



**Elvis Dinati Chantre Lopes**

**Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil.

Orientador: Sebastião A. L. de Andrade  
Co-orientador: José Guilherme S. da Silva

Rio de Janeiro  
Agosto de 2012



**Elvis Dinati Chantre Lopes**

**Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico 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. Luiz Fernando C. Ramos Martha**  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Francisco José da Cunha Pires Soeiro**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. Ricardo Azoubel da Mota Silveira**  
Universidade Federal de Ouro Preto

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

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

### **Elvis Dinati Chantre Lopes**

Possui grau de Mestre em Engenharia Civil, ênfase em Estruturas, pela UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2008. Possui alguns trabalhos publicados em atas de conferências e revistas internacionais na área de Comportamento dinâmico de sistemas mistos aço-concreto.

#### Ficha catalográfica

Lopes, Elvis Dinati Chantre

Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga / Elvis Dinati Chantre Lopes ; orientador: Sebastião A. L. de Andrade ; co-orientador: José Guilherme S. da Silva. – 2012.

219 f. il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estruturas metálicas e mistas. 3. Pisos mistos. 4. Interação aço-concreto. 5. Ligações viga-coluna. 6. Ligações viga-viga. 7. Dinâmica estrutural. 8. Conforto humano. I. Andrade, Sebastião A. L. de. II. Silva, José Guilherme S. da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

*“Mesmo desacreditado e ignorado  
por todos, não posso desistir, pois  
pra mim, vencer é a única solução”.*

*Albert Einstein*

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar a Deus por ter me conduzido até aqui, dando-me provas de sua presença constante.

Aos meus pais, pelo amor, confiança, dedicação e apoio constantes ao longo da minha vida acadêmica.

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

A toda a minha família, em especial as minhas irmãs Euda e Eliane, ao meu irmão Tito e ao meu sobrinho Diego pelo apoio, carinho e amizade.

Aos meus amigos Francelino Lopes, Edson Encarnação, Evandro Santos, Antônio Ramos e Ismael Pimentel, pelo apoio, amizade e companheirismo.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, João, Fernando, Juliana, Antônio, Gilvan, Sidlei, Júlio e Carla pelo apoio e amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela amizade e pelos ensinamentos transmitidos, fazendo com que este sonho fosse possível.

Aos professores do PGECIV/UERJ pela amizade, incentivo e apoio constantes.

Ao funcionário do Laboratório de Estruturas da UERJ, Rodolfo, pela colaboração do apoio logístico prestado.

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

## Resumo

Lopes, Elvis Dináti Chantre; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de; Silva, José Guilherme Santos da. **Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga**. Rio de Janeiro, 2012. 219p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescimento dos problemas de vibrações excessivas em edificações oriundas de atividades humanas rítmicas tem conduzido à necessidade de desenvolvimento de critérios específicos para projetos estruturais submetidos à ação dessas cargas dinâmicas. Esta foi uma das motivações para o desenvolvimento de uma metodologia de análise para investigação da resposta dinâmica de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto). Objetiva-se verificar a influência da interação aço-concreto (interação total e parcial) e, bem como, das ligações estruturais (ligações viga-coluna e viga-viga), sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto). Deste modo, são utilizados três modelos de carregamento dinâmico representativos das atividades humanas rítmicas referentes a saltos à vontade e ginástica aeróbica. As cargas dinâmicas são obtidas por meio de testes experimentais e, também, com base em normas e recomendações internacionais de projeto. Com referência a interação aço-concreto, vários tipos de conectores (tipo stud e perfobond) são considerados ao longo da investigação. Mesmo sabendo-se que a análise de vibrações de pisos induzidas por atividades humanas tem sido alvo de inúmeras investigações ao longo dos últimos dois séculos (1828-2012), os autores desconhecem na literatura técnica um trabalho de pesquisa tão abrangente, no que diz respeito à análise dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos à ação de atividades humanas rítmicas, com base na consideração dos efeitos dos conectores (interação aço-concreto) e das ligações (viga-coluna e viga-viga). Diante do exposto, o quadro global investigado neste trabalho de pesquisa demonstra, claramente, um indicativo de que os critérios de projeto devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação e, especialmente, a influência da interação aço-concreto e das ligações estruturais, no que tange a verificação dos estados limites de utilização (conforto humano), associados ao comportamento estrutural de pisos mistos de edificações.

## Palavras-chave

Estruturas metálicas e mistas; Pisos mistos; Interação aço-concreto; Ligações viga-coluna; Ligações viga-viga; Dinâmica Estrutural; Conforto humano.

## Abstract

Lopes, Elvis Dinati Chantre; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (advisor); Silva, José Guilherme Santos da (Co-advisor). **Non-linear dynamical analysis of composite floors considering the effects of partial interaction and beam to column and beam to beam connections.** Rio de Janeiro, 2012. 219p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The increasing incidence of building vibration problems due to human activities led to a specific design criterion to be addressed in structural design. This was the main motivation for the development of a design methodology centred on the steel-concrete composite floors non-linear dynamic response submitted to loads due to human rhythmic activities. This way, the main objective of this work is to investigate the influence of steel-concrete interaction degree (from total to various levels of partial interaction) and the beam-to-column and beam-to-beam connections effect over the non-linear dynamic behaviour of composite floors. Thus, three dynamic loading models were utilized, in order to simulate human rhythmic activities such as jumping and aerobic gymnastics. The dynamic loads were obtained through experimental tests and based on international design codes and recommendations. Regarding the steel-concrete interaction degree, the stud and perfobond connectors are considered in this investigation. Even though this topic has been studied in the technical literature for nearly two centuries, the steel-concrete composite floors non-linear dynamic analysis submitted to human rhythmic activities has not yet been addressed so comprehensively, as far as the authors are concerned in this investigation, based on the consideration of the connectors (steel-concrete interaction degree) and connections (beam-to-column and beam-to-beam) effects. Considering all aspects mentioned before, the results have demonstrated that the design criteria should include the original nature of the dynamic excitation and, specially, the steel-concrete interaction degree and structural connections effects when the steel-concrete composite floors structural behaviour, related to the serviceability limit states (human comfort) are investigated.

## Keywords

Steel and composite structures; Composite Floors; Steel-concrete interaction; Beam-to-column connections; Beam-to-beam connections; Structural dynamics; Human comfort.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	24
1.1. Generalidades	24
1.2. Interação aço-concreto	26
1.2.1 Histórico	28
1.3 Ligações semirrígidas	35
1.3.1 Histórico	36
1.4 Carregamentos dinâmicos	39
1.4.1 Histórico	40
1.5 Objetivos e Motivação	43
1.6 Estrutura do documento	45
<b>2.Estruturas mistas</b>	47
2.1 Considerações iniciais	47
a) Vigas mistas	48
b) Pilares mistos	50
2.2 Dimensionamento de vigas mistas – Interação total	51
2.2.1 Interação total - linha neutra na laje de concreto	51
2.2.2 Interação total - linha neutra na mesa superior da viga	53
2.2.3 Interação total - linha neutra na alma da viga de aço	55
2.3 Dimensionamento de vigas mistas – Interação parcial	57
2.3.1 Interação parcial - linha neutra na laje de concreto	58
2.3.2 Interação parcial - linha neutra no perfil de aço	61
2.4 Conectores de cisalhamento	63
2.4.1 Classificação dos conectores	63
2.4.2 Aspectos relevantes sobre conectores de cisalhamento	64
2.4.3 O conector stud	65
2.4.4 O conector perfobond	66
2.4.5 O conector em perfil U	67
2.4.6 O conector X-HVB	68
2.4.7 Rebite com rosca interna e parafuso sextavado	68

