

## 8

# Análise de Vibração Forçada – Caminhar Humano

### 8.1

#### Considerações iniciais

Neste capítulo, verifica-se o comportamento dinâmico de pisos mistos submetidos a excitações dinâmicas associadas ao caminhar humano, considerando os níveis de interação distintos existentes entre o aço e o concreto (interação total e interação parcial), no que tange ao desconforto ocasionado pelas vibrações.

Para tanto, foram realizadas análises de vibração forçada por meio do programa computacional Ansys [55]. Os resultados da análise dinâmica não-linear geométrica da estrutura (vibração forçada) foram obtidos em termos dos deslocamentos translacionais verticais e das acelerações (acelerações de pico e rms - *root mean square*), provenientes da aplicação do modelo de carregamento I, descrito no capítulo 4, conforme as equações (4.1) a (4.5), como excitação dinâmica sobre o modelo computacional III (modelo com elementos sólidos Figura 6.13).

Convém chamar atenção do leitor para o fato de que o valor da aceleração de pico é particularmente válido para indicação de impactos de curta duração, porém indicam somente a ocorrência do pico, não levando em consideração o histórico no tempo da onda. Por outro lado, a aceleração em RMS (*Root Mean Square*) é uma medida mais relevante pois leva em consideração o histórico no tempo da onda e dá um valor de nível o qual é diretamente relacionado à média de energia contida no movimento vibratório

Em seguida, a fim de verificar quantitativa e qualitativamente os resultados obtidos, segundo a metodologia proposta, as acelerações (acelerações de pico e em RMS - *Root Mean Square*) do modelo foram comparadas com os valores admissíveis sob o ponto de vista do conforto humano. Desse modo, foram tomadas como base algumas recomendações técnicas disponíveis sobre a questão, a saber, ISO 2631 [70] e AISC [53].

A literatura técnica disponível sobre o assunto, ISO 2631 [70] e AISC [53] especifica uma série de valores-limite para as acelerações, no que diz respeito

ao conforto humano. Esses valores são expressos, de forma geral, em função da aceleração da gravidade ( $g = 9,81\text{m/s}^2$ ) e em termos percentuais (%g).

## 8.2 Estudo do comportamento geral do sistema

Nesta seção, analisou-se o comportamento dinâmico de pisos mistos a partir da aplicação do modelo de carregamento I, descrito matematicamente no capítulo 4, por equações (4.1) e (4.5) que expressam o carregamento induzido por seres humanos durante a caminhada. Esse modelo de carregamento foi desenvolvido em conformidade com os dados experimentais obtidos por Varela [51].

Inicialmente, buscou-se avaliar o comportamento geral de pisos mistos aço-concreto a partir da simulação de duas situações distintas de carregamento que representam o caminhar de seres humanos sobre painéis de pisos. A primeira simula o caminhar de uma pessoa, e a segunda, o deslocamento de duas pessoas, consoante as Figuras 8.1 e 8.2.

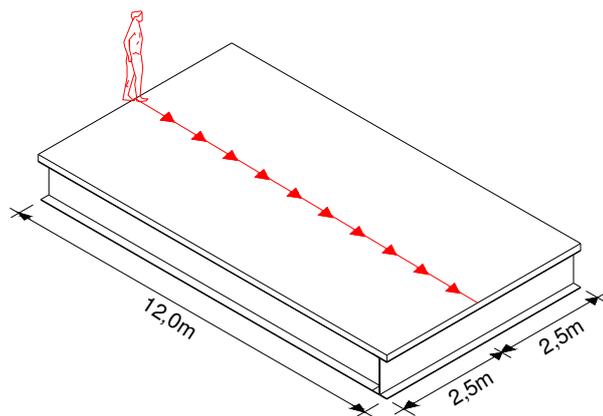


Figura 8.1 – Trajetória percorrida por uma pessoa.

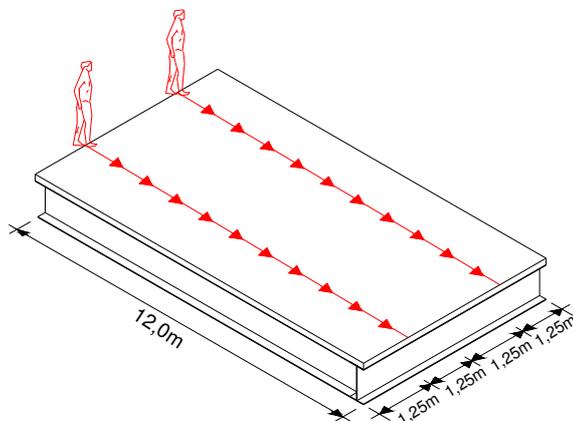


Figura 8.2 – Trajetória percorrida por duas pessoas.

Em seguida, nos pontos A e B (Figura 8.3), foram obtidas as respostas em termos de deslocamento translacionais verticais e das acelerações (pico e rms) para o modelo de piso misto aço-concreto tanto no regime de interação total quanto no parcial.

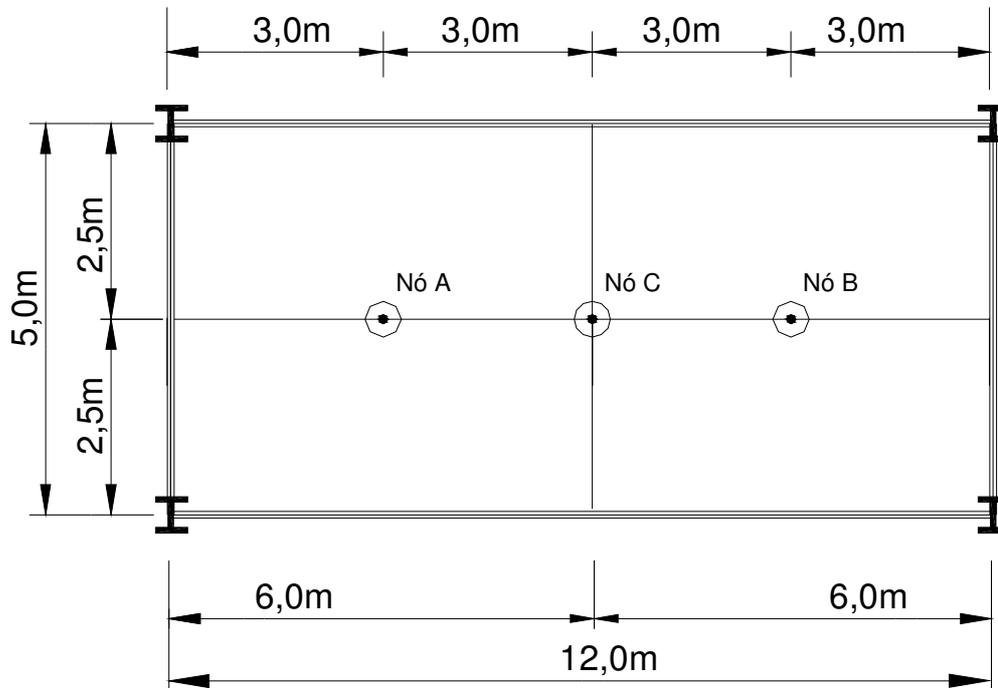


Figura 8.3 – Modelo do piso misto aço-concreto [38].

Na presente análise, considerou-se o fator de majoração do impacto do calcanhar igual a 1,12 ( $f_{mi} = 1,12$ ). A taxa de amortecimento utilizada foi obtida a partir de ensaios experimentais realizados por Oliveira [38] (1º modo –  $\xi = 0,95\%$  e 2º modo –  $\xi = 1,06\%$ ), além disso, a presente análise considerou o intervalo de integração de  $10^{-3}$ s ( $\Delta t = 0,001$ s).

A Tabela 8.1 a seguir apresenta todos os parâmetros utilizados na análise de vibração forçada para o modelo computacional III (Figura 6.13), tanto no regime de interação total quanto no parcial.

Tabela 8.1 – Parâmetros utilizados na análise de vibração forçada.

Interação Total e/ou Parcial					
Frequência do passo	Harmônico	Período do passo	Distância do passo	Tempo de contato	Tempo final
(Hz)	i	(s)	(m)	(s)	(s)
2,000	(4º)	0,500	0,75	0,1777	8,0

Na seção a seguir, apresentam-se os resultados obtidos ao longo da análise, as quais foram realizadas para o modelo estrutural de piso misto aço-concreto, modelo computacional III (modelo com elementos sólidos Figura 6.13), segundo os regimes de interação total e parcial existentes entre a laje de concreto e a viga de aço.

## 8.2.1 Interação total *versus* interação parcial

A partir da aplicação do modelo de carregamento I, descrito no capítulo 4 pelas equações (4.1) a (4.5), como excitação dinâmica sobre o modelo estrutural de piso misto aço-concreto (modelo com elementos sólidos Figura 6.13), foi possível obter, inicialmente, as respostas em termos de deslocamento e aceleração nos pontos A e B (Figura 8.3).

Esses sinais foram representados tanto no domínio do tempo quanto da frequência pelas Figuras 8.4 a 8.11, considerando a interação total e a parcial existente entre a laje de concreto e a viga de aço.

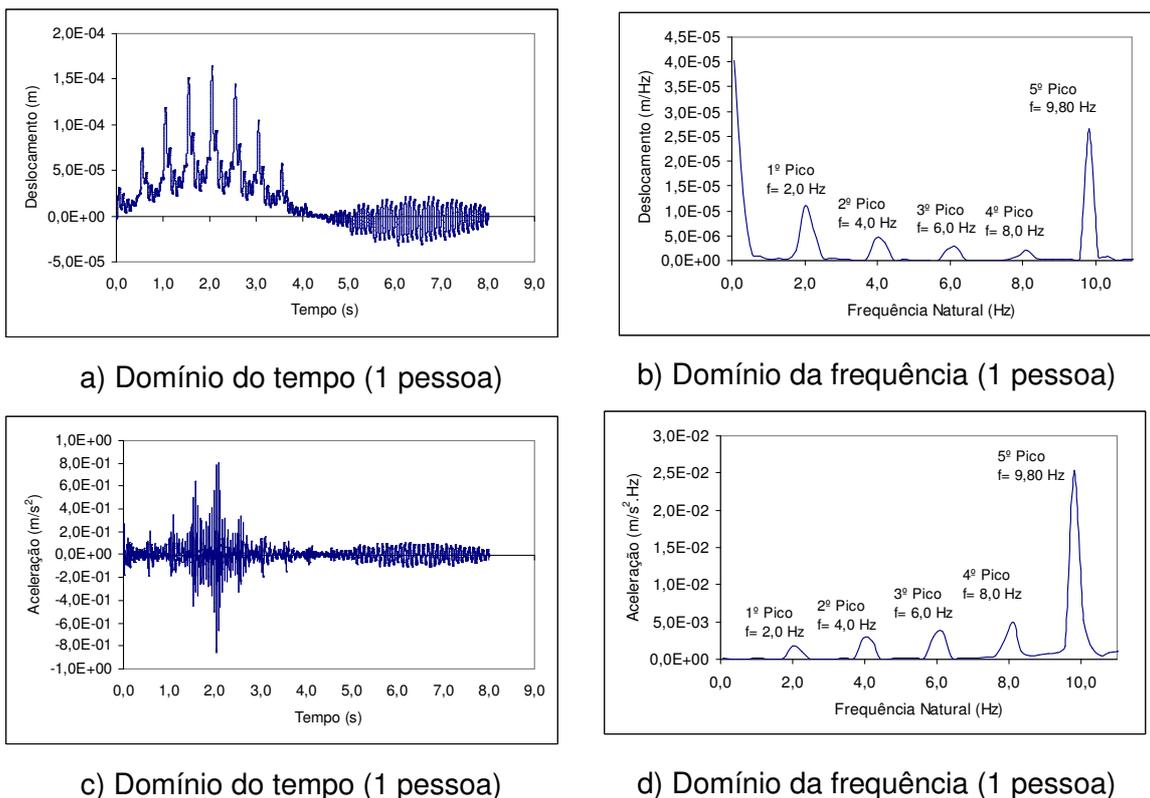
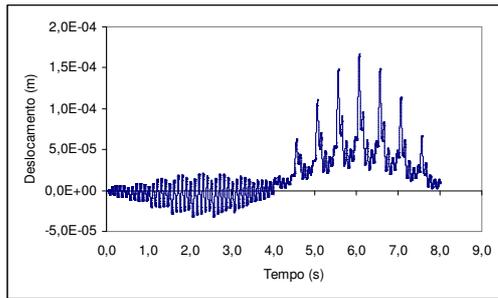
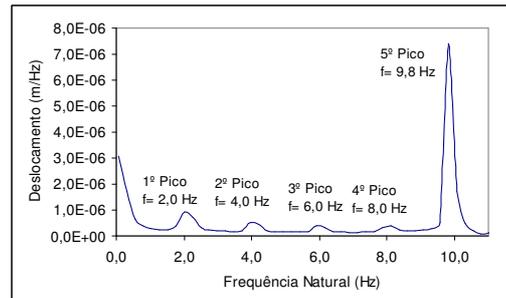


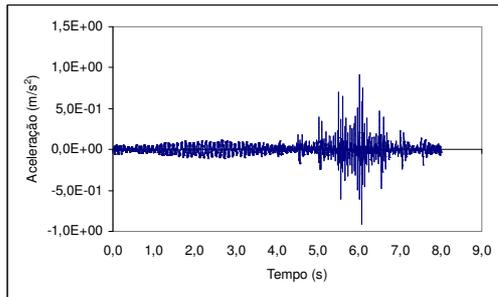
Figura 8.4 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total).



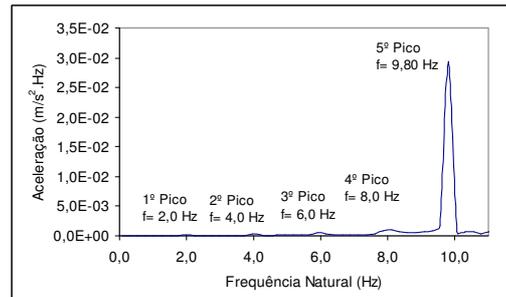
a) Domínio do tempo (1 pessoa)



b) Domínio da frequência (1 pessoa)

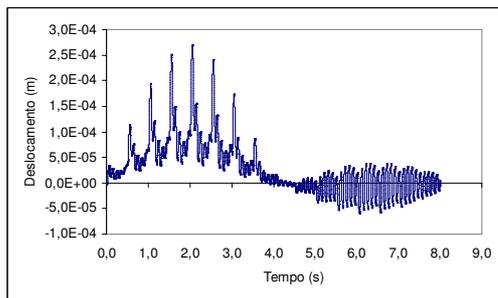


c) Domínio do tempo (1 pessoa)

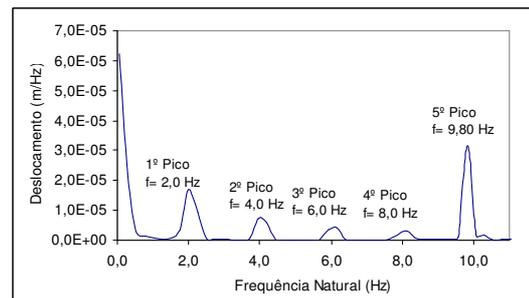


d) Domínio da frequência (1 pessoa)

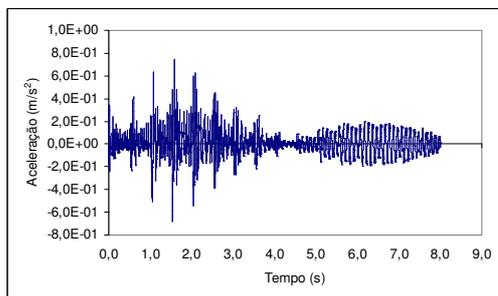
Figura 8.5 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total).



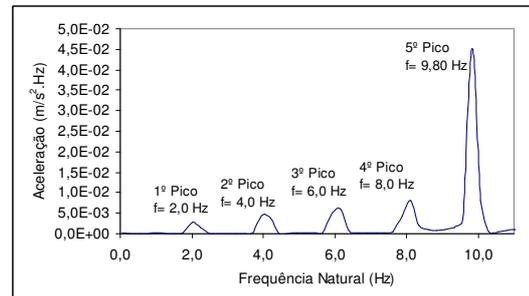
a) Domínio do tempo (3 pessoas)



b) Domínio da frequência (3 pessoas)

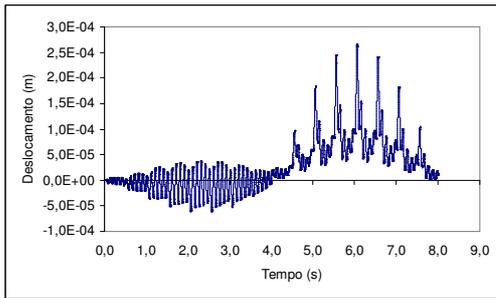


c) Domínio do tempo (3 pessoas)

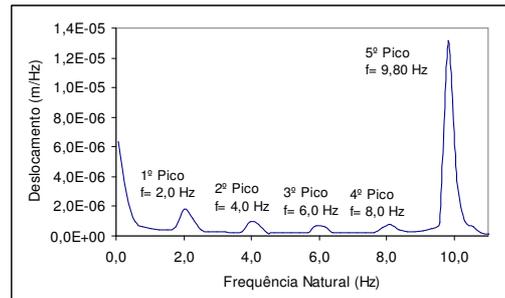


d) Domínio da frequência (3 pessoas)

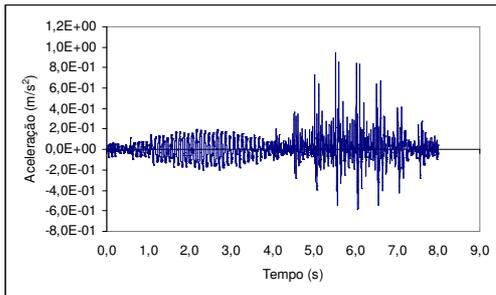
Figura 8.6 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total).



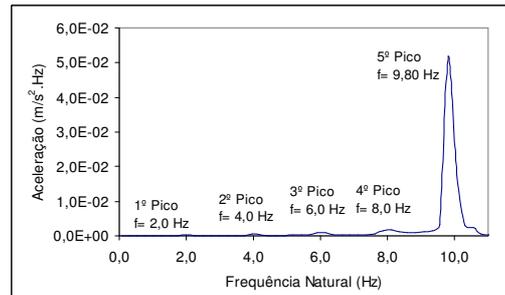
a) Domínio do tempo (3 pessoas)



b) Domínio da frequência (3 pessoas)

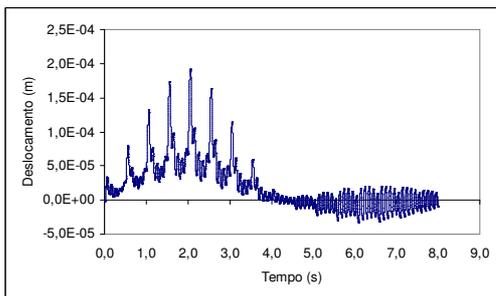


c) Domínio do tempo (3 pessoas)

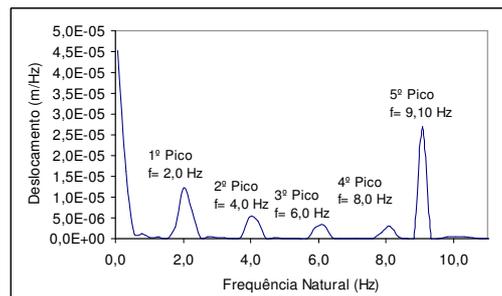


d) Domínio da frequência (3 pessoas)

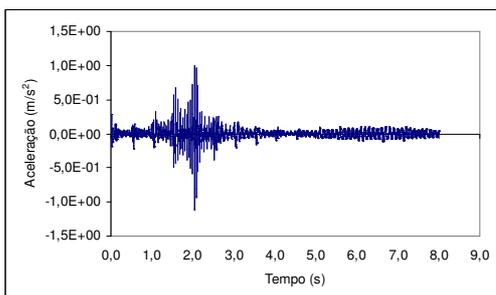
Figura 8.7 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total).



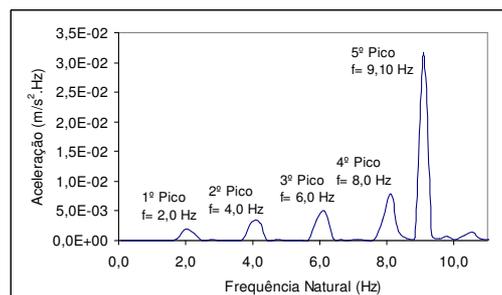
a) Domínio do tempo (1 pessoa)



b) Domínio da frequência (1 pessoa)

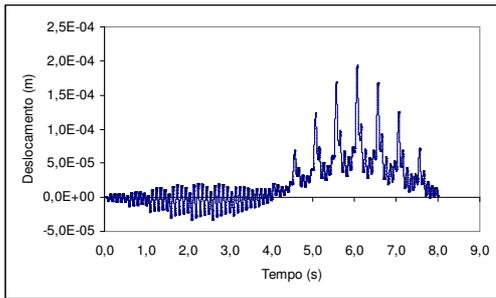


c) Domínio do tempo (1 pessoa)

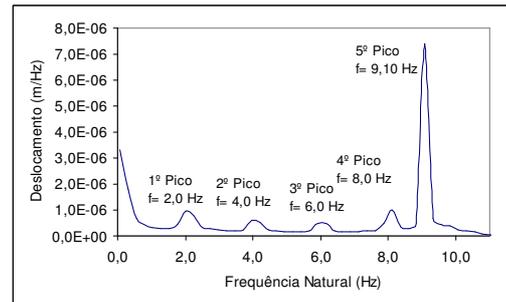


d) Domínio da frequência (1 pessoa)

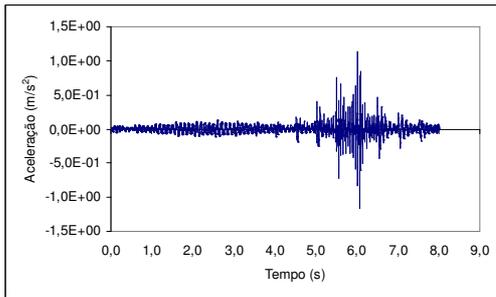
Figura 8.8 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).



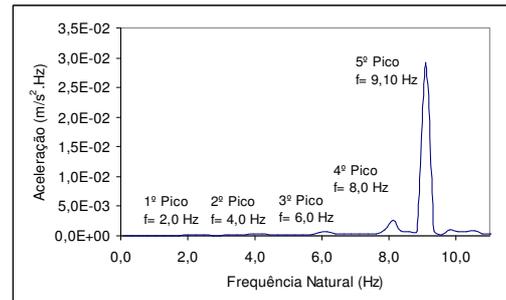
a) Domínio do tempo (1 pessoa)



b) Domínio da frequência (1 pessoa)

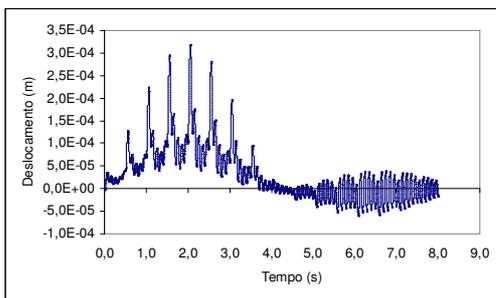


c) Domínio do tempo (1 pessoa)

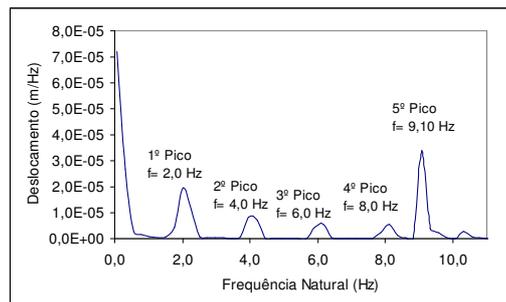


d) Domínio da frequência (1 pessoa)

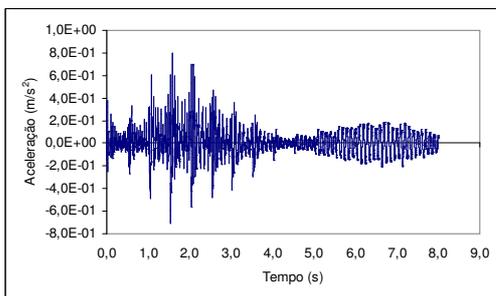
Figura 8.9 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referida ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).



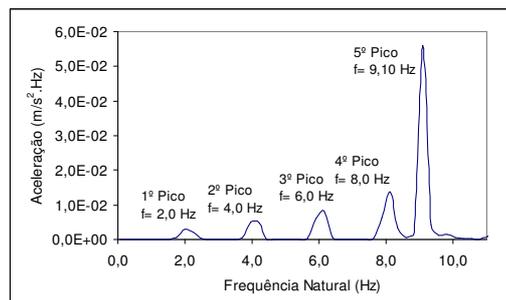
a) Domínio do tempo (3 pessoas)



b) Domínio da frequência (3 pessoas)

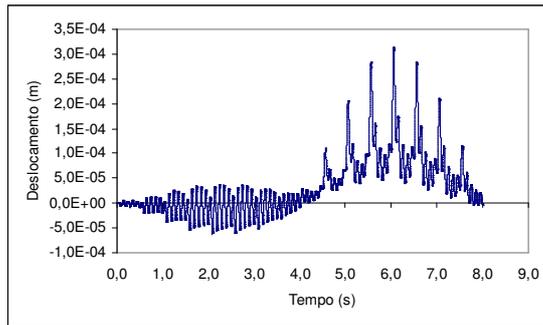


c) Domínio do tempo (3 pessoas)

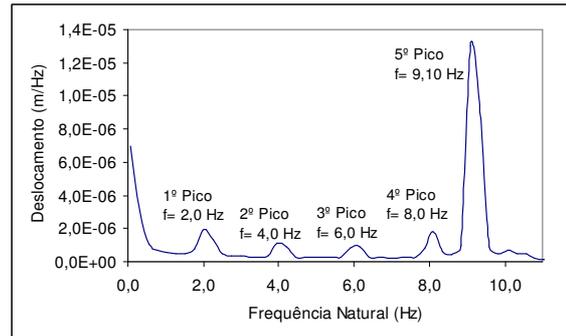


d) Domínio da frequência (3 pessoas)

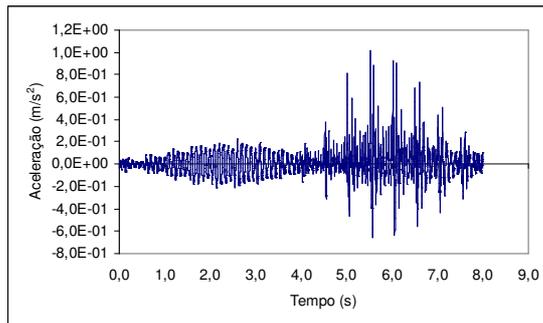
Figura 8.10 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referida ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).



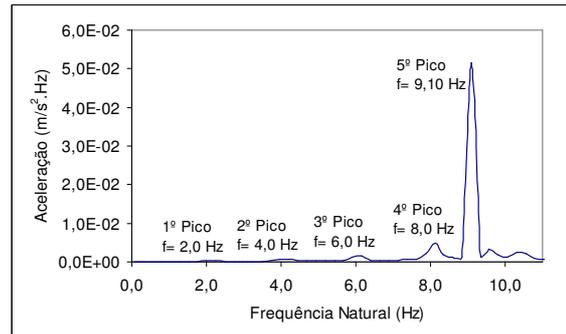
a) Domínio do tempo (3 pessoas)



b) Domínio da frequência (3 pessoas)



c) Domínio do tempo (3 pessoas)



d) Domínio da frequência (3 pessoas)

Figura 8.11 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referida ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).

Em relação aos gráficos apresentados nas Figuras 8.4 a 8.11, relativos a resposta da estrutura no domínio do tempo e da frequência, pôde-se concluir os seguintes aspectos a saber:

a) Pelas análises dos gráficos no domínio do tempo, percebe-se o comportamento adequado à medida que a pessoa atravessa o piso de um lado para o outro. Isto é evidente, pois as amplitudes tendem a aumentar nos pontos em que as respostas dinâmicas (pontos A e B) foram medidas, bem como tendem a diminuir na medida em que a pessoa se afasta destes pontos.

b) Outro fato relevante diz respeito às definições espacial e temporal da função de carregamento. Considerando os sinais de força no tempo para o modelo de carregamento I, os gráficos apresentam vários picos de aceleração na resposta dinâmica estrutural em virtude da aplicação da carga em cada ponto, permitindo descrever as variações espacial e temporal do carregamento. Portanto, os modelos que incluem variações espacial e temporal da carga dinâmica devem ser considerados na análise do conforto humano deste tipo de estrutura, haja vista que conduzem a resultados mais próximos da realidade de projeto.

c) Nas análises dos gráficos apresentados nas Figuras 8.4 a 8.11, percebeu-se que os quatro primeiros picos correspondem aos quatro harmônicos da excitação ( $f=2,0\text{Hz}$ ,  $f=4,0\text{Hz}$ ,  $f=6,0\text{Hz}$  e  $f=8,0\text{Hz}$ ). Entretanto, os picos referentes à frequência fundamental dos modelos em regimes de interação total ( $f_{01}=9,77\text{Hz}$ ) e parcial ( $f_{01}=9,07\text{Hz}$ ), quinto pico dos gráficos, é o principal responsável pela transferência de energia do sistema.

e) De forma geral, deve-se ressaltar que a análise no domínio da frequência do modelo de piso misto aço-concreto investigado neste trabalho apresenta o mesmo quadro para todos os casos estudados ao longo desta tese.

### 8.3 Estudo paramétrico

#### 8.3.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso

##### 8.3.1.1 Introdução

Nesta seção, investiga-se o comportamento dinâmico não-linear geométrico de sistemas de piso misto aço-concreto, considerando o efeito de um grupo de pessoas caminhando ordenadamente sobre a laje. As funções de carregamento representativas de cada pessoa sobre o piso referem-se também ao modelo de carregamento I, descrito no capítulo 4, considerando o fator de majoração do impacto do calcanhar igual a 1,12 ( $f_{mi} = 1,12$ ).

Os resultados obtidos ao longo das análises de vibração forçada foram expressos em termos de acelerações de pico, Figura 8.12, e acelerações em rms (root mean square), Figura 8.13.

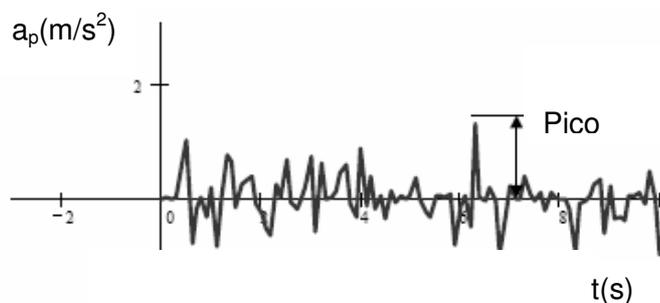


Figura 8.12 – Aceleração de pico [121]

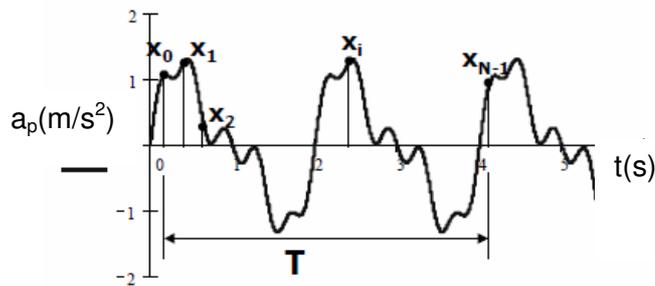


Figura 8.13 – Aceleração em rms (*root mean square*) [121]

A equação (8.1) a seguir, apresenta a expressão utilizada para obter os valores de acelerações em RMS (*Root Mean Square*) a partir de uma dada função de tempo, associada a resposta do sistema.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_i^2 + \dots + x_{N-1}^2}{N}} \quad (8.1)$$

Essa estratégia foi utilizada tendo em vista que os valores das acelerações de pico, que indicam os valores máximos, não trazem qualquer informação acerca da duração ou tempo de movimento e é particularmente usado na indicação de níveis de impacto de curta duração. Por outro lado, as acelerações em rms, ou mais conhecida como valor da raiz média quadrática ou valor eficaz, que é a raiz quadrada dos valores quadrados médios dos movimentos, é uma importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório, ao longo do tempo.

Da Figura 8.14 a 8.17 são apresentados os quatro casos de carga desenvolvidos para simular o caminhar das pessoas sobre o piso.

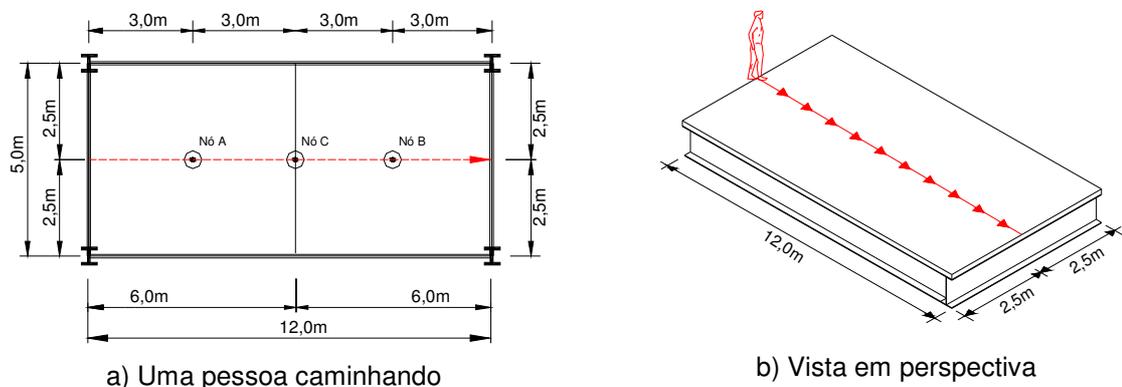
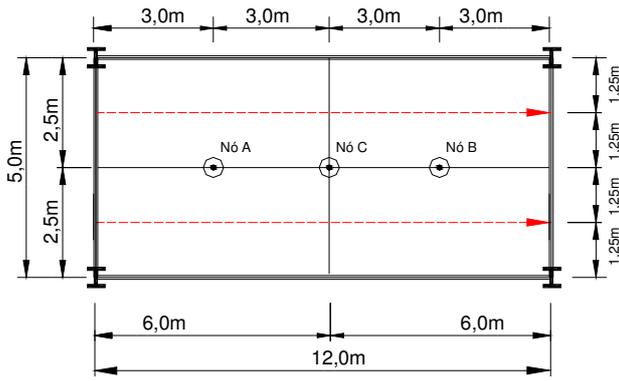
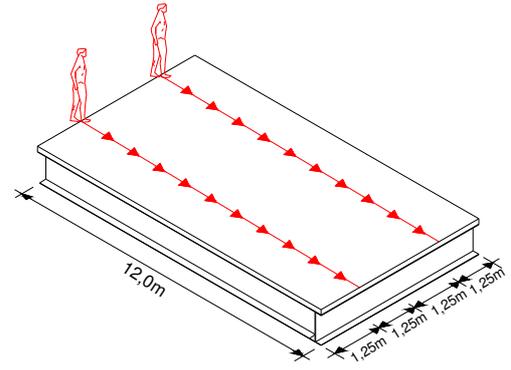


Figura 8.14 – Caso de carga 1

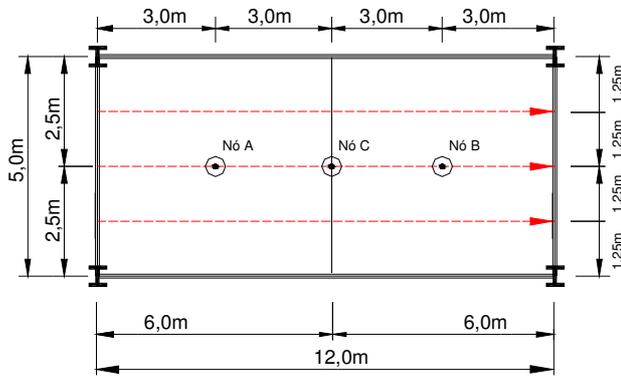


a) Duas pessoas caminhando

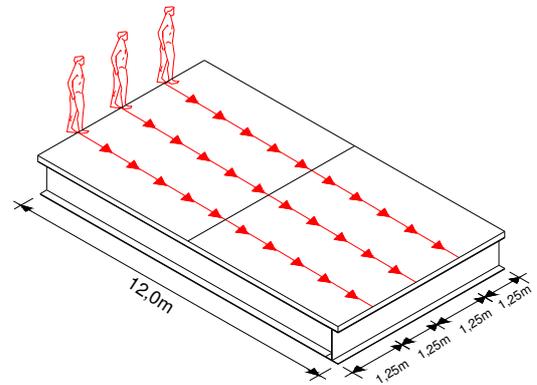


b) Vista em perspectiva

Figura 8.15 – Caso de carga 2

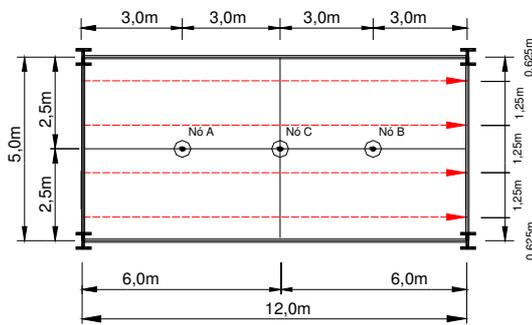


a) Três pessoas caminhando

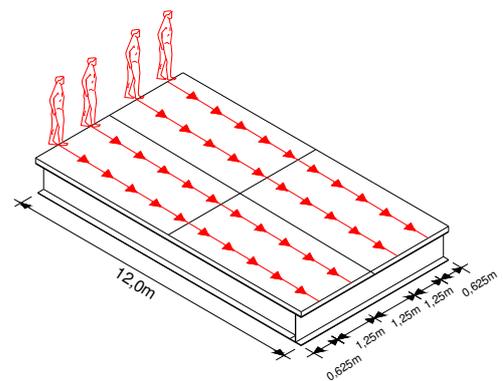


b) Vista em perspectiva

Figura 8.16 – Caso de carga 3



a) Quatro pessoas caminhando



b) Vista em perspectiva

Figura 8.17 – Caso de carga 4

Os sinais de força no domínio do tempo e no domínio da frequência obtidos para os casos de carga 3 e 4 não foram apresentados por não apresentarem mudanças significativas em seu comportamento geral quando comparados com os casos de carga 1 e 2, apresentados no início deste capítulo. Esses sinais de força são bastante semelhantes aos apresentados nas Figuras 8.4 a 8.11.

### 8.3.1.2 Avaliação das acelerações de pico

Prosseguindo com as análises, na Tabela 8.2 são apresentados os valores das acelerações de pico obtidas nos pontos A, B e C (Figuras 8.12 a 8.15), segundo a variação do número de pessoas sobre o modelo estrutural de piso misto aço-concreto.

Tabela 8.2 – Acelerações de pico do modelo. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12$ ). Interação total e interação parcial.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I							
Caso de carga	Interação total			Interação parcial			Limite recomendado AISC [53]
	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )			$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )			
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	(m/s <sup>2</sup> )
Caso 1	0,82	0,67	0,91	1,09	0,67	1,14	0,05
Caso 2	0,74	0,81	0,94	0,80	0,87	1,01	
Caso 3	0,82	1,06	1,18	1,01	1,12	1,41	
Caso 4	0,89	1,32	1,33	1,04	1,44	1,49	

Em relação aos valores das acelerações de pico (Tabela 8.2) encontrados ao longo das análises segundo o caso de carga considerado, pode-se concluir:

a) Em todas as respostas dinâmicas no domínio do tempo (acelerações de pico), percebeu-se que a quantidade de pedestres que compõem o carregamento afeta, de forma significativa, a resposta dinâmica do modelo de piso misto investigado neste trabalho, tanto no regime de interação total quanto no parcial. Tal fato deve ser levado em conta no projeto de estruturas desse tipo.

b) Para todos os casos de carga considerados nessas análises, os limites previstos no AISC [53], são ultrapassados no que tange a aspectos referentes ao

conforto humano. Isto ocorre em razão de o modelo de carregamento utilizado considerar que as pessoas caminham próximas a faixa que causa ressonância na estrutura, conduzindo, assim, a picos elevados de aceleração.

c) Os valores das acelerações de pico obtidos no caso da interação parcial foram, em todos os casos, superiores àqueles obtidos quando comparados com a interação total. Este fato demonstra que a variação do número de conectores no piso pode vir a influenciar a resposta dinâmica estrutural.

d) No que tange ao modelo de carregamento I, o valor máximo de aceleração encontrado foi da ordem de 1,33, referente ao caso de carga 4, em que quatro pessoas caminharam sobre o modelo de piso misto em regime de interação total. Por outro lado, este valor é da ordem de 1,49, considerando o piso em regime de interação parcial. Esses valores estão acima do limite permitido pelo guia de projeto (AISC [53]).

e) Os casos de carga 3 e 4 foram realizados para avaliar o efeito de grupo, ou seja, para entender como a estrutura responde à excitação de várias pessoas que caminham ordenadamente sobre a laje. Além disso, com estes ensaios numéricos, procurou-se obter uma estimativa das amplitudes de vibração, que são induzidas na estrutura por meio da atividade humana normal de ocupação de uma laje de piso em um edifício. As cargas humanas para esses ensaios são, na realidade, frequentes, por isso, devem orientar o projeto, no que diz respeito ao estado-limite de utilização correspondente a vibrações excessivas (conforto humano).

### **8.3.1.3**

#### **Avaliação das acelerações em RMS (*Root Mean Square*)**

Convém chamar atenção do leitor para o fato de que o AISC [53] considera seus limites de aceleração associado ao conforto humano com base nas acelerações de pico, não fornecendo assim informações acerca dos valores em rms (root mean square). Os limites de aceleração deste guia prático (AISC [53]) associados ao conforto humano, são obtidos a partir de fatores multiplicadores baseado na curva base da ISO 2631/2 [70]. Os fatores multiplicadores dos limites de vibração segundo a ISO [70], Tabela 3.5, são estabelecidos em função do tipo de ocupação, do período de tempo e do tipo de vibração. Dessa forma, nesta seção os valores das acelerações obtidos em rms

(root mean square) são então comparados com base no valor limite proposto pela norma “International Organization for Standardization” ISO 2631/2 – Continuous and Shock-Induced Vibration in Building (1 to 80Hz) [70]. Na Tabela 8.3 são apresentados os valores das acelerações em rms (root mean square) do modelo estrutural analisado.

Tabela 8.3 – Acelerações em rms (*root mean square*) do modelo. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12$ ). Interação total e interação parcial.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I							
Caso de carga	Interação total			Interação parcial			Limite recomendado ISO [70]
	$a_{rms}(m/s^2)$			$a_{rms}(m/s^2)$			
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	( $m/s^2$ )
Caso 1	0,057	0,022	0,033	0,065	0,023	0,0319	0,02
Caso 2	0,084	0,044	0,059	0,091	0,047	0,057	
Caso 3	0,120	0,062	0,092	0,131	0,067	0,089	
Caso 4	0,146	0,075	0,115	0,158	0,083	0,113	

Em relação aos valores das acelerações em RMS (*Root Mean Square*) encontrados ao longo das análises segundo o caso de carga considerado (Tabela 8.3), pode-se concluir:

a) Percebe-se que para os casos de carga 2,3 e 4, os limites de aceleração rms (*root mean square*) previstos em norma ISO [70] também são ultrapassados no que tange a aspectos referentes ao conforto humano. Isso se deve ao fato de que o modelo de carregamento utilizado considera que as pessoas caminham próximas a faixa que causa ressonância na estrutura, conduzindo, assim, a picos elevados de aceleração.

b) A partir dos valores de acelerações obtidos em rms (*root mean square*) percebe-se que a quantidade de pedestres que compõem o carregamento também afeta de forma significativa, a resposta dinâmica do modelo de piso misto investigado neste trabalho, tanto no regime de interação total quanto no parcial. Tal fato deve ser levado em conta no projeto de estruturas deste tipo.

c) Novamente foi verificado que considerando-se os valores das acelerações em rms (*root mean square*) obtidos no caso do piso em regime de interação parcial,

estes foram em todos os casos, superiores àqueles obtidos quando comparados com a interação total, porém foram da mesma ordem de grandeza. Conclui-se que a variação do número de conectores no piso pode vir a influenciar a resposta dinâmica estrutural.

d) As acelerações obtidas em rms (*root mean square*) para o modelo de carregamento I, tem como valor máximo da ordem de 0,146, referente ao caso de carga 4, em que quatro pessoas caminharam sobre o modelo de piso misto em regime de interação total. Por outro lado, esse valor é da ordem de 0,158, considerando o piso em regime de interação parcial. Esses valores estão acima do limite permitido pela norma, ISO [70].

### **8.3.2** **Efeitos do impacto do calcanhar humano**

#### **8.3.2.1** **Generalidades**

Nesta seção, é investigada uma grandeza relevante para a análise dinâmica das estruturas tratadas nesta tese: o impacto transiente do calcanhar humano. O fator de impacto transiente do calcanhar humano (fmi) quantifica a relação entre o valor do pico referente ao impacto do calcanhar e o valor máximo existente na expressão matemática que define o modelo de carregamento I, descrito no capítulo 4 pelas equações (4.1) a (4.5). Esse coeficiente varia conforme as pessoas e depende do tipo de calçado utilizado pelo pedestre.

No que se refere ao fator de amplificação do impacto do calcanhar, foram considerados os valores 1,12, 1,30 e 1,45. Assim, para esta análise, foram considerados os mesmos casos de carga definidos anteriormente e apresentados nas Figuras 8.14 a 8.17. Posteriormente, nos pontos A, B e C (Figuras 8.14 a 8.17), foram obtidas as respostas em termos de deslocamento translacional vertical e aceleração de pico e em rms (*root mean square*) para o modelo de piso misto aço-concreto tanto no regime de interação total quanto no parcial.

Novamente, os sinais de força no domínio do tempo e da frequência obtidos para essas análises, segundo os casos de carga considerados, não foram aqui relatados, haja vista que não apresentaram mudanças significativas em seu comportamento quando comparados com os sinais apresentados nas Figuras 8.4 a 8.11.

### 8.3.2.2 Avaliação das acelerações de pico

As Tabelas 8.4 e 8.5 apresentam os valores das acelerações de pico obtidas nos pontos A, B e C (Figuras 8.14 a 8.17), segundo a variação do impacto do calcanhar sobre o modelo estrutural de piso misto aço-concreto investigado neste trabalho.

Tabela 8.4 – Acelerações de pico. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$  e  $1,45$ ). Interação total.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I - Interação total									
Caso de carga	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )								
	$f_{mi} = 1,12$			$f_{mi} = 1,30$			$f_{mi} = 1,45$		
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B
Caso 1	0,82	0,67	0,91	0,86	0,80	1,06	0,91	0,91	1,19
Caso 2	0,74	0,81	0,94	0,84	0,95	1,13	0,95	1,07	1,28
Caso 3	0,82	1,06	1,18	0,98	1,28	1,42	1,11	1,47	1,61
Caso 4	0,89	1,32	1,33	1,26	1,57	1,58	1,52	1,78	1,80
Limite recomendado pelo AISC [53] - 0,05 (m/s <sup>2</sup> )									

Tabela 8.5 – Acelerações de pico. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$  e  $1,45$ ). Interação parcial.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I - Interação parcial									
Caso de carga	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )								
	$f_{mi} = 1,12$			$f_{mi} = 1,30$			$f_{mi} = 1,45$		
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B
Caso 1	1,09	0,67	1,14	1,10	0,80	1,30	1,12	0,91	1,44
Caso 2	0,80	0,87	1,01	0,87	1,02	1,20	0,95	1,15	1,36
Caso 3	1,01	1,12	1,41	1,07	1,36	1,66	1,17	1,56	1,86
Caso 4	1,04	1,44	1,49	1,25	1,70	1,74	1,50	1,93	1,95
Limite recomendado pelo AISC [53] - 0,05 (m/s <sup>2</sup> )									

No que se refere aos valores das acelerações de pico encontrados (Tabelas 8.4 e 8.5) ao longo das análises, de acordo com o caso de carga considerado, pode-se concluir:

a) Para todos os casos de carga considerados nestas análises, os limites previstos em norma, AISC [53], são ultrapassados em relação aos aspectos referentes ao conforto humano. Dessa forma, no que tange aos aspectos relacionados aos estados-limite de utilização, o impacto do calcanhar deve ser considerado neste tipo de análise.

b) Em todos os casos de carga, os valores das acelerações de pico obtidos na interação parcial foram superiores aos valores obtidos na interação total. Este fato demonstra que a variação do número de conectores no piso influencia a resposta dinâmica estrutural.

c) De acordo com as Tabelas 8.4 e 8.5, em todos os casos de carga, houve uma variação crescente da resposta dinâmica dos pisos em termos de acelerações de pico, na medida em que o fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi}$ ) aumentou de 1,12 para 1,45.

d) Deve-se destacar, sobretudo, que os níveis de impacto do calcanhar humano ( $f_{mi}$ ) considerados na presente análise estão em consonância com a realidade prática do projeto [51]. No entanto, os valores de pico encontrados para as acelerações ocorrem efetivamente nos projetos reais, mesmo que por alguns instantes. Tal fato é relevante, pois o estado-limite de utilização, associado à vibração excessiva, não é atendido quando o efeito do pico transiente do calcanhar humano é considerado na análise do problema.

e) De acordo com as Tabelas 8.4 e 8.5, quanto maior for a intensidade do impacto do calcanhar ( $f_{mi}$ ), maior será o nível de amplificação da resposta dinâmica. Essas observações evidenciam o fato de que, para que se idealizem estruturas que não sejam suscetíveis ao desconforto provocado pelo caminhar de pedestres, é necessária a busca de alternativas como o caso da utilização de revestimentos de piso com materiais que promovam a absorção deste tipo de impacto provocado durante o caminhar humano.

f) No que tange ao modelo de carregamento I, o valor máximo de aceleração encontrado foi da ordem de 1,95, associado ao impacto do calcanhar de 1,45 ( $f_{mi}=1,45$ ) com o piso em regime de interação parcial. Contudo, esse valor é da ordem de 1,80, associado ao mesmo impacto do calcanhar ( $f_{mi}=1,45$ ), para o

modelo de piso misto aço-concreto em regime de interação total. Esses valores estão acima do limite permitido pelo guia de projeto (AISC [53]).

### 8.3.2.3 Avaliação das acelerações em RMS (*Root Mean Square*)

Conforme comentado anteriormente, o Guia Prático do AISC [53] considera seus limites de aceleração associado ao conforto humano com base nas acelerações de pico, não fornecendo assim informações acerca dos valores em rms (root mean square). Os limites de aceleração deste guia prático (AISC [53]) associados ao conforto humano, são obtidos a partir de fatores multiplicadores baseado na curva base da ISO 2631/2 [70]. Os fatores multiplicadores dos limites de vibração segundo a ISO [70], Tabela 3.5, são estabelecidos em função do tipo de ocupação, do período de tempo e do tipo de vibração. Dessa forma, nesta seção os valores das acelerações obtidos em rms (root mean square) são então comparados com base no valor limite proposto pela norma “International Organization for Standardization” ISO 2631/2 – Continuous and Shock-Induced Vibration in Building (1 to 80Hz) [70]. Nas Tabelas 8.6 e 8.7, são apresentados os valores das acelerações em rms (root mean square) dos modelos estruturais analisados.

Tabela 8.6 – Acelerações em RMS (*Root Mean Square*). Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$  e  $1,45$ ). Interação total.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I									
Caso de carga	Interação total - $a_{rms}$ ( $m/s^2$ )								
	$f_{mi} = 1,12$			$f_{mi} = 1,30$			$f_{mi} = 1,45$		
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B
Caso 1	0,057	0,022	0,033	0,066	0,026	0,043	0,075	0,029	0,052
Caso 2	0,084	0,044	0,059	0,102	0,049	0,077	0,119	0,053	0,093
Caso 3	0,120	0,062	0,092	0,149	0,069	0,120	0,176	0,077	0,145
Caso 4	0,146	0,075	0,115	0,184	0,0833	0,151	0,219	0,092	0,182
Limite recomendado pelo ISO [70] - $0,02$ ( $m/s^2$ )									

Tabela 8.7 – Acelerações em rms (*root mean square*). Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$  e  $1,45$ ). Interação parcial.

Caminhada Normal – Modelo de Carregamento I									
Caso de carga	Interação parcial - $a_{rms}$ ( $m/s^2$ )								
	$f_{mi} = 1,12$			$f_{mi} = 1,30$			$f_{mi} = 1,45$		
	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B	Nó A	Nó C	Nó B
Caso 1	0,065	0,023	0,0319	0,074	0,027	0,041	0,083	0,030	0,050
Caso 2	0,091	0,047	0,057	0,109	0,050	0,075	0,128	0,055	0,090
Caso 3	0,131	0,067	0,089	0,161	0,073	0,116	0,191	0,081	0,140
Caso 4	0,158	0,083	0,113	0,198	0,090	0,147	0,236	0,098	0,177
Limite recomendado pelo ISO [70] - $0,02$ ( $m/s^2$ )									

No que se refere aos valores das acelerações em RMS (*Root Mean Square*) encontrados ao longo das análises, de acordo com o caso de carga considerado (Tabelas 8.6 e 8.7), pode-se concluir:

a) Considerando-se os valores das acelerações em rms (*root mean square*) obtidos no caso do piso em regime de interação parcial, esses foram em todos os casos, superiores àqueles obtidos quando comparados com a interação total, porém foram da mesma ordem de grandeza. Conclui-se que a variação do número de conectores no piso influencia a resposta dinâmica estrutural.

b) A partir dos valores de acelerações obtidos em rms (*root mean square*), consoante as Tabelas 8.6 e 8.7, para todos os casos de carga, houve uma variação crescente da resposta dinâmica dos pisos em termos de acelerações de pico, na medida em que o fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi}$ ) aumentou de 1,12 para 1,45.

c) As acelerações obtidas em rms (*root mean square*) para o modelo de carregamento I, tem como valor máximo da ordem de 0,236, associado ao impacto do calcanhar de 1,45 ( $f_{mi}=1,45$ ) com o piso em regime de interação parcial. Contudo, este valor é da ordem de 0,219, associado ao mesmo impacto do calcanhar ( $f_{mi}=1,45$ ), para o modelo de piso misto aço-concreto em regime de interação total. Estes valores estão acima do limite permitido pela norma ISO [70].

No capítulo 9, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das análises de vibração forçada que procuram simular o carregamento dinâmico induzido por seres-humanos quando em atividades rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade).