Altair® Motion View software representing four degrees of freedom of the human body sitting on a vibrating platform for testing human vibrations to obtain seat-hand transmissibility in the vertical direction of the z-axis or in the longitudinal direction. As conduct to validate the proposed biodynamic model, a priori, the use of the vibrating platform was carried out in order to subject a group of individuals to exposure to WBV at 0.7 m/s² in amplitude and at 5 Hz of frequency, in the vertical direction of the z-axis or in the longitudinal direction, on the vibrating platform for a period of 5 minutes to obtain the transmissibility data of the seat by hand, in an experimental way, according to the instructions of the international standard ISO 2631-1 using an accelerometer tri-axial positioned on the seat; and another tri-axial accelerometer, in hand, to later use the generated curve in favor of the model to be proposed. A linear model of four degrees of freedom was developed to represent the biodynamic behavior of individuals subjected to an acceleration of 0.7m/s² of amplitude and 5 Hz of frequency in the vertical direction of the z-axis or in the longitudinal direction and in the presented conditions of a human body. sitting on the vibration platform. The model responds simultaneously to the experimentally obtained forced vibration input data. The results obtained with the output data indicated an instability in the first 60 seconds due to the necessary stabilization of the vibrating platform control system in the experimental data. After this period of time in which the system stabilization process occurs, the values generated from the model curve and the experiment curve converge to similar or even identical values, which means the representation of a significant fit between the two curves. With this, it is concluded that using simplified biodynamic models representative of the human body can represent, with relevant results, real situations of experiments.*

Keywords: whole-body vibration, biomechanical model, bioengineering.