

10

Estudo de conforto humano

10.1

Aspectos gerais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise dinâmica não linear geométrica (vibração forçada) com base no emprego do Modelo Estrutural II (ME-II). As análises procuraram avaliar o comportamento dinâmico do piso misto (aço-concreto), quando submetidas a atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações. Considerando os regimes de interação total e parcial existentes entre a laje de concreto e a viga de aço, como também os efeitos das ligações viga-coluna e viga-viga.

Os resultados das análises de vibração forçada foram obtidos, inicialmente, ao longo do tempo, em termos de deslocamentos translacionais verticais e das acelerações, provenientes da aplicação dos modelos de carregamentos MC-I (equação 4.1 e Figura 4.8), MC-II (equação 4.3 e Figura 4.11) e MC-III (equação 4.4 e Figura 4.12), descritos no capítulo 4.

Em seguida foi realizada uma extensa análise paramétrica, visando avaliar os níveis de conforto humano do piso investigado. Para tal, os resultados obtidos, em termos das acelerações máximas (acelerações de pico) foram comparados e confrontados com os valores limites sob o ponto de vista de conforto humano. Esses valores limites são fornecidos por recomendações técnicas internacionais: ISO 2631-1 (1985), ISO 2631-2 (1989) e AISC (2003) e são expressos em função da aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), ou seja, em porcentagem de g (% g).

Neste trabalho de pesquisa foram realizadas 216 (duzentos e dezesseis) análises de vibração forçada, sendo que 192 (Cento e noventa e duas) situações de projeto foram investigadas para os casos de carregamento I e II (Figuras 5.15 e 5.16), respectivamente, e outras 24 (Vinte e quatro) para o caso de carregamento III (Figura 5.17). Os três modelos de carregamento (equações 4.1, 4.3 e 4.4), descritos no capítulo 4 foram efetivamente utilizados, no que diz respeito à simulação das atividades humanas rítmicas de saltos à vontade e de ginástica aeróbica.

De forma geral, os casos de carregamento são constituídos por 16 e 32 pessoas praticando ginástica aeróbica e saltos à vontade. A posição das cargas dinâmicas é sempre simétrica em relação ao centro de cada setor do piso analisado. Para tal foi utilizada uma taxa de distribuição de 0,25 pessoas/m² Bachmann e Ammann (1987).

Ao longo das análises foi considerada a influência da interação aço-concreto (total e parcial), no que se refere à interface da laje de concreto e da viga de aço. O tipo de conector de cisalhamento (stud e perfobond) foi modificado ao longo das análises. A influência das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis) também foi alvo de investigação ao longo deste estudo.

Para uma melhor compreensão deste capítulo, a presente análise será dividida em duas partes, a saber: a primeira considera as ligações viga-coluna como sendo rígidas e na segunda parte do estudo as ligações viga-coluna são simuladas como sendo semirrígidas, considerando o eixo de maior inércia das colunas.

10.2

Análise dinâmica no domínio do tempo: Ligações viga-coluna rígidas

Para avaliar o nível de conforto humano do piso misto em estudo, de acordo com a metodologia de análise proposta, as Figuras 10.1 a 10.3 apresentam a resposta dinâmica não linear geométrica do piso misto, ao longo do tempo, em termo dos deslocamentos translacionais verticais e das acelerações do modelo estrutural em estudo (Modelo Estrutural II - ME-II, Figura 5.1), a fim de avaliar o comportamento dinâmico do piso misto (aço-concreto), quando submetido a atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações.

Na ordenada dos gráficos referentes às Figuras 10.1 a 10.3, são apresentados os valores dos deslocamentos translacionais verticais (na parte da esquerda das figuras) e das respectivas acelerações (na parte da direita das figuras). A variável tempo é ilustrada no eixo das abcissas destes gráficos.

Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 10.1 referem-se à análise do comportamento dinâmico não linear geométrico, ao longo do tempo, do modelo estrutural investigado neste estudo (Modelo Estrutural II - ME-II, Figura 5.1). Nestas análises foi considerado o caso de carregamento II (Figura 5.16) e o grau de interação entre as viga de aço e a laje de concreto é do tipo

parcial (50%), sendo que os conectores de cisalhamento são modelados como sendo do tipo studs de 19mm. As ligações viga-coluna são consideradas como sendo rígidas e as ligações viga-viga como sendo semirrígidas. Foram consideradas 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto (aço-concreto) estudado, de acordo com o modelo de carregamento I(MC-I: equação 4.1 e Figura 4.8).

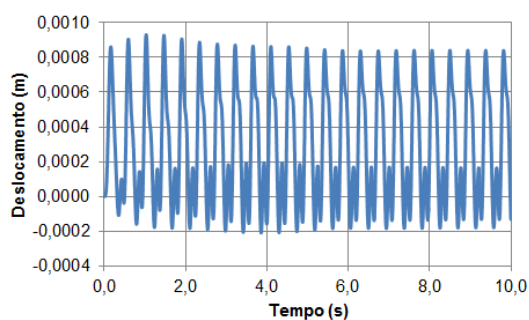
No que diz respeito aos gráficos correspondentes as Figuras 10.2 e 10.3 a única modificação se refere à modificação dos modelos de carregamento dinâmico. Na Figura 10.2 utiliza-se o modelo de carregamento II (MC-II: equação 4.3 e figura 4.11). Na Figura 10.3 foi empregado o modelo de carregamento II (MC-III: equação 4.4 e figura 4.12)

Observando as Figuras verifica-se que os sinais no tempo, apresentados nessas Figuras 10.1 a 10.3 apresentam um trecho inicial relativamente curto, da ordem de 1,0s correspondente à fase transiente dos modelos. Neste trecho dos gráficos alguns picos se apresentam com maior preponderância, mas percebe-se que a resposta dinâmica tem o seu valor amortecido, ao longo do tempo, e a fase permanente é alcançada rapidamente.

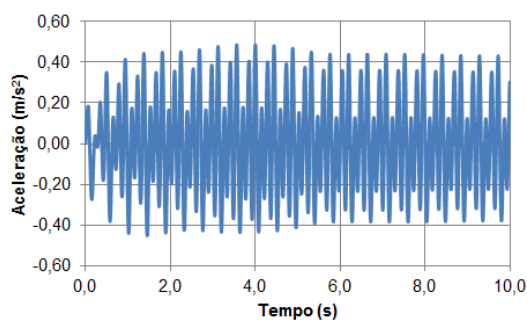
Destaca-se que, em termos qualitativos, as respostas dinâmicas dos modelos analisados, ao longo do tempo, possuem basicamente o mesmo aspecto. Deste modo, os aspectos quantitativos da resposta, associados aos valores das acelerações de pico de cada modelo estrutural, serão analisados de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 10.1 a 10.12.

O intervalo de integração utilizado nas análises numéricas foi igual a 0,002 s ($\Delta t = 2 \times 10^{-3} \text{s} = 0,002 \text{s}$), pois foi verificado que esse intervalo de integração atende convenientemente às características dinâmicas dos modelos e, também, à representação dos carregamentos propostos. Convém chamar a atenção do leitor, para o fato de que os valores das acelerações de pico foram obtidos na fase permanente da resposta do sistema.

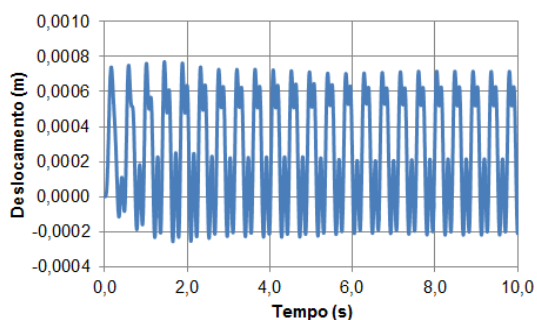
Com base nos resultados obtidos nas Figuras 10.1 a 10.3, pode-se observar que os valores dos deslocamentos e das acelerações variam de acordo com o modelo de carregamento a ser utilizado.



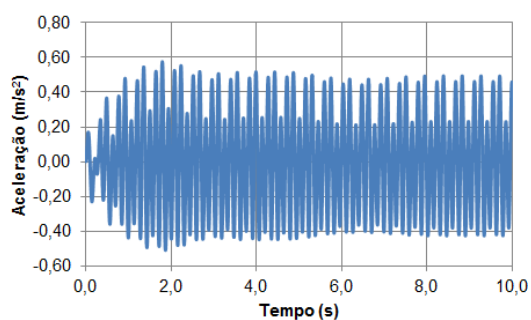
a) Deslocamento (Nó A)



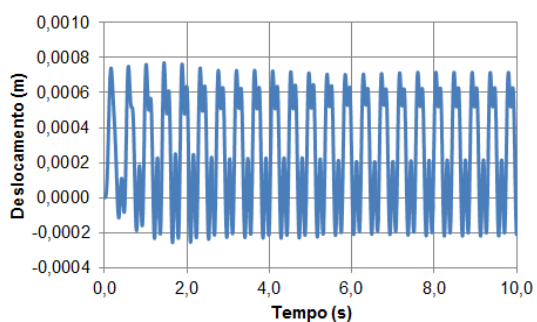
b) Aceleração (Nó A)



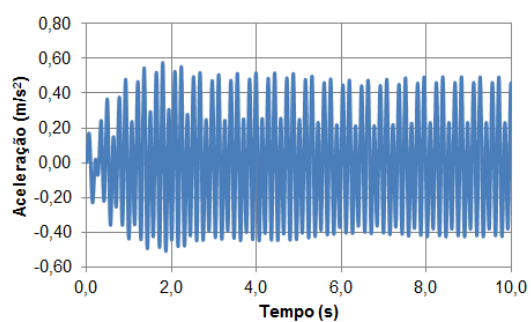
c) Deslocamento (Nó B)



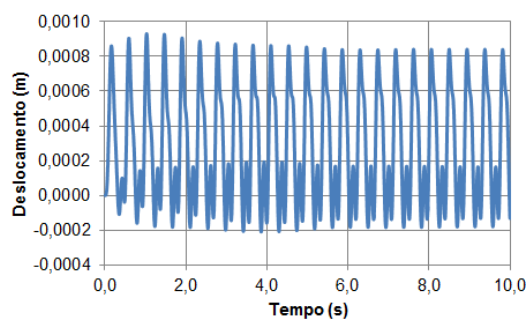
d) Aceleração (Nó B)



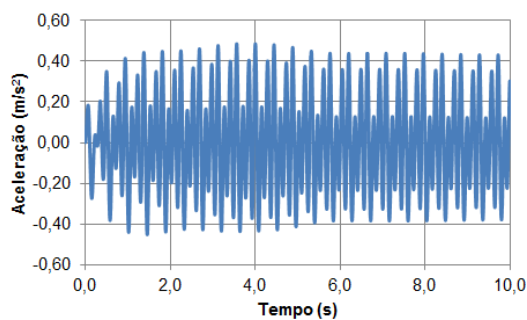
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)

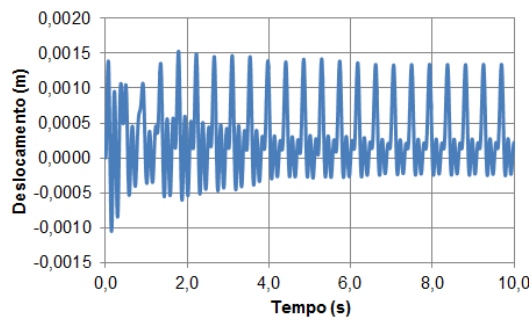


g) Deslocamento (Nó D)

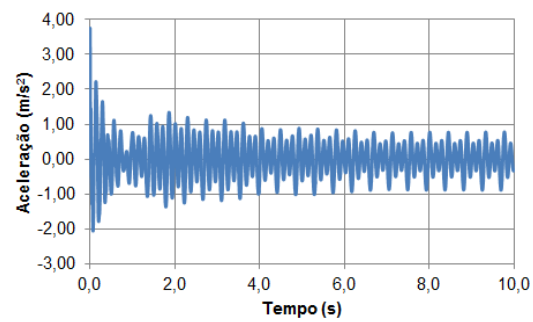


h) Aceleração (Nó D)

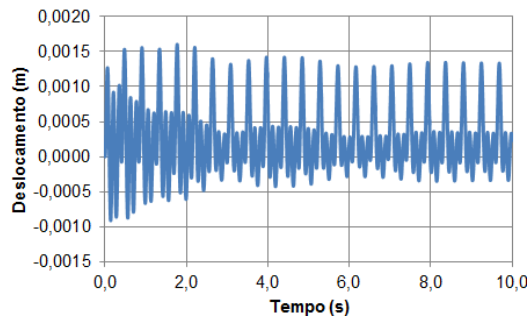
Figura 10.1 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna rígida.
Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-I, Faisca (2003)



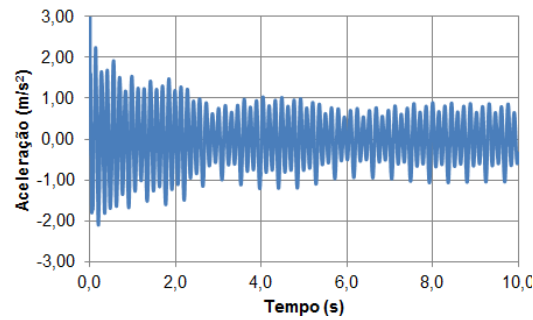
a) Deslocamento (Nó A)



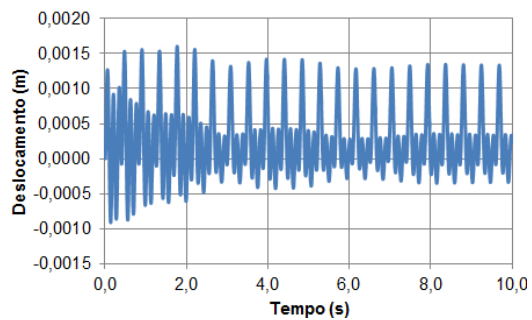
b) Aceleração (Nó A)



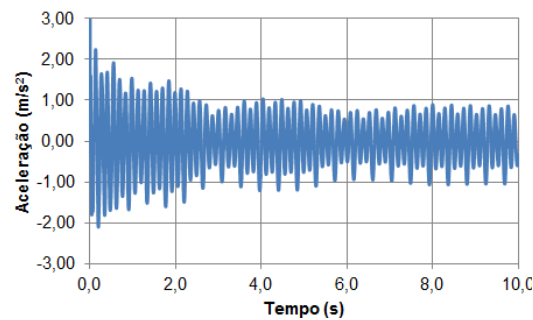
c) Deslocamento (Nó B)



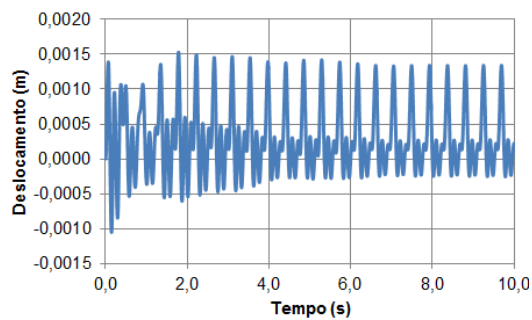
d) Aceleração (Nó B)



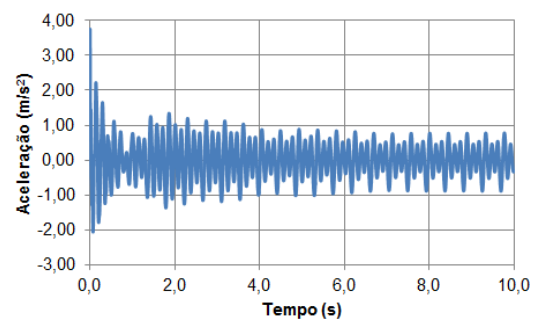
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)

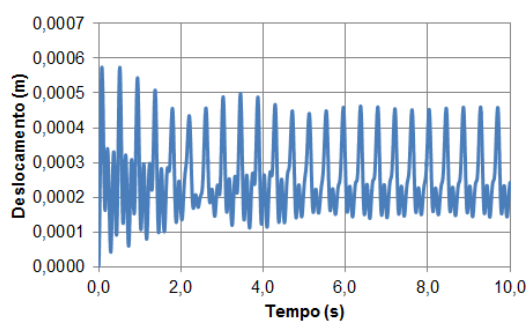


g) Deslocamento (Nó D)

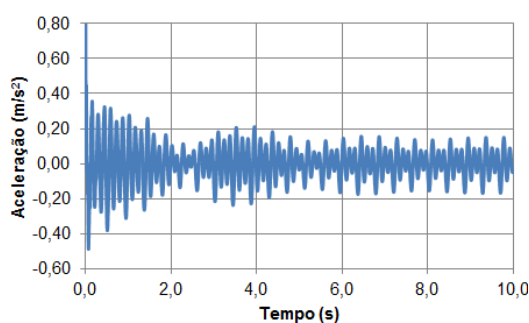


h) Aceleração (Nó D)

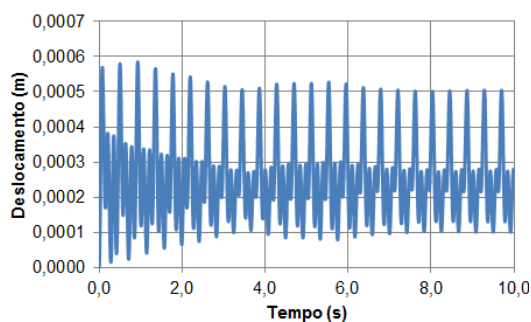
Figura 10.2 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna rígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-II, AISC (2003)



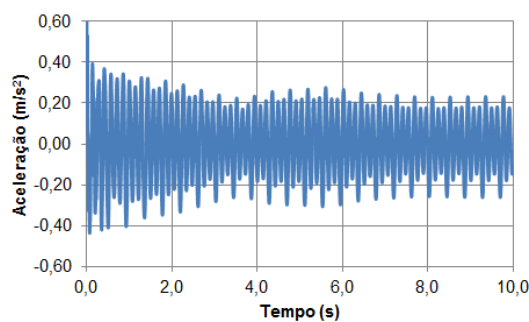
a) Deslocamento (Nó A)



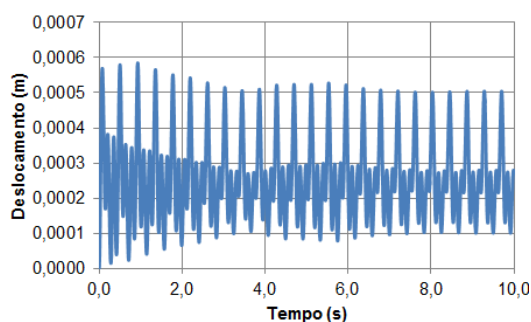
b) Aceleração (Nó A)



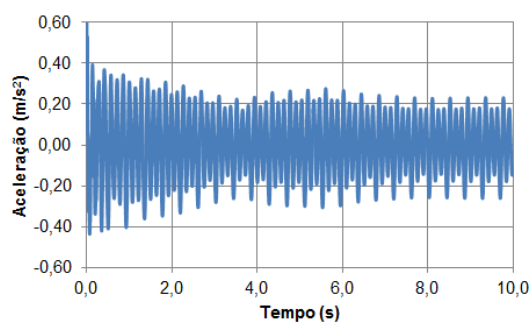
c) Deslocamento (Nó B)



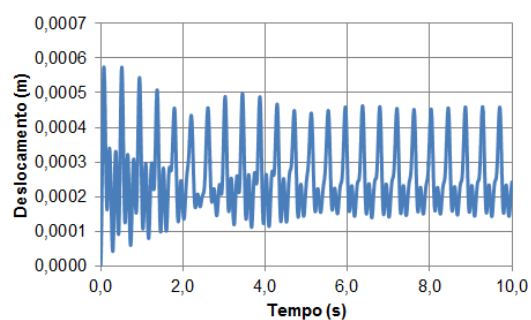
d) Aceleração (Nó B)



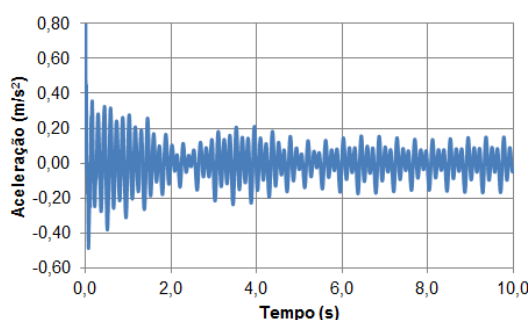
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)



g) Deslocamento (Nó D)



h) Aceleração (Nó D)

Figura 10.3 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna rígida.
Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-III, CEB (1993)

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 10.1 a 10.3, percebe-se que o pico de aceleração mais elevado encontrado na presente investigação, considerando-se um carregamento dinâmico correspondente a 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o Modelo Estrutural II, foi da ordem de $0,97\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,97\text{m/s}^2$), referente ao Nó B do modelo analisado. (Figura 5.14), quando se utiliza o modelo de carregamento MC-II (equação 4.3 e Figura 4.12).

No que diz respeito ao modelo de carregamento MC-I (equação 4.1 e Figura 4.8), o máximo valor de aceleração obtido no Nó B (Figura 5.14), foi da ordem de $0,47\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,47\text{m/s}^2$). Estes valores de aceleração de pico diminuem ainda mais quando o modelo de carregamento MC-III (equação 4.4 e Figura 4.12) foi considerado na análise, pois, para o mesmo nó analisado (Nó B - Figura 5.14) o valor máximo de aceleração foi da ordem de $0,18\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,18\text{m/s}^2$), conforme as Figuras 10.1 a 10.3.

Os sinais de força no domínio do tempo obtidos para esta análise, segundo os casos de carregamentos considerados (caso I e III), associados aos diferentes modelos de carregamentos (MC-I, MC-II e MCIII), não foram apresentados por não possuírem mudanças significativas em seu comportamento quando comparados com os sinais apresentados nas Figuras 10.1 a 10.3. De maneira geral, estes sinais são bastante semelhantes, variando apenas as amplitudes em termos de pico de aceleração devido à influência da interação aço-concreto (total e parcial), ao tipo de conector de cisalhamento (stud e perfobond) utilizado ao longo das análises e, também devido as influência das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis).

Convém chamar a atenção do leitor pelo fato, das ligações semirrígidas e flexíveis são consideradas apenas nas ligações entre as vigas principais e secundárias (ligações viga-viga). As ligações entre as vigas principais e as colunas são do tipo rígidas e, semirrígidas, considerando a maior inércia das colunas (ligações viga-coluna). E que os modelos computacionais que consideram todas as ligações como sendo rígidas (modelos rígidos), inclusive as ligações viga-viga, serviram apenas para um estudo numérico, no âmbito da análise paramétrica, pois se sabe que na prática corrente de projeto as ligações viga-viga são consideradas, geralmente, como sendo rotuladas.

Na sequência do estudo, são apresentadas tabelas com os valores das acelerações de pico dos modelos, de acordo com os casos de carregamento I a III e os modelos de carregamento (MC-I, MC-II e MC-III).

10.3

Análise das acelerações máximas ou acelerações de pico: Ligações viga-coluna rígidas

Na sequência do estudo, são apresentados os valores das acelerações de pico associadas à resposta dinâmica na fase permanente do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II, Figura 5.1). Objetiva-se avaliar o nível de conforto humano do sistema, quando submetido a atividades humanas rítmicas (saltos à vontade e ginástica aeróbica).

A resposta dinâmica do sistema foi obtida no centro dos setores identificados na Figura 5.14, de acordo com os casos de carregamentos I a III, Figuras 5.15 a 5.17, utilizando-se os modelos de carregamento (MC-I, MC-II e MC-III). O Modelo Estrutural (ME-II) analisado considera a influência da interação total e parcial, do tipo de conector utilizado na modelagem das interações, assim como, o efeito das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga, (rígida, semirrígida e flexível).

10.3.1

Saltos à vontade

Na sequência, as Tabelas 10.1 a 10.3 apresentam os valores obtidos para as acelerações de pico, a_p (m/s^2), no que tange ao Modelo Estrutural II, com 16 e 32 pessoas praticando saltos à vontade para os respectivos casos de carregamento descritos abaixo:

Caso de carregamento I, as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x2), para o carregamento dinâmico de 16 pessoas praticando saltos à vontade (Tabela 10.1), conforme ilustrado na Figura 5.15 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo Nó A no setor (1x2), Nó B no setor (2x2) e Nó C no setor (1x3).

Caso de carregamento II, as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 1x2, 1x3 e 1x4), para o carregamento dinâmico de 32 pessoas praticando Saltos à vontade (Tabelas 10.2 a 10.3), conforme ilustrado na Figura 5.16 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo Nó A no setor (1x1), Nó B no setor (1x2), Nó C no setor (1x3), Nó D no setor (1x4), Nó E no setor (2x1), Nó F no setor (2x2), Nó G no setor (2x3) e Nó H no setor (2x4).

Tabela 10.1 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas.

Saltos à vontade. Caso de carregamento I: 16 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)			Interação Parcial a_p (m/s ²)		
			Nós			Nós		
			A	B	C	A	B	C
I	Stud-19	Rígida	0,06	0,17	0,02	0,08	0,20	0,06
		Semirrígida	0,08	0,20	0,03	0,12	0,26	0,08
		Flexível	0,08	0,23	0,03	0,16	0,32	0,09
	Perfobond	Rígida	0,06	0,16	0,02	0,06	0,18	0,03
		Semirrígida	0,08	0,19	0,04	0,08	0,20	0,04
		Flexível	0,08	0,20	0,04	0,09	0,24	0,04
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)								

Tabela 10.2 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas.

Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,17	0,07	0,07	0,17	0,20	0,16	0,16	0,20
		Semirrígida	0,16	0,19	0,19	0,16	0,26	0,30	0,30	0,26
		Flexível	0,25	0,20	0,20	0,25	0,42	0,46	0,46	0,42
	Perfobond	Rígida	0,16	0,08	0,08	0,16	0,20	0,09	0,09	0,20
		Semirrígida	0,23	0,12	0,12	0,23	0,23	0,20	0,20	0,23
		Flexível	0,24	0,18	0,18	0,24	0,27	0,20	0,20	0,27
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.3 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas.

Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,02	0,04	0,04	0,02	0,11	0,11	0,11	0,11
		Semirrígida	0,10	0,04	0,04	0,10	0,17	0,04	0,04	0,17
		Flexível	0,11	0,04	0,04	0,11	0,25	0,10	0,10	0,25
	Perfobond	Rígida	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,05	0,03
		Semirrígida	0,07	0,04	0,04	0,07	0,12	0,04	0,04	0,12
		Flexível	0,12	0,05	0,05	0,12	0,13	0,04	0,04	0,13
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Observando-se os valores apresentados na Tabela 10.1 a 10.3, percebe-se, claramente, um crescimento nos valores das acelerações de pico quando são comparados os modelos com a consideração do efeito da interação parcial (50%) e com uma maior flexibilidade das ligações estruturais viga-viga (modelos flexíveis e semirrígidos), em relação aqueles com a consideração da interação total ($a_p=0,46 \text{ m/s}^2$: interação parcial com ligações flexíveis entre as vigas Tabela 10.2 e, $a_p=0,20 \text{ m/s}^2$: interação total com ligações flexíveis entre as vigas Tabela 10.2). Estas diferenças são da ordem de 56%.

Em termos do comportamento geral verifica-se que considerando-se o piso misto investigado e, ainda, para os valores de rigidez inicial dos conectores adotados nesta investigação (Studs e Perfobonds), com pessoas praticando saltos à vontade, de acordo com o modelo de carregamento I (MC-I), todas as acelerações máximas (aceleração de pico) na fase permanente foram inferiores ao limite especificado nas normas e recomendações de projetos ($a_{lim} = 0,50 \text{ m/s}^2$) (ISO 2631-2, 1989; Murray *et al.*, 2003). Explica-se esses valores pelo fato das atividades humanas rítmicas de saltos à vontade ser uma atividade pouca sincronizada.

10.3.2 Ginástica aeróbica

Prosseguindo com as análises, nas Tabelas 10.4 a 10.8, são apresentados os valores das acelerações de pico, $a_p \text{ (m/s}^2\text{)}$, obtidas em cada setor do piso analisado (Figura 5.14), para as atividades humanas rítmicas de ginástica aeróbica. Nesta análise os três modelos de carregamento (equações 4.1, 4.3 e 4.4), descritos no capítulo 4, foram efetivamente utilizados, para os respectivos casos de carregamento descritos abaixo:

Caso de carregamento I, as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x2), para o carregamento dinâmico de 16 pessoas praticando ginástica aeróbica (Tabela 10.4), conforme ilustrado na Figura 5.15 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo Nó A no setor (1x2), Nó B no setor (2x2) e Nó C no setor (1x3).

Caso de carregamento II, as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 1x2, 1x3 e 1x4), para o carregamento dinâmico de 32 pessoas praticando ginástica aeróbica (Tabelas 10.5 a 10.6), conforme ilustrado na Figura 5.16 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de

resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo Nó A no setor (1x1), Nó B no setor (1x2), Nó C no setor (1x3), Nó D no setor (1x4), Nó E no setor (2x1), Nó F no setor (2x2), Nó G no setor (2x3) e Nó H no setor (2x4).

Caso de carregamento III, as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 2x1, 3x1 e 4x1), para o carregamento dinâmico de 32 pessoas praticando ginástica aeróbica (Tabelas 10.7 a 10.8), conforme ilustrado na Figura 5.17 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo Nó A no setor (1x1), Nó B no setor (2x1), Nó C no setor (3x1), Nó D no setor (4x1), Nó E no setor (1x2), Nó F no setor (2x2), Nó G no setor (3x2) e Nó H no setor (4x2).

Tabela 10.4 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento I: 16 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)			Interação Parcial a_p (m/s ²)		
			Nós			Nós		
			A	B	C	A	B	C
I	Stud-19	Rígida	0,10	0,20	0,02	0,13	0,30	0,09
		Semirrígida	0,13	0,27	0,04	0,20	0,37	0,11
		Flexível	0,13	0,33	0,04	0,26	0,50	0,14
	Perfobond	Rígida	0,10	0,20	0,02	0,12	0,24	0,04
		Semirrígida	0,13	0,25	0,10	0,14	0,30	0,03
		Flexível	0,14	0,3	0,05	0,14	0,37	0,06
II	Stud-19	Rígida	0,13	0,30	0,10	0,20	0,40	0,20
		Semirrígida	0,20	0,37	0,15	0,34	0,77	0,21
		Flexível	0,25	0,40	0,2	0,50	1,00	0,25
	Perfobond	Rígida	0,14	0,23	0,04	0,17	0,25	0,08
		Semirrígida	0,20	0,31	0,15	0,26	0,40	0,16
		Flexível	0,22	0,37	0,15	0,29	0,58	0,21
III	Stud-19	Rígida	0,05	0,07	0,05	0,06	0,10	0,07
		Semirrígida	0,06	0,15	0,05	0,12	0,25	0,09
		Flexível	0,08	0,20	0,06	0,16	0,26	0,11
	Perfobond	Rígida	0,06	0,07	0,05	0,07	0,09	0,06
		Semirrígida	0,07	0,11	0,06	0,09	0,15	0,08
		Flexível	0,08	0,13	0,07	0,11	0,22	0,10
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0.5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray et al. 2003)								

Tabela 10.5 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas.

Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,23	0,12	0,12	0,23	0,30	0,25	0,25	0,30
		Semirrígida	0,30	0,31	0,31	0,30	0,42	0,47	0,47	0,42
		Flexível	0,35	0,34	0,34	0,35	0,50	0,60	0,60	0,50
	Perfobond	Rígida	0,26	0,13	0,13	0,26	0,31	0,14	0,14	0,31
		Semirrígida	0,35	0,20	0,20	0,35	0,37	0,32	0,32	0,37
		Flexível	0,37	0,30	0,30	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40
II	Stud-19	Rígida	0,35	0,10	0,10	0,35	0,50	0,47	0,47	0,50
		Semirrígida	0,40	0,46	0,46	0,40	0,79	0,97	0,97	0,79
		Flexível	0,60	0,57	0,57	0,60	1,32	1,35	1,35	1,32
	Perfobond	Rígida	0,28	0,10	0,10	0,28	0,42	0,38	0,38	0,38
		Semirrígida	0,32	0,35	0,35	0,32	0,60	0,81	0,81	0,81
		Flexível	0,51	0,45	0,45	0,51	1,00	1,05	1,05	1,05
III	Stud-19	Rígida	0,10	0,10	0,10	0,10	0,16	0,10	0,10	0,16
		Semirrígida	0,14	0,18	0,18	0,14	0,18	0,20	0,20	0,18
		Flexível	0,18	0,21	0,21	0,18	0,22	0,27	0,27	0,22
	Perfobond	Rígida	0,10	0,09	0,09	0,10	0,13	0,10	0,10	0,13
		Semirrígida	0,11	0,14	0,14	0,11	0,15	0,16	0,16	0,15
		Flexível	0,14	0,16	0,16	0,14	0,20	0,21	0,21	0,20
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.6 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas.

Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,02	0,06	0,06	0,02	0,20	0,04	0,04	0,20
		Semirrígida	0,20	0,05	0,05	0,20	0,31	0,16	0,16	0,31
		Flexível	0,21	0,08	0,08	0,21	0,40	0,17	0,17	0,40
	Perfobond	Rígida	0,02	0,06	0,06	0,02	0,02	0,06	0,06	0,02
		Semirrígida	0,13	0,06	0,06	0,13	0,21	0,07	0,07	0,21
		Flexível	0,20	0,07	0,07	0,20	0,22	0,08	0,08	0,22
II	Stud-19	Rígida	0,03	0,08	0,08	0,03	0,36	0,30	0,30	0,36
		Semirrígida	0,34	0,12	0,12	0,34	0,54	0,39	0,39	0,54
		Flexível	0,37	0,13	0,13	0,37	0,80	0,70	0,70	0,80
	Perfobond	Rígida	0,04	0,05	0,05	0,04	0,30	0,23	0,23	0,30
		Semirrígida	0,30	0,13	0,13	0,30	0,45	0,33	0,33	0,45
		Flexível	0,32	0,13	0,13	0,32	0,62	0,60	0,60	0,62
III	Stud-19	Rígida	0,08	0,04	0,04	0,08	0,09	0,05	0,05	0,09
		Semirrígida	0,11	0,06	0,06	0,11	0,12	0,10	0,10	0,12
		Flexível	0,15	0,07	0,07	0,15	0,16	0,12	0,12	0,16
	Perfobond	Rígida	0,08	0,05	0,05	0,08	0,08	0,04	0,04	0,08
		Semirrígida	0,11	0,07	0,07	0,11	0,11	0,09	0,09	0,11
		Flexível	0,12	0,07	0,07	0,12	0,16	0,10	0,10	0,16
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Convém destacar que os valores das acelerações apresentadas nas Tabelas 10.7 e 10.8, referem-se apenas ao modelo de carregamento I (MC-I), pois, trata-se de um modelo de carregamento cujos parâmetros foram medidas e avaliados experimentalmente no laboratório, utiliza o CD (coeficiente de defasagem), que considera o grau de sincronismo entre as pessoas, fornece uma proposta mais econômica e, dependendo de cada caso, mais realista na avaliação de sistemas estruturais. Também se pode verificar pelas Tabelas 10.1 a 10.6 que é um modelo de carregamento com pouca dispersão dos resultados das acelerações.

Tabela 10.7 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,21	0,20	0,20	0,21	0,28	0,43	0,43	0,28
		Semirrígida	0,30	0,32	0,32	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40
		Flexível	0,30	0,41	0,41	0,3	0,60	0,48	0,48	0,60
	Perfobond	Rígida	0,22	0,20	0,20	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23
		Semirrígida	0,31	0,40	0,40	0,31	0,32	0,41	0,41	0,32
		Flexível	0,31	0,42	0,42	0,31	0,50	0,47	0,47	0,50
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.8 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,09	0,15	0,15	0,09	0,20	0,21	0,21	0,20
		Semirrígida	0,15	0,25	0,25	0,15	0,24	0,23	0,23	0,24
		Flexível	0,16	0,28	0,28	0,16	0,43	0,30	0,30	0,43
	Perfobond	Rígida	0,14	0,17	0,17	0,14	0,15	0,19	0,19	0,15
		Semirrígida	0,16	0,25	0,25	0,16	0,17	0,28	0,28	0,17
		Flexível	0,16	0,26	0,26	0,16	0,22	0,31	0,31	0,22
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Analisando-se os valores das acelerações de pico (Tabelas 10.1 a 10.8), percebe-se que o valor máximo encontrado no presente estudo foi da ordem de $1,35\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,35\text{m/s}^2$, Tabela 10.5), no que diz respeito ao modelo com

interação parcial, considerando as ligações viga-viga como sendo flexíveis, referente ao modelo de carregamento MC-II. Este valor de aceleração máxima foi obtido no centro do painel da laje onde foi aplicado o carregamento dinâmico associado a 32 pessoas (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14).

Foi verificado que quando a interação aço-concreto foi considerada como sendo total, o valor máximo de aceleração no referido painel (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14) foi reduzido para $0,57\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,57\text{m/s}^2$, Tabela 10.5), uma diferença percentual de 57%, constatando-se a influência das interações sobre a resposta dinâmica não linear geométrica do piso.

Quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo rígidas, o valor máximo de aceleração no referido painel (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14) foi reduzido para $0,47\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,47\text{m/s}^2$, Tabela 10.5), isto é, uma diferença percentual em torno dos 65%, Mostrando desta forma a influência das ligações viga-viga na resposta dinâmica não linear do piso misto.

De outra forma, quando se utiliza o modelo de carregamento MC-I, o máximo valor de aceleração obtido no Nó B e C (Figura 5.14), foi da ordem de $0,61\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,61\text{m/s}^2$, Tabela 10.5). Estes valores de aceleração de pico diminuem ainda mais quando o modelo de carregamento MC-III foi considerado na análise, pois, para os mesmos nós analisados (Nó B e C - Figura 5.14) o valor máximo de aceleração foi da ordem de $0,27\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,27\text{m/s}^2$, Tabela 10.5). Deste modo, verifica-se uma diferença percentual em torno dos 55% entre MC-I, MC-II e MCIII.

No que diz respeito ao tipo de conector utilizado na modelagem das interações (total e parcial), com mesmo carregamento dinâmico, nas mesmas condições e nos mesmos Nós (Nó B e C), a aceleração de pico mais elevado, foi igual a $1,05\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,05\text{m/s}^2$, Tabela 10.5), uma diferença percentual de 22%, contata-se desta forma o comportamento mais rígido dos conectores perfobond em relação aos studs.

Considerando-se os valores das frequências naturais (ver Tabela 7.7) do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II, Figura 5.1), correspondentes aos modos de vibração com preponderância das amplitudes modais das lajes de concreto do piso, constata-se que estes valores encontram-se relativamente próximos da frequência do terceiro harmônico da ação dinâmica humana rítmica ($f = 3 \times 2\text{Hz} = 6\text{Hz}$), o que ocasiona valores elevados para as acelerações, em

determinadas situações, em consonância com o aumento do número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso.

Com base nos valores de aceleração de pico encontrados, correspondente a fase permanente da resposta do modelo estrutural estudado, foi possível observar que estes valores são mais elevados quando se considera o efeito da interação parcial e quando as ligações viga-viga do piso misto (aço-concreto) são consideradas como flexíveis ou semirrígidas. Onde na maioria dos casos, com trinta e duas pessoas praticando ginástica aeróbica, as acelerações de pico ultrapassam os limites para conforto humano, de acordo com normas e recomendações de projeto ($a_{lim} = 0,50m/s^2$), (ISO 2631-2 1989; Murray *et al.* 2003), Tabelas 10.1 a 10.8.

10.4

Análise no domínio do tempo: Ligações viga-coluna semirrígidas

Prosseguindo com as análises, com o objetivo de avaliar o nível de conforto humano do piso misto em estudo, de acordo com a metodologia de análise proposta, considerando-se as ligações viga-coluna como sendo semirrígidas, no eixo de maior inércia das colunas, as Figuras 10.4 a 10.6 apresentam a resposta dinâmica não linear geométrica do piso misto, ao longo do tempo, em termo dos deslocamentos translacionais verticais e das acelerações do modelo estrutural em estudo (Modelo Estrutural II - ME-II, Figura 5.1), a fim de avaliar o comportamento dinâmico do piso misto (aço-concreto), quando submetido a atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações.

Deste modo, os resultados apresentados nos gráficos da Figura 10.4 referem-se à análise do comportamento dinâmico não linear geométrico, ao longo do tempo, do modelo estrutural investigado neste estudo (Modelo Estrutural II - ME-II, Figura 5.1). Nestas análises foi considerado o caso de carregamento II (Figura 5.16) e o grau de interação entre as viga de aço e a laje de concreto é do tipo parcial (50%), sendo que os conectores de cisalhamento são modelados como sendo do tipo studs de 19mm. As ligações viga-coluna são consideradas como sendo semirrígidas e as ligações viga-viga como sendo semirrígidas. Foram consideradas 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto (aço-concreto) estudado, de acordo com o modelo de carregamento I(MC-I: equação 4.1 e Figura 4.8).

No que diz respeito aos gráficos correspondentes as Figuras 10.4 e 10.6 a única modificação se refere à modificação dos modelos de carregamento dinâmico. Na Figura 10.5 utiliza-se o modelo de carregamento II (MC-II: equação 4.3 e figura 4.11). Na Figura 10.6 foi empregado o modelo de carregamento II (MC-III: equação 4.4 e figura 4.12).

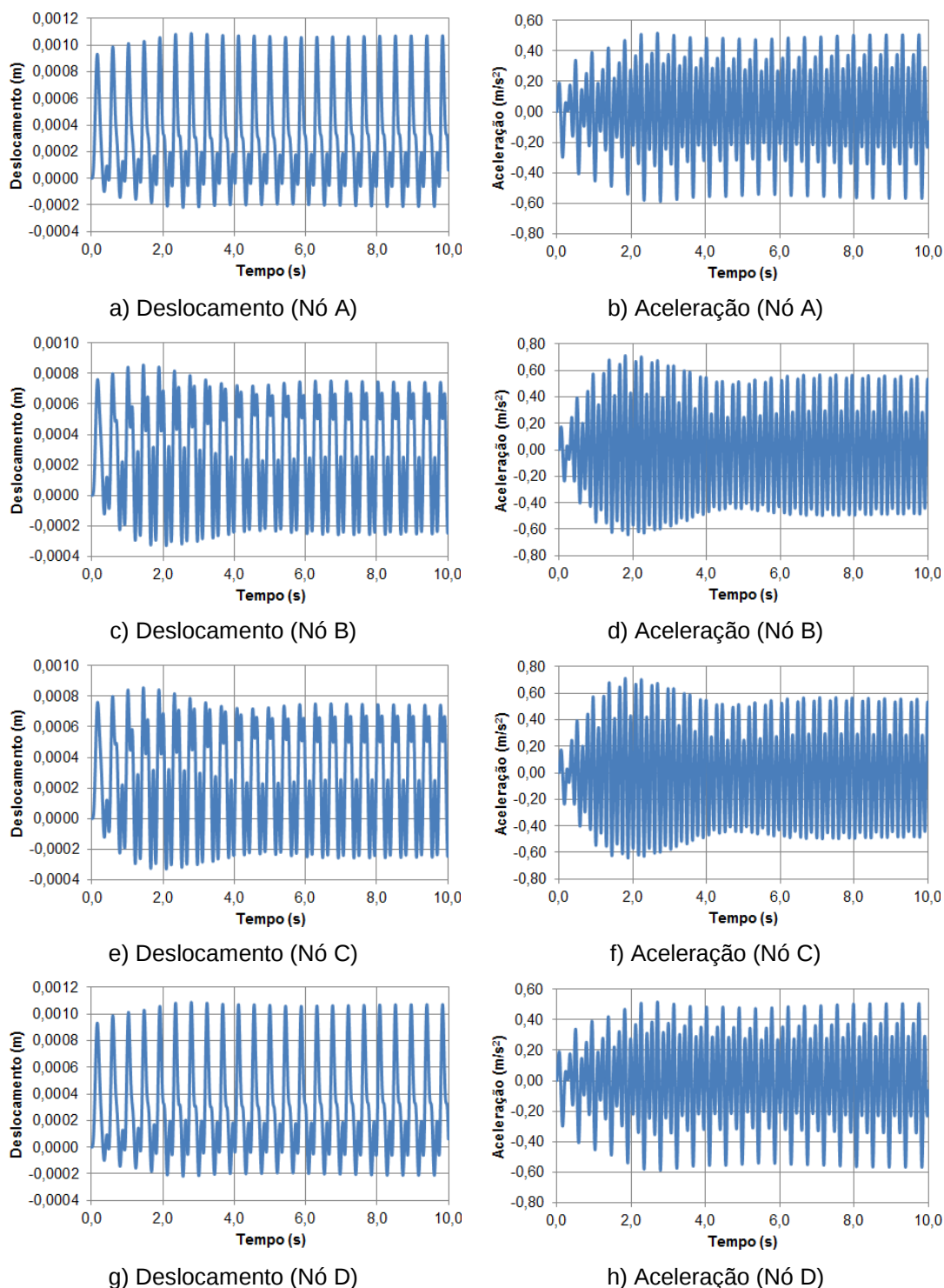
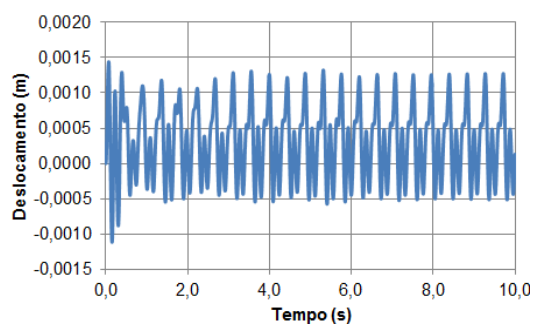
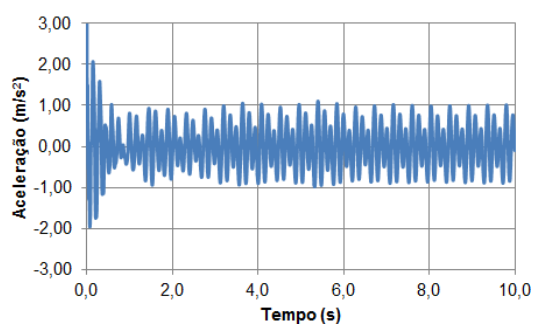


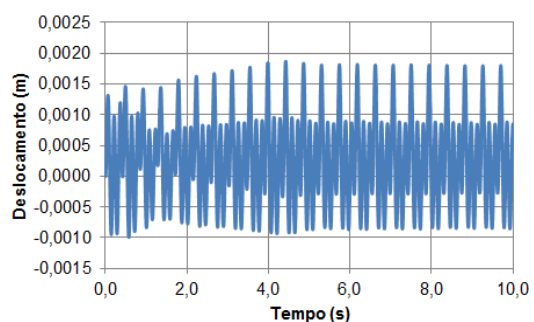
Figura 10.4 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-I, Faisca (2003)



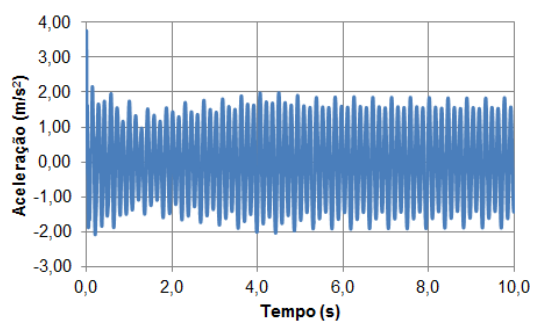
a) Deslocamento (Nó A)



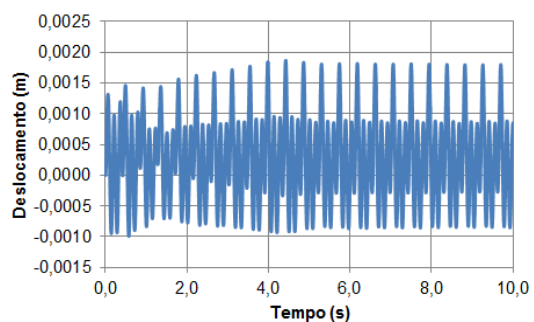
b) Aceleração (Nó A)



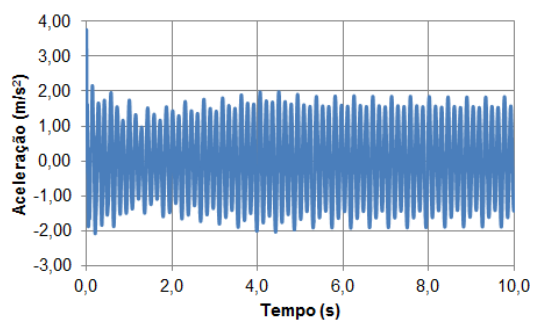
c) Deslocamento (Nó B)



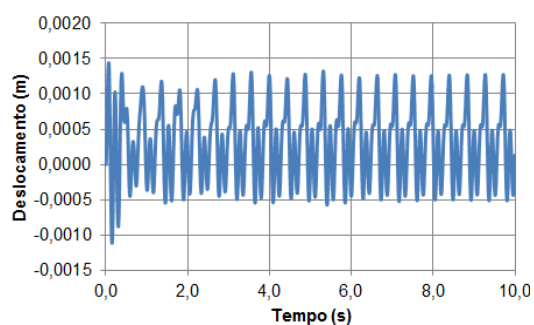
d) Aceleração (Nó B)



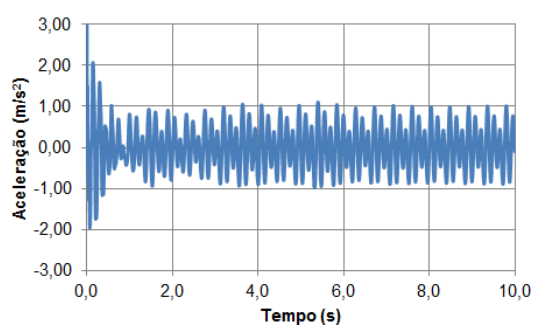
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)



g) Deslocamento (Nó D)



h) Aceleração (Nó D)

Figura 10.5 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-II, AISC (2003)

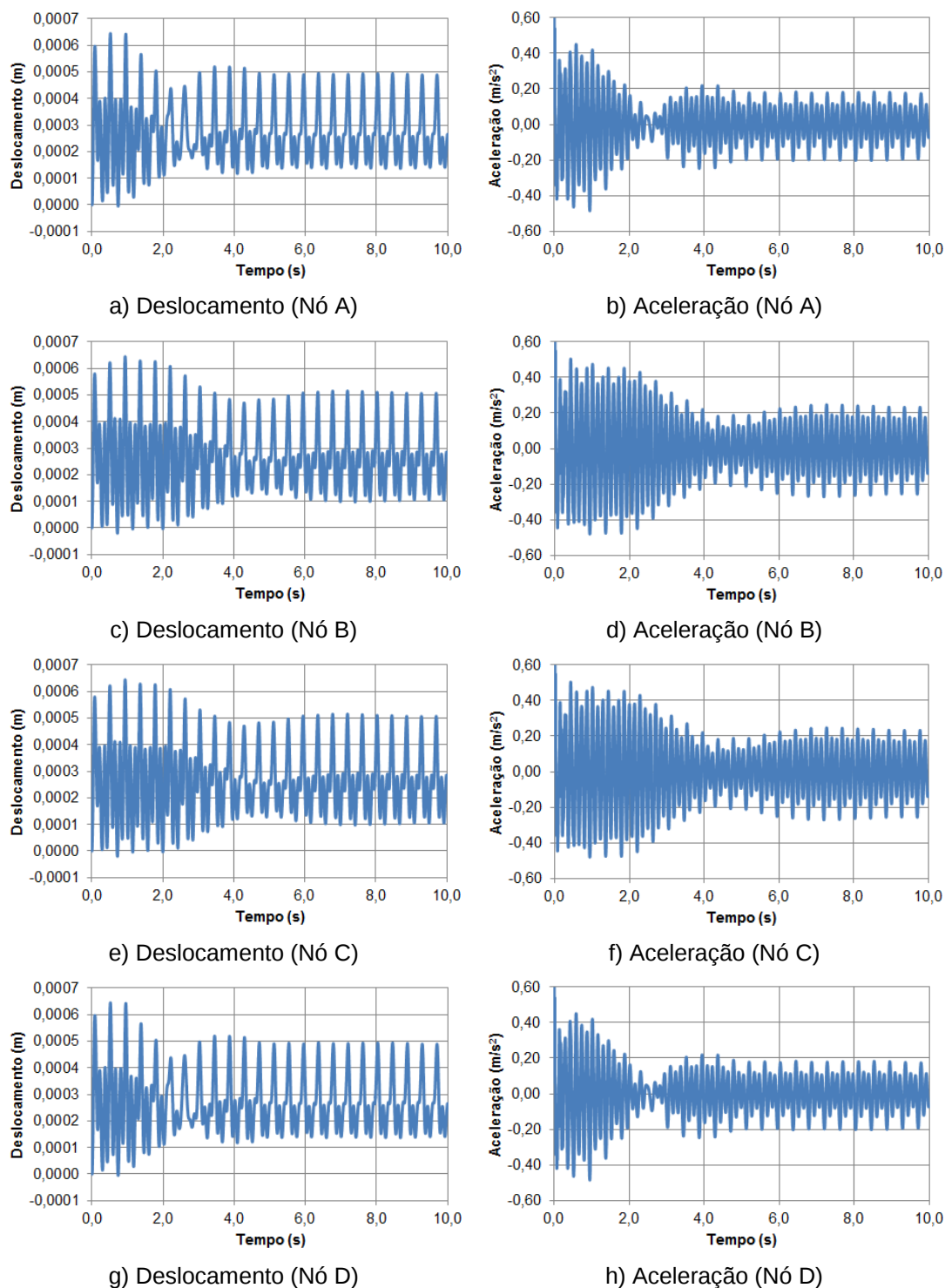


Figura 10.6 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-III, CEB (1993)

Observando as Figuras 10.4 a 10.6, verifica-se também que os sinais da força no domínio do tempo, apresentam um trecho inicial relativamente curto, da ordem de 1,0s correspondente à fase transiente dos modelos. Neste trecho dos gráficos alguns picos se apresentam com maior preponderância, mas percebe-se que a resposta dinâmica tem o seu valor amortecido, ao longo do tempo, e a

fase permanente é alcançada rapidamente. Convém chamar a atenção do leitor, para o fato de que os valores das acelerações de pico foram obtidos na fase permanente da resposta do sistema. Figuras 10.4 a 10.6.

Ressalta-se que no lado esquerdo das Figuras 10.4 a 10.6 são apresentados os gráficos dos deslocamentos translacionais verticais e na parte da direita às respectivas acelerações. A variável tempo é ilustrada no eixo das abscissas destes gráficos.

Observando as Figuras 10.4 a 10.6, constata-se novamente a influência do modelo de carregamento na resposta dinâmica não linear geométrica do sistema de piso misto. Percebe-se que o pico de aceleração mais elevado encontrado na presente investigação, considerando-se um carregamento dinâmico correspondente a 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o Modelo Estrutural II, foi da ordem de $1,70\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,70\text{m/s}^2$), referente ao Nó B do modelo analisado. (Figura 5.14), quando se utiliza o modelo de carregamento MC-II (equação 4.3 e Figura 4.11).

No que diz respeito ao modelo de carregamento MC-I (equação 4.1 e Figura 4.8), o máximo valor de aceleração obtido no Nó B (Figura 5.14), foi da ordem de $0,50\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,50\text{m/s}^2$). Estes valores de aceleração de pico diminuem ainda mais quando o modelo de carregamento MC-III (equação 4.4 e Figura 4.12) foi considerado na análise, pois, para o mesmo nó analisado (Nó B - Figura 5.14) o valor máximo de aceleração foi da ordem de $0,20\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,20\text{m/s}^2$), conforme as Figuras 10.4 a 10.6.

Observando o Nó B da Figura 10.2 e o mesmo Nó B na Figura 10.5, verifica-se claramente uma tendência de aumento das acelerações quando a semi-rigidez das ligações estruturais entre as vigas e as colunas (eixo de maior inércia) é considerada. Neste caso o maior pico da aceleração foi da ordem de $1,70\text{m/s}^2$ (ligação viga-coluna semirrígida, referente ao Nó B da Figura 10.5) e de $0,97\text{m/s}^2$ (ligação viga-coluna rígida, referente ao Nó B da Figura 10.2).

Convém ressaltar, que os sinais de força no domínio do tempo obtidos para esta análise, segundo os casos de carregamentos considerados (caso I e III), associados aos diferentes modelos de carregamentos (MC-I, MC-II e MCIII), não foram apresentados por não possuírem mudanças significativas em seu comportamento quando comparados com os sinais apresentados nas Figuras 10.4 a 10.6. De maneira geral, estes sinais são bastante semelhantes, variando apenas as amplitudes em termos de pico de aceleração devido à influência da interação aço-concreto (total e parcial), do tipo de conector de cisalhamento (stud e perfobond) utilizado ao longo das análises e, também devido as

influência das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis).

Na sequência do estudo, de forma a avaliar a questão quantitativa referente à resposta do sistema, são apresentadas Tabelas com os valores os valores das acelerações de pico dos modelos, calculados na fase permanente da resposta do sistema quando submetidos a atividades dinâmicas, de acordo com os casos de carregamento I a III e os modelos de carregamento (MC-I, MC-II e MC-III).

10.5

Análise das acelerações máximas ou acelerações de pico: Ligações viga-coluna semirrígidas

Na sequência do texto, as Tabelas 10.9 a 10.16 apresentam os valores das acelerações de pico dos modelos estruturais analisados, com o objetivo de avaliar o nível de conforto humano dos modelos estruturais mistos (aço-concreto), quando submetidas a atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações.

As respostas dinâmicas foram obtidas no centro dos setores identificados na Figura 5.14, de acordo com os casos de carregamento I, II e III, utilizando-se os modelos de carregamento (MC-I, MC-II e MC-III). O Modelo Estrutural (ME-II) analisado considera a influência da interação total e parcial, do tipo de conector utilizado na modelagem das interações, assim como, o efeito das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga, (rígida, semirrígida e flexível).

10.5.1

Saltos à vontade

Em seguida, as Tabelas 10.9 a 10.11 apresentam os valores obtidos para as acelerações de pico, a_p (m/s^2), no que tange ao Modelo Estrutural II, com 16 e 32 pessoas praticando saltos à vontade para os casos de carregamento descritos no item 10.3.1.

Tabela 10.9 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento I: 16 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)			Interação Parcial a_p (m/s ²)		
			Nós			Nós		
			A	B	C	A	B	C
MC-I	Stud-19	Rígida	0,08	0,18	0,06	0,11	0,20	0,06
		Semirrígida	0,13	0,24	0,06	0,17	0,38	0,07
		Flexível	0,17	0,35	0,07	0,20	0,50	0,07
	Perfobond	Rígida	0,05	0,16	0,04	0,05	0,20	0,04
		Semirrígida	0,08	0,23	0,06	0,13	0,25	0,07
		Flexível	0,14	0,27	0,08	0,18	0,36	0,08
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)								

Tabela 10.10 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,22	0,19	0,19	0,22	0,26	0,21	0,21	0,26
		Semirrígida	0,35	0,24	0,24	0,35	0,37	0,40	0,40	0,37
		Flexível	0,36	0,33	0,33	0,36	0,60	0,61	0,61	0,60
	Perfobond	Rígida	0,17	0,10	0,10	0,17	0,22	0,11	0,11	0,22
		Semirrígida	0,21	0,20	0,20	0,21	0,33	0,26	0,26	0,33
		Flexível	0,22	0,22	0,22	0,22	0,35	0,40	0,40	0,35
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.11 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,10	0,09	0,09	0,10	0,18	0,04	0,04	0,18
		Semirrígida	0,16	0,09	0,09	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17
		Flexível	0,16	0,30	0,30	0,16	0,17	0,33	0,33	0,17
	Perfobond	Rígida	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,08	0,08	0,04
		Semirrígida	0,11	0,06	0,06	0,11	0,15	0,08	0,08	0,15
		Flexível	0,12	0,06	0,06	0,12	0,18	0,10	0,10	0,18
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Observando-se os valores apresentados na Tabela 10.9 a 10.11, percebe-se, claramente, um crescimento nos valores das acelerações de pico quando são comparados os modelos em que se considere o efeito da interação parcial (50%) e com uma maior flexibilidade das ligações estruturais viga-viga (modelos flexíveis e semirrígidos), em relação aqueles em que a interação é considerada como sendo total ($a_p=0,61 \text{ m/s}^2$: interação parcial com ligações flexíveis entre as vigas Tabela 10.10 e, $a_p=0,33 \text{ m/s}^2$: interação total com ligações flexíveis entre as vigas Tabela 10.10). Estas diferenças são da ordem de 45%.

Foi observado nas Tabelas 10.9 a 10.11, que existe uma tendência de crescimento nos valores das acelerações de pico do modelo quando são comparados os modelos compostos por ligações viga-coluna rígidas em relação aqueles em que as ligações viga-coluna são semirrígidas.

Verifica-se, ainda, que em alguns dos os casos estudados com interação parcial e com ligações entre as vigas flexíveis os critérios estabelecidos para conforto humano são violados, de acordo com normas e recomendações de projeto. ($a_{lim} = 0,50 \text{ m/s}^2$) (ISO 2631-2, 1989; Murray *et al.*, 2003). Mesmo considerando os saltos à vontade uma atividade humana rítmica pouca sincronizada, Tabelas 10.9 a 10.11.

10.5.2

Ginástica aeróbica

Dando sequência as análises, apresentam-se nas Tabelas 10.12 a 10.14, os valores das acelerações de pico, a_p (m/s^2), obtidas em cada setor do piso analisado (Figura 5.14), para as atividades humanas rítmicas de ginástica aeróbica. Nesta análise os três modelos de carregamento (equações 4.1, 4.3 e 4.4), descritos no capítulo 4, foram efetivamente utilizados, para os respectivos casos de carregamento descritos no item 10.3.2.

Tabela 10.12 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento I: 16 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)			Interação Parcial a_p (m/s ²)		
			Nós			Nós		
			A	B	C	A	B	C
I	Stud-19	Rígida	0,11	0,29	0,07	0,17	0,30	0,08
		Semirrígida	0,20	0,35	0,10	0,27	0,55	0,11
		Flexível	0,25	0,50	0,11	0,31	0,73	0,12
	Perfobond	Rígida	0,07	0,20	0,04	0,08	0,26	0,05
		Semirrígida	0,14	0,33	0,07	0,20	0,36	0,10
		Flexível	0,22	0,40	0,12	0,28	0,54	0,13
II	Stud-19	Rígida	0,22	0,34	0,16	0,31	0,45	0,20
		Semirrígida	0,38	0,54	0,19	0,47	0,88	0,21
		Flexível	0,50	0,96	0,20	0,58	1,21	0,23
	Perfobond	Rígida	0,16	0,22	0,10	0,21	0,26	0,19
		Semirrígida	0,28	0,43	0,13	0,34	0,66	0,20
		Flexível	0,34	0,53	0,20	0,50	1,00	0,22
III	Stud-19	Rígida	0,07	0,10	0,08	0,09	0,13	0,08
		Semirrígida	0,13	0,25	0,09	0,15	0,28	0,13
		Flexível	0,16	0,30	0,11	0,16	0,33	0,15
	Perfobond	Rígida	0,03	0,08	0,03	0,06	0,10	0,04
		Semirrígida	0,10	0,20	0,04	0,15	0,25	0,05
		Flexível	0,14	0,25	0,05	0,16	0,30	0,09
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)								

Tabela 10.13 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,30	0,18	0,18	0,30	0,36	0,35	0,35	0,36
		Semirrígida	0,41	0,40	0,40	0,41	0,51	0,50	0,50	0,51
		Flexível	0,54	0,50	0,50	0,54	0,58	0,65	0,65	0,58
	Perfobond	Rígida	0,30	0,13	0,13	0,30	0,38	0,15	0,15	0,38
		Semirrígida	0,24	0,31	0,31	0,24	0,52	0,44	0,44	0,52
		Flexível	0,34	0,36	0,36	0,34	0,55	0,54	0,54	0,55
II	Stud-19	Rígida	0,60	0,40	0,40	0,71	0,71	0,59	0,59	0,71
		Semirrígida	1,00	0,67	0,67	1,00	1,00	1,70	1,70	1,00
		Flexível	1,07	1,00	1,00	1,07	1,32	1,77	1,77	1,32
	Perfobond	Rígida	0,45	0,33	0,33	0,45	0,51	0,42	0,42	0,51
		Semirrígida	0,74	0,40	0,40	0,74	0,71	1,05	1,05	0,71
		Flexível	0,82	0,83	0,83	0,82	1,02	1,15	1,15	1,02
III	Stud-19	Rígida	0,18	0,20	0,20	0,18	0,19	0,21	0,21	0,19
		Semirrígida	0,20	0,22	0,22	0,20	0,19	0,24	0,24	0,19
		Flexível	0,20	0,27	0,27	0,20	0,27	0,30	0,30	0,27
	Perfobond	Rígida	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15
		Semirrígida	0,15	0,19	0,19	0,15	0,16	0,17	0,17	0,16
		Flexível	0,17	0,21	0,21	0,17	0,21	0,24	0,24	0,21
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.14 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,17	0,15	0,15	0,17	0,18	0,04	0,04	0,18
		Semirrígida	0,30	0,04	0,04	0,30	0,30	0,27	0,27	0,30
		Flexível	0,30	0,05	0,05	0,30	0,32	0,28	0,28	0,32
	Perfobond	Rígida	0,03	0,05	0,05	0,03	0,05	0,10	0,10	0,05
		Semirrígida	0,20	0,06	0,06	0,20	0,32	0,06	0,06	0,32
		Flexível	0,21	0,05	0,05	0,21	0,25	0,08	0,08	0,25
II	Stud-19	Rígida	0,33	0,25	0,25	0,33	0,50	0,30	0,30	0,50
		Semirrígida	0,51	0,42	0,42	0,51	0,55	0,51	0,51	0,55
		Flexível	0,53	0,21	0,21	0,53	0,63	0,52	0,52	0,63
	Perfobond	Rígida	0,20	0,19	0,19	0,20	0,41	0,21	0,21	0,41
		Semirrígida	0,36	0,32	0,32	0,36	0,46	0,39	0,39	0,46
		Flexível	0,38	0,16	0,16	0,38	0,51	0,42	0,42	0,51
III	Stud-19	Rígida	0,09	0,08	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10
		Semirrígida	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,11	0,11	0,12
		Flexível	0,20	0,12	0,12	0,20	0,16	0,14	0,14	0,16
	Perfobond	Rígida	0,08	0,06	0,06	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09
		Semirrígida	0,10	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11
		Flexível	0,14	0,10	0,10	0,14	0,16	0,12	0,12	0,16
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Mais uma vez, convém destacar que os valores das acelerações apresentadas nas Tabelas 10.15 e 10.16, referem-se apenas ao modelo de carregamento I (MC-I), pois, trata-se de um modelo de carregamento cujos parâmetros foram medidos e avaliados experimentalmente no laboratório, utiliza o CD (coeficiente de defasagem), que considera o grau de sincronismo entre as pessoas, fornece uma proposta mais econômica e, dependendo de cada caso, mais realista na avaliação de sistemas estruturais. Também se pode verificar pelas Tabelas 10.9 a 10.14 que é um modelo de carregamento com pouca dispersão dos resultados das acelerações.

Tabela 10.15 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			A	B	C	D	A	B	C	D
I	Stud-19	Rígida	0,40	0,30	0,30	0,40	0,43	0,32	0,32	0,43
		Semirrígida	0,41	0,32	0,32	0,41	0,58	0,43	0,43	0,58
		Flexível	0,60	0,42	0,42	0,60	0,64	0,46	0,46	0,64
	Perfobond	Rígida	0,26	0,17	0,17	0,26	0,36	0,23	0,23	0,36
		Semirrígida	0,33	0,30	0,30	0,33	0,40	0,32	0,32	0,40
		Flexível	0,40	0,32	0,32	0,40	0,60	0,43	0,43	0,60
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Tabela 10.16 - Acelerações de pico. Modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas.

MC	Conector	Ligação Viga-viga	Interação Total a_p (m/s ²)				Interação Parcial a_p (m/s ²)			
			Nós				Nós			
			E	F	G	H	E	F	G	H
I	Stud-19	Rígida	0,18	0,15	0,15	0,18	0,21	0,17	0,17	0,21
		Semirrígida	0,23	0,20	0,20	0,23	0,30	0,24	0,24	0,30
		Flexível	0,41	0,38	0,38	0,41	0,42	0,40	0,40	0,42
	Perfobond	Rígida	0,07	0,11	0,11	0,07	0,08	0,12	0,12	0,08
		Semirrígida	0,15	0,20	0,20	0,15	0,25	0,23	0,23	0,25
		Flexível	0,26	0,25	0,25	0,26	0,43	0,34	0,34	0,43
Limite de aceleração: $a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$ (ISO 2631-2 1989; Murray <i>et al.</i> 2003)										

Analisando-se os valores das acelerações de pico nas Tabelas 10.9 a 10.16, percebe-se que o valor máximo encontrado no presente estudo foi da ordem de $1,77\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,77\text{m/s}^2$, Tabela 10.13), no que diz respeito ao modelo com interação parcial, considerando as ligações viga-viga como sendo flexíveis e, as ligações viga-coluna como sendo semirrígidas, referente ao modelo de carregamento MC-II. Este valor de aceleração máxima foi obtido no centro do painel da laje onde foi aplicado o carregamento dinâmico associado a 32 pessoas (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14).

Foi verificado que quando a interação aço-concreto foi considerada como sendo total, o valor máximo de aceleração no referido painel (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14) foi reduzido para $1,0\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,0\text{m/s}^2$, Tabela 10.13), uma diferença percentual de 45%, constatando-se a influência positiva das interações sobre a resposta dinâmica não linear geométrica do piso.

Quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo rígidas, o valor máximo de aceleração no referido painel (Caso de carregamento II: Nó B e C – Figura 5.14) foi reduzido para $0,59\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,59\text{m/s}^2$, Tabela 10.13), isto é, uma diferença percentual em torno dos 66%. Mostrando desta forma a influência das ligações viga-viga na resposta dinâmica não linear do piso misto.

De outra forma, quando se utiliza o modelo de carregamento MC-I, o máximo valor de aceleração obtido no Nó B e C (Figura 5.14), foi da ordem de $0,64\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,64\text{m/s}^2$, Tabela 10.13). Estes valores de aceleração de pico diminuem ainda mais quando o modelo de carregamento MC-III foi considerado na análise, pois, para os mesmos nós analisados (Nó B e C - Figura 5.14) o valor máximo de aceleração foi da ordem de $0,46\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,46\text{m/s}^2$, Tabela 10.13). Deste modo, verifica-se uma diferença percentual em torno dos 30% entre MC-I, MC-II e MCIII.

No que diz respeito ao tipo de conector utilizado na modelagem das interações (total e parcial), com mesmo carregamento dinâmico, nas mesmas condições e nos mesmos Nós (Nó B e C), a aceleração de pico mais elevado quando se usa o conector perfobond, foi igual a $1,15\text{m/s}^2$ ($a_p = 1,15\text{m/s}^2$, Tabela 10.13), uma diferença percentual em torno dos 30%, contata-se desta forma o comportamento mais rígido dos conectores perfobond em relação aos studs.

Considerando-se os valores das frequências naturais (ver Tabela 7.12) do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II, Figura 5.1), correspondentes aos modos de vibração com preponderância das amplitudes modais das lajes de concreto do piso, constata-se mais uma vez que estes valores encontram-se relativamente próximos da frequência do terceiro harmônico da ação dinâmica humana rítmica ($f = 3 \times 2\text{Hz} = 6\text{Hz}$), o que ocasiona valores elevados para as acelerações, em determinadas situações, em consonância com o aumento do número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso.

Verifica-se, também, que, quando se considera o efeito da interação parcial, praticamente em todos os casos estudados, os critérios estabelecidos para conforto humano são violados, de acordo com normas e recomendações de projeto. ($a_{lim} = 0,50\text{m/s}^2$), (ISO 2631-2 1989; Murray *et al.* 2003), Tabelas 10.1 a 10.16.

Observando as Tabelas 10.1 a 10.16, contata-se que os valores mais elevados de aceleração foram obtidos na atividade associada à ginástica aeróbica. Tal fato ocorreu em todos os casos de carga investigados. Explica-se

essa diferença pelo fato de que a ginástica aeróbica ser uma atividade mais sincronizada do que a atividade de saltos à vontade.

Foi observado ao longo do estudo que existe uma tendência de crescimento nos valores das acelerações de pico do modelo quando são comparados os modelos compostos por ligações viga-coluna rígidas em relação aqueles em que as ligações viga-coluna são semirrígidas.

10.6

Comparação das acelerações de pico de acordo os modelos de carregamentos, ligações estruturais e tipo de conectores

Com o objetivo de verificar a influência dos modelos de carregamento propostos nesta investigação para simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas como a ginástica aeróbica e saltos à vontade, considerando-se os regimes de interação total e parcial existentes entre a laje de concreto e a viga de aço, como também os efeitos das ligações viga-coluna e viga-viga, foi feita uma comparação das acelerações de pico do Modelo Estrutural II.

Deste modo, os gráficos das Figuras 10.7 a 10.9 mostram a influência desses parâmetros no estudo do conforto humano. Convém lembrar que gráficos foram construídos com base nos valores apontados nas Tabelas 10.5 e 10.13, considerando 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto (aço-concreto) estudado. Onde IT e IP representam a interação total e parcial respectivamente e MC corresponde aos modelos de carregamento I a III (MC-I, MC-II e MC-III).

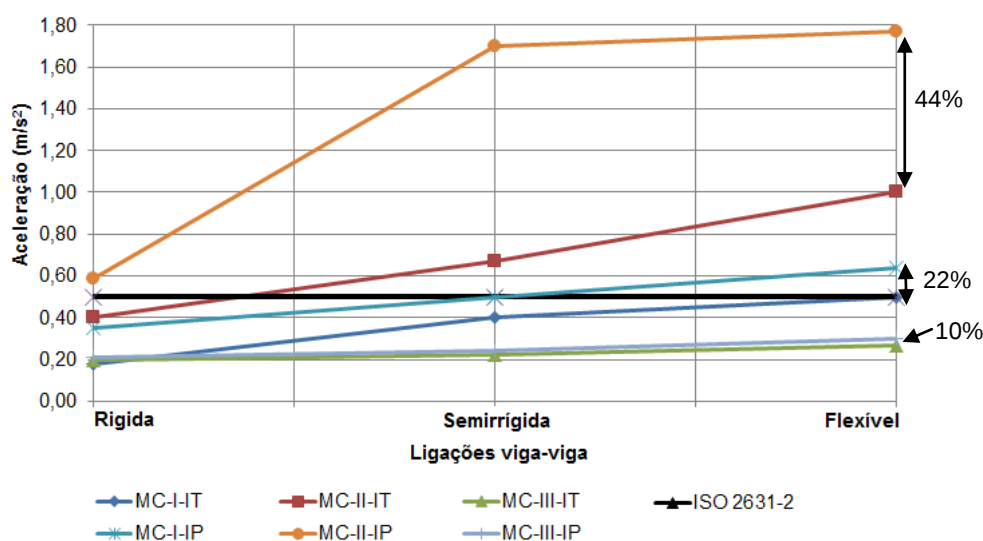


Figura 10.7 – Acelerações de pico em função da variação do modelo de carregamento e das interações aço-concreto. Ligações viga-coluna semirrígidas. Stud 19mm.

Observando a Figura 10.7 que compara as três metodologias de carregamentos, percebe-se que em todos os resultados encontrados utilizando o modelo de carregamento II, as acelerações máximas foram superiores aos resultados obtidos utilizando o modelo de carregamento I e III. Isso porque a metodologia do modelo de carregamento II, que utiliza uma série de Fourier com os parâmetros propostos por Murray *et al.* (2003), não considera o coeficiente CD (coeficiente de defasagem), que considera o grau de sincronismo entre as pessoas e também porque visa provocar a condição de ressonância nos pisos.

O modelo de carregamento II mostrou-se ser um modelo bastante conservadora, pois levou a valores de acelerações de pico bem superiores aos resultados alcançados com o modelo de carregamento I e III. Na prática, a condição de ressonância pode não chegar a ocorrer devido à influência de fatores externos, por isso o modelo de carregamento I fornece uma proposta mais econômica e, dependendo de cada caso, mais realista na avaliação de sistemas estruturais. Isso porque é um modelo cujos parâmetros foram avaliados experimentalmente e considera o coeficiente de defasagem entre as pessoas praticando as atividades humanas rítmicas.

Pela Figura 10.8 percebe-se, ainda, que o modelo de carregamento proposto pelo CEB (1993), conduz a valores de acelerações muito baixos, isto é, é um modelo que subestima o efeito das cargas dinâmicas sobre esse tipo de estrutura. Neste caso as cargas dinâmicas precisam ser reavaliadas, pois podem reduzir a segurança no que tange ao conforto humano.

Observando o gráfico da Figura 10.8, percebe-se claramente uma redução do valor das acelerações em todos os modelos de carregamento, quando o modelo com interação total é comparado com o modelo com interação parcial.

Quando se utiliza o modelo de carregamento MC-I, o máximo valor de aceleração obtido, foi da ordem de $0,50 \text{ m/s}^2$ para a interação total e $0,64 \text{ m/s}^2$ para a interação parcial, isto é uma diferença percentual em torno dos 22%.

Com relação ao modelo de carregamento MC-II, o máximo valor de aceleração obtido, foi da ordem de $1,00 \text{ m/s}^2$ para a interação total e $1,77 \text{ m/s}^2$ para a interação parcial, uma diferença percentual em torno dos 44%, mostrando-se também que é um modelo de carregamento com muita dispersão dos resultados das acelerações.

Finalmente para o modelo de carregamento MC-III, o máximo valor de aceleração obtido, foi da ordem de $0,30 \text{ m/s}^2$ para a interação total e $0,27 \text{ m/s}^2$ para a interação parcial, isto é uma diferença percentual de apenas 10%.

Em seguida os gráficos das Figuras 10.8 e 10.9 mostram a influência do tipo de conector de cisalhamento utilizado na modelagem das interações (Figura 10.8) e a influência das ligações estruturais (Figura 10.9)

Observando o gráfico da Figura 10.8 percebe-se que quando se utiliza o perfobond na modelagem da interação aço-concreto (parcial ou total), as acelerações tendem a ser menores, quando comparados com os modelos em que se usam os studs. O máximo valor de aceleração obtido foi da ordem de $0,65 \text{ m/s}^2$ para o modelo com perfobonds e $0,54 \text{ m/s}^2$ para o modelo com studs, portanto uma diferença percentual em torno dos 17%.

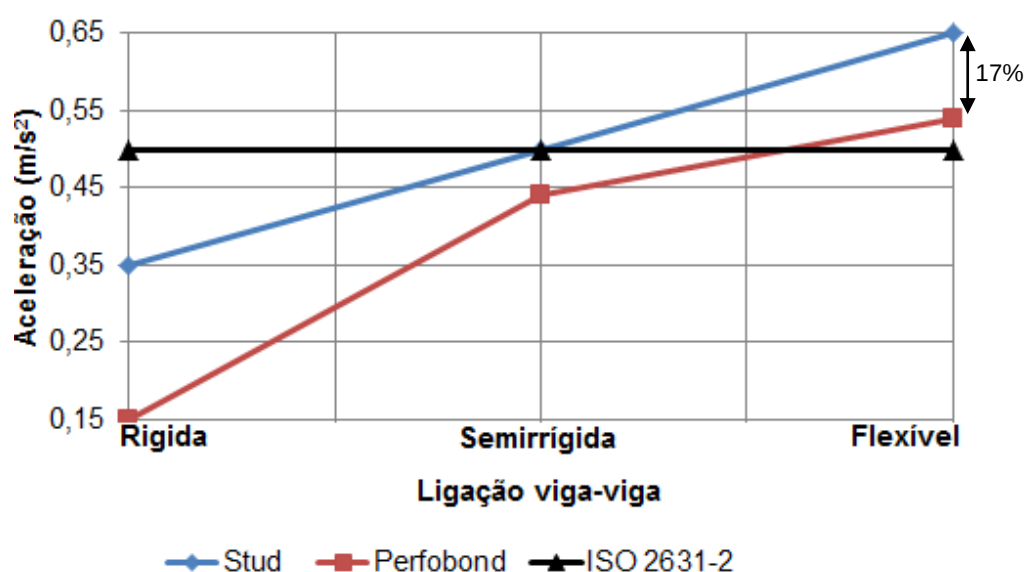


Figura 10.8 – Acelerações de pico em função da variação do tipo de conector de cisalhamento. Ligações viga-coluna semirrígidas. Interação Parcial. Stud 19mm.

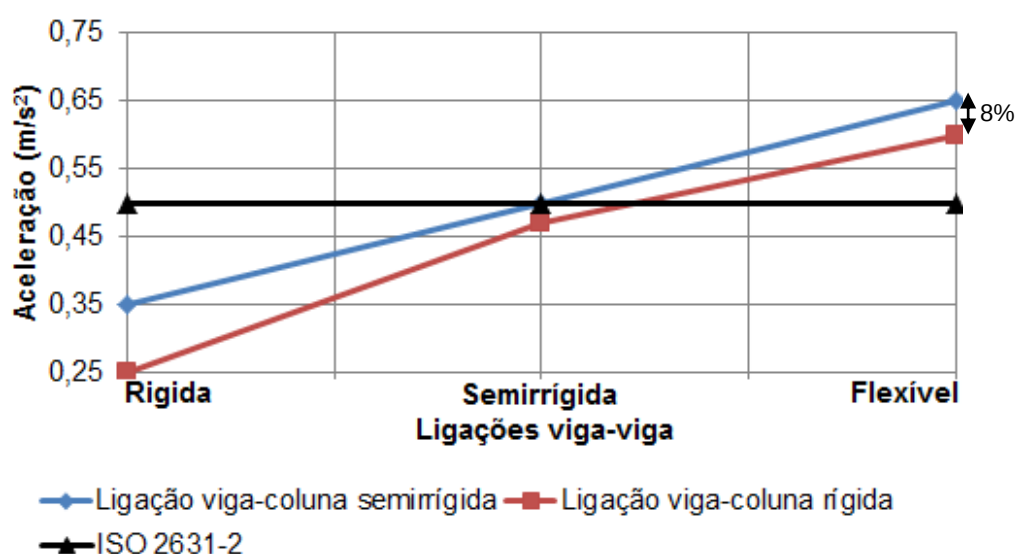


Figura 10.9 – Acelerações de pico em função da variação da rigidez das ligações viga-coluna. Interação Parcial. Stud 19mm.

Observando a Figura 10.9 percebe-se claramente uma tendência de crescimento das acelerações de pico do modelo quando são comparados os modelos compostos por ligações viga-coluna rígidas em relação aqueles em que as ligações viga-coluna são semirrígidas. O máximo valor de aceleração obtido foi da ordem de $0,65 \text{ m/s}^2$ para o modelo com ligações viga-coluna semirrígidas e de $0,60 \text{ m/s}^2$ para o modelo com ligações viga-coluna rígida. Contudo, pode-se verificar que a diferença percentual é da ordem de 8%, portanto uma diferença muito pequena, mas que numa situação de ressonância pode vir a agravar ainda mais as vibrações excessivas.

Analisando os gráficos das Figuras 10.7 a 10.9, percebe-se, também, um crescimento nos valores das acelerações quando se considera o efeito das ligações viga-viga (modelos rígidos), em relação aqueles com ligações flexíveis e semirrígidas.

Verifica-se, ainda, que praticamente em todos os casos estudados com interação parcial e com ligações entre as vigas flexíveis os critérios estabelecidos para conforto humano são violados, de acordo com normas e recomendações de projeto. ($a_{\text{lim}} = 0,50 \text{ m/s}^2$) (ISO 2631-2 1989; Murray *et al.* 2003).

Foi verificado ao longo da análise, que a influência da interação aço-concreto, o tipo de conector utilizado para simulação da interação parcial de 50% e que as ligações estruturais (ligações viga-coluna e viga-viga), para o piso investigado, alteram de forma significativa os valores finais das acelerações de pico. Tal fato pode ser um indicativo de que os critérios de projeto devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação no que tange a verificação os estados limites de utilização (vibrações excessivas), exigindo assim cautela por parte dos projetistas de estruturas de aço mistas (aço-concreto) com relação à análise de conforto humano.

Finalmente no capítulo 11 serão apresentadas as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.