2.5. Expressões para cálculo da resistência de conectores	69
a) Conectores pinos com cabeça – Studs	69
b) Conectores tipo U	70
c) Conector Perfobond	71
d) Conector Tipo-T	72
<b>3 Normas e recomendações de projeto</b>	<b>73</b>
3.1. Introdução	73
3.2. Normas e critérios de projeto	73
3.2.1. NBR 6118 (2003) – Projeto e execução de obras de concreto armado	74
3.2.2. Guia Prático - Floor vibration due to human activity - AISC (2003)	74
3.2.3. Norma Canadense – Limit States Design of Steel Structures (Canadian Standards Association): CAN3-S16.1-M89	78
3.2.4 ISO 2631/1 - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations)	80
3.2.5 ISO 2631/2 - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations)	80
3.2.6 Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e concreto de Edifícios: NBR 8800/2008	81
3.3. Procedimentos para minimizar efeitos de vibração	82
3.3.1 Isolamento da vibração	83
3.3.2 Relocação	83
3.3.3 Enrijecimento	84
3.3.4 Aumento de amortecimento	84
<b>4. Cargas Dinâmicas</b>	<b>85</b>
4.1 Generalidades	85
4.2 Caracterização das ações dinâmicas	87
4.3 Modelo de carregamento I (MC-I)	88
4.4 Modelo de carregamento II (MC-II)	94
4.5 Modelo de carregamento III (MC-III)	96
4.6 Comparação das funções de carregamento	98
<b>5. Descrição do Modelo Estrutural</b>	<b>99</b>
5.1 Introdução	99
5.2 Descrição dos sistemas estruturais	99

5.3 Esquema da aplicação das cargas	107
5.3.1 Carregamento estático	107
5.3.2 Carregamento dinâmico	108
<b>6. Modelo Numérico Computacional</b>	<b>111</b>
6.1 Considerações iniciais	111
6.2 Elementos finitos utilizados	111
6.2.1 Elemento BEAM 44	112
6.2.2 Elemento SHELL 63	113
6.2.3 Combin 7	113
6.2.4 Combin 39	114
6.3 Hipóteses simplificadoras	115
6.4 Modelagem numérico-computacional	116
6.5 Modelagem da interação aço-concreto: interação total e parcial	120
6.6 Modelagem das ligações viga-coluna e viga-viga	122
6.7 Modelagem do amortecimento estrutural	123
6.8 Desempenho computacional	125
<b>7. Análise das frequências e dos modos de vibração</b>	<b>127</b>
7.1 Introdução	127
7.2 Análise das frequências naturais (Autovalores: Interação total)	127
7.3 Análise dos modos de vibração (Autovetores: Interação total)	131
7.4 Análise das frequências naturais (Autovalores: Interação parcial. Ligações viga-coluna rígidas)	136
7.5 Análise dos modos de vibração (Autovetores: Interação parcial. Ligações viga-coluna rígidas)	139
7.6 Variações das frequências naturais de acordo com o número de conectores: Ligações viga-coluna rígidas	141
7.7 Análise das frequências naturais (Autovalores: Interação parcial. Ligações viga-coluna semirrígidas)	146
7.8 Análise dos modos de vibração (Autovetores: Interação parcial Ligações viga-coluna semirrígidas)	148
7.9 Variações das frequências de acordo com o número de conectores: Ligações viga-coluna semirrígidas	151
7.10 Comparação das frequências de acordo com a ligação viga-coluna (Rígida e Semirrígida)	155

<b>8. Análise estática</b>	157
8.1 Introdução	157
8.2 Deslocamentos translacionais verticais	157
8.3 Momentos fletores	160
8.4 Esforços cortantes	166
<b>9. Análise harmônica</b>	171
9.1 Aspectos gerais	171
9.2 Análise harmônica	171
<b>10. Estudo de conforto humano</b>	175
10.1 Aspectos gerais	175
10.2 Análise dinâmica no domínio do tempo: Ligações viga-coluna rígidas	176
10.3 Análise das acelerações máximas ou acelerações de pico: Ligações viga-coluna rígidas	182
10.3.1 Saltos à vontade	182
10.3.2 Ginástica aeróbica	184
10.4 Análise no domínio do tempo: Ligações viga-coluna semirrígidas	189
10.5 Análise das acelerações máximas ou acelerações de pico: Ligações viga-coluna semirrígidas	194
10.5.1 Saltos à vontade	194
10.5.2 Ginástica aeróbica	196
10.6 Comparação das acelerações de pico de acordo os modelos de carregamentos, ligações estruturais e tipo de conectores	201
<b>11. Considerações finais</b>	205
11.1 Introdução	205
11.2 Principais conclusões	205
11.2.1 Metodologia de análise e modelagem computacional	206
11.2.2 Análise estática	206
11.2.3 Análise harmônica	207
11.2.4 Análise das frequências e dos modos de vibração	207
11.2.5 Modelos de carregamento dinâmico	208
11.2.6 Análise de conforto humano	209
11.2.6.1 Efeito da interação aço-concreto (total e parcial)	209
11.2.6.2 Efeito do tipo de conector de cisalhamento (Stud e Perfobond)	210
11.2.6.3 Efeito das ligações estruturais (ligações viga-coluna e viga-viga)	210

11.2.6.4 Efeito das atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade)	211
11.2.7 Recomendações de projeto	212
11.3 Principais contribuições do presente trabalho	212
11.4 Sugestões para trabalhos futuros	213
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>215</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Modelo de uma estrutura mista (Aço-concreto)	27
Figura 1.2 – Conectores de cisalhamento	28
Figura 1.3 – Discretização dos modelos bidimensionais, Kim et al. (2001)	29
Figura 1.4 – Modelo proposto para a forma de aço (steel deck) Vianna (2005)	30
Figura 1.5 – Visão geral da discretização para os modelos com conector perfil “U” formado a frio, Tristão (2005)	31
Figura 1.6 – Conector perfobond e conector em chapa estendida, Veríssimo et al. (2006)	32
Figura 1.7 - Modelagem dos conectores, Queiroz et al. (2007)	33
Figura 1.8 - Modelo tridimensional em elementos finitos, Ansys (2009)	33
Figura 1.9 – Algumas representações matemáticas da curva momento versus rotação	36
Figura 2.1 – Seções transversais de vigas mistas Eurocode 4 (2001)	48
Figura 2.2 – Vigas mistas fletidas David (2007).	49
Figura 2.3 – Perfis soldados de aço embutidos em pilar de concreto armado	50
Figura 2.4 – Posição da linha neutra em vigas mistas	51
Figura 2.5 – Linha neutra na laje de concreto, Andrade e Velasco (2010)	52
Figura 2.6 – Linha neutra na mesa superior da viga de aço, Andrade e Velasco (2010)	53
Figura 2.7 – Linha neutra na alma da viga de aço, Andrade e Velasco (2010)	55
Figura 2.8– Influência do grau de interação parcial sobre a resistência a flexão de vigas mistas. Andrade e Velasco (2010)	58
Figura 2.9 – Interação parcial - força na interface concreto/aço igual à resistência à tração do perfil de aço, Andrade e Velasco (2010)	59
Figura 2.11 - Classificação dos conectores e suas curvas características David (2007).	64
Figura 2.12 – Curva força versus deslizamento David (2007)	64
Figura 2.13 – detalhes do conector stud, Veríssimo (2007).	63
Figura 2.14 - Conector perfobond: contínuo e descontínuo.	66
Figura 2.15 – Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos do perfobond, Veríssimo (2007).	67
Figura 2.16 – Conector em perfil U laminado, Veríssimo (2007).	67
Figura 2.17 – Conector X-HVB Hilti (2000).	68
Figura 2.18 – Rebite com rosca interna e parafuso sextavado oliveira (2001)	69

Figura 3.1 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano ISO 2631/2 (1989).	76
Figura 3.2 – Curva básica de vibrações de edificações para aceleração verticais ISO 2631/2 (1989).	81
Figura 4.1 – Exemplo de exercício de ginástica aeróbica, Gonçalves (2012).	86
Figura 4.2 – Exemplo de exercício de saltos à vontade, Gonçalves (2012).	86
Figura 4.3 – Movimentos de um indivíduo durante um salto, Faisca (2003).	87
Figura 4.4 – Força aplicada numa estrutura durante um salto, Faisca (2003).	88
Figura 4.5 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning, Faisca (2003).	89
Figura 4.6 – Intervalos de tempo da função adotada, Faisca (2003).	90
Figura 4.7 - Coeficientes de defasagem para as atividades propostas por Faisca (2003).	91
Figura 4.8 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica.	92
Figura 4.9 – Sinais de força no tempo para saltos à vontade.	93
Figura 4.10 – Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica.	94
Figura 4.11 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica (MC-II).	96
Figura 4.12 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica (MC-III)	97
Figura 4.13 – Comparação dos sinais de força no tempo para atividades aeróbicas	98
Figura 5.1 – Planta baixa do piso misto investigado. Cotas em (mm).	100
Figura 5.2 - Seção transversal típica. Cotas em (mm).	101
Figura 5.3 – Planta baixa genérica do painel do piso em estudo.	101
Figura 5.4 – Seção transversal genérica do painel do piso em estudo.	101
Figura 5.5 – Perspectiva do modelo do piso misto (aço-concreto).	102
Figura 5.6 - Vistas das ligações. Viga-viga e viga-coluna.	102
Figura 5.7 - Curva momento versus rotação das ligações viga-viga semirrígidas Oliveira (2005).	104
Figura 5.8 - Curva momento versus rotação das ligações viga-coluna semirrígidas Carvalho (1997).	104
Figura 5.9 - Conectores de cisalhamento do tipo Stud bolts e Perfobond, Vianna, (2009).	105
Figura 5.10 - Curva força x deslizamento dos conectores de cisalhamento. Conector do tipo Stud 13mm Tristão (2002).	105
Figura 5.11 - Curva força x deslizamento dos conectores de cisalhamento. Conector do tipo Stud 16mm, Lam et al. (2007).	105

Figura 5.12 - Curva força x deslizamento dos conectores de cisalhamento. Conector do tipo Stud 19mm, Ellobody (2005).	106
Figura 5.13 - Curva força x deslizamento dos conectores de cisalhamento. Conector do tipo Perfobond, Vianna (2009).	106
Figura 5.14 - Nós do modelo para a análise estática	108
Figura 5.15 – Distribuição do modelo de carregamento	109
Figura 5.16 – Distribuição do modelo de carregamento	109
Figura 5.17 – Distribuição do modelo de carregamento	110
Figura 6.1 – Elemento BEAM 44 Ansys (2009)	112
Figura 6.2 – Excentricidade entre a laje e a viga	113
Figura 6.3 – Elemento SHELL 63 Ansys (2009)	113
Figura 6.41 – Elemento COMBIN7 Ansys (2009)	114
Figura 6.5 – Elemento COMBIN39 Ansys (2009)	114
Figura 6.6 – Refinamento da malha	116
Figura 6.7 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural I	118
Figura 6.8 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural II	118
Figura 6.9 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural III	119
Figura 6.10 - Malhas de elementos finitos representativas do modelo estrutural IV	119
Figura 6.11 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo estrutural II.	120
Figura 6.12 - Metodologia inicial proposta na modelagem das interações	121
Figura 6.13 - modelagem dos conectores	121
Figura 6.14 - Representação esquemática da ligação viga-coluna	123
Figura 7.1 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura I	129
Figura 7.2 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura II	130
Figura 7.3 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura III	130
Figura 7.4 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura IV	130
Figura 7.5 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural I: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis	132
Figura 7.6 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural II: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis	133
Figura 7.7 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural III: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis	134

Figura 7.8 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural IV: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis	135
Figura 7.9 - Modos de vibração do modelo estrutural II (Interação total. Stud 19mm. Ligações viga-coluna rígidas. ligações viga-viga semirrígidas)	139
Figura 7.10 - Modos de vibração do modelo estrutural II (Interação parcial. Stud 19mm. Ligações viga-coluna rígidas. ligações viga-viga semirrígidas)	140
Figura 7.11 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura II. Stud 13mm.	143
Figura 7.12 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura II. Stud 16mm	144
Figura 7.13 – Variação da frequência fundamental. Modelo estrutura II. Stud 19mm	145
Figura 7.14 - Modos de vibração do modelo estrutural II (Interação total. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ligações viga-viga semirrígidas)	149
Figura 7.15 - Modos de vibração do modelo estrutural II (Interação parcial. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ligações viga-viga semirrígidas)	150
Figura 7.16 – Variação da frequência fundamental. Stud 13mm	152
Figura 7.17 – Variação da frequência fundamental. Stud 16mm	153
Figura 7.18 – Variação da frequência fundamental. Stud 19mm	154
Figura 7.19 – Frequências naturais em função da variação da rigidez das ligações. Interação Parcial. Stud 19mm	156
Figura 7.20 – Frequências naturais em função da variação da rigidez das ligações. Interação Parcial. Perfobond	156
Figura 8.1 – Deformada típica do Modelo Estrutural II. Interação parcial. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ligações viga-viga flexíveis	158
Figura 8.2 – Deslocamentos translacionais verticais do modelo estrutural II. Ligações viga-coluna rígida. Interação Parcial	159
Figura 8.3 – Deslocamentos translacionais verticais do modelo estrutural II. Ligações viga-coluna semirrígida. Interação Parcial	159
Figura 8.4 – Digrama de momentos fletores. Vigas secundarias. Ligações viga-coluna rígida. Interação total – Stud 19mm	161
Figura 8.5 – Digrama de momentos fletores. Vigas secundarias. Ligações viga-coluna semirrígida. Interação total – Stud 19mm	162
Figura 8.6 – Digrama de momentos fletores. Vigas principais. Ligações viga-coluna rígida. Interação total – Stud 19mm	163
Figura 8.7 – Digrama de momentos fletores. Vigas principais. Ligações viga-coluna semirrígida. Interação total – Stud 19mm	163

Figura 8.8 – Digrama de esforços cortantes. Vigas secundarias. Ligação viga-coluna rígida. Interação total – Stud 19mm	166
Figura 8.9 – Digrama de esforços cortantes. Vigas secundarias. Ligação viga-coluna semirrígida. Interação total – Stud 19mm	169
Figura 8.10 – Digrama de esforços cortantes. Vigas principais. Ligação viga-coluna rígida. Interação total – Stud 19mm	169
Figura 8.11 – Digrama de esforços cortantes. Vigas principais. Ligação viga-coluna semirrígida. Interação total – Stud 19mm	170
Figura 9.1 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga flexível	172
Figura 9.2 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida	172
Figura 9.3 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga rígida	173
Figura 9.4 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga flexível	173
Figura 9.5 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida	173
Figura 9.6 – Fatores de amplificação dinâmica em função de $\beta$ . Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga rígida	174
Figura 10.1 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna rígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-I	178
Figura 10.2 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna rígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-II	179
Figura 10.3 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna rígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-III	180
Figura 10.4 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-I	190
Figura 10.5 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-II	191
Figura 10.6 – Deslocamentos e acelerações. Ligação viga-coluna semirrígida. Ligação viga-viga semirrígida. Ginástica Aeróbica. MC-III	192
Figura 10.7 – Acelerações em função da variação do modelo de carregamento e das interações aço-concreto.	201
Figura 10.8 – Acelerações em função da variação do tipo de conector de cisalhamento. Ligações viga-coluna semirrígidas.	203

Figura 10.9 – Acelerações em função da variação da rigidez das ligações viga-coluna. Interação Parcial. 203

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Frequência natural mínima requerida NBR 6118 (2003)	74
Tabela 3.2 – Frequências da excitação, $f_p$ , e coeficientes dinâmicos, $\alpha_i$ , associados às atividades humanas AISC (2003).	76
Tabela 3.3 – Valores recomendados para os parâmetros $P_0$ , $\beta$ e limites para $a_0/g$ AISC (2003).	78
Tabela 4.1 – Valores de CD, Faisca (2003).	91
Tabela 4.2 – Parâmetros experimentais utilizados por Faisca (2003).	92
Tabela 4.3 - Coeficientes dinâmicos e harmônicos, MURRAY <i>et al.</i> (2003)	95
Tabela 4.4 – Coeficientes dinâmicos (CEB 1993)	97
Tabela 5.1 - Características geométricas das vigas e colunas do piso misto (dimensões em mm).	102
Tabela 5.2. Características quantidade de conectores utilizados	106
Tabela 6.1 – Espaçamento entre os conectores	122
Tabela 6.2 – Valores recomendados de taxas de amortecimento	125
Tabela 7.1 - Frequências naturais do Modelo Estrutural I	127
Tabela 7.2 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II	128
Tabela 7.3 - Frequências naturais do Modelo Estrutural III	128
Tabela 7.4 - Frequências naturais do Modelo Estrutural IV	128
Tabela 7.5 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 13mm. $S_j=66\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna rígidas	136
Tabela 7.6 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 16mm. $S_j=150\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna rígidas.	137
Tabela 7.7 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 19mm. $S_j=200\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna rígidas	137
Tabela 7.8 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Perfobond. $S_j=2400\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna rígidas	138
Tabela 7.9 - Combinações da variação do número de conectores	142
Tabela 7.10 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 13mm. $S_j=66\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna semirrígidas	146
Tabela 7.11 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 16mm. $S_j=150\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna semirrígidas	147

Tabela 7.12 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Stud – 19mm. $S_j=200\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna semirrígidas	147
Tabela 7.13 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II. Perfobond. $S_j=2400\text{kN/mm}$ . Ligações viga-coluna semirrígidas	148
Tabela 8.1 – Deslocamentos translacionais verticais. Modelo Estrutural II. Stud - 19mm.	158
Tabela 8.2 – Deslocamentos translacionais verticais. Modelo Estrutural II. Perfobond.	158
Tabela 8.3 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do modelo II. Ligação viga-coluna rígida. Stud 19mm.	164
Tabela 8.4 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do modelo II. Ligação viga-coluna semirrígida. Stud 19mm	164
Tabela 8.5 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do modelo II. Ligação viga-coluna rígida. Perfobond	164
Tabela 8.6 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do modelo II. Ligação viga-coluna semirrígida. Perfobond.	165
Tabela 8.7 - Valores dos esforços cortantes máximos positivos e negativos do modelo estrutural II. Ligação viga-coluna rígida. Stud 19mm.	166
Tabela 8.8 - Valores dos esforços cortantes máximos positivos e Negativos. Ligação viga-coluna semirrígida. Stud 19mm.	166
Tabela 8.9 - Valores dos esforços cortantes máximos positivos e negativos do modelo estrutural II. Ligação viga-coluna rígida. Perfobond.	167
Tabela 8.10 - Valores dos esforços cortantes máximos positivos e negativos. Ligação viga-coluna semirrígida. Perfobond.	167
Tabela 10.1 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento I: 16 pessoas	183
Tabela 10.2 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas	183
Tabela 10.3 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas	183
Tabela 10.4 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento I: 16 pessoas	185
Tabela 10.5 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas	186
Tabela 10.6 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas	186

Tabela 10.7 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas	187
Tabela 10.8 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas	187
Tabela 10.9 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento I: 16 pessoas	195
Tabela 10.10 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas	195
Tabela 10.11 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna rígidas. Saltos à vontade. Caso de carregamento II: 32 pessoas	195
Tabela 10.12 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento I: 16 pessoas	197
Tabela 10.13 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas	197
Tabela 10.14 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento II: 32 pessoas	198
Tabela 10.15 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas	199
Tabela 10.16 - Acelerações de pico. Ligações viga-coluna semirrígidas. Ginástica aeróbica. Caso de carregamento III: 32 pessoas	199

## Lista de Símbolos

### Letras Romanas Maiúsculas

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

$M_r$  - momento resistente

$C_r'$  - 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

$L$  - 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

$L_g$  - 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

$K_p$  - coeficiente de impacto

$P$  - peso da pessoa

$T$  - período da atividade

$T_c$  – 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.  
 $t$  – tempo  
 $a_p$  – pico de aceleração  
 $g$  – aceleração da gravidade  
 $w_j$  – 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 $i = 2 \text{ i } f_{ni}$
$\gamma_a$	fator de segurança do para o aço estrutural
$\gamma_c$	fator de segurança do concreto
$\gamma_{cs}$	coeficiente de ponderação da resistência do conector
$\gamma_v$	coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,25

## Lista de Abreviaturas

DEC	Departamento de Engenharia Civil
NBR	Norma Brasileira Registrada
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro