



**Antônio Vicente de Almeida Mello**

**Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto  
sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Sebastião A. L. de Andrade

Co-orientador: José Guilherme Santos da Silva

Co-orientador: Pedro C. G. da S. Vellasco

**Rio de Janeiro, Dezembro de 2009**



**Antônio Vicente de Almeida Mello**

**Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto  
sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos**

Tese apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo  
assinada

Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Guilherme Santos da Silva  
Co-orientador

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco  
Co-orientador

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Departamento de Engenharia Civil - UFOP/ MG

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima  
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Paulo Batista Gonçalves  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof<sup>a</sup>. Juliana da Cruz Vianna  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Dezembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Antônio Vicente de Almeida Mello**

Possui grau de Mestre em Engenharia Civil, ênfase em Estruturas, pela UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2005. Possui alguns trabalhos publicados em atas de conferências e revistas internacionais na área de Comportamento dinâmico de sistemas mistos aço-concreto.

#### Ficha Catalográfica

Mello, Antônio Vicente de Almeida

**Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos / Antônio Vicente de Almeida Mello;** orientador: Sebastião A. L. de Andrade; co-orientadores: José Guilherme Santos da Silva, Pedro C. G. da S. Vellasco. – 2009. 212f: 30cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Tese. 2. Sistemas Mistos. 3. Interação Parcial e Total. 4. Ligações semirrígidas. 5. Modelos Numéricos. 6. Conforto Humano. 7. Modelos Ortotrópicos. 8. Modelos Isotrópicos. I. Andrade, Sebastião A. L. de. II. Silva, José Guilherme Santos da. III. Vellasco, Pedro C. G. da S. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

**CDD: 624**

*“Pai, Senhor do céu e da terra,  
eu te dou graças porque escondestes  
estas coisas aos sábios e entendidos  
e as revelastes aos pequeninos.”*

*Lucas 10,21*

## Agradecimentos

Em primeiro lugar a DEUS, por ser misericordioso e por nos fortalecer a cada dia pela sua graça.

Aos meus pais, meus irmãos e minha avó pelas orações de graça dedicadas.

À minha esposa, pelo carinho e pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Aos professores e orientadores Sebastião Arthur Lopes de Andrade, José Guilherme Santos da Silva e Pedro Colmar G. da S. Vellasco, pelos relevantes conhecimentos transmitidos e pela orientação durante o trabalho.

Em especial aos amigos Fernando Ramires, Ricardo Araújo, Juliana da Cruz e Rafael Castro, por não terem medido esforços no apoio à conclusão deste trabalho e pelo bom convívio ao longo desses anos.

Ao funcionário do Laboratório de Computação do PGECIV, Rodolfo, pela colaboração do apoio logístico prestado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que tanto lutaram para que este sonho fosse possível.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro recebido ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

Mello, Antônio Vicente de Almeida; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Orientador); Silva, José Guilherme Santos e Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva (Co-orientadores). **Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos**. Rio de Janeiro, 2009. 212p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ao longo dos anos, a interação aço-concreto tem obtido um lugar de destaque do ponto de vista estrutural, ampliando a gama de soluções em concreto armado e aço, o que permite atender aos novos desafios arquitetônicos e às exigências que o mercado impõe. O objetivo do sistema misto é a combinação desses dois materiais, formando um único sistema estrutural em que a capacidade portante de cada elemento possa ser explorada ao máximo, tirando-se proveito da grande capacidade do concreto resistir a esforços de compressão, e de o aço, à tração. Essas características singulares de sistemas mistos aço-concreto conduzem a frequências naturais mais próximas da faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas. Sendo assim, as considerações relacionadas ao projeto estrutural obrigam os engenheiros a fazer verificações quanto à resistência e à estabilidade de sistemas estruturais (estados limites últimos), mas os problemas relacionados ao estado limite de utilização desses sistemas devem ser analisados de forma mais cuidadosa. Embora o assunto de vibrações em lajes de edifícios induzidas por atividades humanas tem sido de continuado interesse a pesquisadores e a engenheiros ao longo dos últimos dois séculos (1828-2009), inexistente na literatura técnica, até onde o autor tem conhecimento, análise de correlações teórico-experimentais de vibrações de estruturas mistas aço-concreto sob ação de atividades humanas, na qual são consideradas a ortotropia, a interação parcial e as ligações semirrígidas. Com o objetivo de contribuir nessa direção, o presente trabalho investiga o efeito da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica de sistemas de pisos mistos.

## Palavras-chave

Sistemas Mistos, Interação Parcial e Total, Ligações Semirrígidas; Modelos Numéricos; Conforto Humano; Modelos Ortotrópicos; Modelos Isotrópicos.

## Abstract

Mello, Antonio Vicente de Almeida; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Advisor). Silva, José Guilherme Santos e Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva (Co-Advisors). **Analysis of the Interaction Effect Between Steel and Concrete on the Dynamical Response of Composite Floors**. Rio de Janeiro, 2009. 212p. PhD. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Over the years the steel-concrete interaction have been achieving excellent results, in terms of structural performance. This fact have enlarged the range of applications of concrete and steel structures enabling the development of efficient solutions that attend the demands claimed by the market and by increasinly daring architectures. The composite action main objective is to combine steel and concrete into single structural system where the optimum performance of the combined elements could be explored. The concrete is used to sustain compressive while the steel is better used when submitted to tension. These singular characteristics of the composite systems, on the other hand, lead to composite structural systems with natural frequencies close to the frequency associated to human induced loads. Usually the design of composite structures is focused on verifications related to ultimate limit states associated to strength and stability, but the problems related to serviceability limit states should also be carefully considered. Despite the fact that floor vibration induced by human activity has been extensively investigated in the past (1828-2009) there is still a lack of published information on theoretical-experimental correlations on the dynamic response of composite structures specially after considering effects releted to partial interaction, orthotropy and semi-rigid connections. The present study has the objective of contributing in the direction of better understand the effect of the steel-concrete interaction on the composite floor system dynamic response.

## Key-words

Composite System, full and partial interaction, Semirrigid Connections; Numerical Models; Human Confort; Orthotropic Models; Isotropic Models.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>22</b>
1.1 Generalidades	22
1.1.1 Interação aço-concreto	24
1.1.2 Ortotropia	33
1.1.3 Ligações semirrígidas	38
1.1.4 Carregamentos dinâmicos	40
1.2 Objetivos e motivação	48
1.3 Escopo do trabalho	49
 <b>2 Sistemas Mistos</b>	 <b>52</b>
2.1 Introdução	52
2.1.1 Dimensionamento de vigas mistas – interação total	54
2.1.1.1 Interação total - linha neutra na laje de concreto	55
2.1.1.2 Interação total - linha neutra na mesa superior da viga	56
2.1.1.3 Interação total - linha neutra na alma da viga de aço	59
2.1.2 Dimensionamento de vigas mistas – Interação parcial	61
2.1.2.1 Interação parcial - linha neutra na laje de concreto	63
2.1.2.2 Interação parcial - linha neutra no perfil de aço	66
2.2 Conectores de cisalhamento	69
2.2.1 Resistência dos conectores de cisalhamento	70
 <b>3 Critérios de Conforto Humano</b>	 <b>73</b>
3.1 Introdução	73
3.2 Critérios de projeto para minimizar efeitos de vibração	73
3.3 Procedimentos adotados para minimizar efeitos de vibração em pisos	76
3.3.1 Isolamento da vibração	77
3.3.2 Relocação	77
3.3.3 Enrijecimento	78
3.3.4 Aumento do nível de amortecimento	78
3.3.5 Sistema de controle ativo	78
3.3.6 Dispositivos mecânicos de controle passivo	78
3.4 Procedimentos adotados pelas principais normas	79



3.4.1 Norma Brasileira – Projeto e Execução de Obras em Concreto Armado NBR 6118/2003	79
3.4.2 Norma Brasileira – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios: NBR 8800/2008	80
3.4.3 Norma Canadense – <i>Limit States Design of Steel Structures</i> (Canadian Standards Association): CAN3-S16.1-M89 appendices G	81
3.4.4 Guia Prático do AISC – <i>Floor Vibrations Due To Human Activity</i> (Steel Design Guide Series of American Institute of Steel Construction): AISC [53]	82
3.4.4.1 Frequência Natural do painel da viga principal	85
3.4.4.2 Frequência fundamental do painel da viga secundária	86
3.4.4.3 Peso efetivo do painel das vigas principais	87
3.4.4.4 Peso efetivo do painel das vigas secundárias	88
3.4.4.5 Modo combinado	89
3.4.5 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1	90
3.4.6 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations – Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings 1 to 80Hz): ISO 2631/2	90
<b>4 Cargas Dinâmicas</b>	<b>95</b>
4.1 Introdução	95
4.2 Modelos de carregamento	96
4.2.1 Caminhar humano - modelo de carregamento I	96
4.2.2 Atividade rítmica - modelo de carregamento II	102
<b>5 Modelos Estruturais</b>	<b>109</b>
5.1 Introdução	109
5.2 Modelo de viga mista (aço-concreto) [6]	109
5.3 Modelo de piso misto (aço-concreto) [38]	112
<b>6 Modelos Numéricos Computacionais</b>	<b>120</b>
6.1 Introdução	120
6.2 Elementos finitos	121
6.3 Hipóteses simplificadoras	124
6.4 Modelo de viga mista - modelo computacional I	125
6.5 Modelo de piso misto isotrópico - modelo computacional II	127
6.6 Modelo de piso misto ortotrópico - modelo computacional III	129

6.7 Modelagem do amortecimento	131
6.8 Desempenho computacional	132
6.9 Análise Dinâmica	133
<b>7 Análise de Autovalores e Autovetores</b>	<b>134</b>
7.1 Considerações iniciais	134
7.2 Análise de frequências naturais e modos de vibração	134
7.2.1 Modelo de viga mista – modelo computacional I	135
7.2.2 Modelo de piso misto isotrópico – modelo computacional II	141
7.2.3 Modelo de piso misto ortotrópico – modelo computacional III	144
<b>8 Análise de Vibração Forçada – Caminhar Humano</b>	<b>149</b>
8.1 Considerações iniciais	149
8.2 Estudo do comportamento geral do sistema	150
8.2.1 Interação total <i>versus</i> interação parcial	152
8.3 Estudo paramétrico	157
8.3.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso	157
8.3.1.1 Introdução	157
8.3.1.2 Avaliação das acelerações de pico	160
8.3.1.3 Avaliação das acelerações em RMS ( <i>Root Mean Square</i> )	161
8.3.2 Efeitos do impacto do calcanhar humano	163
8.3.2.1 Generalidades	163
8.3.2.2 Avaliação das acelerações de pico	164
8.3.2.3 Avaliação das acelerações em RMS ( <i>Root Mean Square</i> )	166
<b>9 Análise de Vibração Forçada – Cargas Dinâmicas Rítmicas</b>	<b>169</b>
9.1 Considerações iniciais	169
9.2 Estudo do comportamento geral	170
9.2.1 Interação total <i>versus</i> interação parcial	171
9.3 Estudo paramétrico	177
9.3.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso	177
9.3.1.1 Introdução	177
9.3.1.2 Avaliação das acelerações de pico	179
9.3.2 Variação do período de contato	182
9.3.2.1 Generalidades	182
9.3.2.2 Avaliação das acelerações de pico	183
9.3.3 Variação do coeficiente de impacto	186

9.3.3.1 Introdução	186
9.3.3.2 Avaliação das acelerações de pico	187
<b>10 Considerações Finais</b>	<b>191</b>
10.1 Introdução	191
10.2 Conclusões obtidas ao longo do trabalho	191
10.2.1 Modelagem computacional	191
10.2.2 Análise de autovalores e autovetores	192
10.2.3 Modelos de carregamento	192
10.2.4 Análise do conforto devido ao caminhar humano	192
10.2.4.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso	193
10.2.4.2 Efeito do impacto do calcanhar humano	194
10.2.5 Análise do conforto devido a atividades rítmicas	194
10.2.5.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso	195
10.2.5.2 Efeito da variação do período de contato	196
10.2.5.3 Efeito da variação do coeficiente de impacto	196
10.3 Contribuições do presente trabalho	197
10.4 Sugestões para trabalhos futuros	198
<b>11 Referências Bibliográficas</b>	<b>199</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Conector espiral, Tristão [4] .....	25
Figura 1.2 – Conectores rígidos, Chapman [6] .....	26
Figura 1.3 – Ensaios experimentais com aplicação de cargas concentradas e distribuídas [6] .....	27
Figura 1.4 – Representação para a curva tensão deformação do concreto [8] ..	28
Figura 1.5 – Representação adotada para a curva tensão deformação do aço [8] .....	28
Figura 1.6 – Representação adotada para a curva força <i>versus</i> deslizamento dos conectores de cisalhamento [8] .....	29
Figura 1.7 – Curva experimental e curva bilinear representativas da conexão laje-viga, Porco, Spadea e Zinno [11] .....	30
Figura 1.8 – Modelagem das propriedades dos materiais [12] .....	30
Figura 1.9 – Elemento proposto por Gattesco [13] .....	31
Figura 1.10 – Grupos de elementos finitos: (a) laje de concreto, (b) perfil de aço, (c) conectores de cisalhamento e (d) par de contatos entre a laje e a viga [15] ..	32
Figura 1.11 – Modelo tridimensional em elementos finitos [16] .....	33
Figura 1.12 – Modelos dos protótipos ensaiados [18] .....	35
Figura 1.13 – Modelo proposto para a forma de aço ( <i>steel deck</i> ) [21] .....	36
Figura 1.14 – Modelo do <i>steel deck</i> [22] .....	37
Figura 1.15 – Modelo tridimensional em elementos finitos [22] .....	37
Figura 1.16 – Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte, EUA [51] ..	42
Figura 1.17 – <i>Millennium Footbridge</i> sobre o Rio Tâmisa [51] .....	42
Figura 1.18 – Medida aproximada do impacto do <i>Hell Drop Test</i> [41] .....	43
Figura 1.19 – Plataforma de força utilizada por Rainer, Pernica e Allen [45] .....	44
Figura 1.20 – Força de contato do passo e reação do piso devido à caminhada [46] .....	45
Figura 1.21 – Componentes da série de Fourier da função representativa da reação do piso [46] .....	45
Figura 1.22 – Resposta do impacto do calcanhar no piso [47] .....	46
Figura 1.23 – Plataforma de força utilizada por Ebrahimpur, Sack e Patten [48] ..	46
Figura 2.1 – Viga mista e conectores [120] .....	52
Figura 2.2 – Viga mista com forma metálica ( <i>steel Deck</i> ) [120] .....	52

Figura 2.3 – Perfis soldados de aço embutidos em viga e pilar de concreto armado .....	53
Figura 2.4 – Posição da linha neutra em vigas mistas [120].....	55
Figura 2.5 – Linha neutra na laje de concreto [120] .....	55
Figura 2.6 – Linha neutra na mesa superior da viga de aço [120].....	57
Figura 2.7 – Linha neutra na alma da viga de aço [120].....	59
Figura 2.8 – Mecanismo de transmissão de forças na interface concreto aço [120] .....	62
Figura 2.9 – Influência do grau de interação parcial sobre a resistência a flexão de vigas mistas: (a) método rígido plástico; (b) aproximação linear [120] .....	63
Figura 2.10 – Interação parcial - força na interface concreto/aço igual à resistência à tração do perfil de aço [120].....	64
Figura 2.11 – Interação parcial - força na interface concreto/aço igual à resistência à compressão da laje de concreto [120].....	67
Figura 2.12 – Ação de conectores de cisalhamento em vigas mistas .....	69
Figura 2.13 – Tipos de conectores de cisalhamento em vigas mistas [4] .....	70
Figura 2.14 – Modelo do ensaio tipo "Push-out" proposto pelo EUROCODE 4 [59] .....	71
Figura 3.1 – Escala modificada de Reiher – Meister [62], [63] .....	74
Figura 3.2 – Redução de vibração com a utilização de atenuadores dinâmicos [66] .....	76
Figura 3.3 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano [71] .....	83
Figura 3.4 – Posição do eixo de acordo com a posição da pessoa [71] .....	91
Figura 3.5 – Eixos de propagação das vibrações.....	92
Figura 3.6 – Curva de vibrações para aceleração em direções combinadas (eixos x,y e z) [70].....	93
Figura 3.7 – Curva básica de vibrações de edificações para aceleração no eixo z [70] .....	93
Figura 3.8 – Curva básica de vibrações de edificações para aceleração nos eixos x e y [70].....	94
Figura 4.1 – Força de contato do passo e reação do piso devido à caminhada [46] .....	96
Figura 4.2 – Função de carregamento proposta por Wendell [51].....	97
Figura 4.3 – Representação da carga durante a caminhada.....	99
Figura 4.4 – Variação espacial da carga.....	100

Figura 4.5 – Sinal de força no tempo e espectro de frequência referente ao caminhar humano .....	102
Figura 4.6 – Movimentos de um indivíduo durante um salto [110].....	102
Figura 4.7 – Força aplicada em uma estrutura durante um salto [50].....	103
Figura 4.8 – Comparação entre o sinal experimental e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning [50] .....	104
Figura 4.9 – Intervalos de tempo da função adotada .....	105
Figura 4.10 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas [50]...	105
Figura 4.11 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica .....	107
Figura 4.12 – Sinais de força no tempo para atividade de salto à vontade.....	108
Figura 5.1 – Ensaios experimentais com aplicação de cargas concentradas e distribuídas [6] .....	110
Figura 5.2 – Ensaios experimentais com aplicação de cargas distribuídas [6] .	110
Figura 5.3 – Seção transversal do sistema misto (medidas em centímetros) ...	111
Figura 5.4 – Seção genérica do perfil .....	112
Figura 5.5 – Modelo experimental [38].....	112
Figura 5.6 – Modelo estrutural genérico dos pisos [38] .....	113
Figura 5.7 – Seção transversal genérica dos pisos [38] .....	113
Figura 5.8 – Detalhe 1 na Figura 5.7 [38].....	114
Figura 5.9 – Modelo tridimensional do piso .....	114
Figura 5.10 – Ligação semirrígida entre as vigas secundárias (VS e VS_b) e a viga principal (VP) – corte CC [38] .....	115
Figura 5.11 – Ligação semirrígida entre as vigas secundárias (VS e VS_b) e a viga principal (VP) – corte CC [38] .....	116
Figura 5.12 – Ligação do tipo LD e LE – corte AA e BB [38] .....	116
Figura 5.13 – Ligação do tipo LD e LE – corte AA e BB [38] .....	116
Figura 5.14 – Ligação flexível entre as vigas secundárias (VS e VS_b) e a viga principal de borda (VP_b) – corte DD [38].....	117
Figura 5.15 – Ligação flexível entre as vigas secundárias (VS e VS_b) e a viga principal de borda (VP_b) – corte DD [38].....	117
Figura 5.16 – Curva momento <i>versus</i> rotação – ligação tipo LE e LD [38] .....	118
Figura 5.17 – Curva momento <i>versus</i> rotação – ligação tipo LC [38] .....	119
Figura 5.18 – Conector tipo pino cabeça.....	119
Figura 5.19 – Forma metálica ( <i>steel deck</i> MF – 75) .....	119
Figura 6.1 – Elemento finito solid-45 [55] .....	121
Figura 6.2 – Elemento SHELL 63 [55].....	122
Figura 6.3 – Elemento BEAM 44 [55].....	122

Figura 6.4 – Visualização da excentricidade entre a laje e a viga .....	123
Figura 6.5 – Curva momento <i>versus</i> rotação multilinear .....	123
Figura 6.6 – Modelo computacional I [55] .....	125
Figura 6.7 – Perspectiva do modelo [55].....	126
Figura 6.8 – Vista frontal do modelo [55].....	126
Figura 6.9 – Vista superior do modelo [55].....	126
Figura 6.10 – Curva força <i>versus</i> deslizamento do conector [73].....	127
Figura 6.11 – Perspectiva do modelo [55].....	128
Figura 6.12 – Vista superior do modelo [55].....	128
Figura 6.13 – Laje de concreto discretizada por elementos sólidos (Solid 45) [55] .....	130
Figura 6.14 – Vista superior do modelo [55].....	130
Figura 6.15 – Detalhe I [55].....	130
Figura 6.16 – Seção transversal [55] .....	131
Figura 7.1 – Rigidez dos conectores para níveis de força a 25, 50, 75 e 100%.....	136
Figura 7.2 – Metodologia inicial proposta.....	136
Figura 7.3 – Variação das frequências naturais em função da variação do número de conectores e da sua rigidez. ....	138
Figura 7.4 – Iteração total (76 conectores e rigidez a 50% da curva). ....	140
Figura 7.5 – Iteração parcial (38 conectores e rigidez a 100% da curva). ....	140
Figura 7.6 – Frequências naturais em função da variação do número de conectores. ....	142
Figura 7.7 – Interação total (174 conectores de cisalhamento). ....	143
Figura 7.8 – Interação parcial (84 conectores de cisalhamento). ....	144
Figura 7.9 – Frequências naturais em função da variação do número de conectores. ....	145
Figura 7.10 – Interação total (174 conectores de cisalhamento) .....	147
Figura 7.11 – Interação parcial (84 conectores de cisalhamento) .....	148
Figura 8.1 – Trajetória percorrida por uma pessoa. ....	150
Figura 8.2 – Trajetória percorrida por duas pessoas.....	150
Figura 8.3 – Modelo do piso misto aço-concreto [38].....	151
Figura 8.4 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total)....	152
Figura 8.5 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total)....	153
Figura 8.6 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total)....	153

Figura 8.7 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação total)....	154
Figura 8.8 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).154	
Figura 8.9 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).155	
Figura 8.10 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto A (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).....	155
Figura 8.11 – Deslocamento translacional vertical e aceleração referente ao ponto B (Figura 8.3). Domínio do tempo e domínio da frequência (interação parcial).....	156
Figura 8.12 – Aceleração de pico [121].....	157
Figura 8.13 – Aceleração em rms ( <i>root mean square</i> ) [121] .....	158
Figura 8.14 – Caso de carga 1.....	158
Figura 8.15 – Caso de carga 2.....	159
Figura 8.16 – Caso de carga 3.....	159
Figura 8.17 – Caso de carga 4.....	159
Figura 9.1 – Perspectiva referente a uma pessoa em atividade.....	170
Figura 9.2 – Perspectiva referente a três pessoas em atividade. ....	170
Figura 9.3 – Modelo genérico do piso misto aço-concreto investigado. ....	171
Figura 9.4 – Deslocamento referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (ginástica aeróbica – interação total). ....	172
Figura 9.5 – Aceleração referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (ginástica aeróbica – interação total). ....	172
Figura 9.6 – Deslocamento referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (saltos à vontade – interação total). ....	173
Figura 9.7 – Aceleração referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (saltos à vontade – interação total).....	173
Figura 9.8 – Deslocamento referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (ginástica aeróbica – interação parcial).....	174
Figura 9.9 – Aceleração referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (ginástica aeróbica – interação parcial). ....	174
Figura 9.10 – Deslocamento referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (saltos à vontade – interação parcial). ....	175
Figura 9.11 – Aceleração referente ao ponto A e B (Figura 9.3). Domínio do tempo e da frequência (saltos à vontade – interação parcial). ....	175



Figura 9.12 – Caso de carga 1.....	177
Figura 9.13 – Caso de carga 2.....	178
Figura 9.14 – Caso de carga 3.....	178
Figura 9.15 – Caso de carga 4.....	178
Figura 9.16 – Caso de carga 5.....	179

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Frequência natural mínima requerida por Allen, Rainer e Pernica [64] .....	75
Tabela 3.2 – Frequência natural mínima requerida [69] .....	79
Tabela 3.3 – Faixas de frequência das atividades [71].....	84
Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados na avaliação da resposta dinâmica estrutural [56] .....	85
Tabela 3.5 – Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios em relação a resposta humana [70] .....	92
Tabela 4.1 – Harmônicos do passo [53].....	98
Tabela 4.2 – Característica do passo humano.....	100
Tabela 4.3 – Valores de CD utilizados nas análises [50].....	106
Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados nas análises [9]. .....	106
Tabela 5.1 – Características geométricas dos perfis de aço .....	111
Tabela 5.2 – Características geométricas dos perfis de aço .....	115
Tabela 6.1 – Taxa de amortecimento dos quatro primeiros modos de vibração .....	132
Tabela 6.2 – Esforço computacional.....	133
Tabela 7.1 – Frequências naturais dos modelos II e III – interação total.....	135
Tabela 7.2 – Frequências naturais em função da quantidade e da rigidez dos conectores de cisalhamento. ....	137
Tabela 7.3 – Frequências naturais <i>versus</i> variação do número de conectores	141
Tabela 7.4 – Frequências naturais <i>versus</i> variação do número de conectores	145
Tabela 8.1 – Parâmetros utilizados na análise de vibração forçada.....	151
Tabela 8.2 – Acelerações de pico do modelo. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12$ ). Interação total e interação parcial. ....	160
Tabela 8.3 – Acelerações em rms ( <i>root mean square</i> ) do modelo. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12$ ). Interação total e interação parcial.....	162
Tabela 8.4 – Acelerações de pico. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$ e $1,45$ ). Interação total.....	164
Tabela 8.5 – Acelerações de pico. Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$ e $1,45$ ). Interação parcial.....	164

Tabela 8.6 – Acelerações em RMS ( <i>Root Mean Square</i> ). Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$ e $1,45$ ). Interação total. ....	166
Tabela 8.7 – Acelerações em rms ( <i>root mean square</i> ). Fator de majoração do impacto do calcanhar ( $f_{mi} = 1,12, 1,30$ e $1,45$ ). Interação parcial.....	167
Tabela 9.1 – Aceleração de pico em função da variação do número de pessoas. ....	180
Tabela 9.2 – Aceleração de pico em função da variação do número de pessoas. ....	180
Tabela 9.3 – Aceleração de pico em função da variação do período de contato (ginástica aeróbica).....	183
Tabela 9.4 – Aceleração de pico em função da variação do período de contato (saltos à vontade). ....	184
Tabela 9.5 – Aceleração de pico em função da variação do período de contato (ginástica aeróbica).....	184
Tabela 9.6 – Aceleração de pico em função da variação do período de contato (saltos à vontade). ....	185
Tabela 9.7 – Aceleração de pico em função da variação do coeficiente de impacto (ginástica aeróbica). ....	187
Tabela 9.8 – Aceleração de pico em função da variação do coeficiente de impacto (saltos à vontade). ....	188
Tabela 9.9 – Aceleração de pico em função da variação do coeficiente de impacto (ginástica aeróbica). ....	188
Tabela 9.10 – Aceleração de pico em função da variação do coeficiente de impacto (saltos à vontade). ....	189

## Lista de símbolos

### Letras romanas maiúsculas

$A_g$  – área da seção transversal do perfil de aço

$M_r$  – momento resistente

$C'_r$  – a componente resistente em compressão resistida pela laje de concreto

$C_r$  - parcela de aço sujeita a compressão

$T_r$  – parcela do aço sujeita a tração

$L_{cs}$  – força na interface laje-viga

$I_t$  – momento de inércia da seção transformada

$L$  – vão

$I_t$  – momento de inércia da seção transformada

$P(t)$  – ação dinâmica representativa da atividade humana

$P$  – peso da pessoa

$W$  – peso efetivo total do piso em (kN)

$I_g$  – momento de inércia transformado da viga principal

$E_s$  – módulo de elasticidade do aço em (MPa)

$L_g$  – Vão da viga principal

$I_j$  – momento de inércia transformado da viga secundária

$L_j$  – vão da viga secundária

$L_g$  – vão da viga principal

$L_j$  – vão da viga secundária

$E_c$  – módulo de elasticidade do concreto

$I_j$  – momento de inércia efetivo da viga

$S$  – espaçamento entre as vigas secundárias

$P$  – peso da pessoa

$F_m$  – fator máximo da série de Fourier

$F_{mi}$  – fator de majoração do impacto do calcanhar

$C_1$  e  $C_2$  – coeficientes

$F(t)$  – representação matemática do carregamento no tempo

CD – coeficiente de defasagem  
Kp – coeficiente de impacto  
P – peso da pessoa  
T – período da atividade  
Tc – período de contato da atividade  
VS – vigas mistas secundárias internas  
VS\_b – vigas secundárias de borda  
VP – viga principal

### **Letras romanas minúsculas**

$f_{ck}$  – resistência característica do concreto à compressão  
 $b_e$  – largura efetiva  
 $a$  – distância da fibra superior da laje de concreto à linha neutra  
 $f_y$  – tensão de escoamento do aço do perfil  
 $q_n$  – resistência de um conector  
 $m$  – massa da seção mista considerada por unidade de comprimento  
 $a_0$  – aceleração de pico  
 $f$  – frequência em (Hz);  
 $t_c$  – espessura efetiva da laje de concreto  
 $w$  – carga permanente da seção  
 $i$  – múltiplo harmônico da frequência do passo.  
 $f_p$  – frequência do passo da atividade  
 $t$  – tempo  
 $a_p$  – pico de aceleração  
 $g$  – aceleração da gravidade  
 $w_g$  – carga por unidade de comprimento  
 $w_j$  – carga por unidade de comprimento  
 $w_g$  – carga por unidade de comprimento  
 $d_e$  – espessura da laje de concreto  
 $i$  – número do i-ésimo harmônico da frequência fundamental da força  
 $nh$  – números de harmônicos considerados para representar a força  
 $f_p$  – frequência do passo do caminhar humano  
 $d$  – altura  
 $b_f$  – largura da mesa

$t_f$  – espessura da mesa superior e inferior

$t_w$  – espessura da alma

## **Letras gregas**

$\phi_c$  – coeficiente de segurança do concreto

$\phi$  – coeficiente de segurança do aço

$\alpha$  – grau de interação

$\alpha_i$  – coeficiente dinâmico referente ao harmônico causador da ressonância

$\beta$  – taxa de amortecimento modal

$\alpha_i$  – coeficiente dinâmico do i-ésimo harmônico da série de Fourier

$\varphi_i$  – ângulo de fase entre o i-ésimo e o primeiro harmônico

$\xi_i$  – taxa de amortecimento do modo i

$\omega_{0i}$  – frequência natural circular do modo  $i = 2 \text{ a } f_{ni}$ .

## **Lista de abreviaturas**

NBR            Norma Brasileira Registrada

PUC-Rio      Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro