

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS GERADOS NA
ASSOCIAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE VEDAÇÃO E
ESTRUTURA METÁLICA E CARACTERIZAÇÃO
ACÚSTICA E VIBRATÓRIA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO**

Ouro Preto, abril de 2001.

624.014.2

S163m

Sales, Urânia Costa.

Mapeamento dos Problemas gerados na associação entre sistemas de vedação e estrutura metálica e caracterização acústica e vibratória de painéis de vedação / Urânia Costa Sales. -- Ouro Preto: UFOP, 2001.

xxi, 249f. : il.

Orientadores: Prof. Dr. Henor Artur de Souza, Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil.

1. Construção metálica. I. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS GERADOS NA
ASSOCIAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE VEDAÇÃO E
ESTRUTURA METÁLICA E CARACTERIZAÇÃO
ACÚSTICA E VIBRATÓRIA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO**

AUTOR: URÂNIA COSTA SALES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, abril de 2001.

MAPEAMENTO DOS PROBLEMAS GERADOS NA ASSOCIAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE VEDAÇÃO E ESTRUTURA METÁLICA E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA E VIBRATÓRIA DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO.

AUTOR: URÂNIA COSTA SALES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 05 de abril de 2001, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Henor Artur de Souza (Orientador/UFOP)

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP)

Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (UFMG)

Prof. Dr^a. Maria Akutsu (IPT)

À minha família e aos meus amigos.

MEUS AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto e aos professores do Mestrado em Engenharia Civil, pela oportunidade de aprendizado e de crescimento.

Aos meus orientadores, Henor Artur de Souza e Francisco de Assis das Neves, que além de me guiarem no processo de pesquisa, se tornaram pessoas queridas e amigas.

Ao professor Walter Dornelas, por ser a pessoa que é e por estar sempre pronto a ajudar nos imprevistos do laboratório de computação.

Aos meus colegas de curso, que foram o maior prêmio dessa caminhada, já que o título de amigo foi conquistado a cada dia de convivência. Com certeza, o time formado nessa estória foi e sempre será inesquecível.

Aos escritórios de arquitetura, construtoras e empresas que colaboraram com essa pesquisa: Alaor Savoi Arquitetura, Alcindo Dell’Agnese Arquitetura, Candusso Arquitetura, Carsalade e Pascale Arquitetura, João Diniz Arquitetura, João Grillo Arquitetura, Oscar Ferreira Arquitetura, Triade Engenharia, Angra Incorporadora, ARCON – Center Shopping de Uberlândia, Construtora Construtec, Construtora Inpar, Construtora Zeenni Reis, Flasan, Metform, Precon, Premo, Sical, Stamp, Usiminas.

Ao arquiteto Luís Andrade, que cedeu algumas de suas fotos para ilustrarem esse trabalho.

Ao amigo Paulo Krüger, que me incentivou tanto a entrar no curso de mestrado.

À minha família e aos meus amigos, que me apoiaram em todos os momentos dessa jornada.

RESUMO

Na atualidade, a necessidade da industrialização da construção civil é uma realidade e um dos caminhos para a realização desta é a construção em aço. A viabilidade das construções metálicas no mercado brasileiro está diretamente ligada ao sucesso de sua associação aos sistemas de vedação, já que desse casamento depende o desempenho final da obra. O mercado, hoje, oferece uma quantidade significativa de novos tipos de sistemas de vedação industrializada, alguns importados, outros produzidos no país, entretanto, esses sistemas ainda precisam ser adaptados às condições impostas pelo ambiente, pelo tipo de usuário e pelas condições de execução em campo. Considera-se, assim, de grande importância o desenvolvimento e a divulgação dos conhecimentos referentes às limitações e às potencialidades da associação entre sistemas estruturais metálicos e sistemas de vedação pré-fabricados, além de ser necessária a verificação da eficiência de desempenho desses sistemas. Tendo em vista a necessidade de desenvolvimento e de maior conhecimento dos componentes de vedação e da sua ligação à estrutura metálica, este trabalho consiste de uma investigação acerca do desempenho de painéis de vedação associados à construção metálica industrializada. Nessa análise, tem-se como objetivos levantar o perfil dos processos de execução e de projeto das obras metálicas executadas na atualidade nacional, além de se fazer uma avaliação preliminar dos painéis disponíveis no mercado regional, no que diz respeito a seu desempenho acústico e vibratório. O método de investigação utilizado para a caracterização dos processos de projeto e de execução é o de estudos de casos e entrevistas junto a construtores e projetistas. Na avaliação acústica, procura-se caracterizar os painéis de vedação, através da determinação da perda de transmissão sonora (PT) em função da frequência do som. Já na análise da vibração em pisos, é feito um estudo comparativo do desempenho de cada tipo de vedação horizontal, de acordo com um procedimento de cálculo simplificado, para quatro situações hipotéticas pré-definidas.

ABSTRACT

Nowadays, there is a growing need to industrialize civil construction. One of the natural methods for such is steel building. However, its viability in the Brazilian industry is directly dependent on its successful association to external and internal insulation systems. Today, the industry offers a significant amount of new types of industrialized insulation systems, some imported and some national, but such systems still need to be adapted to environmental conditions, user types and local conditions. Therefore, developing and spreading knowledge on the limitations and potentialities of the association between metal structures and premanufactured insulation systems is essential, as well as assessing the efficiency and performance of these systems. Considering the demand for further knowledge and development on these matters, this work analyzes the performance of insulation panels combined with industrialized steel construction. The purpose here is to characterize the design and execution processes of metal constructions carried out in present days in Brazil, and to make a preliminary evaluation of insulation panels currently available in the regional market concerning its acoustic and vibratory performance. The methodology employed for characterizing the design and execution processes was based on case studies and interviews with constructors and designers. For the acoustic evaluation, the insulation panels were characterized by determining sonorous transmission loss (PT) in relation to sound frequency. Finally, in the analysis of floor vibrations, a comparative study was made on the horizontal insulation performance of four predefined hypothetical situations, observing the approach procedure adopted.

SUMÁRIO

Resumo	VI
Abstract	VII
Lista de Figuras	XIV
Lista de Tabelas	XX
CAPÍTULO I	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Panorama geral dos sistemas de vedação no cenário nacional	4
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Estrutura do trabalho.....	8
CAPÍTULO II	
2. METODOLOGIA	10
2.1. Análise físico-construtiva	10
2.2. Análise acústica	10
2.3. Análise vibratória.....	11
CAPÍTULO III	
3. PAINÉIS A SEREM ESTUDADOS	12
3.1. Painéis de vedação vertical	12
3.1.1. Painel de gesso acartonado	12
3.1.2. Painel em placas cimentíceas.....	14
3.1.3. Painel pré-moldado de concreto	14
3.1.4. Painel de concreto celular autoclavado.....	16
3.1.5. Painel de poliestireno expandido – EPS	17
3.2. Painéis de vedação horizontal.....	18
3.2.1. Painel pré-moldado de concreto	18

3.2.2. Pannel alveolar de concreto extrudado	19
3.2.3. Laje em “ <i>Steel Deck</i> ”	20

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE FÍSICO-CONSTRUTIVA	21
4.1. Considerações gerais.....	21
4.2. Sistematização investigativa	22
4.3. Descrição dos edificios-tipo escolhidos.....	22
4.3.1. Edifício 01 (Edifício Residencial)	22
4.3.2. Edifício 02 (Edifício Scala)	30
4.3.3. Edifício 03 (Edifício Augusta).....	32
4.3.4. Edifício 04 (Ed. Ary Scott)	39
4.3.5. Edifício 05 (Edifício Piemonte).....	42
4.3.6. Edifício 06 (Residência João Grillo)	46
4.3.7. Edifício 07 (Shopping Center Uberlândia)	51
4.3.8. Edifício 08 (Hotel Guarulhos)	57
4.3.9. Edifício 09 (Shopping Center Frei Caneca).....	62
4.4. Comparação dos resultados coletados na investigação.....	69
4.5. Análise dos processos construtivos.....	77
4.6. Conclusões	80

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE ACÚSTICA	82
5.1. Conceitos básicos de acústica	82
5.1.1. Propriedades do som	82
5.1.2. Faixas de resposta do ouvido humano	83
5.1.3. Frequência natural e ressonância acústica	83
5.2. Materiais e dispositivos de absorção acústica.....	84
5.2.1. Caracterização de materiais absorventes	84
5.2.2. Caracterização de dispositivos de absorção reativos	86
5.3. Acústica ambiental – transmissão sonora	86
5.3.1. Considerações gerais.....	86

5.3.2. Fontes sonoras.....	87
5.3.3. Isolação sonora ou isolamento sonoro	88
5.3.4. Perda de transmissão em paredes simples	90
5.3.4.1. PT controlada pela rigidez	91
5.3.4.2. PT controlada pela ressonância.....	92
5.3.4.3. PT controlada pela massa – Lei da massa.....	92
5.3.4.4. Efeito de coincidência.....	93
5.3.5. Perda de transmissão em paredes duplas	95
5.3.6. Classes de transmissão sonora (CTS)	99
5.3.7. Isolação sonora recomendada	106
5.3.8. Índice de redução acústica R_w	108
5.4. Análise de desempenho acústico de vedações verticais	109
5.4.1. Considerações gerais.....	109
5.4.2. Avaliação da perda de transmissão sonora para painéis industrializados.....	110
5.4.2.1. Painéis avaliados	111
5.4.2.2. Comparação de resultados	120
5.4.3. Análise dos resultados obtidos.....	123
5.4.4. Conclusões	124

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISE VIBRATÓRIA.....	126
6.1. Conceitos básicos.....	126
6.1.1. Classificação das ações dinâmicas.....	127
6.1.2. Tipos de vibrações	130
6.1.3. Sistemas com um grau de liberdade	131
6.2. Vibrações em pisos	132
6.2.1. Considerações gerais.....	132
6.2.2. Elementos constituintes dos pisos.....	133
6.2.3. Fontes de vibração em pisos	134
6.2.3.1. Caracterização das fontes internas de excitação	135
6.2.4. Reação humana à vibração	138
6.2.5. Critérios de conforto de acordo com especificações de normas	139

6.3. Avaliação de vibrações em pisos segundo “ <i>Design Guide on the Vibration of floors</i> ”	141
6.3.1. Considerações gerais – configurações estrutural e física do piso	141
6.3.2. Parâmetros dinâmicos e Resposta dinâmica	144
6.3.2.1. Introdução	144
6.3.2.2. Resposta estrutural dinâmica	148
6.3.3. Avaliação da frequência natural	153
6.3.3.1. Frequências do sistema e dos componentes	153
6.3.3.2. Avaliação prática.....	156
6.3.4. Resposta dinâmica para vibração de pisos.....	160
6.3.4.1. Pisos de baixa frequência	160
6.3.4.2. Pisos de alta frequência.....	169
6.4. Procedimentos de projeto.....	173
6.4.1. Considerações gerais.....	173
6.4.2. Procedimento de checagem da suscetibilidade de pisos.....	174
6.4.3. Estimativa da frequência natural.....	175
6.4.4. Pisos de alta frequência.....	177
6.4.5. Pisos de baixa frequência.....	178
6.4.6. Critérios de aceitação.....	182
6.5. Estudo paramétrico de casos hipotéticos	183
6.5.1. Descrição dos casos hipotéticos.....	183
6.5.2. Procedimento de cálculo para as situações 01, 02, 03 e 04	185
6.5.2.1. Cargas e massas a serem consideradas	185
6.5.2.1. Cálculo das inércias	187
6.5.2.1. Cálculo da deflexão estática (Y_w), frequência natural (f_0) e fator de resposta (R)	189
6.5.3. Análise dos resultados	201
6.5.4. Conclusões	203

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	205
7.1. Considerações finais	205

7.2. Sugestões para futuras pesquisas	207
Referências Bibliográficas	209
Bibliografia Complementar	214
ANEXOS	216
Anexo I	217
1. Ficha técnica da edificação	217
2. Caracterização da construtora	217
3. Caracterização do processo de projeto.....	218
4. Coleta de dados in loco	219
Anexo II	220
1. Verificação da vibração – situação 01 – piso em “ <i>Steel Deck</i> ”	220
1.1. Descrição do piso	220
1.2. Cargas e massas a serem consideradas	220
1.3. Cálculo das inércias para vigas e laje	221
1.4. Definição da faixa de ação e da forma modal.....	224
1.5. Cálculo da frequência natural f_0	225
1.6. Cálculo do fator de resposta R.....	226
1.7. Aceitabilidade em pisos	226
2. Verificação da vibração – situação 01 – piso em laje de concreto	227
2.1. Descrição do piso	227
2.2. Cargas e massas a serem consideradas	227
2.3. Cálculo das inércias para vigas e laje	228
2.4. Definição da faixa de ação e da forma modal.....	229
2.5. Cálculo da frequência natural f_0	229
2.2.b. Cargas e massas a serem consideradas	230
2.3.b. Cálculo das inércias para vigas e laje	230
2.4.b. Definição da faixa de ação e da forma modal.....	231

2.5.b. Cálculo da frequência natural f_0	231
2.6. Cálculo do fator de resposta R.....	232
2.7. Aceitabilidade em pisos.....	232
3. Verificação da vibração – situação 03 – piso em “ <i>Steel Deck</i> ”	233
3.1. Descrição do piso.....	233
3.2. Cargas e massas a serem consideradas	233
3.3. Cálculo das inércias para vigas e laje	234
3.4. Definição da faixa de ação e da forma modal.....	237
3.5.1. Cálculo da frequência natural f_0 – modo A.....	238
3.5.2. Cálculo da frequência natural f_0 – modo B.....	238
3.6.1. Cálculo do fator de resposta R – modo A	240
3.6.1. Cálculo do fator de resposta R – modo B	240
3.7. Aceitabilidade em pisos	241
Anexo III	242
Anexo IV	243

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- FIGURA 1.1 – Alvenaria e estrutura metálica em edifício residencial 5
FIGURA 1.2 – Exemplo de construção com mistura de sistemas construtivos 6

CAPÍTULO III

- FIGURA 3.1 – Montagem do sistema de fechamento vertical em gesso acartonado..... 13
FIGURA 3.2 – Montagem do sistema de fechamento em placas cimentíceas 14
FIGURA 3.3 – Colocação de painéis pré-moldados de concreto em fachada..... 15
FIGURA 3.4 – Painel pré-moldado de concreto maciço 16
FIGURA 3.5 – Painel pré-moldado de concreto com alma em poliestireno 16
FIGURA 3.6 – Painel de concreto celular autoclavado 17
FIGURA 3.7 – Painel de poliestireno expandido 18
FIGURA 3.8 – Teto de edificação com estrutura metálica e lajes em painéis pré-moldados de concreto 19
FIGURA 3.9 – Montagem de lajes em painéis de concreto extrudado alveolares 19
FIGURA 3.10 – Esquema dos painéis alveolares extrudados 19
FIGURA 3.11 – Vedação horizontal com “*Steel Deck*” 20
FIGURA 3.12 – Corte esquemático dos pisos com “*Steel Deck*” 20

CAPÍTULO IV

- FIGURA 4.1 – Fachada da edificação 23
FIGURA 4.2 – Ligação alvenaria/estrutura com tela “*ancofix*” 24
FIGURA 4.3 – Ligação alvenaria estrutura com cantoneira metálica 25
FIGURA 4.4 – Laje em painéis de concreto pré-moldado 25
FIGURA 4.5 – Perfis metálicos para montagem das divisórias de gesso acartonado 26
FIGURA 4.6 – Instalações embutidas nas divisórias de gesso acartonado 26
FIGURA 4.7 – Divisórias de gesso acartonado montadas..... 26
FIGURA 4.8 – Montagem – esquadria industrializada em divisória interna 27
FIGURA 4.9 – Acabamentos internos..... 27
FIGURA 4.10 – Ligações alvenaria/estrutura metálica 28

FIGURA 4.11 – Trincas nas junções alvenaria/estrutura	28
FIGURA 4.12 – Desenho esquemático junção alvenaria/estrutura metálica.....	29
FIGURA 4.13 – Vistas do Edifício Scala Work Center	30
FIGURA 4.14 – Vista do Edifício Augusta.....	32
FIGURA 4.15 – Painéis de concreto pré-moldado para piso antes do capeamento	34
FIGURA 4.16 – “ <i>Inserts</i> ” metálicos de fixação dos painéis pré-moldados	34
FIGURA 4.17 – Capeamento das lajes de piso	35
FIGURA 4.18 – Juntas entre painéis de fachada (internamente).....	35
FIGURA 4.19 – Divisórias internas montadas	36
FIGURA 4.20 – Acabamentos internos.....	36
FIGURA 4.21 – Localização da obra em relação à fiação pública.....	37
FIGURA 4.22 – Improviso na criação de “ <i>shafts</i> ”	37
FIGURA 4.23 – Danos causados pela umidade nas placas de gesso	38
FIGURA 4.24 – Limpeza e mobilidade na obra.....	38
FIGURA 4.25 – Vistas Edifício Ary Scott	39
FIGURA 4.26 – Desenho esquemático – alvenarias externas	40
FIGURA 4.27 – Infiltração nas vedações de fachada.....	41
FIGURA 4.28 – Trincas na verga/esquadria	41
FIGURA 4.29 – Vista Edifício Piemonte	42
FIGURA 4.30 – Fases da obra sendo executadas simultaneamente.....	44
FIGURA 4.31 – Esquema de execução das laje	44
FIGURA 4.32 – Fixação dos painéis de vedação externos.....	45
FIGURA 4.33 – Implantação da edificação.....	46
FIGURA 4.34 – Vista residência João Grillo	47
FIGURA 4.35 – Vista de teto do “ <i>Steel Deck</i> ”	48
FIGURA 4.36 – Laje em “ <i>Steel Deck</i> ” revestida	48
FIGURA 4.37 – Fixação dos painéis de vedação externos.....	49
FIGURA 4.38 – Adaptação na colocação das vedações e esquadrias	50
FIGURA 4.39 – Defeito de acabamento.....	50
FIGURA 4.40 – Facilidade de manutenção.....	51
FIGURA 4.41 – Acabamentos – vista interna	51
FIGURA 4.42 – Vista externa do edifício	52

FIGURA 4.43 – Vigas para reconstrução de arruamento e paredes diafragma	54
FIGURA 4.44 – Colocação e solidarização das lajes pré-moldadas e estrutura met.	54
FIGURA 4.45 – Montagem dos painéis externos	55
FIGURA 4.46 – Fixação dos painéis externos na estrutura	55
FIGURA 4.47 – Placas de gesso acartonado colocadas	56
FIGURA 4.48 – Obra em andamento e vista do Hotel existente	56
FIGURA 4.49 – Vista Hotel Guarulhos.....	57
FIGURA 4.50 – Torres de concreto / início da montagem da estrutura metálica	59
FIGURA 4.51 – Obra em execução.....	59
FIGURA 4.52 – Fechamento externo do térreo.....	59
FIGURA 4.53 – Montagem dos perfis para divisórias de gesso	60
FIGURA 4.54 – Fechamento divisórias internas com placas de gesso acartonado.....	60
FIGURA 4.55 – Fixação painel externo/proteção passiva da estrutura metálica	61
FIGURA 4.56 – Limpeza da obra.....	62
FIGURA 4.57 – “ <i>Shafts</i> ” previstos para manutenção.....	62
FIGURA 4.58 – Edifício Frei Caneca & Convention Center	63
FIGURA 4.59 – Canteiro de obras incrustado na malha urbana ocupada.....	64
FIGURA 4.60 – Obra em execução.....	65
FIGURA 4.61 – Fixação painéis externos	66
FIGURA 4.62 – Painéis verticais se apóiam nos horizontais.....	66
FIGURA 4.63 – Rejuntes dos painéis de fachada	66
FIGURA 4.64 – Vedação interna em painéis de concreto celular autoclavado.....	67
FIGURA 4.65 – Estrutura metálica para recebimento das placas de gesso.....	67
FIGURA 4.66 – Vista geral da montagem de divisórias de gesso acartonado	67
FIGURA 4.67 – Reforço na ligação entre pilar e painel de fachada	68
FIGURA 4.68 – Manchas de ferrugem na fachada.....	68

CAPÍTULO V

FIGURA 5.1 – Estrutura de um material poroso e seu mecanismo de dissipação de energia sonora	85
FIGURA 5.2 – Estrutura de um material fibroso e seu mecanismo de dissipação de energia sonora	85

FIGURA 5.3 – Esquema de transmissão sonora através de parede simples.....	88
FIGURA 5.4. Perda de Transmissão para uma parede de concreto com 15 cm.....	89
FIGURA 5.5 – Curva de perda de transmissão	91
FIGURA 5.6 – Efeito de coincidência.....	94
FIGURA 5.7 – Reflexão e transmissão sonora em uma parede dupla	96
FIGURA 5.8 – Perda de transmissão sonora em paredes duplas.....	97
FIGURA 5.9 – Variação da PT em função da f para parede dupla	98
FIGURA 5.10 – Determinação da CTS para medições de PT.....	101
FIGURA 5.11 – CTS para divisórias e suas comparações com a lei da massa	104
FIGURA 5.12 – Efeitos das propriedades de uma parede na f_c	105
FIGURA 5.13 – PT de divisórias simples e duplas construídas c/ materiais similares	105
FIGURA 5.14 – PT de divisórias com portas de 1 3/4 “	106
FIGURA 5.15 – PT de divisórias com diferentes janelas, bordas vedadas	106
FIGURA 5.16 – Curva de referência da perda de transmissão.....	109
FIGURA 5.17 – Variação de PT para painel de concreto celular autoclavado	114
FIGURA 5.18 – Variação de PT para painel de concreto pré-moldado maciço.....	115
FIGURA 5.19 – Variação de PT para placa cimentícia	116
FIGURA 5.20 – Variação de PT para painel de concreto + poliestireno expandido ...	117
FIGURA 5.21 – Variação de PT para painel de EPS	119
FIGURA 5.22 – Variação de PT para divisória de gesso acartonado c/ faces simples	120
FIGURA 5.23 – Variação de PT para divisória de gesso acartonado c/ faces duplas .	121
FIGURA 5.24 – Variação de PT para paredes internas	122
FIGURA 5.25 – Variação de PT para paredes externas	123

CAPÍTULO VI

FIGURA 6.1 – Tipos de ações dinâmicas – funções determinísticas.....	127
FIGURA 6.2 – Tipos de ações dinâmica – função não determinística.....	128
FIGURA 6.3 – Características e causas de carregamentos dinâmicos típicos.....	128
FIGURA 6.4 – Características e causas de carregamentos dinâmicos típicos.....	129
FIGURA 6.5 – Resposta de um sistema em movimento harmônico	130
FIGURA 6.6 – Sistema de um grau de liberdade	131
FIGURA 6.7 – Elementos constituintes dos pisos.....	133

FIGURA 6.8 – Fonte de vibração externa	134
FIGURA 6.9 – Fonte de vibração interna	134
FIGURA 6.10 – Geometria simplificada de uma passada.....	135
FIGURA 6.11 – Excitação típica de caminhada.....	136
FIGURA 6.12 – Amplitudes das componentes de Fourier para caminhada regular	137
FIGURA 6.13 – Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua	138
FIGURA 6.14 – Critério de desconforto para vibrações em pisos	139
FIGURA 6.15 – Formas modais de uma viga	147
FIGURA 6.16 – Sentido das forças inerciais em uma viga contínua.....	148
FIGURA 6.17 – Viga contínua com atuação das cargas	148
FIGURA 6.18 – Definição da envoltória da resposta	149
FIGURA 6.19 – Esquema de uma massa (m) em vibração	149
FIGURA 6.20 – Variação do fator de amplificação dinâmica em função da frequência	153
FIGURA 6.21 – Distribuição esquemática do vigamento	155
FIGURA 6.22 – Interação dos elementos de piso	155
FIGURA 6.23 – Esquema de massas.....	158
FIGURA 6.24 – Conjunto massa-mola.....	159
FIGURA 6.25 – Placa ortotrópica simplesmente apoiada nos quatro lados.....	165
FIGURA 6.26 – Ilustração para consideração do fator de peso S_w	176
FIGURA 6.27 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 01	183
FIGURA 6.28 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 02	184
FIGURA 6.29 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 03	184
FIGURA 6.30 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 04	185

ANEXO II

FIGURA A.1 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 01	220
FIGURA A.2 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje.....	221
FIGURA A.3 – Decomposição da viga em áreas	222
FIGURA A.4 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje.....	222
FIGURA A.5 – Decomposição da viga em áreas	223
FIGURA A.6 – Laje em “ <i>Steel Deck</i> ” – forma composta	223

FIGURA A.7 – Laje em “ <i>Steel Deck</i> ” – inércia por metro.....	224
FIGURA A.8 – Forma modal	225
FIGURA A.9 – Laje em concreto moldado “in loco”	228
FIGURA A.10 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 03	233
FIGURA A.11 – Forma modal	238

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO IV

TABELA 4.1(a) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto.....	69
TABELA 4.1(b) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto	70
TABELA 4.1(c) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto.....	70
TABELA 4.1(d) - Caracterização dos projetistas e do processo de projeto	71
TABELA 4.1(e) - Caracterização dos projetistas e do processo de projeto	71
TABELA 4.2(a) - Caracterização dos construtores e do processo executivo.....	72
TABELA 4.2(b) - Caracterização dos construtores e do processo executivo	73
TABELA 4.2(c) - Caracterização dos construtores e do processo executivo.....	74
TABELA 4.2(d) - Caracterização dos construtores e do processo de execução	75
TABELA 4.2(e) - Caracterização dos construtores e do processo de execução.....	76

CAPÍTULO V

TABELA 5.1 – Qualificação do isolamento acústico.....	90
TABELA 5.2 – Classe de transmissão sonora para elementos construtivos	103
TABELA 5.3 – Classe de Transmissão Sonora (CTS) para divisórias com placas de gesso.....	107
TABELA 5.4 – CTS para paredes X condições de privacidade.....	108
TABELA 5.4 – Valores de referência.....	110
TABELA 5.5 – Caracterização dos painéis avaliados	113

CAPÍTULO VI

TABELA 6.1 – Frequências naturais recomendadas.....	141
TABELA 6.2 – Valores para dimensões L_e e S	181
TABELA 6.3 – Fatores de resposta (R) para escritórios	182
TABELA 6.4 – cargas e massas situação 01	186
TABELA 6.5 – cargas e massas situação 02	186
TABELA 6.6 – cargas e massas situação 03	186
TABELA 6.7 – cargas e massas situação 04	187
TABELA 6.8 – Inércia dos elementos de piso situação 01	188

TABELA 6.9 – Inércia dos elementos de piso situação 02	188
TABELA 6.10 – Inércia dos elementos de piso situação 03	188
TABELA 6.11 – Inércia dos elementos de piso situação 04	189
TABELA 6.12 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 01	195
TABELA 6.13 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 02	196
TABELA 6.14 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 03 (modo A).....	197
TABELA 6.15 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 03 (modo B).....	198
TABELA 6.16 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 04 (modo A).....	199
TABELA 6.17 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 04 (modo B).....	200

ANEXO IV

TABELA 6.12 – Cálculo de R para situação 01	244
TABELA 6.13 – Cálculo de R para situação 02.....	245
TABELA 6.14 – Cálculo de R para situação 03 (modo A)	246
TABELA 6.15 – Cálculo de R para situação 03 (modo B)	247
TABELA 6.16 – Cálculo de R para situação 04 (modo A)	248
TABELA 6.17 – Cálculo de R para situação 04 (modo B)	249

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Ao analisar a indústria da construção civil ao longo do tempo, observam-se mudanças pouco expressivas e uma evolução muito lenta das tecnologias, dos processos construtivos e da gestão da organização. Atualmente, o cenário nacional de obras civis ainda é primordialmente artesanal e baseado na improvisação, o que leva ao desperdício de tempo, material, mão de obra e conseqüentemente capital. Tal situação de desperdícios não condiz com nossa realidade de país terceiro mundista, cujo déficit habitacional gira em torno de 5 milhões de unidades (KISS, 2000).

Percebe-se hoje, a necessidade de se mudar a sistemática da construção civil, assim como sua mentalidade. Além da busca por maior produtividade e por melhor qualidade imposta pela concorrência de mercado, há a globalização, que traz a introdução de novos produtos e conceitos industriais, inclusive para a construção civil. Visa-se, essencialmente, em todos os campos da produção, a otimização dos sistemas, tanto no que se refere à qualidade do produto, quanto à qualidade do processo de produção, o qual implica em um mínimo de desperdícios e um máximo de eficiência (TANIGUTI et al., 1998).

Uma grande variedade de materiais, equipamentos e práticas tecnológicas inovadoras têm sido importadas para o mercado da construção civil. Entretanto, para se alcançar uma real inovação tecnológica, não basta introduzir componentes isolados em uma obra, ou importar sistemas funcionais não adaptados à realidade em questão (TANIGUTI et al., 1998). É preciso que os componentes estejam devidamente associados ao processo de produção, e este seja condizente com as condições reais de execução. Deve-se ter uma visão sistêmica do processo, ou seja, a construção deve ser encarada como um conjunto de sistemas a serem montados e conectados como um quebra-cabeça (lego). Nessa visão sistêmica da construção, que busca otimização de custos, redução de tempo de execução e melhoria de desempenho e qualidade, se encaixam as construções ditas

industrializadas. Uma promessa desse tipo construtivo são as edificações em estrutura metálica e sistemas complementares eficientes.

No Brasil, a construção em aço apresenta-se ainda pouco difundida entre a população e entre profissionais da área. Só a partir da década de 80 houve uma maior demanda por edificações comerciais e residenciais em aço (CASTRO, 1999). O desenvolvimento de tecnologias para essa tipologia construtiva, assim como sua divulgação, ficaram em segundo plano, já que se estabeleceu uma “cultura do concreto” no país. Essa cultura surgiu pelas facilidades de aprendizagem, de aquisição e de execução apresentadas pelo concreto. O concreto armado é, ainda hoje, o principal modelo estrutural adotado na maioria das construções brasileiras, entretanto, o aço está sendo redescoberto pelos projetistas e empreendedores da construção, pois é um sistema que apresenta grandes potencialidades para construções industrializadas, com a possibilidade da redução de prazos, de desperdícios e de mão de obra, além da racionalização e exatidão do processo.

A estrutura metálica possui uma metodologia construtiva própria, e não ter conhecimento dessa tecnologia implica em se adotar uma solução que pode ser incompatível com o sistema estrutural. São poucos os profissionais do meio, de serventes, passando por mestres de obras, por engenheiros e por arquitetos, que possuem um nível mínimo de conhecimento técnico para construir e conceber edificações em aço, de maneira a se evitar problemas típicos dessa modalidade construtiva (CASTRO, 1999).

A construção em aço requer conhecimento das potencialidades e das limitações de todos os sistemas complementares interligados na obra e, além disso, exige uma grande atenção ao planejamento e interação de cada uma de suas etapas, desde a concepção de projeto até a montagem e finalização da obra. Segundo Castro (1999), a interação do projeto estrutural metálico com os demais projetos é um ponto extremamente importante, pois a estrutura metálica não se adapta a improvisos de última hora, o que pode causar uma série de transtornos durante a construção. Nesse sistema construtivo, a compatibilização dos vários projetos que constituem uma obra civil e a coordenação e

planejamento interativos das etapas de projeto e execução, são fundamentais para o sucesso final do empreendimento.

Os principais entraves hoje, para uma maior penetração do aço no mercado da construção nacional, são seu custo ainda elevado em relação ao concreto e a falta de domínio técnico acerca do sistema construtivo e seus sistemas complementares, como os fechamentos. Porém, segundo Castro (1999), a desvantagem relativa aos custos, tende a se equilibrar, visto que o aço possui um grande potencial de crescimento devido às suas vantagens pouco exploradas, enquanto que o concreto está em uma posição já estabilizada, e com alguns problemas de ordem técnica, tais como desperdício de materiais, desníveis, desaprumos, velocidade de construção, etc. No que diz respeito ao conhecimento tecnológico, o interesse e os investimentos em pesquisas na área vêm aumentando, entretanto pode se dizer que ainda é uma fase inicial de desenvolvimento de técnicas e sistemáticas próprias.

O conhecimento das características físicas dos principais materiais de construção é tão importante quanto o domínio do cálculo estrutural. Dificilmente pode-se desprezar estas propriedades, pois de nada adianta uma concepção adequada e dimensionamento estrutural estável, se a interação com os demais elementos construtivos não for satisfatória (EICHLER, 1973).

Dessa forma, é necessário que se desenvolvam sistemas viáveis economicamente e compatíveis com os condicionantes nacionais, para que a construção industrializada possa ser solução real no panorama brasileiro. É de grande importância a tropicalização dos sistemas, já que se tem, aqui, além de um conjunto de condições climáticas diferentes, um tipo de usuário também diferente no que diz respeito a hábitos e prioridades com relação a países da Europa e dos EUA, de onde são importados as concepções sistêmicas e muitos de seus componentes. É necessário se adequar o tipo de construção ao meio e ao cliente, e não o contrário.

Tal adequação tem como caminho racional a pesquisa, e é nesse ponto, que fica evidente a importância da parceria entre Universidades e Empresas. A atuação conjunta

dessas instituições pode garantir o sucesso do processo de desenvolvimento relativo à aplicação de novas tecnologias no mercado da construção. Difundir o desenvolvimento dessas tecnologias construtivas nos meios envolvidos consiste em um dos primeiros passos para sua popularização.

1.1. Panorama geral dos sistemas de vedação no cenário nacional

Inicialmente, é de bom senso esclarecer que neste trabalho, o termo sistema de vedação, assim como a palavra vedações, foram usados para indicar elementos que promovem o fechamento de vãos delimitados por uma estrutura portante. O termo técnico mais correto a ser utilizado seria sistema de fechamento, entretanto, tal nomenclatura foi adotada em conformidade com o mercado da construção civil e com a linguagem cotidianamente usada por profissionais da área.

O sistema de vedações é um dos mais importantes no processo construtivo como um todo, pois está diretamente ligado à imagem e ao conforto de qualquer edificação, entretanto só passou a ser visto com outros olhos na última década. Percebeu-se que sua racionalização pode resultar em redução de custos e desperdícios nos demais subsistemas, como esquadrias, instalações e revestimentos, e como se deseja chegar a um processo eficiente na construção metálica, é preciso desenvolver sistemas complementares que funcionem e sejam aceitos pelos usuários e pela comunidade técnica (BARROS, 1999).

Atualmente, na construção com estrutura metálica, ainda se vê, com frequência, o uso de vedações convencionais em alvenaria, o que é problemático, pois esses são sistemas que possuem tempos de execução não condizentes e interfaces construtivas nem sempre bem resolvidas (FIG.1.1). A associação da estrutura metálica à alvenaria convencional não implica na ocorrência de problemas de compatibilidade, mas se as diferenças não forem consideradas em pontos específicos durante as etapas de concepção, projeto e construção, fatalmente os problemas aparecerão.



FIGURA 1.1 – Alvenaria e estrutura metálica em edifício residencial – BH - dez/1999

Segundo Castro (1999), um dos grandes problemas da estrutura metálica é a dificuldade em se fazer um fechamento estanque e ao mesmo tempo resistente. O fato de a estrutura ser mais flexível, dos elementos terem uma seção transversal mais complexa e do aço possuir uma superfície pouco rugosa e pouco porosa leva os projetistas e construtores a adotarem soluções não convencionais para evitar a ocorrência de problemas construtivos. Entretanto, é justamente aqui que se encontra um dos maiores entraves para as estruturas metálicas, pois existem soluções eficientes para o casamento perfeito entre estrutura em aço e vedações, porém não são de domínio público. Além disso, muitas vezes são importadas soluções cujos custos são elevados e as interfaces ainda precisam de adaptações à realidade nacional.

A introdução do uso de painéis de vedação industrializados é cada vez maior nos canteiros de obra, entretanto, nem sempre tais elementos são usados adequadamente e com todo o seu potencial de racionalização. É comum se detectar o uso de componentes de vedação inovadores de maneira tradicional, o que pode gerar problemas a serem resolvidos durante a obra e, até mesmo, problemas futuros para os usuários da edificação. Na verdade, os sistemas de vedação ainda precisam ser acertados e incorporados ao nosso ambiente e ao processo construtivo desde sua concepção (SOUZA, 1997). Na figura 1.2 apresenta-se uma obra na qual foram utilizados sistemas industrializados, mas não houve a associação dos sistemas no processo como um todo. Nessa obra foram utilizados vários sistemas industrializados, porém sem qualquer tipo de visão sistêmica do processo, o que acarretou em problemas construtivos, como trincas, e de custos.



FIGURA 1.2 – Exemplo de construção com mistura de sistemas construtivos

O mercado, hoje, oferece painéis de vedação importados e painéis nacionais que estão sendo adaptados a nossas condições de uso e de aplicação, entretanto, há uma carência de conhecimento tecnológico a respeito das técnicas de execução e das características de desempenho dos sistemas, tanto por parte das empresas construtoras, como dos próprios fabricantes. Porém, considera-se importante que tanto as construtoras como os fabricantes conheçam completamente as características técnicas e de desempenho dos componentes a serem utilizados, pois o emprego de modo incorreto pode ocasionar, além da elevação do custo do edifício, uma alta incidência de problemas patológicos, resultando numa resistência à utilização desse produto em empreendimentos posteriores (BARROS, 1998). Na verdade, há que se provar a real eficiência, ou ineficiência, de cada um desses novos sistemas de vedação, para que os construtores e o mercado possam investir nessas tão promissoras novas tecnologias.

1.2. Objetivos

Tendo em vista todos os condicionantes já mencionados, este trabalho se propõe a estudar os sistemas de vedações para estruturas metálicas. Mais especificamente, tem-se como objetivos fazer uma caracterização dos processos de projeto e de construção praticados hoje nas obras em aço, realizar um mapeamento dos problemas físico-construtivos a que estão sujeitas as vedações horizontais e verticais, disponíveis no mercado, e fazer uma caracterização acústica e vibratória dessas vedações.

Do ponto de vista físico-constructivo, as edificações têm ficado mais leves e esbeltas, assim como sua execução tem se mostrado mais rápida, devido a novas tecnologias do processo constructivo. Entretanto, as ligações entre os subsistemas da construção e a garantia de sua eficiência ainda representam um problema prático no cotidiano das obras e do mercado. Por isso, pretende-se, na abordagem físico-constructiva do estudo, levantar as possíveis patologias físico-constructivas apresentadas pelos painéis de vedação, conectados à estrutura metálica, no que se refere às ligações constructivas, à estanqueidade e à integridade física, e obter uma listagem dos problemas mais comumente enfrentados no que diz respeito ao sistema de vedações com painéis, durante a execução de uma obra e o seu processo de projeto. Levando em consideração o trabalho desenvolvido por Castro (1999), não serão abordadas, aqui, patologias referentes à estrutura metálica, como por exemplo os problemas de corrosão no aço.

Já no tocante à análise acústica, tendo-se estruturas e vedações mais leves, tem-se, conseqüentemente, uma menor massa para isolamento dos ambientes e uma maior fragilidade em termos de isolamento sonora, o que pode levar a condições de conforto ambiental não satisfatórias. Tendo em vista a necessidade de se conhecer a real eficiência acústica dos painéis, foram delineados como objetivos: caracterizar acusticamente os painéis de vedação, através da determinação da perda de transmissão sonora (PT) de acordo com os vários níveis de freqüência do som, e analisar o grau de eficiência acústica dos painéis de vedação, relativamente ao sistema de vedação convencional, levando em consideração a transmissão sonora aérea.

Na área das vibrações em pisos, o que se detecta é a diminuição da massa dos painéis de vedação horizontal, aumento da esbeltez das estruturas e utilização de novos materiais, o que tem levado a freqüências naturais mais baixas e, assim, mais próximas das freqüências de excitação de caminhamento. Dessa forma, tem-se como meta caracterizar os tipos de vedação horizontal industrializada, no que diz respeito às vibrações, fazendo um estudo comparativo do desempenho de cada tipologia em situações hipotéticas pré-definidas, de acordo com normas de procedimento de projeto.

O mapeamento de patologias, o levantamento do perfil de projeto e de execução e a caracterização dos novos componentes construtivos, podem ser utilizados para indicar o que precisa ser estudado e reestruturado nos sistemas de vedação e em sua associação com as estruturas metálicas. Assim, pode-se definir futuras linhas de pesquisa que tenham grande potencial interativo com as empresas ligadas à indústria da construção civil em aço, a fim de contribuir com o desenvolvimento e popularização desse segmento.

1.3. Estrutura do trabalho

O capítulo I deste trabalho é introdutório e descreve o panorama geral da construção civil, indicando os caminhos da construção em aço e a importância dos seus sistemas complementares. Nesse capítulo, ainda, são citados os objetivos da pesquisa. Além do primeiro capítulo, a dissertação é constituída por mais seis capítulos e quatro anexos, descritos a seguir.

O capítulo II descreve a metodologia utilizada para a realização da pesquisa. São descritas as etapas constituintes dos estudos de casos construtivos, e das análises acústica e vibratória acerca dos sistemas de vedação.

O capítulo III faz uma descrição sucinta dos painéis de vedação industrializados, a serem objeto de estudo, e justifica a escolha destes.

O capítulo IV consiste de 09 estudos de casos de edifícios nos quais é utilizada a estrutura metálica associada a painéis de vedação industrializados. Nesse capítulo, é feita uma investigação acerca dos processos de projeto e de execução das obras em aço, que estão sendo realizadas no mercado atual. Além disso, são levantadas as principais dificuldades encontradas nesses processos e as patologias mais comuns advindas de falhas de execução.

O capítulo V apresenta conceitos básicos de acústica e faz uma análise preliminar e qualitativa dos sistemas de vedação vertical, escolhidos para tal análise, através da aplicação de formulações simplificadas da literatura e de comparações com dados experimentais.

O capítulo VI aborda a questão das vibrações em pisos e descreve um procedimento expedito de análise vibratória, apresentado em um guia da SCI (“*Steel Construction Institute*”) e intitulado “*Design guide of vibration floors*”. Esse procedimento foi utilizado, na pesquisa, para se realizar uma avaliação de desempenho dos pisos industrializados em questão. Tal estudo possibilitou a verificação da eficiência do procedimento e da coerência dos resultados obtidos para os diferentes tipos de pisos, além de se obter uma avaliação comparativa destes.

O capítulo VII apresenta as conclusões obtidas a partir das análises feitas acerca dos sistemas de vedação estudados e sua associação ao sistema estrutural metálico, além de destacar sugestões para pesquisas futuras.

O anexo I é constituído pelos questionários utilizados para pesquisa junto aos construtores e projetistas entrevistados.

O anexo II consta de exemplos explicativos do procedimento de cálculo feito para a avaliação da vibração nos pisos estudados.

O anexo III é uma tabela ilustrativa das formulações utilizadas para cálculo de deflexões estáticas para vigas e lajes.

O anexo IV apresenta tabelas comparativas, contendo todos os parâmetros relevantes para o cálculo do fator de resposta à vibração em pisos. Nesse anexo foram sistematizadas as quatro situações estudadas, com todas as variações de pisos e perfis testadas.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de atingir as metas propostas pela pesquisa como um todo, definiu-se uma sistemática de estudos que engloba inicialmente uma análise físico-construtiva de edifícios-tipo e logo após uma análise acústica e uma análise vibratória dos sistemas de vedação em questão.

2.1. Análise físico-construtiva

Para a análise físico-construtiva das edificações-tipo, foram realizadas as seguintes etapas de estudo:

- a) Escolha dos painéis a serem analisados e seus respectivos fabricantes;
- b) Levantamento das edificações a serem objeto de estudo;
- c) Montagem de questionários de pesquisa destinados a projetistas e construtores;
- d) Montagem de formulários de observação e diagnóstico, a serem preenchidos em cada edificação estudada;
- e) Visita das edificações para coleta de dados e levantamento fotográfico;
- f) Entrevistas com construtores e projetistas;
- g) Organização e análise dos dados coletados.

2.2. Análise acústica

Para os sistemas de vedação escolhidos, na avaliação acústica foram acompanhados os seguintes itens:

- a) Levantamento bibliográfico e pesquisa para embasamento teórico;
- b) Escolha dos painéis de vedação e levantamento das características necessárias ao estudo;
- c) Cálculo da perda de transmissão sonora para os diferentes painéis, considerando a faixa de frequência relevante;

- d) Montagem de gráficos comparativos da perda de transmissão (PT) em função da frequência (f) para os diversos painéis;
- e) Avaliação da influência dos parâmetros envolvidos na transmissividade sonora dos painéis simples e compostos estudados;
- f) Análise dos resultados obtidos.

2.3. Análise vibratória

Na avaliação vibratória do desempenho das vedações horizontais em questão, foi respeitada a sistemática seguinte:

- a) Levantamento bibliográfico e pesquisa para embasamento teórico;
- b) Escolha dos painéis de vedação e levantamento das características necessárias ao estudo;
- c) Montagem de casos hipotéticos com condições de contorno preestabelecidas;
- d) Cálculo dos parâmetros que caracterizam a resposta à vibração nos casos propostos – frequência natural (f_0) e parâmetro de resposta (R);
- e) Montagem de tabelas comparativas dos tipos de painéis e respectivas situações hipotéticas;
- f) Análise dos resultados obtidos.

Cada uma das sistemáticas de análise corresponde a um capítulo deste trabalho e no final de cada uma delas, é apresentada uma conclusão relativa aos aspectos ali analisados. Assim, são apresentadas considerações finais, separadamente, para as três análises aqui descritas, além das conclusões finais do trabalho.

CAPÍTULO III

3. PAINÉIS ESTUDADOS

Para realizar o estudo aqui proposto, foram escolhidos cinco tipos básicos de painéis de vedação (fechamento) vertical (painéis de gesso acartonado, painéis em placas cimentíceas, painéis pré-moldados de concreto, painéis de concreto celular autoclavado e painéis de poliestireno expandido) e quatro tipos básicos de sistemas de vedação horizontal (painéis pré-moldados de concreto, lajes em “*Steel Deck*”, painéis de concreto celular autoclavado e painéis alveolares de concreto extrudado). Tal escolha teve como critérios respeitar a seqüência de pesquisa já estabelecida em trabalho anterior, que iniciou uma análise comparativa dos painéis de vedação vertical, e selecionar sistemas de vedação presentes no mercado regional e cuja expansão é notável no cenário da construção civil (KRUGER, 2000).

3.1. Painéis de vedação vertical

O sistema de vedação (fechamento) vertical é o que corresponde às paredes externas e internas de uma edificação. Dessa forma, foram selecionados painéis para os dois tipos de função e descritas suas principais características, de forma resumida.

3.1.1. Pannel de gesso acartonado

Os painéis de gesso acartonado são compostos de placas de gesso revestidos com folhas de papelão em ambos os lados, sendo que estes conferem às placas de gesso estrutura necessária a resistência à tração e compressão, trabalhando comparativamente ao concreto armado, onde o papelão garante resistência à tração (similar ao aço) e o gesso possibilita resistência à compressão (similar ao concreto). As placas de gesso acartonado possuem, na sua maioria, dimensões nominais de 1,20 m de largura e de 2,60 m a 3,00 m de comprimento, sendo de 12,5 mm, 15,0 mm e 18,0 mm as espessuras mais empregadas. Existem, basicamente, placas padrão para paredes sem exigência

específica, hidrófuga para paredes empregadas em ambientes sujeitos à umidade (banheiros, cozinhas e áreas de serviço) e resistente ao fogo para paredes com exigências especiais de resistência ao fogo. Para a fixação destes painéis, são usados guias e montantes tanto em madeira quanto em aço, com tratamento superficial em alumínio ou zinco, sendo o último mais utilizado (MITIDIÉRI, 1997).

Por se tratar de um sistema industrializado, os painéis não permitem improvisos durante a obra, sendo que os mesmos devem ser montados após a elaboração de todos os projetos, tanto arquitetônico quanto os complementares. As instalações hidráulicas, elétricas entre outras instalações devem ser previstas, proporcionando uma prévia abertura de passagens tanto nos painéis quanto nos montantes, além de prever reforços para a fixação de estantes, tanques, bancadas, etc, de acordo com projeto. Neste sistema, os painéis de gesso acartonado são colocados após a instalação dos dutos de energia, telefonia, água e esgoto (FIG.3.1). Estes dutos são instalados onde foram projetados e compatibilizados entre si, proporcionando testes de instalação que identificarão possíveis reparos após a instalação dos painéis, permitindo acabamento posterior (KRUGER, 2000).



FIGURA 3.1 – Montagem do sistema de fechamento vertical em gesso acartonado

3.1.2. Pannel em placas cimentíceas

As placas cimentíceas são compostas por uma mistura de cimento, fibras de celulose sem amianto e quartzo. Essas placas são usadas tanto para vedações externas como internas e acabamentos como pintura ou revestimentos podem ser aplicados diretamente sobre as placas (FIG.3.2). As dimensões desses painéis são geralmente de 1,20 x 2,40 m e suas espessuras variam entre 6, 8, 10 e 15 mm. O sistema de fixação desse tipo de pannel, assim como sua sistemática de montagem, é bastante semelhante ao das placas de gesso acartonado.



FIGURA 3.2 – Montagem do sistema de fechamento vertical em placas cimentíceas

3.1.3. Pannel pré-moldado de concreto

Os painéis pré-moldados de concreto são compostos basicamente de concreto armado, não possuindo limites dimensionais, o que possibilita variedades plásticas bastante significativas, ficando condicionados apenas à disposição e características de fôrma (metálica ou de madeira). Estes painéis podem ser previamente revestidos com cerâmica, pastilhas, texturas pigmentadas, ou mesmo terem a pré-fixação de esquadrias (Lopes, 1989). A instalação dos painéis na fachada depende de içamento, tais como

gruas ou guindastes (FIG.3.3). A fixação dos mesmos à estrutura é feita através de parafusamento, através de elementos de fixação (“*inserts*”) dos painéis à estrutura (KISS, 1999).



FIGURA 3.3 – Colocação de painéis pré-moldados de concreto em fachada

Esses painéis podem ser divididos em três tipos básicos: painéis cortina, painéis de vedação e painéis portantes. Os dois primeiros diferem entre si apenas pelo fato da estrutura ser aparente para os painéis de vedação. Já o terceiro tipo refere-se a painéis auto-portantes, não havendo necessidade de estrutura auxiliar (LOPES, 1989). Além dessas variações pode-se separar esses painéis pré-moldados de concreto em dois grandes grupos: os painéis de concreto maciço e o painéis de concreto com alma em poliestireno (KRUGER, 2000).

a) Painéis pré-moldados de concreto maciço

Os painéis de concreto maciço são painéis constituídos inteiramente por concreto e uma armação metálica interna, de acordo com as dimensões e uso determinados em projeto (FIG.3.4).

b) Painéis pré-moldados de concreto com alma em poliestireno

Os painéis de concreto com alma em poliestireno são constituídos por uma camada intermediária de poliestireno, que varia de espessura conforme projeto, e duas camadas de concreto, ligadas ao recheio de poliestireno por armadura metálica definida em projeto (FIG.3.5).



FIGURA 3.4 – PAINEL PRÉ-MOLDADO DE CONCRETO MACIÇO



FIGURA 3.5 – PAINEL PRÉ-MOLDADO DE CONCRETO COM ALMA EM POLIESTIRENO

3.1.4. PAINEL DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO

Os painéis de concreto celular autoclavado são constituídos por um concreto leve obtido através de um processo industrial, constituído de materiais calcários (cimento, cal ou ambos) e materiais ricos em sílica, granulados finamente. Esta mistura é expandida através da utilização de produtos formadores de gases, água e aditivos, se for o caso, sendo submetidos à pressão e temperatura através de vapor saturado. O concreto celular autoclavado contém células fechadas, aeradas uniformemente. Esses painéis seguem

modulação básica de 40 x 300 x 10 cm e apresentam espessura variando entre 10, 12,5 e 15 cm. Sua fixação à estrutura é feita através de conectores, cantoneiras ou chapas dobradas de acordo com projeto de detalhamento. Esses painéis servem, mais comumente, como vedação vertical, podendo ser para paredes internas e/ou externas, entretanto podem ser utilizados como painéis de piso também (FIG.3.6).

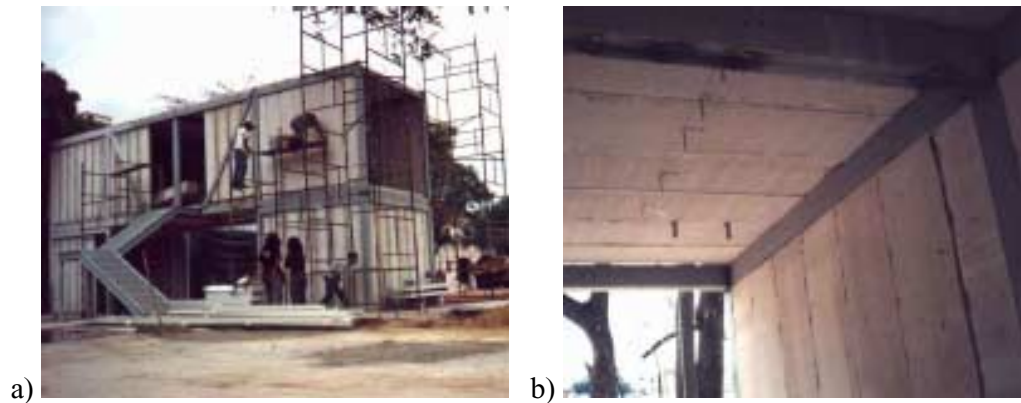


FIGURA 3.6 – Painel de concreto celular autoclavado

- a) Vista geral de protótipo construído em painéis de concreto celular
- b) Detalhe de fixação dos painéis de concreto celular como parede e piso

3.1.5. Painel de poliestireno expandido – EPS

Os painéis EPS consistem de uma alma composta de placa ondulada de poliestireno expandido com espessura que varia, dependendo da técnica utilizada, de 55 mm a 100 mm, entre duas malhas de tela de aço soldadas, revestidas com argamassa projetada. Este tipo de painel permite que o conjunto parede/laje trabalhe como um todo, formando uma estrutura monolítica auto-portante, resistindo até mesmo a abalos sísmicos (MAMMINI, 1998). As dimensões desses painéis são largura de 1125 mm ou 1200 mm, conforme fabricante, e comprimento variável, normalmente igual ao pé direito ou à distância entre vigas. Por se tratar de um sistema monolítico, não há necessidade de juntas de dilatação, sendo que as juntas entre os painéis e a estrutura metálica são feitas utilizando-se ferro-cabelo soldado à estrutura (FIG.3.7), e caso a estrutura não seja

aparente, coloca-se uma tela de recobrimento e procede-se à projeção da argamassa (KRUGER, 2000).



FIGURA 3.7 – Painel de poliestireno expandido

FONTE - KRUGER, 2000

3.2. Painéis de vedação horizontal

O sistema de vedação (fechamento) horizontal corresponde às lajes de piso de uma edificação. Dessa forma, foram selecionados sistemas que cumprem tal função e foram descritas suas principais características. A descrição dos painéis de concreto celular autoclavado, que servem também como vedação horizontal, não foi incluída neste item, pois já está citada anteriormente.

3.2.1. Painel pré-moldado de concreto

Os painéis pré-moldados de concreto, para vedações horizontais, são compostos basicamente de concreto armado, tendo modulação de 100 cm de largura e comprimento variável de acordo com projeto (FIG.3.8). Essas dimensões são variáveis, também, de acordo com fabricantes e necessidades de projeto.



FIGURA 3.8 – Teto de edificação com estrutura metálica e lajes em painéis pré-moldados de concreto

3.2.2. Painel alveolar de concreto extrudado

Os painéis alveolares extrudados são conformados e compactados por uma extrusora deslizando de grande potência. A alta compactação do concreto, de “*slump*” zero, assegurada pela extrusão, resulta em um resistência de 45 MPa, garantindo completa aderência em todo o perímetro da armadura protendida, de cordoalhas de aço 190RB (PREMO, 1999). Esses painéis podem ser usados como vedação horizontal e/ou vertical, sendo a largura padrão de 1,25 m. O comprimento é definido de acordo com projeto, e as espessuras oferecidas são as de 15, 21,5 e 26,5 cm (FIG.3.9 e 3.10).



FIGURA 3.9 – Montagem de lajes em painéis de concreto extrudado alveolares
FONTE – PREMO, 1999

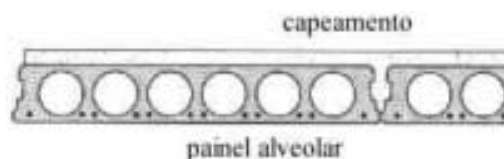


FIGURA 3.10 – Esquema dos painéis alveolares extrudados
FONTE – PREMO, 1999

3.2.3. Laje em steel deck

Esse tipo de vedação horizontal é constituída por três elementos principais: um tablado de aço galvanizado, ASTM A653 Grau 40 (ZAR-280), tensão de escoamento de 280 MPa, que é o chamado “*Steel Deck*”; uma armadura em tela soldada, para controle de fissuração; e uma camada de concreto de resistência mínima a compressão de 20 MPa (FIG.3.11 e 3.12). O “*Steel Deck*” possui dupla função, atuando como fôrma para o concreto durante a construção e como armadura positiva de lajes para as cargas de serviço. Conformado a frio e cobrindo uma largura útil de 820 mm o “*Steel Deck*” possui nervuras largas, permitindo a utilização de conectores (“*stud bolts*”), o que possibilita o cálculo de vigas mistas e reduz o peso da estrutura (METFORM).



FIGURA 3.11 – Vedação horizontal com “*Steel Deck*”

FONTE – METFORM

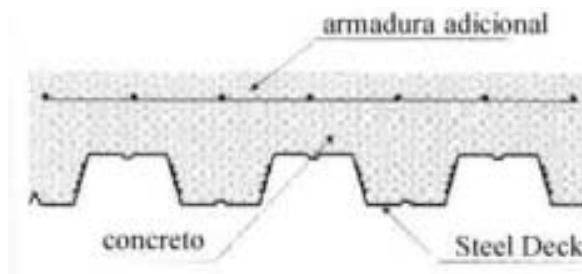


FIGURA 3.12 – Corte esquemático dos pisos com “*Steel Deck*”

FONTE – METFORM

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE FÍSICO-CONSTRUTIVA

4.1. Considerações gerais

No Brasil, os processos tradicionais de vedação ainda são preponderantes. Entretanto, uma grande variedade de materiais e práticas tecnológicas inovadoras têm sido importados e incorporados ao mercado da construção civil nessa área. As construções industrializadas em aço dependem, em grande parte, do sucesso na associação entre estruturas e sistemas de vedação, já que tais sistemas definem limites e possibilidades para a execução de todos os outros. Essa associação ainda apresenta problemas e dificuldades de funcionamento perfeito, sendo seu desenvolvimento e adaptação fundamentais para a efetivação do uso do aço no cenário nacional.

As patologias físico-construtivas apresentadas pelos sistemas de vedação industrial, associados à estrutura metálica, precisam, ainda, de diagnóstico para que todos os problemas sejam analisados e resolvidos, e o processo se torne realmente eficiente como um todo. Inicialmente, deve-se definir o que vem a ser uma patologia físico-construtiva. A palavra patologia significa doença, e sendo ela físico-construtiva, se refere à integridade física de uma construção e seus componentes. Nesse sentido, patologia físico-construtiva seria todo problema físico apresentado por uma edificação, seja durante seu período de execução ou pós-ocupação.

O método escolhido para se realizar o levantamento dessas patologias foi o de investigação de campo, através de estudos de caso. Ou seja, é feita uma análise de observação e coleta de dados em várias edificações, onde se identifica o uso de sistemas de vedação industrializada associados à estrutura metálica.

4.2. Sistematização investigativa

A partir da escolha das edificações, alvo de estudo, a sistemática para realização do levantamento de patologias está dividida em duas etapas. Em um primeiro momento, faz-se uma pesquisa junto às construtoras e aos projetistas envolvidos em cada caso, com o objetivo de se traçar um perfil do processo de projeto e do processo de execução que vêm sendo praticados no mercado (ANEXO I). Essa pesquisa é feita através de entrevistas, e a partir destas serão montadas tabelas comparativas dos vários casos. Em uma segunda fase, através de observação em campo, é realizada uma coleta de dados referentes às condições físicas de cada edifício em questão, o que constitui o levantamento de patologias propriamente dito. Através da análise conjunta dos resultados dessas duas etapas de pesquisa, obtém-se um mapeamento das falhas ocorridas na associação dos sistemas de vedações com a estrutura metálica.

4.3. Descrição dos edifícios-tipo escolhidos

O critério principal, para seleção de edificações a serem analisadas como exemplos, foi o uso de sistemas pré-fabricados (industrializados) de vedação associados à estrutura metálica. Dessa forma, chegou-se a uma lista de obras nas quais pode-se observar a estrutura metálica e alguns tipos de vedação horizontal e/ou vertical trabalhando conjuntamente.

4.3.1. Edifício 01 (Edifício Residencial)

O primeiro caso estudado foi um edifício residencial de 03 pavimentos, situado no bairro Serra em Belo Horizonte. Ele foi construído em estrutura metálica não aparente, com vedações externas em alvenaria de tijolo cerâmico furado e vedações internas em painéis de gesso acartonado, sendo as lajes de piso em painéis pré-moldados de concreto armado (FIG.4.1). Além disso, foram utilizados outros sistemas industrializados como o de esquadrias e o de instalações.



FIGURA 4.1 – Fachada da edificação

- a) Edificação em fase de construção – com estrutura aparente
- b) Edificação acabada

Esse empreendimento foi realizado, em 1999/2000, pela empresa Angra Incorporações Imobiliárias, uma construtora de pequeno porte, cujo empreendedor é um profissional que atua como incorporador e construtor de imóveis, sendo sua formação na área de economia. A empresa em questão atua no mercado há aproximadamente 08 anos. Ela utiliza mão de obra contratada para cada empreendimento, não adota programa de treinamento de pessoal ou plano sistematizado para introdução de novas tecnologias na obra, e seu campo mercadológico de atuação é voltado para prédios residenciais de pequeno porte.

A edificação foi projetada para ser construída em concreto e não houve estudo para adaptação do projeto à utilização da estrutura metálica, assim como não houve acompanhamento da obra por parte do arquiteto. A adaptação do projeto original ao uso de novos materiais e técnicas foi feita parte pela fábrica responsável pelo cálculo e montagem da estrutura metálica e parte durante o processo de execução, no canteiro de obras. Não houve estudo específico para a compatibilização dos sistemas utilizados, o que posteriormente levou a alguns contratempos e à contratação de consultoria na área de vedações.

O processo construtivo e os novos materiais utilizados foram escolhidos através de visitas a feiras da construção civil. E os principais motivos para a utilização de novas tecnologias foram a intenção de reduzir pessoal em obra e diminuir o prazo de execução, e o desejo de modernizar o processo construtivo para se chegar a um esquema de simples montagem.

A seqüência de montagem foi definida pela estrutura metálica, que foi inteiramente montada para se começar o encaixe e montagem dos painéis de laje pré-fabricada. Em seguida, a começar pelo térreo, foram levantadas as alvenarias externas, que se encaixavam na estrutura com ligações feitas em tela galvanizada “*ancofix*” em alguns pontos (FIG.4.2), em outros fazia-se a ligação através de cantoneiras metálicas (FIG.4.3). Os painéis de laje (FIG.4.4) não previam desníveis de áreas molhadas para áreas secas, por isso foi feito um capeamento por todos os pavimentos que permitiu a criação desses desníveis. As paredes externas foram rebocadas internamente e só aí puderam entrar os perfis para montagem das divisórias de gesso acartonado (FIG.4.5). Já o reboco externo estava sendo executado, assim como a instalação das esquadrias externas, constituindo outra frente de trabalho. Nesse ponto, as instalações hidráulicas e elétricas que seriam embutidas nas divisórias internas precisavam ser finalizadas (FIG.4.6) para fechamento dessas vedações com as placas de gesso (FIG.4.7). Então entraram as esquadrias que eram simplesmente encaixadas (FIG.4.8), e foi feita a finalização dos acabamentos de piso e parede (FIG.4.9).



FIGURA 4.2 – Ligação alvenaria/estrutura com tela “*ancofix*”



FIGURA 4.3 – Ligação alvenaria estrutura com cantoneira metálica



FIGURA 4.4 – Laje em painéis de concreto pré-moldado

a) Furações e tubulações – lajes

b) Encaixes e disposição – lajes/estrutura metálica



FIGURA 4.5 – Perfis metálicos para montagem das divisórias de gesso acartonado



FIGURA 4.6 – Instalações embutidas nas divisórias de gesso acartonado



FIGURA 4.7 – Divisórias de gesso acartonado montadas

a) Embutimento – instalações hidráulicas e elétricas – banheiro

b) Embutimento – instalações elétricas – quarto



FIGURA 4.8 – Montagem – esquadria industrializada em divisória interna



FIGURA 4.9 – Acabamentos internos

Durante o processo de execução do edifício, os maiores problemas apresentados foram as ligações da alvenaria com a estrutura metálica (FIG.4.10) e a carência de mão de obra especializada para execução dos novos sistemas. Além disso, houve problemas gerados pela deficiência no planejamento e compatibilização dos processos de execução de cada sistema. Essa falta de integração entre as etapas do processo acumulou atrasos no cronograma da obra, que já começou com prazos estourados devido à entrega da estrutura metálica e dos painéis de laje.



FIGURA 4.10 – Ligações alvenaria/estrutura metálica

Surgiram trincas nas junções das alvenarias com vigas e pilares (FIG.4.11), já que as vedações externas estavam trabalhando junto com a estrutura. Dessa forma, foi necessário soltar a alvenaria da estrutura para evitar problemas de trincas devidas à movimentação e dilatação diferenciada dos dois sistemas (FIG.4.12). Além disso, a estrutura metálica montada apresentou diferenças de prumo e alinhamento de fachada, o que gerou problemas no revestimento externo do prédio, que teve de ser equacionado adotando-se soluções propostas por consultor específico de vedações. Na solução de tais problemas e na adoção de novos materiais como o gesso acartonado, necessitou-se de componentes e aditivos de acabamento, como fitas, telas e massas, de custo muito elevado.

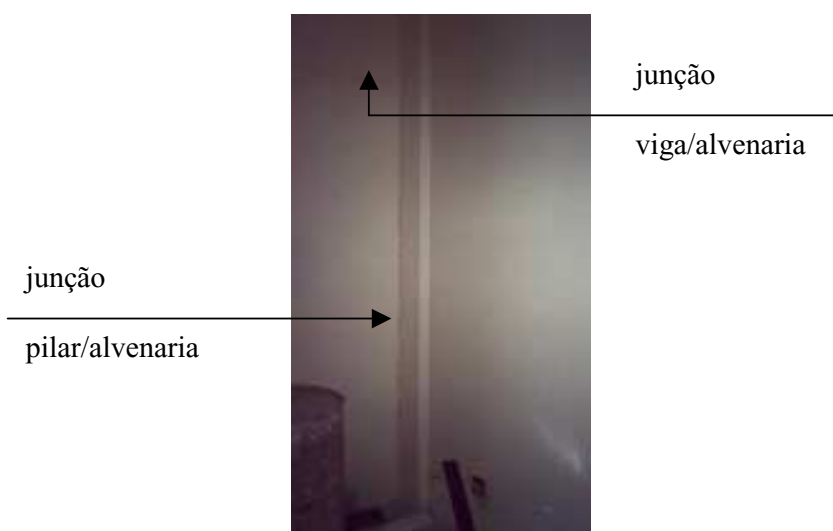


FIGURA 4.11 – Trincas nas junções alvenaria/estrutura

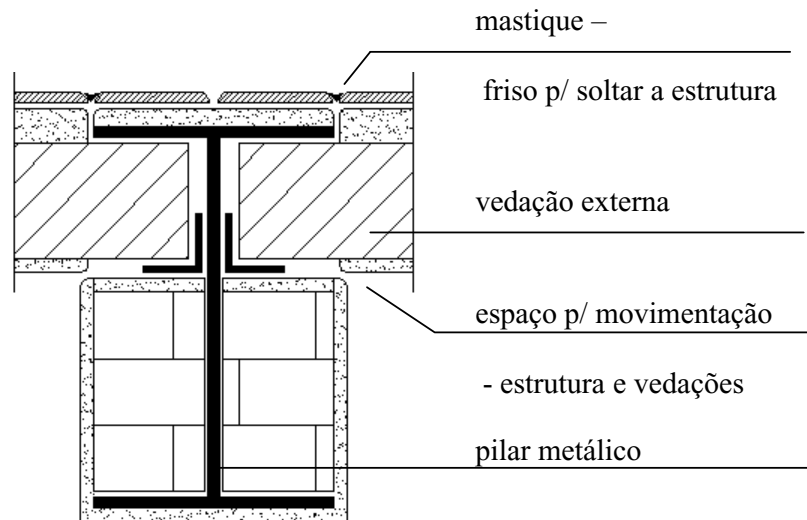


FIGURA 4.12 – Planta esquemática da junção alvenaria/estrutura metálica

Em relação às divisórias internas, o maior problema foi a carência de mão de obra qualificada, já que tal sistema necessita de exatidão na execução, inclusive para a colocação das esquadrias posteriormente (FIG.4.8). A necessidade dessa exatidão levou a um certo desperdício de tempo e retrabalho, já que a equipe inicial de montagem teve que ser trocada e parte do serviço refeito.

No que se refere aos painéis de piso, o problema inicial foi um acréscimo de carga em todos os pavimentos, devido à não previsão dos desníveis de áreas secas para áreas molhadas. Outro imprevisto foi a dificuldade de embutimento de fiação e caixas de passagem no piso pré-moldado, que não conseguiu suprir todas as necessidades de projeto. Como a tubulação para passagem dos fios ficou embutida no piso, a execução dessa tarefa se tornou extremamente artesanal e trabalhosa. Além disso, foram encontradas dificuldades para se obter um acabamento de teto com qualidade, já que o tratamento das juntas das placas de piso não tinha sido estudado pelo fabricante ou pelo construtor.

No caso aqui analisado, a associação da estrutura metálica a outros sistemas industrializados trouxe maior limpeza à obra e possibilitou uma redução no quadro de

funcionários no canteiro. Entretanto, como a introdução dessas novas tecnologias não se deu de maneira planejada e com uma visão sistêmica do processo global da construção, resultados relativos a prazos e custos foram negativos, o que é agravado por se tratar de um empreendimento residencial e que, por isso, tem menos liquidez no mercado.

4.3.2. Edifício 02 (Edifício Scala)

Esse caso trata-se de um edifício comercial de 19 pavimentos, situado no bairro Barro Preto em Belo Horizonte, construído em estrutura metálica não aparente, com vedações externas em alvenaria de blocos de concreto celular e vedações internas em painéis de gesso acartonado, sendo as lajes de piso em “*Steel Deck*” (FIG.4.13).



FIGURA 4.13 – Vistas do Edifício Scala Work Center

a) Vista frontal

b) Vista lateral

FONTE – REM, jul/set 2000 e www.joaodiniz.com.br

Esse empreendimento foi realizado, em 1996/1998, pela Tríade Engenharia, que é uma construtora de médio porte cuja equipe técnica era composta por alguns profissionais da área de engenharia. A empresa em questão atua no mercado há aproximadamente 07

anos, utiliza mão de obra contratada para cada serviço específico, por empreitada, e assim não adota nenhum programa de treinamento, já que tenta terceirizar a maior parte da obra com a intenção de apenas administrar a montagem da construção.

A estrutura metálica foi definida desde o início do projeto, entretanto o tipo de vedações a ser utilizado foi definido posteriormente. Não foi feito projeto específico de vedações, mas houve acompanhamento da obra por parte do escritório de arquitetura. Dessa forma, todas as adaptações, feitas devido à adoção de painéis de gesso como divisórias internas, foram discutidas e acompanhadas pelo arquiteto.

O processo construtivo e os novos materiais utilizados foram escolhidos através de visitas a feiras, congressos, palestras e visitas técnicas nacionais e internacionais. O grupo da construtora desejava modernizar o processo construtivo introduzindo os novos conceitos da construção industrializada e as principais motivações eram a redução de custos e a racionalização do processo.

A seqüência da obra começou pela montagem da estrutura metálica, que foi estabilizada através do núcleo de concreto, formado pela circulação vertical, e pela concretagem das lajes em “*Steel Deck*”. Em seguida foi feito o levantamento das alvenarias externas em blocos de concreto celular. Como as divisórias internas adotadas foram executadas em painéis de gesso acartonado, os perfis para montagem destas foram instalados só depois das faces internas das alvenarias estarem rebocadas. O fechamento com os painéis se deu depois de as instalações hidráulicas e elétricas estarem montadas no espaço interno das divisórias. Após a conclusão da montagem dos sistemas de vedação, foram realizados os acabamentos finais.

Não houve grandes dificuldades durante o processo de execução da obra, mas como foi a primeira experiência do gênero para a construtora, aconteceram alguns contra-tempos. As necessidades de logística da obra eram diferentes dos casos tradicionais, portanto geraram alguns problemas como no transporte e estocagem das placas de gesso. Uma obra desse tipo exige agilidade e o ideal para as divisórias de gesso acartonado é que tão logo as placas cheguem no canteiro, elas já possam ser montadas. Outro ponto delicado

foram as junções entre a estrutura metálica e o forro de gesso, onde o forro se encontrava com faces de pilares e de vigas de bordo, e encontros de alvenarias com as divisórias de gesso em algumas situações. Houve, também, alguns pequenos defeitos de acabamento, e depois do prédio em uso, surgiram alguns problemas de infiltração nas lajes de piso, o que danificou algumas divisórias de gesso.

No que diz respeito aos resultados da associação da estrutura metálica e de sistemas industrializados, como os painéis de vedação, obteve-se uma obra mais racional, com um nível de desperdícios bem mais baixo, um tempo de execução menor, um padrão de acabamento satisfatório e um quadro de funcionários em canteiro bastante reduzido. Já no que se refere a custos, a obra ficou um pouco mais cara do que se fosse feita nos métodos convencionais.

4.3.3. Edifício 03 (Edifício Augusta)

Esta edificação analisada é um edifício residencial de 03 pavimentos, situado no bairro Grajau em Belo Horizonte, construído em estrutura metálica não aparente, com perfis leves em chapa dobrada. As vedações externas foram montadas em painéis de concreto armado com alma em poliestireno expandido, de aproximadamente 4,00 x 3,00 m e 7 cm de espessura. As vedações internas adotadas foram painéis de gesso acartonado e as lajes de piso foram feitas em painéis pré-moldados de concreto (FIG.4.14).



FIGURA 4.14 – Vista do Edifício Augusta

Esse empreendimento foi realizado, em 1999/2000, por uma construtora de pequeno porte associada a empresas fabricantes de sistemas industrializados para a construção civil. Os profissionais responsáveis pelo empreendimento trabalham na área da construção civil há mais de 15 anos, sendo as edificações residenciais seu nicho de mercado de atuação mais comum. A empresa não possui quadro fixo de funcionários para a obra, portanto não mantém nenhum tipo de programa de treinamento. As etapas de acabamento são contratadas por empreitada, assim a obra se torna um conjunto de serviços terceirizados.

A obra foi concebida desde o início como uma construção industrializada. Portanto o projeto nasceu e se desenvolveu de acordo com as possibilidades oferecidas pelos novos sistemas a serem utilizados. Até a finalização do conjunto de projetos para o edifício, foram feitas compatibilizações e criadas soluções específicas de acordo com fabricantes e necessidades do cliente. Entretanto, ainda assim, houve a necessidade de algumas adaptações em obra. O conceito adotado para o edifício foi o da associação de sistemas contratados em firmas especializadas, ou seja, a administração da obra passou a ser uma coordenação de serviços, uma montagem monitorada.

O processo construtivo foi definido através de pesquisas junto a fabricantes e visitas técnicas, já que o interesse dos empreendedores era montar uma edificação com o máximo de industrialização no seu processo executivo. Era intenção, também, a otimização do prazo de execução, a diminuição de custos e conseqüente competitividade e redução de mão de obra no canteiro.

Na seqüência de montagem a estrutura metálica foi inteiramente montada, depois vieram os painéis de laje de piso, sobre os quais foi colocada uma tela de aço galvanizado para a espera do capeamento (FIG.4.15). Na etapa seguinte, foram montados de baixo para cima os painéis externos, o que necessitou de guias para içamento. Esses painéis de vedação foram fabricados em concreto armado, tendo uma alma em poliestireno expandido de aproximadamente 5 cm de espessura, para torná-los mais leves. Eles foram fixados de piso a piso, através de “*inserts*” metálicos (FIG.4.16). Só depois de todos os painéis de fachada montados, é que foi feito o capeamento das

lajes de piso. Dessa forma, os “*inserts*” que apareceriam nas lajes sumiram dentro do capeamento (FIG.4.17). As juntas dos painéis de concreto foram siliconadas e teladas para serem acabadas com a pintura prevista (FIG.4.18). A próxima etapa foi a parte das instalações, locação dos perfis para as divisórias de gesso e acabamentos internos dos painéis de fachada (FIG.4.19). Só aí é que entraram as placas de gesso acartonado e a finalização dos acabamentos (FIG.4.20).



FIGURA 4.15 – Painéis de concreto pré-moldado para piso antes do capeamento

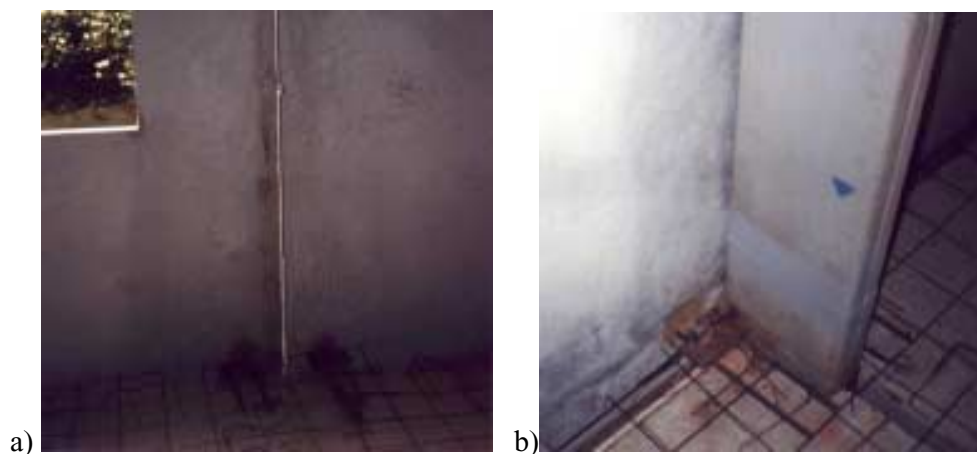


FIGURA 4.16 – “*Inserts*” metálicos de fixação dos painéis pré-moldados

- a) Fixação dos painéis na laje
- b) Fixação dos painéis na laje e pilar

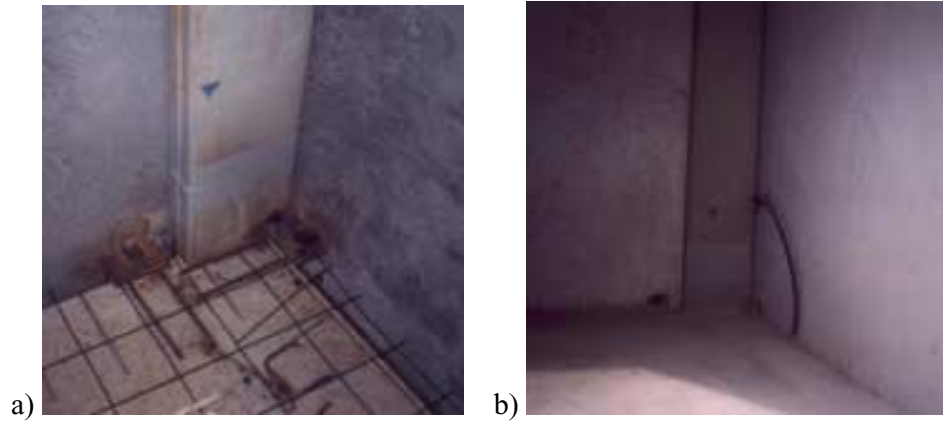


FIGURA 4.17 – Capeamento das lajes de piso

- a) Conjunto piso/"inserts"/pilar – antes do capeamento
- b) Conjunto piso/"inserts"/pilar – depois do capeamento



FIGURA 4.18 – Juntas entre painéis de fachada (internamente)



FIGURA 4.19 – Divisórias internas montadas

- a) Perfis de estruturação das divisórias de gesso
- b) Placas de gesso colocadas



FIGURA 4.20 – Acabamentos internos

As principais dificuldades do processo foram o cumprimento dos prazos de execução de cada etapa, a sincronia de montagem e a compatibilização dos sistemas, além da logística da obra, que está situada em uma área de difícil acesso para as gruas devido à fiação pública existente (FIG.4.21). Devido a deficiências de projeto, houve a necessidade de se criar “*shafts*” para passagem de fiação, já que as vigas metálicas não

podem ser atravessadas por instalações (FIG.4.22). Outro detalhe que gerou um certo retrabalho foram as deformações apresentadas pelas chapas dos perfis leves, o que exigiu soluções paliativas para acerto e acabamento nos encontros de divisórias de gesso com vigas. O planejamento da seqüência de montagem dos sistemas acabou criando problemas para os instaladores das divisórias internas, pois as chuvas chegaram sem que os vãos para esquadrias estivessem fechados, o que danificou algumas placas de gesso que já estavam sendo instaladas (FIG. 4.23). Além disso, houve alguns pequenos defeitos de acabamento nos painéis externos, entretanto, o resultado final foi satisfatório.



FIGURA 4.21 – Localização da obra em relação à fiação pública



FIGURA 4.22 – Improviso na criação de “shafts”

- a) Fiação a ser embutida na divisória interna
- b) “Shaft” criado em obra para embutir fiação



FIGURA 4.23 – Danos causados pela umidade nas placas de gesso

O conjunto de sistemas associados nessa edificação foi inteiramente industrializado, desde a estrutura metálica até as vedações. Entretanto, o empreendimento foi concebido e executado sistemicamente, de maneira parcial, o que gerou alguns atrasos e retrabalhos na obra. A rapidez de execução foi prejudicada, ainda, por problemas de fornecedores e compatibilização de projetos e o nível de qualidade final foi satisfatório. Obteve-se uma obra mais limpa (FIG.4.24), com apenas um administrador como funcionário fixo. No que diz respeito a custos, por ser um empreendimento residencial e popular e considerando que foi uma associação de construtores e fabricantes para viabilizar a experiência, ainda não se obteve viabilidade comercial, principalmente no que diz respeito ao tipo de painéis de piso utilizado.



FIGURA 4.24 – Limpeza e mobilidade na obra

4.3.4. Edifício 04 (Ed. Ary Scott)

O Edifício Ary Scott é um prédio comercial de 10 pavimentos tipo e dois níveis de garagem, situado no bairro Serra em Belo Horizonte. Ele foi construído em estrutura metálica não aparente, com vedações externas em alvenaria de blocos de concreto celular e vedações internas em painéis de gesso acartonado. As lajes de piso foram executadas em “*Steel Deck*” (FIG.4.25).



FIGURA 4.25 – Vistas Edifício Ary Scott

Esse empreendimento foi realizado, em 1995/1997, pela Construtec, uma construtora de médio porte, sob a coordenação de um profissional de engenharia que atua no mercado da construção há aproximadamente 19 anos. A empresa, hoje e na obra em questão, não mantém quadro fixo de funcionários no canteiro de obras, não havendo assim, programa de treinamento ou de introdução de novas tecnologias. Seu nicho de mercado varia entre prédios residenciais e comerciais de nível médio.

A edificação foi projetada para ser feita em estrutura metálica, porém os tipos de vedação foram definidos ao longo do processo de execução. O arquiteto teve oportunidade de acompanhar o andamento da obra e participar da elaboração de soluções técnicas não previstas anteriormente. A equipe arquitetônica sugeriu uma compatibilização de projetos inicial, tendo como foco principal as interferências do

projeto estrutural. Entretanto, esse processo não foi inteiramente desenvolvido por uma equipe determinada de maneira sistemática.

Os sistemas construtivos adotados foram escolhidos a partir de pesquisas de mercado e visitas a feiras feitas pelos empreendedores da edificação. Os principais motivos para a adoção de novos sistemas, como a estrutura metálica, o “*Steel Deck*” e as divisórias internas de gesso, foram o desejo de fugir da mão de obra convencional e dos desperdícios e a intenção de modernizar e racionalizar o processo construtivo. Dessa forma, a execução dos vários sistemas, que compõem a obra, foi terceirizada para firmas especializadas em cada área.

A seqüência de montagem da obra começou pela estrutura metálica, que foi estabilizada pelas lajes em “*Steel deck*” e em seguida foi feito o levantamento das alvenarias externas em blocos de concreto celular. Essas alvenarias foram feitas, em balanços de laje previstos, externas à estrutura, para que as duas trabalhassem independentemente (FIG.4.26). Como as divisórias internas adotadas foram executadas em painéis de gesso acartonado, os perfis para montagem dessas foram instalados só depois das faces internas das alvenarias estarem rebocadas. O fechamento completo com os painéis se deu depois das instalações hidráulicas e elétricas estarem montadas no espaço interno das divisórias. Depois de todas as etapas de montagem completas, foram finalizados os acabamentos.

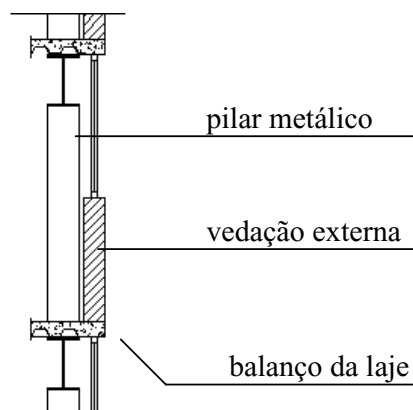


FIGURA 4.26 – Desenho esquemático – alvenarias externas

As maiores dificuldades enfrentadas, no processo de execução dessa obra, foram a carência de mão de obra qualificada e a necessidade de exatidão e agilidade para conciliar a seqüência da montagem dos vários sistemas integrantes da construção.

Após um período relativamente curto de uso, o edifício apresentou problemas de infiltração nas fachadas (FIG.4.27) e trincas na ligação da cortina de alvenaria de fachada com as lajes de teto (FIG.4.28). O que demonstrou não ter sido bem equacionada a questão da ligação estrutura-alvenaria em bloco de concreto celular, já que esses dois sistemas apresentam movimentações diferenciadas.



FIGURA 4.27 – Infiltração nas vedações de fachada



FIGURA 4.28 – Trincas na verga/esquadria

A associação da estrutura metálica a sistemas industrializados, como os painéis de vedação, resultou em uma obra mais racional, com um nível de desperdícios bem mais baixo, um padrão de acabamento satisfatório, um quadro de funcionários em canteiro

bastante reduzido e um tempo de execução menor, apesar de a obra ter sido interrompida em algumas etapas devido a problemas financeiros. Já no que se refere a custos, a obra ficou um pouco mais cara do que se fosse feita nos métodos convencionais.

4.3.5. Edifício 05 (Edifício Piemonte)

Este é um edifício comercial situado no bairro Vale da Serra em Belo Horizonte, constituído por dois blocos distintos, um estruturado em aço, destinado à escritórios e outro em concreto, destinado a garagens (FIG.4.29). O prédio em estrutura metálica tem 08 pavimentos tipo e um subsolo. A estrutura metálica é não aparente, com vedações externas em painéis de concreto celular autoclavado e alvenaria em blocos de concreto celular. As vedações internas são em painéis de gesso acartonado e as lajes de piso em concreto moldado “*in loco*”.

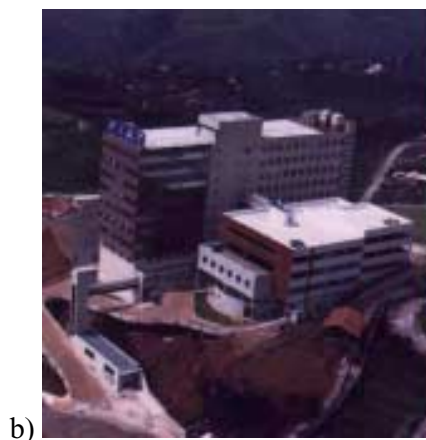


FIGURA 4.29 – Vista Edifício Piemonte

a) Vista aérea do edifício

b) Vista dos dois blocos do edifício

Esse empreendimento foi realizado, em 1999/2000, por uma construtora de grande porte, que atua no mercado há aproximadamente 26 anos. A empresa possui uma equipe de profissionais na área de engenharia e atua como executora, administradora e incorporadora de empreendimentos civis. A mão de obra do canteiro foi quase que em sua totalidade contratada pelas empresas prestadoras de serviços, que venderam os respectivos sistemas componentes da construção para a construtora, a qual assumiu a função de coordenar o processo.

A edificação foi definida como industrializada desde sua concepção, dessa forma foi projetada de acordo com as características e as possibilidades oferecidas pela estrutura em aço e demais sistemas escolhidos para comporem o edifício. Houve interação entre as equipes de projeto e os fornecedores dos materiais de execução, para que pudesse ser feito um projeto de alto nível de detalhamento. O projeto de vedações foi feito pelo fabricante e fornecedor das vedações, com supervisão da equipe de arquitetura.

Os sistemas utilizados na construção foram escolhidos a partir de contatos realizados com fabricantes e visitas técnicas, tendo-se em vista a necessidade de rapidez de execução que tal empreendimento exigia. O fator determinante na escolha dos sistemas industrializados, a serem associados à estrutura metálica, foi o prazo de execução ligado à maior racionalização possível do processo como um todo.

A obra começou com a execução de um subsolo em concreto e a partir dele foi montada a estrutura metálica da torre de escritórios. O levantamento da estrutura, a execução das lajes e o início da montagem dos painéis externos foram feitos simultaneamente em alguns momentos da obra (FIG.4.30). As lajes de piso foram maciças, moldadas “*in loco*” e foi utilizado o sistema de treliças telescópicas apoiadas na estrutura metálica (FIG.4.31). As lajes foram executadas de três em três, sendo a terceira executada primeiramente e depois as duas abaixo dela; o que permitiu uma maior agilidade no andamento da obra e uma maior mobilidade nos pavimentos executados já que as lajes foram feitas sem a necessidade de escoramento convencional e a superior sempre servia como plataforma de trabalho e proteção. As vedações de fachada foram colocadas externamente à estrutura, de modo a garantir que as duas trabalhassem dissociadamente.

Para tal, as lajes dos pisos foram executadas com balanços no contorno da edificação e os painéis de vedação foram pendurados nesses balanços sem se encostarem nas colunas do prédio. Os painéis utilizados foram painéis de concreto celular armados de 1,8 m de comprimento, e eles foram fixados na borda das lajes, de maneira a passar 1 m acima delas e 80 cm abaixo, o que definiu as alturas respectivas de peitoril e verga dos pavimentos, já que o restante do vão seria completado por esquadrias (FIG.4.32). Depois de fechados os pavimentos, foram instalados os perfis das divisórias de gesso e executadas as tubulações e fiações para a finalização das instalações prediais. Só então, as placas de gesso puderam ser fixadas e fechadas as divisórias internas. Na última etapa foram finalizados os acabamentos da obra.



FIGURA 4.30 – Fases da obra sendo executadas simultaneamente



FIGURA 4.31 – Esquema de execução das lajes

FONTE – REM, jul/set 2000

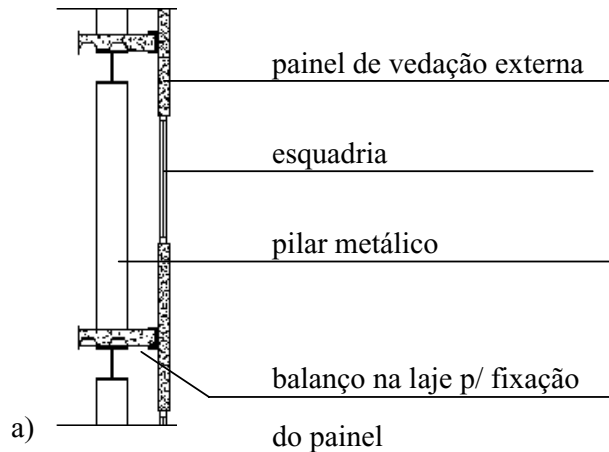


FIGURA 4.32 – Fixação dos painéis de vedação externos

a) Esquema de fixação dos painéis de fachada

b) Colocação de um painel externo

FONTE – REM, jul/set 2000

Durante o processo de execução do edifício, um dos maiores problemas a ser solucionado foi a deformação ocorrida nos balanços que receberiam os painéis de vedação. Essa deformação obrigou os construtores a adotarem um perfil a mais na borda dessas lajes para regular e compensar as diferenças de alinhamento na montagem das fachadas, já que para a colocação dos painéis era necessário um alinhamento perfeito.

A utilização da estrutura metálica, conjuntamente com outros sistemas industrializados, permitiu a finalização da obra, 6 meses antes do previsto. O que em um empreendimento comercial desse porte, torna competitivo o novo sistema construtivo adotado. O custo final foi compensado pelo prazo de execução. Além disso, a obra se

tornou mais limpa, mais ágil e mais racional no que diz respeito à mão de obra e desperdícios em geral.

4.3.6. Edifício 06 (Residência João Grillo)

Este edifício trata-se de uma residência de 02 pavimentos, situada no bairro Serra Dell Rey em Belo Horizonte. Essa construção tem como característica marcante a preservação quase que total do terreno com sua vegetação original e sua declividade, já que a estrutura metálica possibilitou o mínimo de interferência no sítio de implantação (FIG.4.33). Essa estrutura ficou aparente em alguns ângulos da casa e não aparente em outros, as vedações externas foram executadas em painéis cimentícios e as vedações internas em painéis de gesso acartonado. As lajes de piso foram executadas em “*Steel Deck*”. Além desses sistemas, verifica-se a utilização do conceito de industrialização e facilidade de manutenção em todas as instalações (FIG.4.34).



a)



b)

FIGURA 4.33 – Implantação da edificação

a) Estrutura respeita o terreno

b) Vista de fundos – edifício incrustado no sítio



FIGURA 4.34 – Vista residência João Grillo

a) Vista – entrada da casa

b) Vista de fundos – varanda

Esse empreendimento foi realizado, em 2000/2001, por iniciativa do arquiteto e proprietário da residência em questão. Sendo uma obra de cunho pessoal, seu processo de execução, assim como a escolha dos sistemas utilizados não se enquadram completamente em um perfil comercial da construção civil.

A edificação foi projetada desde a sua concepção em estrutura metálica e sistemas industrializados. O arquiteto fez um projeto específico de vedações, que foi acompanhado pelos fornecedores. Entretanto, ainda assim houve alguns imprevistos solucionados na obra, que foi acompanhada de perto pelo proprietário e projetista. Apesar desse acompanhamento, não houve um estudo de compatibilização dos sistemas e de definição dos prazos para sincronia de execução dos mesmos.

Os sistemas construtivos utilizados foram escolhidos através da vivência de mercado do profissional, que se mantém em contato direto com feiras e mostras ligadas ao ambiente construído. Ao escolher esses novos sistemas para a construção, a intenção principal do arquiteto foi fugir do conceito convencional do processo construtivo, ao mesmo tempo preservar a configuração do seu terreno quase intocada e garantir flexibilidade para futuras mudanças na distribuição de espaço interno da casa.

A primeira etapa da seqüência de montagem foi a estrutura metálica, sendo a casa suspensa do terreno em declive, nenhum piso toca o solo e ambos os pisos foram executados em “*Steel Deck*”(FIG.4.35) e seu acabamento foi feito em lajota cerâmica (FIG.4.36). Para as vedações externas foi montada uma estrutura em perfis leves, fixada à estrutura da edificação, na qual foram aparafusados os painéis cimentícios (FIG.4.37). Essa estrutura leve foi escondida por chapas de gesso acartonado internamente, o que criou um colchão de ar para melhorar o conforto termo-acústico da edificação. Na seqüência, as instalações foram locadas e encaixadas nos espaços entre os perfis das divisórias de gesso, as quais, só depois de todas as instalações finalizadas, foram fechadas nas duas faces com as placas de gesso acartonado.



FIGURA 4.35 – Vista de teto do “*Steel Deck*”



FIGURA 4.36 – Laje em “*Steel Deck*” revestida



FIGURA 4.37 – Fixação dos painéis de vedação externos

- a) Vista externa da montagem dos painéis
- b) Vista interna da montagem dos painéis
- c) Painéis externos montados sem fechamento interno

O principal problema na realização da obra foi o acerto dos detalhes da associação do sistema de vedação ao sistema estrutural metálico. Faltaram informações sobre os dois sistemas, a fim de se fazer um detalhamento e casamento perfeitos, já que algumas soluções previstas tiveram que ser adaptadas em obra. A estrutura metálica apresentou deformações consideráveis, o que exigiu adaptações no sistema de vedações e esquadrias (FIG.4.38); houve um deslocamento da esquadria em relação à posição de projeto devido à diferença de prumo na estrutura. Além disso, surgiram bolhas coincidentes com as juntas das placas cimentíceas (FIG.4.39) e ocorreram alguns

defeitos nos rejuntas. Outro ponto delicado foi a administração dos tempos certos para a execução de cada etapa, ou seja, a compatibilização dos vários sistemas e sua sincronia de execução.

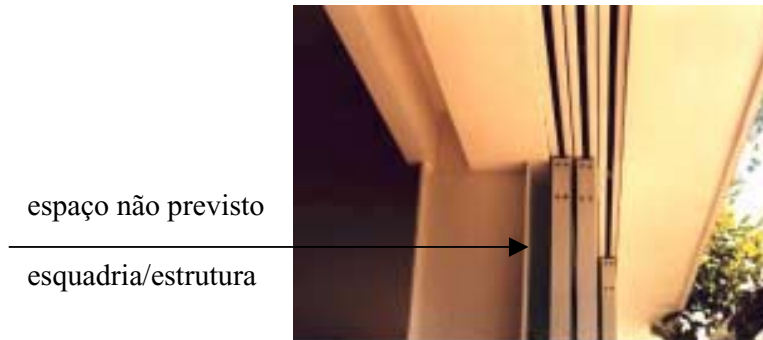


FIGURA 4.38 – Adaptação na colocação das vedações e esquadrias
(Deslocamento da esquadria em relação à posição de projeto devido a diferenças de prumo na estrutura)



FIGURA 4.39 – Defeito de acabamento

A associação da estrutura metálica e de sistemas industrializados de vedações trouxe limpeza para o canteiro de obras, diminuição de pessoal e de desperdícios no processo de execução, além de possibilitar a preservação do sítio de implantação da edificação. Outros pontos positivos alcançados foram a flexibilidade para mudanças futuras, a facilidade de manutenção da construção (FIG.4.40) e a qualidade final da obra (FIG.4.41). Com relação a custos e tempo de execução, esse é um caso muito particular, já que se trata de uma construção pequena e que não tem um grau de repetições como se pode verificar em edifícios de andares múltiplos. Tais características tornam mais delicada a tarefa de coordenar e sincronizar as etapas de execução de cada sistema, que

no caso, são serviços menores e mais rápidos não sendo fácil mobilizar equipes de profissionais para sua realização.



FIGURA 4.40 – Facilidade de manutenção



FIGURA 4.41 – Acabamentos – vista interna

4.3.7. Edifício 07 (Shopping Center Uberlândia)

Essa edificação está localizada próxima ao centro administrativo municipal em Uberlândia e consiste na ampliação de um complexo de compras e hotelaria. O que resultou em um edifício comercial de 06 pavimentos, sendo 03 níveis de sub-solos e os outros distribuídos como áreas de lojas e convenções, incluindo um heliponto no topo

do edifício (FIG.4.42). Tal obra foi realizada em estrutura metálica, com vedações externas em painéis pré-moldados de concreto armado e vedações internas em painéis de gesso acartonado e alvenaria com blocos de concreto celular. As lajes de piso foram executadas em painéis pré-moldados de concreto armado.



FIGURA 4.42 – Vista externa do edifício

- a) Conjunto – torre hotel e prédio shopping
- b) Entrada do “Center Shopping”

O empreendimento foi realizado, em 1998/2000, sob administração e coordenação do grupo ARCOM e Center Shopping Empreendimentos. Foram contratadas empresas de grande porte para montagem e execução das várias etapas da obra. A compatibilização de projetos e organização da logística do canteiro de obras foi responsabilidade da equipe de engenharia do Grupo Center Shopping, que mantém equipe enxuta de profissionais na área. Dessa forma, quase que a totalidade dos serviços foram terceirizados para empresas especializadas.

A obra foi concebida inicialmente em concreto e pré-moldados, sendo adaptada para estrutura metálica posteriormente. Além dessa adaptação de sistema estrutural, houve

modificações de programa e distribuição de espaço que resultaram em outras adaptações estruturais. A flexibilidade oferecida pelo sistema estrutural em aço foi marcante no processo de execução desse empreendimento. A realização de tantas modificações, inclusive de carga da estrutura, só foi possível devido ao trabalho conjunto de equipes multidisciplinares, já que todas as equipes de projetos trabalharam juntas buscando soluções casadas e racionais. Todo o trabalho foi monitorado pelo empreendedor que assumiu o papel de coordenador dos vários sistemas contratados a serem associados.

O processo construtivo foi definido através de visitas técnicas e de estudos junto a fornecedores, havendo três diretrizes básicas: necessidades de programa e projeto, cumprimento de cronograma e minimização de custos. O grupo empreendedor tinha interesse em racionalizar a obra e chegar na melhor relação custo/benefício possível, o que levou à escolha da estrutura em aço e sistemas complementares industrializados.

A execução da obra começou pela adoção do sistema de paredes diafragma, o que permitiu a escavação dos sub-solos, que prolongam-se sob as três ruas contíguas a obra, sem qualquer tipo de revestimento (FIG.4.43). A montagem começou pela estrutura metálica, que foi seguida pelas lajes pré-moldadas modulares de pequena espessura. Depois de encaixadas, essas lajes foram solidarizadas à estrutura e foi feito capeamento adequado (FIG.4.44). As vedações externas foram executadas com painéis de concreto com miolo em poliestireno expandido, em faixas horizontais (FIG.4.45). Esses painéis foram fixados externamente à estrutura, através de “*inserts*” metálicos parafusados de pilar a pilar, de modo a garantir movimentação diferenciada dos dois sistemas (FIG.4.46). Os painéis foram montados de baixo para cima, em faixas horizontais devido a suas dimensões e definições de cálculo. Além desses painéis, houve a utilização de grandes panos de vidro fixo com características termo-acústicas especiais. Depois de fechados os pavimentos, foram executadas as vedações internas em blocos de concreto celular autoclavado e em painéis de gesso acartonado (FIG.4.47). Nos níveis de convenções, foram utilizados, também, painéis acústicos removíveis. Tubulações e fiações foram executadas de acordo com a sincronia dos sistemas de vedação e suas necessidades, e só então a etapa de acabamentos foi acionada.



FIGURA 4.43 – Vigas para reconstrução de arruamento e paredes diafragma

FONTE – foto cedida pela ARCOM, 2000



a)



b)



c)

FIGURA 4.44 – Colocação e solidarização das lajes pré-moldadas e estrutura metálica

a) Colocação das placas pré-moldadas

b) Detalhe da armação da laje

c) Capeamento da laje

FONTE – foto cedida pela ARCOM, 2000



FIGURA 4.45 – Montagem dos painéis externos



a)



b)

FIGURA 4.46 – Fixação dos painéis externos na estrutura

a) Fixação do painel de pilar a pilar

b) “Inserts” de fixação dos painéis

FONTE – foto cedida pela ARCOM, 2000

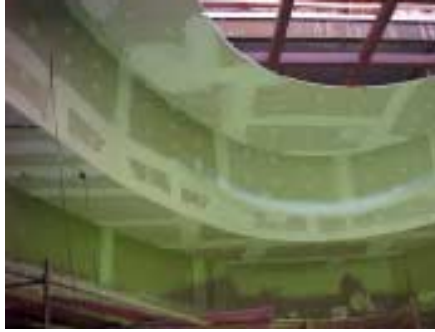


FIGURA 4.47 – Placas de gesso acartonado colocadas

Os maiores problemas enfrentados durante o processo de execução da obra foram a compatibilização perfeita dos sistemas e projetos, as adaptações feitas a partir de mudanças definidas durante o processo de construção e a organização da logística da obra. Além da questão de sua interferência no entorno urbano, já que a edificação aproveitou o sub-solo de três ruas adjacentes a ela, por se tratar da ampliação de um centro comercial e de hotelaria (FIG.4.48), a execução da obra teve muitos limitantes. Nesse sentido, foram necessários cuidados especiais para a reconstituição perfeita da malha urbana e a garantia de preservação das condições de uso dos equipamentos existentes na área. No que diz respeito a aspectos físico-construtivos, houve flechas maiores que as previstas nas lajes de um dos níveis de garagem, o que levou à necessidade da permanência de um sistema de escoramento para minimizar o problema. No tocante às vedações externas, alguns problemas de prumo na estrutura metálica causaram dificuldades na fixação dos painéis externos. Entretanto, todas as questões foram contornadas e obteve-se um resultado positivo.



FIGURA 4.48 – Obra em andamento e vista do Hotel existente
FONTE – foto cedida pela ARCOM, 2000

A utilização da estrutura metálica, simultaneamente com outros sistemas industrializados, permitiu a realização da obra dentro de um prazo relativamente curto e com o mínimo de interferência na vizinhança e no Shopping, que já existia e não podia parar seu funcionamento. Houve um máximo de racionalização do processo construtivo e um mínimo de desperdícios. O custo final foi compensado pelo prazo de execução e pelo nível de qualidade final.

4.3.8. Edifício 08 (Hotel Guarulhos)

Este é um edifício comercial de 14 pavimentos, situado em área adjacente ao aeroporto de Guarulhos em São Paulo. Esse edifício constitui-se por dois hotéis, um de 4 estrelas e outro de 5 estrelas, sendo a área total construída de 33000 m² e 14 lajes em “*Steel Deck*” sobrepostas (FIG.4.49). Para as vedações externas foram utilizados painéis pré-moldados de concreto maciço e nas vedações internas foram utilizadas divisórias de gesso acartonado. Outro sistema completamente industrializado foi o de banheiros prontos simplesmente encaixados em cada ponto previsto. Além disso, as instalações, esquadrias e acabamentos foram definidos na mesma linha do restante da obra.

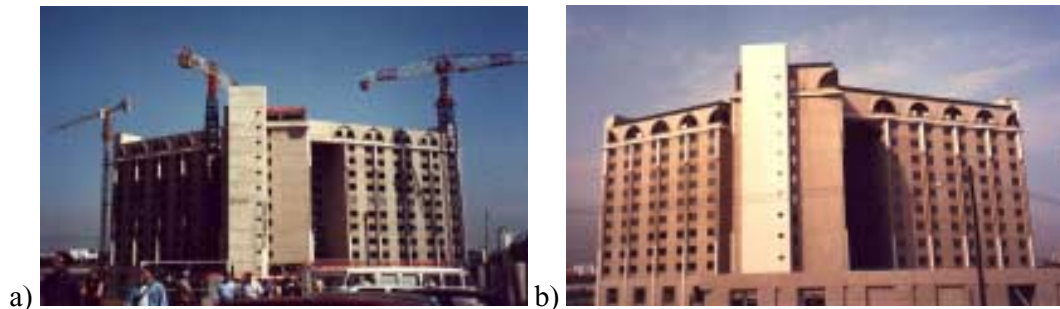


FIGURA 4.49 – Vista Hotel Guarulhos

a) Vista 01 – fase intermediária da obra

b) Vista 02 – fase de acabamento da obra

Esse empreendimento foi realizado, em 2000/2001, por uma construtora de grande porte, cujo diretor trabalha na área da construção civil há mais de 15 anos. A empresa possui uma equipe de profissionais da área de engenharia, que têm como função

coordenar e organizar as várias etapas de cada empreendimento. Já a mão de obra de canteiro é originária de cada empresa especializada, responsável por determinado sistema. Ou seja, cada fornecedor ou fabricante dos sistemas específicos, que compõem a obra, é responsável pelo treinamento e qualificação de seus operários.

A edificação foi projetada para ser executada inteiramente industrializada, com elevadíssimo nível de detalhamento. As equipes de projeto interagiram entre si e com os fornecedores, e ainda durante a obra qualquer alteração foi estudada e solucionada em conjunto. Foi adotada uma abordagem sistêmica multidisciplinar para a realização do empreendimento.

O processo construtivo e os novos materiais foram definidos a partir de experiências anteriores da construtora e pesquisa de mercado. No caso específico desse edifício, que é um conjunto hoteleiro, a redução do prazo de execução da obra foi o motivo principal para a escolha dos sistemas industrializados associados à estrutura metálica, além, é claro, da diminuição dos desperdícios, da otimização da mão de obra no canteiro, da limpeza da obra e da qualidade final do empreendimento.

A obra começou com a execução das três torres em concreto, a partir das quais foi montada a estrutura metálica (FIG.4.50). O levantamento da estrutura, colocação do “*Steel Deck*” e começo da instalação dos painéis de fachada foi feito simultaneamente (FIG.4.51). Os painéis começaram a ser colocados de baixo para cima a partir do primeiro nível da edificação, para depois se fechar o térreo por questões de logística (FIG.4.52). Os volumes de banheiros prontos foram encaixados depois das instalações preparadas e, então, os perfis para as divisórias internas foram montados (FIG.4.53). Depois de todas as instalações preparadas e caixilharia pronta para receber as placas de gesso, as divisórias foram fechadas e finalmente os acabamentos finalizados (FIG.4.54).



FIGURA 4.50 – Torres de concreto / início da montagem da estrutura metálica

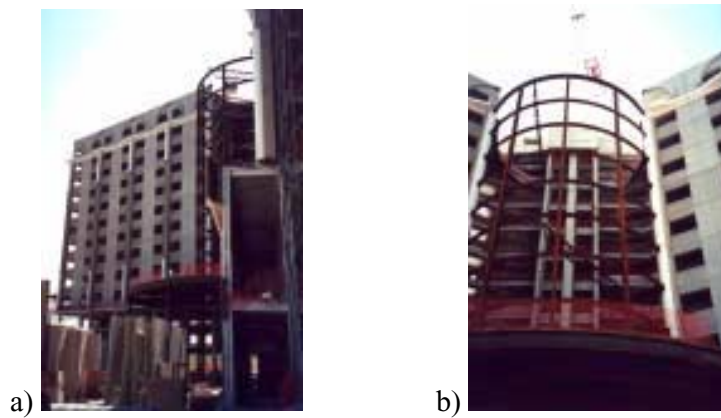


FIGURA 4.51 – Obra em execução

a) Fachada semi-pronta e painéis à espera da colocação

b) Estrutura metálica aguarda esquadrias

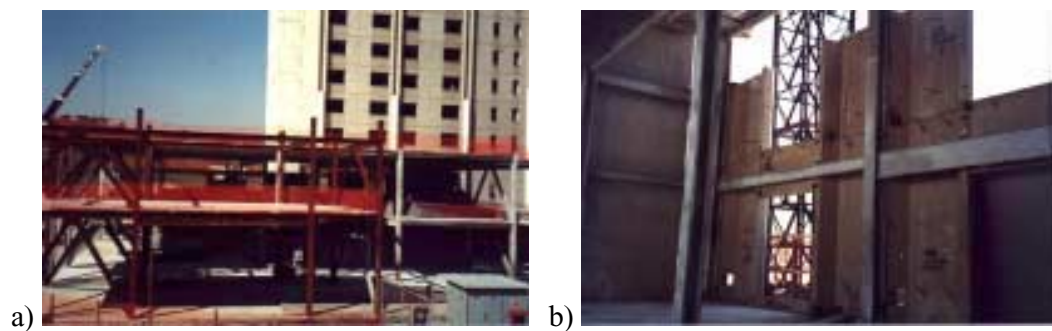


FIGURA 4.52 – Fechamento externo do térreo

a) Nível térreo aberto

b) Painéis começam a ser colocados no nível térreo

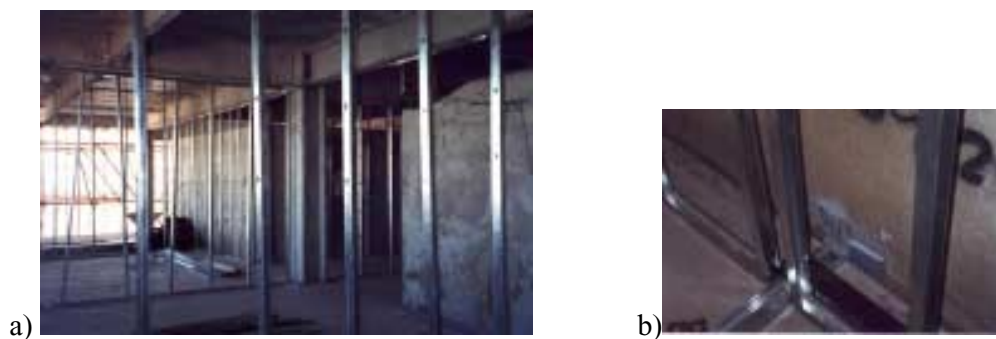


FIGURA 4.53 – Montagem dos perfis para divisórias de gesso

- a) Vista dos perfis de estruturação das divisórias de gesso
- b) Detalhe – colocação/perfis junto às vedações externas



FIGURA 4.54 – Fechamento divisórias internas com placas de gesso acartonado

As maiores dificuldades enfrentadas no processo de execução da obra foram de compatibilização de projetos e nível de detalhes necessário com rapidez muito grande. No que se refere aos painéis externos, houve um certo desperdício de tempo no início da sua colocação, pois a proteção passiva contra incêndio estava interferindo no espaço disponível para sua fixação (FIG.4.55). Houve, também, uma certa dificuldade no encaixe dos painéis no térreo, que eram os moldes menos repetitivos, entretanto o resultado foi satisfatório.



FIGURA 4.55 – Fixação painel externo/proteção passiva da estrutura metálica

- a) Vista interna do painel pré-moldado e seus apoios
- b) Detalhe – apoio gravitacional
- c) Detalhe – apoio de contraventamento

A adoção da visão sistêmica da obra e a utilização de estrutura metálica e vedações industrializadas, assim como todos os outros sistemas, permitiu uma redução considerável no prazo de execução da obra, uma diminuição brutal de desperdícios, uma otimização da utilização da mão de obra e das suas condições de segurança. A racionalização da obra e do projeto levou a um processo limpo (FIG.4.56) e a uma construção com sistemas de fácil manutenção (FIG.4.57). Além disso, obteve-se uma construção final com alto nível de acabamentos.



FIGURA 4.56 – Limpeza da obra



FIGURA 4.57 – “Shafts” previstos para manutenção

4.3.9. Edifício 09 (Shopping Center Frei Caneca)

O Frei Caneca Shopping & Convention Center é um edifício comercial, situado na região central de São Paulo, realizado em estrutura metálica não aparente (FIG.4.58). Esse edifício constitui-se por cinco sub-solos, dois térreos e sete pavimentos, todos em lajes de “*Steel Deck*”. Para as vedações externas foram utilizados painéis pré-moldados de concreto armado e nas vedações internas foram utilizadas divisórias de gesso acartonado e painéis de concreto celular autoclavado. Além disso, as instalações, esquadrias e acabamentos foram definidos na mesma linha do restante da obra.



FIGURA 4.58 – Edifício Frei Caneca & Convention Center

- a) Fachada prevista em projeto
- b) Vista do edifício em construção

Esse empreendimento foi realizado, em 2000/2001, por uma construtora de médio a grande porte, que mantém uma equipe de profissionais de engenharia responsáveis pela coordenação e programação do andamento da obra, integrando todos os sistemas constituintes do edifício e seus respectivos fabricantes e montadores. Cada sistema escolhido para compor a obra foi contratado e supervisionado pela empresa construtora, que dessa forma passa a ser uma coordenadora de serviços terceirizados de empresas qualificadas.

A edificação foi projetada desde sua concepção em estrutura metálica e demais componentes industrializados, o que exigiu um alto nível de detalhamento. Todas as empresas fornecedoras de sistemas participaram do processo de projeto, assim como, o arquiteto acompanhou a execução do edifício. A compatibilização de projetos e sistemas foi responsabilidade da construtora, que monitorou todas as etapas do processo adquirindo uma visão global de logística e andamento da obra.

O processo construtivo e os novos materiais foram definidos a partir de experiências anteriores da construtora e pesquisa de mercado. No caso específico desse edifício, que é um centro de compras e convenções, a redução do prazo de execução da obra foi o

motivo principal para a escolha dos sistemas industrializados associados à estrutura metálica, já que o edifício está incrustado na malha construída da cidade de São Paulo (FIG.4.59). Além disso, outros fatores foram a diminuição dos desperdícios, a otimização da mão de obra no canteiro, a limpeza da obra e a qualidade final do empreendimento.

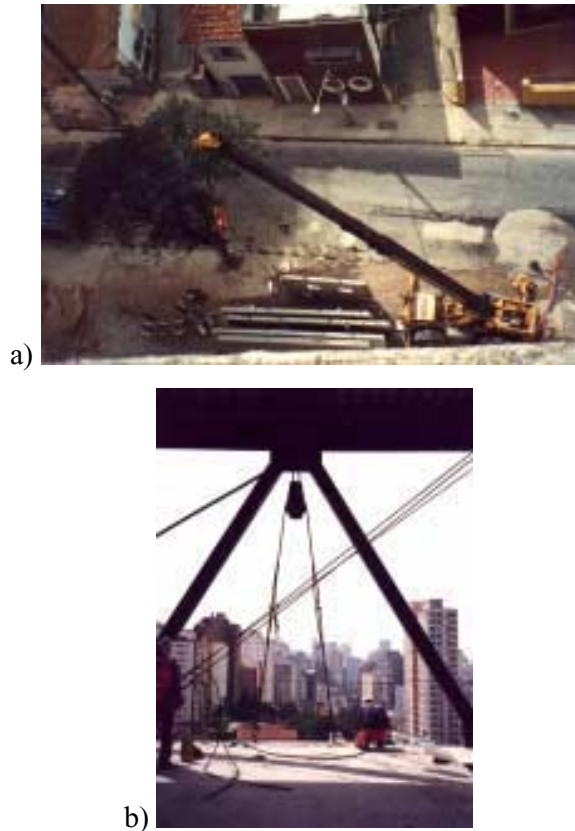


FIGURA 4.59 – Canteiro de obras incrustado na malha urbana ocupada

a) Içamento de painéis utilizando área de calçada pública

b) Vista do entorno da obra

A montagem da estrutura metálica, do “*Steel Deck*” e o começo da fixação dos painéis de fachada, se deu de maneira simultânea em alguns momentos da obra (FIG.4.60). Os painéis utilizados foram de concreto, nervurados e com alma em poliestireno. A montagem desses painéis começou nos andares inferiores e foi subindo nas fachadas, compostas por painéis horizontais e verticais. Os painéis horizontais foram fixados de pilar a pilar e conectados nos pisos, e sua carga descarregada em berços feitos sobre as

lajes (FIG.4.61). Já os verticais se apoiaram sobre os horizontais (FIG.4.62), que nesse caso funcionam como vigas de transmissão de carga. Após todos os painéis montados começou a etapa de rejunte desses, e para isso foi usado um “*tarusel*” e silicone (FIG.4.63). Simultaneamente às vedações externas, estavam sendo executadas as vedações internas em painéis de concreto celular autoclavado. Esse tipo de vedação foi utilizada em áreas específicas, como na caixa de circulação vertical (FIG.4.64). Depois das instalações preparadas e os perfis para as divisórias internas montados (FIG.4.65), foram colocadas as placas de gesso e então os acabamentos finalizados (FIG.4.66).

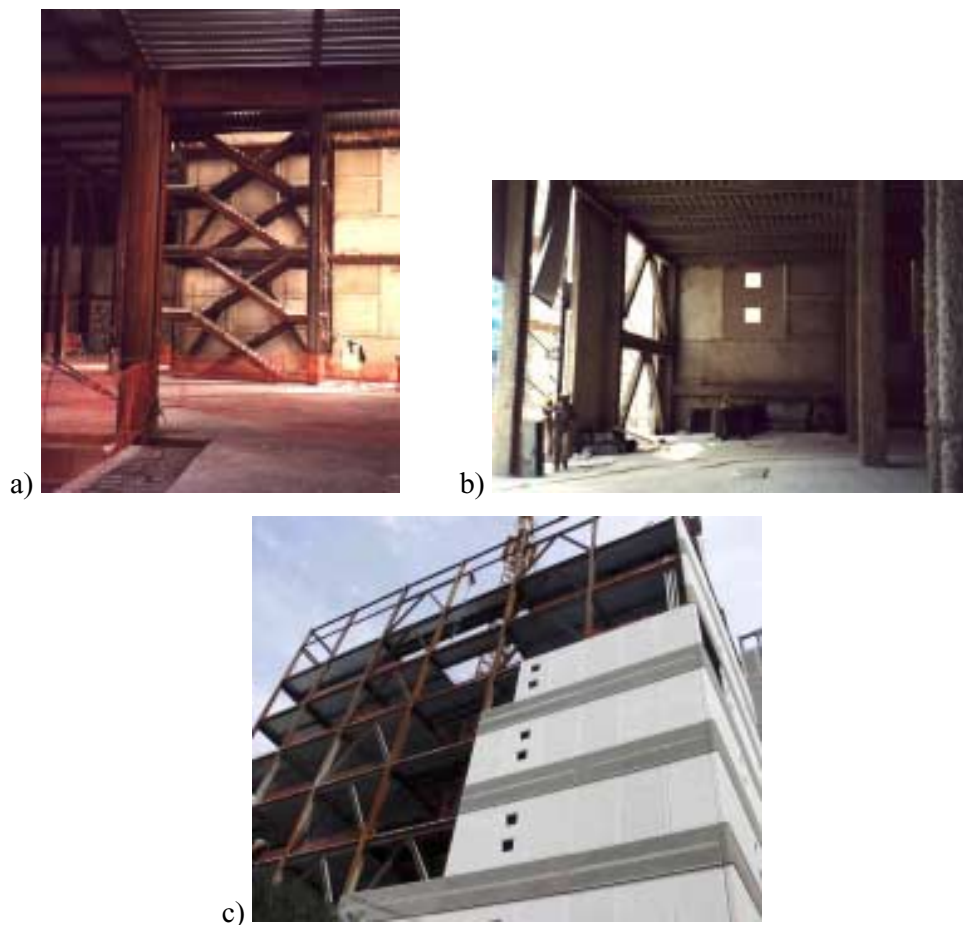


FIGURA 4.60 – Obra em execução

- a) Vedações em andamento e estrutura a ser protegida
- b) Vedações em andamento e estrutura protegida
- c) Vista geral externa

FONTE – foto cedida pelo arqtº. Luis Andrade, 2000

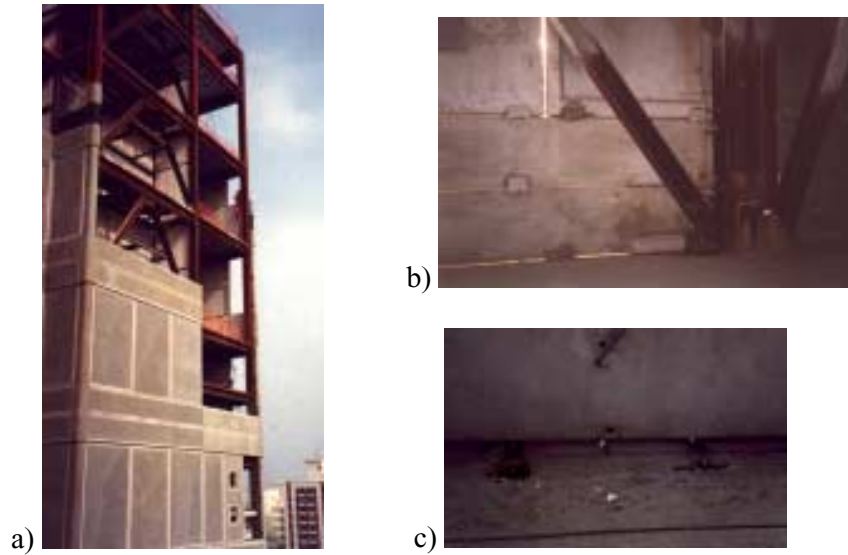


FIGURA 4.61 – Fixação painéis externos

- a) Vista externa painéis horizontais e verticais
- b) Vista interna painéis – berços no piso e fixação nos pilares
- c) Detalhe – fixação na laje



FIGURA 4.62 – Painéis verticais se apóiam nos horizontais

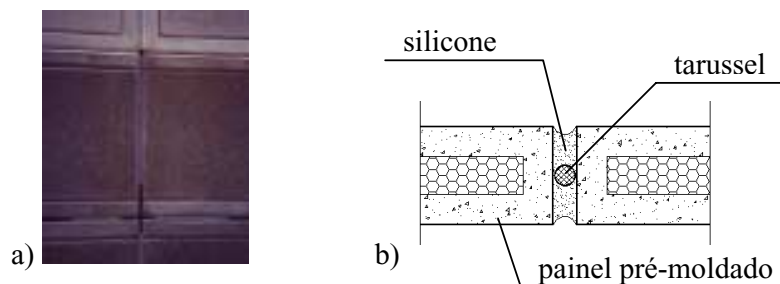


FIGURA 4.63 – Rejuntas dos painéis de fachada

- a) Vista dos rejuntas dos painéis
- b) Desenho esquemático do rejunte



FIGURA 4.64 – Vedação interna em painéis de concreto celular autoclavado

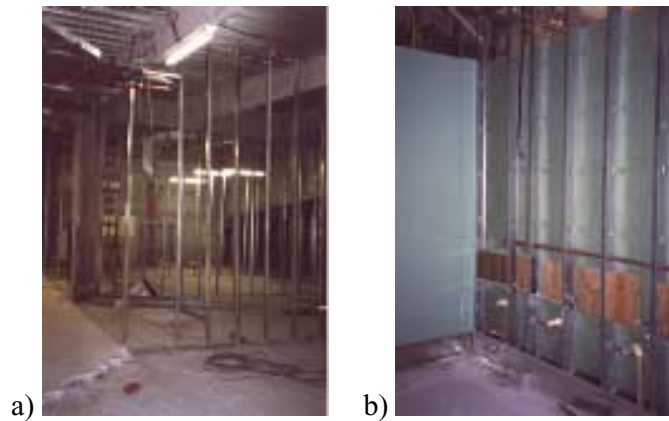


FIGURA 4.65 – Estrutura metálica para recebimento das placas de gesso

a) Estrutura divisórias de gesso acartonado – área seca

b) Estrutura divisórias de gesso acartonado – área molhada



FIGURA 4.66 – Vista geral da montagem de divisórias de gesso acartonado

As maiores dificuldades nessa obra foram enfrentadas devido às dificuldades oferecidas por sua localização, já que o terreno era totalmente confinado entre áreas construídas e estava em vias de tráfego significativo. No que se refere aos painéis de fachada, houve alguns imprevistos como o deslocamento de alguns painéis, cujas ligações com a estrutura foram reforçadas (FIG.4.67) e além disso, devido à programação das etapas de execução e à ocorrência de chuvas inesperadas, houve um escoamento de ferrugem na face de alguns painéis que ainda não estavam rejuntados (FIG.4.68). Entretanto, essas manchas foram retiradas, o que gerou um certo retrabalho.



FIGURA 4.67 – Reforço na ligação entre pilar e painel de fachada



FIGURA 4.68 – Manchas de ferrugem na fachada

FONTE – foto cedida pelo arqtº. Luis Andrade, 2000

O conceito da obra como um conjunto de sistemas industrializados integrados e a utilização da estrutura metálica, permitiu uma redução considerável no prazo de execução da obra, uma diminuição brutal de desperdícios, uma otimização da utilização da mão de obra e das suas condições de segurança, além de se obter uma construção final de alto nível de acabamentos e facilidade de manutenção.

4.4. Comparação dos resultados coletados na investigação

Nas tabelas 4.1(a, b, c, d, e) e 4.2(a, b, c, d, e), apresentam-se, de maneira esquemática, as informações coletadas a respeito dos processos de projeto e de execução, referentes às edificações descritas anteriormente. Dessa forma, é possível fazer uma análise comparativa dos perfis profissionais que se apresentam, no mercado nacional atual, e dos respectivos processos que se praticam na construção civil em aço.

TABELA 4.1(a) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto

	EDIFÍCIO 01	EDIFÍCIO 02
Caracterização - equipe de projeto arquitetônico	-equipe de trabalho pequena -atuação restrita ao desenvolvimento do projeto e aprovação na prefeitura -interesse por novas tecnologias condicionado pelo cliente	-equipe de trabalho pequena -atuação inclui acompanhamento da obra -interesse por novas tecnologias condicionado pelo cliente
Processo de projeto	-processo de projeto convencional (representação gráfica de acordo com regras de prefeitura) -estrutura e vedações definidas após finalização do projeto -não houve projeto de vedações -não foi feita compatibilização dos projetos e planejamento da obra	-processo de projeto convencional (representação gráfica de acordo com regras de prefeitura) -estrutura definida desde o início do projeto (vedações posteriormente) -não houve projeto específico de vedações -a compatibilização dos projetos foi feita pela construtora
Interação – projetista / execução obra	-atuação do projetista foi restrita ao desenvolvimento do projeto (não houve participação no processo de execução da obra)	-houve acompanhamento da obra/ interferência em pequenas questões -não houve participação no processo de compatibilização e planejamento da obra
Dificuldades – na introdução de inovações	-aceitação do cliente devido a custos normalmente elevados e aceitação do mercado pela confiabilidade em processos convencionais	-faltam informações de fornecedores para detalhamento minucioso -restrições devidas a custos

TABELA 4.1(b) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto

	EDIFÍCIO 03	EDIFÍCIO 04
Caracterização - equipe de projeto arquitetônico	-equipe de trabalho de médio porte -atuação atinge execução da obra -interesse por novas tecnologias condicionado pelo cliente	-equipe de trabalho de médio porte -atuação atinge execução da obra -interesse por novas tecnologias condicionado pelo cliente
Processo de projeto	-processo de projeto convencional (representação gráfica de acordo com regras de prefeitura) -estrutura e vedações definidas desde a concepção do projeto -projeto de vedações feito p/ fabricante -compatibilização básica dos projetos feita pela equipe de projeto arquitetônico	-processo de projeto convencional (representação gráfica de acordo com regras de prefeitura) -estrutura definida desde o início do projeto (vedações posteriormente) -não houve projeto de vedações -a compatibilização dos projetos foi feita pela construtora
Interação – projetista / execução obra	-houve acompanhamento da obra/ interferência em algumas questões -acompanhamento da obra condicionado pela necessidade de adaptações	-houve acompanhamento da obra/ interferência em algumas questões -acompanhamento da obra condicionado pela necessidade de adaptações
Dificuldades – na introdução de inovações	-restrições devidas a custos -compatibilização dos sistemas e sincronia de execução (houve, ainda, soluções improvisadas)	-compatibilização dos sistemas e sincronia de execução (houve, ainda, soluções improvisadas)

TABELA 4.1(c) – Caracterização dos projetistas e do processo de projeto

	EDIFÍCIO 05	EDIFÍCIO 06
Caracterização - equipe de projeto arquitetônico	-equipe de trabalho de porte -atuação inclui acompanhamento da obra e compatibilização de projetos -grande interesse p/ novas tecnologias mas sua utilização depende da disposição do cliente	-profissional autônomo que trabalha sozinho (residência de uso próprio) -atuação atinge a execução da obra -grande interesse p/ novas tecnologias
Processo de projeto	-processo de projeto adaptado aos novos sistemas (representação gráfica convencional) -estrutura e vedações definidas desde o início do projeto -houve projeto de vedações -compatibilização dos projetos foi feita pela equipe de projeto arquitetônico	-processo de projeto convencional (representação gráfica de acordo com regras de prefeitura) -estrutura e vedações definidas desde a concepção do projeto -projeto de vedações feito p/ arquiteto -compatibilização dos projetos insatisfatória (na execução)
Interação – projetista / execução obra	-houve acompanhamento da obra/ interferência em todas as questões -nível elevado de responsabilidades no processo executivo	-houve acompanhamento da obra/ interferência em todas as questões
Dificuldades – na introdução de inovações	-dificuldades geradas pela novidade dos sistemas -compatibilização dos sistemas e sincronia de execução (houve, ainda, soluções improvisadas) -junção dos painéis c/ estrutura e esquadrias	-faltam informações de fornecedores para detalhamento minucioso -compatibilização dos sistemas e sincronia de execução (houve, ainda, soluções improvisadas) -restrições devidas a custos

TABELA 4.1(d) - Caracterização dos projetistas e do processo de projeto

	EDIFÍCIO 07	EDIFÍCIO 08
Caracterização - equipe de projeto arquitetônico	-equipe de trabalho de médio porte -atuação atinge execução da obra -interesse por novas tecnologias condicionado pelo cliente	-equipe de trabalho de porte -atuação inclui acompanhamento da obra e compatibilização de projetos -grande interesse p/ novas tecnologias mas sua utilização depende da disposição do cliente
Processo de projeto	-processo de projeto adaptado aos novos sistemas (representação gráfica convencional) -estrutura e vedações definidas depois da proposta inicial de projeto – adaptação -houve projeto de vedações feito pelo fabricante e acompanhado pelo arquiteto -compatibilização dos projetos feita pela equipe de eng ^a . do grupo empreendedor	-processo de projeto adaptado aos novos sistemas (representação gráfica padrão p/ novo tipo de construção) -estrutura e vedações definidas desde o início do projeto -houve projeto de vedações -compatibilização dos projetos feita pela equipe de projetos (coordenada pela equipe de arquitetura)
Interação – projetista / execução obra	-houve acompanhamento da obra/ interferência em todas as questões -nível elevado de responsabilidades no processo executivo	-houve acompanhamento da obra/ interferência em todas as questões -nível elevado de responsabilidades no processo executivo
Dificuldades – na introdução de inovações	-dificuldades geradas pela novidade dos sistemas -compatibilização dos sistemas e sincronia de execução (houve, ainda, soluções improvisadas)	-necessidade de rapidez e exatidão na liberação de informações de projeto -linguagem gráfica adotada pelo fabricante e montador da estrutura metálica (adequação para a linguagem das equipes de desenvolvimento de projeto)

TABELA 4.1(e) - Caracterização dos projetistas e do processo de projeto

	EDIFÍCIO 09	OBSERVAÇÕES
Caracterização - equipe de projeto arquitetônico	-equipe de trabalho de porte -atuação inclui acompanhamento da obra -grande interesse p/ novas tecnologias mas sua utilização depende da disposição do cliente	<p>- profissionais da área de projeto estão se adaptando à nova filosofia sistêmica da construção, entretanto, esse processo de adaptação ainda está no seu início.</p> <p>-As maiores dificuldades de projeto estão no nível de informação e de detalhamento da ligação e compatibilização dos vários sistemas constituintes da obra.</p> <p>- O ponto chave do processo de projeto é a visão sistêmica do empreendimento construtivo como um todo e a obrigatoriedade do trabalho multidisciplinar.</p>
Processo de projeto	-processo de projeto adaptado aos novos sistemas (representação gráfica padrão p/ novo tipo de construção) -estrutura e vedações definidas desde o início do projeto -houve projeto de vedações -compatibilização dos projetos feita pela equipe de projetos (coordenada pela equipe de arquitetura)	
Interação – projetista / execução obra	-houve acompanhamento da obra/ interferência em todas as questões -nível elevado de responsabilidades no processo executivo	
Dificuldades – na introdução de inovações	-necessidade de rapidez e exatidão na liberação de informações de projeto	

TABELA 4.2(a) - Caracterização dos construtores e do processo executivo

	EDIFÍCIO 01	EDIFÍCIO 02
Ilustração		
Sistemas associados	- alvenaria externa em tijolo cerâmico furado, divisórias internas em gesso acartonado, piso em lajes pré-fabricadas de concreto	-alvenaria externa em blocos de concreto celular, divisórias internas em gesso acartonado, piso em Steel Deck
Caracterização construtores	-construtora de pequeno porte, onde um empreendedor administra o processo construtivo -processo predominantemente artesanal	-construtora de médio porte; tem uma equipe de profissionais envolvida c/ o processo construtivo -processo parcialmente artesanal
Mão de obra – treinamento	-parte do pessoal contratado (carteira assinada) -parte do serviço terceirizado -não há treinamento de pessoal -serviço terceirizado especializado	-praticamente todo serviço terceirizado -serviço praticamente todo terceirizado e especializado
Veículos – introdução novas técnicas	-feiras de materiais p/ construção civil -contatos com fabricantes	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras
Justificativa – inovações	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição de custos
Processo – introdução inovações	-introdução de novas tecnologias de maneira incompleta e aleatória	-não houve processo de adaptação da construtora p/ a introdução de novas tecnologias -obra encarada como um conjunto de serviços contratados
Problemas físico-construtivos	-trincas nas junções alvenaria/ estrutura -diferença de prumo na estrutura -acabamento das juntas painéis de laje -instalações embutidas no piso de difícil execução	-imperfeições nos acabamentos das juntas estrutura/divisória de gesso e alvenaria/divisórias de gesso -infiltrações danificaram placas de gesso acartonado
Dificuldades – introdução inovações	-compatibilização e sincronia de execução dos sistemas -mão de obra não qualificada -atrasos nos prazos das várias etapas de construção	-(organização da logística da obra) transporte e estocagem de materiais -tratamento das junções estrutura metálica c/ forro e alvenaria
Resultados	-prejuízo econômico -acabamento final satisfatório -desconfiança do usuário final em relação à eficiência acústica e de resistência física dos painéis internos	-limpeza e rapidez na obra -acabamento final satisfatório -usuário com ligeira desconfiança em relação aos novos sistemas usados

TABELA 4.2(b) - Caracterização dos construtores e do processo executivo

	EDIFÍCIO 03	EDIFÍCIO 04
Ilustração		
Sistemas associados	- fechamento externo em painéis de concreto com poliestireno, divisórias internas em gesso acartonado, piso em lajes pré-fabricadas de concreto	-alvenaria externa em blocos de concreto celular, divisórias internas em gesso acartonado, piso em Steel Deck
Caracterização construtores	-construtora de pequeno/médio porte onde um empreendedor administra o processo construtivo -processo industrializado	-construtora de pequeno/médio porte onde um empreendedor administra o processo construtivo -processo parcialmente industrializado
Mão de obra – treinamento	-todo serviço terceirizado -serviço terceirizado especializado	-praticamente todo serviço terceirizado -serviço praticamente todo terceirizado e especializado
Veículos – introdução novas técnicas	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras
Justificativa – inovações	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição de custos e desperdícios	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -modernização do sistema construtivo
Processo – introdução inovações	-não houve processo de adaptação da construtora p/ a introdução de novas tecnologias -obra encarada como um conjunto de serviços contratados	-não houve processo de adaptação da construtora p/ a introdução de novas tecnologias -obra encarada como um conjunto de serviços contratados
Problemas físico-construtivos	-dificuldade na instalação da divisórias internas devido a deformações dos perfis leves da estrutura -retrabalho na instalação dos painéis internos devido a falhas de projeto -qualidade do acabamento dos painéis de fachada	-trincas nas junções entre estrutura e sistema de vedações externo -infiltração vedação externa / esquadrias
Dificuldades – introdução inovações	-(logística da obra) dificuldades na montagem -atrasos devido a projetos específicos -sincronia na execução dos sistemas	-tratamento da associação da estrutura metálica c/ alvenaria e divisórias de gesso. -compatibilização e sincronia de execução dos sistemas componentes
Resultados	-limpeza da obra -acabamento final satisfatório	-limpeza e rapidez na obra -acabamento final satisfatório -custo um pouco mais elevado


TABELA 4.2(c) - Caracterização dos construtores e do processo executivo

	EDIFÍCIO 05	EDIFÍCIO 06
Ilustração		
Sistemas associados	- fechamento externo em painéis de concreto celular, divisórias internas em gesso acartonado, piso em lajes de concreto moldado “in loco”	- fechamento externo em placas cimentíceas, divisórias internas em gesso acartonado, piso em Steel Deck
Caracterização construtores	-construtora de médio porte – tem uma equipe de profissionais envolvida c/ o processo construtivo -processo parcialmente industrializado	-empreendedor particular administra o processo construtivo -processo parcialmente industrializado
Mão de obra – treinamento	-praticamente todo serviço terceirizado -serviço praticamente todo terceirizado e especializado	-todo serviço terceirizado -serviço terceirizado especializado
Veículos – introdução novas técnicas	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras	-feiras e eventos -mostras de arquitetura e decoração
Justificativa – inovações	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição de desperdícios	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -ganho de flexibilidade futura
Processo – introdução inovações	-não houve processo de adaptação da construtora p/ a introdução de novas tecnologias -obra encarada como um conjunto de sistemas acoplados	-não houve processo de adaptação da construtora p/ a introdução de novas tecnologias -obra encarada como um conjunto de serviços contratados
Problemas físico-construtivos	-dificuldade na instalação dos painéis de fachada devido a diferenças de prumo na estrutura metálica -infiltrações entre estrutura e vedação vertical	-bolhas nas junções dos painéis cimentícios -diferença de prumo na estrutura gerou adaptações do sistema de vedações
Dificuldades – introdução inovações	-carência de conhecimento técnico a respeito dos novos materiais e processos -exatidão na compatibilização dos projetos	-(logística da obra) dificuldades na montagem e compatibilização dos sistemas -atrasos na execução
Resultados	-limpeza obra / menos desperdícios -rapidez de execução -qualidade final	-limpeza da obra -conservação das condições do local -flexibilidade do espaço

TABELA 4.2(d) - Caracterização dos construtores e do processo de execução

	EDIFÍCIO 07	EDIFÍCIO 08
Ilustração		
Sistemas associados	- fechamento externo em painéis de concreto com poliestireno, divisórias internas em gesso acartonado, piso em lajes pré-fabricadas de concreto	-fechamento externo em painéis de concreto maciço, divisórias internas em gesso acartonado, piso em Steel Deck
Caracterização construtores	-grupo empreendedor de médio/grande porte – adotou postura sistêmica de administração -processo industrializado	-construtora de grande porte – adotou postura sistêmica de montagem e administração -processo industrializado
Mão de obra – treinamento	-todo serviço terceirizado -serviço terceirizado especializado	-todo serviço terceirizado -serviço terceirizado especializado -treinamento para pessoal da construtora
Veículos – introdução novas técnicas	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras e contatos com fabricantes	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras
Justificativa – inovações	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição de desperdícios	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição de desperdícios
Processo – introdução inovações	-obra encarada como um conjunto de sistemas acoplados e serviços especializados contratados	-houve processo de adaptação -obra encarada como um conjunto de sistemas acoplados
Problemas físico-construtivos	-dificuldade na fixação de alguns painéis de fachada devido a diferenças de prumo da estrutura metálica -flechas excessivas de laje em pontos específicos	-dificuldade na fixação de alguns painéis de fachada devido à espessura da proteção passiva contra incêndio da estrutura
Dificuldades – introdução inovações	-exatidão na compatibilização dos projetos -organização da logística da obra -novidades, no processo executivo e na associação, advindas dos novos sistemas	-exatidão na compatibilização dos projetos
Resultados	-limpeza obra / menos desperdícios -rapidez de execução -boa qualidade final de acabamento	-limpeza obra / menos desperdícios -rapidez de execução -boa qualidade final de acabamento

TABELA 4.2(e) - Caracterização dos construtores e do processo de execução

	EDIFÍCIO 09	OBSERVAÇÕES
Ilustração		
Sistemas associados	-fechamento externo em painéis de concreto maciço, divisórias internas em gesso acartonado, piso em Steel Deck	- A grande maioria dos problemas apresentados em obra é consequência de falhas de projeto ou de compatibilização.
Caracterização construtores	-construtora de grande porte – adotou postura sistêmica de montagem e administração -processo industrializado	- O sucesso de obras industrializadas em aço está diretamente ligado à utilização da visão sistêmica na administração e coordenação do processo construtivo, desde a concepção do empreendimento.
Mão de obra – treinamento	-todo serviço terceirizado -serviço terceirizado especializado -treinamento para pessoal da construtora	- O nível de qualificação dos operários da construção civil aumenta com a industrialização do processo.
Veículos – introdução novas técnicas	-congressos e palestras -visitas técnicas -feiras	- A quantidade de pessoal mobilizada no canteiro de obras cai em função do grau de industrialização do processo construtivo.
Justificativa – inovações	-diminuição no prazo de execução -redução da mão de obra contratada -diminuição custos e desperdícios	- O custo de obras industrializadas em aço deve ser avaliado segundo a relação custo/benefício.
Processo – introdução inovações	-houve processo de adaptação -obra encarada como um conjunto de sistemas acoplados	
Problemas físico-construtivos	-movimentação/ estrutura causou deslocamento de painel externo (ligações foram reforçadas) -manchas de ferrugem da estrutura nos painéis de fachada pela ação de chuvas	
Dificuldades – introdução inovações	-exatidão na compatibilização dos projetos	
Resultados	-limpeza obra / menos desperdícios -rapidez de execução -boa qualidade final de acabamento	

4.5. Análise dos processos construtivos

Na edificação 01, a associação da estrutura metálica a outros sistemas industrializados trouxe uma racionalização parcial e deficiente da obra, pois a introdução das novas tecnologias não se deu de maneira planejada e com uma visão sistêmica do processo global da construção. Resultados relativos a prazos e custos foram negativos, o que foi agravado por se tratar de um empreendimento residencial e que, por isso, apresenta menor liquidez no mercado. A grande quantidade de patologias detectadas durante o processo de execução da obra foi consequência da inexistência de projetos específicos para cada sistema e respectivas compatibilizações.

O edifício 02 representa uma tentativa inicial e parcial do uso de sistemas industrializados integrados, já que a vedação externa foi, ainda, um sistema que não acompanhou a velocidade da estrutura metálica e das vedações internas em painéis. Por se tratar de uma das primeiras experiências do tipo, realizada pela construtora, foram enfrentadas dificuldades diante da falta de domínio das possibilidades e limitações oferecidas pelos novos sistemas. Houve resultados positivos no que diz respeito a prazos, redução de mão de obra e limpeza do canteiro de obras. Entretanto, no que se refere a custos, o empreendimento ficou um pouco acima do que seria uma obra convencional. Em relação à qualidade final do produto, poucos problemas foram detectados, sendo estes sanados facilmente.

O conjunto de sistemas associados na edificação 03 foi inteiramente industrializado, desde a estrutura metálica, até as vedações. Entretanto, a rapidez de execução foi prejudicada por problemas de fornecedores e compatibilização de projetos. No que diz respeito a custos, por ser um empreendimento residencial popular e considerando que foi feita uma associação de construtores e fabricantes para viabilizar a experiência, ainda não se obteve viabilidade comercial, principalmente no que diz respeito ao tipo de painéis de piso utilizado. Os principais problemas construtivos detectados foram ocasionados pela falta de domínio técnico dos novos sistemas e por deficiências de projeto, que geraram retrabalhos e soluções paliativas em lugar de soluções otimizadas.

No edifício 04, o uso conjunto da estrutura metálica e de sistemas industrializados resultou em uma obra mais limpa e racional. Entretanto, devido a questões de disponibilidade financeira e de mercado, o prazo da obra se dilatou em relação ao previsto inicialmente. A logística da obra e a compatibilização dos vários projetos e sistemas foram encaradas de maneira não totalmente integrada, já que algumas decisões e adaptações foram improvisadas em obra. O principal problema apresentado pelo edifício foi a associação do sistema de vedação externa, em blocos de concreto celular, à estrutura metálica, o que gerou patologias na pós-ocupação do imóvel, como infiltrações nas fachadas e trincas na junção da alvenaria com as lajes de teto.

Na edificação 05, a obra se tornou mais racional no que diz respeito à combinação de sistemas e processos de execução. Entretanto, seu planejamento ainda foi tratado como experiência nova e sem sistemática pré-definida. A utilização da estrutura metálica, conjuntamente com outros sistemas industrializados, permitiu a finalização da obra, 6 meses antes do previsto, o que em um empreendimento comercial do porte, torna competitivo o novo sistema construtivo adotado. O custo final foi compensado pelo prazo de execução. Quanto às patologias e imprevistos construtivos, esses foram gerados pela deformabilidade da estrutura e pelas soluções adotadas para o sistema de vedações externas.

Na edificação 06, a associação da estrutura metálica e de sistemas industrializados de vedações trouxe uma racionalização parcial à obra, já que o planejamento desta não foi feito dentro de uma visão sistêmica global da construção. Com relação a custos e tempo de execução, esse é um caso muito particular, já que se trata de uma construção pequena e que não tem um grau de repetições como se pode verificar em edifícios de andares múltiplos. Tais características tornam mais delicada a tarefa de coordenar e sincronizar as etapas de execução de cada sistema, que no caso, são serviços menores e mais rápidos não sendo fácil mobilizar equipes de profissionais para sua realização. Os problemas físico-construtivos foram gerados por deficiências de compatibilização de sistemas e por falta de domínio de conhecimento técnico acerca dos novos materiais utilizados, o que permitiria a adoção de soluções mais eficazes em projeto.

No edifício 07, que foi uma ampliação, a utilização da estrutura metálica, juntamente com sistemas de vedação industrializado e outros, permitiu a otimização no uso do espaço e do tempo em obra. Atingiu-se um bom nível de racionalização do processo construtivo, através de uma mentalidade sistêmica e estratégica de projeto e de execução. A redução de tempo, mão de obra e desperdícios, compensou os custos extra advindos da adoção de novas tecnologias. Nesse caso, houve muitas mudanças durante a execução da obra, inclusive mudanças de programa no projeto, entretanto, a abordagem sistêmica de administração da obra fez com que as equipes de projeto chegassem às melhores soluções, elaboradas de maneira integrada. No que diz respeito a problemas construtivos, pode-se destacar dificuldades encontradas na fixação dos painéis externos de vedação, devido à deformabilidade da estrutura.

Na edificação 08, a adoção da visão sistêmica da obra e utilização da estrutura metálica e vedações industrializadas, assim como todos os outros sistemas, permitiu uma racionalização global do processo construtivo. Nesse caso, o planejamento do processo de projeto e do processo executivo segue sistemática adotada pela empresa construtora, já que esta adaptou sua filosofia de trabalho ao conceito de construção industrializada e sistêmica. Os problemas e imprevistos construtivos foram minimizados e conseguiu-se solucionar todas as questões, através de projetos prévios e do planejamento ao longo da obra.

Na edificação 09, a associação de sistemas industrializados de vedação com a estrutura em aço, possibilitou uma obra rápida e racional no que diz respeito ao processo de execução. Nessa obra, foi primordial o tempo de execução e a possibilidade de montagem, já que não havia espaço para um canteiro de obras comum. A construção foi encarada como um processo sistêmico e a construtora adaptou suas rotinas e profissionais ao novo tipo de filosofia construtiva. Em relação aos imprevistos e problemas de execução, esses foram minimizados e solucionados pelas equipes responsáveis por cada sistema, através de uma atuação multidisciplinar integrada de projeto e de execução.

4.6. Conclusões

Através das pesquisas realizadas, detectou-se que grande parte das patologias construtivas e problemas executivos são devidos à deficiência de projeto e de planejamento do processo de produção. Na construção metálica, a exatidão e a compatibilização perfeitas dos vários projetos são necessárias para se aproveitar as vantagens que o aço e a industrialização podem oferecer. Ou seja, se a estrutura pode oferecer rapidez, leveza e limpeza no canteiro de obras, os outros sistemas têm que estar afinados e sincronizados com o primeiro de maneira milimétrica.

O ponto crítico da associação entre estruturas metálicas e sistemas de vedação é justamente a ligação entre os dois sistemas. A fixação e as juntas são o ponto chave desse casamento, já que os dois sistemas devem trabalhar diferenciadamente, com liberdade para movimentação, e além disso as junções devem garantir isolamento térmico, acústico e estanqueidade. Dessa forma, as soluções de projeto para tais questões devem ser estudadas e executadas de modo a não gerarem patologias futuras nas construções. Deve-se ressaltar, ainda, a importância de estudos de pós-ocupação com o intuito de pesquisar e destacar claramente os problemas enfrentados por usuários ao longo do tempo de uso do edifício, o que aqui não foi alvo da pesquisa.

Além disso, para a execução dos sistemas industrializados nos canteiros, é necessário que se tenha mão de obra especializada e qualificada. O que ainda representa uma dificuldade para os empreendedores, já que as técnicas e materiais em questão são relativamente novos no mercado nacional, e as empresas que oferecem mão de obra, nem sempre têm qualificação adequada.

Outro ponto crítico observado foi a falta de conhecimento e domínio técnico acerca das potencialidades, limitações e condições de interação dos vários sistemas entre si e isoladamente. O mercado da construção civil ainda está carente de profissionais preparados para lidar, de forma sistemática e consciente, com as novas tecnologias introduzidas no mercado e principalmente com a filosofia sistêmica da construção. Tanto no processo de projeto, como no processo executivo, há a necessidade de se criar

e se implantar metodologias de trabalho que facilitem a utilização dos novos sistemas, além de otimizar o seu uso no processo construtivo.

A viabilidade das estruturas metálicas no mercado está diretamente ligada ao sucesso de sua associação com os sistemas de vedação e à filosofia adotada nos processos de projeto e de execução dos edifícios. É a partir do bom casamento dos dois sistemas, vedações e estrutura, que pode se chegar a uma concepção realmente industrializada e eficiente da obra, já que todas as outras etapas complementares de uma construção devem se basear e se adaptar à essas etapas. Os projetos, sua compatibilização, assim como o planejamento dos processos de concepção e de execução da obra, ganharam importância vital na nova filosofia construtiva que se delineia no cenário nacional. A visão sistêmica da construção exige uma abordagem multidisciplinar e integrada de todos os projetos e etapas constituintes. Dessa forma, a construção metálica e industrializada pode ser vista como uma promessa de solução racional e viável para as necessidades da construção no país, desde que profissionais e mercado se habilitem para a modernização necessária.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE ACÚSTICA

5.1. Conceitos básicos de acústica

5.1.1. Propriedades do som

O som é a sensação percebida pelo ouvido, resultado da variação de pressão causada por um meio em vibração, gerando ondas sonoras. Para que haja som e propagação sonora, é necessário que haja um meio de propagação, (as partículas do meio retornam a posição original após o distúrbio cessar) que pode ser sólido, líquido ou gasoso e que permita a vibração, que é o movimento em torno de uma configuração de equilíbrio. Se o meio for gás ou líquido, a vibração é transmitida como uma onda longitudinal, isto é, alternando compressão e rarefação das moléculas na direção de propagação da onda.

As principais características da onda sonora, segundo GERGES (1992), são:

- a) frequência (f): número de ciclos por segundo (Hz). A frequência é geralmente dada em bandas de oitava (o limite superior de cada intervalo de frequência é o dobro do anterior) .
- b) período (T): tempo consumido em um ciclo completo (s)
- c) comprimento de onda (λ): distância entre dois pontos sucessivos de pressão máxima ou mínima (m)
- d) velocidade de propagação (c): depende da massa e da elasticidade do meio. Para um modelo simplificado, no ar, pode-se considerar $c = 331 + 0,6T$ (m/s) - onde T é a temperatura
- e) amplitude: máximo deslocamento de um corpo em vibração. A amplitude de pressão acústica $P_{(t)}$ refere-se à magnitude da flutuação da pressão total $P_{t(t)}$ em comparação à pressão atmosférica estática, P_e , que é da ordem de 100 kN/m^2 ,

$$P_{(t)} = P_{t(t)} - P_e \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (5.1)$$

5.1.2. Faixas de resposta do ouvido humano

O ouvido humano responde a uma larga faixa de intensidade sonora. No limiar da dor, a intensidade é de 10^{14} vezes mais intensa que no limite da audição. Dessa forma, percebe-se a dificuldade da utilização de uma escala linear com números tão grandes. Em função disso, os parâmetros acústicos são expressos como uma razão logarítmica entre o valor medido e um valor de referência, razão logarítmica esta chamada de decibel (dB) (SILVA, 1993).

Com relação ao nível sonoro, os sons com um nível de pressão sonora (NPS) de 120 dB causam desconforto e em 140 dB podem ocasionar danos na audição, podendo este ser considerado o limite superior tolerável para o ouvido. Sons com um menor nível de pressão sonora, porém suportados por longos períodos durante muitos anos, podem levar à surdez permanente. O limiar da audição (limite inferior) varia consideravelmente com a frequência, mas a 1000 Hz é de 0 dB de NPS. Com relação à frequência, a resposta do ouvido humano é na faixa de 20 Hz a 20000 Hz, considerando-se tons puros e com respeito a pessoas jovens com boa capacidade auditiva (GERGES, 1992).

5.1.3. Frequência natural e ressonância acústica

A vibração ou oscilação é um fenômeno ligado a tudo o que existe no universo, sejam seres vivos ou não. E há algumas vibrações que podem ser percebidas pelo ouvido humano. Estas são as vibrações sonoras que estão na faixa do audível.

Um dos modelos mais simples de um sistema vibratório é o que consiste em uma massa, uma rigidez (mola) e o amortecimento, sendo este um sistema de um grau de liberdade, pois é necessário somente uma coordenada para descrever seu movimento. Através das equações de movimento, demonstra-se que a frequência natural desse sistema é dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)} \quad (5.2)$$

onde k é a rigidez da mola (N/m), m é a massa (kg), F é a força (N), c é o amortecimento (Ns/m)

A frequência natural é aquela em que para uma mesma amplitude da força de excitação, o sistema apresenta uma maior resposta (deslocamento), sendo esta frequência uma característica do sistema. Quando a frequência da excitação coincidir com a frequência natural do sistema, diz-se que o sistema está em ressonância.

5.2. Materiais e dispositivos de absorção acústica

Existem materiais absorventes (mecanismos resistivos) e dispositivos reativos (mecanismos reativos). Nos materiais absorventes, a energia acústica é transformada em calor, o que ocorre em materiais porosos ou fibrosos. Já nos dispositivos reativos, procura-se a excitação de ressonância, de modo a emitir-se uma onda defasada de 180° da incidente, tendo-se assim uma anulação de ambas as ondas acústicas (SILVA, 1993).

5.2.1. Caracterização de materiais absorventes

Os materiais de alta absorção acústica são normalmente porosos e/ou fibrosos. Nos materiais porosos, a onda acústica incidente passa pelos poros e dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica a qual é dissipada do material absorvente por convecção natural (FIG.5.1). Nos materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos interstícios das fibras, fazendo-as vibrar junto com o ar, dissipando a energia acústica por transformação em energia térmica pelo atrito entre as fibras vibrantes excitadas pelas ondas acústicas (FIG.5.2).



FIGURA 5.1 – Estrutura de um material poroso e seu mecanismo de dissipação de energia sonora

FONTE – SILVA, 1993

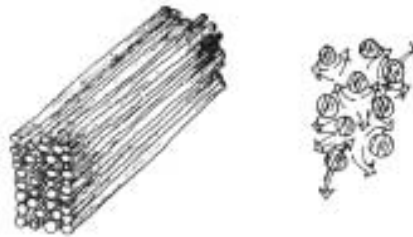


FIGURA 5.2 – Estrutura de um material fibroso e seu mecanismo de dissipação de energia sonora

FONTE – SILVA, 1993

O desempenho de um material de absorção acústica é determinado por um coeficiente de absorção acústica (α), definido pela razão entre a energia acústica absorvida (W_a) e a energia acústica incidente (W_i),

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (5.3)$$

O valor α sempre é positivo, variando de 0 a 1, dependendo principalmente da frequência, do ângulo de incidência do som, do tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), da densidade, da espessura e da estrutura interna do material.

Para se obter a máxima absorção de um material, é interessante se observar o seguinte procedimento prático: a espessura, L , do material deve ser escolhida em função da componente baixa de frequência, de modo a se cortar o primeiro meio comprimento de onda onde a velocidade da partícula é máxima. Assim,

$$L \geq \frac{c}{2f} \quad (5.4)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda sonora.

O coeficiente de absorção de materiais acusticamente absorventes, pode ser melhorado em função do método de instalação, obtendo-se máxima eficiência quando a distância L entre o material e a parede for igual a um múltiplo de um quarto do comprimento da onda acústica,

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \quad (5.5)$$

5.2.2. Caracterização de dispositivos de absorção reativos

Em frequências excepcionalmente baixas, o uso de materiais absorventes (porosos ou fibrosos) apresenta custos muito altos, além de ocupar grandes espaços, o que em diversos casos torna seu uso inexecutável. Para a solução do problema de frequências muito baixas são usados os dispositivos reativos, que se baseiam na ressonância de painéis ou cavidades de ar, os quais atuam como amortecedores das ondas sonoras. Tem-se como exemplos desse dispositivos: os absorvedores de painel vibrante, os ressonadores de Helmholtz, as placas perfuradas (GERGES, 1992).

5.3. Acústica ambiental – transmissão sonora

5.3.1. Considerações gerais

O efeito do ruído nas emoções humanas varia de insignificante, desde aborrecimento e raiva, a danoso psicologicamente. Do ponto de vista fisiológico, o ruído pode variar de inofensivo a doloroso e prejudicial fisicamente. O ruído pode, também, resultar em fatores econômicos de queda de desempenho no trabalho, alterando margens de lucro e

assim por diante (KINSLER et al., 1982). Percebe-se, então, a importância de se garantir uma boa qualidade acústica para os ambientes a serem habitados pelo homem.

Todo ambiente construído está sujeito a interferências acústicas devidas a ruídos gerados interna ou externamente. A primeira linha de defesa contra o ruído é o planejamento urbano. O zoneamento urbano deve encorajar a máxima separação possível entre áreas com ruído intensivo (comércio pesado, vias de tráfego intenso, aeroportos, etc.) e áreas sensíveis ao ruído (residências, hospitais, parques, etc.) (KINSLER et al., 1982). Outro aspecto importante, que deve ser levado em consideração, é a locação e orientação das edificações, assim como de seus compartimentos, segundo as condições acústicas oferecidas pelo entorno de implantação. Além dos cuidados com ruídos externos, é necessário reduzir as possibilidades de interferências geradas por ruídos internos à edificação. Para tal, os profissionais de projeto devem especificar equipamentos, que tenham baixo nível de ruído, e tipologias construtivas assim como materiais, que inibam a transmissão sonora através da estrutura e do ar.

Dado um ambiente acústico existente ou potencialmente adverso, é possível aliviar econômica e fisicamente o impacto do ruído, considerando-se a acústica desde o início do projeto. Dessa forma, fica evidente a importância dos procedimentos de avaliação e classificação de desempenho acústico para os vários materiais e suas possibilidades de montagem e utilização como barreiras acústicas.

5.3.2. Fontes sonoras

O som pode se propagar através de uma construção tanto por via aérea como através da estrutura da edificação. Portanto, as fontes sonoras podem ser classificadas em dois grupos. O primeiro consiste das fontes que geram som diretamente para o ar, como a voz, alto-falantes, etc. O isolamento contra este tipo de som é chamado de isolamento aéreo. O outro grupo consiste de fontes que agem diretamente na estrutura da edificação, usualmente decorrente de impactos ou vibrações de equipamento. A

transmissão sonora então se dará não só através da estrutura, como também proveniente desta.

5.3.3. Isolação sonora ou isolamento sonoro

Uma fonte sonora operando em um ambiente irá produzir ondas sonoras que irão propagar-se em todas as direções, talvez com intensidades diferentes. A energia sonora incidente na parede divisória dependerá da potência sonora da fonte e da absorção sonora total da sala. Esta energia sonora incidente será, em parte refletida, e em parte absorvida pela divisória, dependendo do coeficiente de absorção desta parede. Da energia absorvida pela divisória, parte será dissipada em calor, e o resto irá propagar-se através desta. O efeito total será que a parede como um todo entrará em vibração, causada pela flutuação de pressão das ondas sonoras incidentes. A parede vibrando irá agir do mesmo modo que um alto-falante, ou seja, irradiando energia acústica para a sala adjacente (FIG.5.3).

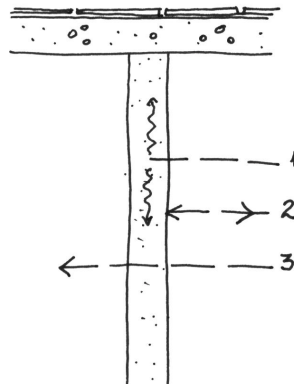


FIGURA 5.3 – Esquema de transmissão sonora através de parede simples

- 1) Parte da onda sonora se dissipa em energia térmica dentro da divisória
- 2) Parte da onda sonora é refletida para o meio da fonte
- 3) Parte da onda sonora é transmitida para o outro meio através da divisória

A quantidade da radiação sonora advinda da parede, e portanto, a capacidade de isolamento desta parede, dependerá da frequência do som, do sistema construtivo e do tipo de material que a compõe. Por intuição percebe-se que quanto mais massa possuir a divisória, mais dificuldade encontrará a onda sonora para fazê-la vibrar.

Nas diversas faixas de frequência existem parâmetros variáveis, que permitem determinar o nível de ruído transmitido. A característica de isolamento sonoro de uma divisória é normalmente expressa em termos da Perda de Transmissão (PT), (FIG. 5.4),

$$PT = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} = 10 \log \frac{W_i}{W_t} \text{ (dB)} \quad (5.6)$$

onde α_t é o coeficiente de transmissão acústica, α_t é a razão entre a energia transmitida e a energia incidente, W_i é a energia sonora incidente e W_t é a energia sonora transmitida.

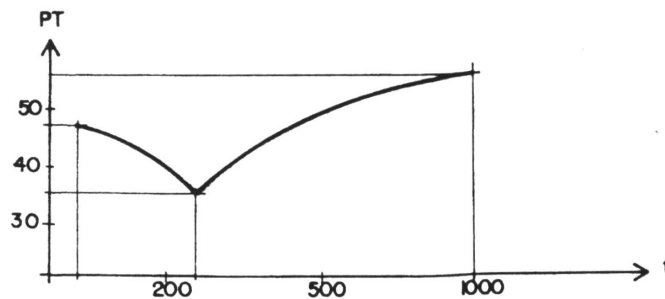


FIGURA 5.4. Perda de Transmissão para uma parede de concreto com 15 cm de espessura, em função da frequência

FONTE – GERGES, 1992

Quanto maiores os valores da perda de transmissão, mais baixa será a transmissão da energia acústica, e vice-versa. Segundo GOMEZ (1988), o isolamento acústico de paredes pode ser classificado, de acordo com os valores das respectivas perdas de transmissão, conforme indicado na tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Qualificação do isolamento acústico

Qualificação do isolamento	Perda de Transmissão (PT)	Condições de audição
pobre	< 30 dB	Compreende-se a conversação normal facilmente através da parede
regular	30 a 35 dB	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não se entende bem a conversação normal.
bom	35 a 40 dB	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não é facilmente inteligível.
muito bom	40 a 45 dB	A palavra normal é inaudível e em voz alta é muito atenuada, sem compreensão.
excelente	> 45 dB	Ouve-se muito fracamente os sons muito altos.

FONTE – GERGES, 1992

Uma outra forma de quantificar a redução sonora é através da diferença de nível de pressão acústica (D), que expressa a diferença de pressão antes e depois da colocação do dispositivo isolador. A diferença de nível D depende das características dos materiais, do local da medição dos níveis de pressão sonora, do volume do enclausuramento, dos orifícios existentes, da absorção acústica, etc,

$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad (5.7)$$

onde NPS_1 é o nível de pressão sonora antes da colocação do dispositivo isolador e NPS_2 é o nível de pressão sonora depois da colocação do dispositivo isolador.

5.3.4. Perda de transmissão em paredes simples

A importância relativa dos diferentes mecanismos de transmissão sonora através de um sólido varia através da faixa de frequência de áudio. Uma parede sólida possui as

qualidades de massa, rigidez e amortecimento, e portanto pode exibir ressonâncias e modos de vibração. Em baixas frequências, a transmissão depende basicamente da rigidez da parede, isto é, a massa e o amortecimento não são importantes. Em frequências um pouco mais altas, o comportamento da parede será de ressonância. Em uma frequência em torno do dobro da frequência de ressonância mais baixa, a parede se comporta como um conjunto de pequenas massas, e é dito que esta região de frequência é controlada pela massa. A perda de transmissão sonora cresce até uma certa frequência, chamada frequência crítica, onde ocorre uma queda significativa do valor da PT, o que corresponde ao efeito da coincidência (quando o comprimento da onda sonora incidente é igual ao comprimento da onda estrutural). Após a frequência crítica, a rigidez adquire nova importância e, depois, a PT volta a aumentar, sendo controlada novamente pela massa (FIG.5.5).

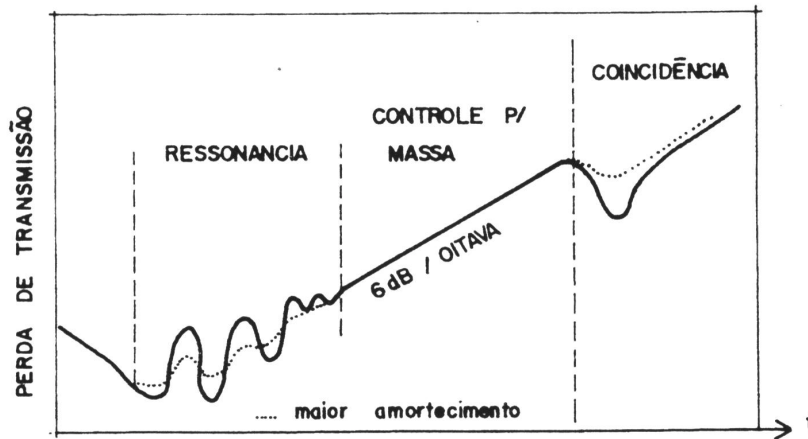


FIGURA 5.5 – Curva de perda de transmissão

FONTE – GERGES, 1992

5.3.4.1. PT controlada pela rigidez

Para frequências muito baixas, a perda de transmissão não segue a lei da massa, mas depende principalmente das características de rigidez da divisória. Se verifica que quanto mais rígido for o painel, pior será o seu isolamento acústico.

5.3.4.2. PT controlada pela ressonância

Para frequências um pouco acima das que determinam a região controlada pela rigidez, aparecem as primeiras frequências de ressonância do sistema. A divisória se comporta como uma membrana, apresentando uma série de frequências naturais de ressonância, nas quais ocorrem quedas na perda de transmissão (SANCHO & SENCHERMES, 1982).

As ressonâncias amplificam sensivelmente a emissão de ruído de uma placa, mas podem ser amortecidas. A colocação de uma camada fina de material de amortecimento poderá diminuir os picos de ressonância e, em consequência, diminuir sensivelmente o ruído (INGEMANSSON, 1996).

Os fenômenos de ressonância se produzem em frequências que dependem das dimensões da parede. Em geral, para paredes com superfícies maiores que 10 m², construídas com materiais usuais, as primeiras frequências de ressonância se encontram em zonas de muito baixa frequência e não influem no isolamento do conjunto.

5.3.4.3. PT controlada pela massa – Lei da massa

Para frequências superiores ao dobro da frequência da primeira ressonância, a perda de transmissão depende da massa e da frequência incidente. A partir do desenvolvimento de considerações sobre transferência de energia entre as ondas sonoras e as partículas da parede, chegou-se à chamada Lei da Massa, que quantifica a perda de transmissão em função da massa e da frequência. Segundo GERGES (1992), para uma transmissão aleatória, na prática, deve-se usar a perda de transmissão de campo, correspondente a incidências com ângulos até 78°, dada pela expressão:

$$PT = [20 \log(Mf)] - 47,4 \text{ (dB)} \quad (5.8)$$

onde M é a densidade superficial da parede (kg/m^2) e f é a frequência sonora incidente (Hz)

Na região controlada pela massa, a perda de transmissão cresce em uma razão de 6 dB para cada vez que dobra-se a frequência (6 dB por oitava), e em torno também de 6 dB quando dobra-se a densidade superficial do material. Assim, é possível afirmar que, para se garantir um bom isolamento ao ruído, é necessário usar componentes de alta densidade superficial. Além disso conclui-se que as altas frequências são mais fáceis de serem isoladas que as baixas frequências. Quanto maior a massa do fechamento e maior a frequência incidente, maior será a dificuldade para fazer o material vibrar, garantindo, assim, um isolamento mais eficiente.

A região controlada pela massa estende-se até uma frequência crítica, a partir da qual, segundo GERGES (1992), a perda de transmissão aumenta de 10 a 18dB por oitava de frequência (FIG.5.5).

5.3.4.4. Efeito de coincidência

No ar, o som propaga-se em ondas longitudinais com velocidade constante, de forma que é independente da frequência. Entretanto, em meios sólidos como paredes, o som pode propagar-se em ondas longitudinais, transversais ou de flexão. A mais importante, do ponto de vista da acústica de edificação, é a onda de flexão. Esse tipo de onda está associado a grandes deslocamentos transversais, o que significa que elas podem acoplar-se a ondas longitudinais da excitação sonora. As ondas de flexão não tem velocidade constante, mas sim variantes com a frequência, isto é quanto maior a frequência, maior a velocidade de propagação. Dessa forma, haverá uma frequência crítica, na qual a projeção do comprimento de onda do som incidente será igual ao comprimento de onda livre à flexão, ao longo da parede (FIG.5.6)

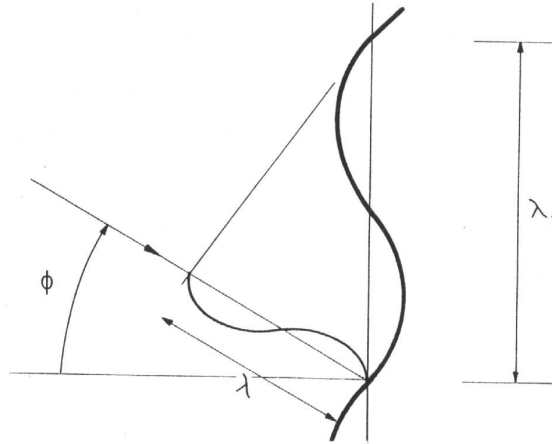


FIGURA 5.6 – Efeito de coincidência
 FONTE – GERGES, 1992

Quando ocorre o efeito de coincidência, este dá margem ao surgimento de um eficiente mecanismo de transferência de energia entre o ar, a superfície sólida e o ar do outro lado desta superfície. Assim, o efeito de isolamento da parede é reduzido, produzindo a queda na curva de PT. A condição para que a coincidência ocorra é que:

$$\text{sen } \phi = \frac{\lambda}{\lambda_f} \quad (5.9)$$

onde: λ é o comprimento da onda sonora incidente, λ_f é o comprimento da onda estrutural (FIG.5.6).

Se o comprimento da onda sonora no ar for maior que o comprimento da onda de flexão na parede, nenhuma coincidência ocorrerá, visto que o valor do seno não pode ser maior que um. A frequência crítica é definida como a menor frequência na qual ocorre a coincidência, isto é, a frequência na qual $\lambda = \lambda_f$ (GERGES, 1992),

$$f_c = \frac{c^2}{1.8hc_f} \quad e \quad c_f = \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (5.10)$$

onde c é a velocidade do som (m/s), h é a espessura da placa divisória (m), c_l é a velocidade da onda longitudinal de flexão (m/s), E é o módulo de Young (N/m^2) e ρ_s é a densidade da placa (kg/m^3).

A determinação da frequência crítica dos componentes é extremamente importante, pois é ela que gera a maior queda na perda de transmissão, criando uma grande imprecisão na previsão da isolamento sonora. Assim, em geral, procura-se adotar um componente que tenha uma frequência crítica muito elevada ou muito baixa, situada em uma zona pouco sensível ao ouvido humano, a fim de se garantir uma isolamento mais eficaz.

Na maioria das vezes, a coincidência ocorre numa faixa de frequência entre 1000 Hz e 4000 Hz, na qual estão incluídas importantes frequências da fala. Quando se for especificar a PT para uma parede divisória é necessário portanto, que se defina o isolamento para toda a faixa de frequência, isto é, a perda de transmissão por banda de frequência, pois um valor único representando a PT média não declara as deficiências provenientes das ressonâncias e da coincidência.

5.3.5. Perda de transmissão em paredes duplas

As paredes duplas, com um espaço intermediário preenchido por ar, podem produzir um isolamento sonoro maior que paredes simples, que seguem a lei da massa, para uma mesma espessura. Tal montagem é chamada de sanduíche (SILVA, 1997).

Segundo GERGES (1992), quando as duas paredes estão bem afastadas e isoladas uma da outra, a perda de transmissão é igual ou maior do que a soma aritmética das perdas de transmissão das duas paredes. A incorporação de um espaço de ar de 15 a 200 mm entre os painéis, fornece um aumento de aproximadamente 6 dB acima da soma aritmética das perdas de transmissão de cada uma das paredes.

De acordo com SANCHO & SANCHERMES (1982), o isolamento acústico total da parede dupla não é a soma dos isolamentos acústicos individuais, devido à complexidade das vias de transmissão da energia sonora entre os painéis. Somente no

caso limite, quando a cavidade de ar apresenta uma espessura suficientemente grande, e os dois painéis estão isolados entre si, atuando independentemente, é que o isolamento acústico da parede dupla é igual à soma aritmética das perdas de transmissão individuais. A eficiência da parede dupla depende da ligação entre os painéis; se esta união for muito rígida, o conjunto passa a funcionar como um único painel.

Para se descrever o mecanismo de transmissão sonora em paredes duplas, pode-se imaginar uma parede formada por dois painéis acoplados entre si, de maneira elástica, por meio de uma camada de ar (FIG.5.7). A energia acústica transmitida pela primeira parede incide sobre a segunda, que, por sua vez, transmite parte desta energia ao ar que a rodeia e reflete outra grande parte. Ocorre, dessa forma, uma sucessão de reflexões na camada de ar e, em cada uma dessas reflexões, parte da energia é dissipada (MENDEZ, 1991).

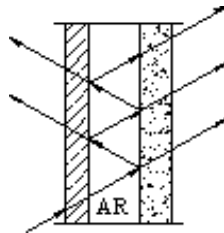


FIGURA 5.7 – Reflexão e transmissão sonora em uma parede dupla

Assim como para paredes simples, o isolamento de uma parede dupla varia em função da frequência e do ângulo de incidência do som. Teoricamente seria de se esperar um aumento de 12 dB por cada duplicação de frequência, porém, na prática, devido a problemas no contorno e pontes acústicas (caminhos alternativos de transmissão sonora) (FIG5.8), se obtém um aumento, na perda de transmissão sonora, compreendido entre 6 e 8 dB por oitava (MENDEZ et al., 1991).

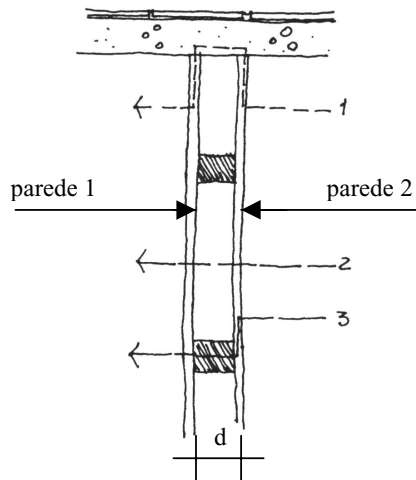


FIGURA 5.8 – Perda de transmissão sonora em paredes duplas

- 1) Transmissão pela conexão das extremidades
- 2) Transmissão através da cavidade
- 3) Transmissão através dos elementos de ligação

Em sistemas com paredes duplas e camada intermediária preenchida por ar, segundo GERGES (1992), a perda de transmissão pode ser determinada pela equação:

$$PT = PT_1 + PT_2 + 6,0 + 20 \log \left(\text{sen} \frac{2\pi f d}{c} \right) \text{ (dB)} \quad (5.11)$$

onde PT_1 e PT_2 são as perdas de transmissão das paredes simples 1 e 2, d é o espaçamento entre as paredes (m), f é a frequência (Hz) e c é a velocidade do som ($c = 343$ m/s no ar), (FIG.5.8).

Um esquema de variação da perda de transmissão de uma parede dupla, em função da frequência, é apresentado na FIGURA 5.9, onde se distinguem os fenômenos que predominam em cada região (SANCHO & SENCHERMES, 1982).

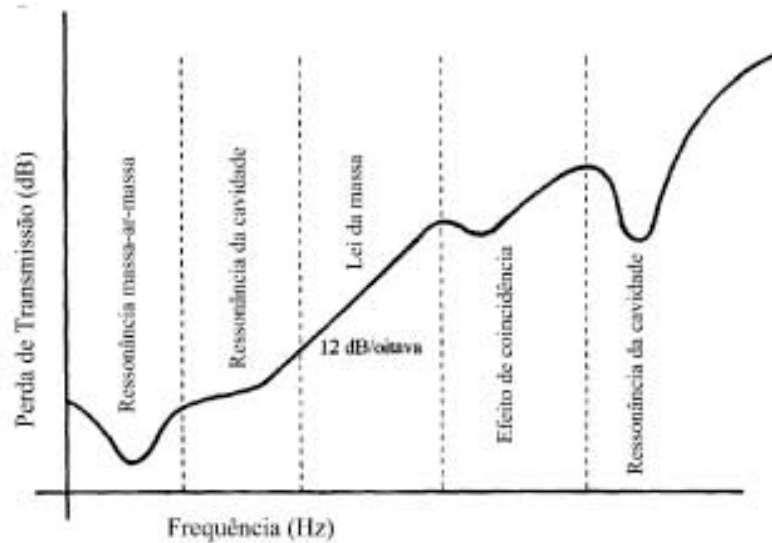


FIGURA 5.9 – Variação da PT em função da f para parede dupla
 FONTE – SANCHO & SENCHERMES, 1982

O primeiro fenômeno, identificado na figura 5.9, é o da ressonância massa-ar-massa, o qual ocorre em uma frequência em que as duas paredes formam um sistema mecânico ressonante com a rigidez do volume de ar, e o valor de PT cai (GERGES, 1992). O sistema funciona como um sistema massa-mola-massa e a ligação elástica entre os elementos de vedação possibilita a ressonância do sistema. A frequência de ressonância é dada por:

$$f_{mam} = 60 \times \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ (Hz)} \quad (5.12)$$

onde m_1 e m_2 são as densidades superficiais das paredes (kg/m^2), d é o espaçamento entre as paredes e f_{mam} é a frequência massa-ar-massa.

De acordo com a equação 5.12, a espessura da cavidade entre os painéis tem grande importância, e se os painéis forem pesados a frequência de ressonância será baixa. Se a frequência de incidência do som é inferior à frequência de ressonância, o ar (a mola) não tem nenhuma eficácia e a parede se comporta como uma parede simples de massa equivalente. Se a frequência do som incidente é superior à frequência de ressonância, a

parede dupla é eficaz, o ar (a mola) transmite mal o movimento de um painel para o outro, e o isolamento da parede dupla é superior ao de uma parede simples, de mesma massa (MENDEZ, 1991).

Outro fenômeno indicado na figura 5.9 é o das ressonâncias na cavidade. O termo contendo a função seno, na equação 5.11, pode apresentar valores nulos, significando fisicamente a possibilidade de ocorrência de ressonância acústica na cavidade de ar entre as paredes duplas, o que redundará em baixas perdas de transmissão. Neste caso PT tende a $-\infty$. Portanto, é recomendado o preenchimento deste espaço com material de absorção acústica para eliminar as ressonâncias da cavidade (GERGES, 1992). Segundo PUJOLLE (1978), esse efeito ocorre geralmente nas frequências agudas do espectro e está associado à relação entre a espessura da cavidade e o comprimento de onda do som incidente.

Outra região mostrada na figura 5.9 é a que indica o efeito de coincidência. Já que cada parede simples componente da parede dupla tem uma frequência crítica, o isolamento acústico do conjunto diminui em cada uma destas frequências. Se os dois elementos têm frequências críticas diferentes, a curva de isolamento apresenta duas falhas diferentes e, quando um dos elementos não isola, o outro proporciona isolamento. Se as duas paredes têm a mesma frequência crítica, se produz somente uma falha muito acentuada, limitando o isolamento pelas perdas internas das paredes e pela camada de ar intermediária (MENDEZ, 1991). Dessa forma, é recomendado usar paredes de diferentes espessuras e/ou materiais para evitar a coincidência das frequências críticas.

MENDEZ et. al. (1991) fazem algumas considerações acerca do comportamento de paredes duplas, cuja cavidade é preenchida por materiais absorventes:

a) O material absorvente modifica o acoplamento elástico entre os dois elementos, tornando-o mais rígido e, em consequência, elevando a frequência fundamental de ressonância da parede dupla.

b) O material absorvente dissipa uma parte da energia sonora, permitindo diminuir a queda de isolamento, nas frequências críticas, dos elementos que compõem a parede dupla.

c) O material absorvente dissipa parte da energia contida entre as paredes, diminuindo o efeito das frequências de ressonância da camada de ar.

No entanto, deve-se ter extremo cuidado com o uso dos diversos materiais nos painéis duplos, principalmente quanto aos isolantes. Se o isolante é relativamente rígido, poliestireno, por exemplo, a frequência de ressonância poderá estar mal situada, provocando uma queda no índice de isolamento global da partição. Ao contrário, se for muito flexível, lã mineral, por exemplo, o índice de isolamento poderá ser reforçado (SILVA, 2000).

5.3.6. Classes de transmissão sonora (CTS)

A sigla CTS (Classe de Transmissão Sonora) é usada no Brasil, em equivalência à STC (*Sound Transmission Class*), um classificador que é baseado na norma americana ASTM E 413. Esse tipo de classificador é utilizado para facilitar a comparação inicial do desempenho acústico de elementos, já que é um número único e não uma avaliação variável ao longo de um espectro de frequência. Deve-se ter em mente, que esse número único é uma simplificação do problema, pois o desempenho final relativo à perda de transmissão sonora depende de todo o espectro de frequência.

As classes de transmissão sonora, como o próprio nome indica, classificam, numa escala habitual de 10 a 60, a capacidade que as vedações possuem para reduzir níveis de ruído. Essa classificação se divide em CTSA (classe de transmissão sonora aérea), que diz respeito à capacidade das vedações verticais de reduzir sons, vozes e ruídos, em decibel, ou dB e a CTSI (classe de transmissão sonora de impacto), que diz respeito à capacidade das vedações horizontais para reduzir níveis de ruído de impacto, também em dB (BARING, 2000).

Para determinar a classe de transmissão sonora (CTS) de uma parede, sua perda de transmissão é medida em 16 compartimentos em bandas de 1/3 de oitava entre 125 e 4000 Hz, inclusive (FIG.5.10). Esses valores medidos de PT são então comparados com uma família de curvas de referência, cada uma das quais consiste de três linhas rígidas: um segmento de baixa freqüência que aumenta em 15 dB de 125 para 400 Hz, um segmento mediano que aumenta em 5dB de 400 para 1250 Hz, e um segmento horizontal de altas freqüências (FIG.5.10).

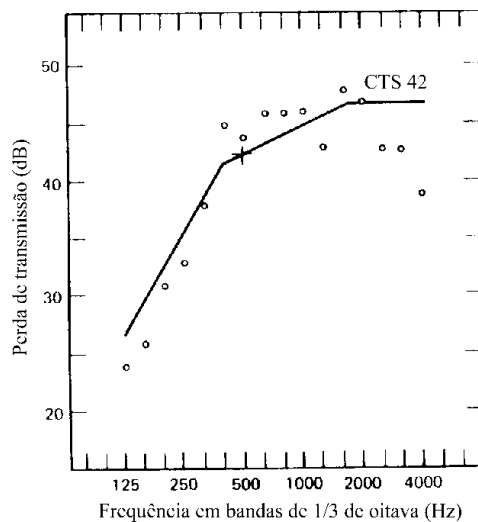


FIGURA 5.10 – Determinação da CTS para medições de PT.

FONTE – KINSLER et al, 1982

Para determinar a CTS de uma parede, a curva de referência é escolhida quando a máxima deficiência (desvio de dados abaixo da curva) em qualquer freqüência não excede 8 dB e a deficiência total de todas as freqüências não excede 32 dB. A CTS da parede é então o valor da PT correspondente à interseção da curva de referência escolhida com a ordenada 500 Hz (KINSLER, 1982). A classe da parede representada na figura 5.10 é CTS = 42. (A PT em 4 kHz é 8 dB abaixo da curva de CTS, e a deficiência total é 30 dB)

A construção de paredes e tetos/pisos, assim como a instalação de portas e janelas podem ser avaliadas em laboratório, e seus valores de perda de transmissão (PT) e

classe de transmissão sonora (CTS) tabelados para uso de arquitetos. Sabendo da importância do problema, os arquitetos podem escolher o tipo de construção que irá atender à isolamento requerida. A tabela 5.2 mostra alguns valores de CTS para elementos construtivos representativos. Compilações mais extensas podem ser encontradas na literatura. (DOELLE, 1972).

A CTS de estruturas compostas, por exemplo, paredes com portas e janelas, pode ser encontrada pelas perdas de transmissão dos componentes individuais, através de formulações envolvendo: S_i que é a área do componente individual com perda de transmissão PT_i , α_{Ti} que é seu coeficiente de transmissão, S que é a área da parede inteira e α_{Tc} que é o coeficiente de transmissão do conjunto.

$$\alpha_{Ti} = \text{anti log} \left(\frac{-PT_i}{20} \right) \quad (5.13)$$

$$\alpha_{Tc} = \frac{1}{S} \sum \alpha_{Ti} S_i \quad (5.14)$$

A partir dessas fórmulas, a perda de transmissão para a estrutura composta é dada por:

$$PT = 20 \log \frac{1}{\alpha_{Tc}} \quad (5.15)$$

Assim, a classe de transmissão sonora (CTS) para a estrutura composta pode, então, ser calculada pelo processo usual.

Classes de transmissão sonora medidas em campo são geralmente menores que essas obtidas em laboratório. Isso pode ser atribuído, normalmente, aos caminhos alternativos de transmissão (pontes acústicas) ou ao deficiente acabamento de execução (juntas calafetadas impropriamente, pontes entre elementos supostamente isolados). Mesmo com divisórias construídas de maneira correta, uma diferença de 5 dB na CTS pode ser esperada entre medições de campo e de laboratório (KINSLER, 1982).

TABELA 5.2 – Classe de transmissão sonora para elementos construtivos

Tipo de construção	M (kg/m²)	CTS
1. 4in bloco vazado, argamassa dos dois lados	115	40
2. 4in tijolo, 1/2in argamassa dos dois lados	210	40
3. 9in tijolo, 1/2in argamassa dos dois lados	490	52
4. 24in pedra, 1/2in argamassa dos dois lados	1370	56
5. 3/8in parede de gesso	8	26
6. 1/2in parede de gesso	10	28
7. 5/8in parede de gesso	13	29
8. duas placas de gesso juntas de 1/2in	22	31
9. 2x4 “studs on 16in centers”, placas de gesso 1/2in em ambos os lados	21	33
10. o mesmo que 9, mas com 5/8in de gesso dos dois lados	26	34
11. o mesmo que 10, mas com duas folhas de 5/8in de gesso em um lado e uma folha no outro	42	36
12. o mesmo que 10, mas com 1/2 in de argamassa sobre a parede	68	46
13. o mesmo que 9, mas com uma manta de isolamento de 2in	23	36
14. o mesmo que 10, mas com uma manta de isolamento de 2in	29	38
15. o mesmo que 11, mas com uma manta de isolamento de 2in	44	39
16. o mesmo que 14, mas com montagem elástica em um dos lados	29	47
17. o mesmo que 14, mas com montagem elástica em ambos os lados	29	49
18. Fila dupla de “studs on 16in centers”, placas de gesso de 5/8in em ambos os lados, e manta de isolamento	37	57
19. Fila dupla de “studs on 16in centers”, duas placas de gesso 5/8in em ambos os lados e sem manta de isolamento	60	58
20. o mesmo que 19, mas com manta de isolamento de 2in	60	62

(1 a 15 são divisórias simples e 16 a 20 são divisórias duplas – 1in = 2,54 cm)

FONTE – KINSLER et al., 1982

Como pode ser visto na figura 5.11, as classes de transmissão sonora para paredes divisórias simples são invariavelmente abaixo daquelas previstas pela lei da massa. Parte disso é causado por porosidade do material, como comprovado pela melhoria apresentada quando os blocos de concreto são emassados, mas o restante é relacionado à rigidez do painel, que é negligenciada em favor da lei da massa.

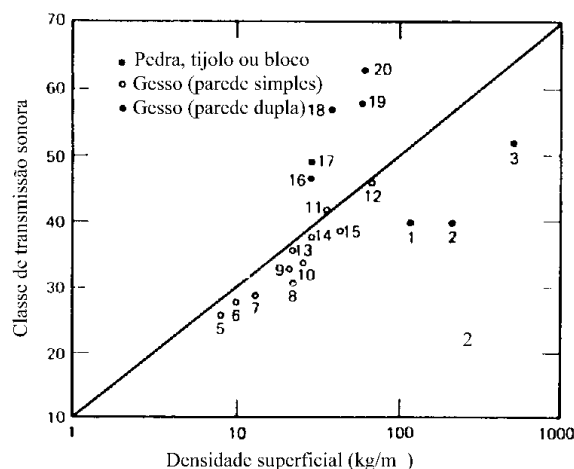


FIGURA 5.11 – CTS para divisórias e suas comparações com a lei da massa.

FONTE – KINSLER et al, 1982

Os números demonstram as construções da tabela 5.2. As paredes divisórias simples são representadas pelos números de 1 a 15, enquanto que os números de 16 a 20 demonstram divisórias duplas. Para obter uma CTS próxima daquela prevista pela lei da massa, uma parede tem que ser projetada de modo que a frequência de coincidência ocorra em frequências ou abaixo de 125 Hz, requerendo uma parede grossa com baixa densidade e alto módulo de Young, ou acima de 4000 Hz, requerendo uma parede fina, com alta densidade e baixo módulo de Young. Exemplos de efeitos de coincidência em paredes de diferentes construções são mostrados na figura 5.12.

Como visto na figura 5.12, a CTS para uma divisória dupla é consideravelmente mais alta que para uma divisória simples com a mesma densidade de massa. Esse efeito é claramente ilustrado na figura 5.13 onde a curva de perda de transmissão, para duas placas de gesso de 1,3 cm unidas como uma única folha, é comparada com aquela obtida para a mesma placa usada em uma parede dupla. Nota-se, também, a melhoria de desempenho quando um material absorvedor é colocado no espaço entre as duas placas.

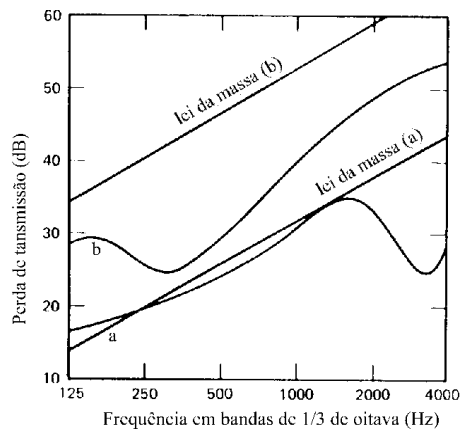


FIGURA 5.12 – Efeitos das propriedades de uma parede na frequência de coincidência.

- a) Parede de gesso com 1/2 “ - frequência crítica = 2,6 kHz, CTS = 28.
- b) Concreto leve expandido (110 kg/m²). Frequência crítica = 200 Hz, CTS = 35.

FONTE – KINSLER et al, 1982

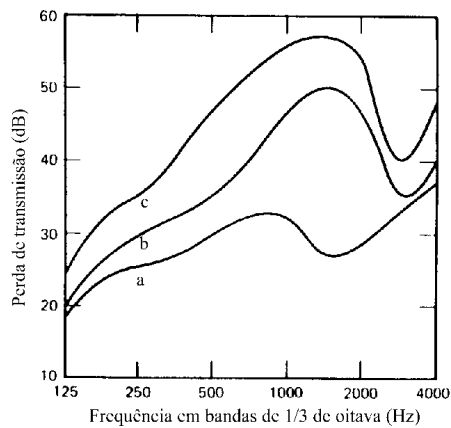


FIGURA 5.13 – PT de divisórias simples e duplas construídas c/ materiais similares.

- a) duas placas de gesso de 1/2" unidas (22 kg/m²). CTS = 31.
- b) placas de gesso de 1/2" de ambos os lados com estrutura de aço de 4" (21 kg/m²)
- c) o mesmo que (b) mas com uma manta de isolamento acústico de 2"

FONTE – KINSLER et al, 1982

Portas e janelas são elementos fracos acusticamente na composição de uma parede divisória, por causa de sua baixa densidade superficial e de frestas ao redor de seus contornos. A figura 5.14 ilustra as vantagens de portas maciças sobre portas ocas e o valor de uma vedação acústica que inclui um mecanismo automático de vedação das frestas na parte de baixo das portas. Para janelas, a figura 5.15 ilustra as vantagens do uso de vidros duplos com bordas bem seladas e um mínimo de separação de 10 a 13 cm.

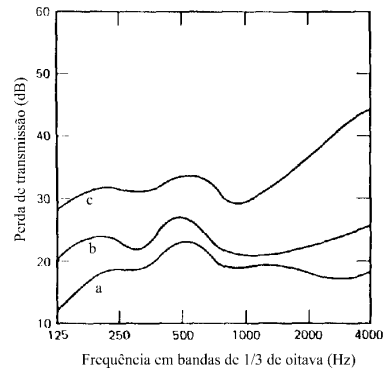


FIGURA 5.14 – PT de divisórias com portas de 1 3/4 “

- a) Porta oca, sem junta de vedação (7 kg/m^2), CTS = 17.
- b) Porta oca, com junta de vedação (7 kg/m^2), CTS = 24
- c) Porta maciça, com junta de vedação (20 kg/m^2), CTS = 26

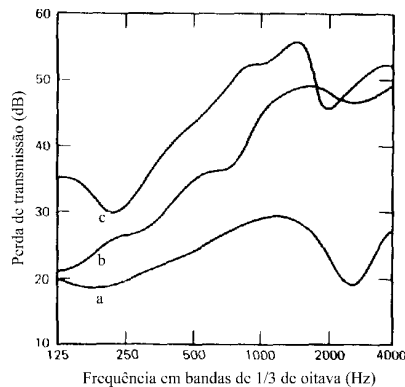


FIGURA 5.15 – PT de divisórias com diferentes janelas, bordas vedadas.

- a) Pano único janela, vidro 3mm ($7,5 \text{ kg/m}^2$), CTS = 25
- b) Pano duplo janela, vidro 3mm e espaço de ar de 10cm (15 kg/m^2), CTS = 36
- c) Pano duplo janela, vidro 3mm e espaço de ar de 20cm (13 kg/m^2), CTS = 40

FONTE – KINSLER et al, 1980

Para ilustrar efeitos nos valores da CTS de várias mudanças de projeto, a tabela 5.3 esboça uma seqüência de divisórias de construções similares, com placas de gesso de 4/8”, que têm montagem e fixação diferenciadas, com ou sem manta de isolamento acústica. Nota-se que quando a montagem não é elástica, a adição de material amortecedor acrescenta apenas 4 dB ao valor da CTS, mas com montagem elástica, uma manta acrescenta 10 dB. Também nota-se que com ou sem uma manta, a segunda montagem elástica acrescenta apenas 1 ou 2 dB.

TABELA 5.3 – Classe de Transmissão Sonora (CTS) - divisórias com placas de gesso.

Manta de isolamento	Montagem elástica	CTS
não	Não elástica	34
sim	Não elástica	38
não	Um dos lados – montagem elástica	38
não	Dois lados – montagem elástica	39
sim	Um dos lados – montagem elástica	47
sim	Dois lados – montagem elástica	49

FONTE – KINSLER et al., 1982

5.3.7. Isolação sonora recomendada

A quantia de isolamento acústica recomendada entre dois ambientes depende do nível de ruído no ambiente da fonte transmissora e do nível de ruído aceitável no ambiente receptor. Ambos esses níveis dependem do uso a que se destinam os ambientes e posteriormente dependem do ruído ambiente que tenderá a mascarar o ruído intrusivo.

A literatura pesquisada (KINSLER, 1982) considera a diferença do ruído de fundo, definindo três graus de edificações.

Grau 1 – Edificação com níveis de ruído noturno externo mais baixos que 40 dBA e níveis de ruído interno recomendados abaixo de 35 dBA.

Grau 2 – Edificação com níveis de ruído interno de 40 dBA ou mais baixos.

Grau 3 – Edificação com níveis de ruído noturno externo de 55 dBA ou mais altos e níveis de ruído interno de 45 dBA ou mais altos.

Para paredes divisórias de diferentes apartamentos, recomenda-se uma CTS de 55, 52, e 48 para edificações de grau 1, 2 e 3, respectivamente. Para paredes divisórias de cômodos da mesma habitação, eles recomendam para uma edificação de grau 1 o seguinte: quarto para quarto CTS = 48; sala de estar para quarto CTS = 50; banheiro para quarto, cozinha para quarto, e banheiro para sala de estar CTS = 52. As recomendações para grau 2 são 4 dB mais baixas e aquelas para grau 3 são outros 4 dB mais baixas (KINSLER, 1982).

Para paredes divisórias entre cômodos de apartamentos e espaços de serviço geralmente compartilhados (garagens, lavanderias, salões de festas, etc.), os seguintes requisitos mínimos têm sido sugeridos: quarto CTS = 70, sala de estar CTS = 65, cozinha e banheiro CTS = 60. Existem, também, recomendações para classes de isolamento de impacto, para pisos que separam habitações (KINSLER, 1982).

Segundo GERGES (1992), pode-se enumerar, em uma tabela, os valores recomendados para classes de transmissão sonora de paredes (TAB.5.4)

TABELA 5.4 – CTS para paredes X condições de privacidade

CTS	Condições de privacidade
52	Conversa�o em voz alta inaud�vel
47	Conversa�o em voz alta fracamente aud�vel
45	Conversa�o em voz alta com muita aten�o para escutar e entender
43	Conversa�o em voz alta aud�vel com murm�rio
35	Conversa�o em voz alta aud�vel e n�o intelig�vel
30	Conversa�o em voz alta e razoavelmente entendida
25	Conversa�o normal e facilmente entendida

FONTE – GERGES, 1992

5.3.8. Índice de redução acústica R_w

Atualmente, o classificador CTS (Classe de Transmissão Sonora) vem sendo substituído por R_w (Índice de redução acústica), que é baseado na norma internacional ISO 717 (1996). Esse método consiste em comparar os níveis de isolamento sonora oferecidos por um elemento, medidos em bandas de 1/3 de oitavas, com uma curva de referência (FIG.5.16).

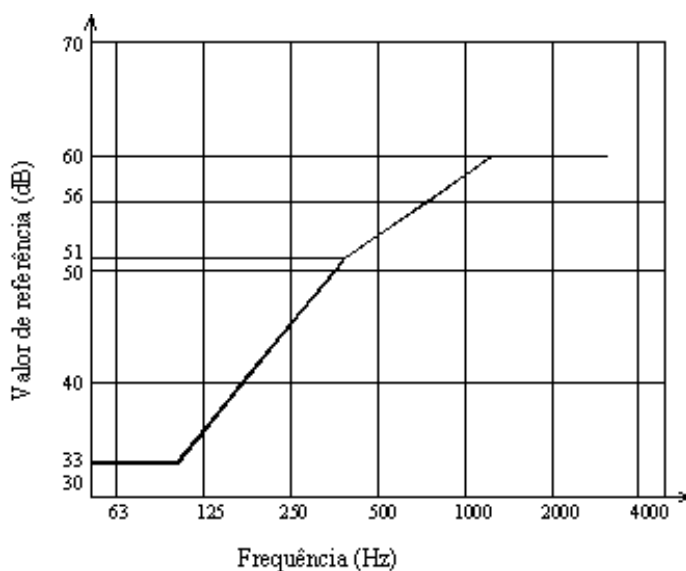


FIGURA 5.16 – Curva de referência da perda de transmissão

FONTE – ISO 717, 1996

Os valores medidos obtidos de acordo com a norma ISO 140-3 (1978) são comparados com os valores de referência tabelados, conforme tabela 5.4, nas frequências de medição, no intervalo de 100 a 3150 Hz para as bandas de 1/3 de oitava. Para se realizar tal comparação, deve-se plotar a curva de referência, variando de 1 em 1 dB em direção à curva medida, até que a soma dos desvios desfavoráveis seja a maior possível, mas não excedendo a 32 dB, para bandas de 1/3 de oitava. O desvio desfavorável em uma dada frequência ocorre quando o resultado da medição é menor que o valor de referência. Somente estes desvios desfavoráveis devem ser levados em conta. O número único para o índice de redução sonora é o valor, em decibéis, da curva de referência à 500 Hz, após a plotagem ser realizada.

TABELA 5.4 – Valores de referência

Frequência (Hz)	Valores de Referência (dB)	
	Bandas de 1/3 de oitava	Bandas de oitava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	56
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

5.4. Análise de desempenho acústico de vedações verticais

5.4.1. Considerações gerais

O desempenho acústico de um ambiente depende da combinação de vários fatores e tomadas de decisão em projeto. Entre esses determinantes estão o posicionamento do edifício e suas dependências, a escolha e execução de paredes, pisos, tetos e esquadrias e até a especificação de equipamentos e instalações, que são possíveis geradores de ruído. Todos os componentes são parte de uma engrenagem que funciona como um todo, não sendo possível determinar qual tem maior importância, já que cada situação representa um caso particular. Entretanto, pode se destacar a importância da especificação das vedações verticais, cuja constituição e montagem determinam, em grande parte, os níveis de desempenho acústico no ambiente construído.

É possível se determinar a capacidade de isolamento acústica de vedações verticais, de maneira isolada, através da aplicação de formulações simples, de simulações numéricas ou da coleta de dados experimentais. Tais resultados são determinados, geralmente, na faixa de frequência de 125 a 4000 Hz, já que dependendo de o som ser grave (125 a 200 Hz), médio (250 a 1600 Hz) ou agudo (2000 a 4000 Hz), as reduções sonoras serão diferentes.

A utilização de fórmulas simplificadas, como a lei da massa, para se ter uma estimativa do desempenho acústico de elementos de vedação, pode auxiliar na especificação mais acertada do material e do tipo de execução para cada caso. Tem-se, ainda, como respaldo para tais análises, a literatura e trabalhos experimentais e de simulação para comparação e confirmação de resultados.

5.4.2. Avaliação da perda de transmissão sonora para painéis industrializados

A partir da escolha e levantamento das características de 05 tipos de painéis de vedação, e algumas variações de montagem destes, elaboraram-se tabelas e gráficos comparativos, com os valores da perda de transmissão sonora (PT) em função da frequência de incidência (f). Esses cálculos foram feitos no espectro de frequência de 125 a 4000 Hz, faixa que engloba sons graves, médios e agudos.

Os cálculos realizados se basearam em formulações simples. Para os resultados de perda de transmissão (PT) e frequência crítica (f_c) em paredes simples, utilizaram-se as equações propostas por GERGES (1992):

$$PT = 20 \log(Mf) - 47,4 \text{ (dB)} \quad (5.8)$$

$$f_c = \frac{c^2}{1,8hc_l} \text{ , } \text{ sendo } c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (5.10)$$

onde PT é a perda de transmissão (dB), M é a densidade superficial (kg/m^2), f é a frequência (Hz), f_c é a frequência crítica, c é a velocidade do som no ar ($c = 343 \text{ m/s}$), h é a espessura da placa divisória (m) e c_l é a velocidade da onda longitudinal de flexão no sólido (m/s), E é o módulo de Young (N/m^2) e ρ_s é a densidade da placa (kg/m^3).

Já para a avaliação da capacidade de isolamento de paredes duplas, usou-se outra formulação, também indicada por GERGES (1992):

$$PT = PT_1 + PT_2 + 6,0 + 20 \log \left(\sin \frac{2\pi f d}{c} \right) \text{ (dB)} \quad (5.11)$$

onde PT_1 e PT_2 são as perdas de transmissão das paredes simples 1 e 2, d é o espaçamento entre as paredes (m), f é a frequência (Hz) e c é a velocidade do som no meio intermediário entre placas 1 e 2.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos analiticamente, através das equações 5.8 e 5.11, inseriram-se dados coletados na literatura, referentes a ensaios feitos com paredes similares às avaliadas neste trabalho. Além disso, utilizou-se formulação desenvolvida por SILVA (2000), que foi obtida através de uma análise estatística, feita com o auxílio do programa SAS, a partir de resultados de ensaios realizados em paredes simples pesadas e leves.

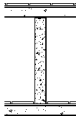
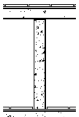
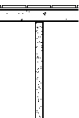
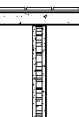
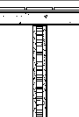
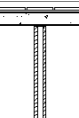
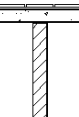
$$PT = 14,3 \log(fM) - 29,2 \quad (5.15)$$

5.4.2.1. Painéis avaliados

Os painéis avaliados foram escolhidos com base em levantamento feito no trabalho de von KRUGER (2000) e seguindo as tendências do mercado da construção civil regional. Tais painéis foram descritos no capítulo III e suas propriedades, relevantes na análise acústica em questão, são mostradas na tabela 5.5. Além desses painéis industrializados, incluíram-se na avaliação divisórias em alvenaria de tijolo cerâmico, com a finalidade

de se fazer uma comparação dos novos sistemas com a construção convencional. Para a alvenaria convencional de tijolo cerâmico, consideraram-se paredes internas com 15 cm de espessura e paredes externas com 20 cm de espessura.

TABELA 5.5 – Caracterização dos painéis avaliados

Painéis	Espessura d (m)	Densidade ρ (kg/m ³)	Densidade superficial M (kg/m ²)	Módulo de Young E (N/m ²)
Concreto celular 	0,10	750,00	75,00	13,50 x 10 ⁸
	0,15	750,00	112,50	
Concreto maciço 	0,09	2300,00	207,00	23,00 x 10 ⁹
	0,14	2300,00	322,00	
Placa cimentícea 	0,01	1330,00	13,30	12,00 x 10 ⁷
	0,015	1330,00	19,95	
Concreto + poliestireno 	0,09	1538,00	139,00	
	0,14	993,00	138,00	
EPS 	0,10	844,70	84,50	
Gesso acartonado 	0,0125	806,40	10,08	
	2 x 0,0125	806,40	20,16	
Alvenaria 	0,15	1800,00	270,00	
	0,20	1800,00	360,00	

a) Painel de concreto celular autoclavado

O painel, aqui avaliado, consiste de uma placa única fixada em armação metálica. Não foi considerado o acabamento final da parede. Para comparação dos resultados obtidos pela formulação simplificada, foi inserida, no gráfico de avaliação acústica, a curva de PT referente à formulação proposta por SILVA (2000). Além das curvas de perda de transmissão (PT), relativas ao tipo de painel em questão, foram incluídas curvas de PT para paredes em alvenaria convencional de 15 e 20 cm de espessura, equivalentes a paredes internas e externas, respectivamente (FIG.5.17).

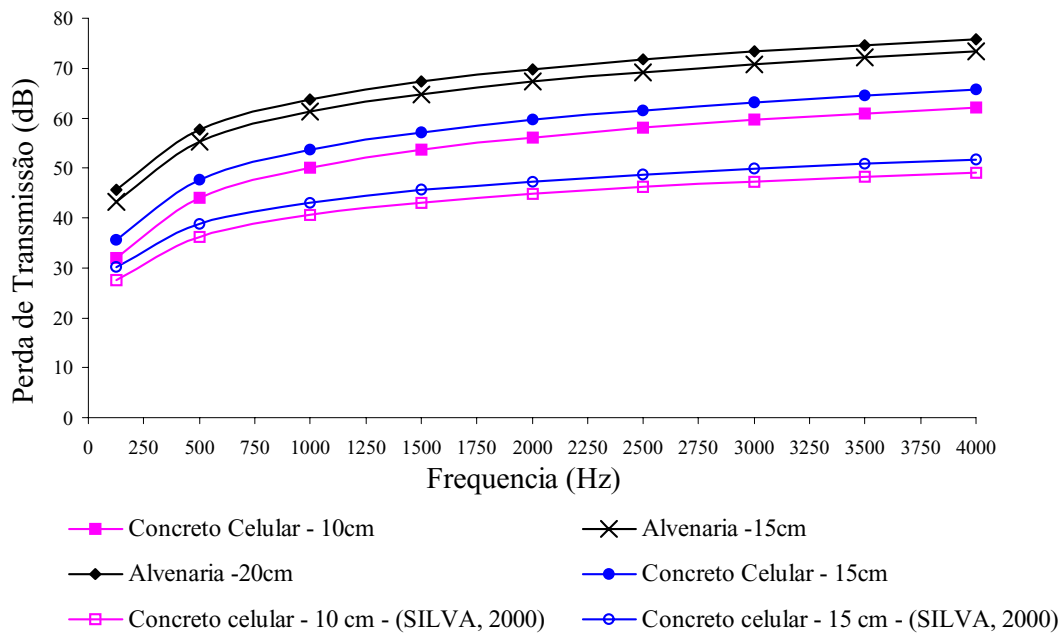


FIGURA 5.17 – Variação de PT para painel de concreto celular autoclavado

De acordo com figura 5.17, o painel de concreto celular autoclavado apresenta desempenho acústico inferior à alvenaria, sendo a frequência crítica calculada para painéis de 10 e 15 cm de espessura, 487 e 325 Hz respectivamente. Quanto mais espessos, para os mesmos valores de densidade, os painéis apresentam maior quantidade de massa e assim têm melhores resultados de perda de transmissão. As curvas obtidas pela lei da massa resultam em capacidades de isolamento bem superiores às estimadas pelo modelo proposto por SILVA (2000), cujos resultados devem ser mais próximos dos reais, já que a formulação foi desenvolvida a partir de estudos experimentais.

b) Pannel de concreto pré-moldado maciço

O pannel, aqui avaliado, consiste de uma placa única de espessura tomada como 09 cm ou 14 cm. Não foi considerado o acabamento final da parede internamente. Para efeito de comparação dos resultados obtidos pela formulação simplificada utilizada, foi inserida, no gráfico de avaliação acústica, a curva de PT referente à formulação proposta por SILVA (2000). Além das curvas de perda de transmissão (PT), relativas ao tipo de pannel em questão, foram incluídas curvas de PT para paredes em alvenaria convencional de 20 cm de espessura (FIG.5.18).

Os painéis de concreto maciço, aqui avaliados, apresentam desempenho inferior à alvenaria (FIG.5.18). Entretanto, o aumento da espessura desses painéis implica em uma melhoria do desempenho acústico considerável, já que sua densidade é elevada. Dessa forma, se o pannel analisado tiver espessura de 16 cm, sua capacidade de isolamento sonora se iguala à da alvenaria em questão, no entanto, isso implica em um aumento de peso considerável. As frequências críticas calculadas, para os painéis de 9 e 14 cm, foram 230 e 148 Hz respectivamente. Mais uma vez, a lei da massa mostra resultados bem acima dos obtidos com a formulação de SILVA (2000).

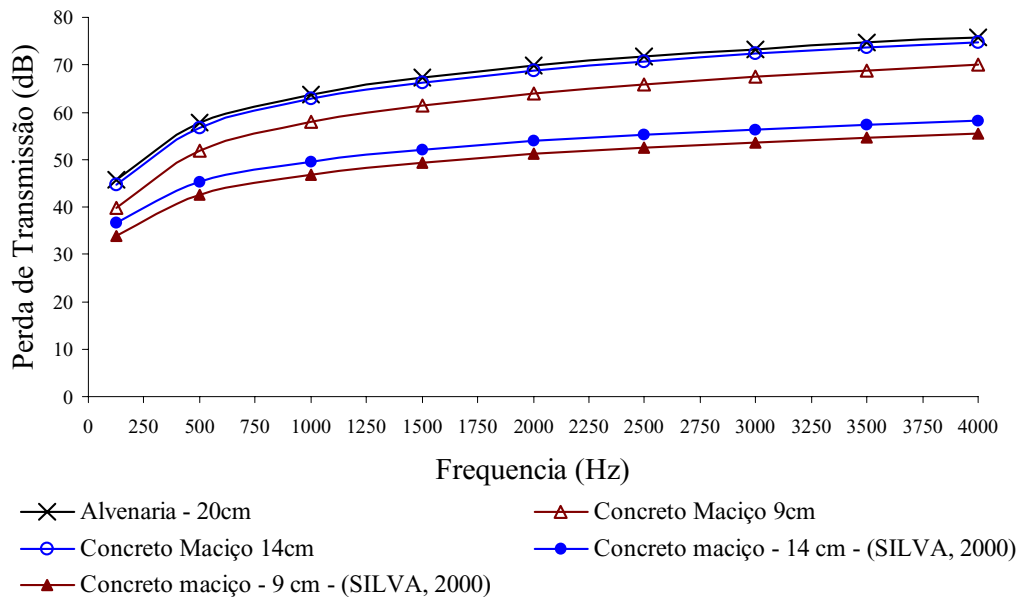


FIGURA 5.18 – Variação de PT para pannel de concreto pré-moldado maciço

c) Placa cimentícea

O painel, aqui avaliado, consiste de uma placa única de espessura tomada com valores de 1,0 cm e 1,5 cm. Não foi considerado o acabamento final da parede. Para efeito de comparação dos resultados obtidos pela formulação simplificada utilizada, foi inserida, no gráfico de avaliação acústica, a curva de PT referente à formulação proposta por SILVA (2000). Além das curvas de perda de transmissão (PT), relativas ao tipo de painel em questão, foram incluídas curvas de PT para paredes em alvenaria convencional de 20 cm de espessura e para uma divisória dupla com uma face em placa cimentícea de 1 cm e a outra face em painéis de gesso acartonado (FIG.5.19).

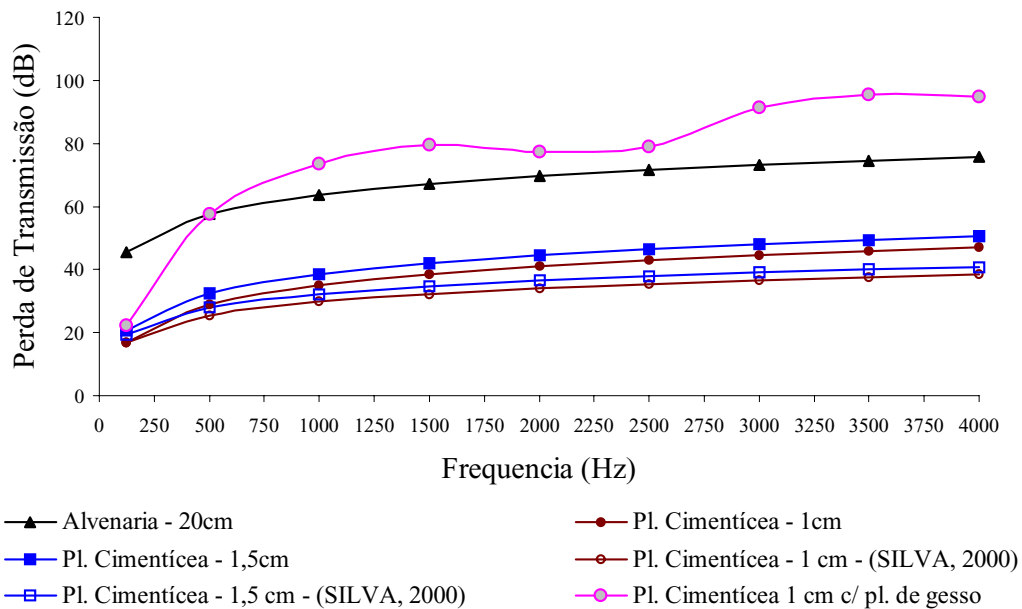


FIGURA 5.19 – Variação de PT para placa cimentícea

Como mostrado na figura 5.19, os painéis em placas cimentíceas apresentam desempenho acústico bastante inferior à alvenaria. Entretanto, deve-se ressaltar que tal tipo de vedação é, geralmente montada, associada a algum tipo de painel colocado internamente na edificação, o que gera uma parede dupla com cavidade de ar intermediária. Dessa forma, a performance acústica adquire uma melhoria; a qual foi avaliada, segundo formulação de GERGES (1992), imaginando-se uma placa de gesso de 1,25 cm afastada de 7,5 cm da placa cimentícea (FIG.5.19). Nessa avaliação,

percebe-se uma exacerbação dos valores da perda de transmissão em relação às outras curvas plotadas.

d) Painel de concreto pré-moldado com alma em poliestireno expandido

O painel, aqui avaliado, consiste de uma placa formada por três camadas, sendo a primeira e a última de concreto armado e a intermediária de poliestireno expandido. Considerou-se as camadas de concreto com espessura igual a 3 cm e a camada de poliestireno variando a de 3 cm a 8 cm. Não foi considerado o acabamento final da parede internamente. Para efeito de comparação dos resultados obtidos pela formulação simplificada utilizada, foi inserida, no gráfico de avaliação acústica, a curva de PT referente à formulação proposta por SILVA (2000) e os resultados de seus ensaios referentes à divisória leve de concreto e poliestireno expandido (FIG.5.20). Além do painel em questão, foram calculadas curvas de perda de transmissão (PT) para um painel de concreto maciço de 9 cm de espessura e para uma parede em alvenaria de tijolo cerâmico de 20 cm de espessura.

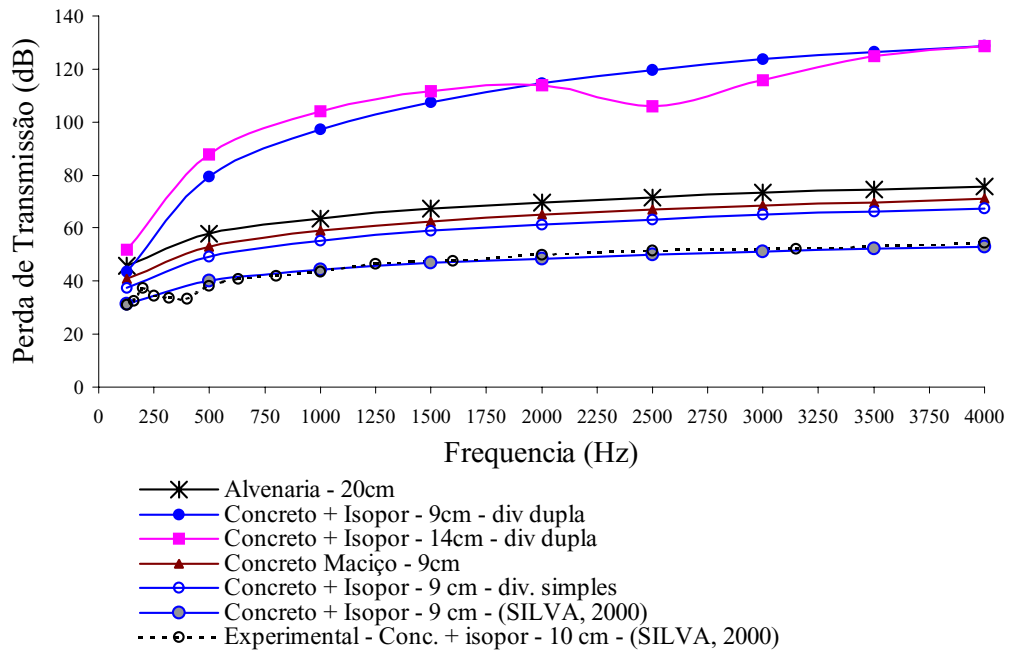


FIGURA 5.20 – Variação de PT para painel de concreto + poliestireno expandido

De acordo com figura 5.20, o painel de concreto com alma em poliestireno foi avaliado como placa única, painel simples (EQ.5.8), e como placa dupla com cavidade intermediária preenchida por poliestireno expandido (EQ.5.11). Se considerado como uma só placa, seu desempenho acústico é inferior ao da alvenaria. Se considerado como painel duplo, apesar da ligação de suas camadas ser muito rígida, sua capacidade de isolamento sonora se apresenta muito superior à calculada para a alvenaria em questão. Observando-se resultados obtidos por SILVA (2000), para painel similar em ensaios, e através de sua formulação, percebe-se uma superestimação de valores dada pela lei da massa.

e) Painel em poliestireno expandido e argamassa armada

O painel, aqui avaliado, consiste de uma divisória construída em três camadas, sendo a camada de base feita em poliestireno expandido com armação metálica dos dois lados e as camadas de acabamento feitas em argamassa projetada dos dois lados. Considerou-se as camadas de argamassa com espessura igual a 2,25 cm e a de poliestireno com 5,5 cm. Não foi considerado o acabamento final da parede internamente. Para efeito de comparação, foram usadas as duas equações simplificadas, 5.8 e 5.11, considerando o painel atuando como uma placa única e como painel composto por três meios. Além disso foram inseridas, no gráfico de avaliação acústica, curvas relativas à formulação de SILVA (2000) e relativas a alvenarias de 15 e 20 cm de espessura, já que as divisórias de EPS são destinadas a divisórias tanto internas como externas (FIG.5.21).

O painel de poliestireno expandido e argamassa armada, se avaliado como placa única pela lei da massa, apresenta resultados inferiores à alvenaria (FIG.5.21). Porém, se tomado como painel duplo cuja cavidade é preenchida com poliestireno, de acordo com formulação para painéis duplos (GERGES, 1992), apresenta valores de perda de transmissão muito superiores aos apresentados pela alvenaria convencional. O que não corresponde a uma análise fiel da realidade, já que a ligação entre as camadas do painel é rígida e faz o conjunto trabalhar de maneira integrada. Há uma superestimação de valores, se for feita comparação com formulação desenvolvida por SILVA (2000).

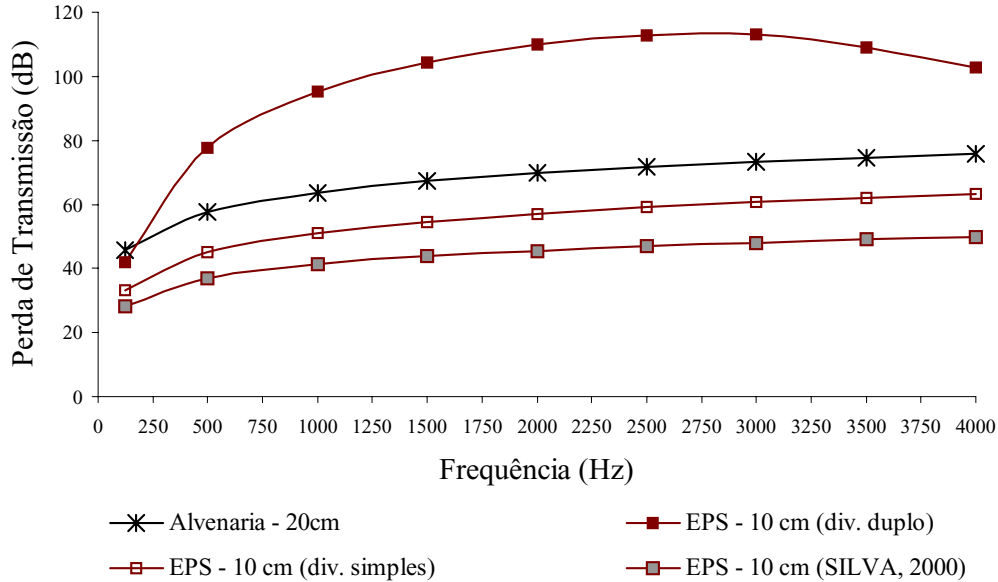


FIGURA 5.21 – Variação de PT para painel de EPS

f) Divisória de gesso acartonado com placas simples de ambos os lados

O painel, aqui avaliado, consiste de duas placas de gesso acartonado conectadas a uma estrutura metálica, que define um espaço preenchido por ar entre essas duas placas. Considerou-se as placas de gesso com espessura igual a 1,25 cm e o espaçamento entre elas igual a 7,5 cm ou 4,8 cm. Foram utilizados valores de densidade superficial de 02 tipos de placa, de acordo com classificação do fabricante (LAFARGE): PREGYPLAC, que é a placa mais comumente utilizada, com $M = 10,08 \text{ kg/m}^2$ e PREGYDRO, que é uma placa própria para áreas molhadas, com $M = 10,51 \text{ kg/m}^2$. Não foi considerado o acabamento final da parede. Para efeito de comparação dos resultados obtidos pela formulação simplificada utilizada, foi inserida, no gráfico de avaliação acústica, a curva de PT referente a dados publicados por BARING (2000) e SILVA (2000), e curvas relativas a cálculos para alvenaria de 15 cm de espessura (FIG.5.22).

Esse sistema, que foi avaliado como um conjunto de paredes duplas (GERGES, 1992), cuja cavidade é preenchida por ar, apresenta melhores resultados que a alvenaria, a partir de 500 Hz (FIG.5.22). Entretanto, pode-se notar que tais resultados são superestimados, se comparados com dados experimentais obtidos por BARING (2000) ,

considerando a cavidade de ar com 7,5 cm de espessura, e por SILVA (2000), considerando a cavidade de ar com 4,8 cm de espessura.

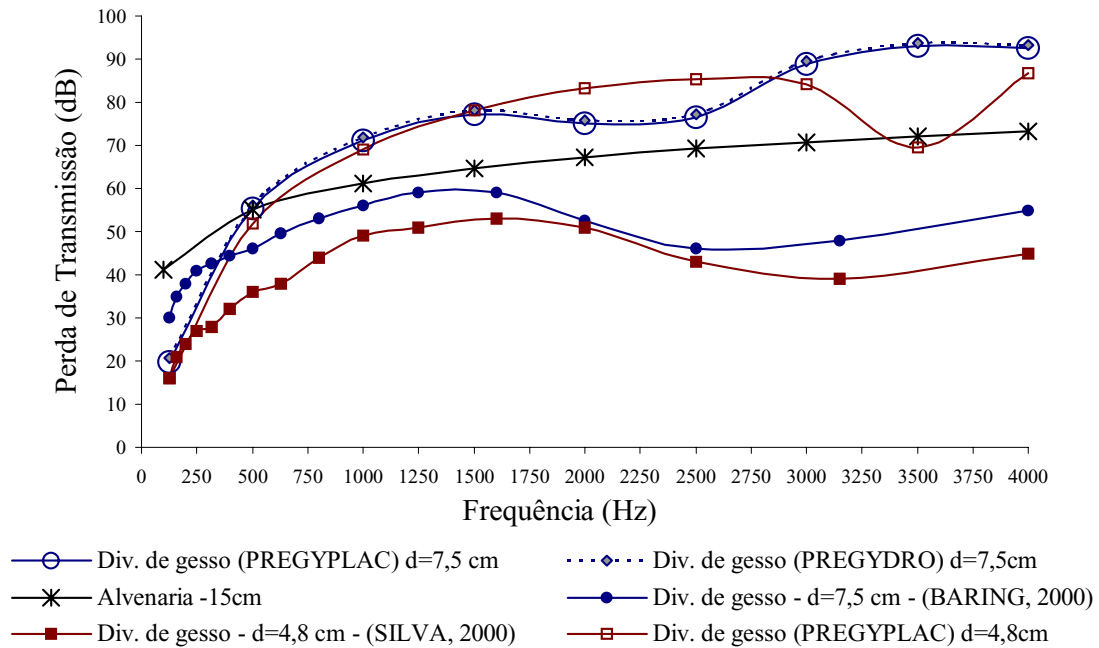


FIGURA 5.22 – Variação de PT para divisória de gesso acartonado c/ faces simples

g) Divisória de gesso acartonado com placas duplas de ambos os lados

O painel, aqui avaliado, consiste de duas placas duplas de gesso acartonado conectadas a uma estrutura metálica, que define o espaço entre essas placas duplas. Considerou-se as placas de gesso com espessura igual a 1,25 cm, cada uma, e o espaçamento entre elas igual a 7,5 cm. A cavidade intermediária entre placas foi avaliada como espaço preenchido por ar. Não foi considerado o acabamento final da parede. Para efeito de comparação do desempenho acústico, foram incluídas, no gráfico de avaliação acústica, curvas referentes à uma divisória construída com faces simples de gesso acartonado e a uma parede em alvenaria convencional de 15 cm de espessura (FIG.5.23).

A duplicação das placas de gesso nas faces do conjunto, de maneira previsível, aumentou a capacidade de isolamento da parede, que apresenta melhores resultados de

perda de transmissão sonora que os calculados para a alvenaria (FIG.5.23). Entretanto, levando-se em conta resultados experimentais obtidos por SILVA (2000), percebe-se que os valores calculados, de acordo com formulação apresentada por GERGES (1992), estão muito acima do real desempenho obtido pelos painéis em questão.

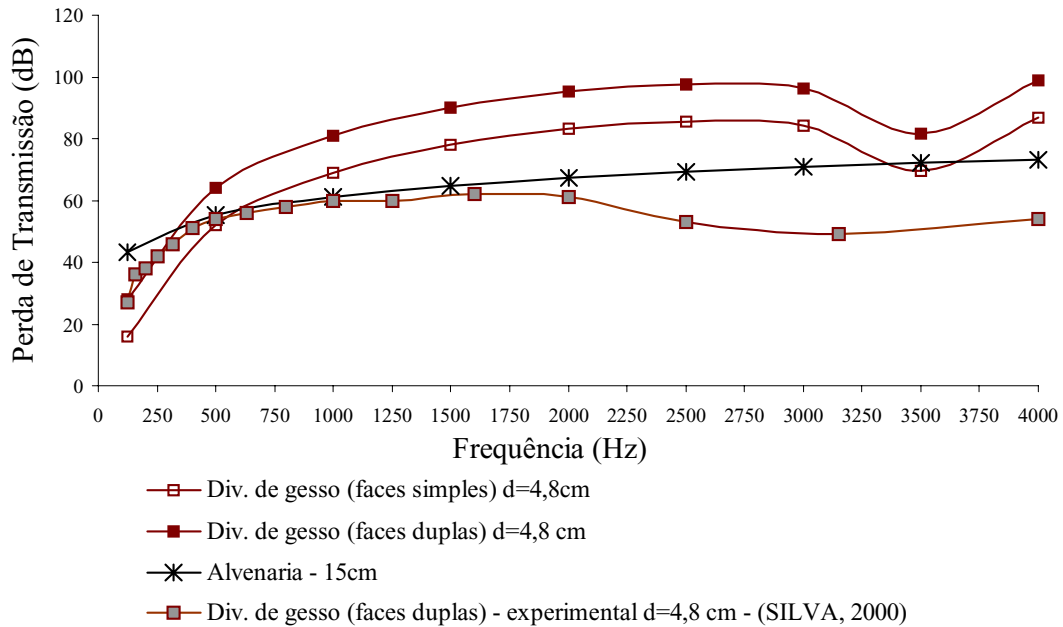


FIGURA 5.23 – Variação de PT para divisória de gesso acartonado c/ faces duplas

5.4.2.2. Comparação de resultados

Para efeito de comparação do desempenho acústico das várias possibilidades de painéis de vedação aqui estudados, foram montados gráficos (FIGS. 5.24 e 5.25) contendo, separadamente, painéis destinados a vedação interna e painéis destinados a vedação externa. Em cada um desses gráficos foram incluídas as curvas de PT para alvenaria convencional interna e externa, respectivamente.

a) Paredes internas

De acordo com a equação 5.8 utilizada, os painéis internos em EPS e concreto celular autoclavado apresentam desempenho acústico inferior à alvenaria (FIG.5.24). O que é confirmado pela formulação desenvolvida por SILVA (2000). Já através da equação 5.11, utilizada para painéis duplos, obtém-se resultados, para divisórias de gesso e para os mesmos painéis de EPS, superiores ao desempenho calculado para alvenaria convencional.

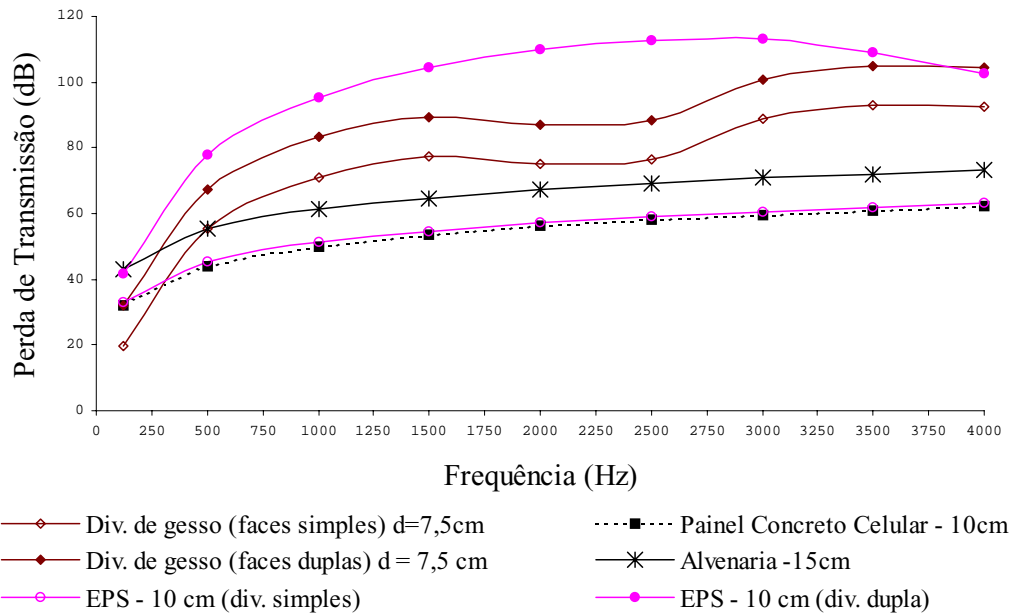


FIGURA 5.24 – Variação de PT para paredes internas

b) Paredes externas

Os painéis externos em concreto maciço, concreto e poliestireno (isopor), EPS e concreto celular autoclavado apresentam desempenho acústico inferior à alvenaria, quando avaliados como placas simples (FIG.5.24). O que é confirmado pela formulação desenvolvida por SILVA (2000). Já através da formulação utilizada para painéis duplos, obtém-se resultados, para os mesmos painéis de EPS e de concreto e poliestireno, superiores ao desempenho calculado para alvenaria convencional.

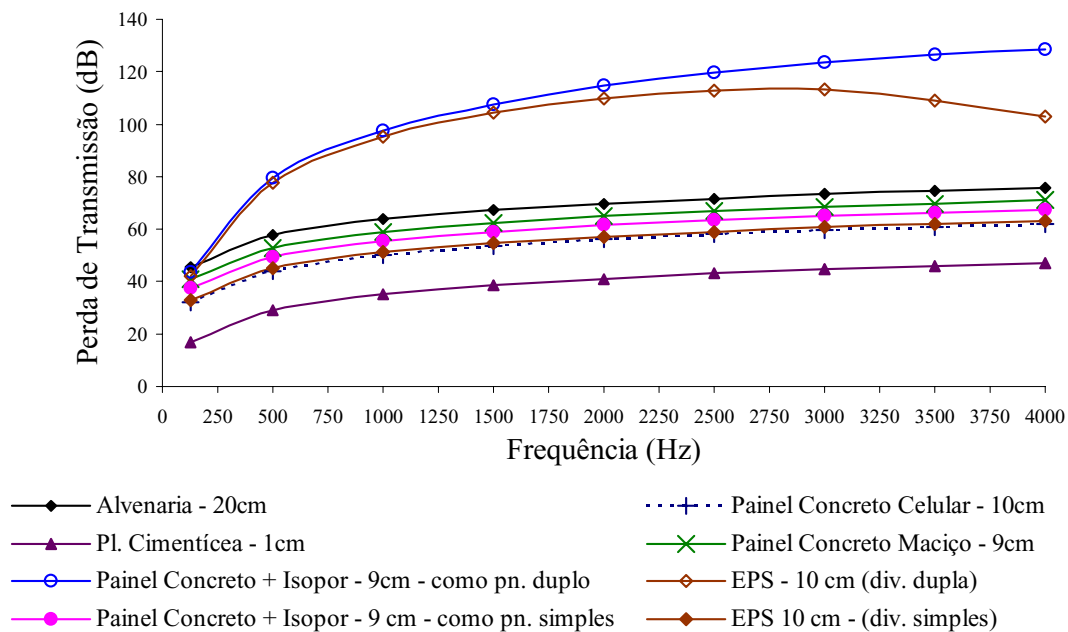


FIGURA 5.25 – Variação de PT para paredes externas

5.4.3. Análise dos resultados obtidos

Os painéis industrializados, analisados como placas únicas pela lei da massa, apresentaram valores de perda de transmissão mais baixos que a alvenaria convencional, a qual foi avaliada pelo mesmo método. Já os painéis analisados como duplos, quando comparados aos valores de isolamento sonora da alvenaria, apresentaram resultados superiores a esta. O que deve ser tomado como uma superestimação não condizente com o comportamento real, que pode ser verificado através de dados experimentais coletados na literatura.

O desempenho acústico da alvenaria convencional apresenta-se, ainda, superior à maioria dos sistemas de vedação industrializados, entretanto há alguns sistemas que oferecem resultados bem próximos da alvenaria, como os painéis de concreto maciço e os painéis de concreto e alma em poliestireno. Esse desempenho é reafirmado, já que não foi levado em conta nenhum tipo de acabamento interno para estes painéis, que na

maioria dos casos recebem uma armação metálica e placas de gesso acartonado em sua face interna, o que aumentaria ainda mais sua capacidade de isolamento.

Os sistemas de vedação internos que apresentaram os piores resultados de perda de transmissão foram os painéis de concreto celular autoclavado e os de EPS. Entretanto, a comparação desses resultados, com os valores obtidos para as divisórias de gesso, não é confiável, já que as avaliações foram feitas através de formulações diferentes (equações 5.8 e 5.11). Por meio de resultados experimentais pesquisados na literatura, pode-se classificar o desempenho das divisórias de gesso como satisfatório, em relação à alvenaria convencional. Sendo esse desempenho otimizado por meio da utilização de placas duplas nas faces das divisórias e / ou através de enchimento das cavidades, entre placas, com materiais isolantes acústicos (amortecedores).

Os painéis externos que apresentaram menor grau de isolamento sonora foram as placas cimentícias, seguidas dos painéis de concreto celular autoclavado e dos painéis de EPS. Pode-se dizer que os dois últimos têm os piores resultados, já que com eles não é comum a construção de falsas paredes internas em gesso, o que ocorre normalmente com as placas cimentícias. A utilização dessas falsas paredes, cria uma cavidade de ar e um novo anteparo para o som, o que, evidentemente, melhora a capacidade de isolamento sonora.

Para a escolha do elemento de vedação mais adequado, no que diz respeito à acústica, além de conhecer as propriedades isoladas do material, é necessário se levar em conta os detalhes de execução e montagem de cada sistema e suas interferências e interligações com o meio circundante.

5.4.4. Conclusões

A avaliação da capacidade de isolamento sonora, através da lei da massa, apresentou resultados acima dos valores reais, valores superestimados. Entretanto, é possível se fazer um estudo comparativo no que diz respeito a uma avaliação qualitativa dos

elementos de vedação. Já no que diz respeito à formulação para paredes duplas (EQ.5.11), a superestimação, resultante desta, compromete análises, mesmo que apenas de cunho qualitativo, se a comparação é feita com resultados obtidos pela formulação da lei da massa para paredes simples (EQ.5.8). Como pode-se exemplificar nas figuras 5.24 e 5.25.

O desempenho acústico de elementos de vedação está diretamente ligado ao tipo de montagem que é feita, já que dela depende o seu funcionamento, seja como placa única ou como placas associadas por ligação flexível. Outros pontos para os quais se deve chamar a atenção, são as frequências de coincidência e de ressonância, que aqui não foram exploradas, entretanto, podem denotar fragilidades importantes no uso de determinados painéis.

A análise experimental é de suma importância no estudo do comportamento acústico de elementos construtivos e é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de métodos analíticos de avaliação mais eficientes.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISE VIBRATÓRIA

6.1. Conceitos básicos

O tipo de problema de interesse da dinâmica estrutural é o que incorpora modificações nas quantidades de movimento dos sistemas elásticos. A variação das forças, que atuam sobre um sistema deformável, faz com que o sistema tenha sua quantidade de movimento alterada e a segunda lei de Newton assegura a satisfação das condições de equilíbrio. Basicamente, a grande modificação é a necessidade de incorporação da variável tempo, t , às equações de equilíbrio. O movimento do sistema transforma-se numa oscilação, pela sucessiva troca de energia potencial em cinética, e vice-versa. Neste caso é dito que a estrutura vibra.

Além do caráter repetitivo, ou alternativo, da resposta, as amplitudes dos deslocamentos chegam a ultrapassar, em diversas vezes, os valores correspondentes à aplicação estática da ação, tornando o estudo de dinâmica de importância indiscutível. Os problemas estruturais dinâmicos são bem mais complexos e de solução mais demorada que os problemas devidos a carregamentos estáticos. Essa complexidade está associada ao fato de que para cargas dinâmicas, é necessário se analisar uma sucessão de situações que correspondem à variação da carga no tempo. Além disso, outro ponto de grande importância, quando se considera um carregamento dinâmico sendo aplicado a uma estrutura, é que os deslocamentos resultantes estão associados a acelerações (produzidas pela variação da força no tempo) que provocam o aparecimento de forças inerciais internas, as quais resistem a essas acelerações. Ou seja, em uma análise dinâmica, os esforços internos têm que ser equilibrados não só pela aplicação de forças externas, mas também por forças inerciais internas resultantes de acelerações produzidas dentro da estrutura (CLOUGH et al., 1975).

A maior parte das estruturas é projetada adequadamente para cargas estáticas, mas existem casos onde se faz necessário levar em conta os efeitos das cargas dinâmicas. As cargas dinâmicas podem produzir níveis de vibração elevados, os quais podem tanto comprometer a segurança estrutural como causar desconforto humano. Além disso, existe uma tendência em se projetar estruturas cada vez mais esbeltas, inclusive utilizando novos materiais na construção civil. Esta tendência faz com que haja uma redução das frequências naturais das estruturas deixando-as mais suscetíveis a uma série de carregamentos dinâmicos, já que suas frequências naturais passam a ficar cada vez mais próximas das de excitação. Portanto, torna-se cada vez mais importante verificar o comportamento dinâmico das estruturas e descrever com detalhe as cargas dinâmicas que podem atuar.

6.1.1. Classificação das Ações Dinâmicas

As ações dinâmicas que ocorrem em um sistema estrutural podem ser avaliadas de duas maneiras: de forma determinística, na qual as características do sistema e da excitação são estabelecidas à priori e não determinística, randômica ou estocástica quando não se pode prever o seu valor instantâneo em qualquer tempo futuro. Neste caso, as características do sistema e da excitação são estabelecidas em termos de probabilidade de ocorrência, ou seja, definidos a partir de um conjunto amostral com certa definição probabilística. Exemplos típicos de ações determinísticas são mostradas na figura 6.1. A figura 6.2 ilustra o caso de ação estocástica ou randômica.

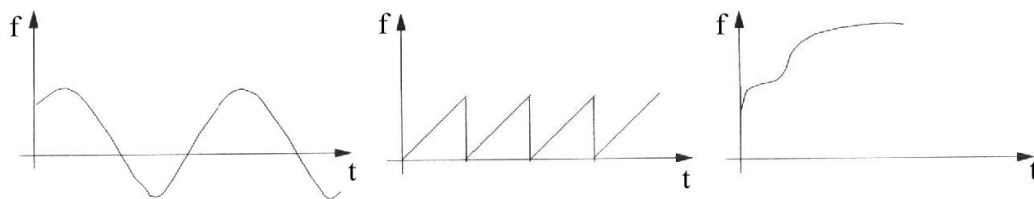


FIGURA 6.1 – Tipos de ações dinâmicas – funções determinísticas

FONTE – NEVES, 2000.

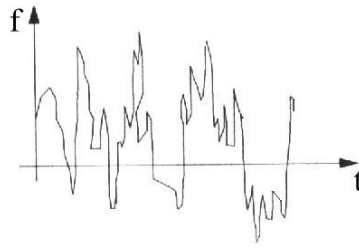


FIGURA 6.2 – Tipos de ações dinâmicas – função não determinística
 FONTE – NEVES, 2000

A vibração é um termo que descreve a oscilação num sistema mecânico, e na prática não possui muitas vezes um padrão regular, podendo ser uma combinação de vários harmônicos de resposta simples. O estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhe são associadas. Movimentos oscilatórios são aqueles em que há inversão de sentido. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração. Deste modo, a maior parte das máquinas e estruturas está sujeita a certo grau de vibração e o seu projeto requer geralmente o exame de seu comportamento. Se a vibração repete-se a certos intervalos de tempo é dita periódica (FIG.6.3), do contrário é não periódica (FIG.6.4), ou complexa.

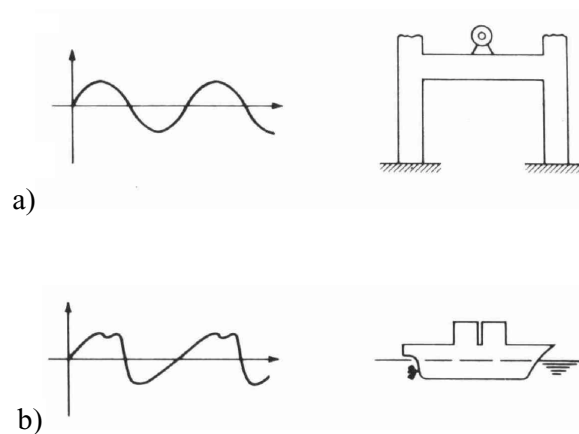


FIGURA 6.3 – Características e causas de carregamentos dinâmicos típicos
 a) Harmônico simples – rotação de equipamento em edificação;
 b) Complexo – forças da hélice na popa do navio;
 FONTE – CLOUGH et al., 1975.

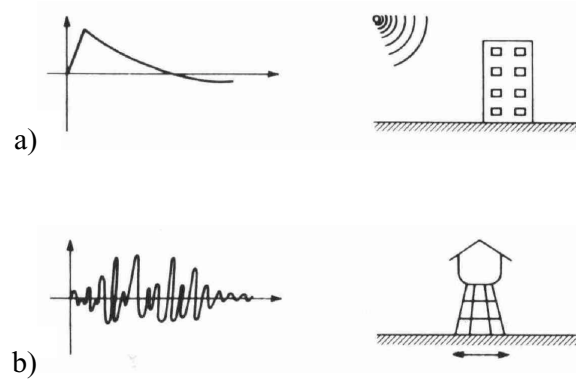


FIGURA 6.4 – Características e causas de carregamentos dinâmicos típicos

a) Impulsivo – explosão de bomba repercutindo em edificação;

b) De longa duração – terremoto abalando depósito.

FONTE – CLOUGH et al., 1975.

A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico (FIG.6.5), sobre o qual pode ser escrito que:

$$x = x_0 \cos w_0 t \quad (6.1)$$

sendo,

$$w_0 = 2\pi f_0 \quad (6.2)$$

e,

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad (6.3)$$

onde w_0 é a frequência natural circular (rad/s), f_0 é a frequência natural e T_0 é o período natural.

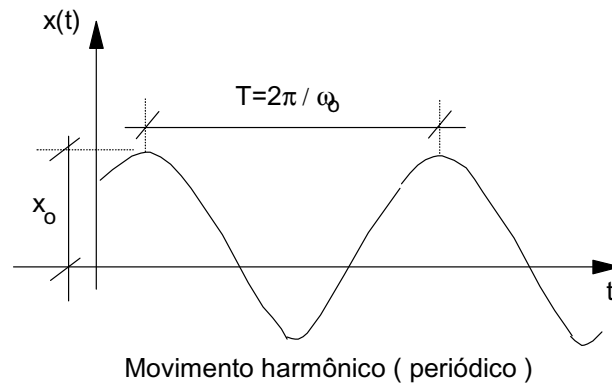


FIGURA 6.5 – Resposta de um sistema em movimento harmônico
 FONTE – NEVES, 2000

As ações atuantes em um sistema material podem ser também de curta duração, ou transiente, no qual as forças dinâmicas externas ao sistema, agem apenas num espaço limitado de tempo, isto é, numa fração do período natural T_0 . O estrondo e o impacto durante a colisão de dois corpos podem ser citados como exemplos. Chama-se geralmente de resposta transiente a resposta de um sistema mecânico a um impulso ou choque. Em presença do amortecimento, uma vez cessada a excitação, cessam as vibrações.

6.1.2. Tipos de vibrações

Existem duas classes gerais de vibração: a livre e a forçada. A vibração livre acontece quando um sistema oscila sob a ação de forças que lhe são inerentes e na ausência da ação de qualquer força externa. São provocadas exclusivamente pela energia cinética e potencial existentes no sistema. No caso de vibração livre o sistema poderá vibrar com uma ou mais das suas frequências naturais, que são peculiares ao sistema dinâmico estabelecido pela distribuição de sua massa e rigidez.

Denomina-se vibração forçada quando ela ocorre sob a excitação de forças externas. Quando a excitação é oscilatória, o sistema é obrigado a vibrar na frequência da

excitação. Se esta frequência coincide com uma das frequências naturais do sistema, forma-se um estado de ressonância, daí podendo resultar amplas e perigosas oscilações. Os sistemas de vibração são todos eles sujeitos a um certo grau de amortecimento, em face da perda de energia pelo atrito e outras resistências. O amortecimento é importante ao limitar a amplitude de oscilação na ressonância.

6.1.3. Sistemas com um grau de liberdade

O modelo dinâmico mais simples para representar um sistema estrutural linear elástico, sujeito a um carregamento dinâmico, consiste do sistema massa/mola/amortecedor, correspondendo a um sistema de um grau de liberdade, já que é necessário somente uma coordenada para descrever completamente seu movimento (FIG. 6.6).

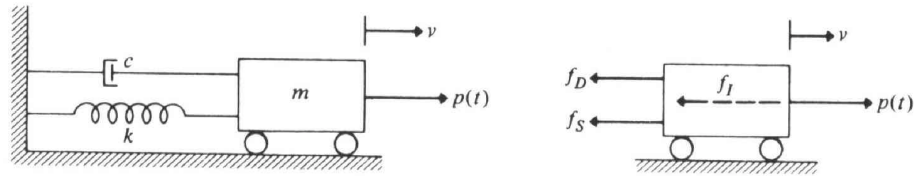


FIGURA 6.6 – Sistema de um grau de liberdade - componentes e forças de equilíbrio
 FONTE – CLOUGH et al., 1975.

A partir da equação de movimento, demonstra-se que a frequência natural desse sistema é dada por uma relação entre a rigidez da mola (k) e a massa do corpo (m):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)} \quad (6.4)$$

onde k é a rigidez da mola, m é a massa, P é a força e c é o amortecimento. Na figura 6.6, f_p representa as forças elásticas, f_s representa as forças inerciais e $p(t)$ representa a excitação externa.

A frequência natural é aquela em que para uma mesma amplitude da força de excitação, o sistema apresenta uma maior resposta (deslocamento). Quando a frequência da excitação coincide com a frequência natural do sistema, diz-se que o sistema está em

ressonância. As frequências naturais estão associadas às deformações oscilatórias de partes da estrutura em torno da sua posição de equilíbrio estável. Essas frequências medem o número de vezes por segundo que as deformações oscilatórias da estrutura ocorrem, sendo expressas em ciclos por segundo (Hz). A frequência natural é uma característica do sistema e é dependente da distribuição de massa e da rigidez. A menor frequência natural de vibração é chamada de frequência fundamental.

6.2. Vibrações em pisos

6.2.1. Considerações gerais

A aceitabilidade de pisos do ponto de vista da vibração depende de três fatores: características do piso, tipo de ação de excitação no piso e limites aceitáveis de vibração (RAINER, 1980)

A ocorrência de vibrações em pisos não é um fenômeno novo, entretanto, os novos conceitos e técnicas construtivas têm tornado as edificações mais leves e esbeltas, o que leva a frequências naturais e taxas de amortecimento efetivo mais baixos. Tal fato deixa as construções em condições de maior suscetibilidade em relação às vibrações provocadas por carregamentos dinâmicos, cujas respostas a essas ações devem ser analisadas separadamente.

A vibração de pisos pode acontecer devido a ação de fontes externas como tráfego rodoviário e/ou ferroviário, e por fontes internas como tráfego de pedestres e/ou atividades rítmicas de grupos. Tais fontes podem ser periódicas ou impulsivas, o que deve ser analisado separadamente.

A percepção humana das vibrações é de difícil caracterização, podendo ser muito sensível para baixos níveis de vibração do piso, e por outro lado, quase insensível, quando ocorrem mudanças quantitativas de forma substancial na amplitude de vibração. Há também o fator subjetivo, já que as pessoas possuem percepções diferenciadas umas

das outras. A reação humana aos níveis de vibração é substancialmente psicológica, dependendo parcialmente da atividade que está sendo desempenhada. Essa reação é geralmente afetada por outros estímulos, como o som. Embora o nível de vibração em pisos possa induzir algumas pessoas a uma sensação de insegurança, na maior parte dos casos, isso não significa que exista algum risco de colapso estrutural.

Em suma, para a descrição e caracterização do problema dinâmico, envolvendo vibrações de pisos, é importante que sejam avaliadas as características de cada piso, como suas condições de contorno, massa, frequência natural, rigidez e capacidade de amortecimento; quanto às características das cargas de excitação, como sua variabilidade com o tempo, sua frequência de excitação e sua magnitude; e quanto ao nível de aceitabilidade e percepção humana, em termos de fatores de resposta levantados estatisticamente.

6.2.2. Elementos constituintes dos pisos

As características dos elementos constituintes de um piso sujeito a vibrações são de grande importância no estudo da suscetibilidade dos pisos à ação de cargas de excitação. Esses elementos são os painéis de piso ou lajes, as vigas principais e as vigas intermediárias, e suas características são definidas pelas dimensões e pelo material constituinte (FIG.6.7).

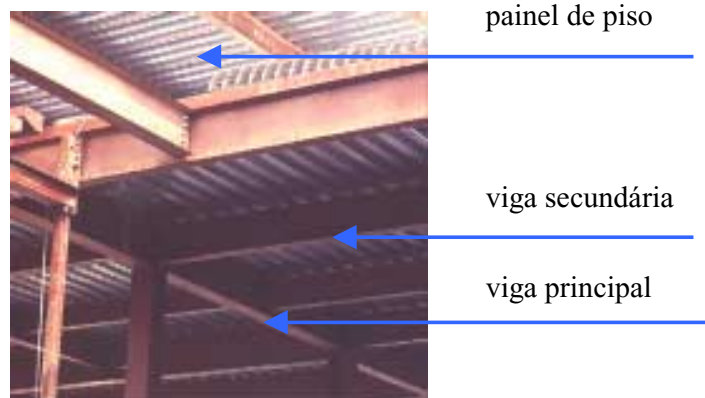


FIGURA 6.7 – Elementos constituintes dos pisos

6.2.3. Fontes de vibração em pisos

As fontes de vibração em pisos são classificadas em externas e internas, e há uma grande variedade de causas possíveis de excitação dinâmica em pisos. As características importantes dessas excitações variam, de uma fonte para outra, de modo que diferentes processos de avaliação podem ser apropriados dependendo de qual causa potencial é a mais relevante.

Como exemplos de fontes externas de vibração, podem ser citados o tráfego rodoviário e o ferroviário, que dependendo das condições do entorno da edificação, provocam vibrações na estrutura desta (FIG.6.8). Tal problema é geralmente tratado através do isolamento entre a fonte e o edifício, com a criação de barreiras no meio de propagação da vibração, já que o objetivo é barrar a transmissão da onda vibratória.

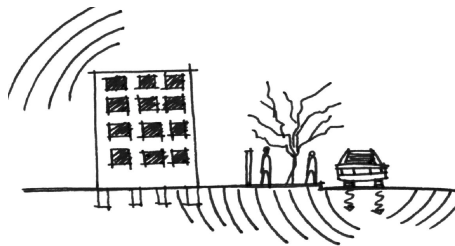


FIGURA 6.8 – Fonte de vibração externa

No que se refere a fontes internas de vibração, a mais comum e importante é o tráfego de pedestres. Uma pessoa caminhando, em ritmo regular, aplica uma força repetida periodicamente ao piso, que pode causar um pico na sua resposta estrutural (FIG.6.9). Outros tipos de fontes internas de excitação são encontrados no cotidiano, como por exemplo grupos de pessoas praticando atividades rítmicas em academias de ginástica. Entretanto, esses são casos especiais a serem analisados separadamente.

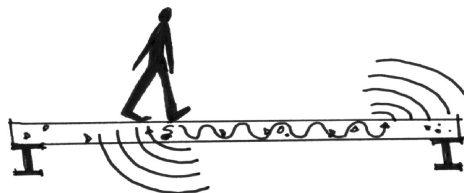


FIGURA 6.9 – Fonte de vibração interna

6.2.3.1. Caracterização das fontes internas de excitação

O tipo de excitação mais comum é o efeito da caminhada em pisos. A geometria do corpo humano andando, em uma primeira aproximação, é um movimento organizado de pernas que causa uma subida e uma descida da massa efetiva do corpo em cada passada (FIG.6.10). Esse movimento de subida e descida é de aproximadamente 50 mm, de pico a pico, mas é sensível ao ângulo entre uma perna e outra completamente esticada, ou seja, à extensão das passadas que o pedestre está imprimindo a sua caminhada.

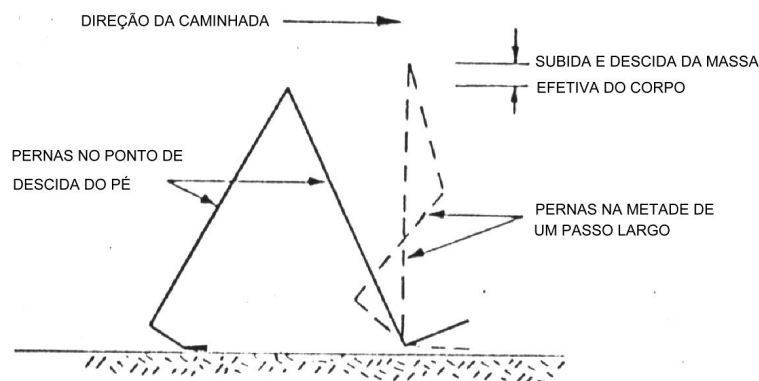
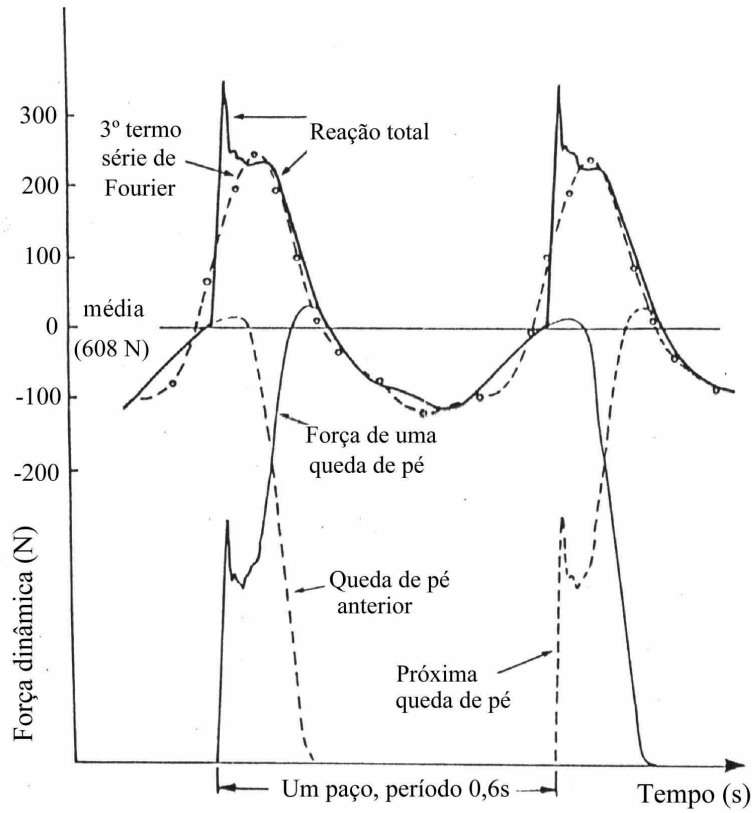


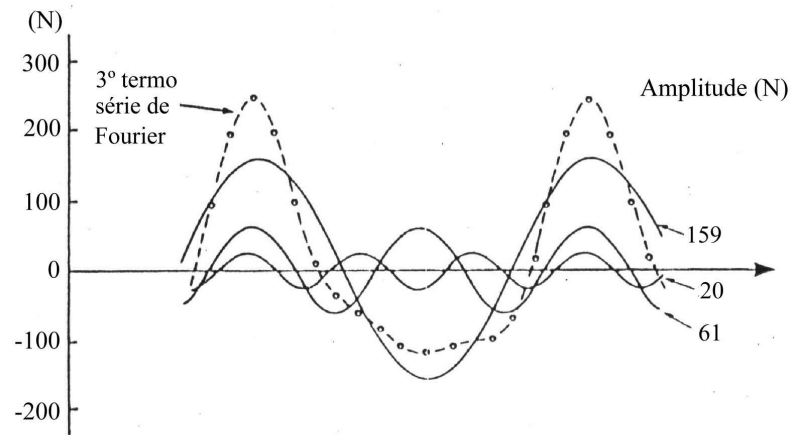
FIGURA 6.10 – Geometria simplificada de uma passada

FONTE – OHLSSON, 1982

As acelerações da massa do corpo são associadas com reações no piso, e elas são aproximadamente periódicas, na frequência do passo. A flutuação pode ser resolvida como uma série de componentes senoidais (série de Fourier) e o termo fundamental corresponde bem à simplificação visual da figura 6.10, gerando uma amplitude de força entre 100 N e 300 N (FIG.6.11). As primeiras três componentes de Fourier são mostradas na figura 6.11(b), e o grau de aproximação dado à adição dessas três componentes é indicado na figura 6.11(a). Na figura 6.11 estão ilustradas as três componentes da força descritiva do passo, correspondentes à frequência fundamental e ao segundo e terceiro harmônicos, múltiplos da frequência fundamental do passo. Portanto, a amplitude da força é considerada até o terceiro harmônico ($3f_0$), sendo desprezadas as outras componentes para harmônicos maiores devido a pequena amplitude.



a)



b)

FIGURA 6.11 – Excitação típica de caminhada

a) força de descida da passada e reação no piso

b) componentes de Fourier da reação no piso

FONTE – OHLSSON, 1982

A frequência de passos em uma caminhada pode variar entre 1,4 Hz e 2,5 Hz, com amplitude de força tendendo a aumentar pronunciadamente com o aumento da frequência, como pode ser verificado para a primeira componente da série de Fourier na figura 6.12. Entretanto, passos numa caminhada, que acontece no interior de uma edificação, estão mais comumente por volta de 1,6 Hz.

A magnitude da segunda componente de Fourier varia com os passos na caminhada de forma similar à componente básica. Os efeitos das frequências mais altas, especialmente o impulso devido ao contato dos pés com o piso, variam consideravelmente de pessoa para pessoa. Os valores médios dos coeficientes de Fourier relatados por Rainer, Pernica e Allen em um estudo canadense para carregamentos em passarelas de pedestres são mostrados na figura 6.12 (OHLSSON, 1982). O impulso de contato está normalmente por volta de 3 Ns.

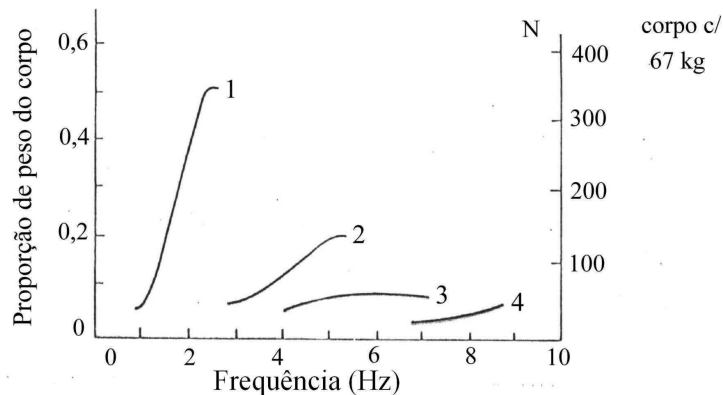


FIGURA 6.12 – Amplitudes das componentes de Fourier para uma caminhada regular
FONTE – OHLSSON, 1982

Carregamentos impulsivos muito maiores podem surgir na chamada queda de calcanhar. Uma pessoa, em pé na ponta dos pés, que retorna pesadamente sobre seus calcanhares pode descarregar um impulso de 70 Ns, com a duração de uns 0,04 s. Essa situação pode ser ilustrada por uma pessoa procurando alguma coisa em uma prateleira alta na ponta dos pés, quando ela volta de uma só vez sobre seus calcanhares.

6.2.4. Reação humana à vibração

As grandes amplitudes de oscilação para frequências na faixa de 2 Hz a 20 Hz podem provocar deformações significativas no corpo humano, incluindo ressonância de órgãos específicos, aumentando a sensação de desconforto, prejudicando a habilidade para desenvolver tarefas mecânicas e até mesmo provocando lesões.

Os critérios apropriados para ambientes de residências e de escritórios são associados a níveis intermediários de vibração, para os quais os efeitos fisiológicos ficam em segundo plano em relação aos fatores psicológicos. A importância dos fatores psicológicos faz com que seja difícil quantificar a reação humana para estes níveis de vibração. As reações a esses níveis de vibração podem ser influenciadas por vários fatores. No limite inferior da faixa de frequência intermediária, dentro do intervalo de 2 a 20 Hz (FIG.6.13), a reação é fortemente ligada ao sentimento de insegurança, baseado na associação instintiva dos movimentos perceptíveis em uma estrutura sólida com uma expectativa de inadequação estrutural ou falha. Para o limite superior da faixa de frequência, a reação é fortemente ligada aos níveis de barulho associados.

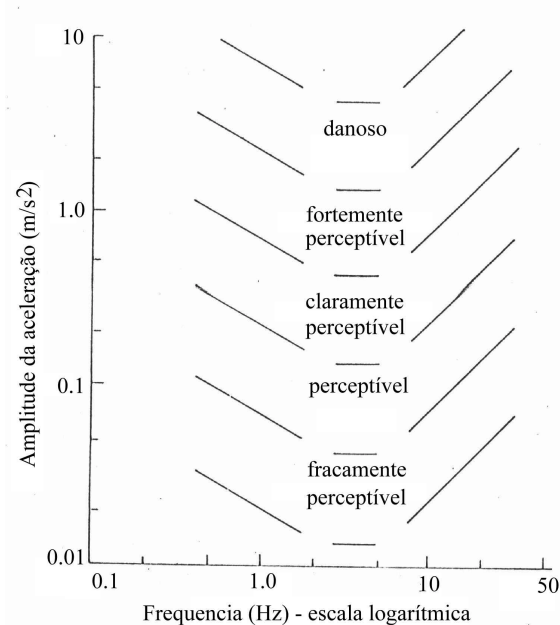


FIGURA 6.13 – Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme

FONTE – OHLSSON, 1982

Devido à larga faixa de freqüências a ser coberta, é usual plotar contornos indicando a reação humana em escalas logarítmicas de freqüência e amplitude de resposta. A resposta estrutural pode ser expressa em termos de deslocamentos, velocidade ou aceleração (FIG.6.13).

6.2.5. Critérios de conforto de acordo com especificações de normas

Os critérios para as vibrações em pisos são estabelecidos em função dos picos de aceleração em relação à freqüência, Sendo a resposta em aceleração dada em porcentagem da aceleração da gravidade (g), como mostrado na figura 6.14.

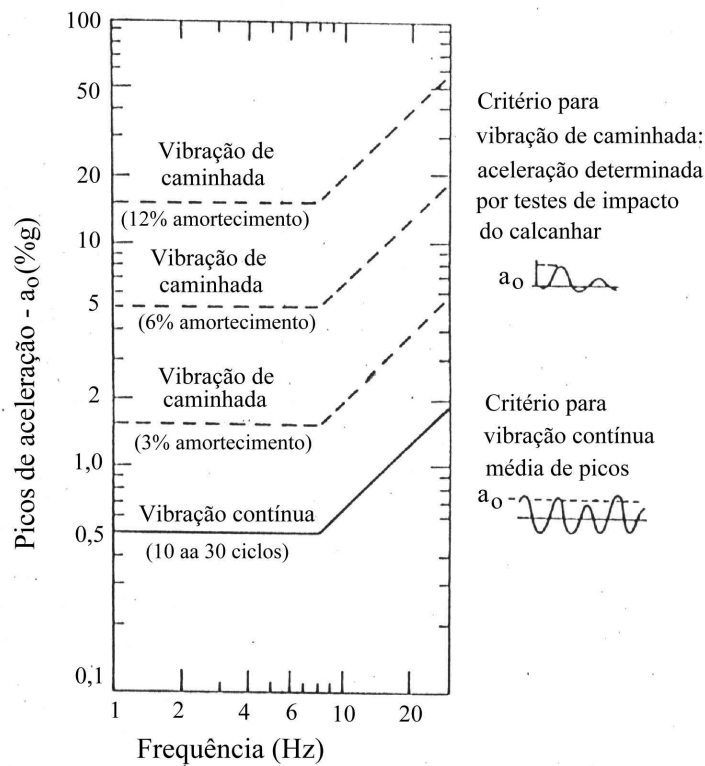


FIGURA 6.14 – Critério de desconforto para vibrações em pisos
(ocupações: residencial, escolar e em escritórios)

FONTE – OHLSSON, 1982

As curvas classificadas como vibração de caminhada devem ser usadas para avaliar a resposta do impulso gerado pela queda do calcanhar sobre o piso. Já as curvas classificadas como vibração contínua devem ser usadas para avaliar o movimento causado por uma pessoa caminhando pelo piso.

No Brasil, para a avaliação de vibrações em pisos, tem-se como guia a NBR 8800 – anexo N (1986), a qual segue os conceitos da ISO 2631/1 e 2, que é também a base dos cálculos mostrados no “*Design Guide on the Vibration of floors*”. Esse guia de cálculo, baseado também em normas canadenses, mostra o procedimento aqui utilizado nas avaliações propostas.

A especificação canadense, CAN3-S16.1 (1984) Estruturas de Aço para Prédios, inclui um apêndice muito usado, intitulado “Guia para vibrações em pisos”, que, entretanto, não faz parte obrigatória do código (FIG. 6.14). As especificações canadenses sugerem uma taxa de 6% do amortecimento crítico para pisos tipicamente mobiliados e sem divisórias. O “Suplemento do Código Nacional de Construção do Canadá” estabelece limites para a tolerância humana em casos de atividades de grupo: para salas de dança e de jantar uma amplitude de aceleração de 0,02g e para locais de concertos ao vivo e de eventos esportivos uma amplitude de aceleração de 0,05 g. Para essas atividades, a verificação do estado limite de vibração é aplicada somente para a componente de excitação relativa à frequência fundamental. Assim, a resposta considerada é para frequências até 3 Hz, e a ressonância do piso por componentes de frequências mais altas não é levada em conta. Para exercícios com saltos é considerada a segunda componente da força de excitação, resultando um valor de até 6 Hz para a frequência do segundo harmônico.

A mais relevante especificação inglesa é a BS 6472 Avaliação da exposição humana à vibração em edifícios (1 Hz a 80 Hz) (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1984), a qual é fortemente ligada ao Padrão Internacional ISO 2631 Guia de Avaliação da exposição humana à vibração total do corpo, que é em parte descendente das especificações alemãs feitas para condições industriais de trabalho. Nas especificações

da ISO são fornecidas curvas de picos de aceleração em função da frequência e do tempo de exposição, levando em consideração a posição do corpo.

A título de informação, é listada na tabela 6.1 valores recomendados para as frequências naturais de estruturas com vibrações induzidas por pessoas (BACHMANN, 1992).

TABELA 6.1 – Frequências naturais recomendadas (Hz)

Tipo de estrutura	Tipo de construção			
	Concreto armado	Concreto protendido	Concreto/aço (misto)	Aço
Ginásios e salões de esportes	> 7,5	> 8,0	> 8,5	> 9,0
Salões de dança e locais para concertos sem acentos fixos	> 6,5	> 7,0	> 7,5	> 8,0
Casas de shows e teatros com acentos fixos - com música clássica ou música popular “leve”.	> 3,4	> 3,4	> 3,4	> 3,4
Casas de shows e teatros com acentos fixos - com música “pesada”.	> 6,5	> 6,5	> 6,5	> 6,5
Casas de shows e teatros com acentos fixos em direção horizontal	> 2,5	> 2,5	> 2,5	> 2,5
Para passarelas de pedestres: evitar de 1,6 – 2,4 Hz (também com baixo amortecimento de 3,5 – 4,5 Hz)				

FONTE – BACHMANN, 1992

6.3. Avaliação de vibrações em pisos segundo “Design Guide on the Vibration of floors”

6.3.1. Considerações gerais – configurações estrutural e física do piso

O objetivo essencial de um piso é atuar como uma superfície de distribuição de cargas. A construção de uma laje de piso é geralmente em concreto, madeira ou composição de

aço e concreto (pisos em “deck” metálico e enchimento de concreto) e normalmente recebe algum material de acabamento e mobília (contrapisos, carpetes, revestimentos de madeira, ou similar). Há poucas evidências de que acabamentos tenham muita influência em problemas de vibração, exceto através de resultados alcançados pelo aumento da massa. Contudo, é possível um aumento adicional no amortecimento do piso e da carga impulsiva aplicada através do acabamento apropriado. A percepção dos usuários, em relação ao conforto acústico e de caminhar, está geralmente ligada ao grau de maciez dos acabamentos, entretanto essa percepção nem sempre é diretamente proporcional aos resultados estruturais proporcionados por cada material.

Um parâmetro de rigidez da forma, k_L , pode ser considerado como auxílio na apreciação da importância da rigidez da laje.

$$k_L = \frac{EI_1}{L_e^4} \quad (6.5)$$

onde EI_1 é a rigidez à flexão por unidade de comprimento e L_e é o vão efetivo a ser considerado. A rigidez real da laje sob carga distribuída seria obtida pela multiplicação do parâmetro de rigidez por um coeficiente dependente das condições de apoio e da distribuição de carga. Considerando o vão entre as vigas de piso adjacentes, de modo que o vão efetivo L_e é posto igual ao espaçamento entre vigas, b , o parâmetro de rigidez resulta na faixa de 30 – 100 kN/m^3 . Por outro lado, considerando a habilidade da laje para suportar carga além da largura total da faixa de área, $L_e = W$ (TAB.6.2), este parâmetro, k_L , muito raramente excede 1 kN/m^3 . Para faixas largas de área contínuas além de 8 vigas de piso, por exemplo, este parâmetro será menor que 0,01 kN/m^3 . O parâmetro de rigidez k_{vg} , para as vigas de piso, está tipicamente na faixa 1 – 10 kN/m^3 e é dado por:

$$k_{vg} = \frac{EI}{bL^4} \quad (6.6)$$

onde EI é a rigidez à flexão por unidade de comprimento, b é o espaçamento entre vigas de piso e L é o vão das vigas de piso.

A rigidez relativa da laje e das vigas de piso indicado por estes parâmetros tem como consequência, que sob um carregamento distribuído global, a deflexão da laje entre vigas é relativamente pequena. A laje é também suficiente para fornecer resistência significativa para a deflexão diferencial das vigas de piso. Embora esse comportamento como descrito não se distancie do conceito básico de que o caminho da carga dominante, nas lajes, é via vigas de piso, como se fosse um vão numa única direção.

O resultado líquido, em termos de ação dinâmica, é que o piso se comporta, fortemente como uma placa ortotrópica (apresenta comportamento diferente nas duas direções) e uma faixa contendo uma ou duas vigas de piso pode ser considerada como a unidade estrutural dominante quando se considera vibração devido à caminhada.

Quando unidades pré-moldadas, que apresentam furos na altura (no núcleo), são requeridas para mobilizar a ação mista (composta) das vigas de apoio, então as extremidades das unidades deveriam ser chanfradas (entalhadas) e uma armadura de ligação suplementar usada em conjunção com uma camada de concreto “in loco” deveria ser fornecida. A implementação dessas medidas terão, em adição, um efeito de enrijecimento da laje de piso de modo que o sistema de piso tenderá a atuar como uma placa ortotrópica.

Contrariamente, se pisos pré-moldados de construção seca são usados sem que tais medidas sejam tomadas, as vigas de apoio (vigas de piso) não deveriam ser consideradas atuando de maneira mista (composta) com a laje. Nem se deveria assumir as lajes contribuindo na redução de qualquer deflexão diferencial entre vigas ou distribuindo qualquer efeito local. Conseqüentemente, esta forma de construção, por falta de rigidez, contribui somente com sua massa para as características de vibração do piso como um todo.

Para vãos muito longos, ou onde padrões muito altos são requeridos, o sistema de piso pode compreender vigas com características de rigidez comparáveis nas duas direções ortogonais, constituindo um vão efetivo nas duas direções, e em conseqüência, aproximadamente um sistema dinâmico isotrópico. Submetida às limitações acima sobre a deflexão da laje entre vigas, esta mobiliza o piso completo para resistir à excitação dinâmica e, assim, constitui-se uma configuração muito favorável.

As vigas do piso, muito freqüentemente, estarão apoiadas nas vigas principais, as quais pertencem ao esqueleto da estrutura principal da construção. A deflexão adicional resultante, sob um carregamento distribuído global pode ser comparável à deflexão da viga de piso entre vigas principais.

Deve ser notado que os níveis toleráveis de tensão e deflexão, na resposta dinâmica, são baixos. As amplitudes típicas de tensão são menos que 1% das tensões de projeto estático, de modo que condições convencionais de projeto para apoios simples não irão atuar, geralmente na prática, como tais em situações dinâmicas. Grandes áreas de piso podem então atuar como se fossem estruturalmente contínuas.

A maior continuidade estrutural efetiva, sob carregamento dinâmico, faz com que a rigidez da coluna contribua comumente com restrição de extremidade, de forma significativa, mesmo quando as ligações da viga sejam projetadas de modo a serem consideradas como liberando a rotação. A rigidez da coluna será provavelmente significativa em construções altas. Uma análise adequada pode ser comumente alcançada por um procedimento de substituição por pórticos equivalentes.

6.3.2. Parâmetros dinâmicos e resposta dinâmica

6.3.2.1. Introdução

O modelo clássico de sistema dinâmico é caracterizado por uma massa, uma rigidez e um amortecedor. Por uma conveniência matemática, o amortecedor é normalmente

imaginado desenvolvendo uma força oposta à direção do movimento, proporcionalmente à velocidade. Exceto em casos muito raros, onde algum amortecedor identificado tenha sido calibrado para atacar um problema oscilatório específico, pisos reais não incorporam tais elementos. Não obstante, haverá algumas situações nas quais a energia é dissipada no processo de oscilação. Isso acontece geralmente através do atrito, que comumente depende de componentes não estruturais como as divisórias. A ocupação humana também adiciona amortecimento, embora necessite de uma alta densidade de ocupação para ter algum efeito substancial sobre o piso com laje de concreto ou mista. Este efeito é mais evidente onde alta densidade de ocupação é combinada com pouca massa, como numa sala de escola com piso em madeira.

O amortecimento é, em geral, reconhecido como uma propriedade global, mais diretamente medido e expresso pelo decremento logarítmico do decaimento da vibração livre, após cessada a força de excitação. Para níveis de amortecimento, pequenos ou moderados, inerentes às estruturas de engenharia, um decremento logarítmico de, por exemplo, 0,2 significa que a amplitude cai de 20% em cada ciclo sucessivo.

$$\delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (6.7)$$

onde δ é o decremento logarítmico, x é decaimento da vibração e ζ é a taxa de amortecimento. Uma outra alternativa para medir o amortecimento é a taxa de amortecimento, ou fração do amortecimento crítico.

$$\zeta = \frac{c}{c_r} \quad (6.8)$$

onde ζ é a taxa de amortecimento (fração do amortecimento em relação ao valor crítico), c é o coeficiente de amortecimento e c_r é o coeficiente de amortecimento crítico.

Para um sistema massa/mola/amortecedor, de um grau de liberdade, em vibração livre, a frequência de oscilação é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6.9)$$

onde f é a frequência, k é a rigidez da mola e m é a massa. O amortecimento tem pouco efeito sobre a frequência natural, ou vice-versa. Utilizando o valor da rigidez (k) em função da deflexão estática causada pela massa (m) (FIG.6.12), tem-se:

$$y_w = \frac{mg}{k} \quad (6.10)$$

resultando para a frequência natural:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{y_w}} \quad (6.11)$$

onde y_w é a deflexão estática e g é a aceleração da gravidade. A deflexão de peso próprio é uma quantidade que o engenheiro pode geralmente caracterizar com boa aproximação, sem a necessidade de cálculos detalhados. Além de ser um parâmetro que segue uma forma padrão como uma função do vão para qualquer forma estrutural dada. Esta equação oferece, então, uma aproximação geral valiosa para avaliar frequências e mostrar que procedimentos de projeto estáticos convencionais, que impõem limite sobre y_w , realmente restringem muito o valor que resultará para a frequência natural.

Para sistemas com vários graus de liberdade, como uma viga com massa distribuída continuamente, existirá uma série de frequências naturais, cada frequência associada com sua própria forma modal. As frequências e os modos naturais de vibração de um sistema genérico de n graus de liberdade são calculados a partir do problema de autovalor definido por:

$$(\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{M})\underline{\phi} = 0 \quad (6.12)$$

Este problema gera n pares de valores (ω_i^2, ϕ_i) , onde para cada auto-valor (frequência circular, ω_i) existe um auto-vetor correspondente associado (modo normal de vibração ou forma modal, ϕ_i).

O modo com frequência mais baixa é o modo fundamental e tem a forma mais simples (FIG.6.15). Para muitos problemas de vigas e placas, a deflexão estática y_w , na equação da frequência, para sistemas com um grau de liberdade, deve ser tomada como cerca de 3/4 do máximo valor da deflexão de peso próprio.

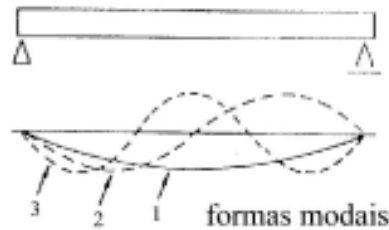


FIGURA 6.15 – Formas modais de uma viga

FONTE – OHLSSON, 1982

Para uma viga contínua, maiores cuidados devem ser tomados nessa aproximação. As cargas inerciais atuam no sentido mostrado na figura 6.16 e aumentam as deflexões, enquanto que no processo estático, os efeitos do peso próprio sobre vãos adjacentes se combinam para reduzir as tensões e as deflexões correspondentes (FIG.6.17). Portanto, se construções contínuas com vãos uniformes de comprimentos muito próximos, submetidos a forças de excitação dinâmica, forem projetadas pelo critério estático, podem apresentar uma frequência fundamental significativamente mais baixa que aquela para estruturas simplesmente apoiadas. Para o enfoque da deflexão de peso próprio, cargas efetivas de peso próprio deveriam ser aplicadas em vãos alternados, na direção para cima.

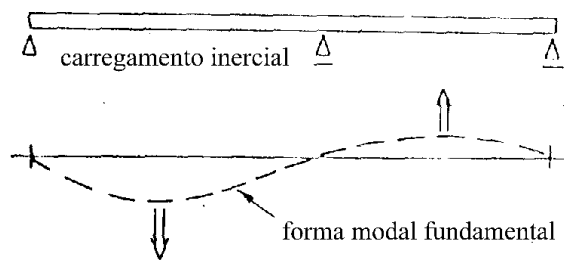


FIGURA 6.16 – Sentido da forças inerciais em uma viga contínua
(problema dinâmico)

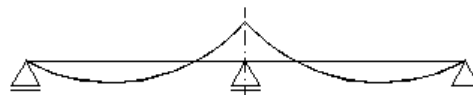


FIGURA 6.17 – Viga contínua com atuação das cargas
(problema estático)

Para cada modo é possível estabelecer uma massa e rigidez efetivas, as quais podem ser usadas, em geral, da mesma maneira como a massa e a rigidez de um sistema de um grau de liberdade (massa/mola/amortecedor). Esses valores são referidos como valores modais generalizados. A massa modal generalizada para cada modo de uma viga biapoiada é metade da massa real. Para placas e vigas contínuas, a fração é menor, porém a massa efetiva de um sistema de vigas contínuas pode ser ainda maior que de uma estrutura biapoiada correspondente, porque o fator é aplicável à massa total em movimento, isto é, para todos os vãos. (massa mobilizada no movimento)

6.3.2.2. Resposta estrutural dinâmica

a) Cargas impulsivas

É importante notar as soluções analíticas para duas classes de cargas de excitação: os carregamentos impulsivos e os carregamentos harmônicos (variação senoidal com o tempo). Em ambos os casos o movimento é aproximadamente uma função senoidal do

tempo, na frequência de vibração livre e na frequência de carregamento respectivamente. A amplitude é o valor de pico no ciclo corrente, e a envoltória da resposta é a curva pontilhada indicada pelos valores de pico (FIG. 6.18).

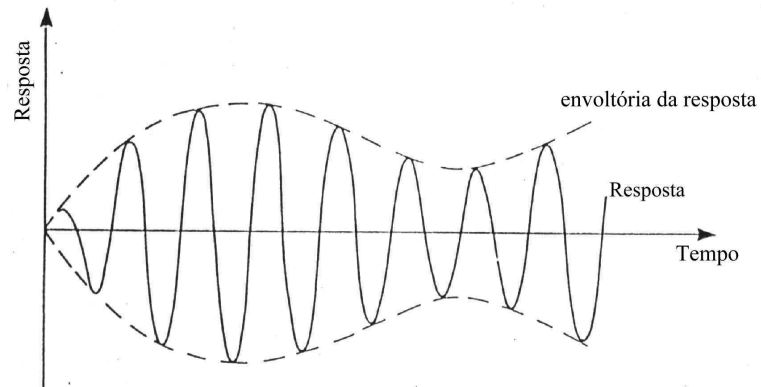


FIGURA 6.18 – Definição da envoltória da resposta
 FONTE – OHLSSON, 1982

O impulso (J) é definido como a mudança do momento produzido, em geral, por uma força de curta duração (F).

$$J = F\Delta t \quad (6.13)$$

Para um sistema de um grau de liberdade, a resposta estrutural para um impulso de curta duração pode ser obtida como a seguir.

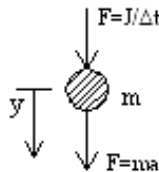


FIGURA 6.19 – Esquema de uma massa (m) em vibração

Da equação 6.13, tem-se:

$$F = \frac{J}{\Delta t} \quad (6.14)$$

sendo:

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (6.15)$$

e,

$$\frac{J}{m} = \Delta v \quad (6.16)$$

onde J é o impulso, F é a força de curta duração, t é o tempo, m é a massa, a é a aceleração e v é a velocidade. A frequência natural circular, w, é dada por:

$$w = 2\pi f \quad (6.17)$$

Durante o período de atuação do impulso, a massa adquire velocidade (Δv). Após isso, cessada a atuação da força (F), a massa (m) estará em vibração livre e, ignorando a atenuação devida ao amortecimento, o deslocamento (y) pode ser escrito em termos da amplitude inicial (\bar{y}),

$$y = \bar{y} \sin wt = \bar{y} \sin(2\pi f t) \quad (6.18)$$

onde w é a frequência natural circular, t é o tempo e f é a frequência

É importante notar que essa é a resposta para um sistema em vibração livre não amortecida (movimento harmônico). Diferenciando a equação de deslocamento (EQ.6.18), a velocidade máxima é obtida como:

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = 2\pi f \tilde{y} \cos(2\pi f t) \quad (6.19)$$

onde $2\pi f \tilde{y}$ é a amplitude da velocidade, ou seja, a velocidade máxima. Comparando esse termo à equação 6.16, obtém-se:

$$\tilde{y} = \frac{J}{2\pi fm} \quad (6.20)$$

onde \tilde{y} é a amplitude inicial, J é o impulso, f é a frequência e m é a massa.

Um piso simples (laje simplesmente apoiada de vão único) apresenta um comportamento dinâmico semelhante ao de uma placa ortotrópica, apresentando uma família de modos de vibração. A resposta total pode ser obtida pela soma da resposta de cada modo, a partir da solução determinada para uma resposta impulsiva simples, mostrada anteriormente.

b) Cargas harmônicas

A resposta do estado permanente para carga harmônica é dada por:

$$y_{perm} = y \text{sen}(wt - \theta) \quad (6.21)$$

sendo,

$$y = \frac{P}{\sqrt{(k - mw^2)^2 + (cw)^2}} \quad (6.22)$$

onde y_{perm} é a amplitude da deflexão do estado permanente, y é a deflexão, w é a frequência natural circular, t é o tempo e θ é o ângulo de fase. A resposta permanente pode ser dada também, a partir da equação 6.21, por:

$$y_{perm} = \frac{y_{est} \text{sen}(wt - \theta)}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (6.23)$$

sendo,

$$y_{est} = \frac{P}{k} \quad (6.24)$$

e,

$$r = \frac{f}{f_0} \quad (6.25)$$

e,

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (6.8)$$

onde y_{est} é a amplitude da deflexão causada pela força de excitação, P é a amplitude da força, k é a rigidez, f é a freqüência da força de excitação, f_0 é a freqüência natural, r é a razão entre freqüências e ζ é a taxa de amortecimento.

A razão entre a amplitude da deflexão do estado permanente (y_{perm}) e a deflexão estática (y_{est}) é conhecida como fator de amplificação dinâmica, e é calculada pela relação:

$$FAD = \frac{y}{y_{est}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\zeta)^2}} \quad (6.26)$$

Com a definição do fator de amplificação dinâmica (FAD), a equação 6.23 pode ser escrita como:

$$y_{perm} = y_{est} \times FAD \times \text{sen}(wt - \theta) = \frac{P}{k} \times FAD \times \text{sen}(wt - \theta) \quad (6.27)$$

Assim, a amplitude de deslocamento para o estado permanente de movimento é dada por:

$$\tilde{y} = \frac{\tilde{P}}{k} \times FAD \quad (6.28)$$

onde \tilde{P} é a amplitude da força de excitação, FAD é o fator de amplificação dinâmica e k é a rigidez. Na ressonância, quando r igual a 1, o fator de amplificação dinâmica é inversamente proporcional à taxa de amortecimento (FIG.6.20) e tem-se:

$$FAD(r = 1) = \frac{1}{2\zeta} = \frac{0.5}{\zeta} \quad (6.29)$$

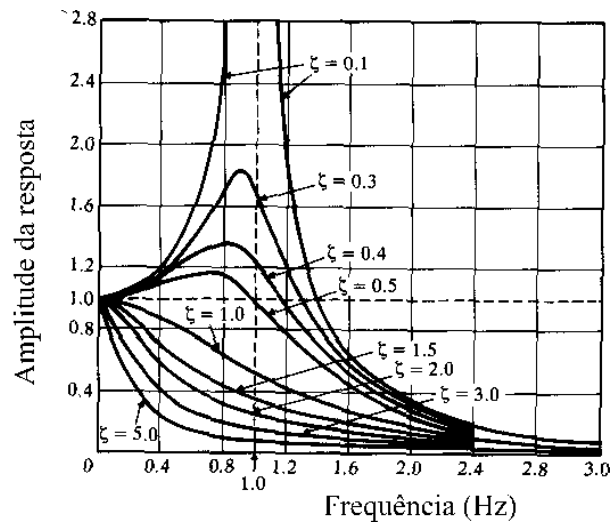


FIGURA 6.20 – Variação do fator de amplificação dinâmica em função da frequência

6.3.3. Avaliação da frequência natural

6.3.3.1. Frequências do sistema e dos componentes

Um piso é constituído geralmente por três componentes elásticos: uma laje mista ou de concreto, as vigas do piso e as vigas principais. Estes componentes são basicamente ligados em série e para a avaliação das deflexões estáticas é apropriado considerar cada

componente separadamente e estimar a deflexão total como a soma das deflexões dos componentes. Uma divisão semelhante pode ser útil para análise dinâmica, mas com grande prudência porque as interações entre as deformações dos componentes são comumente mais sutis.

As freqüências do piso são uma propriedade da estrutura montada e em princípio, cada modo envolve movimento de todas as partes do sistema. Contudo, uma idealização das freqüências naturais dos componentes pode ser definida, compreendendo:

- a) a freqüência de oscilação da laje, supondo nenhuma deflexão das vigas de piso;
- b) a freqüência das vigas de piso, supondo nenhuma deflexão das vigas principais e que uma massa associada com uma faixa da laje, de largura igual ao espaçamento das vigas de piso, se move com cada viga.
- c) a freqüência das vigas principais, assumindo que o movimento do piso corresponde somente à deflexão das vigas principais.

As freqüências dos componentes podem ser usadas para uma avaliação aproximada da freqüência fundamental do sistema total de piso pelo método de Dunkerly (RAD, 1995),

$$\frac{1}{f_0^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} \quad (6.30)$$

onde f_0 é a freqüência fundamental do sistema e f_1 , f_2 e f_3 são as freqüências dos componentes.

Com o conhecimento prático da engenharia relativo à condições de contorno, a aplicação deste procedimento pode dar uma boa estimativa para o valor calculado para as freqüências. As condições de apoio assumidas para cada componente devem ser compatíveis com o conceito de “carga de inércia”, a qual atua na direção da deflexão total do sistema. Considerando-se o piso da figura 6.21, tendo vigas principais rígidas, a

interação das vigas de piso e da laje daria, normalmente, um modo fundamental do sistema como mostrado na figura 6.22.

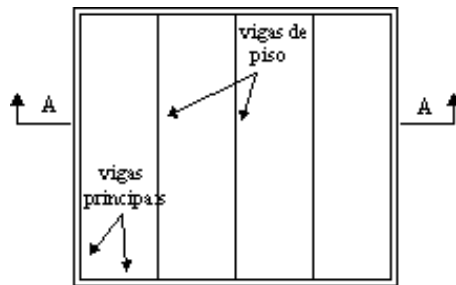


FIGURA 6.21 – Distribuição esquemática do vigamento



FIGURA 6.22 – Interação dos elementos de piso

- a) Interação viga do piso e laje
- b) Somente a laje

Deve-se verificar também a interação entre as vigas de piso e as vigas principais, sendo necessário esboçar diferentes possibilidades. A solução válida é a combinação dando o menor valor de f_0 , dadas as hipóteses compatíveis para as condições de apoio de cada combinação. Pode ser visto da equação de Dunkerly que o resultado não é especialmente sensível às interações. Qualquer frequência do componente que é mais que duas vezes a menor componente, tem pouco efeito.

Relembrando os comentários feitos sobre a rigidez relativa (item 6.3.1), mais a relação existente entre rigidez e frequência, percebe-se que a frequência da componente da laje mista tem pouca influência sobre a frequência fundamental do piso. A componente de frequência para a viga de piso está restringida (como uma função do vão) em projetos convencionais pela aplicação de limites ou sobre a relação vão/altura da viga, em combinação com tensões normais de projeto. Contudo, esses limites estão baseados principalmente na carga móvel, enquanto o fator dominante para a frequência natural é a rigidez em relação a massa ou ao peso próprio.

Existe também uma tendência lógica para uma especificação de carregamentos móveis elevados resultarem, relativamente, em altas frequências naturais, porque a rigidez da viga aumenta, de modo a atender o limite imposto sobre a flecha, numa proporção maior que o aumento correspondente na massa posta em oscilação (EQ.6.9). Como o arranjo das vigas principais e a forma estrutural variam enormemente de construção para construção, a importância da componente de frequência da viga principal é variável, podendo ser desprezível ou ser semelhante àquela das vigas de piso.

6.3.3.2. Avaliação prática

Quatro níveis de aproximação para avaliar as frequências naturais podem ser discutidos:

a) A partir da estimativa global da deflexão de peso próprio

Neste caso, considerando a equação 6.11,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{y_w}} \quad (6.11)$$

e tomando a deflexão estática como:

$$y_w = \frac{3}{4} y_0 \quad (6.31)$$

onde y_w é a deflexão estática, y_0 é o máximo valor da deflexão de peso próprio, f é a frequência e g é a aceleração da gravidade, obtém-se a frequência natural f ,

$$f = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \quad (6.32)$$

com y_0 dado em mm. Este método provavelmente será suficiente para se estimar a frequência fundamental de sistemas de piso consistindo de uma laje e vigas de piso apoiadas sobre vigas principais rígidas.

b) A partir de uma combinação das frequências dos componentes estimados da deflexão de peso próprio ou de fórmula de frequência tabelada

Essa segunda aproximação certamente será útil onde exista uma interação significativa com as deflexões das vigas principais, especialmente onde isto resulta numa forma do modo fundamental com deflexões significativas nas faixas de área seguintes (pisos contínuos). Em tais casos, um esboço cuidadoso da forma modal é recomendado. Se as frequências dos componentes são estimadas pelo método da deflexão do peso próprio, este se torna efetivamente o mesmo daquele obtido pelo método da deflexão do peso próprio global.

Em alguns casos, a solução analítica para a frequência natural de vigas uniformes pode ser usada. Isto geralmente é preferível quando se tem vigas contínuas regulares. A solução analítica é dada por:

$$f = C_B \left(\frac{EI}{mL^4} \right)^{1/2} \quad (6.33)$$

onde m é a massa por unidade de comprimento em (t/m) se a rigidez à flexão, EI , é dada em (kNm^2), ou se a massa é dada em (kg/m), a rigidez à flexão, EI , é dada em (Nm^2); L é o vão (m) – para vigas contínuas pegar o maior vão, C_B é o fator de frequência – função da relação entre vãos.

A frequência fundamental do sistema é calculada a partir das frequências das componentes, pela expressão:

$$f_0 = \frac{1}{\left(\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2}\right)^{1/2}} \quad (6.34)$$

Valores de C_B para vigas biapoiadas com várias condições de apoio e para vigas contínuas são dadas pelo “*Design guide on the vibration of floors*” .

c) Pela aplicação iterativa da análise estática, usando um programa de análise estática comum.

Onde o arranjo não é suficientemente regular para permitir uma idealização de componentes de viga uniforme atuando em séries e/ou uma ilustração conveniente da forma modal fundamental não pode ser obtida por um simples julgamento, a forma do modo fundamental pode ser encontrada por sucessivas aproximações usando rotinas de análise estática.

O objetivo é descobrir uma distribuição de carregamentos, q , produzindo deflexões, y , tal que o produto $y.m$ seja da mesma proporção da carga q em todos os pontos. As cargas q e as massas m podem ser pensadas como variáveis contínuas ou funções das coordenadas definindo posições no piso, ou podem ser discretizadas como um conjunto de cargas pontuais e correspondentes massas discretas (FIG.6.23).

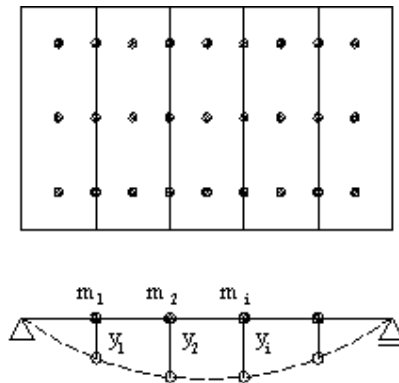


FIGURA 6.23 – Esquema de massas – piso discretizado

Neste caso, pode-se usar a seguinte sistemática de cálculo:

- 1) determina-se a massa discreta m_i
- 2) estima-se y_i (estimativa inicial)
- 3) calcula-se $q_i = m_i y_i^i$
- 4) com q_i calcula-se y^{i+1} de $ky^{i+1} = Pq_i$
- 5) com o novo $y(y^{i+1})$, estima-se uma nova carga
- 6) para-se quando y^{i+1}/y_0 , para todos os pontos, altere o valor para menos que 0,1 (10%) em um ciclo do processo de iteração (onde y_0 é o maior valor)
- 7) calcula-se a frequência através da equação 6.39

O parâmetro P é uma constante de proporcionalidade arbitrária, no estágio inicial, de modo que as cargas podem ser escritas como Pq_i , onde P é um valor conveniente (por exemplo 1kN) e q_i são coeficientes adimensionais expressando a variação de acordo com a variação do objetivo final $m_i y_i$. Se P for expresso em kN, então m deve ser expresso em tonelada e y em metro, ou N, kg e m (FIG.6.24). A figura 6.24 mostra um sistema massa/mola, cuja massa está submetida à ação da gravidade e à ação da força elástica.

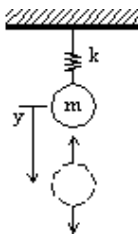


FIGURA 6.24 – Conjunto massa-mola

Será usado esse sistema para se deduzir a equação que permite calcular a frequência com o procedimento de cálculo exposto anteriormente,

$$ky = mg = Pq \quad (6.35)$$

sendo,

$$k = \frac{Pq}{y} \quad (6.36)$$

e,

$$g = \frac{Pq}{m} \quad (6.37)$$

obtém-se:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{Pq}{ym} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\pi my} \left(\frac{Pqy}{my^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.38)$$

Para um elemento discretizado, fica-se com o seguinte valor da frequência:

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{P \sum q_i y_i}{\sum m_i y_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.39)$$

d) Usando um programa de análise dinâmica em elementos finitos.

As frequências e os modos naturais de vibração podem ser determinadas usando programas de análise dinâmica baseados no método de elementos finitos, por exemplo, contendo rotinas para solução do problema de auto-valor dinâmico. Existem vários “softwares” comerciais conhecidos, contendo rotinas para cálculo do problema de auto-valor, entre eles pode-se citar ANSYS (1982) e LUSAS ([http\\www.feauk.com](http://www.feauk.com)).

6.3.4. Resposta dinâmica para vibração de pisos

6.3.4.1. Pisos de baixa frequência

Quando qualquer pessoa caminha por qualquer piso, uma descrição completa da resposta da estrutura inevitavelmente envolve efeitos dinâmicos, pois o processo básico

de caminhada produz forças que variam ao longo de cada passo. A probabilidade de que o piso seja fortemente ortotrópico e tenha uma família básica de modos compartilhando as propriedades de formas modais similares ao longo da direção paralela às vigas de piso, identifica um evento potencialmente crítico quando uma pessoa caminha a passadas constantes, paralelas às vigas de piso. Isso pode ocorrer, especialmente quando um pequeno múltiplo (por exemplo, menor que 4) da frequência do passo se torna próximo da faixa de frequências da família básica de modos. A componente de Fourier da força do passo correspondente dará uma resposta ressonante ou quase ressonante. A entrada modal efetiva varia com a localização da pessoa, em proporção à forma modal naquela posição e, então, tipicamente aumenta à medida que a pessoa caminha no piso, atingindo um máximo quando se está próximo ao meio do vão e, em seguida, há um decaimento. Com valores práticos de amortecimento estrutural e a pessoa caminhando a 0,8 m por passo, a resposta máxima ocorrerá a um pequeno número de passos após a passagem do meio do vão, e cerca de 10 passos terão sido aplicados. Se o piso tem uma frequência ressonante entre 4,8 Hz e 7 Hz, isto é, susceptível à terceira componente de Fourier da carga de passo, o mesmo será submetido a alguns 30 ciclos daquela componente. Isto seria suficiente para gerar uma resposta muito próxima àquela da resposta do estado permanente para uma força senoidal de dada amplitude, aplicada continuamente no meio do vão.

A resposta do estado permanente para excitação harmônica, y_{perm} , e a amplitude do deslocamento, \tilde{y} , são dadas por:

$$y_{perm} = \frac{P_0}{k} \times FAD \times \text{sen}(wt - \theta) = \tilde{y} \text{sen}(wt - \theta) \quad (6.40)$$

sendo,

$$\tilde{y} = \frac{P_0}{k} FAD \quad (6.41)$$

onde P_0 é a amplitude da força de excitação, k é a rigidez, FAD é o fator de amplificação dinâmica, w é a frequência natural circular ($w = 2\pi f$), t é o tempo, θ é o ângulo de fase.

Na ressonância, o fator de amplificação (FAD) é inversamente proporcional à taxa de amortecimento ζ , como mostrado na equação 6.26. Portanto, a amplitude do deslocamento é:

$$\tilde{y} = \frac{\tilde{P}}{k} \times \frac{1}{2\zeta} \quad (6.42)$$

onde \tilde{P} , para o problema de vibração de pisos, é a amplitude da componente quase ressonante, de Fourier, da força descritiva do passo. Retomando a resposta do estado permanente:

$$y_{perm} = \tilde{y} \sin(\omega t) = \tilde{y} \sin(2\pi f t) \quad (6.18)$$

e derivando, em relação ao tempo, obtém-se:

$$\dot{y}_{perm} = 2\pi f \tilde{y} \cos(2\pi f t) = V \quad (6.19)$$

onde V corresponde à resposta em velocidade. Derivando-se mais uma vez, encontra-se finalmente a resposta dinâmica em aceleração:

$$\ddot{y}_{perm} = -4\pi^2 f^2 \tilde{y} \sin(2\pi f t) = a \quad (6.43)$$

onde a é a aceleração. Assim, a amplitude da aceleração vale:

$$\tilde{a} = 4\pi^2 f^2 \tilde{y} \quad (6.44)$$

Como,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6.9)$$

e,

$$k = 4\pi^2 f^2 m, \quad (6.45)$$

onde m é a massa do sistema massa/mola/amortecedor, que está sendo usado como modelo para o estudo do problema de vibração de pisos. Sendo assim, M (massa modal efetiva) substitui m na equação 6.45, passando a representar a massa do piso que é colocada em movimento. Então, a rigidez, em termos da massa modal efetiva, é dada por:

$$k = 4\pi^2 f^2 M \quad (6.46)$$

onde M é a massa modal efetiva e f é a frequência. Com isso, a amplitude da aceleração se torna:

$$\tilde{a} = 4\pi^2 f^2 \times \frac{\tilde{P}}{k} \times \frac{1}{2\zeta} = 4\pi^2 f^2 \times \frac{\tilde{P}}{4\pi^2 f^2 M} \times \frac{1}{2\zeta} = \frac{\tilde{P}}{M} \times \frac{1}{2\zeta} \quad (6.47)$$

A massa modal efetiva, massa mobilizada na vibração para uma dada frequência e forma modal de vibração, é dada por:

$$M = mWL \quad (6.48)$$

onde m é a massa por unidade de área do piso, L é o vão da viga de piso e W é a largura da faixa de área que será mobilizada no movimento. Desse modo, a amplitude da aceleração, após a inclusão de um fator de correção C_s , é dada por:

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{P}}{mWL} \times \frac{1}{2\zeta} \times C_s \quad (6.49)$$

comparando as equações 6.47 e 6.49, pode-se definir o fator de correção C_s por:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{M}{mwL} \quad (6.50)$$

onde C_s é o fator que leva em conta a razão da massa modal efetiva, M , para o valor mWL além da interação dos modos da família básica dos modos. Na verdade, C_s é um fator que corrige o valor da massa modal efetiva calculada por mWL e a ocorrência da interação entre os modos.

A largura de faixa, W , é difícil de se definir de maneira rigorosa e concisa, porém o objetivo para se trabalhar com W é muito simples: definir a massa que deve ser significativamente posta em movimento na vibração do piso pela força de excitação devida ao passo. A largura de faixa definida é muito comumente maior do que o retângulo delimitado pelas linhas das colunas adjacentes. O acoplamento do movimento das vigas de piso claramente depende da rigidez relativa da laje.

Para pisos de proporções convencionais, o acoplamento será efetivamente interrompido por uma viga de piso que possua rigidez duas vezes e meia (2,5) maior que aquela da vizinhança. Deve ser notado que a rigidez efetiva comumente varia entre vigas adjacentes devido aos apoios elásticos sobre as vigas principais em comparação com o apoio direto em colunas.

Para largura de faixa de pisos básicos, a qual se aproxima de uma placa ortotrópica simplesmente apoiada, a massa generalizada (efetiva) é aproximadamente $\frac{1}{4} mWL$. Assim:

$$M = \frac{1}{4} mWL \quad (6.51)$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{M}{mWL} = \frac{1}{4} \quad (6.52)$$

e desse modo obtém-se $C_s = 4$.

Se a largura de faixa é aproximadamente quadrada e o piso constitui-se de rigidezes convencionais para as vigas e a laje, a interação entre os modos é fraca, então $C_s \approx 4$.

Para entender melhor esses valores, vale a pena descrever o comportamento de uma placa ortotrópica. O modo fundamental se assemelha, em ambas as direções, às formas modais das vigas correspondentes. Este princípio se aplica também aos modos superiores. Porém, se a rigidez é altamente ortotrópica, a direção “fraca” de deformações (menos rígida) tem relativamente pouco efeito sobre a frequência, e uma família básica de modos retendo a forma fundamental na direção “forte” pode ocorrer para frequências muito próximas (FIG.6.25).

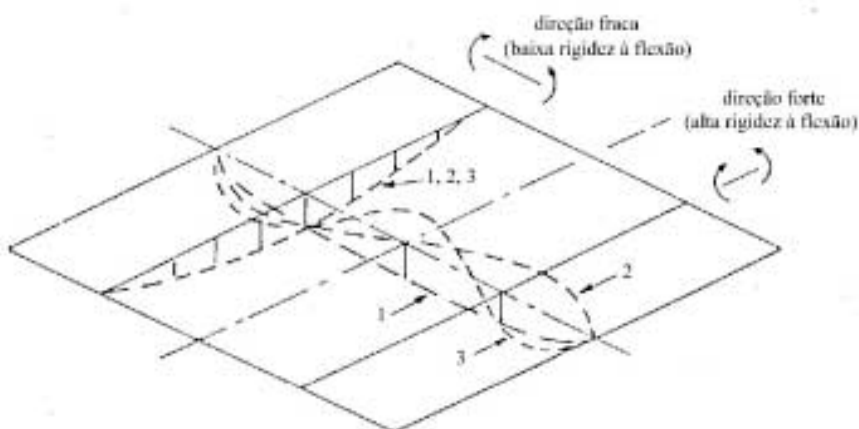


FIGURA 6.25 – Placa ortotrópica simplesmente apoiada nos quatro lados

FONTE – OHLSSON, 1982

Para faixas mais largas, a diferença de frequências entre os modos, modos 1, 2 e 3 (FIG.6.25), se torna muito pequena, de modo que uma amplificação dinâmica significativa pode ocorrer em mais de um modo. Assim, o valor de C_s é aumentado.

Um estudo paramétrico limitado à resposta do estado permanente para pisos de proporções convencionais sugere que a massa efetiva de placas ortotrópicas largas, simplesmente apoiadas, seja aproximadamente:

$$M = \frac{1}{4}mSL \quad (6.53)$$

onde a largura efetiva, S , pode ser calculada como uma função das rigidezes relativas ortogonais à flexão. Isto foi generalizado para casos onde as rigidezes reais das vigas de piso precisam ser modificadas de acordo com as suas condições de apoio, substituindo sua rigidez por $k = 4\pi^2 f_0^2 M$ (de acordo com equação 6.45), ou seja, para que o cálculo da rigidez não ficasse condicionado ao tipo de condição de apoio, o seu valor foi obtido em função da frequência. Desse modo, a influência da condição de apoio será levada em conta no cálculo da frequência natural.

As condições de apoio e continuidade da viga de piso também podem afetar diretamente a massa efetiva por colocar em movimento mais de um vão da viga de piso. Isto pode ocorrer de duas maneiras:

a) as vigas de piso podem ser contínuas de maneira que o modo de vibração fundamental toma a forma apresentada na figura 6.17.

Com dois vãos iguais, as deflexões dos dois vãos são iguais em valor e a massa efetiva é dobrada. Se a massa efetiva é dobrada (mWL), percebe-se pela equação 6.54, que a amplitude da aceleração reduz-se à metade.

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{P}}{mWL} \times \frac{C_s}{2\zeta} \quad (6.54)$$

Este efeito, contudo, se reduz rapidamente se os vãos são de comprimento desiguais. Para levar em conta essa redução, o procedimento de projeto, dado no item 6.4, pressupõe o valor para redução de 0,6 (=1/1,7), desde que o vão adjunto não seja menor que 0,8L (ver o caso 2 da tabela 6.2). De fato, ao invés de $\frac{1}{2} = 0,5$, o valor passa a ser $1/1,7 = 0,6$, o que significa que o valor do comprimento efetivo ao invés de 2L se reduz para 1,7L.

b) Alternativamente, as vigas principais podem ser suficientemente flexíveis de modo que o modo fundamental tenha deflexões similares em ambos os vãos da viga de piso. Um aumento similar na massa efetiva é aplicável. Esta condição só se aplica, geralmente, quando a disposição (“*lay out*”) das colunas for selecionada de modo a proporcionar vãos longos em ambas as direções. Em qualquer dos casos, a ou b, a continuidade da viga de piso é levada em conta no item 6.4, através de um parâmetro de comprimento efetivo, L_e (ver o caso 3 da tabela 6.2).

As componentes de Fourier da força descritiva do passo são identificáveis até a terceira (frequência até cerca de 7 Hz), porém com a amplitude diminuindo aproximadamente em proporção inversa as suas respectivas frequências (FIG.6.12); e a curva de reação (ou de critério) para a aceleração é horizontal até cerca de 8 Hz (FIG.6.14). Assim, o critério de reação para oscilações contínuas provocadas por passadas regulares (caminhada) se torna altamente onerosa na faixa de frequência entre 4,8 e 7 Hz (terceira componente de frequência), faixa de frequência pertencente ao patamar horizontal da curva de reação. Uma frequência natural na faixa de 4 a 4,8 Hz é particularmente provável de resultar em resposta perceptível à caminhada. Pode ser visto que para uma dada frequência natural, este critério conduz, de fato, a uma participação da massa do piso para um valor mínimo aceitável, ou seja, valor mínimo para o qual, abaixo dele, a amplitude de resposta aumenta, ficando, portanto, além do nível aceitável. Contudo, deve ser notado que um aumento de massa deve ser acompanhado por um aumento proporcional de rigidez se a mesma frequência natural deve ser mantida.

Regras simplificadas baseadas nessa análise são dadas no item 6.4. As dimensões S e L_e, dependentes das rigidezes ortogonais relativas, são dadas explicitamente pela incorporação de C_s = 4 dentro de um fator numérico global. Os valores base da força de excitação e o critério de percepção de aceleração foi levado em conta neste fator numérico.

O critério de resposta, em aceleração, para pisos de alta freqüência é dado pela equação:

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{P}}{mWL} \times \frac{C_s}{2\zeta} \quad (6.54)$$

onde \tilde{P} é a amplitude das componentes de Fourier da força descritiva do passo. Na figura 6.12, nota-se que as amplitudes das componentes são funções da freqüência. O valor de \tilde{P} pode ser colocado parametrizado por um fator C_f, função do valor da freqüência de excitação do piso,

$$\tilde{P} = C_f P_1 = 240 C_f \quad (6.55)$$

onde P₁ é a amplitude da componente básica de Fourier da força.

Com a massa (M) dada (EQ.6.51 e 6.52) por:

$$M = mWL = \frac{1}{4} mSL = \frac{1}{C_s} mSL \quad (6.56)$$

tem-se a aceleração dada por:

$$\tilde{a} = \frac{240 \times C_f \times 4}{mSL \times 2\zeta} = \frac{480 C_f}{mSL \zeta} \quad (6.57)$$

Adotando-se como valor limite da aceleração:

$$\tilde{a} = 0,007R \quad (6.58)$$

onde R é o fator de resposta e igualando-se as equações 6.57 e 6.58, chega-se a:

$$\frac{480C_f}{mSL\zeta} = 0,007R \quad (6.60)$$

Então, o valor de R é:

$$R = \frac{68571C_f}{mSL\zeta} \approx \frac{68000C_f}{mSL\zeta} \quad (6.61)$$

Deve ser notado que um piso de baixa frequência também responde às excitações transientes devido às batidas do calcanhar. Realmente, isto pode ser mais frequentemente percebido para pisos reais, do que o efeito ressonante discutido anteriormente. Contudo, de um ponto de vista de projeto, a ressonância define um evento mais oneroso.

6.3.4.2. Pisos de alta frequência

O comportamento descrito para pisos de baixa frequência não é visto como modelo apropriado para pisos onde a frequência natural é maior que a frequência do terceiro harmônico da série de Fourier, representativo do passo numa caminhada. Para frequências mais altas, uma excitação impulsiva pode ser considerada.

Retomando a equação 6.20, tem-se:

$$\bar{y} = \frac{J}{2\pi f M} \quad (6.20)$$

onde M é a massa efetiva, J é o impulso e f é a frequência natural. Da equação 6.18, representando o estado permanente, tem-se:

$$y = \bar{y} \text{sen}(2\pi f t) \quad (6.18)$$

Derivando-se a equação 6.18, em relação ao tempo, obtém-se a velocidade,

$$\dot{y} = \bar{y} 2\pi f \cos(2\pi f t) \quad (6.19)$$

e fazendo-se a segunda derivada, chega-se no valor da aceleração,

$$\ddot{y} = -4\pi^2 f^2 \bar{y} \text{sen}(2\pi f t) \quad (6.43)$$

onde o termo $4\pi^2 f^2 \bar{y}$ é a amplitude da aceleração. Assim,

$$\tilde{a} = 4\pi^2 f^2 \bar{y} \quad (6.44)$$

Considerando-se o valor de \bar{y} dado na equação 6.20, tem-se:

$$\tilde{a} = 4\pi^2 f^2 \frac{J}{2\pi f M} = 2\pi f \frac{J}{mbL} \quad (6.61)$$

onde M é a massa efetiva, sendo seu valor igual a mbL , b é o espaçamento entre vigas de piso e L é o vão das vigas.

Como visto na equação 6.61, a resposta a uma excitação impulsiva pode ser expressa em termos da aceleração. O efeito da continuidade lateral nessa resposta é relativamente fraco, pois o critério é baseado no primeiro pico de resposta, antes da dispersão lateral

atingir efeito substancial. É, portanto, coerente basear a equação na massa de um painel, juntamente com um coeficiente C_i , que é determinado empiricamente.

$$\tilde{a} = \frac{J}{mbL} \times 2\pi f C_i \quad (6.62)$$

onde C_i é um coeficiente de ajuste da massa efetiva, de modo a corrigir a massa do piso que é posta efetivamente em vibração.

Para painéis simples, aproximadamente quadrados no plano o valor de C_i é de aproximadamente 1,7. Embora a continuidade longitudinal da viga de piso possa ser benéfica, isto não foi explorado ao ponto de recomendações positivas poderem ser feitas. Dessa forma, é sugerido um valor padrão para todos os casos, $C_i = 1,7$.

Considerando-se o impulso do passo de 3 a 4 Ns e $C_i = 1,7$, tem-se:

$$\tilde{a} = \frac{4}{mbL} \times 2\pi f \times 1,7 = \frac{42,7}{mbL} f \quad (6.63)$$

O impulso devido a uma passada regular levaria a uma resposta passo a passo, que para cada tempo seria substancialmente amortecida durante o intervalo para o passo seguinte. Portanto, a resposta é constituída de picos, quando o calcanhar está em contato com o piso, e de valores menores durante o amortecimento, no intervalo que antecede a passada seguinte. Portanto, ao invés de se ter a resposta baseada no valor do pico da amplitude de aceleração, esse valor é reduzido de modo que a amplitude da aceleração efetiva ficaria entre 0,6 e 0,75 do valor máximo. Assim, a partir da equação 6.63 tem-se:

$$\tilde{a} = 0,6 \times \frac{42,7}{mbL} f \approx \frac{25}{mbL} f = \frac{200}{mbL} \times \frac{f}{8} \quad (6.64)$$

onde \tilde{a} é dada em m/s^2 e mbL é dado em kg.

O efeito da excitação impulsiva é mais significativo na faixa de frequências acima de 8 Hz. Portanto, de modo a amenizar esse efeito nos pisos, segundo o critério aqui adotado, é possível estabelecer um valor limite para a massa efetiva, usando o critério de reação com a frequência de 8 Hz como referência, já que a partir desse valor de frequência o nível aceitável de aceleração aumenta proporcionalmente (FIG.6.11). Assim, é calculado o valor limite da massa de modo a resultar num valor aceitável do fator de resposta (R). Com isso, tem-se que se a massa efetiva do piso for menor que esse valor limite resultará num valor maior para a aceleração, portanto num fator de resposta maior. Por outro lado, se a massa efetiva for maior que o valor limite implicará num valor menor para a aceleração e conseqüentemente para o fator de resposta. Conclui-se, portanto, que o valor limite funciona como valor de referência, em torno do qual deve estar a massa efetiva do piso. De fato, para valores elevados de massa efetiva serão encontrados valores baixos do fator de resposta, tornando o critério oneroso.

$$f = \frac{mbL}{25} \tilde{a} \leq 8 \quad (6.65)$$

Então, chega-se ao valor limite para a massa efetiva.

$$mbL \leq \frac{200}{\tilde{a}} \quad (6.66)$$

De acordo com as especificações do Reino Unido, norma BS6472 (1984), o critério de reação, em termos da aceleração, para uma frequência de 8 Hz é dado por:

$$\tilde{a} = 0,007R \quad (m/s^2) \quad (6.67)$$

Assim, tem-se:

$$mbL \leq \frac{200}{0,007R} \approx \frac{30000}{R} \quad (6.68)$$

onde R é um fator multiplicativo ou uma dada curva R selecionada (ISO 2631/1 e 2, 1985).

De acordo com a norma, o valor de R que resulta em uma aceleração aceitável é R=7. Então, com alguns arredondamentos, tem-se:

$$mbL \leq 4300 \text{ (kg)} \quad (6.69)$$

e o critério de resposta para pisos de altas frequências é dado por:

$$R = \frac{30000}{mbL} \quad (6.70)$$

6.4. Procedimentos de projeto

6.4.1. Considerações gerais

Normalmente, pisos não devem ser projetados para ter uma frequência natural menor que 3 Hz. Pisos que podem ser sujeitos a atividades rítmicas de grupo (como dança, concertos populares, exercícios) não devem ser projetados para ter frequência natural menor que 5 Hz. Todos os pisos devem ser projetados para reduzir a um nível desprezível, as possibilidades de qualquer risco de danos provocados por vibração excessiva, incluindo a possibilidade de excitação de ressonância. Essa condição pode ser encontrada, assegurando-se ligações rígidas dos elementos de piso com seus apoios e atentando-se para os requisitos gerais do comportamento dúctil nas grandes deformações. Deve-se prestar atenção, também, às ligações pesadas de qualquer elemento, que poderia cair para o andar abaixo, e à proteção dos serviços em relação aos efeitos da vibração contínua.

Quando possível, os “*lay-outs*” de piso para atividades de grupos rítmicos devem ser arranjados para minimizar a transmissão de vibração para partes do piso ocupadas por

pessoas não diretamente participantes da atividade, como por exemplo, salas de jantar próximas de pisos de dança. Onde uma avaliação quantitativa da vibração é requerida, é necessário estabelecer um procedimento detalhado que levará em conta não só a ordenada do modo de vibração no ponto de recepção, como também no ponto de excitação.

A possível percepção das vibrações pelos ocupantes em construções residenciais ou de escritórios pode ser checada através de avaliações da resposta que pode ser levantada por uma única pessoa caminhando sobre o piso. O procedimento dado para a avaliação da resposta pode também ser usado para construções com ocupação especial (laboratórios, hospitais, etc.), mas o critério de aceitação pode ser consideravelmente mais oneroso; e estreita ligação com o cliente pode ser necessária para se estabelecer tal critério.

A resposta prevista pelas equações, nos itens seguintes, pode ser localmente exagerada perto das bordas sem apoio, como nas vigas de piso em balanço ou em vigas de piso ao lado de uma área de piso que não seja dinamicamente restringida. Reservas à aplicabilidade desse procedimento, aqui descrito, a certas formas de elementos de laje foram citadas no item 6.3.

6.4.2. Procedimento de checagem da suscetibilidade de pisos

O primeiro passo é identificar os locais críticos a serem checados. Para isso, o piso é dividido em (“*bays*”) faixas de ação ou de área, cada uma representando uma área cuja massa será substancialmente mobilizada pela excitação dinâmica ressonante dentro dessa área. Se a largura de faixa de área é dinamicamente contínua com outra, a verificação pode ser baseada na largura de faixa que apresenta viga de piso com vão mais longo.

Após a definição das larguras de faixa de área, o próximo passo é estimar a frequência natural de vibração, como descrito a seguir no item 6.4.3. Quando essa frequência

natural é superior a 7 Hz, o parâmetro de resposta R deve ser avaliado de acordo com o procedimento para pisos de alta frequência natural. Quando essa frequência natural é menor que 7 Hz, o parâmetro R deve ser avaliado de acordo com o procedimento para pisos de baixa frequência natural.

Os valores aceitáveis do parâmetro R são indicados no item 6.4.6, de acordo com a função do piso. Uma aproximação flexível é desejável para garantir que o balanço correto seja mantido entre o custo da estrutura e o refinamento da qualidade ambiental no edifício. Se o valor previsto para R exceder o valor aceitável, será comumente preferível aumentar a massa do piso.

6.4.3. Estimativa da frequência natural

Antes de fazer uma avaliação numérica, um esboço deve ser feito com a provável forma(s) relevante(s) do modo de vibração do piso. A forma deformada produzida por um carregamento uniformemente distribuído em uma única viga de piso, considerando o vão mais longo, geralmente dará uma referência útil dessa forma modal.

Na maioria dos casos, a frequência natural (f_0) pode ser avaliada a partir da deflexão de peso próprio modificado, usando a expressão:

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)} \quad (6.32)$$

Onde f_0 é frequência natural, y_0 é a máxima deflexão (mm) causada pelos carregamentos $S_w P_w$, uniformemente distribuídos sobre cada área limitada pelas linhas médias dos pilares adjacentes, dependendo da forma modal assumida (as linhas médias podem ser paralelas ou normais às vigas de piso). P_w é o peso de uma dada área, compreendendo o peso próprio da estrutura, a sobrecarga e 10% da carga característica imposta, e S_w é um fator de ponderação, igual a 1 nas áreas que incluem o deslocamento

máximo, e escolhido em outras áreas de acordo com a grandeza do deslocamento máximo daquelas áreas (FIG.6.26).

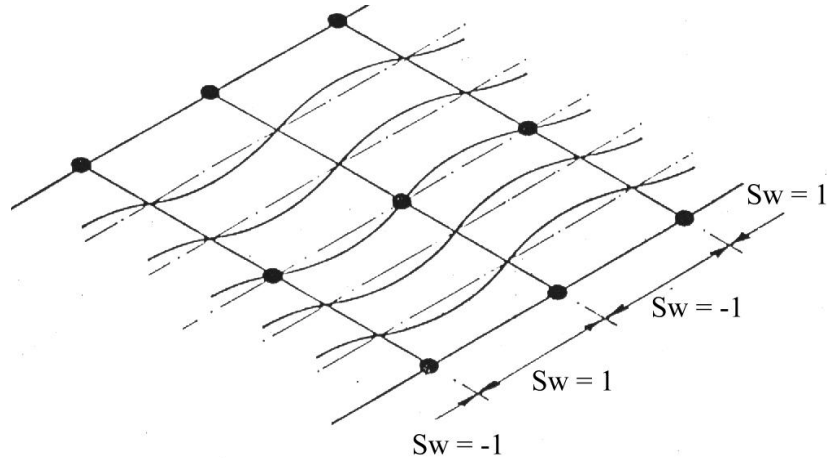


FIGURA 6.26 – Ilustração para consideração do fator de peso S_w

A melhor solução possível é dada se os fatores S_w são diretamente proporcionais às deflexões totais das respectivas áreas (incluindo valores negativos, como apropriado); essa condição pode ser aproximada por sucessivas modificações. O valor inicial de S_w pode ser tomado como unidade (positivo ou negativo, de acordo com a direção da deflexão) em áreas onde a deflexão central exceder um terço da deflexão máxima y_0 , e zero em todas as outras áreas. Um procedimento para se fazer uma estimativa mais real do modo de vibração, e por conseguinte do peso que contribui para causar deflexão e que influencia no cálculo de f_0 , é o procedimento descrito no item 6.3.3.2 (c).

Os valores relativos assumidos para S_w podem ser reexaminados se a frequência estimada é menor que 3,6 Hz (6,0 Hz para pisos que podem ser submetidos a atividades de grupos rítmicos). Da mesma forma, os valores de S_w são reexaminados se a frequência estimada estiver nas faixas 4,5 – 5,5 Hz ou 7,0 – 8,0 Hz e além disso, o valor de R calculado exceder metade do valor permitido. Se a avaliação de y_0 é sensível a variações de valores relativos de S_w , a avaliação deve ser repetida com valores mais próximos do ótimo.

Quando o modo fundamental é governado pela flexibilidade das vigas de piso, e a largura da faixa de ação se estende além de um certo número de vigas de piso, que têm uma seqüência repetida de rigidez (por exemplo vigas de piso se apoiando alternadamente nos pilares e nas vigas principais), a média das deflexões das vigas calculadas pode ser usada, sujeita à adição da deflexão da laje como apropriado. Com esse propósito, a deflexão das vigas principais pode ser calculada como extremidades engastadas.

As freqüências podem, alternativamente, ser estimadas por adição de soluções analíticas para os elementos componentes de acordo com o método de Dunkerly, ou por qualquer programa de computador reconhecido, que oferece ferramentas de análise dinâmica.

O cálculo da freqüência natural deve ser baseado no módulo dinâmico de Young, tipicamente 38 kN/mm^2 para peso normal de concreto ou 22 kN/mm^2 para concreto leve (densidade – 1800 kg/m^3). As condições de apoio devem ser avaliadas tendo em mente as pequenas amplitudes das deflexões dinâmicas. Lajes mistas, como “*Steel Deck*”, podem, normalmente, ser consideradas dinamicamente contínuas sobre as vigas de piso independentemente da condição de reforço de topo. A borda convencional da placa ou ligações de vigas travadas em pontos onde a laje é contínua podem ser considerados como elementos que dão continuidade ao sistema. Bordas de faixas de área colineares com paredes podem ser consideradas como rigidamente apoiadas.

6.4.4. Pisos de alta freqüência

Se a freqüência natural fundamental excede 7Hz, o piso deve ser “avaliado” na resposta à componente do impulso gerado pelo contato do calcanhar durante uma passada. O fator de resposta é dado por:

$$R = \frac{30000}{mb_e L} \quad (6.70)$$

onde m é a massa do piso, incluindo a compensação para carga de ocupação (kg/m^2), b_e é o menor valor de: espaçamento entre vigas de piso ($b_{(m)}$) ou 40 vezes a média da espessura da laje (m) e L é o vão das vigas de piso (para construções contínuas, L pode ser tomado como o comprimento do vão contíguo, se este for maior).

Essa formulação pode ser razoavelmente conservadora para lajes de concreto, onde $b_e L < 20 \text{ m}^2$ imaginando-se que a deflexão do componente da laje não dê grande contribuição para a determinação da frequência natural. Pode não ser conservador para qualquer área onde a deflexão dos componentes da laje constituem as maiores contribuições na determinação da frequência natural do sistema.

6.4.5. Pisos de baixa frequência

Se a frequência natural fundamental é menor que 7 Hz, o piso deve ser avaliado baseado na resposta do componente apropriado próximo da ressonância de forças regulares da caminhada (contínua e harmônica). Escrevendo a componente da amplitude da força, P , em termos da componente da amplitude fundamental básica típica de Fourier, $P_1 = 240 \text{ N}$, tem-se:

$$\tilde{P} = C_f P_1 = 240 C_f \quad (6.55)$$

O valor do fator da componente de Fourier C_f deve ser tomado como uma função da frequência de piso f_0 (Hz),

- Se f_0 está entre 3,0 Hz e 4,0 Hz $\rightarrow C_f = 0,4$
- Se f_0 está entre 4,0 Hz e 4,8 Hz $\rightarrow C_f = 1,4 - 0,25 f_0$
- Se f_0 está acima de 4,8 Hz $\rightarrow C_f = 0,2$

Para escritórios normais ou ambientes residenciais, a ocorrência de excitação crítica em pisos de frequência f_0 entre 4,0 Hz e 4,8 Hz será incomum de modo que a avaliação

pode ser baseada no valor reduzido de C_f mostrado. Contudo, essa redução (de $C_f = 0,4$) não deve ser adotada se as circunstâncias de uso são tais que caminhadas muito rigorosas (frequência de passo excedendo 2 Hz) ocorram freqüentemente.

O amortecimento natural do piso, expresso como uma taxa do amortecimento crítico, ζ , deve em geral ser tomado como $\zeta = 0,03$ para pisos normais bem mobiliados e livre de divisórias. Um valor mais baixo pode ser apropriado para pisos excepcionalmente vazios, notando que o amortecimento de um piso não mobiliado de uma construção em “deck” composto pode ser tão baixo quanto $\zeta = 0,015$. Um valor mais alto, tal como $\zeta = 0,045$ para pisos com divisórias, deve apenas ser assumido se o projetista tem confiança de que as divisórias estarão apropriadamente localizadas para interromper todos os modos relevantes de vibração.

O fator R é dado por:

$$R = \frac{68000 C_f}{m S L_e \zeta} \quad (6.61)$$

onde m é a massa do piso, incluindo uma compensação para o carregamento acidental (kg/m^2), S é a largura efetiva do piso (m), L_e é o vão efetivo da viga de piso (m) e ζ é o amortecimento estrutural (taxa de amortecimento crítico).

As dimensões S e L_e contribuem para a distribuição efetiva da excitação. Seus valores devem ser tomados da tabela 6.2, na qual:

$$RF = \frac{\text{deflexão de um elemento componente}}{\sum \text{deflexão de todos os elementos componentes}} = \text{flexibilidade relativa} \quad (6.71)$$

e,

$$S^* = 4,5 \left(\frac{EI_1}{mf_0^2} \right)^{1/4} \quad (6.72)$$

e,

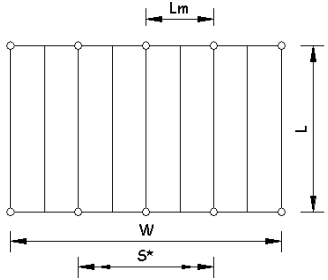
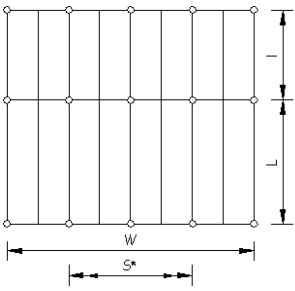
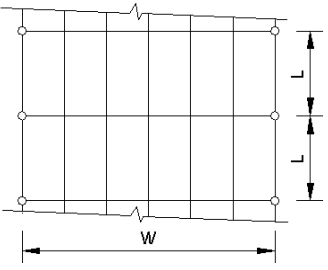
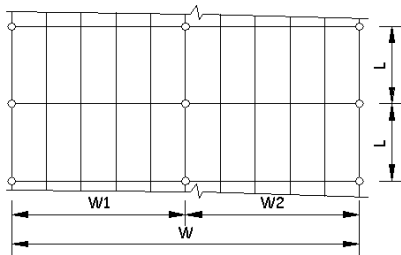
$$L^* = 3,8 \left(\frac{EI_b}{mbf_0^2} \right)^{1/4} \quad (6.73)$$

onde EI_1 é a rigidez à flexão dinâmica da laje (Nm^2 por m de largura da laje), EI_b é a rigidez à flexão dinâmica da viga mista de piso (Nm^2), b é o espaçamento das vigas de piso (m), W é a largura da área que é mobilizada na vibração (m), L_m é o comprimento da viga principal e L_{\max} é o comprimento total da viga de piso contínua (m)

Para todos os casos da tabela 6.2, é assumido que a flexibilidade relativa da laje é menor que 0,2, tal que seria aplicável a lajes compostas por decks de metal. Quando essa condição não é encontrada, é sugerido que S deve ser tomado como o espaçamento de vigas, b , para flexibilidades relativas iguais ou maiores que 0,3 e um valor linearmente interpolado para flexibilidades relativas entre 0,2 e 0,3. Para construção seca com sistemas de pisos em painéis, S deve também ser tomado como o espaçamento de vigas.

Pisos nos quais a flexibilidade da laje é maior que a flexibilidade das vigas (como expresso pela respectiva deflexão de peso próprio na avaliação da frequência), e que tem a frequência menor que 7 Hz, deve ser avaliado por um método analítico detalhado que leva em conta, de forma apropriada, as variações de deslocamento (deflexão) da laje, ponto a ponto, em ambas as direções. Isso irá requerer, geralmente, um modelo computacional em elementos finitos.

TABELA 6.2 – Valores para dimensões L_e e S

“Lay-out de piso”	Qualificação	L_e (m)	S (m)
<p>Caso (1)</p> 	$RF_{vg.principal} < 0,2$	L	S^* ($S \leq W$)
	$RF_{vg.principal} > 0,2$	L	Maior valor: S^* ou L_m ($S \leq W$)
<p>Caso (2)</p> 	$1 = L$	$2L$	como p/ caso (1)
	$0,8L < 1 < L$	$1,7L$	
	$1 < 0,8L$	L	
<p>Caso (3)</p> 	$RF_{vg.principal} < 0,6$	$2L$	W
	$RF_{vg.principal} > 0,6$	L^* ($L_e \leq L_{max}$)	
<p>Caso (4)</p> 	$W_2 = W_1$	como p/ caso (3)	$2W_1$
	$W_2 > 0,8W_1$		$1,7W_1$
	$W_2 < 0,8W_1$		W_1

FONTE – OHLSSON, 1982

6.4.6. Critérios de aceitação

Em acomodações de escritório o fator R de resposta não deve ser excedido de valores dados na tabela 6.3.

TABELA 6.3 – Fatores de resposta (R) para escritórios

Tipo de escritório	Fator de resposta R
Escritório geral	8
Escritório especial	4
Escritório movimentado	12

FONTE – OHLSSON, 1982

A classificação de escritório geral prevê um ambiente adequado para um escritório com atividades normais, incluindo o uso de computadores. O escritório especial é adequado para trabalhos técnicos que requerem concentração especial prolongada. O escritório movimentado é aquele acessível a um grande número de pessoas, com distrações visuais e auditivas que (se juntam) concorrem com qualquer vibração existente.

Para áreas sujeitas a um elevado tráfego de pedestres com pessoas andando animadamente e propositalmente, tal que pode-se associar a áreas de grande circulação de pessoas – o fator de resposta R (computado como resultado da excitação provocada por uma pessoa) não deve exceder $R = 4$.

O fator de resposta diário para acomodações residenciais não deve exceder o valor indicado para o escritório especial. Se a excitação devida ao caminhar puder ocorrer à noite em uma seção do piso dos quartos, pode ser necessário restringir o valor de R à metade desse valor. Onde é requerida mais qualidade para o ambiente, menores valores podem ser especificados.

6.5. Estudo paramétrico de casos hipotéticos

Para se realizar um estudo comparativo do método simplificado de avaliação de vibrações em pisos, foram montadas quatro situações hipotéticas, nas quais os vãos escolhidos se aproximam das dimensões mais comumente encontradas no mercado. Para cada situação estrutural serão analisados quatro tipos de piso: laje em concreto, “*Steel deck*”, painéis de concreto celular autoclavado e painéis alveolares de concreto extrudado. Esses painéis foram descritos anteriormente, no capítulo III.

A definição das dimensões dos perfis metálicos, de cada situação, foi feita a partir de um pré-dimensionamento básico e foram escolhidos os perfis mais robustos para serem usados como padrão, nos quatro tipos de piso. A partir das dimensões mínimas desse perfil inicialmente escolhido, pôde-se variar suas características a fim de se observar o grau de influência para cada montagem estudada.

6.5.1. Descrição dos casos hipotéticos

a) Situação 01

Piso de 18,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 6.27. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 350x38), V3 – viga interna (perfil 400x78).

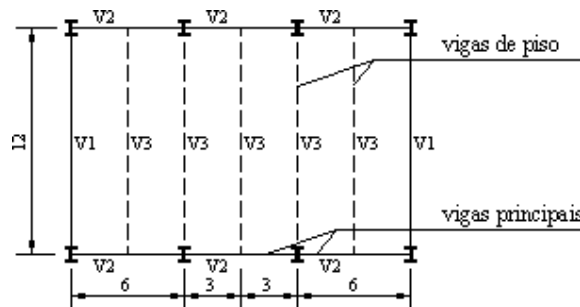


FIGURA 6.27 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 01 (medidas em m)

b) Situação 02

Piso de 36,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 6.28. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 500x97), V3 – viga interna (perfil 450x60).

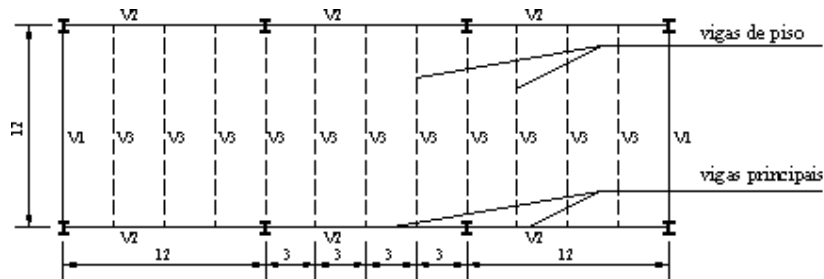


FIGURA 6.28 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 02 (medidas em m)

c) Situação 03

Piso de 24,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 6.29. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 200x19), V2 – viga externa (perfil 400x68), V3 – viga interna (perfil 250x27), V4 – viga interna (perfil 550x100).

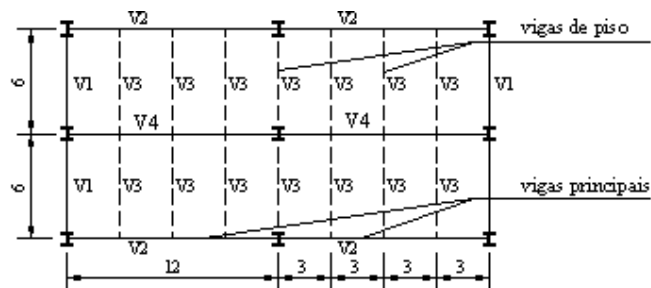


FIGURA 6.29 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 03 (medidas em m)

d) Situação 04

Piso de 24,00 m x 24,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 6.30. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões

mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 200x19), V2 – viga externa (perfil 600x95), V3 – viga interna (perfil 250x27), V4 – viga interna (perfil 650x155).

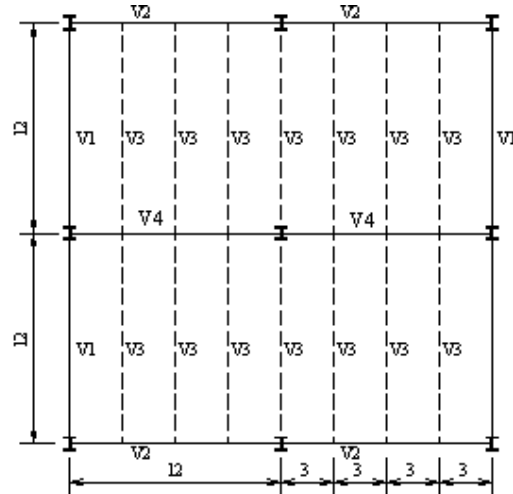


FIGURA 6.30 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 04 (medidas em m)

6.5.2. Procedimento de cálculo para as situações 01, 02, 03 e 04

Foram montadas tabelas comparativas das 04 situações hipotéticas, cada uma com seus 04 tipos de piso, a fim de se acompanhar as variações paramétricas em cada etapa de cálculo. Os pisos em laje de concreto, “*Steel deck*”, painéis de concreto celular autoclavado e painéis alveolares de concreto extrudado foram nomeados respectivamente de LC, SD, CC e CE.

6.5.2.1. Cargas e massas a serem consideradas

Através do somatório da sobrecarga e da carga permanente das lajes de piso, chegou-se a uma estimativa de carga (w) e de massa (m), para cada situação, considerando-se a variação dos perfis usados nas vigas de piso internas. Esse cálculo foi exemplificado de maneira mais detalhada no anexo II.

TABELA 6.4 – Cargas e massas situação 01

Situação 01				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
W₀₁ (V3 – perfil - 400x78)	4,06 kN/m ²	4,11 kN/m ²	2,69 kN/m ²	4,81 kN/m ²
m₀₁ (V3 – perfil - 400x78)	413,86 kg/m ²	418,96 kg/m ²	274,21 kg/m ²	490,32 kg/m ²
W₀₂ (V3 – perfil - 500x86)	4,09 kN/m ²	4,14 kN/m ²	2,72 kN/m ²	4,84 kN/m ²
m₀₂ (V3 – perfil - 500x86)	416,92 kg/m ²	422,02 kg/m ²	277,27 kg/m ²	493,37 kg/m ²
W₀₃ (V3 – perfil - 500x97)	4,12 kN/m ²	4,17 kN/m ²	2,75 kN/m ²	4,87 kN/m ²
m₀₃ (V3 – perfil - 500x97)	419,98 kg/m ²	425,08 kg/m ²	280,33 kg/m ²	496,43 kg/m ²

TABELA 6.5 – Cargas e massas situação 02

Situação 02				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
W₀₁ (V3 – perfil - 450x60)	4,00 kN/m ²	4,05 kN/m ²	2,63 kN/m ²	4,75 kN/m ²
m₀₁ (V3 – perfil - 450x60)	407,75 kg/m ²	412,84 kg/m ²	268,09 Kg/m ²	484,20 kg/m ²
W₀₂ (V3 – perfil - 500x86)	4,09 kN/m ²	4,14 kN/m ²	2,72 kN/m ²	4,84 kN/m ²
m₀₂ (V3 – perfil - 500x86)	416,92 kg/m ²	422,02 kg/m ²	277,27 kg/m ²	493,37 kg/m ²
W₀₃ (V3 – perfil - 500x97)	4,12 kN/m ²	4,17 kN/m ²	2,75 kN/m ²	4,87 kN/m ²
m₀₃ (V3 – perfil - 600x111)	421,00 kg/m ²	426,10 kg/m ²	281,35 kg/m ²	497,4 kg/m ²

TABELA 6.6 – Cargas e massas situação 03

Situação 03				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
W₀₁ (V3/V2 – 250x27/400x68)	3,89 kN/m ²	3,94 kN/m ²	2,52 kN/m ²	4,64 kN/m ²
m₀₁ (V3/V2 – 250x27/400x68)	396,53 kg/m ²	401,63 kg/m ²	256,88 kg/m ²	472,99 kg/m ²
W₀₂ (V3/V2 – 300x26/500x86)	3,89 kN/m ²	3,94 kN/m ²	2,52 kN/m ²	4,64 kN/m ²
m₀₂ (V3/V2 – 300x26/500x86)	396,53 kg/m ²	401,63 kg/m ²	256,88 kg/m ²	272,99 kg/m ²
W₀₃ (V3/V2 – 300x34/550x100)	3,91 kN/m ²	3,96 kN/m ²	2,54 kN/m ²	4,66 kN/m ²
m₀₃ (V3/V2 – 300x34/550x100)	398,57 kg/m ²	403,67 kg/m ²	258,92 kg/m ²	475,03 kg/m ²

TABELA 6.7 – Cargas e massas situação 04

Situação 04				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
W01 (V3 – perfil - 250x27)	3,89 kN/m ²	3,94 kN/m ²	2,52 kN/m ²	4,64 kN/m ²
m01 (V3 – perfil - 250x27)	396,53 kg/m ²	401,63 kg/m ²	256,88 kg/m ²	472,99 kg/m ²
W02 (V3 – perfil - 400x78)	3,94 kN/m ²	3,99 kN/m ²	2,57 kN/m ²	4,69 kN/m ²
m02 (V3 – perfil - 400x78)	401,63 kg/m ²	406,73 kg/m ²	261,98 kg/m ²	478,08 kg/m ²
W03 (V3 – perfil - 500x97)	4,12 kN/m ²	4,17 kN/m ²	2,75 kN/m ²	4,87 kN/m ²
m03 (V3 – perfil - 500x97)	419,98 kg/m ²	425,08 kg/m ²	280,33 kg/m ²	496,43 kg/m ²

6.5.2.1. Cálculo das inércias

Nas situações 01, 02, 03 e 04, as vigas metálicas foram definidas de acordo com os valores obtidos no pré-dimensionamento. Assim, suas características geométricas, como a inércia, são obtidas em tabelas de perfis soldados. Exceto quando se considera o piso em “*Steel Deck*”, pois nesse caso, de acordo com procedimento do “*Design Guide on the vibration of floors*”, deve-se calcular a inércia levando em conta o comportamento de viga mista, como mostrado no anexo II.

Foi feita uma variação apenas para as vigas internas de piso, nas situações 01, 02 e 04, já que são elas a exercer maior influência na resposta do piso a vibrações, o que pode ser comprovado pelos resultados mostrados nas tabelas do anexo IV. Já no caso da situação 03, foi feita variação dos perfis tanto para as vigas de piso como para as vigas principais, pois nesse caso, as deflexões calculadas para as vigas principais foram relevantes. Fato que pode ser comprovado através da comparação de resultados obtidos no anexo IV.

TABELA 6.8 – Inércia dos elementos de piso situação 01

Situação 01				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
I laje	8333,3 cm ⁴	1891,1 cm ⁴	8333,3 cm ⁴	59075,9 cm ⁴
I_{vg.ext} (V2 – perfil - 350x38)	10834,0 cm ⁴	40582,9 cm ⁴	10834,0 cm ⁴	10834,0 cm ⁴
I_{01vg.int} (V3 – perfil - 400x78)	30094,0 cm ⁴	580193,9 cm ⁴	30094,0 cm ⁴	30094,0 cm ⁴
I_{02vg.int} (V3 – perfil - 500x86)	52250,0 cm ⁴	635215,4 cm ⁴	52250,0 cm ⁴	52250,0 cm ⁴
I_{03vg.int} (V3 – perfil - 500x97)	60154,0 cm ⁴	653553,6 cm ⁴	60154,0 cm ⁴	60154,0 cm ⁴

TABELA 6.9 – Inércia dos elementos de piso situação 02

Situação 02				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
I laje	8333,3 cm ⁴	1891,1 cm ⁴	8333,3 cm ⁴	59075,9 cm ⁴
I_{vg.ext} (V2 – perfil - 500x97)	60154,0 cm ⁴	165386,1 cm ⁴	60154,0 cm ⁴	60154,0 cm ⁴
I_{01vg.int} (V3 – perfil - 450x60)	27962,0 cm ⁴	575485,7 cm ⁴	27962,0 cm ⁴	27962,0 cm ⁴
I_{02vg.int} (V3 – perfil - 500x86)	52250,0 cm ⁴	635215,4 cm ⁴	52250,0 cm ⁴	52250,0 cm ⁴
I_{03vg.int} (V3 -perfil- 600x111)	94091,0 cm ⁴	768705,2 cm ⁴	94091,0 cm ⁴	94091,0 cm ⁴

TABELA 6.10 – Inércia dos elementos de piso situação 03

Situação 03				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
I laje	8333,3 cm ⁴	1891,1 cm ⁴	8333,3 cm ⁴	59075,9 cm ⁴
I_{01vg.ext} (V2 -perfil- 400x68)	26223,0 cm ⁴	237236,7 cm ⁴	26223,0 cm ⁴	26223,0 cm ⁴
I_{01vg.int} (V3 – perfil - 250x27)	3787,0 cm ⁴	259511,1 cm ⁴	3787,0 cm ⁴	3787,0 cm ⁴
I_{02vg.ext} (V2 – perfil - 500x86)	52250,0 cm ⁴	267722,5 cm ⁴	52250,0 cm ⁴	52250,0 cm ⁴
I_{02vg.int} (V3 – perfil - 300x26)	50000,0 cm ⁴	263445,7 cm ⁴	50000,0 cm ⁴	50000,0 cm ⁴
I_{03vg.ext} (V2 – perfil- 550x100)	74041,0 cm ⁴	237236,7 cm ⁴	74041,0 cm ⁴	74041,0 cm ⁴
I_{03vg.int} (V3 – perfil - 300x34)	7294,0 cm ⁴	267722,5 cm ⁴	7294,0 cm ⁴	7294,0 cm ⁴

TABELA 6.11 – Inércia dos elementos de piso situação 04

Situação 04				
	Piso LC	piso SD	piso CC	piso CE
I laje	8333,3 cm ⁴	1891,1 cm ⁴	8333,3 cm ⁴	59075,9 cm ⁴
I_{vg.ext} (V2 – perfil - 650x155)	160963,0 cm ⁴	428108,0 cm ⁴	160963,0 cm ⁴	160963,0 cm ⁴
I_{01vg.int} (V3 – perfil - 250x27)	3787,0 cm ⁴	504337,0 cm ⁴	3787,0 cm ⁴	3787,0 cm ⁴
I_{02vg.int} (V3 – perfil - 400x78)	30094,0 cm ⁴	580193,9 cm ⁴	30094,0 cm ⁴	30094,0 cm ⁴
I_{03vg.int} (V3 – perfil - 500x97)	60154,0 cm ⁴	653553,6 cm ⁴	60154,0 cm ⁴	60154,0 cm ⁴

6.5.2.1. Cálculo da deflexão estática (Y_w), frequência natural (f_0) e fator de resposta (R)

A partir do modo de vibração estimado foram calculadas, separadamente, as flechas da laje, das vigas de piso (internas) e das vigas principais (externas), para se chegar a um valor de deflexão estática. Para cálculo das deflexões estáticas foram utilizadas as formulações mostradas no anexo III, de acordo com as condições de contorno de cada caso. Seguindo os procedimentos descritos no item 6.4, foram calculados a frequência natural e o fator de resposta de cada piso, nas situações propostas. No anexo II é mostrado o procedimento de cálculo detalhado para algumas das situações estudadas e no anexo IV são mostradas tabelas comparativas com os parâmetros de cálculo relevantes.

Nas situações 01 e 02, considerou-se apenas um modo de vibração, já que a partir das dimensões e da disposição das vigas, deduz-se intuitivamente que esse é o modo dominante. Nas situações 03 e 04, considerou-se dois modos de vibração, A e B, que são ilustrados nas respectivas tabelas, 6.14 a 6.17. Para o modo A, as deflexões das vigas principais foram consideradas nulas, ou seja, elas não influenciam nos cálculos. Foram avaliados 04 tipos de pisos, em 04 situações de “*lay-out*” de vigamento, e para cada situação foram testados perfis metálicos com dimensões diferentes. A partir do primeiro pré-dimensionamento, foram utilizados 03 perfis para as vigas de piso de cada situação, exceto na situação 03 para o modo B de vibração, onde foi feita variação do

perfil para as vigas principais, já que nesse caso, as deflexões predominantes aconteceram para as vigas principais. Para alguns tipos de painéis de piso, as deflexões das vigas ficaram maiores que o máximo admissível, considerado aqui como $L/300$, devido a valores elevados de carga e/ou inércia insuficiente dos elementos solicitados. Além disso, alguns valores de frequências naturais ficaram abaixo do mínimo recomendado, que é 3 Hz, pois os valores das frequências estão diretamente ligados aos valores das deflexões, como pode-se verificar nas tabelas 6.12 a 6.17. Dessa forma, utilizou-se perfis com maiores dimensões, até se atingir valores admissíveis para as deflexões das vigas (y_w) e para as frequências naturais dos pisos (f_0). Esse procedimento foi realizado, a fim de se encontrar valores para R (fator de resposta), para todos os tipos de pisos avaliados, sendo esses valores comparados com a tabela 6.3 de aceitabilidade de R, segundo a qual, o valor máximo aceitável para R seria 12. Além dessas variações, foi feito o cálculo de R, para efeito de comparação, desconsiderando-se o comportamento de viga mista para o “*Steel Deck*”.

a) Resultados obtidos na situação 01

Nesta configuração de piso, a deflexão das vigas de piso teve maior influência no valor da deflexão estática total, o que se deve às condições de contorno assumidas para cálculo e às dimensões apresentadas. Dessa forma, foram testados três perfis diferentes para as vigas de piso. Apenas no terceiro perfil testado, 500x97, se obteve valores de R para todos os pisos, entretanto, esse valor ficou dentro do admissível apenas para a laje em concreto, com $R = 9,99$, e para a laje em “*Steel Deck*”, com $R = 1,96$ (TAB.6.12). Nos pisos pré-moldados em concreto, chegou-se a valores muito elevados de R, 85,35 para os painéis de concreto celular e 50,73 para os painéis alveolares de concreto. Esses valores ficaram muito altos, pois o procedimento utilizado recomenda considerar-se, para pisos pré-moldados, o valor da largura efetiva (S) mobilizada na vibração, como a largura de apenas 01 painel, que vai de uma viga de piso à outra (no caso $S = 3$ m). Para efeito de comparação paramétrica, testou-se esses tipos de pisos utilizando a mesma largura efetiva que para lajes moldadas “in loco” ($S = 18$ m), e se obteve valores menores de R. Os valores calculados caíram de 85,53 para 14,23, que ainda ficou acima do limite, e de 50,73 para 8,46, que ficou dentro do máximo valor da tabela 6.3. Outra

variação de cálculo utilizada, a fim de comparar e analisar resultados, foi não considerar as vigas do “*Steel Deck*” como mistas. Com isso, utilizou-se a inércia dos perfis metálicos sem a colaboração da laje e obteve-se valores bastante próximos dos encontrados para a laje moldada “in loco” (TAB.6.12). Nesse caso, o determinante dos valores de deflexão e de frequência natural passa a ser o carregamento considerado.

b) Resultados obtidos na situação 02

Nesta situação, a deflexão das vigas de piso teve valor preponderante na deflexão estática total, assim, foram testados três perfis diferentes nas vigas de piso para a realização de comparação paramétrica. Obtiveram-se valores de R para todos os tipos de pisos, na terceira tentativa de perfil, 600x111 (TAB.6.13). Para a laje moldada “in loco” e para o “*Steel Deck*”, o fator de resposta (R) ficou dentro do limite aceitável, com valores de respectivamente 8,42 e 1,96. Já para os pisos pré-moldados, chegou-se a resultados extremamente altos, 81,68 e 50,63, para painéis de concreto celular e para painéis alveolares de concreto. Esses valores foram calculados, considerando-se a largura efetiva como $S = 3$ m, que é o espaçamento entre vigas de piso. Entretanto, se a largura mobilizada na vibração for considerada como o valor de S^* , adotado de acordo com tabela 6.3 e calculado pela equação 6.72, chega-se a valores bem menores para o fator de resposta R. Sendo R igual a 11,50 para painéis de concreto celular, com S igual a 21,31 m e R igual a 4,38, com S igual a 34,67, para painéis alveolares de concreto. Outra variação de cálculo utilizada, a fim de comparar e analisar resultados, foi não considerar a colaboração da laje no comportamento das vigas do “*Steel Deck*” como mistas. Com isso, utilizaram-se as inércias dos perfis metálicos e obtiveram-se valores bastante próximos dos encontrados para a laje moldada “in loco”, já que esta apresenta um valor para a carga estimada bem próximo do valor estimado para o “*Steel Deck*”.

c) Resultados obtidos na situação 03 – modo A e modo B

Nesta configuração de piso, foram considerados dois modos de vibração, para a determinação da frequência natural fundamental, que corresponde ao menor valor encontrado para f_0 .

No modo A, considera-se como zero a deflexão das vigas principais, dessa forma, a influência destas é nula no comportamento relativo à vibração. Assim, a variação de perfis foi relevante apenas para as vigas de piso. Nesse caso, as vigas de piso e as principais foram variadas devido a necessidades de cálculo impostas pela situação para o modo B de vibração, onde as deflexões das vigas principais foram consideráveis. Para os três perfis utilizados foram encontrados valores de R e f_0 , entretanto, apenas para o terceiro perfil, todos os pisos apresentaram valores admissíveis de deflexão das vigas internas (TAB.6.14). Os valores de R encontrados para a laje de concreto moldada “in loco” e para o “*Steel Deck*” ficaram dentro do limite admissível, sendo seus valores 3,95 e 2,06, respectivamente. Já para os pisos pré-moldados avaliados, encontrou-se valores muito altos, sendo o fator de resposta R igual a 48,64 para painéis de concreto celular e igual a 35,79 para painéis alveolares de concreto. Esses valores se referem a uma largura efetiva considerada como 3 m, mas se essa largura for considerada como 24 m, que é o mesmo valor utilizado para cálculo da laje convencional, os resultados de R caem para 6,08 e 4,47. Outra variação a ser considerada, é o comportamento das vigas do piso em “*Steel Deck*”. Se essas vigas não são consideradas como mistas, os valores de y_0 , f_0 e R ficam bastante próximos dos obtidos para a laje moldada “in loco” (TAB.6.14), já que utiliza-se, nesse caso, valores bem menores para as inércias das vigas e obtêm-se deflexões conseqüentemente maiores.

Para o modo B de vibração, as deflexões preponderantes foram as das vigas principais. Essas vigas apresentaram maiores deflexões devido à configuração do piso e às condições de contorno para cálculo (ANEXO II). Dessa forma, foram utilizados três perfis diferentes, como vigas principais e de piso, para efeito de comparação paramétrica, sendo esses perfis os mesmos testados para a situação 03 no modo A. Apenas o terceiro conjunto de perfis testado apresentou valores admissíveis para a deflexão das vigas principais e para a frequência natural em todos os tipos de pisos. O “*Steel Deck*” e a laje moldada “in loco” tiveram os melhores valores para o fator de resposta, sendo estes 3,90 e 7,90 respectivamente, ambos dentro dos limites da tabela 6.3. Já os pisos pré-moldados apresentaram valores muito altos para o fator de resposta R , já que para seu cálculo foi utilizada uma largura efetiva de 3 m, segundo recomendações do procedimento adotado. Esses valores de R chegaram a 55,93 para os

painéis de concreto celular autoclavado e a 53,02 para os painéis alveolares de concreto. Entretanto, se for utilizado o mesmo valor de largura efetiva adotado para a laje convencional, que foi de 24 m, chega-se a valores de R muito menores: 6,99 e 6,63. Outra variação a ser considerada é no caso do “*Steel Deck*”. Se desconsiderar-se o comportamento de viga mista, obtém-se resultados bastante próximos da laje moldada “in loco” (TAB.6.15), já que as condições de contorno e de carregamento são bastante similares.

Comparando-se os valores obtidos para as frequências naturais dos pisos testados, percebe-se que o modo dominante para todos os tipos de pisos avaliados foi o modo de vibração B, no qual ocorreram as maiores deflexões estáticas e portanto as menores frequências. Assim, os valores de R a serem tomados, para avaliação de desempenho dos pisos, são os referentes ao modo B.

d) Resultados obtidos na situação 04 – modo A e modo B

Assim como na situação 03, aqui foram considerados 02 modos de vibração para avaliação, tendo em vista que o modo dominante é determinado pela menor frequência natural encontrada.

No modo A, as deflexões das vigas externas são consideradas nulas e a importância das vigas internas fica ainda mais evidente. Testou-se novamente três perfis diferentes para as vigas de piso. Foram obtidos valores de R para todos os tipos de pisos, na terceira tentativa de cálculo, que usou o perfil 500x97 (TAB.6.16). Para a laje de concreto moldado “in loco”, R foi 3,75 e para o “*Steel Deck*”, R foi 1,96, ou seja, os valores estão dentro do admissível. Já para os pisos pré-moldados em concreto, os valores de R ficaram em 38,18 e 25,37, para os painéis de concreto celular e para os painéis alveolares de concreto respectivamente. Entretanto, se a largura efetiva considerada mudar de 3 m para 24 m, que é o valor utilizado para a laje convencional, serão encontrados valores bem menores de R, 4,77 e 3,17. Outra variação de cálculo utilizada, a fim de comparar e analisar resultados, foi desconsiderar o comportamento misto das vigas do “*Steel Deck*”. Com isso, foram utilizadas as inércias dos perfis metálicos sem

colaboração da laje e obtiveram-se valores bastante próximos dos encontrados para a laje moldada “in loco” (TAB.6.16), que apresenta carregamento bastante próximo ao do “*Steel Deck*”.

No modo B de vibração, há contribuição das vigas internas e externas no valor da deflexão estática, assim como nas situações 01 e 02 e 03 modo B. Neste caso, as deflexões preponderantes foram as das vigas de piso e, por isso, foram testados três perfis diferentes para estas. Obtiveram-se valores admissíveis de deflexões e de frequências e, assim, valores de R para todos os tipos de pisos, com a utilização do perfil 500x97 (TAB.6.17). Os valores encontrados para a laje de concreto convencional e para o “*Steel Deck*” ficaram dentro do recomendado, R igual a 3,75 e 1,85 respectivamente. No caso dos pisos pré-moldados de concreto, mais uma vez, os valores de R ficaram muito altos, já que considerou-se como largura mobilizada na vibração, a distância entre vigas de piso, que é de 3 m. Esses valores foram de 33,69, para piso em painéis de concreto celular, e de 25,37, para piso em painéis alveolares de concreto. No entanto, testando uma largura efetiva igual a 24 m, como para a laje moldada “in loco”, obteve-se R igual a 4,21 e 3,17 para os painéis de concreto celular e de concreto alveolar respectivamente. Outra variação a ser considerada, é o comportamento das vigas do piso no “*Steel Deck*”. Se essas vigas não são consideradas como mistas, os valores de y_0 , f_0 e R ficam bastante próximos dos obtidos para laje moldada “in loco” (TAB.6.17), o que deve-se à similaridade das condições de contorno e carregamento.

Comparando os resultados obtidos para as frequências naturais, o modo de vibração predominante é o modo B para os pisos em “*Steel Deck*”, onde as vigas são consideradas como mistas e para todos os outros tipos de pisos, o modo dominante de vibração é o A. Dessa forma, os valores válidos para R são os que se referem aos respectivos modos dominantes.

TABELA 6.12 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 01

SITUAÇÃO 01			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{68000C_f}{mSL_{eff}\zeta}$ 			
Situação 01 – vigas internas com perfil (400x78)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. Conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 55,21 \text{ mm}$ $f_0 = 2,42 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 3,52 \text{ mm}$ $f_0 = 9,59 \text{ Hz}$ R = 1,99	$y_0 = 36,78 \text{ mm}$ $f_0 = 2,97 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 65,41 \text{ mm}$ $f_0 = 2,23 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 56,06 \text{ mm}$, $f_0 = 2,40 \text{ Hz}$	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 01 – vigas internas com perfil (500x86)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. Conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 32,15 \text{ mm}$ $f_0 = 3,13 \text{ Hz}$ R = 10,07	$y_0 = 3,30 \text{ mm}$ $f_0 = 9,90 \text{ Hz}$ R = 1,97	$y_0 = 22,05 \text{ mm}$ $f_0 = 3,83 \text{ Hz}$ R = 90,83	$y_0 = 38,87 \text{ mm}$ $f_0 = 2,89 \text{ Hz}$ R =
obs:	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 33,42 \text{ mm}$, $f_0 = 3,11 \text{ Hz}$, R = 9,95	obs: p/ R=90,83 S=3 (piso pré-moldado) Se S=18 R=15,14	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 01 – vigas internas com perfil (500x97)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. Conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 29,30 \text{ mm}$ $f_0 = 3,33 \text{ Hz}$ R = 9,99	$y_0 = 3,26 \text{ mm}$ $f_0 = 9,98 \text{ Hz}$ R = 1,96	$y_0 = 19,56 \text{ mm}$ $f_0 = 4,07 \text{ Hz}$ R = 85,35	$y_0 = 34,27 \text{ mm}$ $f_0 = 3,07 \text{ Hz}$ R = 50,73
obs:	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 29,52 \text{ mm}$, $f_0 = 3,31 \text{ Hz}$, R = 9,87	obs: p/ R=85,35 S=3 (piso pré-moldado) Se S=18 R=14,23	obs: p/ R=50,53 S=3 (piso pré-moldado) Se S=18 R=8,46

TABELA 6.13 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 02

SITUAÇÃO 02			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{68000 C_f}{m S L_{eff} \zeta}$ 			
Situação 02 – vigas internas com perfil (450x60)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. Conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 67,38 \text{ mm}$ $f_0 = 2,19 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 6,87 \text{ mm}$ $f_0 = 6,87 \text{ Hz}$ R = 5,41	$y_0 = 44,30 \text{ mm}$ $f_0 = 2,70 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 79,66 \text{ mm}$ $f_0 = 2,02 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 68,09 \text{ mm}$, $f_0 = 2,76 \text{ Hz}$	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 02 – vigas internas com perfil (500x86)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 42,03 \text{ mm}$ $f_0 = 2,78 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 6,76 \text{ mm}$ $f_0 = 6,92 \text{ Hz}$ R = 5,35	$y_0 = 27,95 \text{ mm}$ $f_0 = 3,40 \text{ Hz}$ R = 90,83	$y_0 = 49,38 \text{ mm}$ $f_0 = 2,56 \text{ Hz}$ R =
obs: considerando $f_0 = 3 \text{ Hz}$	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 42,41 \text{ mm}$, $f_0 = 2,76 \text{ Hz}$	obs: p/ R=90,83 S=3 (pré-moldado) Se S=23,52 R=11,59	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 02 – vigas internas com perfil (550x100)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 28,56 \text{ mm}$ $f_0 = 3,37 \text{ Hz}$ R = 8,42	$y_0 = 6,37 \text{ mm}$ $f_0 = 7,13 \text{ Hz}$ R = 1,96	$y_0 = 19,08 \text{ mm}$ $f_0 = 4,12 \text{ Hz}$ R = 81,68	$y_0 = 33,38 \text{ mm}$ $f_0 = 3,12 \text{ Hz}$ R = 50,63
obs:	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 28,76 \text{ mm}$, $f_0 = 3,36 \text{ Hz}$, R=7,39	obs: p/ R=85,35 S=3 (pré-moldado) Se S=21,31 R=8,42	obs: p/ R=50,63 S=3 (pré-moldado) Se S=34,67 R=4,38

TABELA 6.14 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 03 – modo A

SITUAÇÃO 03 – modo A			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{68000C_f}{mSL_{eff}\zeta}$ 			
Situação 03 – vigas de piso (250x27) e vigas principais (400x68)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 25,71 \text{ mm}$ $f_0 = 3,55 \text{ Hz}$ $R = 7,94$	$y_0 = 0,59 \text{ mm}$ $f_0 = 23,45 \text{ Hz}$ $R = 4,15$	$y_0 = 16,65 \text{ mm}$ $f_0 = 4,41 \text{ Hz}$ $R = 71,08$	$y_0 = 30,32 \text{ mm}$ $f_0 = 3,27 \text{ Hz}$ $R = 53,25$
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível - ver anexo IV	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 25,91\text{mm}$, $f_0 = 3,54\text{Hz}$, $R = 7,84$	obs: p/ $R=71,08$ $S=3$ (piso pré-moldado) Se $S=24$ $R=9,19$	obs: p/ $R=53,25$ $S=3$ (piso pré-moldado) Se $S=24$ $R=6,66$
Situação 03 – vigas de piso (300x26) e vigas principais (500x86)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 19,55 \text{ mm}$ $f_0 = 4,07 \text{ Hz}$ $R = 7,54$	$y_0 = 0,58 \text{ mm}$ $f_0 = 23,56 \text{ Hz}$ $R = 4,15$	$y_0 = 12,67 \text{ mm}$ $f_0 = 5,06 \text{ Hz}$ $R = 49,02$	$y_0 = 22,97 \text{ mm}$ $f_0 = 3,76 \text{ Hz}$ $R = 53,25$
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível - ver anexo VI	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 19,67\text{mm}$, $f_0 = 4,06\text{Hz}$, $R = 7,54$	obs: p/ $R=49,02$ $S=3$ (pré-moldado) Se $S=24$ $R=6,13$	obs: p/ $R=53,25$ $S=3$ (pré-moldado) Se $S=24$ $R=6,66$
Situação 03 – vigas de piso (300x34) e vigas principais (550x100)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 13,58 \text{ mm}$ $f_0 = 4,88 \text{ Hz}$ $R = 3,95$	$y_0 = 0,58 \text{ mm}$ $f_0 = 23,68 \text{ Hz}$ $R = 2,06$	$y_0 = 8,82 \text{ mm}$ $f_0 = 6,06 \text{ Hz}$ $R = 48,64$	$y_0 = 15,84 \text{ mm}$ $f_0 = 4,52 \text{ Hz}$ $R = 35,79$
obs:	obs: p/ vigas não mistas: $y_0 = 13,62\text{mm}$, $f_0 = 4,88\text{Hz}$, $R = 3,90$	obs: p/ $R=48,64$ $S=3$ (pré-moldado) Se $S=24$ $R=6,08$	obs: p/ $R=35,79$ $S=3$ (pré-moldado) Se $S=24$ $R=4,47$

TABELA 6.15 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 03 – modo B

SITUAÇÃO 03 – modo B			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7 \text{ Hz} \Rightarrow R = \frac{68000 C_f}{m S L_{eff} \zeta}$ 			
Situação 03 – vigas de piso (250x27) e vigas principais (400x68)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 61,10 \text{ mm}$ $f_0 = 2,30 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 16,35 \text{ mm}$ $f_0 = 4,45 \text{ Hz}$ R = 5,68	$y_0 = 39,58 \text{ mm}$ $f_0 = 2,86 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 72,53 \text{ mm}$ $f_0 = 2,11 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. ext. maior que a admissível	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 61,75 \text{ mm}$, $f_0 = 2,29 \text{ Hz}$	obs: deflexão da vg. Ext. maior que a admissível	obs: deflexão da vg. ext. maior que a admissível
Situação 03 – vigas de piso (300x26) e vigas principais (500x86)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 32,13 \text{ mm}$ $f_0 = 3,18 \text{ Hz}$ R = 7,94	$y_0 = 10,19 \text{ mm}$ $f_0 = 5,64 \text{ Hz}$ R = 3,92	$y_0 = 20,81 \text{ mm}$ $f_0 = 3,95 \text{ Hz}$ R = 98,04	$y_0 = 37,97 \text{ mm}$ $f_0 = 2,92 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. ext. maior que a admissível	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 32,41 \text{ mm}$, $f_0 = 3,16 \text{ Hz}$, R = 5,68	obs: Se S=24 R=12,26	obs: deflexão da vg. ext. maior que a admissível
Situação 03 – vigas de piso (300x34) e vigas principais (550x100)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 22,81 \text{ mm}$ $f_0 = 3,77 \text{ Hz}$ R = 7,90	$y_0 = 7,97 \text{ mm}$ $f_0 = 6,37 \text{ Hz}$ R = 3,90	$y_0 = 14,82 \text{ mm}$ $f_0 = 4,68 \text{ Hz}$ R = 55,93	$y_0 = 26,84 \text{ mm}$ $f_0 = 3,47 \text{ Hz}$ R = 53,02
obs:	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 22,97 \text{ mm}$, $f_0 = 3,76 \text{ Hz}$, R = 7,80	obs: Se S=24 R=6,99	obs: Se S=24 R=6,63

TABELA 6.16 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 04 – modo A

SITUAÇÃO 04 – modo A			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{68000C_f}{mSL_{eff}\zeta}$ 			
Situação 04 – vigas internas com perfil (400x78)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 406,21 \text{ mm}$ $f_0 = 0,89 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 3,30 \text{ mm}$ $f_0 = 9,91 \text{ Hz}$ R = 2,07	$y_0 = 263,15 \text{ mm}$ $f_0 = 1,11 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 484,18 \text{ mm}$ $f_0 = 0,82 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 411,30\text{mm}$, $f_0 = 0,89\text{Hz}$	obs: deflexão da vg. Int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 04 – vigas internas com perfil (400x78)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 52,08 \text{ mm}$ $f_0 = 2,49 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 2,930 \text{ mm}$ $f_0 = 10,51 \text{ Hz}$ R = 2,05	$y_0 = 33,97 \text{ mm}$ $f_0 = 3,10 \text{ Hz}$ R = 48,07	$y_0 = 61,64 \text{ mm}$ $f_0 = 2,29 \text{ Hz}$ R =
obs:	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 52,60\text{mm}$, $f_0 = 2,48\text{Hz}$	obs: p/ R=45,42 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=6,01	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 04 – vigas internas com perfil (500x97)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 27,42 \text{ mm}$ $f_0 = 3,44 \text{ Hz}$ R = 3,75	$y_0 = 2,75 \text{ mm}$ $f_0 = 10,86 \text{ Hz}$ R = 1,96	$y_0 = 18,31 \text{ mm}$ $f_0 = 4,21 \text{ Hz}$ R = 38,18	$y_0 = 32,05 \text{ mm}$ $f_0 = 3,18 \text{ Hz}$ R = 25,37
obs:	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 27,62\text{mm}$, $f_0 = 3,43\text{Hz}$, R= 3,70	obs: p/ R=38,18 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=4,77	obs: p/ R=25,37 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=3,17

TABELA 6.17 – Cálculo de y_w , f_0 e R para situação 04 – modo B

SITUAÇÃO 04 – modo B			
Formulação básica		Modos de vibração – deflexões	
<ul style="list-style-type: none"> • $f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}} \text{ (Hz)}$ • Se $f_0 > 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{30000}{mb_e L}$ • Se $f_0 < 7\text{Hz} \Rightarrow R = \frac{68000C_f}{mSL_{eff}\zeta}$ 			
Situação 01 – vigas internas com perfil (250x27)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 99,66 \text{ mm}$ $f_0 = 1,80 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 7,74 \text{ mm}$ $f_0 = 6,47 \text{ Hz}$ R = 1,96	$y_0 = 64,56 \text{ mm}$ $f_0 = 2,24 \text{ Hz}$ R =	$y_0 = 118,52 \text{ mm}$ $f_0 = 1,65 \text{ Hz}$ R =
obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 100,81\text{mm}$, $f_0 = 1,79\text{Hz}$	obs: deflexão da vg. Int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: deflexão da vg. int. maior que a admissível e $f_0 < 3$ (abaixo do limite)
Situação 01 – vigas internas com perfil (400x78)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 29,07 \text{ mm}$ $f_0 = 3,34 \text{ Hz}$ R = 3,92	$y_0 = 7,76 \text{ mm}$ $f_0 = 6,46 \text{ Hz}$ R = 1,94	$y_0 = 18,96 \text{ mm}$ $f_0 = 4,13 \text{ Hz}$ R = 44,46	$y_0 = 34,25 \text{ mm}$ $f_0 = 3,08 \text{ Hz}$ R = 26,34
obs: $f_0 < 3$ (abaixo do limite)	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 29,30\text{mm}$, $f_0 = 3,33\text{Hz}$, R = 3,87	obs: p/ R=48,44 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=5,56	obs: p/ R=26,34 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=3,29
Situação 01 – vigas internas com perfil (500x97)			
Lj. Concreto	Steel Deck	Pn. conc. Celular	Pn. alveolares conc.
$y_0 = 24,99 \text{ mm}$ $f_0 = 3,60 \text{ Hz}$ R = 3,75	$y_0 = 8,04 \text{ mm}$ $f_0 = 6,35 \text{ Hz}$ R = 1,85	$y_0 = 16,68 \text{ mm}$ $f_0 = 4,41 \text{ Hz}$ R = 33,69	$y_0 = 29,17 \text{ mm}$ $f_0 = 3,33 \text{ Hz}$ R = 25,37
obs:	obs: : p/ vigas não mistas: $y_0 = 25,15\text{mm}$, $f_0 = 3,59\text{Hz}$, R = 3,70	obs: p/ R=33,69 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=4,21	obs: p/ R=25,37 S=3 (piso pré-moldado) Se S=24 R=3,17

6.5.3. Análise dos resultados

Os valores das variáveis utilizadas no cálculo de y_0 , f_0 e R são determinados pelas condições de contorno assumidas e por características próprias de cada piso. Entretanto, algumas vezes, os valores recomendados pelo procedimento, aqui estudado, fornecem resultados super ou subestimados em relação ao comportamento real dos pisos. No decorrer da avaliação feita para as quatro situações, foram ressaltadas correlações paramétricas através da formulação apresentada e através da comparação dos resultados obtidos (ANEXO IV), as quais serão descritas neste item.

No que se refere ao cálculo das deflexões estáticas e da frequência natural, a inércia considerada para as vigas teve influência significativa. O que é comprovado quando são comparados os valores, das deflexões e das frequências, obtidos para o “*Steel Deck*”, considerando as inércias das vigas como mistas e como não mistas. Assim, explicam-se os valores mais altos para a frequência natural no “*Steel Deck*”, que apresentou praticamente a mesma carga que a laje moldada “*in loco*”, porém originou uma deflexão bem menor e conseqüente frequência natural maior. Isso ocorre, considerando-se as vigas no “*Steel Deck*” com comportamento misto para o cálculo de suas inércias. Para esse cálculo, foram tomados valores de largura efetiva da laje relativamente elevados, ou seja, considerou-se grande porção da laje de piso contribuindo na inércia das vigas metálicas, o que influenciou os resultados finais de deflexão, frequência natural e fator de resposta (R). Outro fator determinante dos valores calculados para as deflexões estáticas e para as frequências naturais foi a carga estimada para cada tipo de piso. Fato que pode ser verificado nos pisos em painéis alveolares de concreto extrudado, que apresentaram as frequências naturais mais baixas, pois tinham a maior carga por metro quadrado (ANEXO IV) e chegaram, assim, às maiores deflexões estáticas, já que considerou-se a mesma estrutura portante para todos os pisos.

No que diz respeito ao fator de resposta (R), quando a frequência natural se apresenta maior que 7 Hz, o parâmetro determinante é a massa modal efetiva (mbL). Comportamento que pode ser verificado através da equação 6.70, quanto maior for a massa modal efetiva, menor é o fator R resultante, ou seja, quanto mais massa

mobilizada na vibração, melhor o desempenho do piso. Quando a frequência natural é baixa, menor que 7 Hz, o número de parâmetros a influenciar mais diretamente o valor do fator de resposta (R) aumenta, como pode-se verificar na equação 6.60. Nesse caso, são determinantes de R, além da massa, as condições de contorno mostradas na tabela 6.2, a largura efetiva S, o vão efetivo L_e , a flexibilidade relativa RF e a faixa de frequência onde está a frequência natural calculada, que determina o valor do coeficiente C_f .

Comparando-se o desempenho dos quatro tipos de pisos, os que se apresentaram mais susceptíveis à vibração, induzida pelos passos numa caminhada, foram os pré-moldados de concreto (os painéis de concreto celular autoclavado e os painéis alveolares de concreto). O que era previsível pelo tipo de procedimento de cálculo adotado, já que para esse tipo de piso, as larguras efetivas consideradas, como mobilizadas na vibração, são muito pequenas em relação aos outros pisos avaliados. Para pisos pré-moldados, a faixa de piso mobilizada na vibração foi considerada como a distância entre vigas de piso, enquanto que para o “*Steel Deck*” e para a laje moldada “in loco”, foi considerada, ora como o vão entre pilares, ora como todo o piso e ora como um valor intermediário entre os dois anteriores. Comparando-se os resultados dos dois tipos de pisos pré-moldados de concreto, percebe-se que o piso em painéis alveolares de concreto apresentou resultados melhores para o fator de resposta (R) na maioria dos casos. Esse resultado deveu-se à sua grande quantidade de massa por metro quadrado, que equilibrou e compensou os valores elevados de deflexão estática apresentados. Adicionando-se a isso, pode-se ressaltar os baixos valores de massa apresentados pelos painéis de concreto celular.

Dentre os dois pisos que apresentaram melhores resultados, o “*Steel Deck*” e a laje moldada “in loco”, o “*Steel Deck*” apresentou valores muito melhores que a laje. Os resultados obtidos para o “*Steel Deck*” apresentaram valores de deflexões estáticas muito pequenas, e em consequência, os valores da frequência natural ficaram altos e o fator de resposta se mostrou baixo, ou seja, foi obtido um resultado sempre favorável ao comportamento do piso. Entretanto, esses resultados se mostraram otimistas demais, o que se deve às considerações feitas no cálculo das deflexões estáticas para esse tipo de

piso. Nesse caso, as inércias das vigas foram calculadas como se estas se comportassem como mistas e a contribuição da laje levada em conta foi super estimada, já que as larguras efetivas tomadas (ANEXO II) foram muito altas. Para se confirmar a superestimação dos resultados obtidos, o cálculo de y_0 , f_0 e R foi feito para o “*Steel Deck*”, considerando-se as inércias dos perfis metálicos, sem qualquer contribuição da laje no sentido de tornar as vigas mistas. Esse procedimento resultou em valores próximos dos valores calculados para a laje moldada “in loco”.

De acordo com o procedimento de cálculo, as variáveis que mais influenciam no comportamento do piso, em relação à vibração, são a quantidade de massa efetivamente envolvida no processo e a rigidez do vigamento, principalmente da vigas internas do piso. Para a tomada dos valores desses parâmetros, outros fatores que entram em cena são as dimensões e disposição do piso e a flexibilidade relativa da estrutura em questão, como condicionado na tabela 6.2.

6.5.4. Conclusões

O procedimento simplificado, aqui utilizado como método de avaliação, apresenta muitas limitações para as situações analisadas e requer um grau de conhecimento elevado, na área de dinâmica e estática das estruturas por parte do usuário, para que sejam feitas avaliações acertadas dos resultados. Para a elaboração desse procedimento, muitas simplificações e aproximações foram feitas e para que estas não gerem resultados enganosos, é preciso ter uma visão clara do assunto e saber detectar os pontos frágeis do procedimento como um todo. Deve-se ter em mente que os resultados obtidos não são avaliações finais, mas sim, estimativas para análise preliminar.

Os resultados obtidos, nas avaliações dos pisos, parecem ser tendenciosos, positivamente, para os pisos compostos (“*Steel Deck*”), se feita análise comparativa com outros tipos de pisos. Para os pisos pré-moldados, por exemplo, nos quais a largura efetiva (S) deve ser adotada como o espaçamento entre vigas de piso, os valores de R obtidos ficam muito elevados. O que pode ser considerado como uma subestimação da

porção da laje de piso a ser mobilizada na vibração. Em compensação, em outras situações analisadas, como para laje moldada “in loco” e para o “Steel Deck”, parece haver uma superestimação da massa mobilizada na vibração. Isso ocorre quando considera-se como largura efetiva (S), todo o comprimento do piso (W). Nesse caso, obtém-se valores de R bastante baixos.

Para validação e possíveis ajustes do procedimento, em questão, é necessária a realização paralela de um estudo experimental ou de simulação para os diferentes pisos propostos.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSÕES

7.1. Considerações finais

Através da investigação feita acerca dos sistemas de vedação industrializados associados à estrutura em aço, foi possível identificar as principais fragilidades de uso destes sistemas e destacar áreas ainda carentes de conhecimento certificado.

A associação do sistema de vedação ao sistema estrutural metálico é ainda um ponto frágil no potencial de afirmação da construção em aço no mercado nacional. Seja pela imagem de pouca tradição e confiabilidade, seja pela falta de domínio técnico e de tecnologia nacional desenvolvida. A construção em aço, com suas potencialidades e limitações, é, ainda, relativamente pouco conhecida, tanto no meio técnico como no mercado consumidor.

A fase de projetos na construção industrializada em aço tornou-se vital para o sucesso desse tipo de empreendimento. A eficiência dos projetos compatibilizados e a coordenação das etapas construtivas determinam o desempenho final da obra e o nível de problemas a serem enfrentados durante o processo executivo. Por esse motivo, as principais dificuldades enfrentadas, no canteiro de obras, durante a execução de edificações metálicas, são causadas por deficiências de projeto. Dessa forma, para obras industrializadas em aço, o grau de detalhes previstos em projeto aumenta, já que busca-se a eliminação dos improvisos. A obra industrializada funciona como um quebra cabeça a ser montado pela seqüência mais racional e econômica possível. Nesse sentido, a visão sistêmica do processo é essencial.

Os fabricantes e os profissionais da construção ainda estão carentes no que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico e ao conhecimento de todas as características dos sistemas de vedação industrializada, assim como de outros componentes disponíveis e fabricados no país. Para que a utilização de novas tecnologias seja mais racional e para

que se otimize o uso dos recursos de cada sistema, é necessário que se tenha conhecimento certificado a respeito das características dos materiais disponíveis no mercado. Dessa forma, é de grande importância a realização de estudos experimentais e analíticos para comprovação da capacidade dos novos sistemas de vedação e para a melhoria do desempenho dos mesmos.

A avaliação da capacidade de isolamento sonora, através da lei da massa, apresentou resultados acima dos valores reais, valores superestimados. Entretanto, é possível se fazer um estudo comparativo no que diz respeito a uma avaliação qualitativa dos elementos de vedação. Já no que diz respeito à formulação para paredes duplas, a superestimação resultante desta compromete análises, mesmo que apenas de cunho qualitativo, se a comparação é feita com resultados obtidos pela formulação da lei da massa para paredes simples. Para se chegar a uma avaliação mais precisa, é necessário que se utilize de procedimentos experimentais e ou de simulação com o intuito de quantificar o desempenho dos elementos de cada sistema de vedação.

No procedimento simplificado, utilizado para avaliação da vibração em pisos, foram apresentadas muitas limitações para as situações analisadas e percebeu-se a necessidade de um grau de conhecimento elevado, na área de dinâmica e estática das estruturas por parte do usuário. O procedimento de cálculo é baseado em muitas simplificações e aproximações e para que estas não gerem resultados enganosos, é preciso ter uma visão clara do assunto e saber detectar os pontos frágeis do procedimento como um todo. Deve-se ter em mente que os resultados obtidos não são avaliações finais, mas sim, estimativas para análises preliminares.

É importante ressaltar que o desempenho acústico e vibratório dos elementos de fechamento, tanto verticais como horizontais, depende, também, da ligação desses elementos entre si e com a estrutura. Desse modo, é fundamental uma análise que leve em conta, não só características isoladas, mas também o tipo de montagem dos sistemas e sua interação. Na avaliação, aqui realizada, os painéis de piso e de parede foram estudados isoladamente, assim como seus comportamentos relativos à acústica e à vibração. Considerando a estreita relação entre tais fenômenos, é importante, também,

destacar a relevância de uma análise acústico-vibratória do desempenho dos sistemas de fechamento e da eficiência de suas junções.

Outro ponto para o qual deve-se chamar a atenção é a necessidade de pesquisas e de divulgação, para profissionais e consumidores, das possibilidades que oferecem novas tecnologias construtivas como busca de soluções alternativas. Em um país, cujo déficit habitacional gira em torno de cinco milhões de unidades, é necessário que se busquem soluções racionais e viáveis para o problema. Fica então evidente a importância da aproximação de Universidades e empresariado da construção, para o desenvolvimento do aparato tecnológico nacional e sua integração na formação de profissionais capazes de atender as necessidades do mercado atual.

7.2. Sugestões para futuras pesquisas

O trabalho, aqui apresentado, trata-se de uma investigação preliminar acerca de aspectos variados da utilização de sistemas industrializados de vedação, na construção metálica. Dessa forma, foram detectadas várias linhas de pesquisa a serem aprofundadas futuramente, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento tecnológico e mercadológico da construção nacional em aço. Algumas das linhas de pesquisa são:

- Estudo das conseqüências da montagem simultânea dos sistemas de vedação e estruturas. Racionalização e sistematização desse processo a nível de comportamento estrutural. Estudo de possível normalização.
- Estudo para a sistematização (normalização) da seqüência de montagem de obras industrializadas de pequeno, médio e grande porte. Estudo das particularidades do processo executivo em cada uma dessas categorias.
- Estudo e sistematização da metodologia do processo de projeto para construções industrializadas em aço.

- Estudo experimental do desempenho acústico de painéis de vedação e possível estudo de simulação paralelo para comparação de resultados.

- Estudo experimental do desempenho de painéis de vedação horizontal no que diz respeito à vibração.

- Estudo de simulação numérica para vibrações em pisos, no que diz respeito a pisos industrializados para construção em aço.

- Estudo de pós-ocupação para levantamento de problemas vivenciados por usuários de edificações industrializadas em aço, acompanhado de avaliação experimental com medições “in loco”.

- Estudo vibro-acústico no que diz respeito à junção entre os sistemas de fechamento vertical e horizontal e ao seu desempenho global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 413-87**: classification for rating sound insulation. Philadelphia, 1994.

ANSYS 5.5.3, Ansys Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Houston, 1982.

BACHMANN, H. Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations, **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 118, n. 3, p. 631-647, mar. 1992.

BARING, J. G. de A. A qualidade acústica dos edifícios e a contribuição das paredes de gesso acartonado. **Techné**, n. 47, p.69-73, jul/ago. 2000.

BARING, J. G. de A. Isolação sonora de paredes e divisórias, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Tecnologia das edificações, p. 429-434, São Paulo. (1988):

BARROS, M. M. S. B. **Inovação Tecnológica**. [S.l.: s.n.], 1999. Disponível em: <<http://www.pcc.usp.br/Pós/gepes/TGP/InovaçãoTecnológica-v12.htm>>. Acesso em: dez. 1999.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6472**: evaluation of human exposure to vibration in buildings. [S.l.], 1984.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **S16.1: M84**: steel structures for buildings. [S.l.], 1984.

CASTRO, E. M. C. de **Patologia dos Edifícios em Estruturas Metálicas**, 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN J. **Dynamics of Structures**. Auckland: McGraw-Hill International, 1975. 634p.

DOELLE, LESLIE L. **Environmental acoustics**. Auckland: McGraw-Hill Inc., 1972. 246p.

EUROPEAN RECOMENDATIONS FOR STEEL CONSTRUCTION. **The design of composite floors with profiled steel sheet**. [Ascot], 1975.

GERGES, Samir N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: UFSC, 1992. 600p.

GOMEZ, G. O. **Acustica aplicada a la construcción: el ruido**. Santiago de Cuba: Ed. ISPJAM, 1988. 53p.

INGEMANSSON, S. Dicas para controle de ruído: parte III, **Revista de Acústica e Vibrações**, [S.l.], v. 17, p.02-22, jul. 1996

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 717-1: Rating of sound insulation in buildings and of building elements**, [S.l.], 1996.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **ISO 2631: guide to the evaluation of human exposure to whole body vibration**, [S.l.], 1985.

KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 480p.

KISS, P. Muito Barulho por Tudo. **Techné**, [S.l.], n. 43, p.30-33, nov/dez. 1999.

KISS, P. Pensando leve. **Techné**, [S.l.], n. 44, p.24-28, jan/fev. 2000.

KISS, P. Tem que casar. **Techné**, [S.l.], n. 44, p.20-23, jan/fev. 2000.

KISS, P. Choque sistêmico. **Techné**, [S.l.], n. 44, p.32-33, jan/fev. 2000.

KISS, P. A casa seca. **Techné**, [S.l.], n. 44, p.34-39, jan/fev. 2000.

KISS, P. A economia que vem do Drywall. **Techné**, [S.l.], n. 44, p.46-48, jan/fev. 2000.

KRUGER, P. von. **Análise de Painéis de Vedação nas Edificações em Estrutura Metálica**, 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, 2000.

LAFARGE. **Catálogo de produtos**. [S.l.: s.n.], [1999].

LOPES, N. J. **Aspectos técnicos: painéis de concreto pré-fabricados e suas vantagens**. [S.l.: s.n.], 1989.

LUSAS, Finite Element System – User Guide – <http://www.feauk.com>

MAMMINI, O. O processo Monolite de construção com painéis de EPS. **Techné**, LOCAL DE PUBLIC., n. 37, p.53-55, nov/dez. 1998.

MENDEZ, A. M. et al. **Acústica arquitetônica**. Buenos Aires: UMSA, 1991. 238p.

METFORM. **Catálogo de produtos**. [S.l.: s.n.], [1999].

MITIDIERI FILHO, C. V. Paredes em chapas de gesso acartonado. **Techné**, n. 30, p.65-70, set/out. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: projeto e execução de estruturas de aço de edifícios**. Rio de Janeiro, [1986]. p. 163-170.

NEVES, B. V. B.; NEVES, F. de A. **Estudo Teórico Experimental de Vibrações Induzidas por Cargas de Pessoas em Movimento**: relatório de projeto de iniciação científica, [Ouro Preto]: UFOP, 2000

PREMO. **Catálogo de produtos**. [S.l.: s.n.], [1999].

PRESTES, J. A. S. Edifício Piemonte. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 53, n. 3, p.175-180, jul/set. 2000.

PUJOLLE, J. **La pratique de l'isolation acoustique des batiments**. Paris: Editions du Moniteur, 1978. 574p.

RAINER, J. H.; PERNICA, G.; ALLEN, D. E. Dynamic Loading and Response of Footbridges. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S.l.], v. 15, p. 66-71, feb. 1988.

SANCHO, V. M., SENCHERMES, A. G. Curso de acústica em arquitetura. In: **Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid**, Madrid: COAM, 1982. 215p.

SANTIN, E. Rebelde com Causa. **Techné**, n. 32, p.10-12, jan/fev. 1998.

SANTIN, E. Capital Aberto. **Techné**, n. 41, p.10-12, jul/ago. 1999.

SICAL. **Catálogo de produtos**. [S.l.: s.n.], [1999].

SILVA, D. T. da. **Estudo da isolação sonora em paredes e divisórias de diversas naturezas**. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

SILVA, E. B. V. da. Curso Introdução à Acústica Arquitetônica. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2, 1993. **Anais...** Florianópolis, 1993. 42p.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**. 3. ed. Belo Horizonte: Ed. Termo Acústica, 1997. 277p.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 3. ed. [S.l.: s.n], 1995. 462p.

SOUZA, U. E. L. Qualidade e produtividade nos métodos, processos e sistemas construtivos. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, São Paulo, 1997. **Anais...** São Paulo: USP.

SOUZA, U. E. L. A construção civil, a redução dos custos e a melhoria da qualidade, 2ª Semana Integrada da Qualidade, palestra, AVQC/FUNCADE, Vale do Paraíba, São José dos Campos – SP. (1997).

TANIGUTI, E. K.; BARROS, M.M.B. Tecnologia de produção de vedação vertical interna com placas de gesso acartonado, In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: qualidade no processo construtivo, 7, 1998. **Anais...**, Florianópolis, NPC/ECV/CTC/UFSC, v. 1, p. 219-26.

TANIGUTI, E. K.; MASSETO, L. T.; BARROS, M.M.B. A indústria de materiais, componentes e equipamentos e a inovação tecnológica no processo de produção de edifícios, In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: qualidade no processo construtivo, 7, 1998. **Anais...**, Florianópolis, NPC/ECV/CTC/UFSC, v.2, p.251-258.

THE STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE, OHLSSON. **Design Guide on the Vibration Floors**. Ascot: The Steel Construction Institute, 1989. 43p.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ALVES, Nilda Knudsen de Castro. **Cargas Dinâmicas Devidas a Pessoas em Movimento**, Rio de Janeiro : UFRJ-COPPE, 1997. 97p.

CALMON, J. L. & MORAES, F. R. de. Diagnóstico da construção metálica de edifícios: análise preliminar à luz dos princípios da lean construction. **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, Vitória, v. 3, n. 17, p. 27-32, set/out. 2000.

CALMON, J. L. & MORAES, F. R. de. Percepções concernentes ao processo de projeto de empreendimentos em construção metálica. **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, Vitória., v. 3, n. 17, p. 42-49, set/out. 2000.

CALMON, J. L. & MORAES, F. R. de. Uma contribuição ao processo de projeto de empreendimentos em construção metálica. **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, Vitória, v. 3, n. 17, p. 3-9, set/out. 2000.

JOSSE, R. **La acústica en la construcción**. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 291p.

COELHO, R. de A. Vedações para edifícios em estruturas metálicas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL : O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3, 2000, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2000.

FRANÇA, J. L. **Manual para Normalização de Publicações Técnico-científicas**. Belo Horizonte: ed. UFMG, 1998. 213p.

GONÇALVES, J. C. S. Limites para a verticalidade. **Revista Qualidade na Construção**, [São Paulo], n. 21, p. 16-26, 1999

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Referência Técnica 005**: sistemas Lafarge Gypsum de paredes pré-fabricadas em chapas de gesso, São Paulo, 1997.

KULLAA, J. & TALJA, A. Vibration performance tests for light-weight steel-joint floors. In: MAKELAINEN, P., HASSINEN, P. (edit.). **Light-Weight and Aluminium Structures**, [S.l.: s.n.], 1999. p. 719-726.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. [Rio de Janeiro], 1980.

PEREIRA, T. C. A., LANA, M. F. de, SILVA, M. G. da, SILVA, V. G. da. Alternativas de vedações externas de edifícios com estruturas metálicas. **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, LOCAL DE PUBLIC. v.3, n. 17, p. 18-26, set./out. 2000.

RAAD Jr., A. A. **Diretrizes para a fabricação e montagem de estruturas metálicas**. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.

RAMOS, F. **Painéis de vedação e de revestimento em aço inoxidável**. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1997.

ROSA, L. Z. Absorção acústica de materiais de acabamento e construção. **Revista de Acústica e Vibrações**, [S.l.], v. 12, p. 44-59, jun. 1993.

SANTOS, P. C. Alguns comentários sobre a construção metálica no Brasil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 53, n. 3, p. 152-156, jul/set. 2000.

SCHIMITT, N. M. & TAMAGNA, A. Fórmulas simplificadas para o cálculo de perdas de transmissão sonora de paredes e divisórias simples, p. 352-355. 2000.

SOUZA, U. E. L. de, PALLARI, J. C. & AGOPYAN V. O custo de desperdício de materiais nos canteiros de obras. **Revista Qualidade na Construção**, São Paulo, n. 21, p. 64-66, 1999.

ANEXOS

ANEXO I

Neste anexo, apresentam-se os questionários utilizados na pesquisa junto às construtoras e aos projetistas.

1. Ficha técnica da edificação

- a) Nome do edifício:
- b) Projeto arquitetônico:
- d) Construtora:
- e) Endereço da obra:
- f) Data da obra:
- g) Material a ser analisado/fabricante:

2. Caracterização da construtora e do processo construtivo

- a) Características da construtora:
 - Há quantos anos a empresa atua no mercado da construção civil?
 - Quantas são as obras concluídas?
 - Quantos funcionários?
- b) Mão de obra:
 - Qual a forma de contratação?
- c) Treinamento:
 - Há algum tipo de treinamento de pessoal?
- d) Introdução de novas tecnologias:
 - Qual é o veículo de contato, mais comum, com novas tecnologias na área da construção? Através de que meios se toma conhecimento das inovações que chegam ao mercado da indústria da construção?

e) Justificativa para introdução de novas tecnologias:

- Qual é a motivação para a busca da aplicação de novas tecnologias no canteiro de obras? Qual o porque da introdução de sistemas inovadores no processo da construção.

f) Metodologia para introdução de novas tecnologias:

- Há ou houve um processo de adaptação e preparo, dentro da construtora, para a introdução dos novos sistemas na construção?

g) Dificuldades:

- Quais as maiores dificuldades enfrentadas durante o processo de execução da obra?

h) Resultados alcançados:

- Houve ganhos reais com a introdução dessas novas tecnologias na obra?

- A obra acabada, do ponto de vista do construtor, atinge o mesmo nível de desempenho de uma obra convencional?

- Qual é a aceitação por parte dos futuros usuários?

3. Caracterização do processo de projeto

a) Características do projetista:

- Profissão:

- Há quanto tempo trabalha na área de projetos?

- Qual é o seu esquema de trabalho? Você trabalha com uma equipe contratada, ou com equipes terceirizadas?

- Qual o seu interesse por novos processos e componentes construtivos? Onde você procura esse tipo de informação?

b) Características do projeto:

- Em que momento do processo de projeto foi definida a estrutura e os sistemas de vedação?

- Houve projeto específico de vedações? (Ou o projeto foi feito baseado em informações do fabricante das vedações? Ou, ainda, não foi previsto o sistema de vedações, e foram feitas adaptações durante a execução da obra?)
- A compatibilização dos projetos foi feita por uma equipe de projetos, ou foi feita pela construtora?
- Quais as principais dificuldades encontradas na implantação dessas novas tecnologias no processo de projeto?

c) Resultados obtidos:

- A opção pelo uso desses novos sistemas na edificação resultou em ganhos para o projeto? Quais?
- O resultado final da obra foi satisfatório? Houve necessidade de adaptações de projeto durante a obra?
- Como é a aceitação dos clientes, diante da sugestão da utilização de sistemas construtivos inovadores?
- Você acredita no sucesso da utilização da estrutura metálica associada aos novos sistemas de vedação?

4. Coleta de dados in loco

- a) Condições de integridade física dos painéis;
- b) Condições das juntas e ligações painéis/estrutura;
- c) Condições de estanqueidade em relação à umidade;
- d) Condições qualitativas de conforto acústico;
- e) Condições qualitativas de conforto vibratório;
- f) Levantamento fotográfico e gráfico complementar;
- g) Observações.

ANEXO II

Neste anexo, apresenta-se o procedimento de cálculo utilizado para verificação do fator de resposta de vibração em pisos, para o “*steel deck*” nas situações 01 e 03 e para a laje moldada “*in loco*” na situação 01.

1. VERIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO – SITUAÇÃO 01 – PISO EM STEEL DECK

1.1. Descrição do piso

Piso de 18,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na FIG.A1. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 350x38), V3 – viga interna (perfil 400x78).

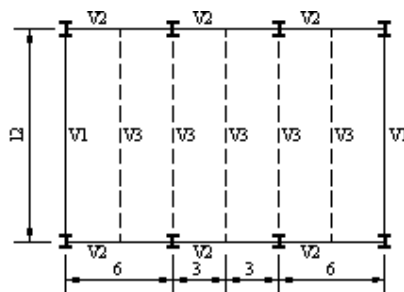


FIGURA A1 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 01 (dimensões em m)

1.2. Cargas e massas a serem consideradas

- Sobrecarga
 - sobrecarga de ocupação (escritório) _____ 2,00 kN/m²
 - divisórias _____ 1,00 kN/m²
- Carga permanente
 - peso próprio laje _____ 2,55 kN/m²
 - teto + serviços _____ 0,50 kN/m²
 - revestimento de piso _____ 0,50 kN/m²
 - peso da viga _____ 0,26 kN/m²
 - 10% da sobrecarga _____ 0,30 kN/m²

$$w \text{ (carga)} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 4,11 \text{ kN/m}^2$$

$$m = w \times 10^3 / 9,81 \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 418,96 \text{ kg/m}^2$$

1.3. Cálculo das inércias para vigas e laje

a) Momento de inércia para vigas internas

A inércia das vigas de piso, para o “Steel deck”, é calculada levando em consideração a contribuição da laje de concreto. Calcula-se a inércia de uma viga mista formada por um perfil metálico e um largura efetiva L_{ef} da laje em concreto (FIG.A2).

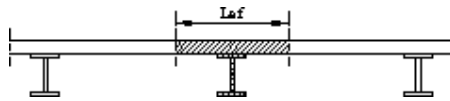


FIGURA A2 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje

Características da viga metálica - perfil: 400x78:

$$d = 400,0 \text{ mm}, \quad b_f = 200,0 \text{ mm}, \quad t_f = 19,0 \text{ mm}, \quad t_w = 6,3 \text{ mm}, \quad h = 362,0 \text{ mm}$$

$$I_x = 26223,0 \text{ cm}^4$$

Cálculo da inércia para a viga mista:

O cálculo da inércia é feito através da decomposição do conjunto em áreas, geométricas conhecidas, de concreto e aço (FIG.A3). Considerando-se:

- $E_c = 2879,38 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

- $L_{ef} = 300 \text{ cm}$ (largura efetiva tomada como o menor entre os valores: o espaçamento entre vigas de piso ou a quarta parte do vão da viga de piso) – (EUROPEAN RECOMMENDATIONS FOR STEEL CONSTRUCTION, 1975)

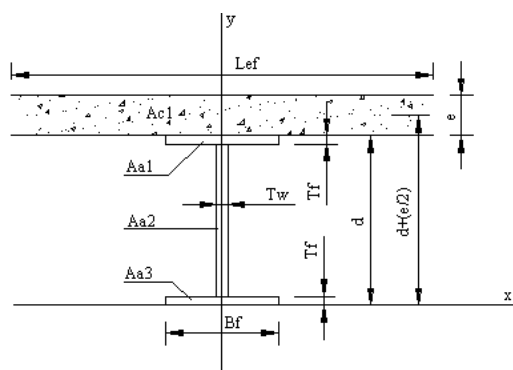


FIGURA A3 – Decomposição da viga em áreas

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOT} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_{CG} \text{ (vg. mista)} = 580193,90 \text{ cm}^4$$

b) Momento de inércia para vigas externas

A inércia das vigas de piso, para o “Steel deck”, é calculada levando em consideração a contribuição da laje de concreto. Calcula-se a inércia de uma viga mista formada por um perfil metálico e um largura efetiva L_{ef} da laje em concreto (FIG.A4).



FIGURA A4 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje

Características da viga metálica - perfil: 350x38:

$d = 350,0 \text{ mm}$, $b_f = 200,0 \text{ mm}$, $t_f = 8,0 \text{ mm}$, $t_w = 4,75 \text{ mm}$, $h = 334,0 \text{ mm}$

$$I_x = 10834,0 \text{ cm}^4$$

Cálculo da inércia para a viga mista:

O cálculo da inércia é feito através da decomposição do conjunto em áreas, geométricas conhecidas, de concreto e aço (FIG.A5). Considerando-se:

- $E_c = 2879,38 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

- $L_{ef} = 80 \text{ cm}$ (largura efetiva tomada como: $L_{ef} = b_f + \frac{1}{10} L_{(M=0)}$) – (EUROPEAN RECOMMENDATIONS FOR STEEL CONSTRUCTION, 1975))

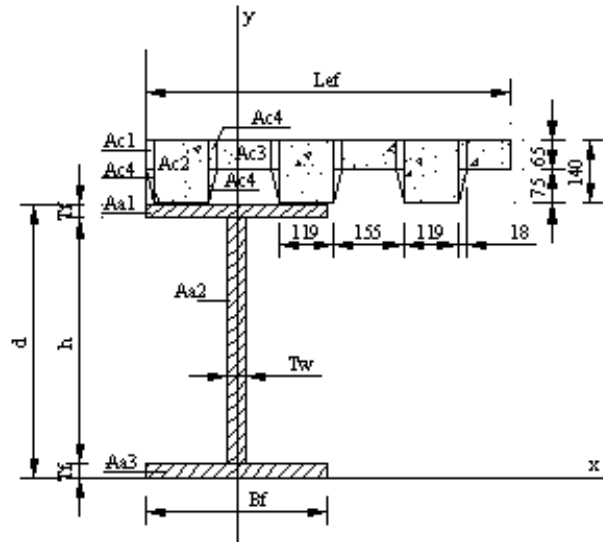


FIGURA A5 – Decomposição da viga em áreas (dimensões em mm)

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOT} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_G \text{ (vg. mista)} = 40582,98 \text{ cm}^4$$

c) Momento de inércia para painéis de laje

A inércia da laje em “*Steel deck*” foi calculada, levando-se em consideração o aço do “*deck*” metálico e o concreto do enchimento. O primeiro passo é se estimar a espessura média do concreto (t_c), já que a forma da laje é irregular (FIG.A6).

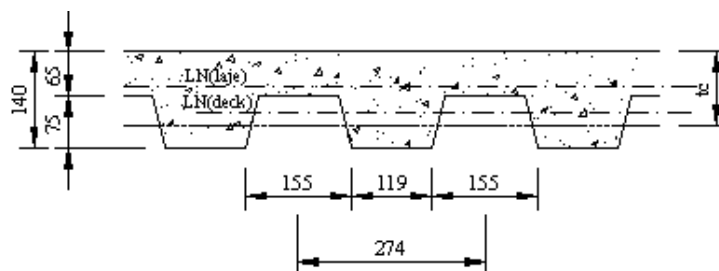


FIGURA A6 – Laje em “*Steel Deck*” – forma composta (dimensões em mm)

$$A = (155 + 119) \times \frac{75}{2} = 10275 \text{ mm}^2 \quad (\text{área do trapézio vazio})$$

$$t_c = 140 - \frac{10275}{274} = 102,5 \text{ mm} \quad (\text{altura útil da laje de concreto})$$

Depois, calcula-se a posição da linha neutra do conjunto (aço + concreto) e assim, é possível chegar-se à inércia do todo. Considerou-se, aqui, 1 m do conjunto (FIG.A7), sendo:

- $E_c = 2879,38 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

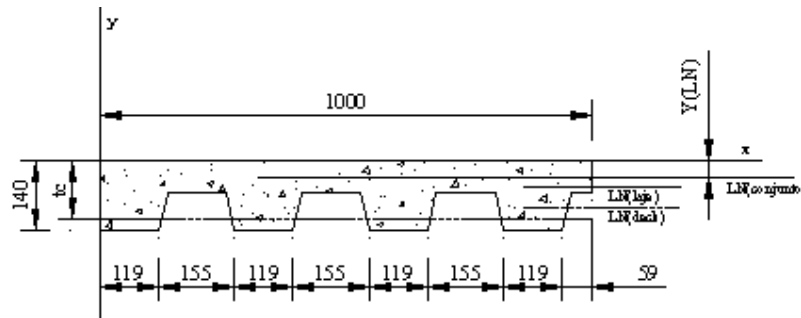


FIGURA A7 – Laje em “Steel Deck” – inércia por metro (dimensões em mm)

$$\bar{y}_{LN} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}$$

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOT} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_{CG} = 1891,09 \text{ cm}^4$$

1.4. Definição da faixa de ação e da forma modal

Analisando as relações dimensionais do piso, em questão, e sua carga distribuída (FIG.A8), pode-se estimar o modo de vibração mais provável e a área de piso que vai ser mobilizada na vibração. Para esta situação, aqui analisada, toma-se $Sw = 1$

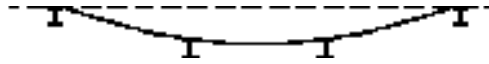


FIGURA A8 – Forma modal

1.5. Cálculo da frequência natural (f_0)

As deflexões estáticas foram calculadas de acordo com as formulações e condições de contorno apresentadas no anexo III.

a) Deflexão da laje, considerando bordas engastadas

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = QL$$

$$Q = 4,11 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 300 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 1891,09 \text{ cm}^4$$

$$y_{Lj} = 0,22 \text{ mm}$$

b) Deflexão da viga de piso, considerando a viga simplesmente apoiada

$$y_{Lj} = \frac{5Wl^3}{384EI} ; \quad W = Q_d L$$

$$Q_d = 12,33 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 1200 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 580193,90 \text{ cm}^4$$

$$y_{vi} = 2,80 \text{ mm}$$

c) Deflexão da viga principal, considerando a viga engastada

$$y_{Lj} = \frac{Pl^3}{192EI} ;$$

$$P = 81,9 \text{ kN}, \quad L = 600 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 52750,68 \text{ cm}^4$$

$$y_{ve} = 1,00 \text{ mm}$$

Desde que as vigas de piso estejam alternadamente entre colunas e vigas principais, a média da deflexão do piso pode ser usada. Dessa forma, a deflexão da viga principal será tomada como: $1/2 y_{ve}$

d) Cálculo da deflexão estática:

$$Y_0 = 0,22 + 2,80 + (1,00/2) = 3,52 \text{ mm}$$

e) Cálculo da frequência natural f_0

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{Y_0}}$$

$$f_0 = 9,59 \text{ Hz} \quad (f_0 > 7 \text{ Hz})$$

1.6. Cálculo do fator de resposta R

Como $f_0 > 7 \text{ Hz}$, $R = \frac{30000}{mb_e L}$, sendo:

$$m = 418,96 \text{ kg/m}^2, \quad b_e = 3 \text{ m}, \quad L = 12 \text{ m}$$

$$R = 1,99$$

1.7. Aceitabilidade em pisos

De acordo com a tabela 6.3, o fator de resposta mais exigente seria R até 4, para escritórios especiais, portanto, o piso avaliado com $R = 1,99$ satisfaz o critério de aceitabilidade para todos os usos mostrados na tabela 6.3.

2. VERIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO – SITUAÇÃO 01 – PISO EM LAJE DE CONCRETO

2.1. Descrição do piso

Piso de 18,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na FIG.A1. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 350x38), V3 – viga interna (perfil 400x78).

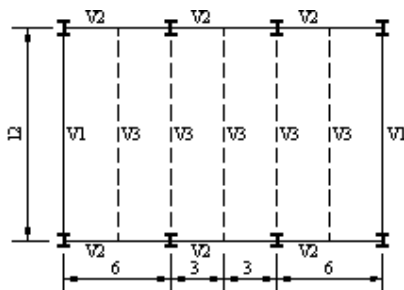


FIGURA A1 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 01 (dimensões em m)

2.2. Cargas e massas a serem consideradas

- Sobrecarga
sobrecarga de ocupação (escritório) _____ 2,00 kN/m²
divisórias _____ 1,00 kN/m²
- Carga permanente
peso próprio laje _____ 2,50 kN/m²
teto + serviços _____ 0,50 kN/m²
revestimento de piso _____ 0,50 kN/m²
peso da viga _____ 0,26 kN/m²
10% da sobrecarga _____ 0,30 kN/m²
w (carga) _____ 4,06 kN/m²
m = w x 10³ / 9,81 _____ 413,86 kg/m²

2.3. Cálculo das inércias para vigas e laje

a) Momento de inércia para vigas internas

A inércia das vigas de piso, para a laje em concreto moldado “in loco”, é a inércia do perfil metálico utilizado. Dessa forma, seu valor é obtido em tabelas que caracterizam perfis metálicos.

Características da viga metálica - perfil: 400x78:

$d = 400,0 \text{ mm}$, $b_f = 200,0 \text{ mm}$, $t_f = 19,0 \text{ mm}$, $t_w = 6,3 \text{ mm}$, $h = 362,0 \text{ mm}$

$I_x = 26223,0 \text{ cm}^4$

b) Momento de inércia para vigas externas

A inércia das vigas principais, para a laje em concreto moldado “in loco”, é a inércia do perfil metálico utilizado. Dessa forma, seu valor é obtido em tabelas que caracterizam perfis metálicos.

Características da viga metálica - perfil: 350x38:

$d = 350,0 \text{ mm}$, $b_f = 200,0 \text{ mm}$, $t_f = 8,0 \text{ mm}$, $t_w = 4,75 \text{ mm}$, $h = 334,0 \text{ mm}$

$I_x = 10834,0 \text{ cm}^4$

c) Momento de inércia para painéis de laje

A inércia da laje em concreto moldado in loco” foi calculada para 1 m de comprimento e como sua seção é retangular (FIG.A9), usou-se a aplicação direta da fórmula

$$I = \frac{bh^3}{12}.$$

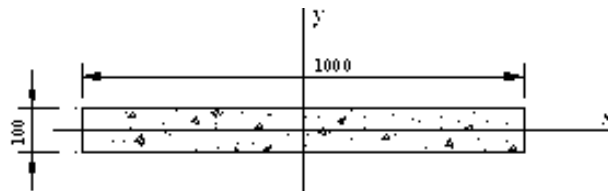


FIGURA A9 – Laje em concreto moldado “in loco” – (dimensões em mm)

$I_{CG} = 8333,3 \text{ cm}^4$

2.4. Definição da faixa de ação e da forma modal

Analisando as relações dimensionais do piso, em questão, e sua carga distribuída (FIG.A8), pode-se estimar o modo de vibração mais provável e a área de piso que vai ser mobilizada na vibração. Para esta situação, aqui analisada, toma-se $S_w = 1$

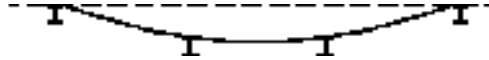


FIGURA A8 – Forma modal

2.5. Cálculo da frequência natural (f_0)

As deflexões estáticas foram calculadas de acordo com as formulações e condições de contorno apresentadas no anexo III.

a) Deflexão da laje, considerando bordas engastadas

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = QL$$

$$Q = 4,06 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2 , \quad L = 300 \text{ cm} , \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2 , \quad I = 8333,3 \text{ cm}^4$$

$$y_{Lj} = 0,05 \text{ mm}$$

b) Deflexão da viga de piso, considerando a viga simplesmente apoiada

$$y_{Lj} = \frac{5Wl^3}{384EI} ; \quad W = Q_d L$$

$$Q_d = 12,18 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2 , \quad L = 1200 \text{ cm} , \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2 , \quad I = 30094 \text{ cm}^4$$

$$y_{vi} = 53,31 \text{ mm}$$

considerando $y_{\text{máx}} = L/300 = 34,29 \text{ mm}$, a deflexão encontrada está acima do admissível. Dessa forma, um perfil mais robusto será testado.

O perfil a ser testado é o (500x86), assim volta-se ao cálculo de cargas e massas:

2.2.b Cargas e massas a serem consideradas

- Sobrecarga
sobrecarga de ocupação (escritório) _____ 2,00 kN/m²
divisórias _____ 1,00 kN/m²
- Carga permanente
peso próprio laje _____ 2,50 kN/m²
teto + serviços _____ 0,50 kN/m²
revestimento de piso _____ 0,50 kN/m²
peso da viga _____ 0,29 kN/m²
10% da sobrecarga _____ 0,30 kN/m²
w (carga) _____ 4,09 kN/m²
m = w x 10³ / 9,81 _____ 416,92 kg/m²

2.3.b Cálculo das inércias para vigas e laje

a) Momento de inércia para vigas internas

A inércia das vigas de piso, para a laje em concreto moldado “in loco”, é a inércia do perfil metálico utilizado. Dessa forma, seu valor é obtido em tabelas que caracterizam perfis metálicos.

Características da viga metálica - perfil: 500x86:

$d = 500,0 \text{ mm}$, $b_f = 250,0 \text{ mm}$, $t_f = 16,0 \text{ mm}$, $t_w = 6,3 \text{ mm}$, $h = 468,0 \text{ mm}$

$I_x = 52250,0 \text{ cm}^4$

b) Momento de inércia para vigas externas

Valor já mostrado anteriormente: $I_x = 10834,0 \text{ cm}^4$

c) Momento de inércia para painéis de laje

Valor já mostrado anteriormente: $I_{CG} = 8333,3 \text{ cm}^4$

2.4.b Definição da faixa de ação e da forma modal

Forma já mostrada anteriormente.

2.5.b Cálculo da frequência natural (fo)

As deflexões estáticas foram calculadas de acordo com as formulações e condições de contorno apresentadas no anexo III.

a) Deflexão da laje, considerando bordas engastadas

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = QL$$

$$Q = 4,09 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 300 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 8333,3 \text{ cm}^4$$

$$y_{Lj} = 0,05 \text{ mm}$$

b) Deflexão da viga de piso, considerando a viga simplesmente apoiada

$$y_{Lj} = \frac{5Wl^3}{384EI} ; \quad W = Q_d L$$

$$Q_d = 12,27 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 1200 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 52250,0 \text{ cm}^4$$

$$y_{vi} = 30,93 \text{ mm}$$

c) Deflexão da viga principal, considerando a viga engastada

$$y_{Lj} = \frac{Pl^3}{192EI} ;$$

$$P = 73,62 \text{ kN}, \quad L = 600 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 10834,0 \text{ cm}^4$$

$$y_{ve} = 1,01 \text{ mm}$$

Desde que as vigas de piso estejam alternadamente entre colunas e vigas principais, a média da deflexão do piso pode ser usada. Dessa forma, a deflexão da viga principal será tomada como: $1/2 y_{ve}$

d) Cálculo da deflexão estática:

$$Y_0 = 0,05 + 30,93 + (1,01/2) = 3,52 \text{ mm}$$

e) Cálculo da frequência natural f_0

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{Y_0}}$$

$$f_0 = 3,14 \text{ Hz } (f_0 < 7 \text{ Hz})$$

2.6. Cálculo do fator de resposta R

Como $f_0 < 7 \text{ Hz}$, $R = \frac{68000 C_f}{m S L_e \zeta}$, sendo:

$$m = 416,92 \text{ kg/m}^2,$$

$$C_f = 0,4 \rightarrow (3 < f_0 < 4),$$

$$S = 18 \text{ m} \rightarrow (\text{RF} = 0,11 < 0,2) \text{ ver tabela 6.2 – caso 1,}$$

$$L_e = 12 \text{ m} \rightarrow (\text{RF} = 0,11 < 0,2) \text{ ver tabela 6.2 – caso 1,}$$

$$\zeta = 0,03 \rightarrow (\text{considerando um piso não mobiliado}).$$

$$R = 10,07$$

2.7. Aceitabilidade em pisos

De acordo com a tabela 6.3, o fator de resposta menos exigente seria R até 12, para escritórios movimentados, portanto, o piso avaliado com $R = 10,07$ satisfaz o critério de aceitabilidade para essa condição, não sendo aceitável para escritórios de uso geral (R até 8) e de uso especial (R até 4).

3. VERIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO – SITUAÇÃO 03 – PISO EM STEEL DECK

3.1. Descrição do piso

Piso de 24,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura A10. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 200x19), V2 – viga externa (perfil 400x68), V3 – viga interna (perfil 250x27), V4 – viga interna (perfil 550x100).

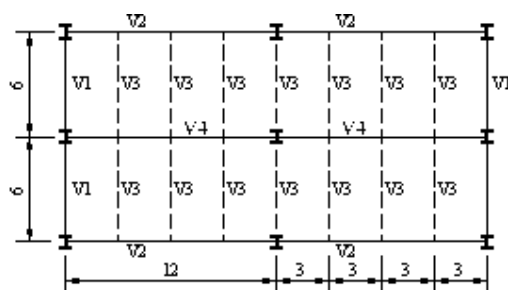


FIGURA A10 – Planta esquemática vigamento de piso – situação 03 (dimensões em m)

3.2. Cargas e massas a serem consideradas

- Sobrecarga
sobrecarga de ocupação (escritório) _____ 2,00 kN/m²
divisórias _____ 1,00 kN/m²
- Carga permanente
peso próprio laje _____ 2,55 kN/m²
teto + serviços _____ 0,50 kN/m²
revestimento de piso _____ 0,50 kN/m²
peso da viga _____ 0,26 kN/m²
10% da sobrecarga _____ 0,30 kN/m²
w (carga) _____ 3,89 kN/m²
m = w x 10³ / 9,81 _____ 396,53 kg/m²

3.3. Cálculo das inércias para vigas e laje

a) Momento de inércia para vigas internas

A inércia das vigas de piso, para o “*Steel deck*”, é calculada levando em consideração a contribuição da laje de concreto. Calcula-se a inércia de uma viga mista formada por um perfil metálico e um largura efetiva L_{ef} da laje em concreto (FIG.A2).

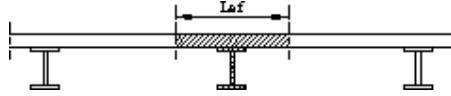


FIGURA A2 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje

Características da viga metálica - perfil: 250x27:

$d = 250,0$ mm, $b_f = 120,0$ mm, $t_f = 9,5$ mm, $t_w = 4,75$ mm, $h = 231,0$ mm

$I_x = 3787,0$ cm⁴

Cálculo da inércia para a viga mista:

O cálculo da inércia é feito através da decomposição do conjunto em áreas, geométricas conhecidas, de concreto e aço (FIG.A3). Considerando-se:

- $E_c = 2879,38$ kN/cm² (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500$ kN/cm² (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

- $L_{ef} = 150$ cm (largura efetiva tomada como o menor entre os valores: o espaçamento entre vigas de piso ou a quarta parte do vão da viga de piso) – (EUROPEAN RECOMMENDATIONS FOR STEEL CONSTRUCTION, 1975)

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOR} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_{CG} \text{ (vg. mista)} = 259511,13 \text{ cm}^4$$

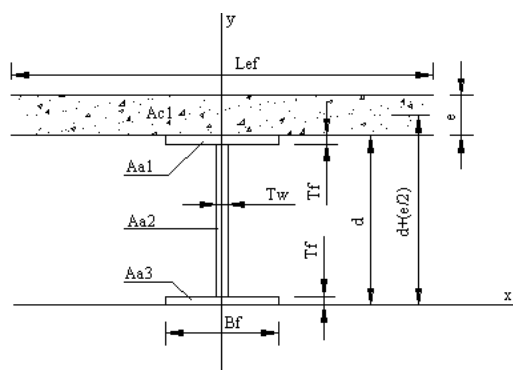


FIGURA A3 – Decomposição da viga em áreas

b) Momento de inércia para vigas externas

A inércia das vigas de piso, para o “Steel deck”, é calculada levando em consideração a contribuição da laje de concreto. Calcula-se a inércia de uma viga mista formada por um perfil metálico e um largura efetiva L_{ef} da laje em concreto (FIG.A4).



FIGURA A4 – Viga mista – perfil metálico e contribuição da laje

Características da viga metálica - perfil: 400x68:

$d = 400,0 \text{ mm}$, $b_f = 200,0 \text{ mm}$, $t_f = 16,0 \text{ mm}$, $t_w = 6,3 \text{ mm}$, $h = 368,0 \text{ mm}$

$I_x = 26223,0 \text{ cm}^4$

Cálculo da inércia para a viga mista:

O cálculo da inércia é feito através da decomposição do conjunto em áreas, geométricas conhecidas, de concreto e aço (FIG.A5). Considerando-se:

- $E_c = 2879,38 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

- $L_{ef} = 80 \text{ cm}$ (largura efetiva é tomada como: $L_{ef} = b_f + \frac{1}{10} L_{(M=0)}$) – (EUROPEAN RECOMMENDATIONS FOR STEEL CONSTRUCTION, 1975)

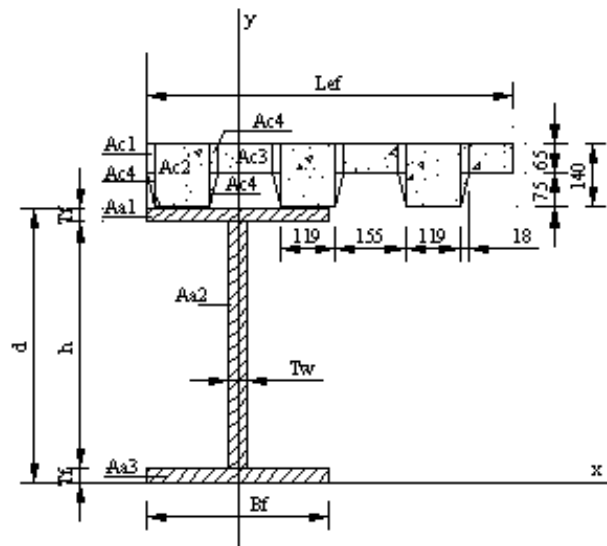


FIGURA A5 – Decomposição da viga em áreas (dimensões em mm)

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOT} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_G \text{ (vg. mista)} = 92112,93 \text{ cm}^4$$

c) Momento de inércia para painéis de laje

A inércia da laje em “Steel deck” foi calculada, levando-se em consideração o aço do “deck” metálico e o concreto do enchimento. O primeiro passo é se estimar a espessura média do concreto (t_c), já que a forma da laje é irregular (FIG.A6).

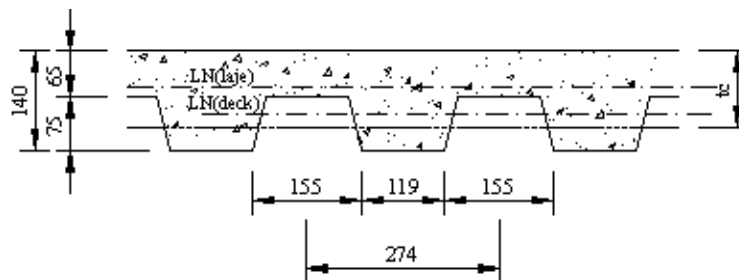


FIGURA A6 – Laje em “Steel Deck” – forma composta (dimensões em mm)

$$A = (155 + 119) \times \frac{75}{2} = 10275 \text{ mm}^2 \text{ (área do trapézio vazio)}$$

$$t_c = 140 - \frac{10275}{274} = 102,5 \text{ mm} \quad (\text{altura útil da laje de concreto})$$

Depois, calcula-se a posição da linha neutra do conjunto (aço + concreto) e assim, é possível chegar-se à inércia do todo. Considerou-se, aqui, 1 m do conjunto (FIG.7), sendo:

- $E_c = 2879,38 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do concreto)

- $E_a = 20500 \text{ kN/cm}^2$ (módulo de elasticidade do aço)

- sendo $\eta = E_a/E_c$ (coeficiente de homogeneização)

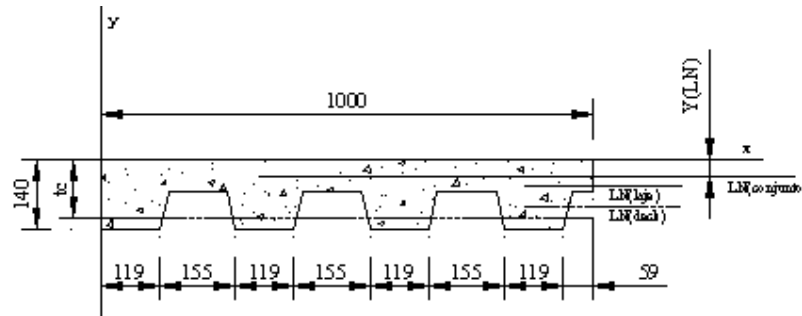


FIGURA A7 – Laje em “Steel Deck” – inércia por metro (dimensões em mm)

$$\bar{y}_{LN} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}$$

$$I_{CG} = \sum I_x - (A_{TOT} \times Y_{CG}^2)$$

$$I_x = I_0 + (A_d \times d^2)$$

$$I_{CG} = 1891,09 \text{ cm}^4$$

3.4. Definição da faixa de ação e da forma modal

Analisando as relações dimensionais do piso em questão e sua carga distribuída, pode-se estimar o modo de vibração mais provável e a área de piso que vai ser mobilizada na vibração. Para a situação, aqui analisada, detecta-se dois modos de vibração, que serão chamados de A e B, tomando-se $Sw = 1$ para os dois casos (FIG.A11).

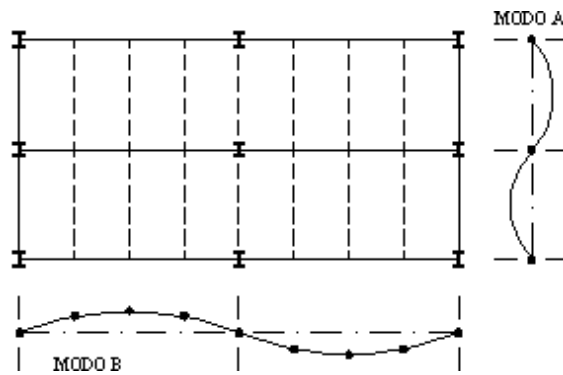


FIGURA A11 – Forma modal

3.5.1. Cálculo da frequência natural (f_0) – MODO A

As deflexões estáticas foram calculadas de acordo com as formulações e condições de contorno apresentadas no anexo III.

a) Deflexão da laje, considerando bordas engastadas

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = QL$$

$$Q = 3,94 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 300 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 1891,09 \text{ cm}^4$$

$$y_{Lj} = 0,21 \text{ mm}$$

b) Deflexão da viga de piso, considerando a viga simplesmente apoiada

$$y_{Lj} = \frac{5Wl^3}{384EI} ; \quad W = Q_d L$$

$$Q_d = 11,82 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 600 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 259511,13 \text{ cm}^4$$

$$y_{vi} = 0,37 \text{ mm}$$

c) Deflexão da viga principal, considerando a viga com deflexão nula

$$y_{ve} = 0$$

d) Cálculo da deflexão estática:

$$Y_0 = 0,21 + 0,37 = 0,59 \text{ mm}$$

e) Cálculo da frequência natural f_0

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{Y_0}}$$

$$f_0 = 23,45 \text{ Hz} \quad (f_0 > 7 \text{ Hz})$$

3.5.2. Cálculo da frequência natural (f_0) – MODO B

As deflexões estáticas foram calculadas de acordo com as formulações e condições de contorno apresentadas no anexo III.

a) Deflexão da laje, considerando bordas engastadas

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = QL$$

$$Q = 3,89 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 300 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 1891,09 \text{ cm}^4$$

$$y_{Lj} = 0,21 \text{ mm}$$

b) Deflexão da viga de piso, considerando a viga engastada

$$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI} ; \quad W = Q_d L$$

$$Q_d = 11,82 \times 10^{-4} \text{ kN/cm}^2, \quad L = 600 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 259511,13 \text{ cm}^4$$

$$y_{vi} = 0,07 \text{ mm}$$

c) Deflexão da viga principal, considerando a viga simplesmente apoiada

$$y_{Lj} = \frac{19Pl^3}{384EI} ;$$

$$P = 35,46 \text{ kN}, \quad L = 1200 \text{ cm}, \quad E = 20500 \text{ kN/cm}^2, \quad I = 237236,67 \text{ cm}^4$$

$$y_{ve} = 16,06 \text{ mm}$$

d) Cálculo da deflexão estática:

$$Y_0 = 0,21 + 0,07 + 16,06 = 16,35 \text{ mm}$$

e) Cálculo da frequência natural f_0

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{Y_0}}$$

$$f_0 = 4,45 \text{ Hz} \quad (4 \text{ Hz} < f_0 < 4,8 \text{ Hz})$$

3.6.1. Cálculo do fator de resposta R – MODO A

Como $f_0 > 7 \text{ Hz}$, $R = \frac{30000}{mb_e L}$, sendo:

$$m = 401,63 \text{ kg/m}^2, \quad b_e = 3 \text{ m}, \quad L = 6 \text{ m}$$

$$R = 4,15$$

3.6.2. Cálculo do fator de resposta R – MODO B

Como $f_0 < 7 \text{ Hz}$, $R = \frac{68000C_f}{mSL_{ef}\zeta}$, sendo:

$$C_f = 0,29 \quad (4 < f_0 < 4,8)$$

$$m = 401,63 \text{ kg/m}^2$$

$$S = 24 \text{ m}$$

$$L_{ef} = 12 \text{ m}$$

$$\zeta = 0,03$$

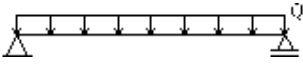
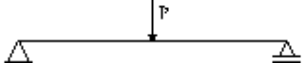
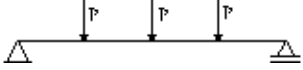
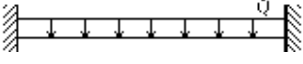


$$R = 5,68$$

3.7. Aceitabilidade em pisos

Comparando as frequências naturais encontradas nos modos A ($f_0 = 23,45$ Hz) e B ($f_0 = 4,45$ Hz) de vibração, chega-se a conclusão que o modo dominante é o modo B, já que sua frequência natural é a mais baixa, portanto tem-se $R = 5,68$. De acordo com a tabela 6.3, o fator de resposta mais exigente seria R até 4 para escritórios especiais, e o próximo fator de resposta seria R até 8 para escritórios gerais, portanto, o piso avaliado com $R = 5,68$ satisfaz o critério de aceitabilidade para essa última tipologia de uso.

ANEXO III

TABELA 1 – Cálculo de deflexões estáticas no meio do vão

Deflexão para laje com bordas engastadas	
$y_{Lj} = \frac{Wl^3}{384EI}$	
Deflexão para vigas simplesmente apoiadas	
	$y_{Lj} = \frac{5Ql^4}{384EI}$
	$y_{vg} = \frac{Pl^3}{48EI}$
	$y_{vg} = \frac{19Pl^3}{384EI}$
Deflexão para vigas engastadas	
	$y_{vg} = \frac{Ql^4}{384EI}$
	$y_{vg} = \frac{Pl^3}{192EI}$
	$y_{vg} = \frac{Pl^3}{96EI}$

ANEXO IV

Este anexo tem como objetivo apresentar as variáveis utilizadas para o cálculo da deflexão estática (y_0), da frequência natural (f_0) e do fator de resposta (R), para todas as situações avaliadas, de maneira esquemática e comparativa. Por esse motivo, optou-se por elaborar tabelas resumo de cada situação, para os quatro tipos de pisos, considerando a variação no “*Steel deck*” das vigas como mistas (“Steel Deck/M”) e não mistas (“Steel Deck”) e, além disso, listando os três tamanhos de perfis utilizados em cada situação.

Nas tabelas de 1 a 6 serão listados os parâmetros relevantes obtidos no processo de avaliação de pisos, feito de acordo com o procedimento simplificado apresentado no “*Design guide on the vibration of floors*”. Para maior clareza, as unidades e siglas utilizadas para os respectivos parâmetros são discriminadas a seguir:

m – massa (kg/m^2)

$y(l_j)$ – deflexão estática da laje (mm)

$y(v_i)$ – deflexão estática da viga de piso (mm)

$y(v_e)$ – deflexão estática da viga principal (mm)

$I(l_j)$ – inércia da laje (mm)

$I(v_i)$ – inércia da viga de piso (mm)

$I(v_e)$ – inércia da viga principal (mm)

y_0 – deflexão estática total (mm)

f_0 – frequência natural (Hz)

RF – flexibilidade relativa

b_e – largura efetiva que é o espaçamento entre vigas de piso (m)

L – vão da viga de piso (m)

L_{ef} – vão efetivo (m)

C_f – coeficiente definido pela faixa de frequência

S – largura efetiva (m)

R – fator de resposta

ζ – taxa de amortecimento foi adotada como 0,03 para todos os pisos

TABELA 1 – Cálculo de R para situação 01

Situação 01								
(400x78)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	Y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	413,86	8333,3	30094	10834	0,36	53,31	3,70	55,51
Steel deck/M	418,96	1891,09	580193,9	40582,98	0,22	2,80	1,00	3,52
Steel deck	418,96	1891,09	30094	10834	0,22	53,96	3,75	56,06
Conc. celular	274,21	8333,3	30094	10834	0,24	35,32	2,45	36,78
Conc. extrud.	490,32	59075,9	30094	10834	0,06	63,15	4,39	65,41
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	2,42	0,06						
Steel deck/M	9,59	0,25	3	12				1,99
Steel deck	2,40	0,06						
Conc. celular	2,97	0,06						
Conc. extrud.	2,23	0,06						
(500x86)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	416,92	8333,3	52250	10834	0,36	30,93	3,73	33,15
Steel deck/M	422,02	1891,09	635215,36	40582,98	0,23	2,58	1,01	3,30
Steel deck	422,02	1891,09	55250	10834	0,23	31,31	3,77	33,42
Conc. Celular	277,27	8333,3	52250	10834	0,24	20,57	2,48	22,05
Conc. Extrud.	493,37	59075,9	52250	10834	0,06	36,60	4,41	38,87
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,13	0,11			12	0,4	18	10,07
Steel deck/M	9,90	0,26	3	12				
Steel deck	3,11	0,11			12	0,4	18	9,95
Conc. Celular	3,83	0,11			12	0,4	3	90,83
Conc. Extrud.	2,89	0,11						
(500x97)	m	I(lj)	I(ve)	I(ve)	y(lj)	y(ve)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	419,98	8333,3	60154	10834	0,36	27,06	3,76	29,30
Steel deck/M	425,08	1891,09	653553,59	40582,98	0,23	2,52	1,01	3,26
Steel deck	425,08	1891,09	60154	10834	0,23	27,39	3,80	29,52
Conc. Celular	280,33	8333,3	60154	10834	0,24	18,06	2,51	19,56
Conc. extrud.	496,43	59075,9	60154	10834	0,06	31,99	4,44	34,27
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,33	0,14			12	0,4	18	9,99
Steel deck/M	9,98	0,37	3	12				1,96
Steel deck	3,31	0,12			12	0,4	18	9,87
Conc. celular	4,07	0,14			12	0,38	3	85,35
Conc. extrud.	3,07	0,14			12	0,4	3	50,73

TABELA 2 – Cálculo de R para situação 02

Situação 02								
(450x60)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	407,75	8333,3	27962	60154	0,35	56,52	10,51	67,38
Steel deck/M	412,81	1891,09	575485,73	165386,07	0,22	2,78	3,87	6,87
Steel deck	412,81	1891,09	27962	60154	0,22	57,23	10,64	68,09
Conc. Celular	268,09	8333,3	27962	60154	0,23	37,16	6,91	44,30
Conc. Extrud.	484,20	59075,9	27962	60154	0,06	67,12	12,48	79,66
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	2,19	0,16						
Steel deck/M	6,87	0,56			12	0,2	16,9	5,41
Steel deck	2,76	0,26						
Conc. Celular	2,70	0,16						
Conc. Extrud.	2,02	0,16						
(500x86)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	416,92	8333,3	52250	60154	0,36	30,93	10,75	42,03
Steel deck/M	422,02	1891,09	635215,36	165386,07	0,23	2,58	3,96	6,76
Steel deck	422,02	1891,09	52250	60154	0,23	31,31	10,88	42,41
Conc. Celular	277,27	8333,3	52250	60154	0,24	20,57	7,15	27,95
Conc. Extrud.	493,37	59075,9	52250	60154	0,06	36,60	12,72	49,38
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	2,78	0,59						
Steel deck/M	6,92	0,59			12	0,2	16,74	5,35
Steel deck	2,76	0,26						
Conc. Celular	3,40	0,26			12	0,4	3	90,83
Conc. Extrud.	2,56	0,26						
(600x111)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	421,00	8333,3	94091	60154	0,36	17,34	10,85	28,56
Steel deck/M	426,10	1891,09	768705,21	165386,07	0,23	2,15	3,99	6,37
Steel deck	426,10	1891,09	94091	60154	0,23	17,55	10,98	28,76
Conc. celular	281,35	8333,3	94091	60154	0,24	11,59	7,25	19,08
Conc. extrud.	497,45	59075,9	94091	60154	0,06	20,49	12,82	33,38
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,37	0,38			12	0,4	21,31	8,42
Steel deck/M	7,13	0,63	3	12				1,96
Steel deck	3,36	0,38			12	0,4	24	7,39
Conc. celular	4,12	0,38			12	0,365	3	81,68
Conc. extrud.	3,12	0,38			12	0,4	3	50,63

TABELA 3 – Cálculo de R para situação 03 (modo A)

Situação 03 – modo A								
250x27/400x68	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	Y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	26223	0,34	25,37	0,00	25,71
Steel deck/M	401,63	1891,09	259511,13	237236,67	0,21	0,37	0,00	0,59
Steel deck	401,63	1891,09	3787	26223	0,21	25,69	0,00	25,91
Conc. Celular	256,88	8333,3	3787	26223	0,22	16,43	0,00	16,65
Conc. Extrud.	472,99	59075,9	3787	26223	0,06	30,26	0,00	30,32
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,55	0,00			12	0,4	24	7,94
Steel deck/M	23,45	0,00	3	6			9,21	4,15
Steel deck	3,54	0,00			12	0,4	24	7,84
Conc. Celular	4,41	0,00			12	0,29	3	71,08
Conc. Extrud.	3,27	0,00			12	0,4	3	53,25
300x26/500x86	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	Y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	5000	52250	0,34	19,21	0,00	19,55
Steel deck/M	401,63	1891,09	263445,72	237236,67	0,21	0,37	0,00	0,58
Steel deck	401,63	1891,09	5000	52250	0,21	19,46	0,00	19,67
Conc. Celular	256,88	8333,3	5000	52250	0,22	12,45	0,00	12,67
Conc. extrud.	472,99	59075,9	5000	52250	0,06	22,92	0,00	22,97
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	4,07	0,00			12	0,38	24	7,54
Steel deck/M	23,56	0,00	3	6				4,15
Steel deck	4,06	0,00			12	0,385	24	7,54
Conc. Celular	5,06	0,00			12	0,2	3	49,02
Conc. extrud.	3,76	0,00			12	0,4	3	53,25
300x34/ 550x100	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	Y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	398,57	8333,3	6492	74041	0,34	14,87	0,00	15,22
Steel deck/M	403,67	1891,09	267722,54	237236,67	0,21	0,37	0,00	0,58
Steel deck	403,67	1891,09	6492	74041	0,21	15,06	0,00	15,28
Conc. Celular	258,92	8333,3	6492	74041	0,22	9,66	0,00	9,89
Conc. Extrud.	475,03	59075,9	6492	74041	0,06	17,73	0,00	20,27
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	4,61	0,00			12	0,24	24	4,74
Steel deck/M	23,62	0,00	3	12				2,06
Steel deck	4,60	0,00			12	0,25	24	4,87
Conc. Celular	5,73	0,00			12	0,2	3	48,64
Conc. Extrud.	4,27	0,00			12	0,33	3	43,74

TABELA 4 – Cálculo de R para situação 03 (modo B)

Situação 03 – modo B								
250x27/400x68	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	Y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	26223	0,34	5,07	55,68	61,10
Steel deck/M	401,63	1891,09	259511,13	92112,93	0,21	0,07	16,06	16,35
Steel deck	401,63	1891,09	3787	26223	0,21	5,14	56,40	61,75
Conc. Celular	256,88	8333,3	3787	26223	0,22	3,29	36,07	39,58
Conc. Extrud.	472,99	59075,9	3787	26223	0,06	6,05	66,42	72,53
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	2,30	0,91						
Steel deck/M	4,45	0,98			12	0,29	24	5,68
Steel deck	2,29	0,91						
Conc. Celular	2,86	0,91						
Conc. Extrud.	2,11	0,92						
300x26/500x86	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	52250	0,34	5,07	27,95	33,36
Steel deck/M	401,63	1891,09	259511,13	149286,99	0,21	0,07	9,91	10,20
Steel deck	401,63	1891,09	3787	52250	0,21	5,14	28,31	33,66
Conc. celular	256,88	8333,3	3787	52250	0,22	3,29	18,10	21,61
Conc. extrud.	472,99	59075,9	3787	52250	0,06	6,05	33,33	39,44
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,12	0,84			12	0,4	24	7,94
Steel deck/M	5,64	0,97			12	0,2	24	3,92
Steel deck	3,10	0,84			12	0,4	24	7,84
Conc. celular	3,87	0,84			12	0,4	3	98,04
Conc. extrud.	2,87	0,85						
300x34/ 550x100	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	74041	0,34	5,07	19,72	25,14
Steel deck/M	401,63	1891,09	259511,13	193388,99	0,21	0,07	7,65	7,94
Steel deck	401,63	1891,09	3787	74041	0,21	5,14	19,97	25,33
Conc. Celular	256,88	8333,3	3787	74041	0,22	3,29	12,78	16,28
Conc. Extrud.	472,99	59075,9	3787	74041	0,06	6,05	23,52	29,63
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,59	0,78			12	0,4	24	7,94
Steel deck/M	6,39	0,96			12	0,2	24	3,92
Steel deck	3,58	0,79			12	0,4	24	7,84
Conc. Celular	4,46	0,78			12	0,285	3	69,86
Conc. Extrud.	3,31	0,79			12	0,4	3	53,25

TABELA 5 – Cálculo de R para situação 04 (modo A)

Situação 04 – modo A								
(250x27)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	Y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	160963	0,34	405,87	0,00	406,21
Steel deck/M	401,63	1891,09	504337	428108,03	0,21	3,09	0,00	3,30
Steel deck	401,63	1891,09	3787	160963	0,21	411,09	0,00	411,30
Conc. Celular	256,88	8333,3	3787	160963	0,22	262,93	0,00	263,15
Conc. Extrud.	472,99	59075,9	3787	160963	0,06	484,12	0,00	484,18
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	0,89	0,00						
Steel deck/M	9,91	0,00	3	12				2,07
Steel deck	0,89	0,00						
Conc. Celular	1,11	0,00						
Conc. Extrud.	0,82	0,00						
(400x78)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	401,63	8333,3	30094	160963	0,34	51,73	0,00	51,78
Steel deck/M	406,73	1891,09	580193,9	428108,03	0,21	2,72	0,00	2,93
Steel deck	406,73	1891,09	30094	160963	0,21	52,39	0,00	52,60
Conc. celular	261,98	8333,3	30094	160963	0,22	33,74	0,00	33,77
Conc. extrud.	478,08	59075,9	30094	160963	0,06	61,58	0,00	61,69
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	2,50	0,00			24	0,4	24	
Steel deck/M	10,51	0,00	3	12				2,05
Steel deck	2,48	0,00			24	0,4	24	
Conc. celular	3,10	0,00			24	0,4	3	48,07
Conc. extrud.	2,29	0,00						
(500x97)	M	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y ₀
Lj. Concreto	419,98	8333,3	60154	160963	0,34	27,06	0,00	27,42
Steel deck/M	425,08	1891,09	653553,59	428108,03	0,21	2,52	0,00	2,75
Steel deck	425,08	1891,09	60154	160963	0,21	27,39	0,00	27,62
Conc. Celular	280,33	8333,3	60154	160963	0,22	18,06	0,00	18,31
Conc. Extrud.	496,43	59075,9	60154	160963	0,06	31,99	0,00	32,05
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,44	0,00			24	0,4	24	3,75
Steel deck/M	10,86	0,00	3	12				1,96
Steel deck	3,43	0,00			24	0,4	24	3,70
Conc. Celular	4,21	0,00			24	0,34	24	38,18
Conc. Extrud.	3,18	0,00			24	0,4	24	25,37

TABELA 6 – Cálculo de R para situação 04 (modo B)

Situação 04 – modo B								
(250x27)	M	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	396,53	8333,3	3787	160963	0,34	81,17	18,14	99,66
Steel deck/M	401,63	1891,09	504337	428108,03	0,21	0,62	6,91	7,74
Steel deck	401,63	1891,09	3787	160963	0,21	82,22	18,38	100,81
Conc. celular	256,88	8333,3	3787	160963	0,22	52,59	11,75	64,56
Conc. extrud.	472,99	59075,9	3787	160963	0,06	96,82	21,64	118,52
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	1,80	0,18						
Steel deck/M	6,47	0,89			24	0,2	24	1,96
Steel deck	1,79	0,18						
Conc. celular	2,24	0,18						
Conc. extrud.	1,65	0,18						
(400x78)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	401,63	8333,3	30094	160963	0,35	10,35	18,38	29,07
Steel deck/M	406,73	1891,09	580193,9	428108,03	0,22	0,54	7,00	7,76
Steel deck	406,73	1891,09	30094	160963	0,22	10,48	18,61	29,30
Conc. Celular	261,98	8333,3	30094	160963	0,23	6,75	11,99	18,96
Conc. extrud.	478,08	59075,9	30094	160963	0,06	12,32	21,87	34,25
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,34	0,63			24	0,4	24	3,92
Steel deck/M	6,46	0,90			24	0,2	24	1,94
Steel deck	3,33	0,64			24	0,4	24	3,87
Conc. celular	4,13	0,63			24	0,37	3	44,46
Conc. extrud.	3,08	0,64			24	0,4	3	26,34
(500x97)	m	I(lj)	I(vi)	I(ve)	y(lj)	y(vi)	y(ve)	y₀
Lj. Concreto	419,98	8333,3	60154	160963	0,36	5,41	19,22	24,99
Steel deck/M	425,08	1891,09	653553,59	428108,03	0,23	0,50	7,31	8,04
Steel deck	425,08	1891,09	60154	160963	0,23	5,48	19,45	25,15
Conc. Celular	280,33	8333,3	60154	160963	0,24	3,61	12,83	16,68
Conc. extrud.	496,43	59075,9	60154	160963	0,06	6,40	22,71	29,17
	f₀	RF	be	L	L_{ef}	C_f	S	R
Lj. Concreto	3,60	0,77			24	0,4	24	3,75
Steel deck/M	6,35	0,91			24	0,2	24	1,85
Steel deck	3,59	0,77			24	0,4	24	3,70
Conc. celular	4,41	0,77			24	0,3	24	33,69
Conc. extrud.	3,33	0,78			24	0,4	24	25,37