

Estudo do conforto humano em pisos mistos (aço-concreto)

(Composite floor human comfort study (steel-concrete))

Antonio Vicente de Almeida Mello

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PGECIV. Faculdade de Engenharia - UERJ
E-mail: estruturasmello@gmail.com

José Guilherme Santos da Silva

Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia - UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: jgss@uerj.br

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Departamento de Estruturas e Fundações. Faculdade de Engenharia - UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mails: seb.andrade@uol.com.br vellasco@uerj.br lucianolima@uerj.br

Resumo

A crescente competitividade do mercado da engenharia civil tem induzido projetistas de estruturas a desenvolverem sistemas estruturais compostos por peças mais leves e com menor custo final. A consequência direta dessa filosofia de projeto foi o aumento considerável dos problemas de vibrações em pisos. Assim sendo, o principal objetivo desse trabalho é o de desenvolver uma metodologia de análise para avaliação do conforto humano em pisos de edificações, com base em modelos de carregamento representativos do caminhar das pessoas. Os modelos estruturais foram compostos por pisos mistos com vão variando de 5,0m a 10,0m. Um estudo paramétrico extenso foi desenvolvido e os resultados, com base nos valores das acelerações de pico, foram comparados com valores-limites propostos por diversos autores e normas de projeto. Os resultados encontrados indicaram que a ação do caminhar das pessoas pode vir a gerar níveis elevados de vibração sobre os pisos, não satisfazendo os critérios de conforto humano.

Palavras-chave: Pisos mistos, estruturas de aço, dinâmica estrutural, modelagem computacional.

Abstract

The competitive trends of the civil engineering market have long been forcing structural engineers to develop minimum weight and labor cost solutions. A direct consequence of this new design trend is a considerable increase in floor vibration problems. The main objective of this paper is to present an analysis methodology to evaluate the composite floor's human comfort criteria, considering a more realistic loading model incorporating the dynamic effects induced by people walking. The investigated models were based on floors, with main spans varying from 5m to 10m. Based on an extensive parametric study the composite floors dynamic response was obtained and compared to limiting values proposed by several authors and design standards. The results of the present study indicated that the walking loads could induce the composite floors to reach significant vibration levels implying and violating the human comfort criteria.

Keywords: Composite floor, steel structures, structural dynamics, computational modeling.

1. Introdução

Atualmente, as tendências arquitetônicas e as exigências de mercado têm obrigado os engenheiros estruturais a utilizar soluções cada vez mais arrojadas, que exigem grande experiência e conhecimento, no que diz respeito à utilização de novos materiais e tecnologias. Essas novas concepções estruturais vêm orientando a evolução de sistemas estruturais de rápida execução com peças de menor peso próprio, com grandes vãos, e com um mínimo de elementos verticais, permitindo, assim, uma maior flexibilidade na adequação de ambientes. Entretanto esses pré-requisitos requerem soluções estruturais que usem materiais menos deformáveis em tipologias adequadas à forma arquitetônica, o que só é possível, a partir de avanços das investigações científicas, tanto no campo dos materiais, como na análise estrutural.

É conveniente ressaltar, também, que o progresso, na engenharia estrutural, sempre esteve intimamente ligado a acréscimos significativos da resistência característica dos materiais. Esse fato reduz as peças estruturais e, muitas vezes, gera elementos demasiadamente esbeltos e leves, porém com baixos valores de frequências naturais. Esses novos elementos conduzem a sistemas estruturais de pisos com frequências naturais cada vez mais próximas da faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas, fato que os torna vulneráveis aos efeitos de vibrações induzidas por pequenos impactos, como é o caso do caminhar de pessoas sobre o piso, e por excitações mais intensas, como é o caso das ações dinâmicas rítmicas. Essas vibrações resultam em desconforto e, em casos menos comuns, até mesmo no comprometimento da estrutura. Uma consequência direta dessa tendência é o aumento considerável dos problemas estruturais conforme relatado por: Bachmann e Ammann (1987), Chen (1999), Faisca (2003), Mello (2005), Mello et al. (2005), Moreira (2004), Murray et al. (1997), Ohlsson (1982) e Varela (2004).

Quando os critérios de resistência e estabilidade desse tipo de sistema estrutural (pisos mistos aço-concreto) são avaliados, nota-se que os estados-limites últimos não são ultrapassados. Entretanto os estados-limites de utilização, associados às vibrações excessivas, devem ser analisados de forma mais cuidadosa, buscando alternativas viáveis para minimizar os efeitos de vibrações induzidas por atividades humanas.

Novos sistemas estruturais de pisos têm sido elaborados e o conhecimento do seu desempenho frente a carregamentos dinâmicos nocivos ao conforto humano e à estrutura torna-se imperativo. Vários estudos sob este foco vem sendo realizados nos últimos anos (Bachmann & Ammann, 1987), (Chen, 1999), (Faisca, 2003), (Mello, 2005), (Mello et al. 2005), (Moreira, 2004), (Murray et al., 1997), (Ohlsson, 1982), (Varela, 2004).

Esse trabalho investiga o comportamento dinâmico de uma série de modelos estruturais associados a pisos mistos usados por Murray et al. (1997), considerando a rigidez das colunas de aço, quando sujeitos a ações dinâmicas induzidas por seres humanos. Inicialmente, são obtidos as frequências naturais e os modos de vibração dos modelos para, em seguida, obter-se a resposta dinâmica dos pisos em termos de uma análise crítica de suas acelerações máximas (pico).

Os resultados numéricos são obtidos a partir do desenvolvimento de um modelo computacional, via método dos elementos finitos, com o emprego do programa ANSYS (ANSYS, 1998). Os resultados são comparados com a literatura técnica sobre o assunto (Murray et al., 1997) (ISO 2631-2, 1989). Os resultados indicaram, claramente, que vários pisos analisados apresentaram problemas referentes a conforto humano, quando submetidos ao caminhar de pessoas.

2. Vibração de pisos devido às atividades humanas

As vibrações induzidas por atividades humanas, tais como andar, pular, dançar, entre outras atividades físicas, têm sido consideradas na análise dinâmica de pisos de edificações, de forma cada vez mais elaborada. As características representativas das cargas geradas durante a execução dessas atividades são de definição complexa e se encontram associadas às particularidades corporais de cada indivíduo e a maneira como realizam um determinado tipo de atividade. Tais características peculiares podem incluir idade, peso, sexo, tipo de calçado, etc. Isto pode ser verificado no caso específico do movimento, onde cada indivíduo tende a assumir um tipo de marcha e de velocidade mais condizente com a sua estrutura particular.

De modo geral, a comunidade científica tem ciência de que é bastante complexo o processo de modelagem das cargas dinâmicas induzidas por seres humanos, pois os carregamentos gerados envolvem aspectos individuais que são bastante distintos. Desse modo, na tentativa de representação do carregamento dinâmico gerado por atividades humanas sobre painéis de pisos, dois modelos de carregamento foram idealizados com o intuito de representar a ação dinâmica gerada durante o caminhar de pessoas para avaliar, de forma conveniente, a resposta dinâmica dos pisos.

2.1 Modelo de Carregamento I

O primeiro modelo de carregamento considerado nessa investigação (Mello, 2005), (Mello et al., 2005), (Murray et al., 1997) é composto pela parcela estática correspondente ao peso do pedestre e uma combinação de harmônicos associados à excitação dinâmica. A força dinâmica que representa o caminhar humano é obtida através da equação (1). A Figura 1 apresenta uma função de carregamento dinâmico asso-

ciada a uma caminhada com frequência do passo $f_p = 1,856$ Hz.

$$F(t) = P[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f_p t + \Phi_i)] \quad (1)$$

Onde:

P: peso do ser humano tomado igual a 700 N.

α_i : coeficiente dinâmico para a componente da força harmônica i .

i : múltiplo do harmônico da frequência do passo.

f_p : frequência do passo ou frequência da excitação.

t : tempo.

Φ_i : ângulo de fase do harmônico i .

Esse modelo de carregamento objetiva simular, de maneira mais realista, a ação dinâmica gerada durante a caminhada. Nessa situação, a posição do ser humano é alterada ao longo do tempo. Portanto a função de tempo gerada para representar a caminhada do ser humano apresenta uma descrição temporal e espacial da carga, como mostrado na Figura 1.

Para a representação da variação espacial da carga, a ação dinâmica será aplicada sobre o modelo estrutural de um piso genérico, diretamente no nó de um determinado elemento finito, durante certo intervalo de tempo. Todavia, para um melhor entendimento desse modelo, faz-se necessário estudar outros parâmetros neste tipo de modelagem como a distância e a velocidade do passo. Esses parâmetros estão associados à frequência do passo e são ilustrados na Tabela 1 (Bachmann & Ammann, 1987). A excitação dinâmica associada ao caminhar do ser humano sobre o piso é obtida mediante o emprego da equação (1), Figura 1, e quatro harmônicos são empregados para gerar a função de carregamento. (Tabela 2).

Considera-se, como exemplo, um piso misto com frequência fundamental de 7,424 Hz e uma frequência do passo igual a 1,856 Hz. Nesse caso, a condição de ressonância do modelo estrutural é

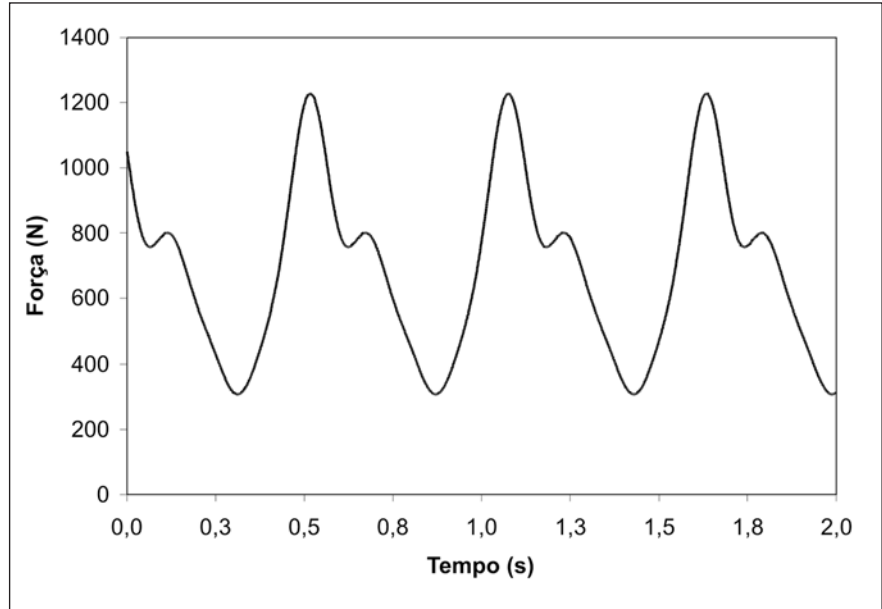


Figura 1 - Função de carregamento dinâmico: $f_p = 1,856$ Hz.

Tabela 1 - Características da caminhada humana (Bachmann & Ammann, 1987).

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do passo (m)	Frequência do passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,6	1,7
Caminhada normal	1,5	0,75	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,0	2,3

Tabela 2 - Frequência da excitação (f_p) e coeficiente dinâmico (α_i) (Murray et al., 1997).

Harmônico	Ser Humano Caminhando		
	f_p (Hz)	α_i	Φ
1	1,6 - 2,2	0,5	0
2	3,2 - 4,4	0,2	$\pi/2$
3	4,8 - 6,6	0,1	$\pi/2$
4	6,4 - 8,8	0,05	$\pi/2$

obtida com a aplicação dos quatro harmônicos representativos do caminhar ($4 \times 1,856$ Hz = 7,424 Hz) e a parcela estática devido ao peso do pedestre, de acordo com a Equação (1) e Figura 1.

A metodologia de análise considera que a distância do passo, associada à frequência do passo de 1,856 Hz, é igual

a 0,69 m, Tabela 1. O período do passo é igual a $1/f_p = 1/1,856$ Hz = 0,5388 s, correspondente a uma distância de 0,69 m. Adotando-se uma malha de elementos finitos com elementos com um comprimento de 0,23 m, Figura 2, para representar um passo humano sobre o piso, são necessárias três cargas. Desse modo,

cada uma dessas ações dinâmicas P1, P2 e P3 devem ser aplicadas durante $0,5388/3 = 0,1796$ s, Figura 2.

Convém ressaltar que a força dinâmica não é aplicada simultaneamente. A carga P1 é aplicada durante 0,1796 s e, no fim deste período, P1 passa a assumir um valor nulo e, logo em seguida, a carga P2 é aplicada por 0,1796 s. Esse processo ocorre sucessivamente, ao longo do tempo, e a força dinâmica associada ao caminhar do ser humano é aplicada ao longo de todo o piso. (Figura 2).

2.2 Modelo de Carregamento II

Nesse modelo de carregamento, considera-se a mesma estratégia de modelagem utilizada no caso anterior (modelo de carregamento I). Entretanto o modelo de carregamento II incorpora, também, o efeito do pico transiente representativo do impacto do calcanhar humano (Varela, 2004).

Com base em estudos experimentais que permitiram registrar a reação total de um piso, gerada ao longo do tempo, durante uma caminhada sobre plataformas rígidas (Ohlsson, 1982), Varela (2004) propõe expressões matemáticas que representam a magnitude dessa reação, como apresentado nas Equações (2) a (5).

$$F(t) = \begin{cases} \left(\frac{f_{mi} F_m - P}{0,04 T_p} \right) t + P; \text{ se } 0 \leq t < 0,04 T_p \\ f_{mi} F_m \left[\frac{C_1 (t - 0,04 T_p)}{0,02 T_p} + 1 \right]; \text{ se } 0,04 T_p \leq t < 0,06 T_p \\ F_m; \text{ se } 0,06 T_p \leq t < 0,15 T_p \\ P + \sum_{i=1}^{nh} P \alpha \text{ sen} [2 \pi i f_c (t + 0,1 T_p) + \phi_i]; \text{ se } 0,15 T_p \leq t < 0,90 T_p \\ 10(P - C_2) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) + P; \text{ se } 0,90 T_p \leq t < T_p \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

F_m : valor máximo da série de Fourier, dado pela Eq. (3).

f_{mi} : fator de majoração do impacto do calcanhar ($f_{mi} = 1,12$).

T_p : período do passo.

C_1 : coeficiente dado pela Eq. (4).

C_2 : coeficiente dado pela Eq. (5).

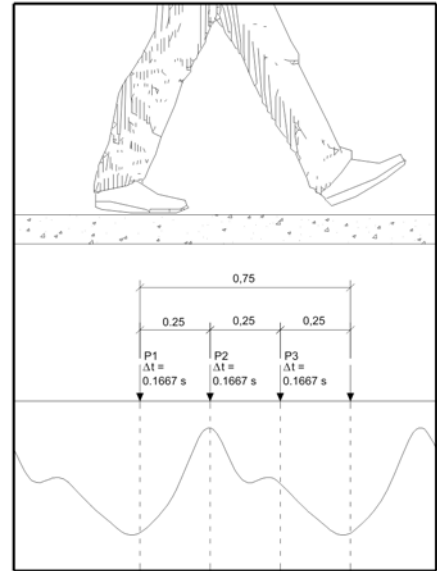


Figura 2 - Simulação do passo de um ser humano durante a caminhada sobre um piso genérico ($f_p = 1,856$ Hz).

$$F_m = P \left(1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \right) \quad (3)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{f_{mi}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$C_2 = \begin{cases} P(1 - \alpha_2); \text{ se } nh = 3 \\ P(1 - \alpha_2 + \alpha_4); \text{ se } nh = 4 \end{cases} \quad (5)$$

De acordo com Varela (2004), a função matemática proposta, Equações (2) a (5), utilizada para representar a carga dinâmica produzida por uma pessoa caminhando sobre um piso, não é simulada simplesmente por uma série de Fourier, pois essas equações incorporam, também, em sua formulação, o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso. (Figura 3).

Na presente investigação, adota-se, para o fator de amplificação do impacto do calcanhar humano, o valor de 1,12 ($f_{mi} = 1,12$), (Varela, 2004). Todavia deve-se ressaltar que esse valor de 1,12 varia de pessoa para pessoa e que esse coeficiente merece um estudo mais aprofundado. A Figura 4 apresenta o gráfico da função de carregamento para uma pessoa caminhando com uma frequência de passo igual a 1,856 Hz.

3. Modelo estrutural investigado

O modelo estrutural estudado consiste em um piso misto (aço-concreto), Murray et al. (1997), onde a influência da rigidez real das colunas de aço é considerada na análise. As colunas de aço apresentam altura de 5m com características descritas na Tabela 3.

No que tange à análise paramétrica, ressalta-se que o sistema estrutural adotado para o piso é o mesmo em todos os casos. Contudo o vão denominado de “ L_j ” é modificado (ver Figura 5) com variação de 5 m até 10 m (de 0,5 m em 0,5 m). Já o vão denominado de “ L_g ” é mantido constante e igual a 9 m, como mostrado na Figura 5. O espaçamento entre as vigas secundárias também é mantido constante e igual a 3 m (Figura 7). As vigas principais e secundárias são formadas por perfis soldados da série VS, de acordo com a Tabela 3.

Os perfis metálicos do tipo “T” são constituídos por um aço com limite de escoamento de 300 MPa. Para as vigas de aço, foi considerado um módulo de elasticidade igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e massa específica igual a 7850 Kg/m³. A laje de concreto possui espessura de 0,15 m, resistência característica à compressão de 30 MPa, módulo de elasticidade igual a 24 GPa, coeficiente de Poisson de 0,1 e massa específica igual a 2550 kg/m³. As Figuras 5 e 6 apresentam o modelo estrutural usado nesse estudo, bem como a seção transversal genérica do piso, respectivamente.

4. Modelo em elementos finitos

Os modelos computacionais foram gerados usando-se técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, com o programa ANSYS (ANSYS, 1998). No presente modelo, as vigas e as colunas são simuladas por elementos finitos tridimensionais, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. A laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca,

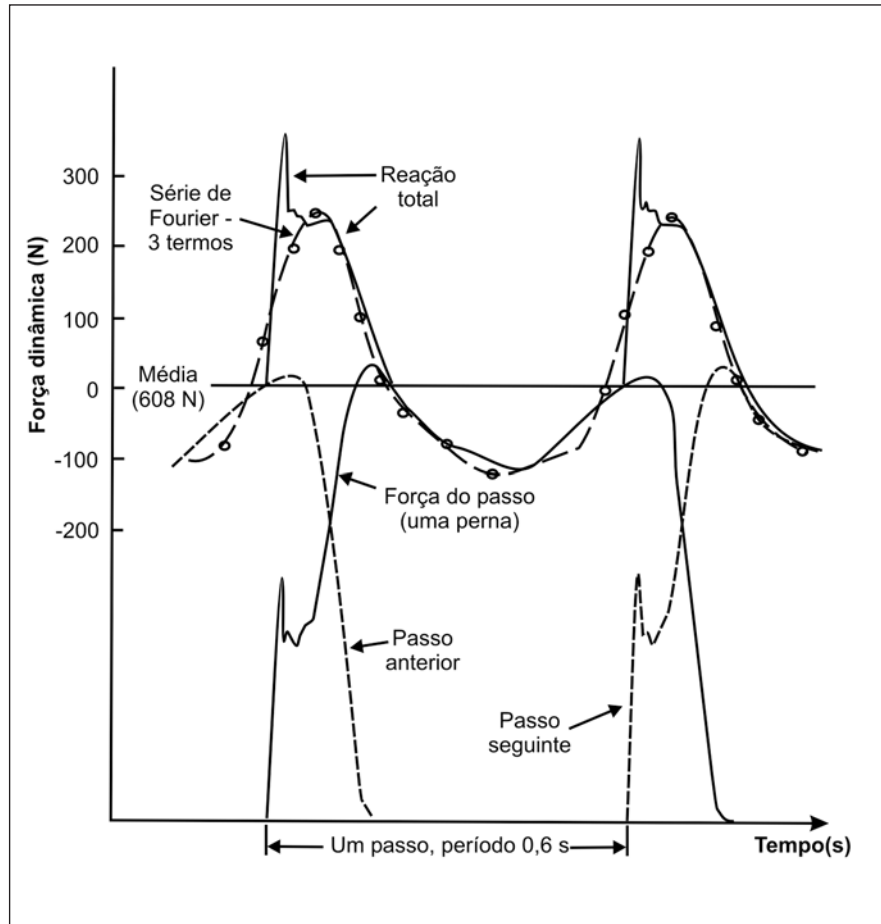


Figura 3 - Força de contato de um passo e reação do piso (Varela, 2004).

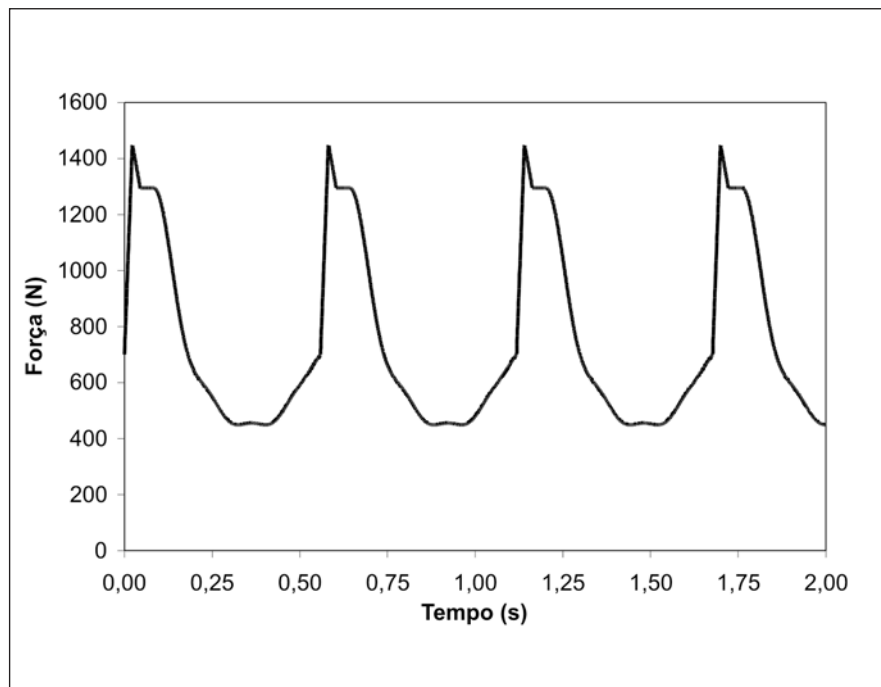


Figura 4 - Função de carregamento dinâmico: $f_p = 1,856$ Hz.

Tabela 3 - Características geométricas (em mm) do piso misto.

Tipo de perfil	Altura (d)	Largura da Mesa (b_f)	Espessura da Mesa Superior (t_f)	Espessura da Mesa Inferior (t_i)	Espessura da Alma (t_w)
Viga: I 550 x 64	550	250	9,5	9,5	6,3
Viga: I 450 x 51	450	200	9,5	9,5	6,3
Coluna: I 300 x 62	300	300	9,5	9,5	8,0

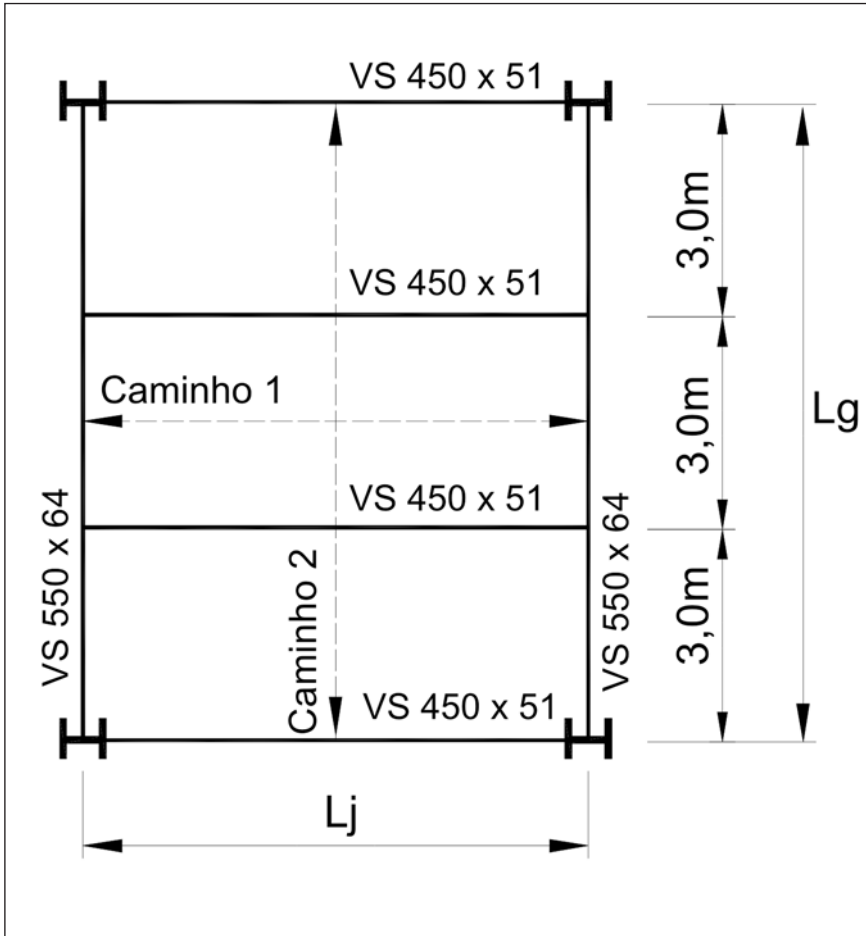


Figura 5 - Modelo estrutural genérico dos pisos.

como apresentado na Figura 7. Em ambos os elementos, considera-se que as seções permanecem planas no estado deformado.

São utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “off-set”, de forma a garantir-se a compatibilidade de deformações dos nós dos elementos de placa e dos elementos de viga tridimensionais, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto. Considera-se, ainda, que os materiais empregados nas estruturas em estudo, aço e concreto, trabalham em regime linear-elástico.

5. Análise dinâmica

A resposta dinâmica dos pisos mistos é determinada mediante a obtenção das frequências naturais, deslocamentos, velocidades e acelerações para cada modelo estrutural. Os resultados são obtidos através de uma análise paramétrica extensa, com base no método dos

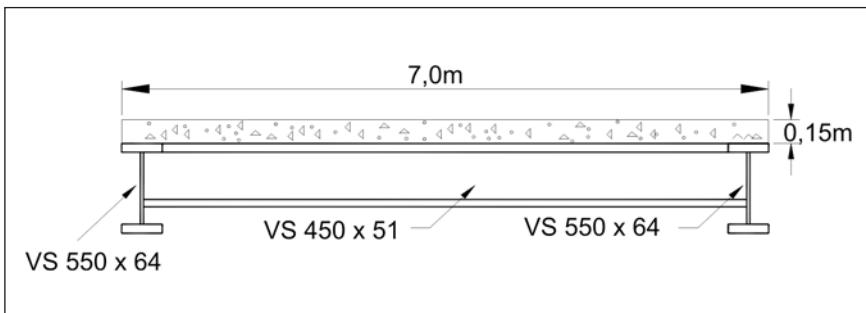


Figura 6 - Seção transversal genérica do piso em estudo.

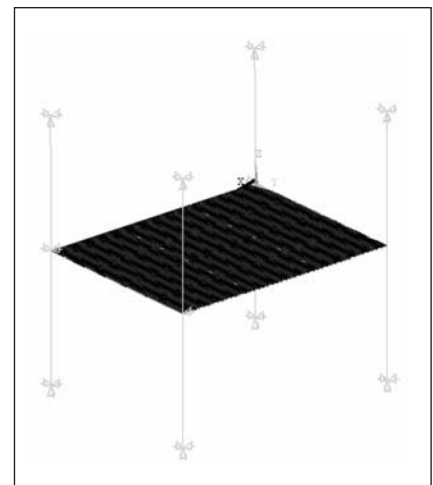


Figura 7 - Modelo em elementos finitos do piso com as colunas.

elementos finitos, utilizando o programa ANSYS (ANSYS, 1998).

Com o objetivo de se verificarem, quantitativa e qualitativamente, os resultados, foram obtidos os valores das acelerações máximas dos modelos (pico) para comparação com os critérios associados ao conforto humano presentes em recomendações técnicas disponíveis sobre o assunto, (Murray et al., 1997), (ISO 2631/2, 1989).

5.1 Análise das frequências naturais e dos modos de vibração

Inicialmente, com base na simulação numérica realizada, são determinados as frequências naturais e os modos de vibração referentes ao piso com vão “ L_j ” de 7m.

Pode-se perceber, a partir dos resultados fornecidos pela Tabela 4, que existe uma boa concordância entre o valor da frequência fundamental do piso, $f_{01} = 8,00$ Hz, obtida por meio do modelo desenvolvido, via método dos elementos finitos (MEF), e aquele calculado de acordo com a literatura técnica (Murray et al., 1997), $f_{01} = 7,85$ Hz. Essas observações, no tocante às frequências naturais, fornecem um bom indicativo de coerência, no que diz respeito ao modelo numérico aqui apresentado e, aos resultados e conclusões obtidos ao longo da análise.

Em seguida, a Figura 8 apresenta os modos de vibração correspondentes às quatro primeiras frequências naturais do modelo de piso com $L_j = 7$ m. A Tabela 5 apresenta as frequências naturais para os demais pisos analisados, de acordo com a variação do vão mencionada anteriormente.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, o valor da frequência fundamental dos pisos diminui, sensivelmente, com o aumento do vão das vigas, como era de se esperar. Por outro lado, convém ressaltar que a redução na frequência fundamental dos modelos, com o aumento do vão, torna esses pi-

Tabela 4 - Frequências naturais do modelo de piso com $L_j = 7,0$ m.

Frequências naturais obtidas com base no MEF - f_{0i} (Hz)		Frequência fundamental (Murray et al., 1997) - f_{01} (Hz)
f_{01}	8,00	7,85
f_{02}	15,25	
f_{03}	15,70	
f_{04}	19,90	

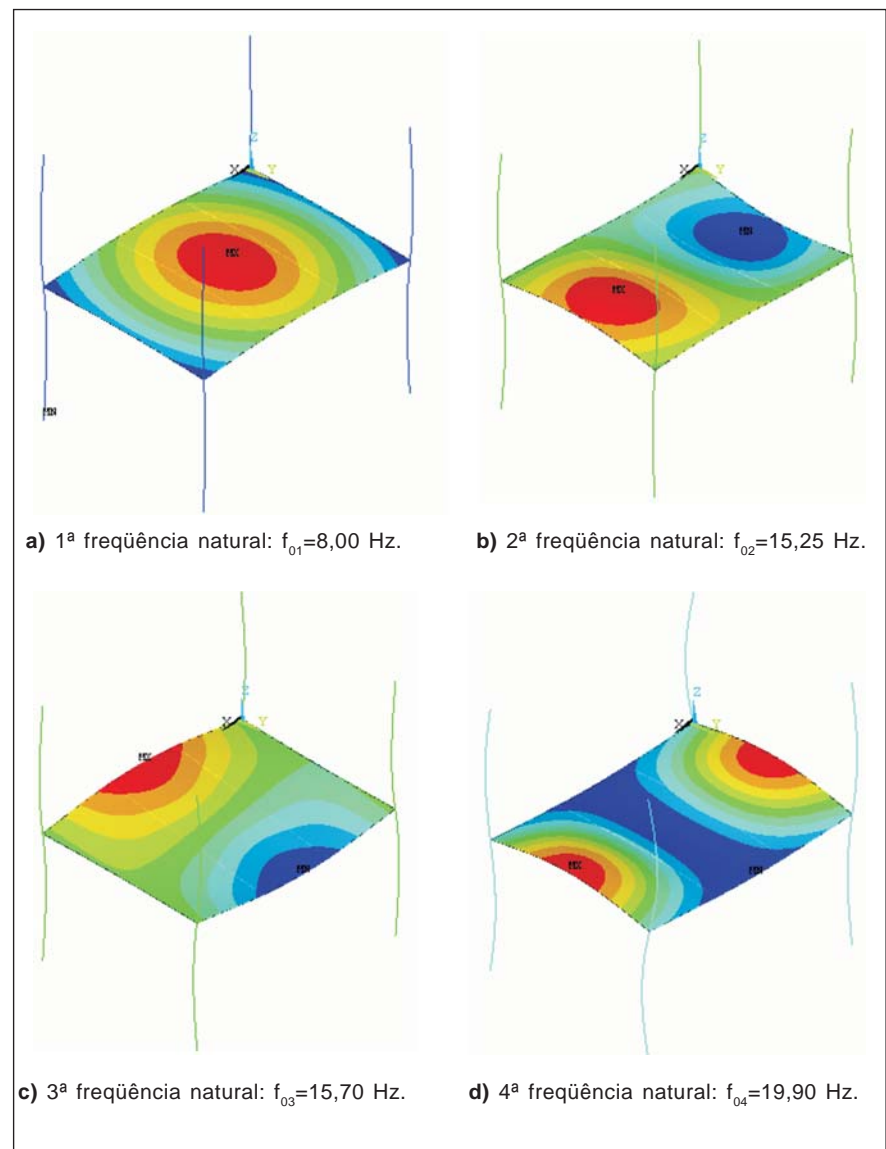


Figura 8 - Modos de vibração.

soos ainda mais suscetíveis às excitações dinâmicas induzidas pelos seres humanos.

5.2 Avaliação das acelerações máximas

Esse item objetiva verificar a adequabilidade dos pisos em estudo, quando submetidos ao caminhar humano, no que tange ao desconforto relacionado a vibrações excessivas. Os dois modelos de carregamento descritos anteriormente foram aplicados como excitações dinâmicas sobre as lajes de concreto dos pisos mistos, objetivando determinar os picos de aceleração, para cada modelo estrutural analisado. Assim sendo, são determinadas as acelerações máximas dos modelos (picos), como apresentado na Tabela 6.

Nessa tabela, as acelerações máximas dos pisos são comparadas com os valores-limites propostos por inúmeros autores (Murray et al., 1997), (ISO 2631-2, 1989). Ressalta-se que, na presente investigação, foi considerado um coeficiente de amortecimento para os modelos estruturais de 3% ($\xi=0,03$). Nessa investigação, considera-se que o peso de um ser humano é igual a 700N (Murray et al., 1997).

No que tange à comparação dos valores das acelerações de pico dos pisos mistos, Tabela 6, calculados com base nos modelos de carregamento apresentados nesse trabalho (modelo de carregamento I), Mello (2005), Mello et al. (2005), Murray et al. (1997) e modelo de carregamento II, Varela (2004)), equações (1) a (5), em relação àqueles obtidos a partir das expressões simplificadas do AISC (Murray et al., 1997), pode-se perceber que o guia prático em questão fornece valores para as acelerações bem inferiores, quando comparados com aqueles obtidos mediante a utilização dos modelos de carregamento I e II.

Esse fato pode ser um indicativo de um critério de projeto que se constitui em uma ação contra a segurança e deve servir de alerta para os projetistas

Tabela 5 - Frequências naturais dos pisos com a variação do vão.

Vão (m)	Frequências naturais dos pisos com colunas (Hz)			
	f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}
L_j				
5,00	10,27	19,08	23,25	28,60
5,50	9,65	18,05	20,81	26,21
6,00	9,08	17,16	18,70	23,88
6,50	8,53	16,37	16,87	21,77
7,00	8,00	15,25	15,70	19,90
7,50	7,50	13,89	15,03	18,32
8,00	7,06	12,69	14,44	16,94
8,50	6,62	11,64	13,89	15,75
9,00	6,21	10,71	13,37	14,73
9,50	5,82	9,90	12,88	13,84
10,00	5,45	9,18	12,41	13,09

Tabela 6 - Acelerações máximas dos pisos.

L_j (m)	Modelo I Caminho 1 (m/s ²)	Modelo I Caminho 2 (m/s ²)	Modelo II Caminho 1 (m/s ²)	Modelo II Caminho 2 (m/s ²)	AISC* (m/s ²)	Limite ISO** 0,5%g (m/s ²)
5,0	0,150	0,131	0,202	0,120	0,033	0,049
5,5	0,191	0,125	0,223	0,128	0,038	0,049
6,0	0,164	0,140	0,157	0,113	0,043	0,049
6,5	0,159	0,165	0,197	0,143	0,048	0,049
7,0	0,198	0,127	0,192	0,231	0,052	0,049
7,5	0,167	0,107	0,158	0,106	0,057	0,049
8,0	0,113	0,108	0,148	0,113	0,062	0,049
8,5	0,188	0,151	0,205	0,157	0,066	0,049
9,0	0,155	0,117	0,182	0,167	0,070	0,049
9,5	0,146	0,109	0,156	0,128	0,073	0,049
10,0	0,115	0,100	0,156	0,123	0,078	0,049

*AISC: (Murray et al., 1997); **ISO: (ISO 2631-2, 1989)

de estruturas. Deve-se ressaltar, ainda, que os modelos de carregamento usados nesse estudo são próximos da realidade, pois consideram a variação espacial e temporal da carga dinâmica.

Os modelos de carregamento I e II apresentam valores de acelerações elevados, no que diz respeito a todos os pisos analisados (Tabela 6). Tal situação indica que, quando a posição da carga dinâmica, correspondente à excitação induzida pelo caminhar das pessoas, é alterada, de acordo com a posição do indivíduo, há um aumento substancial na resposta dinâmica dos pisos mistos.

Verifica-se que, quando o modelo de carregamento II é aplicado sobre os pisos mistos investigados, usando o fator de majoração do impacto do calcanhar igual a 1,12 ($f_{mi} = 1,12$) (Varela, 2004), os valores das acelerações de pico são, praticamente, da mesma ordem de grandeza que os gerados com a aplicação do modelo de carregamento I (Tabela 6).

Como mencionado anteriormente, o fator de majoração do impacto do calcanhar ($f_{mi} = 1,12$), (Varela, 2004), deve ter o seu valor modificado mediante uma análise paramétrica extensa, de forma a se obter uma visão mais global dos modelos de carregamento I e II. Contudo os autores ressaltam a importância de que o impacto da queda do calcanhar sobre o piso deve ser considerado, sem sombra de dúvida, na análise de conforto humano.

Nota-se que o limite da norma (ISO 2631-2, 1989) é ultrapassado, quando são consideradas as acelerações de pico geradas a partir dos modelos de carregamento desenvolvidos. Isto deve ser levado em consideração, no que tange aos critérios de conforto humano, pois a modelagem da carga móvel apresenta-se como uma alternativa mais realista da ação dinâmica humana gerada, ao longo do tempo, durante a caminhada.

O modelo de carregamento II, que inclui o pico transiente gerado pelo im-

pacto do calcanhar humano sobre o piso, produz níveis bastante elevados de aceleração, onde grande parte desses valores são superiores aos encontrados com a aplicação do modelo de carregamento I, nas duas direções (caminhos 1 e 2), sendo, também, maiores que aqueles previstos pela literatura técnica (Murray et al., 1997), inclusive violando os critérios de conforto humano (ISO 2631-2, 1989). Tal fato demonstra, claramente, que o impacto da queda do calcanhar sobre o piso deve ser considerado para análise do conforto humano desse tipo de estrutura.

6. Conclusões

Essa investigação apresenta uma contribuição desenvolvida para se avaliar o comportamento estrutural de pisos mistos submetidos a excitações dinâmicas associadas ao caminhar de pessoas. A metodologia de análise considera o estudo do comportamento dinâmico linear em regime de serviço de pisos mistos. Assim sendo, foi possível avaliar-se o nível de vibração dos pisos, quando submetidos ao caminhar de pessoas, com base na obtenção da resposta dinâmica dos modelos, principalmente, em termos das acelerações máximas.

Convém ressaltar que os picos de aceleração obtidos via aplicação dos modelos de carregamento I e II são sempre superiores àqueles fornecidos pelos procedimentos simplificados de guias práticos de projeto utilizados correntemente (Murray et al., 1997). Por outro lado, esses valores de pico encontram-se bem acima das normas de projeto (ISO 2631-2, 1989). Esse quadro pode ser um indicativo de que os critérios simplificados de projeto devem ser empregados com cautela.

Com base nos resultados obtidos ao longo da investigação, observa-se que, a partir do emprego do modelo de carregamento que incorpora o efeito tran-

siente do impacto do calcanhar humano (modelo II), as acelerações de pico encontram-se em patamares bastante elevados. Evidentemente, esses resultados apontam para a consideração do efeito do impacto do calcanhar das pessoas sobre os pisos, quando da análise dinâmica desse tipo de estrutura.

Os resultados encontrados, no presente trabalho, sugerem a continuação da pesquisa com base no desenvolvimento de uma nova análise paramétrica, através da modificação de determinados parâmetros de projeto, tais como: fator de majoração do impacto do calcanhar, espessura da laje, amortecimento estrutural, rigidez da ligação viga-coluna, características geométricas das seções transversais das vigas do piso, variação do pé direito das colunas e do tipo de sistema estrutural.

7. Referências bibliográficas

- ANSYS, *Swanson analysis systems*, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 5.5, Basic analysis procedures, Second edition, 1998.
- BACHMANN, H., AMMANN, W. *Vibrations in structures induced by man and machines, IABSE Structural Engineering Document 3E*, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987.
- CHEN, Y. Finite element analysis for walking vibration problems for composite precast building floors using ADINA: modeling, simulation, and comparison, *Computers & Structures*, v. 72, p. 109-126, 1999.
- FAISCA, R. G. *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: COPPE/UFRJ, 2003. (Tese de Doutorado).
- International Standards Organisation / ISO 2631-2. *Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Continuous and shock-induced vibration in buildings (1-80Hz)*, 1989.
- MELLO, A.V. de A. *Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas*. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,

PGECIV, Faculdade de Engenharia, FEN, UERJ, 2005. (Dissertação de Mestrado).
MELLO, A.V. de A., SILVA J.G.S. da, LIMA L.R.O. de. *Análise de pisos de edificações submetidos à ações dinâmicas provenientes do caminhar humano*. CILAMCE XXVI, Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Guarapari/ES, CD-ROM, 14 páginas, 2005.

MOREIRA, B. C. *Avaliação comparativa de pisos de edificações em estrutura metálica quanto aos critérios de vibração*. Ouro Preto: Escola de Minas / UFOP, 2004. (Dissertação de Mestrado).

MURRAY T. M., ALLEN D.E., UNGAR E.E. Floor vibrations due to human activity, steel design guide series, *American Institute of Steel Construction, AISC*, 1997.

OHLSSON, S. V. *Floor vibration and human discomfort*. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Gotemborg, Sweden, 1982. (PH. D. Thesis).

VARELA, W. D. *Modelo teórico-experimental para análises de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004. (Tese de Doutorado).

Artigo recebido em 24/11/2006 e aprovado em 28/11/2006.

REM - Revista Escola de Minas 71 anos divulgando CIÊNCIA.

www.rem.com.br

