

Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto)

J. K. Loose,⁽¹⁾ W. G. Ferreira,⁽²⁾ J. G. S. da Silva,⁽³⁾

Trabalho recebido em 8/7/2008 e aprovado para publicação em 19/8/2009.

Resumo

As novas tendências arquitetônicas e as exigências de mercado, atualmente, apontam para a procura por soluções estruturais cada vez mais arrojadas, as quais estão inseridas em uma das mais importantes tendências de projeto dos últimos anos, ou seja, a busca por sistemas estruturais de rápida execução, compostos por peças de menor peso próprio e que possam vencer grandes vãos, com um mínimo de elementos verticais, permitindo, assim, uma maior flexibilidade na adequação de ambientes. Esta filosofia de projeto conduz a sistemas estruturais cada vez mais esbeltos e com frequências naturais cada vez mais baixas e próximas das faixas de frequência das excitações associadas às atividades humanas, resultando em efeitos de vibrações indesejáveis. Assim, este trabalho de pesquisa estuda o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos às atividades rítmicas correspondentes à ginástica aeróbica (atividade sincronizada) e saltos livres (atividade não sincronizada). A metodologia de análise fundamenta-se na modelagem computacional, com base no emprego do método dos elementos finitos (MEF), via utilização do programa ANSYS. Na modelagem do carregamento dinâmico foram utilizados resultados experimentais que consideram os efeitos de multidão. Diversos sistemas estruturais compostos por pisos mistos (aço-concreto) são investigados e os resultados, em termos das acelerações máximas (acelerações de pico), são comparados com os limites propostos por recomendações de projeto do ponto de vista do conforto humano. Os resultados alcançados indicam que esses pisos mistos são submetidos a níveis de aceleração muito superiores aos limites sugeridos por normas e recomendações de projeto.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto). Dinâmica estrutural. Conforto humano. Modelagem computacional. Estruturas de aço e mistas.

⁽¹⁾ Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Ufes.

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Uerj.

⁽³⁾ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Uerj.

1 Introdução

O desenvolvimento das estruturas de aço é um dos responsáveis por promover uma maior industrialização da construção civil, pois utiliza peças pré-fabricadas mais esbeltas, com maior controle de qualidade, favorecendo a utilização de grandes vãos e reduzindo o tempo de construção. Esses fatores favorecem a concepção de estruturas mais arrojadas, vencendo grandes vãos com peças estruturais cada vez mais leves e econômicas e, portanto, mais suscetíveis a problemas de vibração.

No que tange à vibração excessiva de estruturas de aço e mistas (aço-concreto), pode-se citar como exemplo o desabamento de uma passarela na Carolina do Norte, EUA, em maio de 2000, ocorrido durante a saída do público de um evento esportivo, ocasionando ferimentos em mais cem pessoas (Loose 2007). Um outro problema grave ocorreu durante a inauguração da passarela “Millennium Footbridge”, em Londres, Inglaterra, pois no dia de sua inauguração o sistema estrutural apresentou oscilações laterais com amplitude da ordem de 20 cm ao longo de seus 345 m de comprimento, em razão do caminhar das pessoas sobre ela (Loose 2007).

Os dois exemplos citados, associados à vibração de estruturas de aço e mistas (aço-concreto), mostram que ações dinâmicas provenientes de atividades humanas, tais como caminhar, saltar, correr, etc., podem gerar problemas de vibração excessiva, inclusive levando uma estrutura ao colapso, ou mesmo tornando-a inaceitável, no que tange a critérios de utilização.

Dentro desse contexto, esta investigação busca estudar o comportamento dinâmico de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto) que representem pisos de academias de ginástica e salas de danças, quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas. Na definição das ações dinâmicas atuantes sobre os modelos estruturais são empregados dados de dois tipos de atividades, ginástica aeróbica e saltos livres, com base em resultados de testes experimentais, os quais levam em conta os efeitos de multidão (Faisca 2003).

Este trabalho investiga o comportamento dinâmico de uma série de modelos estruturais associados a pisos mistos (aço-concreto). Os resultados numéricos são obtidos a partir do desenvolvimento de um modelo computacional, por meio do método dos elementos finitos, com o emprego do programa ANSYS (ANSYS 1998). Inicialmente, são obtidas as frequências naturais e os modos de vibração dos modelos em estudo. Em seguida, a resposta dinâmica dos pisos contempla uma análise crítica acerca dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico).

As conclusões obtidas indicam que os pisos investigados são submetidos a níveis de aceleração que comprometem a aceitabilidade destes, no que tange a critérios de conforto humano estabelecidos em recomendações de projeto (ISO 2631-2 1989) (Murray, Allen and Ungar 2003).

2 Cargas geradas por atividades humanas

Diversos trabalhos de pesquisa descrevem o carregamento gerado por atividades humanas através de uma série de Fourier, que considera uma parcela estática para levar em conta o peso do indivíduo e outra parcela devido à carga dinâmica. Contudo, a descrição das cargas geradas por atividades humanas é bastante complexa, pois diversos fatores externos podem influenciar no desenvolvimento dessas atividades pelo indivíduo.

Allen et al. (Allen, Rainer, Pernica 1985) realizaram ensaios com grupos de duas a quatro pessoas saltando em uma plataforma construída em estrutura mista. Com este trabalho de pesquisa foram estabelecidos parâmetros que têm sido usados para caracterizar os carregamentos dinâmicos produzidos por danças, shows, exercícios aeróbicos, eventos esportivos, etc.

Ebrahimpour e Sack (Ebrahimpour, Sack 1989) descreveram analiticamente cargas dinâmicas geradas por pessoas. Os carregamentos periódicos foram modelados utilizando-se uma série de Fourier e, para o carregamento impulsivo, referente a um salto, foram utilizadas funções de decaimento logarítmico.

Em 1991, o CEB (CEB 1991) lançou um boletim técnico com várias recomendações que consideram cargas dinâmicas induzidas por pessoas para diversos tipos de estruturas: estádios, salões de ginástica e dança, passarelas, dentre outras. Para cada tipo de atividade é fornecida a faixa de valores de frequência, bem como os valores dos coeficientes de Fourier referentes a cada excitação dinâmica (Tab. 1).

Tabela 1: Faixas de frequência e coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos associados a carregamentos humanos recomendados pelo CEB (CEB 1991)

Atividade	Frequência da excitação	Coeficientes de Fourier		
	(Hz)	A_1	A_2	A_3
Andar	1,6 a 2,4	0,4	0,1	0,1
Correr	2,0 a 3,5	1,6	0,7	0,2
Saltar	1,8 a 3,4	1,8	1,3	0,7
Dançar hard rock	1,5 a 3,0	0,5	0,2	0,1
Dançar light rock	1,5 a 3,0	0,05	0,02	0,01
Movimento lateral do corpo	0,6	0,4	-	-
Aplaudir e mover o corpo de pé	1,6 a 2,4	0,17	0,1	0,04

Bachmann (Bachmann 1992) estudou casos de passarelas, ginásios e salas de esporte, salas de dança e shows submetidos a carregamentos dinâmicos, a fim de estabelecer recomendações para auxiliar na solução de problemas de vibração. O autor conclui que, em situações normais, a frequência fundamental da estrutura deve ser definida de acordo com a frequência da componente harmônica crítica da excitação dinâmica. Além disso, recomenda frequências naturais mínimas para diferentes tipos de construções e para diferentes ocupações (Tab. 2).

Tabela 2: Frequências naturais mínimas recomendadas (Bachmann 1992)

Tipo de estrutura	Frequências naturais mínimas (Hz)			
	Concreto armado	Concreto protendido	Concreto/aço (misto)	Aço
Ginásios e salões (esporte)	7,5	8,0	8,5	9,0
Salões de dança e locais para concertos sem assentos	6,5	7,0	7,5	8,0
Shows e teatros com assentos (música “leve”)	3,5	3,5	3,5	3,5
Shows e teatros com assentos (música “pesada”)	6,5	6,5	6,5	6,5

Os pesquisadores Ji e Ellis (Ji, Ellis 1994) estudaram os carregamentos gerados por atividades humanas rítmicas. Foi verificado que, quando as pessoas realizam saltos ou outras atividades rítmicas, nas quais existe um contato relativamente curto com a estrutura, a massa do corpo não se encontra vibrando juntamente com esta.

Em seu trabalho de pesquisa, Faisca (Faisca 2003) descreve matematicamente as cargas dinâmicas geradas por atividades humanas em que existe a perda de contato com a estrutura, como saltos (com e sem estímulo), ginástica aeróbica, torcidas de futebol e plateias de show, com base na realização de diversos ensaios experimentais.

Na presente investigação são utilizados resultados provenientes de uma série extensa de ensaios experimentais, de forma a descrever as cargas dinâmicas geradas por atividades humanas, tais como saltos com e sem estímulo (Faisca 2003).

2.1 Modelo de carregamento

Neste modelo de carregamento são simuladas atividades do tipo ginástica aeróbica e saltos livres (Faisca 2003). A atividade da ginástica aeróbica é caracterizada pelo sincronismo entre seus participantes. Para tanto, os testes com os indivíduos foram realizados utilizando estímulos sonoros e visuais que forçavam a sincronia de movimento entre seus participantes. Já a atividade de saltos livres é caracterizada pelo não sincronismo, ou seja, os testes com os indivíduos foram realizados sem estímulo sonoro e/ou visual que pudesse influenciar no resultado da atividade.

A função Hanning é utilizada para representar a ação dinâmica oriunda dos seres humanos, pois foi verificado que esta função é a que melhor representa o sinal da força, obtido a partir de testes experimentais (Faisca 2003).

A representação da ação dinâmica humana por meio da função Hanning é representada matematicamente pela Equação (1). Na sequência, a Tabela 3 define os parâmetros necessários para o emprego da Equação (1) no que tange à ginástica aeróbica, tais como período da atividade, T , período de contato, T_c , coeficiente de impacto, K_p e o coeficiente de defasagem, CD .

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\}, \text{ para } t \leq T_c \quad (1)$$

$$F(t) = 0, \text{ para } T_c < t \leq T$$

Onde:

$F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N);

t : tempo em (s);

T : período da atividade (s);

T_c : período de contato da atividade (s);

P : peso da pessoa (N);

K_p : coeficiente de impacto;

CD : coeficiente de defasagem.

Tabela 3: Parâmetros utilizados para representação da ginástica aeróbica (Faisca 2003)

Atividade	T (s)	T_c (s)	K_p
Ginástica Aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$

A Figura 1 apresenta o gráfico do coeficiente de defasagem, CD , para três atividades distintas, as quais foram extrapoladas para um grande número de pessoas (Faisca 2003). O coeficiente de defasagem é representativo da ponderação da carga dinâmica, sendo determinado em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam sobre a estrutura. Este parâmetro leva em consideração os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam na estrutura. Por meio dele são consideradas possíveis defasagens, variações de ritmo, etc., que levariam à redução no módulo do carregamento.

Como exemplo, a Figura 2 ilustra a ação dinâmica ao longo do tempo exercida por uma pessoa em atividade de ginástica aeróbica sobre o piso. Para tal são empregados os seguintes parâmetros: $P = 800\text{N}$, $T = 0,35\text{s}$, $T_c = 0,25\text{s}$ e $K_p = 2,78$. No que se refere aos saltos livres, novamente se utiliza a Equação (1). Contudo, os parâmetros necessários para este tipo de atividade são definidos de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para representação de saltos livres (Faisca 2003)

Atividade	T (s)	T_c (s)	K_p
Saltos livres	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$

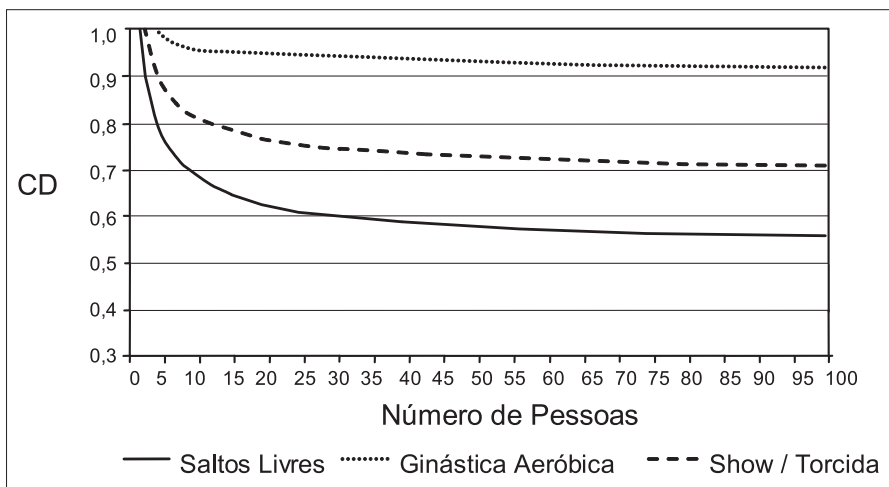


Figura 1: Coeficientes de defasagem para as atividades humanas (Faisca 2003)

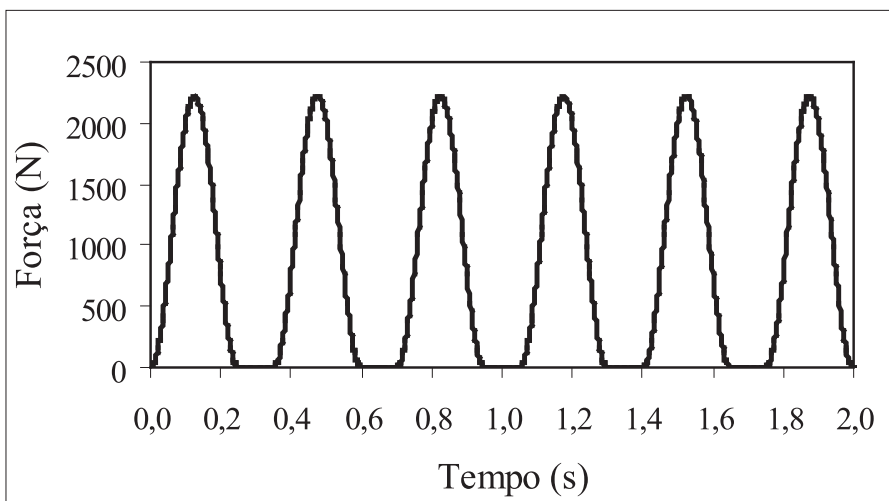


Figura 2: Ação dinâmica ao longo do tempo para 1 pessoa em atividade de ginástica aeróbica com os seguintes parâmetros: $T = 0,35s$, $T_c = 0,25s$ e $K_p = 2,78$

3 Modelo estrutural

O modelo estrutural investigado refere-se a um piso misto composto por vigas de aço e uma laje maciça de concreto (piso misto aço-concreto). Este modelo estrutural foi idealizado tomando como base as dimensões referentes a salas de academia de ginástica e de dança (Loose 2007).

O modelo estrutural é composto por dois painéis de laje apoiados em vigas de aço formadas por perfis I soldados. As vigas principais são formadas por perfis VS 550 x 64 e as vigas secundárias, por perfis VS 450 x 51. As colunas também são formadas por perfis I soldados do tipo CS 300 x 62. As características geométricas dos perfis estão descritas na Tabela 5. A Figura 3 apresenta um esquema do modelo estrutural estudado neste trabalho de pesquisa.

Tabela 5: Propriedades geométricas dos perfis de aço.

Tipo do perfil	Altura (mm)	Largura das mesas (mm)	Espessura das mesas (mm)	Espessura da alma (mm)
I 550 x 64	550	250	9,5	6,3
I 450 x 51	450	200	9,5	6,3
I 300 x 62	300	300	9,5	8,0

Os perfis de aço têm limite de escoamento de 300 MPa, módulo de elasticidade igual a 200GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e massa específica igual a 7.850 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 2.550 kg/m³.

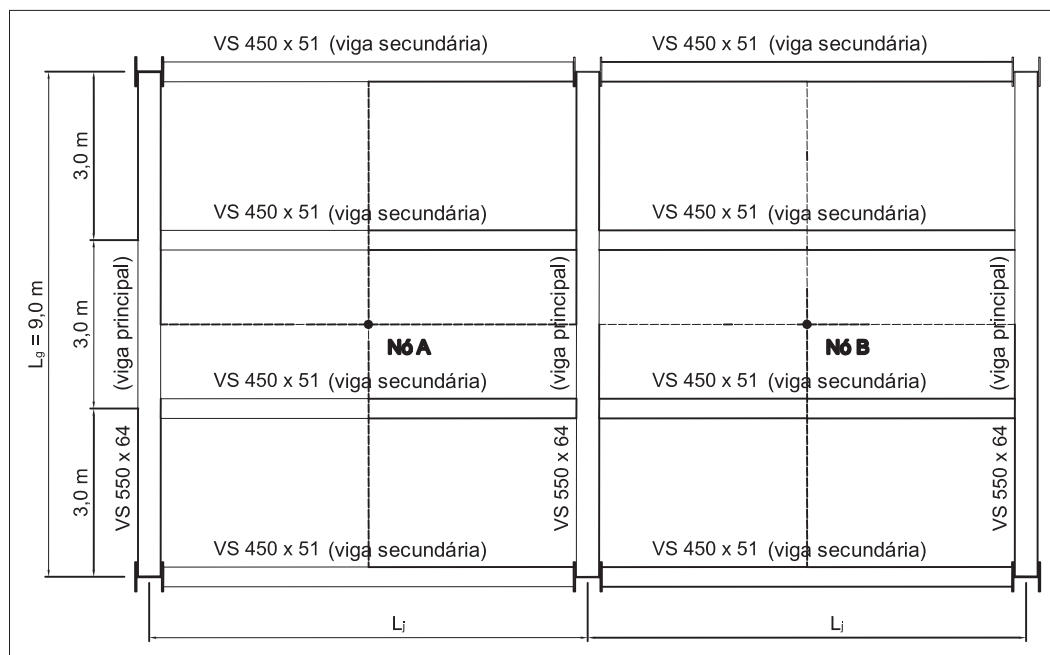


Figura 3: Modelo estrutural investigado

Na presente investigação, inicialmente, optou-se por manter constantes as dimensões dos perfis de aço das vigas e colunas, de forma a verificar a influência da variação dos vãos dos modelos. Desse modo, o vão denominado “Lj” tem sua dimensão variada de 5,0 m a 10,0 m (de 1,0 m em 1,0 m). Por outro lado, a dimensão do vão denominado “Lg” é mantida constante e igual a 9,0 m.

A altura das colunas de aço é mantida igual a 5,0 metros ($H = 5,0$ m) para todos os pisos. As extremidades das colunas foram modeladas com apoios de segundo gênero. A incorporação das colunas no modelo computacional visa obter uma situação mais real em termos da rigidez na ligação viga-coluna.

A ação dinâmica induzida pelo ser humano é aplicada no primeiro painel, cujo nó central se denomina “nó A”, como mostrado na Figura 3. As respostas em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações máximas são obtidas no “nó A”, a fim de serem avaliados os níveis de vibrações no piso onde são aplicadas as cargas, e também no “nó B”, a fim de se verificar a influência desta excitação sobre o painel do piso adjacente, de acordo com a Figura 3.

Nesta investigação foram aplicados carregamentos dinâmicos sobre os modelos estruturais correspondentes a uma pessoa, três pessoas, seis pessoas, nove pessoas e doze pessoas, como ilustrado nas Figuras 4 a 8. A distribuição foi feita utilizando-se uma taxa de 0,25 pessoas/m² (Bachmann and Ammann 1987), centradas no painel de laje, Figuras 4 a 8. Foi considerado, ainda, que o peso de uma pessoa é igual a 800 N (Bachmann and Ammann 1987).

4 Modelo computacional

Nos modelos numéricos são empregadas técnicas usuais de discretização por meio do método dos elementos finitos, com o uso do programa computacional ANSYS (ANSYS 1998). Na modelagem computacional, as vigas e as colunas de aço são simuladas por elementos finitos tridimensionais, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. No que tange as lajes de concreto, são simuladas por meio de elementos finitos de casca, de acordo com a Figura 9.

Além disso, para garantir que os modelos funcionem como um sistema misto, com interação total, são utilizadas conexões do tipo *off-set* na ligação entre a laje de concreto e as vigas de aço, objetivando garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga tridimensionais e os elementos de placa.

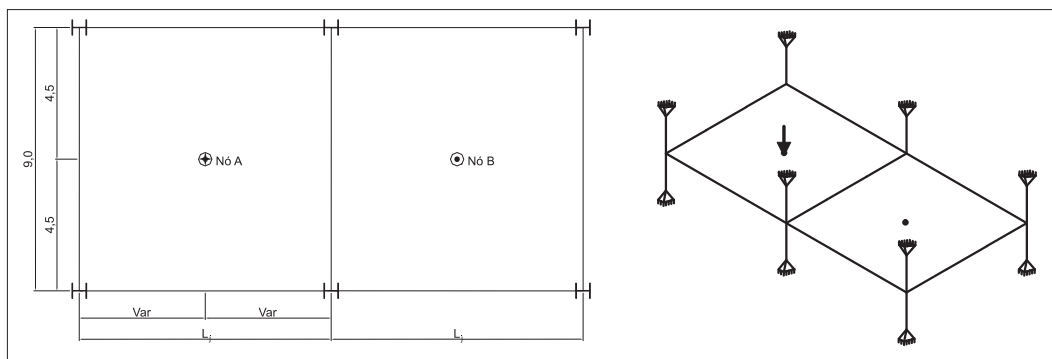


Figura 4: Aplicação de uma pessoa (Planta e perspectiva)

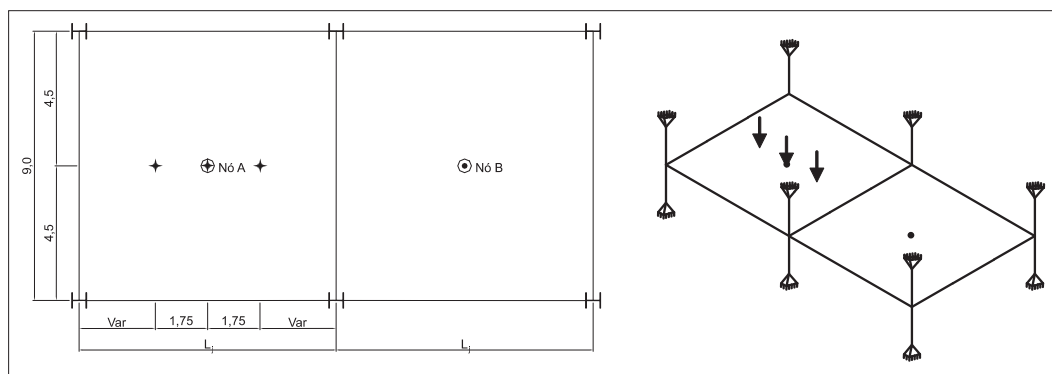


Figura 5: Aplicação de três pessoas (Planta e perspectiva)

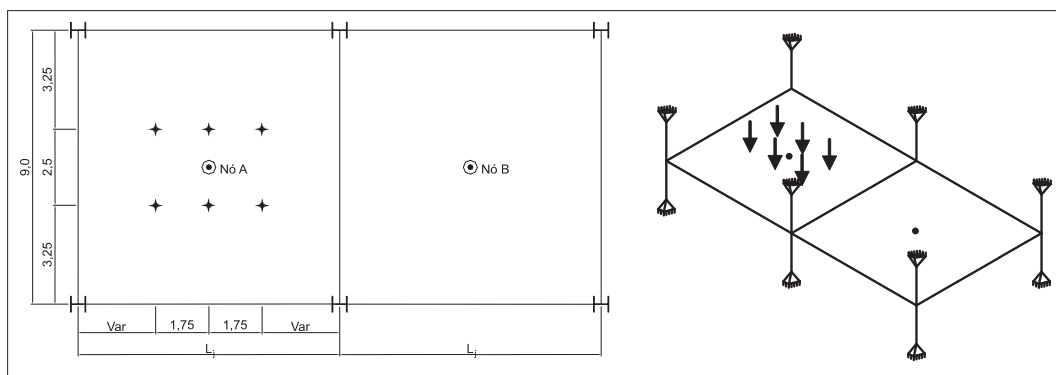


Figura 6: Aplicação de seis pessoas (Planta e perspectiva)

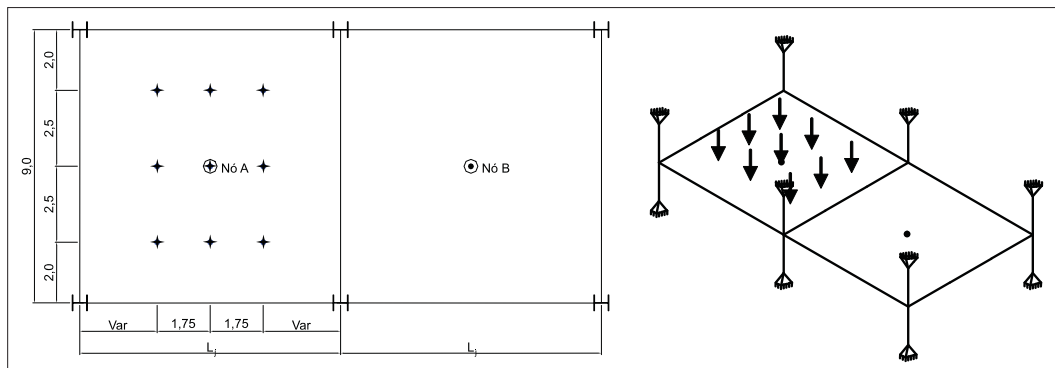


Figura 7: Aplicação de nove pessoas (Planta e perspectiva)

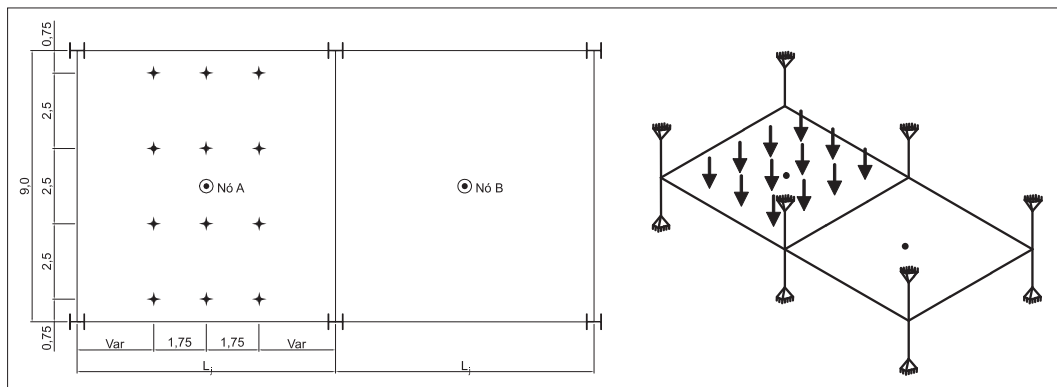


Figura 8: Aplicação de doze pessoas (Planta e perspectiva)

Considera-se também que os dois materiais, aço e concreto, trabalham no regime linear-elástico. Foi adotado um coeficiente de amortecimento de 3% ($\xi = 3\%$) para todos os pisos (Murray, Allen and Ungar 2003). A taxa de amortecimento leva em conta que em locais onde se praticam as atividades humanas rítmicas estudadas neste trabalho existem poucos elementos que contribuem com o amortecimento do sistema estrutural.

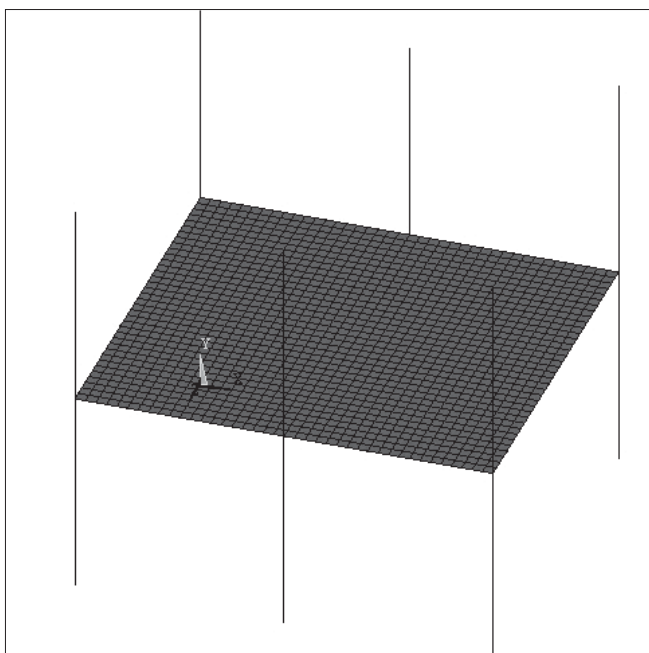


Figura 9: Modelo genérico via elementos finitos correspondente aos pisos analisados

5 Análise das frequências naturais e modos de vibração

A análise de vibração livre foi realizada com o objetivo de determinar as frequências naturais e os modos de vibração dos pisos. Percebe-se que com o aumento do vão “Lj”, Figura 3, os valores das frequências naturais dos pisos diminuem e se aproximam da faixa de frequência das atividades humanas (CEB 1991) (Bachmann 1992), Tabelas 1 e 2, como ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6: Frequências naturais dos pisos estudados

Vão	Frequências naturais (f_{oi})					
L_j (m)	f_{01} (Hz)	f_{02} (Hz)	f_{03} (Hz)	f_{04} (Hz)	f_{05} (Hz)	f_{06} (Hz)
5,0	7,98	11,23	19,87	21,86	22,57	26,47
6,0	7,21	9,64	16,53	17,71	18,79	21,07
7,0	6,58	8,27	14,22	14,31	16,14	17,23
8,0	6,05	7,08	11,69	12,69	13,86	14,65
9,0	5,58	6,05	9,81	11,43	11,94	12,87
10,0	5,15	5,18	8,38	10,35	10,38	11,58

6 Avaliação das acelerações máximas (Acelerações de pico)

Inicialmente, a análise das acelerações de pico considera uma variação do período de contato, T_c . Com base nos resultados experimentais (Faisca 2003) empregados ao longo da investigação, correspondentes à ginástica aeróbica, o comportamento dinâmico dos pisos foi avaliado mantendo-se constante o valor do coeficiente de impacto K_p ($K_p = 2,78$) e o valor do período sem contato com os pisos, T_s ($T_s = 0,10s$).

Na sequência, as Figuras 10 a 15 apresentam os valores da aceleração de pico, a_p , à medida que o número de pessoas exercendo ginástica aeróbica sobre os modelos é modificado, simultaneamente com a variação do vão “Lj” dos pisos (Fig. 3), considerando-se do piso mais rígido ($L_j = 5,0$ m) até o piso mais flexível ($L_j = 10,0$ m). Observa-se também que são utilizados três valores para o tempo de contato, T_c , conforme apresentado nas Figuras 10 a 15.

Verifica-se que os valores de aceleração de pico, a_p , obtidos para a ginástica aeróbica são mais elevados quando o tempo de contato das pessoas com o piso é menor ($T_c = 0,25s$), de acordo com as Figuras 10 a 15. Esse fato ocorre para todos os modelos de pisos mistos, com vão L_j entre 5,0 e 10,0 m, inclusive para as respostas referentes ao nó B, conforme mostrado na Figura 3.

No caso dos modelos mais rígidos ($L_j = 5,0$ m e 6,0 m), as acelerações de pico obtidas com a aplicação de nove pessoas atuando sobre os modelos estão muito próximas daquelas obtidas quando são utilizadas doze pessoas (Fig. 10-15), porque, neste caso, as cargas estão mais distribuídas sobre o piso, conforme a relação de 0,25 pessoas/m² (Bachmann and Ammann 1987).

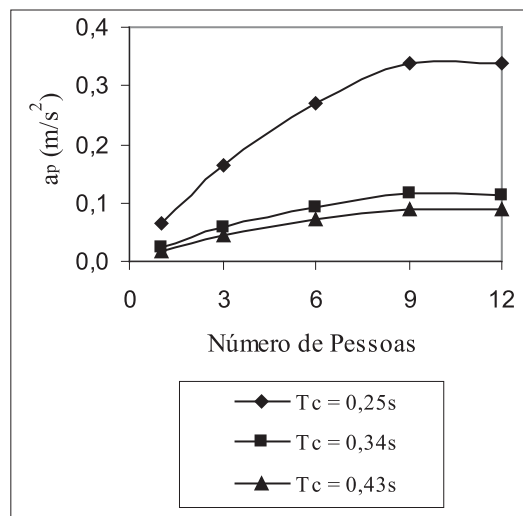


Figura 10: Aceleração de pico ($L_j = 5,0$ m)

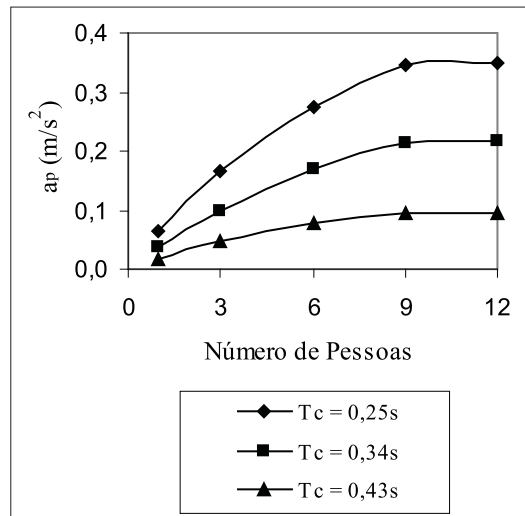
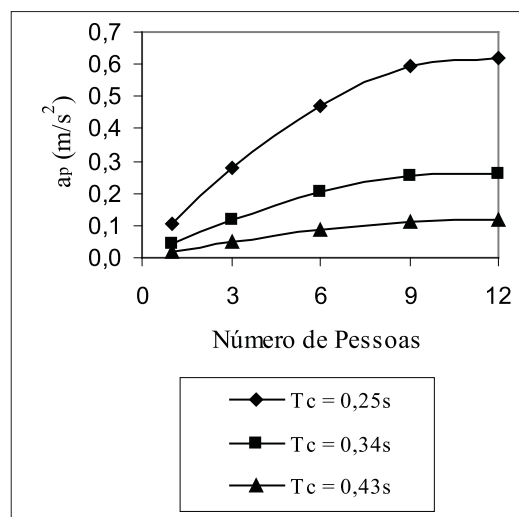
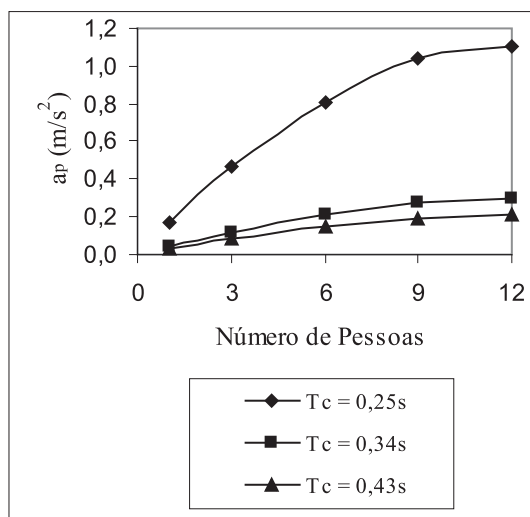
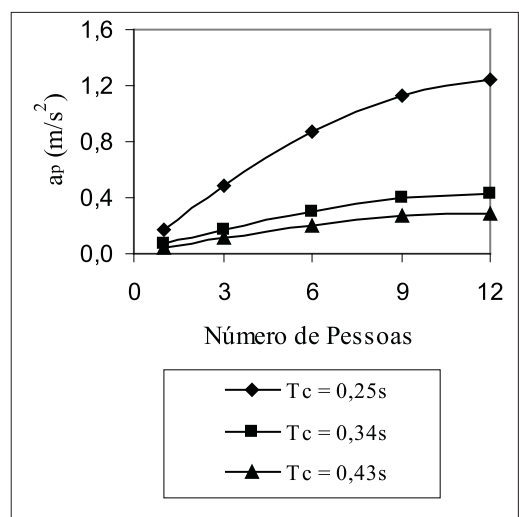
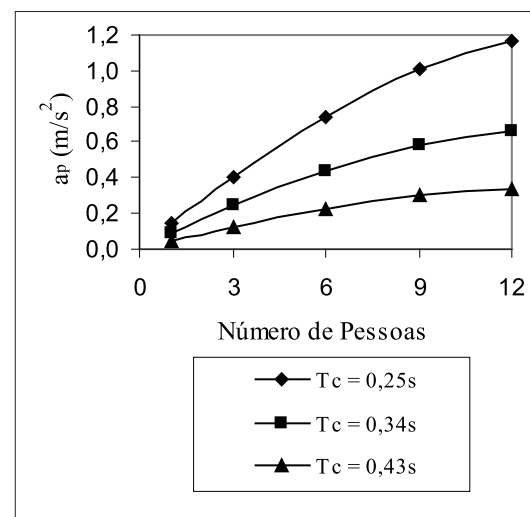


Figura 11: Aceleração de pico ($L_j = 6,0$ m)

Figura 12: Aceleração de pico ($L_j = 7,0\text{m}$)Figura 13: Aceleração de pico ($L_j = 8,0\text{m}$)Figura 14: Aceleração de pico ($L_j = 9,0\text{m}$)Figura 15: Aceleração de pico ($L_j = 10,0\text{m}$)

Considera-se, agora, uma variação do coeficiente de impacto, K_p , no que diz respeito às atividades de ginástica aeróbica e de saltos livres. Para essas atividades são sempre mantidos constantes os valores do período de contato, T_c ($T_c = 0,25\text{s}$) e do tempo sem contato com a estrutura, T_s ($T_s = 0,10\text{s}$). Assim, varia-se o coeficiente de impacto, K_p , com o objetivo de verificar uma faixa de valores na qual as acelerações de pico, a_p , não violem os critérios de conforto humano estabelecidos em recomendações de projeto (ISO 2631-2 1989) (Murray, Allen and Ungar 2003). A Tabela 7 ilustra os resultados obtidos para o piso mais rígido com vão $L_j = 5,0\text{ m}$.

Tabela 7: Acelerações de pico obtidas para o piso com $L_j = 5,0$ m

Nº de pessoas	a_p (m/s ²)					
	Ginástica aeróbica			Saltos livres		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$
1	0,050	0,064	0,078	0,059	0,073	0,086
3	0,129	0,164	0,200	0,135	0,165	0,195
6	0,213	0,271	0,330	0,193	0,236	0,279
9	0,266	0,340	0,413	0,231	0,282	0,334
12	0,267	0,340	0,413	0,223	0,273	0,323

Os valores máximos das acelerações de pico referentes a doze pessoas atuando sobre os pisos (carga máxima) variam da ordem de $0,267 \text{ m/s}^2$ a $0,413 \text{ m/s}^2$ para a ginástica aeróbica, ao passo que para a atividade de saltos livres os valores máximos variam na faixa de $0,223 \text{ m/s}^2$ a $0,323 \text{ m/s}^2$, conforme os resultados apresentados na Tabela 7.

Os valores mais elevados de aceleração são obtidos para a atividade associada à ginástica aeróbica, de acordo com a Tabela 7. Tal fato ocorre em todos os modelos de pisos mistos investigados, com vão L_j variando na faixa de $5,0$ a $10,0$ m. Explica-se essa diferença pelo fato de que a ginástica aeróbica é uma atividade mais sincronizada do que a atividade de saltos livres.

Com o objetivo de avaliar a aceitabilidade dos pisos submetidos a atividades rítmicas no que diz respeito ao conforto humano, os valores das acelerações máximas (acelerações de pico: a_p) obtidas a partir das ações dinâmicas oriundas de atividades de ginástica aeróbica e saltos livres, correspondentes a doze pessoas atuando sobre os modelos estruturais (carga máxima), Figura 8, são comparados com os limites recomendados por normas e recomendações de projeto (ISO 2631-2 1989), (Murray, Allen and Ungar 2003).

Os resultados são apresentados nas Tabelas 8 e 9, referentes aos nós A e B dos pisos, respectivamente, como mostrado na Figura 3, em termos da relação (a_p/g), onde a_p representa a aceleração de pico e g corresponde à aceleração da gravidade.

Tabela 8: Relação (a_p/g) obtida sobre o nó A para os pisos carregados com doze pessoas

Lj (m)	a_p/g (%)		Limite da norma ISO 2631/2* (5% g)
	Ginástica aeróbica	Saltos livres	
	$K_p = 3,38$	$K_p = 3,75$	
5,0	4,213	3,297	5,0
6,0	4,332	3,389	
7,0	7,682	6,011	
8,0	13,688	10,711	
9,0	15,357	12,016	
10,0	14,429	11,290	

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas (ISO 2631-2 1989).

Tabela 9: Relação (a_p/g) obtida sobre o nó B para os pisos carregados com doze pessoas

Lj (m)	a_p/g (%)		Limite da norma ISO 2631/2* (1,5% g)
	Ginástica aeróbica	Saltos livres	
	$K_p = 3,38$	$K_p = 3,75$	
5,0	2,355	1,842	1,5
6,0	2,755	2,155	
7,0	3,542	2,771	
8,0	7,170	5,610	
9,0	8,767	6,860	
10,0	6,543	5,119	

* Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas (ISO 2631-2 1989).

Com base nos resultados mostrados na Tabela 8, verifica-se que a atividade referente à ginástica aeróbica apresenta níveis de acelerações superiores a 5% g (ISO 2631-2 1989), no que tange aos pisos mistos (aço-concreto) com vão Lj a partir de 7,0 m ($a_p/g = 7,682$). Com referência aos saltos livres, tal atividade apresenta níveis um pouco inferiores para as acelerações de pico, porém também superiores ao limite de 5% g (ISO 2631-2 1989), no que diz respeito aos pisos mistos com vão Lj a partir de 7,0 m ($a_p/g = 6,011$), conforme ilustrado na Tabela 8.

Por outro lado, observando-se os resultados apresentados na Tabela 9, percebe-se que todos os pisos analisados ao longo desta investigação, no que tange às duas ativi-

dades (ginástica aeróbica e saltos livres), apresentam níveis de acelerações superiores a 1,5% g (ISO 2631-2 1989), violando os critérios de conforto humano para o piso adjacente àquele onde a carga dinâmica foi efetivamente aplicada (Nó B: Fig. 3 e 8).

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os valores das acelerações de pico, obtidas a partir da atuação de nove pessoas sobre os pisos, representativas de ações dinâmicas oriundas de atividades de ginástica aeróbica e saltos livres, são superiores àqueles obtidos com base no emprego de doze pessoas, especialmente para os modelos mais flexíveis (Tab. 7-9). Tal fato ocorre em virtude da distribuição das cargas dinâmicas sobre os modelos, pois, no caso associado a doze pessoas, as ações dinâmicas estão mais distribuídas sobre o piso, conforme a relação de 0,25 pessoas/m² (Bachmann and Ammann 1987) (Fig. 7 e 8). Por outro lado, deve-se ressaltar que existe uma interação maior entre a excitação dinâmica proveniente do caso de carregamento associado a nove pessoas (Fig. 7), distribuído de forma mais próxima do centro dos pisos, região de amplitude máxima do primeiro modo de flexão dos modelos (modo fundamental de vibração), do que no caso correspondente a doze pessoas (Fig. 8).

7 Considerações finais

Este trabalho de pesquisa apresenta uma contribuição, no que tange ao estudo do comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) com referência a atividades humanas rítmicas referentes à ginástica aeróbica e saltos livres. Para tal foram analisados diversos modelos estruturais associados a pisos mistos, considerando-se uma faixa de vãos situada entre 5,0 m e 10,0 m.

A definição das ações dinâmicas atuantes sobre os modelos estruturais foi feita com base em resultados obtidos por meio de testes experimentais (Faisca 2003), os quais levam em conta os efeitos de multidão. O modelo numérico-computacional desenvolvido permitiu uma ampla avaliação sobre o comportamento dinâmico dos modelos. Esses modelos numéricos foram desenvolvidos com base no emprego de técnicas usuais do método dos elementos finitos por meio do emprego do programa ANSYS (ANSYS 1998).

Os resultados obtidos ao longo do estudo indicam que os limites recomendados por normas e recomendações de projeto (ISO 2631-2 1989), (Murray, Allen and Ungar 2003) foram ultrapassados na maioria dos casos investigados no que concerne aos carregamentos dinâmicos considerados (ginástica aeróbica e saltos livres). Tal fato demonstra que essas atividades humanas rítmicas podem gerar níveis elevados de aceleração (acelerações de pico), violando critérios de projeto no que concerne ao conforto humano.

Foi verificado ainda que a atuação dessas cargas dinâmicas gera perturbações significativas em pisos adjacentes, ou seja, a influência causada por ações dinâmicas em ambientes próximos àquele onde a carga é aplicada pode também comprometer o conforto humano, dependendo do tipo da ocupação adjacente a que se destina.

Os resultados encontrados nesta investigação sugerem a continuação da pesquisa a partir do desenvolvimento de um estudo paramétrico, mediante a modificação de grandezas relevantes de projeto, tais como parâmetros experimentais que definem a carga dinâmica, rigidez inicial das ligações entre o piso e as colunas, geometria das vigas e da laje e tipo do sistema estrutural.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Pesquisa, CNPq, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ e ao Núcleo de Excelência em Estruturas Metálicas e Mistas (NEXEM), o auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Referências bibliográficas

- Allen, D.E., Rainer, J.H. and Pernica, G. (1985). Vibration criteria for assembly occupancies, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, p. 617-623.
- ANSYS (1998). *Swanson analysis aystems*. Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 5.5, Basic analysis procedures, Second edition.
- Bachmann, H. and Ammann, W. (1987). Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document 3e. *International Association for Bridges and Structural Engineering*.
- Bachmann, H. (1992). *Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations*. Journal of Structural Engineering, v. 118, n. 3, p. 631-647.
- CEB - Comité Euro-International du Béton (1991). *Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines*. Bullitin d'information, n. 209.
- Ebrahimpour, A., Sack, R.L. (1989). *Modeling Dynamic Occupant Loads*. ASCE - Journal of Structural Engineering, v. 115, n. 6, p. 1476-1495.
- Faisca, R.G. (2003). *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 230 páginas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- International Standard Organization (1989). *Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: human exposure to continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80Hz)*. International Standard, ISO 2631-2.
- Ji, T. and Ellis, B.R. (1994). Floor vibration induced by dance-type loads: theory and verification. *The Structural Engineer*, v. 72, n. 3, p. 37-50.
- Loose, J.K. (2007). *Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos a atividades humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, 110 páginas, Vitória, ES, Brasil.

Mello, A.V. de A. (2005). *Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PGE CIV. Faculdade de Engenharia, FEN. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, UERJ, 189 páginas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Mello, A.V. de A., Silva, J.G.S. da., Lima, L.R.O. de. (2005). Dynamical analysis for the walking induced vibrations of composite floors. *CC 2005 - The Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Roma, Itália, CD-ROM, p. 1-15.

Mello, A.V. de A., Silva, J.G.S. da., Vellasco, P.C.G. da S., Andrade, S.A.L. de., Lima L.R.O. de. (2007). Estudo do Conforto Humano em Pisos Mistos (Aço-Concreto). *Revista da Escola de Minas*, v. 60, p. 409-418.

Mello, A.V. de A., Silva, J.G.S. da., Vellasco, P.C.G. da S., Andrade, S. A.L. de., Lima L.R.O. de. (2008). Dynamic Analysis of Composite Systems Made of Concrete Slabs and Steel Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, p. 125-151.

Murray, T. M., Allen, D. E. and Ungar, E. E. (2003). *Floor vibration due to human activity*, Steel Design Guide Series, AISC, Chicago, USA.

Influence of the human rhythmic activities on the composite floors dynamic response

Abstract

Structural engineers have long been trying to develop solutions using the full potential of its composing materials. These efforts in conjunction with up to date modern construction techniques have led to an extensive use of composite floors in large span structures. On the other hand, the competitive trends of the world market have long been forcing structural engineers to develop minimum weight and labour cost solutions.

A direct consequence of this new design trend is a considerable increase in the problems related to unwanted floor vibrations. This phenomenon is becoming very frequent in a wide range of structures subjected to dynamical actions induced by people. These dynamical loads are generally caused by human activities such as walking, dance, sport events or even gymnastics (Bachmann and Ammann 1987), (Faisca 2003), (Loose 2007), (Mello 2005), (Mello, Silva and Lima 2005), (Mello et al. 2007), (Mello et al. 2008), (Murray, Allen and Ungar 2003).

This paper investigated the dynamic behaviour of composite floors (steel-concrete) when subjected to the rhythmic activities corresponding to aerobic gymnastics and free jumps. The dynamic loads were obtained through experimental tests with individuals carrying out rhythmic and non-rhythmic activities such as stimulated and non-stimulated jumping and aerobic gymnastics (Faisca 2003). Based on the experimental results human load functions due to rhythmic and non-rhythmic activities were proposed.

The proposed analysis methodology adopted the usual mesh refinement techniques present in the finite element method simulations implemented in the ANSYS program (ANSYS 1998). The investigated structural model was based on several floors, with main spans varying from 5 m to 10 m. The structural systems are composed of a composite (steel/concrete) solution made of an "I" steel profile and a reinforced concrete slab.

The parametric analysis was performed varying the composite floor span from 5 m to 10 m. The steel columns height was kept equal to 5m ($H = 5.0$ m) to all floors. The incorporation of the columns in the computational model was made in order to obtain a more realistic simulation of the beam-column joint.

The results, in terms of maximum accelerations, are compared with the limits proposed by design recommendations, on the point of view of human comfort (ISO 2631-2 1989), (Murray, Allen and Ungar 2003).

The results indicated that the limits suggested by design recommendations (ISO 2631-2 1989), (Murray, Allen and Ungar 2003) were not satisfied, in most of the investigated composite floors. Such fact shows that these rhythmic activities may generate peak accelerations that violated design criteria when the human comfort is considered. It was verified that these dynamic loads generated considerable perturbations on adjacent floor. The influence caused by dynamic actions in adjacent floors near where the load was applied also can compromise the human comfort.

Key words: Composite Floors. Structural Dynamics. Human Comfort. Computational Modelling. Steel and Composite Structures.