

PROCEDIMENTO DE MEDIDA DA VIBRAÇÃO DE CORPO INTEIRO VIA PROGRAMAÇÃO MATLAB DE ACORDO COM A ISO 2631

PROCEDURE FOR MEASURING THE WHOLE BODY VIBRATION THROUGH MATLAB PROGRAMMING ACCORDING TO ISO 2631

Recebido em: 06/10/2017.

Aceito em: 05/12/2017.

Halane Maria Braga Fernandes Brito¹

Julyanna Bezerra de Oliveira²

RESUMO

Quando um ser humano é exposto a certos níveis de vibrações, gerando sensações de desconforto ou incômodo que interferem na eficiência ocupante da edificação, causando efeitos consideráveis na sua saúde, torna-se necessário avaliá-las e controlá-las. Como ferramenta para análise da vibração, em pisos de edificações quanto ao conforto humano, diretrizes normativas direcionam-se a procedimentos de métodos de avaliação para a análise da ponderação da frequência, sendo esta realizada através de tabelas ou de filtros digitais. Para esse estudo, foi realizada a ponderação da frequência com a aplicação de filtros digitais, na forma de funções de transferência, no registro temporal das acelerações instantâneas. Foram desenvolvidos algoritmos em linguagem de programação *MatLab*, segundo recomendações da ISO 2631, resultando em um programa que filtra os registros de aceleração de medidas em circunstâncias reais, para posterior análise com limites aceitáveis quanto o conforto humano, apresentando uma ferramenta adequada que supre as dificuldades encontradas para fazer esse tipo de medição.

Palavras-chave: Conforto humano. *MatLab*. Normas. Vibração

ABSTRACT

When a human being is exposed to certain levels of vibrations, generating feelings of discomfort or annoyance that interfere with the occupant efficiency of the building, causing considerable effects on his health, it becomes necessary to evaluate and control them. As a tool for analysis of vibration in building floors regarding human comfort, normative guidelines are directed to procedures of assessment methods for

¹ Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
Docente da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). E-mail: halanemaria@gmail.com

² Graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
E-mail: julyanna_mec@gmail.com

the analysis of frequency weighting, which is performed through tables or digital filters. For this study, the frequency weighting was performed with the application of digital filters, in the form of transfer functions, in the time register of instantaneous accelerations. *MatLab* programming language algorithms were developed according to ISO 2631 recommendations, resulting in a program that filters the acceleration records of measurements under real circumstances, for later analysis with acceptable limits as to human comfort, presenting an adequate tool that provides the difficulties to do this type of measurement.

Keywords: Human comfort. *MatLab*. *Design codes*. Vibration.

INTRODUÇÃO

A vibração estrutural a que os seres humanos estão expostos em edifícios pode ser detectada, pelos ocupantes, e pode afetá-los de várias maneiras, mas particularmente, o seu conforto e a qualidade de vida podem ser reduzidos (ISO 2631-2, 2003). A vibração pode ser considerada como um problema de engenharia, como também de saúde quando está relacionada ao ser humano. Pesquisadores vêm desenvolvendo estudos, com relação à exposição de seres humanos à vibração, e as consequências desta exposição na saúde física e mental. Desconforto, insegurança, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho, sensação de enjoo e intolerância são alguns dos problemas que afetam as pessoas expostas à vibração excessiva (MARJANEN, 2010; PEREIRA, 2005; ISO 2631-1,1997; GRIFFIN, 1996). Como a sensibilidade humana para a vibração é muito aguçada, o corpo humano pode sentir amplitudes de deslocamento de vibração tão baixas quanto 0,001 mm (BACHMANN et al, 1995). Entretanto, Gama e Paneiro (2006) dizem que não devem ser confundidos os conceitos de incomodidade e de percepção, dado que este último tem geralmente valores mais baixos que o primeiro, embora a repetição de eventos simplesmente perceptíveis possa conduzir à incomodidade.

As ações dinâmicas podem provocar estados limites de serviço (ELS) (também chamado de estados limites de utilização) e estados limites últimos (ELU) por vibrações excessivas, ou por fadiga dos materiais (NBR-6118, 2014). Como ações dinâmicas tem-se: cargas induzidas pelo vento, por ondas, por máquinas, por tráfego, por pedestres, cargas providas de terremotos, cargas de impacto ou devido a explosões, entre outras. Segundo a ISO 2631-2 (2003), o tipo de vibração é definido de acordo com a natureza da vibração que é medida, por exemplo:

- A vibração pode ser contínua, com magnitudes variando ou permanecendo constantes com o tempo;

- A vibração pode ser intermitente, sendo a magnitude de cada evento constante ou variando com o tempo;
- A vibração ser impulsiva, como em choques.

A causa do desconforto proveniente de vibrações está associada diretamente ao movimento e à aceleração. A aceleração é o parâmetro utilizado pelas normas para avaliação do nível de vibração quanto ao conforto humano, associados ao ambiente construído.

Segundo a ISO 2631-2 (2003), a resposta humana à vibração nos edifícios é muito complexa. Em muitas circunstâncias, o grau de desconforto e reclamações não pode ser explicado diretamente pela magnitude da vibração monitorada sozinha. Em algumas condições de amplitude e frequência, podem surgir reclamações enquanto a vibração medida do corpo inteiro é inferior ao nível de percepção. Os parâmetros, relacionados à fonte de vibração (por exemplo, tempo de trabalho) ou produzidos pela vibração na área de exposição de vibração medidos, complementados pela avaliação desses fenômenos, permitem uma melhor quantificação do grau de incômodo por vibração nos edifícios.

Como a vibração pode entrar no corpo humano de diversas posições e em várias direções (ISO 2631-1, 1997), Pereira (2005) enfatiza que os efeitos individuais destas variáveis devem ser combinados de modo a produzir um procedimento geral para prever a perceptibilidade de vibrações complexas em edificações.

Os parâmetros para análise do conforto humano quanto à exposição de vibração são avaliados tomando-se como base normas, dentre elas destacam-se:

- NBR 8800 (2008) cita algumas orientações para avaliação simplificada da questão da vibração em pisos causada pelas atividades humanas normais. Entretanto, ela recomenda que para uma avaliação precisa, deve ser usada norma ou especificação nacional ou estrangeira ou bibliografia especializada;
- NBR 6118 (2014) faz comentários para garantir um desempenho satisfatório das estruturas que apresentam vibrações e descreve que a frequência natural de vibração da estrutura deve ser 20% maior que a frequência de excitação. São feitas algumas sugestões para que seja executada uma avaliação dinâmica mais apurada, de acordo com estabelecimento em normas internacionais, enquanto não houver norma brasileira específica;
- ISO 2631-1 (1997) determina alguns procedimentos de medida da vibração de corpo inteiro, sendo a ISO 2631-2 (2003) uma orientação para análise sobre a resposta humana à vibração de prédios quanto ao conforto das pessoas;

- ISO 4866 (2010) estabelece princípios para a realização de medições de vibração e processamento de dados com relação à avaliação de efeitos de vibração nas estruturas, sendo relacionada aos danos estruturas.
- ISO 5349-2 (2001) relacionada a medição da vibração transmissível à mão no local de trabalho;
- ISO 8041 (2005) determina as especificações de desempenho e limites de tolerância para instrumentos concebidos para medir os valores de vibração, com o objetivo de avaliar a resposta humana à vibração.

Para avaliação da influência da vibração, as normas internacionais ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2 (2003) utilizam o método do valor quadrado médio (também chamado de valor eficaz ou valor *rms*), da aceleração ponderada (*weighted acceleration*) em função da frequência ponderada. Esse é o método de avaliação básica, porém de difícil interpretação, pois um filtro digital é sugerido com especificações distintas. Em virtude da difícil utilização prática das recomendações normativas, se fez necessário um estudo para analisar níveis aceitáveis de conforto humano quanto à exposição de vibrações, através de uma linguagem de programação numérica, segundo recomendações de normas internacionais, apropriada para avaliar o conforto humano.

Portanto, este estudo de pesquisa teve como objetivo fundamental a avaliação dos limites de vibração toleráveis ao conforto humano, em relação aos valores da resposta dinâmica estrutural, em termos das acelerações, através de programação via *MatLab* desenvolvido para o cálculo da aceleração em função das frequências ponderadas como sugerido pela ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2 (2003), já que a medição e avaliação do grau de severidade da vibração no corpo humano baseiam-se exclusivamente em normas internacionais.

PROCEDIMENTO SEGUNDO ISO 2631

Segundo a ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2 (2003), a vibração deve ser captada na superfície estrutural que suporta o corpo humano, o mais próximo possível do ponto que atinge a pessoa exposta à vibração, medida num período representativo em relação ao comportamento da fonte de excitação.

A ISO 2631-1 (1997) define métodos para quantificar a vibração de corpo inteiro, informando quanto aos efeitos da vibração quanto à saúde, o conforto e a percepção, na faixa de frequência de 0,5 Hz a 80 Hz, e entre 0,1 Hz a 0,5 Hz quanto à sensação de enjoo. Aplicam-se a vibrações tanto na direção vertical como na lateral, visto que a vibração pode ser medida nas três direções ortogonais, nas posições em que as pessoas estão em pé, sentadas ou deitada.

Fatores como a intensidade, frequência, direção e duração da vibração são importantes para determinar a resposta humana à vibração.

A ISO 2631-2 (2003) apresenta um guia que concerne à exposição humana à vibração dos prédios com respeito ao conforto dos ocupantes. Especifica um método para medição e avaliação, incluindo a determinação da medição e o local da medição. A faixa de frequência estudada é de 1 Hz a 80 Hz onde a postura de um ocupante não precisa ser definida, ao contrário da ISO 2631-1 (1997).

Logo no prefácio da ISO 2631-1 (1997), é informado que esta norma não contém limites de exposição à vibrações, apenas que os métodos de avaliação foram definidos de modo a que pudessem ser usados como base para limites que podem ser estudados individualmente. Valores apresentados no anexo C da ISO 2631-1 (1997) (ver tabela 1) são indicações aproximadas de reações prováveis quanto a vibração e ao conforto. Entretanto, esses valores foram determinados, mediante estudos de exposição a vibrações em transportes públicos. Essa norma diz que os ocupantes de edifícios residenciais provavelmente já reclamarão se as magnitudes de vibração estiverem ligeiramente acima do limiar de percepção, aproximadamente $0,015\text{m/s}^2$ o valor de pico.

Tabela 1: Reações devido a vibração, segundo a ISO 2631-1(1997)

Aceleração (m/s^2)	Reação provável
Menor do que 0,315	Confortável
Entre 0,315 e 0,63	Pouco desconfortável
Entre 0,5 e 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 e 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 e 2,5	Muito desconfortável
Superior a 2	Extremamente desconfortável

Fonte: ISO 2631-1 (1997)

A ISO 2631-2 (2003) também não fornece valores aceitáveis de vibração quanto ao conforto, apenas método de análise. O resultado dessa análise é a base para limites que pode ser analisado através de pesquisas relacionadas ao conforto.

Para avaliação da influência da vibração, essas duas normas utilizam o método do valor *rms* da aceleração ponderada, denominado método de avaliação básica. Cada um dos métodos de avaliação especificados nestas normas requer a prévia ponderação em frequência do registo temporal de acelerações. Frequência ponderada fornecida, através de tabelas, ou por meio de funções de transferência, que podem ser aplicadas através de filtros digitais.

Margarido (2013) explica que, quando uma vibração é mensurada numa particular direção, a sua magnitude é medida para todas as frequências dentro do intervalo às quais o homem é sensível. Contudo, as frequências de vibração não têm todas a mesma importância na análise da resposta humana. É onde as normas técnicas entram com a aplicação de filtros de ponderação às vibrações medidas, atribuindo maior peso às frequências as quais o corpo humano se mostra sensível.

De acordo com a ISO 2631-1(1997), o valor *rms* da aceleração ponderada deve ser calculado de acordo com a seguinte equação ou o equivalente no domínio da frequência:

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

Onde, a_w é a aceleração ponderada em m/s^2 (de translação) ou rad/s^2 (de rotação) e T é o tempo de duração da medição da vibração em segundos.

Um fator de pico (*crest factor*), definido como o módulo da razão entre o valor de pico instantâneo da aceleração em função da frequência ponderada e o valor *rms*, é utilizado para investigar se o método de avaliação básica é o adequado para descrever a vibração em relação aos efeitos do corpo humano. Se o valor de pico é menor ou igual a 9, esse método de avaliação básica é, normalmente, suficiente. Quando esse valor de pico ultrapassa o valor limite, por exemplo, devido a choques ocasionais, vibrações transitórias, então a ISO 2631-1 (1997) recomenda outros métodos de avaliação.

Uma outra forma de representação da Eq.(1) é a aceleração em função da frequência ponderada em bandas de um terço de oitavas, como a seguir:

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

Onde, a_w é a aceleração em função das frequências ponderadas, W_i é o fator ponderado para a i-ésima banda de um terço de oitavas e a_i é a aceleração *rms* para a i-ésima banda de um terço de oitavas.

Essa análise em bandas de um terço de oitavas separa as frequências em faixas de igual comprimento. Um filtro digital é sugerido pela ISO 2631, e o projeto desse filtro e o cálculo da Eq. (2) são descritos no tópico a seguir.

PROJETO E VERIFICAÇÃO DO FILTRO

Uma combinação de filtro digital passa-alta com um passa-baixa resultando num filtro digital passa-banda, com características *Butterworth* e inclinação das assíntotas de -12 dB por oitavas, que é um filtro de segunda ordem, é projetado segundo as recomendações da ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2(2003).

Esse filtro permite a passagem do sinal acima de uma frequência de corte (f_{c1}) e abaixo de uma segunda frequência de corte (f_{c2}). Essa frequência de corte (*corner frequency ou cutoff frequency*), fica situada no ponto onde há uma atenuação de 3 dB em relação ao sinal que não está sendo filtrado. Na ISO 2631-1 (1997) posiciona-se a frequência de corte de cada banda limite do filtro estando fora em um terço de oitava da faixa de frequência nominal da banda relevante, ou seja, cada banda limite do filtro compreende 3 bandas de um terço de oitavas.

A definição matemática para as frequências ponderadas são determinadas,

através de funções de transferência. A função de transferência $H_p(p)$ é expressa como o produto de quatro fatores: filtro passa-alta $H_h(p)$, filtro passa-baixa $H_l(p)$, da transição aceleração-velocidade $H_t(p)$ e do passo ascendente $H_s(p)$, ou seja:

$$H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_t(p) \cdot H_s(p) \quad (3)$$

Onde,

$$|H_h(p)| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (4)$$

$$|H_l(p)| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (5)$$

$$|H_t(p)| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}} \quad (6)$$

$$|H_s(p)| = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}} \quad (7)$$

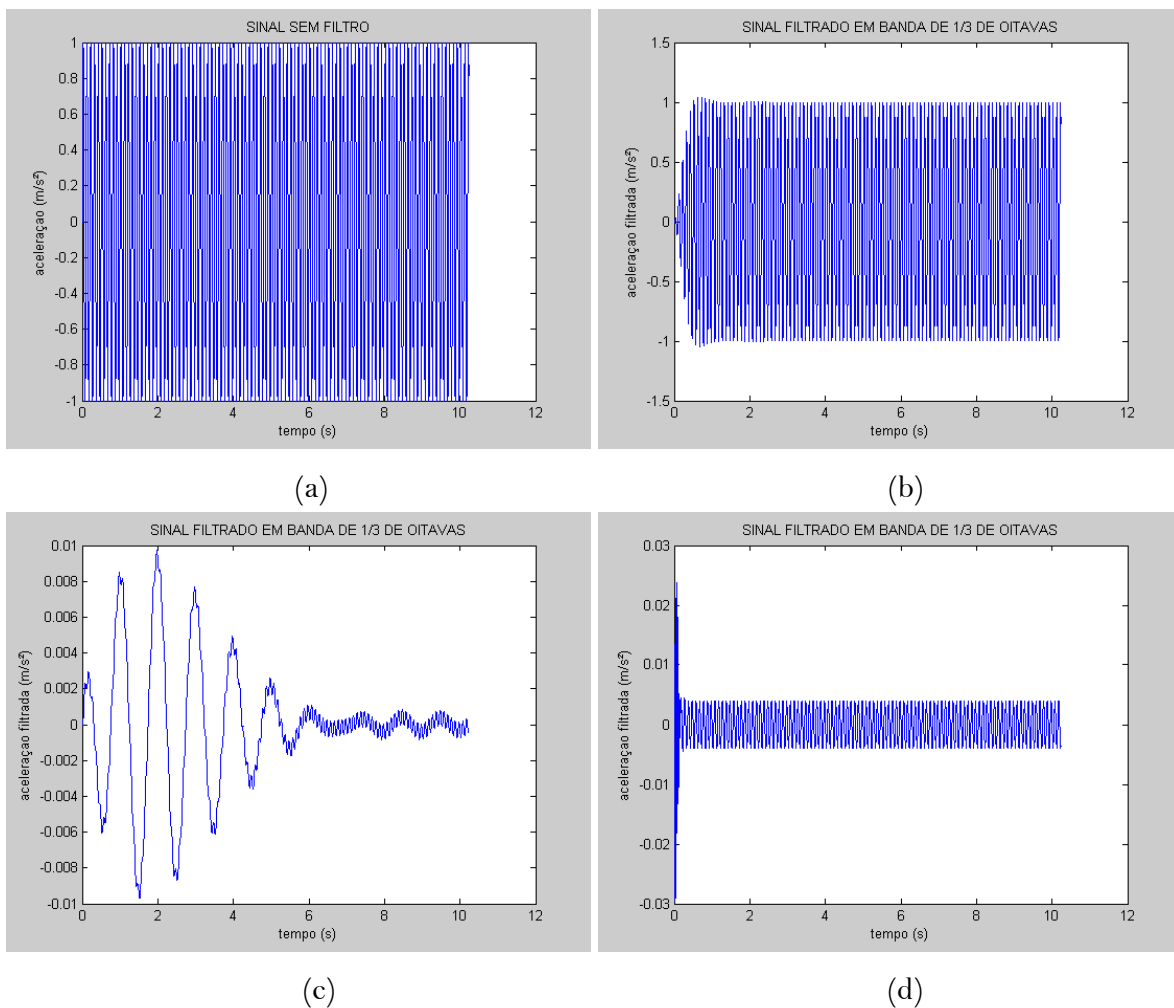
os valores para a frequência ponderada W_p , atribuída pela norma referente ao eixo z (superfície do assento, pessoas em pé) e deitadas.

Para a composição do filtro foram implementados os algoritmos *oct3dsgn* (projeto do filtro em bandas de 1/3 de oitavas), *filter* (função que filtra uma dada sequência de dados usando um filtro digital definido) e *butter* (comando para o projeto de filtro *Butterworth*) na programação numérica via *MatLab* para compor as exigências da ISO 2631, na análise da equação (3) para encontrar a aceleração ponderada da equação (2).

Para verificação e exemplificação do filtro digital projetado, utilizou-se duas maneiras:

1. Uma senoide de amplitude unitária ($A = 1$), frequência de $f = 10$ Hz e um intervalo de tempo $\Delta t = 0,005$ s, $a(t) = A \sin(2\pi f t)$, é filtrada para cada frequência central. Passando o filtro projetado, verifica-se que ao utilizar $f_c = 10$ Hz, todo o sinal é passado (ver fig 1.b), ou seja, a amplitude é a mesma do sinal filtrado, e com outras frequências $f_c = 1$ Hz e $f_c = 40$ Hz) o sinal é quase que totalmente cortado (Ver fig. 1.c e 1.d). Observa-se que há um resíduo nos sinais filtrados, devido ao fato de não existir um projeto de um filtro digital ideal.

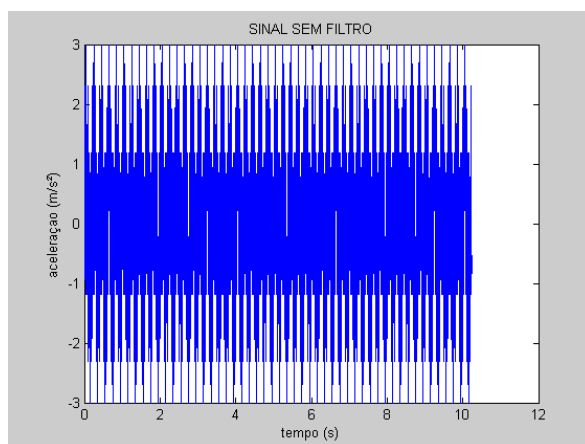
Fig. (1): (a) sinal no domínio do tempo; (b) sinal no domínio do tempo filtrado para frequência central $f_c = 10$ Hz, (c) sinal no domínio do tempo filtrado para frequência central $f_c = 1$ Hz, (d) sinal no domínio do tempo filtrado para frequência central $f_c = 40$ Hz.



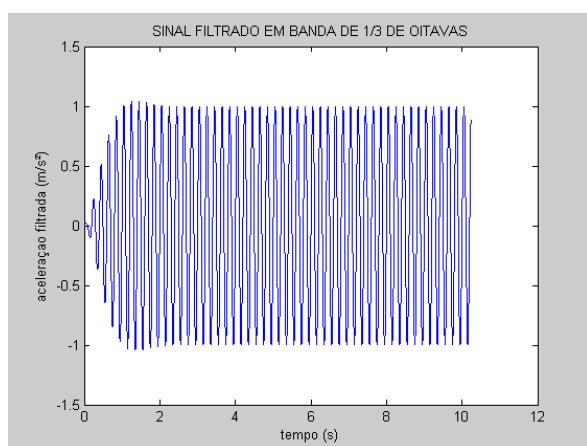
Fonte: Autor

2. Somatório de duas senoides com amplitudes diferentes ($A_1 = 1$ e $A_2 = 2$), frequências diferentes ($f_1 = 5$ Hz e $f_2 = 25$ Hz), e mesmo intervalo de tempo $\Delta t = 0,005$ s, $a(t) = A_1 \text{sen}(2\pi f_1 t) + A_2 \text{sen}(2\pi f_2 t)$. Verifica-se que ao passar o filtro para frequência central $f_c = 5$ Hz, no sinal filtrado encontra-se somente a amplitude $A_1 = 1$ (Ver fig. 2b), e quando trocada a frequência central para $f_c = 25$ Hz, somente a amplitude $A_2 = 2$ é encontrada (Ver fig. 2c).

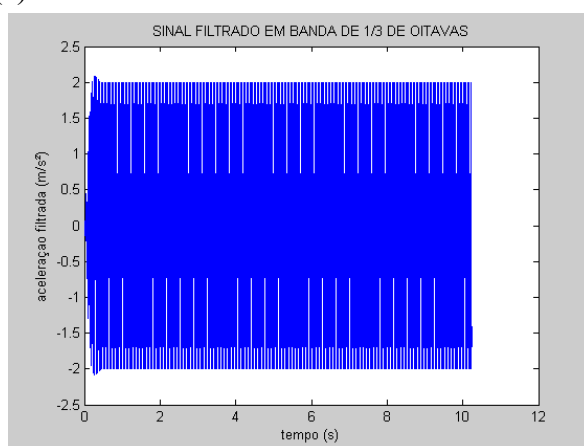
Fig. (2): (a) sinal no domínio do tempo, do somatório das duas senoides; (b) sinal no domínio do tempo filtrado para frequência central $f_c = 5$ Hz; (c) sinal no domínio do tempo filtrado para frequência central $f_c = 25$ Hz.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

Pela análise da filtragem dos dados comparados com o resultado esperado dessas equações, de resultado de fácil interpretação, verifica-se que o programa pode ser utilizado para a análise da vibração de pisos de prédios reais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vibração em estruturas pode ser perceptível pelos seus ocupantes e, de algum modo, afetá-los em diferentes aspectos, particularmente, seu conforto e a qualidade de vida podem se reduzidos. Deste modo, estudos sobre a relação entre a severidade da vibração e o conforto humano levaram a algumas normas a desenvolver métodos de avaliação das vibrações em prédios, dentre as quais destacam-se a norma internacional ISO 2631, sob o título geral vibração mecânica e choque - avaliação da exposição humana à vibração do corpo inteiro: parte 1- Requisitos gerais e parte 2- vibração contínua e induzida por choque em edifícios (1 a 80 Hz). Essa foi a norma analisada nesse estudo.

Para análise dessa norma, um programa de computador na linguagem de programação *MatLab* foi desenvolvido para quantificação de vibração em regime de corpo inteiro quanto ao conforto, com base em seu método de orientação.

As diretrizes normativas implementadas nos algoritmos em linguagem *MatLab* e estas verificadas pela filtragem de dados obtidos de equações conhecidas, resultou em um programa que filtra os registros de acelerações de medidas em circunstâncias reais, para assim proceder a análise do resultado filtrado com os limites aceitáveis para o conforto humano.

Esta é uma útil ferramenta para análise da vibração em pisos de prédios, em virtude da difícil utilização prática das recomendações normativas.

AGRADECIMENTO

As autoras agradecem ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800** - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2014.

BACHMANN, H. et al. **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines**. Birkhäuser Verlag Basel, 1995.

International Standard Organization. **ISO 2631-1**. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. 1997.

International Standard Organization. **ISO 2631-2**. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). 2003.

International Standard Organization. **ISO 4866**. Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures. 2010.

International Standard Organization. **ISO 5349-2**. Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace. 2001.

International Standard Organization. **ISO 8041**. Human response to vibration - Measuring instrumentation. 2005.

GAMA, C. e PANEIRO, G. A incomodidade humana perante vibrações e sua caracterização absoluta e relativa. **10º Congresso Nacional de Geotecnia**, Lisboa. v. III. p. 701-710, 2006.

GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London: Academic Press, 1996

MARGARIDO, D. R. **Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. Dissertação. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

MARJANEN, Y. **Validation and improvement of the ISO 2631-1 (1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment**. Tese. Loughborough University. 2010

PEREIRA, C. **Curvas de conforto humano e percepção para vibrações verticais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, 2005.