



ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE PISOS SUBMETIDOS A EXCITAÇÕES RÍTMICAS – APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA CONFORTO EM EDIFICAÇÕES

M A M Vecci, R H Fakury e P V P Mendonça

Departamento de Engenharia de Estruturas

Universidade Federal de Minas Gerais

30110-060 Belo Horizonte-MG, Brasil

Fax: +55(31) 238-1973

e-mail: vecci@dedalus.lcc.ufmg.br

fakury@dees.ufmg.br

pedro@dees.ufmg.br

RESUMO Ultimamente tem-se observado um aumento da incidência de problemas de vibrações em pisos metálicos de edificações, oriundos de atividades rítmicas tais como danças, eventos culturais e esportivos, entre outros. Tal fato se deve, principalmente, ao desconhecimento do assunto por parte da maioria dos projetistas, que se limitam à análise estática da estrutura, desconsiderando efeitos dinâmicos de excitações advindas de tais carregamentos. Em projetos de pisos para tais atividades, é, em geral, desejável evitar que vibrações excessivas causem desconforto aos usuários, bem como às pessoas que estejam em locais próximos. No presente trabalho, a adequabilidade desses pisos, quanto ao desconforto provocado por vibrações, é avaliada utilizando-se o critério de projeto do National Building Code of Canada (NBC), edição de 1990. Este critério de projeto, em sua versão mais simples, avalia a adequabilidade do piso para excitações rítmicas, a partir de uma análise comparativa entre as frequências naturais da estrutura e uma frequência mínima requerida. Um estudo de caso de uma estrutura real de piso metálico constituído por vigas mistas com laje com forma de aço incorporada é apresentado. Resultados de medições experimentais de vibrações para este caso são comparados com valores numéricos, obtidos com o objetivo de avaliar a qualidade do modelo computacional de análise utilizado.

ABSTRACT Rhythmic activities, such as high-impact dancing, aerobics and walking, are known to cause serious floor vibration problems in steel framed floor systems. A great number of the structural engineers do not take into account the dynamical effects from this type of excitation in their design considerations. In designing this kind of floor system, one must concern with the discomfort that vibrations over an accepted threshold cause to their occupants. The present paper evaluates the suitability of the floor system, using the prescriptions of the National Building Code of Canada (NBC), edition of 1990. The design criterion of the NBC provides guidance to evaluate the suitability of the floor system for rhythmic activities. In its simplified version the NBC compares the floor natural frequencies of vibration with a minimum required value. A case study of a real floor system built up of steel joists supporting a concrete slab poured over a steel deck is presented. A comparison between results from a numerical analysis using the finite element method and the floor first natural frequency measured is made in order to evaluate the accuracy of the computational model adopted.

1 Introdução

A vibração de uma estrutura pode causar desconforto, náusea e ansiedade em pessoas que nela estejam. Vibrações, ainda que leves, podem ser um problema de solução difícil, dada a larga variação de sensibilidade das pessoas aos seus efeitos, e, também, na influência que o ambiente e circunstâncias diversas têm sobre a percepção e as expectativas humanas. As pessoas diferem largamente na tolerância às diversas vibrações, as quais podem causar enjoos semelhantes aos de uma viagem em navio. Tais efeitos variam com as freqüências e as amplitudes das vibrações, bem como com as atividades sendo realizadas. Embora a origem do desconforto proveniente de vibrações seja o movimento, a taxa de variação da sua velocidade – a aceleração – é, em geral, utilizada nos critérios de conforto do ambiente construído, pois ela causa o aparecimento de forças que atuam sobre o corpo humano, e em particular sobre os sensores nos ouvidos, que controlam o equilíbrio. Assim, a severidade do movimento pode ser caracterizada pela aceleração que ele produz. A Norma Internacional ISO 2361⁷ define métodos para a mensuração de vibrações periódicas, aleatórias ou transientes no corpo humano considerado como um todo, e descreve os fatores que se combinam para a determinação dos critérios de tolerância humana às vibrações em edifícios, causadas por fontes diversas. A experiência tem mostrado que o critério para a aceitação de vibrações contínuas ou intermitentes em edifícios está no nível, ou ligeiramente acima, do início da percepção, na maior parte dos espaços físicos ocupados por seres humanos⁸.

Conforme Murray et al.¹, as vibrações em pisos causadas por atividades rítmicas foram mencionadas pela primeira vez pelo National Building Code of Canada (NBC) em 1970, quando se estabeleceu que vibrações devidas a atividades humanas podem representar um problema se a freqüência natural fundamental do piso for menor que 5 Hz. Na edição do NBC de 1975, este valor foi modificado para 10 Hz para atividades muito repetitivas, como danças, pelo fato de ser possível haver ressonância quando a pulsação excitar sistematicamente o segundo ciclo de vibração do piso. Um critério de projeto para excitação rítmica baseada na resposta e no carregamento dinâmicos foi apresentado na edição de 1985 do NBC, e melhorado na edição de 1990².

Este trabalho apresenta, resumidamente, o critério de projeto do NBC de 1990², restrito à análise de freqüências naturais de pisos metálicos. Um modelo numérico para determinação destas freqüências, utilizando-se o Programa Ansys versão 5.4³ é adotado. Apresenta-se, também, um exemplo prático em que o piso metálico é constituído por vigas mistas com laje com forma de aço incorporada, no qual foram realizadas medições experimentais para obtenção das freqüências naturais. Os valores obtidos na simulação numérica são comparados aos obtidos experimentalmente.

2 Critério de Projeto

As freqüências naturais de vibração de sistemas estruturais, f_n , são parâmetros importantes a serem considerados na análise de vibração de pisos submetidos a excitações rítmicas. A norma NBC de 1990² em seu critério simplificado atribui valores de limitantes inferiores para as freqüências naturais da estrutura (Allen⁴). Estes limitantes são apresentados resumidamente a seguir:

$$f_n \geq (f_n)_{req} = f \sqrt{1 + \frac{k}{a_0/g} \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (1)$$

onde,

- $(f_n)_{req}$ é a freqüência natural mínima exigida para prevenir vibrações inaceitáveis a cada freqüência forçada, f ;
- f é a freqüência forçada;
- k é uma constante que depende da atividade desenvolvida;

- α_i é o coeficiente dinâmico;
 a_0/g é o valor limite da relação entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade;
 w_p é o peso efetivo por unidade de área dos participantes distribuído sobre o painel de piso
 w_t é o peso efetivo total por unidade de área distribuído sobre o painel de piso (peso dos participantes mais peso do sistema de piso).

Os valores de f , k , α_i , a_0/g e w_p , para todos os harmônicos que precisam ser avaliados, estão listados na Tabela 1, adaptada de Murray et al.¹, para diversas atividades rítmicas.

Tabela 1 - Valores de f , k , α_i , a_0/g e w_p

Atividade	Frequência Forçada, f (Hz)	Constante k	Coeficiente Dinâmico α_i	Limite de Aceleração a_0/g	Peso dos Particip., w_p (kN/m ²)
Dança e Jantar:					
1o. Harmônico	3,00	1,3	0,50	0,02	0,6
Espetáculo Musical ou Evento Esportivo:					
1o. Harmônico	3,00	1,7	0,25	0,05	1,5
2o. harmônico	5,00	1,7	0,05	0,05	1,5
Aeróbica Apenas:					
1o. Harmônico	2,75	2,0	1,50	0,05	0,2
2o. Harmônico	5,50	2,0	0,60	0,05	0,2
3o. Harmônico	8,25	2,0	0,10	0,05	0,2
Salto com Levantamento de Peso:					
1o. Harmônico	2,75	2,0	1,50	0,02	0,12
2o. Harmônico	5,50	2,0	0,60	0,02	0,12
3o. Harmônico	8,25	2,0	0,10	0,02	0,12

Para o estudo de caso, a ser apresentado no item 3.2, o limitante inferior da frequência natural, calculado pela Equação (1), é de 9,10 Hz, como mostrado a seguir:

- para o 1o. harmônico : $(f_n)_{req} = 2,75 \sqrt{1 + \frac{2}{0,05} \frac{1,5 \times 0,2}{3,7}} = 5,66$ Hz
- para o 2o. harmônico : $(f_n)_{req} = 5,50 \sqrt{1 + \frac{2}{0,05} \frac{0,6 \times 0,2}{3,7}} = 8,33$ Hz
- para o 3o. harmônico : $(f_n)_{req} = 8,25 \sqrt{1 + \frac{2}{0,05} \frac{0,1 \times 0,2}{3,7}} = 9,10$ Hz

3 Determinação Numérica e Experimental das Frequências Naturais

As frequências naturais de pisos mistos podem ser obtidas numericamente pelo método dos elementos finitos. O modelo de análise utilizado, juntamente com resultados numéricos e experimentais para um estudo de caso, é descritos a seguir.

3.1 Modelo Computacional

No modelo de elementos finitos utilizados, as nervuras do piso (vigas de aço) são simuladas por elementos de barras em 3D, onde estão incluídos os efeitos de flexão e de torção. A laje é simulada por elementos de placa. Em ambos os elementos supõem-se que seções planas permanecem planas no estado deformado. O centro de gravidade dos elementos de barra e dos elementos de placa são compatibilizados por meio de conexões rígidas de off-set. Tanto o material de aço, barras e forma da laje, quanto o de concreto, laje, foram supostos trabalharem no regime linear elástico.

3.2 Estudo de Caso

Dentre as destinações previstas para o piso mostrado na Fig. 1, de dimensões 43,7 m x 14,0 m, está a ginástica aeróbica. O piso, deste estudo de caso, é constituído por vigas mistas, e a laje de concreto é construída com forma de aço incorporada com chapa de 0,8 mm, altura total de 150 mm e altura das nervuras de 75 mm. As vigas V_1 a V_4 são constituídas de perfis I 1400 x 350 x 12,5/31,5 x 12,5 nos seus 9,274 m centrais (em cada extremidade, existe redução na altura das vigas, que chegam nos apoios com altura total de 460 mm), a viga V_5 por I 700 x 200 x 8,0/9,5 x 8,0, as vigas V_6 e V_7 por I 600 x 150 x 6,3/6,3 x 6,3, as vigas V_8 e V_{12} por I 250 x 130 x 6,3/6,3 x 4,75, a viga V_9 por I 400 x 200 x 6,3/8,0 x 4,75 e as vigas V_{10} e V_{11} por I 400 x 150 x 6,3/6,3 x 4,75. Os perfis metálicos possuem aço com limite de escoamento de 300 MPa. O concreto da laje possui resistência característica à compressão de 20 MPa e módulo de elasticidade de 23 479 MPa. O peso próprio do piso por unidade de área é de 3,5 kN/m² e o peso dos participantes por unidade de área é de 0,2 kN/m² (Tabela 1). O piso se apoia em muros rígidos de concreto. As ligações entre as vigas são flexíveis.

Deve-se destacar que no piso estudado, por simplicidade, considerou-se apenas o concreto situado acima do topo das nervuras da forma. Além disso, de acordo com Murray et al.¹, quando se usam estas lajes, o concreto situado sobre as formas se torna mais rígido sob carregamento dinâmico do que sob carregamento estático. Por esta razão, obedecendo a recomendação deste autor, o módulo de elasticidade do concreto foi tomado igual a 1,35 vezes o valor convencional de 23 479 MPa. Para as vigas e a forma de aço da laje, o valor do módulo de elasticidade adotado foi de 205 000 MPa.

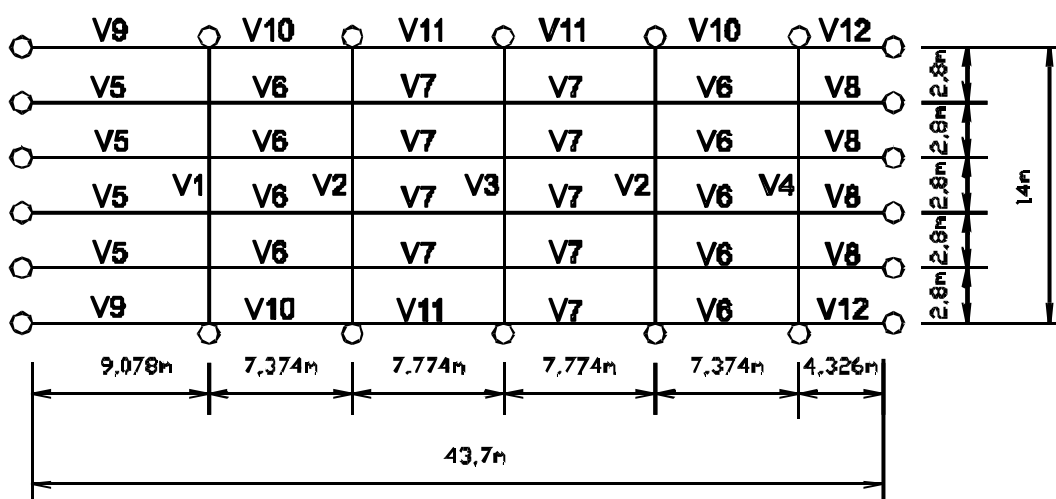


Fig. 1 - Piso para Aeróbica

Na solução por elementos finitos deste piso, foram utilizados 1830 nós, 505 elementos de barra e 1740 elementos de placa, resultando em um total de 10836 graus de liberdade. Este modelo foi rodado em um computador DELL Optiplex 266MHz, com 64MB de RAM e 4GB de disco rígido. Foram gastos aproximadamente 30 segundos de CPU para a extração das dez primeiras frequências naturais utilizando a estratégia da iteração por subespaço. As quatro primeiras frequências naturais obtidas são iguais a 10,31 Hz, 10,68 Hz, 10,78 Hz e 10,86 Hz. As Figs. 2 e

3 mostram os modos correspondentes às duas primeiras freqüências naturais de vibração do piso.



Fig. 2 - Modo de Vibração Correspondente à Primeira Freqüência Natural (10,31 Hz)



Fig. 3 - Modo de Vibração Correspondente à Segunda Freqüência Natural (10,68 Hz)

3.3 Resultados Experimentais

As freqüências naturais foram obtidas experimentalmente utilizando-se o analisador de freqüências Hewlett Packard modelo 3569A, número de série 3442A00433 ao qual estava acoplado um acelerômetro HP PCBI-353B34, número de série 43934. O piso foi excitado por cargas de impacto, seguidas de vibração livre. As freqüências naturais foram medidas a partir de um resultado médio de 12 excitações de impacto. Utilizando-se este procedimento, obteve-se a freqüência natural fundamental de 9,5 Hz para o piso, a qual mostrou-se bastante próxima dos valores obtidos numericamente.

Nas simulações numéricas, foi possível determinar diversas freqüências naturais e seus respectivos modos de vibração, figuras 2 e 3. Com o procedimento experimental adotado, mediu-se a freqüência natural fundamental do piso, do estudo de caso apresentado. Os resultados numéricos e experimentais estão listados na tabela 2 a seguir:

Tab. 2 Quadro comparativo de freqüências naturais

Freqüência Natural	Res. Numéricos (Hz)	Res. Experimental (Hz)
Primeira freqüência	10,31	
Segunda freqüência	10,68	9.5
Terceira freqüência	10,78	
Quarta freqüência	10,86	

Pelos resultados apresentados, pode-se observar uma boa aproximação entre os valores numéricos e aquele encontrado experimentalmente, o que valida o procedimento de simulação numérica utilizado.

Pelo critério adotado, o piso analisado satisfaz as exigências de conforto, uma vez que os valores das frequências naturais obtidos, tanto na análise numérica quanto no procedimento experimental, superam o valor mínimo, de 9,10 Hz, exigido.

4 Conclusões

Pisos mistos, com formas de aço incorporadas, submetidos a atividades rítmicas, foram analisados quanto à adequabilidade dos mesmos ao conforto humano. Adotou-se o critério de projeto simplificado da norma canadense NBC, o qual prevê limitantes inferiores para as frequências naturais de vibração do sistema estrutural.

Para utilizar este critério, foi necessária a obtenção das frequências naturais de vibração do piso. Neste trabalho, as frequências naturais foram obtidas tanto numericamente, pelo método dos elementos finitos, quanto experimentalmente, utilizando-se acelerômetro e analisador de frequências. Os resultados numéricos foram bastante próximos do valor experimental medido em campo, para o estudo de caso considerado. Estes valores estão acima do limitante inferior imposto pelo critério de conforto adotado.

Portanto, conclui-se que a simulação numérica conduziu a resultados bastante próximos dos reais, constituindo um procedimento recomendado para projetos de pisos similares sujeitos a excitações rítmicas.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à União Brasileira de Educação e Ensino pelo suporte financeiro e pela autorização de publicação de dados utilizados na análise do piso da laje do complexo poliesportivo-teatral do colégio Dom Silvério, em Belo Horizonte, com os quais foi possível a realização deste trabalho.

6 Referências Bibliográficas

- [1] Murray, T. M., Allen, D. E. and Ungar E. E. (1997): Floor Vibrations Due to Human Activity, *11th Steel Design Guide Series*, AISC, Chicago.
- [2] National Research Council of Canada (1990): *National Building Code of Canada*, Supplement-Commentary A, Serviceability Criteria for Deflections and Vibrations, Ottawa.
- [3] *Ansys User's Manual* (1997): version 5.4.
- [4] Allen, D. E. (1990): Floor Vibrations from Aerobics, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 5.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986): *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*, NBR 8800, Rio de Janeiro.
- [6] Allen, D. E. (1990): Building Vibration From Human Activities, *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 12, No. 6.
- [7] International Organization for Standardization (1994): *Guide to the Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration and Shock— Part 1 and 2*, ISO 2631-1/2, Geneva.
- [8] Harris, Cyril M. (1995): *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill.