

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JULIANE KLUG LOOSE

**ANÁLISE DINÂMICA DE PISOS MISTOS EM
AÇO-CONCRETO SUBMETIDOS A ATIVIDADES
HUMANAS RÍTMICAS**

VITÓRIA
2007

JULIANE KLUG LOOSE

**ANÁLISE DINÂMICA DE PISOS MISTOS EM
AÇO-CONCRETO SUBMETIDOS A ATIVIDADES HUMANAS
RÍTMICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas.

Orientador: Profº Drº Walnório Graça Ferreira

Co-Orientador: Profº Drº José Guilherme Santos da Silva

VITÓRIA
2007

L863a Loose, Juliane Klug, 1980.

Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos a atividades humanas rítmicas / Juliane Klug Loose. – 2007.

110 f. : il.

Orientador: Walnório Graça Ferreira.

Co-Orientador: José Guilherme Santos da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Dinâmica estrutural. 2. Aço - Estruturas. 3. Construção mista. 4. Conforto humano. I. Ferreira, Walnório Graça. II. Silva, José Guilherme Santos da. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

À minha família, por todo amor, carinho e apoio.

Aos meus professores Walnório Graça Ferreira e José Guilherme Santos da Silva, pela oportunidade, confiança e estímulo dispensados ao longo deste trabalho.

Ao Nexem, pelo auxílio financeiro, e especialmente ao seu coordenador Pedro Augusto Cezar Oliveira de Sá, por toda a disposição em colaborar com este trabalho.

À professora Renata Gonçalves Faisca, pela colaboração e incentivo.

Aos meus queridos amigos: Elicarlos Vionet Scaramussa, Isabel Mello, Jociléia Alves Buback, Phablo Pettersen, Rodrigo Silveira Camargo e Victor Carlos Teixeira, por toda ajuda, força e incentivo compartilhados durante esta jornada.

À CAPES, pelo suporte financeiro recebido ao longo de todo o período da pesquisa.

RESUMO

O emprego cada vez mais corrente da análise dinâmica de estruturas tem crescido bastante, de acordo com o surgimento de novas tecnologias construtivas. Estruturas cada vez mais esbeltas têm sido concebidas graças ao crescente conhecimento a respeito do comportamento dos materiais e da otimização da sua utilização.

Essa tendência de projeto tem gerado sistemas estruturais com características dinâmicas associadas a valores de frequências naturais cada vez mais baixos e mais próximos das frequências de atividades humanas, tais como: andar, correr e saltar. Como consequência desses fatores, cargas dinâmicas oriundas das atividades humanas rítmicas podem levar uma estrutura a um nível de solicitação próximo da ressonância, fazendo com que os deslocamentos, esforços e acelerações sejam intensificados, provocando o desconforto no usuário.

Assim sendo, esta investigação objetiva o estudo do comportamento de pisos mistos aço-concreto, quando submetidos às atividades rítmicas correspondentes a ginástica aeróbica e saltos à vontade. A análise fundamenta-se na modelagem computacional dos sistemas estruturais, através do Método dos Elementos Finitos (MEF). No modelo computacional desenvolvido, são empregadas técnicas usuais de discretização, por meio do programa Ansys. As vigas são simuladas por elementos finitos, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. A laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca.

Na modelagem do carregamento dinâmico foram utilizados resultados experimentais que consideram os efeitos de multidão e, ainda, parâmetros de projeto propostos por recomendações internacionais. Os resultados obtidos ao longo do estudo, em termos das acelerações máximas (acelerações de pico), são confrontados e comparados com os limites propostos por recomendações internacionais, sob o ponto de vista do conforto humano, para diferentes tipos de ocupação.

Os resultados alcançados neste trabalho indicam que os pisos mistos analisados são submetidos a níveis de aceleração elevados que certamente podem vir a causar problemas, pois ultrapassam critérios de conforto humano.

Palavras-chave: Análise Dinâmica de Estruturas, Modelagem Computacional, Estruturas de Aço e Mistas, Conforto Humano.

ABSTRACT

The application of dynamic analysis in structures is growing together with the new technologies of construction. Knowledge about the behavior of materials and its consequent optimized usage allow making structures more and more slender.

This tendency of design are leading to structures systems with natural frequencies much and much lower and, therefore closer to the frequency of the dynamic excitation associated to the human beings activities, such as: walking, running and jumping. As a consequence, dynamic loads due to human rhythmic activities can be enough to cause frequencies near the resonance, making the system sufficiently vulnerable to the effects of vibrations, exceeding the recommended limits for human comfort, resulting in discomfort for people.

This work intends to study the behavior of composite floor systems (steel-concrete), subjected to human rhythmic activities like aerobic activities and free jumps. For such, analysis in composite floor models will be done using the Finite Element Method (FEM). It was considered the usual techniques of discretization using the computer program Ansys. The beams are simulated by finite elements considering flexion and torsion effects. The concrete floors are simulated by elements with membrane capability.

The dynamics loads were modeling using diferents metodologies. One of these, uses experimental parameters that considere effects produced by crowds, and other, use parameters from international recomendations. Later, the results obtained, in terms of the maximums accelerations (peaks accelerations), are confronted and compared to those supplied by the technical literature available about the subject, from the point of view of human comfort.

The results obtained in this study show that composite floors analyzed are submitted to high accelerations that can be cause problems, because exceed the limits associated to the human comfort.

Keywords: Dynamic Analysis of Structures, Computational Modeling, Steel Structures and Composite Structures, Human Comfort.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	15
1.1 Motivação e Objetivos	15
1.2 Estado da Arte	16
1.3 Escopo do Trabalho.....	23
Capítulo 2 – Critérios de Normas para Análise de Vibrações	24
2.1 Introdução.....	24
2.2 Norma Brasileira – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: NBR 6118/2003 [23].....	24
2.3 Norma Brasileira – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – Projeto de Revisão: NBR 8800/1986 [24].....	25
2.4 Guia Prático do AISC – Floor Vibrations Due to Human Activity 11 (Steel Design Guide Series) [21]	26
2.4.1 Procedimentos Adotados na Solução de Problemas de Vibração.....	28
2.4.1.1 Redução de Efeitos.....	28
2.4.1.2 Relocação	28
2.4.1.3 Redução da massa	29
2.4.1.4 Enrijecimento	29
2.4.1.5 Aumento do Nível de Amortecimento	29
2.4.1.6 Dispositivos Mecânicos de Controle Passivo.....	29
2.4.1.7 Sistemas de Controle Ativo.....	30
2.5 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations): ISO 2631/1 [25]	30
2.6 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations – Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings (1 to 80 Hz): ISO 2631/2 [26].....	31
Capítulo 3 - Carregamentos Dinâmicos.....	34
3.1 Generalidades	34
3.2 Caracterização das Ações Dinâmicas	35
3.3 Modelo de Carregamento I (MC-I).....	36
3.4 Modelo de Carregamento II (MC-II).....	42
Capítulo 4 - Descrição do Modelo Estrutural	44
4.1 Introdução.....	44

4.2	Descrição dos Sistemas Estruturais	44
4.3	Modelos Estruturais Considerados	46
4.4	Esquema da Aplicação das Cargas	47
4.5	Descrição dos Elementos Finitos	48
4.6	Modelagem Computacional	50
4.7	Modelagem do Amortecimento	51
Capítulo 5 – Análise Dinâmica dos Modelos.....		53
5.1	Generalidades	53
5.2	Análise de Autovalores e Autovetores	53
5.3	Análise Harmônica.....	62
5.4	Estudo do Conforto Humano	64
5.4.1	Aspectos Gerais.....	64
5.4.2	Aplicação do Modelo de Carregamento I (MC-I).....	66
5.4.2.1	Estudo do Comportamento Geral	66
5.4.2.2	Estudo Paramétrico.....	70
5.4.3	Aplicação do Modelo de Carregamento II (MC-II).....	85
5.4.3.1	Estudo do Comportamento Geral	85
5.4.3.2	Estudo Paramétrico.....	89
5.4.4	Comparação dos Resultados dos Carregamentos	92
5.4.4.1	Respostas Dinâmicas no Painel A	93
5.4.4.2	Respostas Dinâmicas no Painel B	98
Capítulo 6 – Considerações Finais		106
6.1	Introdução	104
6.2	Conclusões Obtidas ao Longo do Trabalho	104
6.2.1	Modelagem Computacional	104
6.2.2	Comparação entre as Metodologias de Carregamentos	105
6.2.3	Análise do Conforto Humano	106
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	107

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Plataforma usada por Ebrahimpour, Haman e Sack [6]	18
Figura 1.2 – Critério de conforto para vibração em pisos [14]	20
Figura 1.3 – Escala modificada de Reiher e Meister [10] e [16].	21
Figura 2.1 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano [21]	28
Figura 2.2 – Direções de propagação das vibrações no corpo humano [26]	32
Figura 2.3 – Curva base de aceleração em direções combinadas (eixo x, y e z) [26]	33
Figura 2.4 – Curva base de aceleração no eixo z [26]	33
Figura 2.5 – Curva base de aceleração nos eixos x e y [26]	33
Figura 3.1 – Movimentos de um indivíduo durante um salto [28] <i>apud</i> [9]	35
Figura 3.2 – Força aplicada numa estrutura durante um salto [9]	36
Figura 3.3 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning [9]	37
Figura 3.4 – Intervalos de tempo da função adotada	38
Figura 3.5 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas [9]	38
Figura 3.6 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica	40
Figura 3.7 – Sinais de força no tempo para atividade de saltos à vontade	41
Figura 3.8 – Espectro de frequência da força proveniente do MC-I	41
Figura 3.9 – Sinal da força no tempo para atividade aeróbica	43
Figura 3.10 – Espectro de frequência da força proveniente do MC-II	43
Figura 4.1 – Modelo estrutural genérico dos pisos	45
Figura 4.2 – Seção genérica dos perfis	45
Figura 4.3 – Modelos Estruturais	46
Figura 4.4 – Distribuição dos carregamentos aplicados no modelo III genérico	48
Figura 4.5 – Elemento BEAM 44 [27]	49
Figura 4.6 – Excentricidade entre a laje e a viga	49
Figura 4.7 – Elemento SHELL 63 [27]	50
Figura 4.8 – Refinamento da malha	50
Figura 4.9 – Exemplo de um dos modelos em elementos finitos.	51
Figura 5.1 – Frequências fundamentais dos modelos em função do vão L_j	55
Figura 5.2 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural I.	57
Figura 5.3 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural II.	58
Figura 5.4 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 3,0$ m	59
Figura 5.5 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 4,0$ m	60

Figura 5.6 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 5,0$ m.....	61
Figura 5.7 – Gráficos do FAD em função de β para o modelo III com altura de coluna igual 5,0m.....	63
Figura 5.8 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó A, segundo a variação do vão L_j	67
Figura 5.9 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó B, segundo a variação do vão L_j	69
Figura 5.10 – Acelerações de pico no nó A, para diferentes valores de T_c	74
Figura 5.11 – Acelerações de pico no nó A para $T_c=0,25s$	75
Figura 5.12 – Acelerações de pico no nó B, para diferentes valores de T_c	79
Figura 5.13 – Acelerações de pico no nó B para $T_c=0,25s$	80
Figura 5.14 – Acelerações de pico para atividade aeróbica e saltos à vontade, ao longo da variação do número de pessoas.....	84
Figura 5.15 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó A, segundo a variação do vão L_j	87
Figura 5.16 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó B, segundo a variação do vão L_j	88
Figura 5.17 – Acelerações de pico no nó A, segundo a variação do vão L_j	91
Figura 5.18 – Acelerações de pico no nó B, segundo a variação do vão L_j	91
Figura 5.19 – Modelo estrutural III.....	92
Figura 5.20 – Relação a_p/g no nó A.....	96
Figura 5.21 – Relação a_p/g no nó B.....	101

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Frequências naturais mínimas recomendadas [4].....	17
Tabela 2.1 – Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas à vibração pela ação de pessoas [23].	25
Tabela 2.2 – Faixas de frequência das atividades [21]	27
Tabela 2.3 – Faixa dos fatores de multiplicação usados em vários países para estimar satisfatoriamente os níveis de vibrações em edificações, no que se refere ao conforto humano [26].....	32
Tabela 3.1 – Valores de CD utilizados nas análises [9]	39
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados nas análises [9]	39
Tabela 3.3 – Coeficientes dinâmicos e harmônicos do passo para atividade aeróbica [21] .	42
Tabela 4.1 – Propriedades geométricas dos perfis	45
Tabela 5.1 – Frequências naturais do modelo I ao longo da variação do vão L_j	54
Tabela 5.2 – Frequências naturais do modelo II ao longo da variação do vão L_j	54
Tabela 5.3 – Frequências naturais do modelo III de $H = 3,0m$, ao longo da variação do vão L_j	54
Tabela 5.4 – Frequências naturais do modelo III de $H = 4,0m$, ao longo da variação do vão L_j	55
Tabela 5.5 – Frequências naturais do modelo III de $H = 5,0m$, ao longo da variação do vão L_j	55
Tabela 5.6 – Valores do FAD para o primeiro pico ($\beta=1$).	64
Tabela 5.7 – Parâmetros usados na análise de vibração forçada, segundo a variação do vão L_j	65
Tabela 5.8 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 5,0m$	70
Tabela 5.9 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 6,0m$	71
Tabela 5.10 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 7,0m$	71
Tabela 5.11 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 8,0m$	71
Tabela 5.12 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 9,0m$	72
Tabela 5.13 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 10,0m$	72
Tabela 5.14 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 5,0m$	75
Tabela 5.15 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 6,0m$	76
Tabela 5.16 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 7,0m$	76
Tabela 5.17 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 8,0m$	76
Tabela 5.18 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 9,0m$	77
Tabela 5.19 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 10,0m$	77

Tabela 5.20 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 5,0\text{m}$	81
Tabela 5.21 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 6,0\text{m}$	81
Tabela 5.22 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 7,0\text{m}$	81
Tabela 5.23 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 8,0\text{m}$	82
Tabela 5.24 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 9,0\text{m}$	82
Tabela 5.25 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 10,0\text{m}$	82
Tabela 5.26 – Acelerações de pico no nó A	89
Tabela 5.27 – Acelerações de pico no nó B	90
Tabela 5.28 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 5,0\text{ m}$	93
Tabela 5.29 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 6,0\text{ m}$	93
Tabela 5.30 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 7,0\text{ m}$	94
Tabela 5.31 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 8,0\text{ m}$	94
Tabela 5.32 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 9,0\text{ m}$	94
Tabela 5.33 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 10,0\text{ m}$	95
Tabela 5.34 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 5,0\text{ m}$	98
Tabela 5.35 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 6,0\text{ m}$	98
Tabela 5.36 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 7,0\text{ m}$	99
Tabela 5.37 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 8,0\text{ m}$	99
Tabela 5.38 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 9,0\text{ m}$	99
Tabela 5.39 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 10,0\text{ m}$	100

Lista de Símbolos

a_p	→ aceleração de pico calculada
a_p/g	→ razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade
b_f	→ largura da mesa
CD	→ coeficiente de defasagem
d	→ altura do perfil
e	→ excentricidade entre laje e viga
f	→ frequência de excitação
FAD	→ fator de amplificação dinâmico
$f_{crítica}$	→ frequência crítica
f_n	→ frequência natural
f_p	→ frequência do passo
$F(t)$	→ força variável com o tempo
g	→ aceleração da gravidade
H	→ altura de coluna
i	→ harmônico
K	→ matriz de rigidez da estrutura
K_p	→ coeficiente de impacto
L_g	→ dimensão das vigas secundárias
L_j	→ dimensão das vigas principais
M	→ matriz de massa da estrutura
n	→ número máximo de harmônicos
P	→ peso da pessoa
T	→ período da atividade
T_c	→ período de contato da atividade
t_f	→ espessura da mesa
T_s	→ período sem contato da atividade
t_w	→ espessura da alma
v_D	→ deslocamento dinâmico
v_E	→ deslocamento estático
w_p	→ carga efetiva por unidade de área
w_t	→ carga total por unidade de área
α	→ parâmetro de amortecimento proporcional à matriz de massa
α_i	→ coeficiente dinâmico
β	→ relação entre a frequência de excitação e a frequência natural

- δ → parâmetro de amortecimento proporcional à matriz de rigidez
- Δt → intervalo de tempo
- ϕ_i → ângulo de fase
- ξ → taxa de amortecimento modal
- ξ_i → taxa de amortecimento do modo i
- ω_{0i} → frequência natural circular do modo i

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

O desenvolvimento científico e tecnológico vem proporcionando o avanço da construção civil, seja no campo que envolve o conhecimento dos materiais e novas técnicas construtivas, seja no aprimoramento dos processos de cálculo.

Para manter a competitividade o mercado busca novas soluções, com altíssima qualidade e que tenham um menor custo-benefício. Além disso, o acesso a computadores e ferramentas computacionais mais avançadas têm ampliado a capacidade de análise dos sistemas estruturais, tornando as soluções mais rápidas e precisas. Esses fatores favorecem a concepção de estruturas mais arrojadas, que vençam grandes vãos com peças estruturais cada vez mais leves. Uma forte consequência dessa tendência é a diminuição da frequência fundamental da estrutura, que fica mais próxima da faixa de frequências associadas às atividades humanas como andar, correr, saltar e dançar. Isso faz com que tais estruturas se tornem, portanto, susceptíveis a sofrer vibrações excessivas pelo simples caminhar de pessoas, ou mais gravemente por atividades rítmicas. Essa situação pode levar ao desconforto do usuário ou até mesmo ao comprometimento da estrutura.

Para acompanhar esta evolução, é necessário que os sistemas estruturais de pisos sejam concebidos levando em consideração esses efeitos. É importante lembrar que esses sistemas têm atendido aos estados limites últimos, mas devem ser analisados de forma mais criteriosa quanto aos estados limites de utilização. A solução estrutural deve garantir resistência, durabilidade, segurança e conforto adequados ao tipo de ocupação a que essa estrutura servirá.

A partir deste contexto, essa investigação tem por objetivo estudar o comportamento dinâmico de sistemas estruturais de pisos, quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas. Para isso, são realizadas análises numéricas em sistemas mistos idealizados em aço e concreto, submetendo-os a excitações dinâmicas oriundas de atividades rítmicas como a ginástica aeróbica e saltos à vontade.

São propostas duas metodologias diferentes para a modelagem dos carregamentos, representadas matematicamente por diferentes funções e parâmetros. A partir das duas metodologias é realizada a variação do número de pessoas aplicadas sobre a estrutura. As respostas dinâmicas são obtidas em termos de deslocamentos e acelerações.

Com o intuito de avaliar as condições dos pisos no que se refere ao conforto humano, as respostas obtidas, em termos das acelerações de pico, são comparadas com limites propostos por recomendações internacionais.

Busca-se com este trabalho fornecer embasamento aos engenheiros no que se refere à análise dinâmica de sistemas estruturais submetidos às atividades rítmicas, a fim de mostrar a importância de uma análise mais criteriosa na prevenção de problemas de vibrações.

1.2 Estado da Arte

A vibração em estruturas é assunto estudado por vários autores ao longo dos últimos anos. Em tempos remotos, o efeito da carga dinâmica era considerado através da majoração da carga estática, mas sabe-se que essa simplificação está incorreta, pois a análise estática não é capaz de avaliar os efeitos que causam as cargas dinâmicas. Além disso, cada tipo de atividade geradora de excitação possui características próprias de frequência, amplitude e forma de carregamento, que irão levar um sistema estrutural a diferentes perturbações.

Ao longo dos anos, vários estudos têm sido realizados a fim de avaliar o comportamento de estruturas sujeitas às vibrações provenientes de atividades humanas. Allen *et al.* [1], realizaram ensaios com grupos de duas a quatro pessoas saltando em uma plataforma construída em estrutura mista, composta de treliças metálicas e tabuleiro de concreto. Através dessa pesquisa foram estabelecidos parâmetros que podem ser usados para caracterizar os carregamentos dinâmicos produzidos por danças, shows, exercícios aeróbicos, eventos esportivos, etc.

Ebrahimpour e Sack [2] descreveram analiticamente cargas dinâmicas geradas por pessoas. Os carregamentos periódicos foram modelados utilizando-se uma série de Fourier e para o carregamento impulsivo como um salto, por exemplo, foram utilizadas funções de decaimento logarítmico. A área ocupada por cada pessoa foi estimada e a partir daí, estabelecia-se a intensidade de carga por pessoa em função do número de pessoas envolvidas.

Mais tarde os autores [3] construíram uma plataforma de 16,72 m² onde realizaram ensaios com até 40 pessoas. Foram sugeridos valores para a carga estática vertical, assim como

para a componente dinâmica. Segundo os autores, uma estrutura deve ser capaz de suportar uma sobrecarga total de $5,5 \text{ kN/m}^2$, sendo uma parcela estática de $2,2 \text{ kN/m}^2$ e uma componente dinâmica de $3,35 \text{ kN/m}^2$. Considera-se para isso que o peso de uma pessoa seja igual a 712 N sobre uma área de $0,325 \text{ m}^2$.

Bachmann [4] estudou casos de passarelas, ginásios e salas de esporte, salas de dança e shows submetidos a carregamentos dinâmicos, a fim de estabelecer guias para solucionar problemas de vibração. O autor apresenta dez exemplos práticos analisados em seu trabalho, e conclui que em situações normais, a frequência fundamental da estrutura deve ser definida de acordo com a frequência da componente harmônica crítica da excitação dinâmica. Isto consiste em manter as frequências dos modos dominantes de vibração da estrutura fora do alcance da frequência dos harmônicos críticos de excitações de atividades humanas. Além disso, ele recomenda frequências naturais mínimas para diferentes tipos de construções, Tabela 1.1, para diferentes ocupações.

Tabela 1.1 – Frequências naturais mínimas recomendadas [4].

Tipo de estrutura	Frequências naturais mínimas (Hz)			
	Concreto armado	Concreto protendido	Concreto/aço (misto)	Aço
Ginásios e salões (esporte)	7,5	8,0	8,5	9,0
Salões de dança e locais para concertos sem assentos	6,5	7,0	7,5	8,0
Shows e teatros com assentos (música "leve")	3,5	3,5	3,5	3,5
Shows e teatros com assentos (música "pesada")	6,5	6,5	6,5	6,5

Os pesquisadores Ji e Ellis [5], estudaram os carregamentos gerados por alguns tipos de danças rítmicas. Eles verificaram que quando as pessoas realizam saltos ou outras atividades onde há um contato relativamente curto com a estrutura, a massa do corpo não se encontra vibrando juntamente com a estrutura, como uma massa fixa. De acordo com a pesquisa, Ji e Ellis [5] sugerem, em alguns casos, que a multidão seja modelada como sistemas do tipo massa-mola-amortecedor. Essa consideração é de grande importância numa análise, pois quando se assume que um grupo de pessoas se encontra parado sobre uma estrutura, significa um aumento da massa total da estrutura, o que implicaria em uma redução da frequência natural da estrutura. Eles concluíram que para o caso de atividades

que tenham perda de contato com a estrutura, a atuação humana ocorre apenas como carregamento e não agindo em conjunto com a estrutura.

Além disso, eles verificaram que a posição da pessoa sobre a estrutura influenciava significativamente no amortecimento da estrutura. Em testes experimentais realizados por Ji e Ellis [5], observou-se que a taxa de amortecimento de uma pequena estrutura utilizada nas análises, aumentava significativamente quando a pessoa encontrava-se de pé ou sentada sobre a mesma. Ao substituir a pessoa por uma massa equivalente, a frequência natural diminuía e a taxa de amortecimento permanecia a mesma.

Outros estudos foram realizados por Ebrahimpour, Haman e Sack [6], a fim de avaliar a influência da multidão na atividade de caminhar. Eles construíram uma plataforma instrumentada de 14,20 m por 2,00 m em aço e madeira, Figura 1.1. Os autores chegaram à conclusão de que ocorre certo sincronismo na atividade realizada em grupo, não apenas por sinais visuais e auditivos, mas também por influência do movimento dos próprios indivíduos.

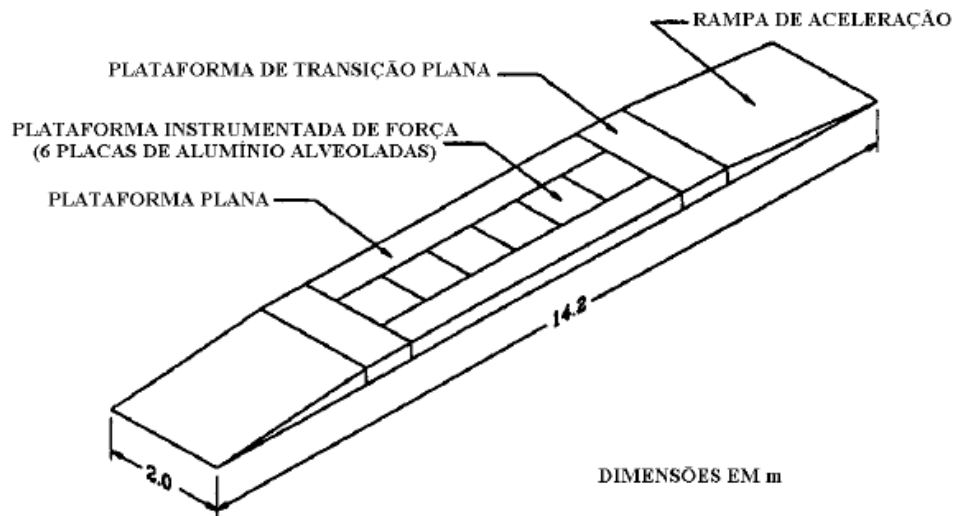


Figura 1.1 – Plataforma usada por Ebrahimpour, Haman e Sack [6].

A descrição das cargas geradas por atividades humanas é bastante complexa. As características individuais, a maneira em que cada indivíduo realiza a mesma atividade, a existência de estímulos externos são fatores que influenciam nas características do carregamento. Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos a fim de estabelecer parâmetros experimentais que descrevessem essas cargas. Vários autores [1, 2, 4, 5], descrevem o carregamento gerado por atividades humanas através de uma série de Fourier, que considera uma parcela estática para levar em conta o peso do indivíduo e outra parcela devido à carga dinâmica.

No Brasil, Alves [7] em sua dissertação de mestrado, realizou ensaios em uma plataforma rígida para várias atividades como: andar, correr e saltar. Ela obteve os valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos dessas atividades e verificou que esses coeficientes estavam bem próximos dos recomendados pelo CEB [8].

Em seu trabalho, Alves [7] verificou também que esses coeficientes podem ser influenciados por características individuais tais como idade, habilidade física, e a forma como os indivíduos realizam as atividades, além dos tipos de calçados utilizados durante a realização das atividades.

Seguindo essa linha de pesquisa, Faisca [9] descreve matematicamente as cargas dinâmicas geradas por atividades humanas onde existe a perda de contato com a estrutura, como saltos (com e sem estímulo), ginástica aeróbica, torcidas de futebol e platéias de show, com base em resultados experimentais.

Para esse estudo foi construída uma estrutura mista composta por vigas metálicas em perfil I para as longarinas e transversinas e um tabuleiro em concreto armado com dimensões 12,20 m x 2,20 m x 0,10 m, sobre apoios móveis. Através dos apoios móveis, pode-se variar a rigidez da estrutura, e analisar se as cargas sofrem alterações devido à interação pessoa-estrutura.

Outro importante aspecto do trabalho de Faisca [9] é a análise do carregamento de multidão. São realizadas atividades que envolvem ou não sincronismo. Foi verificado que o comportamento humano pode ser bastante influenciado por fatores externos como estímulos visuais e auditivos. Ao final, é proposta uma função de carregamento para atividades referentes a saltos à vontade, ginástica aeróbica, show e torcida. São apresentados parâmetros que caracterizam cada tipo de atividade estudada para serem usados em projetos estruturais submetidos a tais atividades.

No que tange ao conforto humano, vários estudos foram realizados a fim de definir limites, em termos de amplitudes, velocidades e acelerações, em estruturas sujeitas às vibrações provenientes de atividades humanas.

Reiher e Meister [10] desenvolveram uma escala, utilizada para determinação dos níveis de aceitabilidade de pisos. A escala foi desenvolvida a partir de ensaios experimentais submetendo um grupo de pessoas em pé a vibrações permanentes, com a frequência variando entre 1 Hz e 100 Hz. Segundo essa escala, as vibrações são classificadas em diversos patamares, em termos de amplitude e frequência.

Wiss e Parmalee [11] analisaram a resposta humana a vibrações transientes verticais, similares às produzidas por passos durante o caminhar, em termos de frequência, deslocamento máximo e amortecimento.

Através de pesquisa realizada por Murray [12], proveniente da análise de 100 sistemas de pisos mistos compostos por vigas de aço e lajes de concreto, a percepção humana pode ser classificada em quatro categorias distintas. Na primeira categoria, a vibração, apesar de existir, não é percebida pelos ocupantes. Na segunda, a vibração é percebida, mas não causa perturbação. Na terceira categoria, a vibração é capaz de causar incômodo e na quarta, a vibração é tão intensa que causa danos à saúde das pessoas. Nessa classificação, as duas primeiras categorias são consideradas aceitáveis.

Os pesquisadores Allen e Rainer [13], através de uma extensa pesquisa, desenvolveram uma escala para avaliação dos níveis de conforto. Os autores observaram que oscilações verticais contínuas tornam-se perceptíveis para as pessoas quando o pico de aceleração atinge 0,5% de g (g é a aceleração da gravidade). Esse critério fornece o pico de aceleração máximo em função da frequência natural e do amortecimento do piso, podendo ser aplicado para residências, escritórios ou escolas. A Figura 1.2 [14], apresenta a escala que foi adotada, posteriormente, pelo CSA (*Canadian Standards Association*).

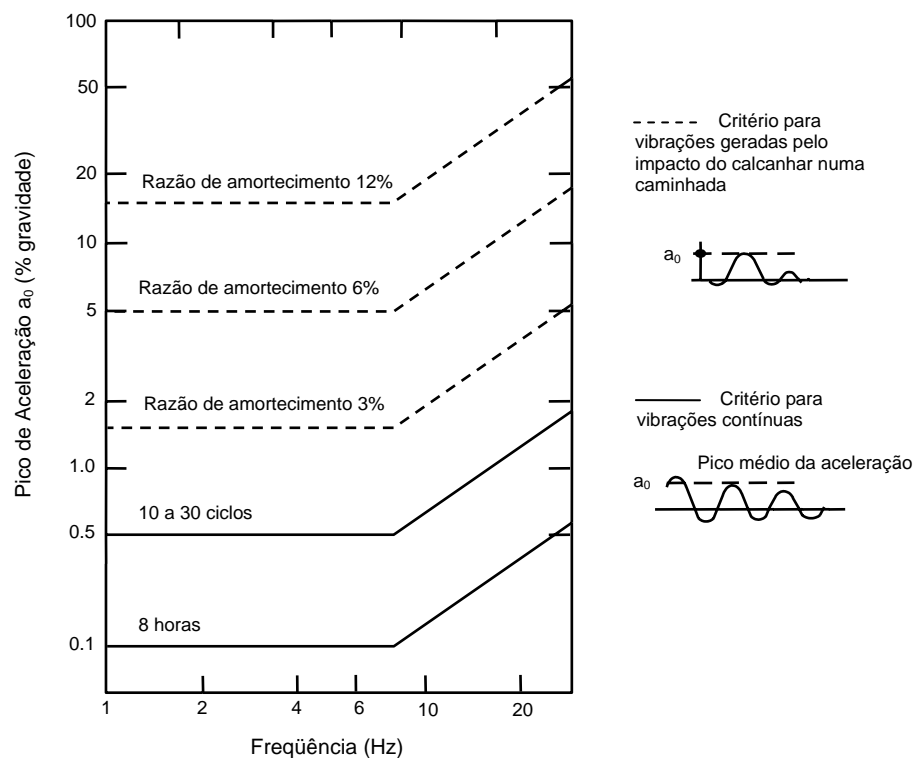


Figura 1.2 – Critério de conforto para vibração em pisos [14].

Através de outras pesquisas, Allen, Rainer e Pernica [1] propuseram valores mínimos para a frequência fundamental das estruturas de acordo com o tipo de ocupação e as características da estrutura. Esses valores foram baseados em carregamentos dinâmicos provenientes de atividades rítmicas como exercícios aeróbicos, e nos valores limites de aceleração de acordo com essas atividades.

Allen [15] desenvolveu um procedimento para análise de sistemas estruturais submetidos a atividades rítmicas, distribuídas em toda a estrutura ou em parte da estrutura. O critério pode ser usado para avaliar sistemas estruturais submetidos à atividade aeróbica, dança, e eventos similares. Ele recomenda que a frequência natural da estrutura seja maior que a frequência do maior harmônico significativo da atividade.

Em seu estudo, Lenzen [16] observou que a escala desenvolvida por Reiher e Meister [10] não considerava a influência do amortecimento sobre a percepção humana a vibrações. Através de seus estudos em laboratório, modificou a escala de Reiher e Meister [10]. Esta escala modificada apresentou bons resultados em pisos com fatores de amortecimento de até 5%.

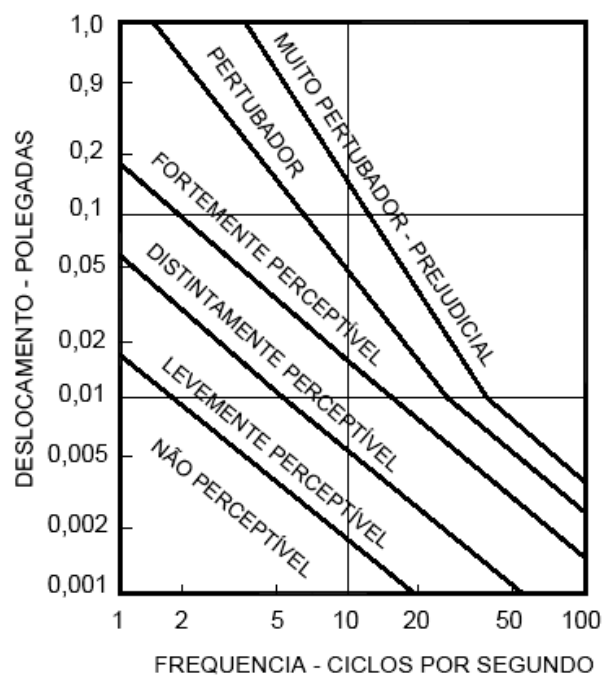


Figura 1.3 – Escala modificada de Reiher e Meister [10] e [16].

Em pesquisa realizada por Vecci *et al.* [17], foi avaliado o comportamento dinâmico de pisos metálicos submetidos a excitações rítmicas. Para avaliar a condição desses pisos quanto ao conforto humano e ao estado limite de utilização, a análise se limitou a uma comparação entre as frequências naturais da estrutura e uma frequência mínima exigida, com base no

critério de projeto do *National Building Code of Canada* (NBC), edição de 1990. Foi verificado nesse estudo que o piso não poderia ser utilizado em sua totalidade para ginástica aeróbica, a menos que fossem realizadas verificações adicionais em termos das acelerações e estas fossem atendidas.

Os pesquisadores De Paula e Queiroz [18] analisaram uma estrutura mista já existente, em aço e concreto, a fim de atender a um novo tipo de ocupação. A estrutura passaria a ser submetida a atividades rítmicas. Para essa análise, os autores utilizaram um programa computacional baseado no método dos elementos finitos. O carregamento dinâmico foi simulado através de carregamentos harmônicos. Os resultados obtidos para as frequências naturais da estrutura, utilizando-se o modelo computacional, foram comparados com valores experimentais obtidos na estrutura real.

Os autores verificaram que, em alguns pontos do piso, os níveis de aceleração foram superiores aos limites recomendados para atender aos critérios de conforto humano, o que levou à proposição de reforços para tornar a estrutura adequada à nova situação.

A partir de uma modelagem numérica Mello [19] desenvolveu estudos com modelos numéricos de pisos mistos em aço-concreto, submetendo-os a carregamentos representativos do caminhar de pessoas, utilizando para isso parâmetros de projeto propostos por Murray *et al.* [21]. Além disso, também utilizou em seus modelos uma aproximação matemática proposta por Varela [22], que incorpora o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso, ação considerada como a maior fonte de excitação gerada durante uma caminhada. Os resultados dessa pesquisa indicam que níveis de acelerações bastante elevados são alcançados, podendo, de fato, gerar desconforto aos usuários.

É importante ressaltar que o desconforto humano diante de vibrações é um fenômeno complexo e difícil de quantificar, pois traduz a reação de indivíduos com características distintas submetidas a um dado estímulo. Mas, de acordo com Gama [20], percepção e desconforto não devem ser confundidos, pois o segundo geralmente possui valores mais altos que o primeiro. Mesmo assim, ele afirma que a repetição de eventos simplesmente perceptíveis também pode levar ao desconforto. Diante disso é importante que a condição de conforto seja considerada na análise de sistemas estruturais, pois afeta diretamente no bem-estar, na eficiência do trabalho ou de quaisquer outras atividades, e até mesmo na saúde dos usuários.

1.3 Escopo do Trabalho

No capítulo 1, são apresentados os objetivos da pesquisa, mostrando a importância da análise dinâmica diante das novas concepções estruturais. São apresentados diversos trabalhos de pesquisa que tratam da análise de sistemas estruturais, da modelagem do carregamento e dos critérios de conforto humano, a fim de fornecer embasamento a esse trabalho.

No capítulo 2, são apresentados critérios e recomendações de análise propostos por algumas normas, nacionais e internacionais.

No capítulo 3, são apresentadas as metodologias adotadas na modelagem dos carregamentos dinâmicos, assim como as respectivas formulações matemáticas que descrevem as atividades estudadas. O enfoque deste estudo são os carregamentos humanos rítmicos correspondentes à ginástica aeróbica e aos saltos à vontade.

No capítulo 4, são apresentados os modelos estruturais utilizados na análise dinâmica e todos os detalhes pertinentes, no que se refere à concepção dos modelos estruturais, dimensões dos pisos, peças estruturais utilizadas, espessura das lajes, características dos materiais e suas propriedades físicas. São apresentados os tipos de elementos finitos adotados na modelagem numérica, a definição da malha e por fim a modelagem do amortecimento estrutural.

O capítulo 5 apresenta as análises de vibração livre dos modelos estruturais, análises harmônicas e análises de vibração forçada. As análises de vibração forçada são realizadas no domínio do tempo utilizando as metodologias de carregamento apresentadas anteriormente. O comportamento dos pisos é avaliado ao longo das análises, através da variação de uma das dimensões dos pisos. Ao final os resultados das duas metodologias de carregamento são comparados e confrontados com a literatura técnica disponível quanto aos critérios de conforto humano.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como as sugestões para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa.

CAPÍTULO 2

Critérios de Normas para Análise de Vibrações

2.1 Introdução

As vibrações em pisos ocasionadas por atividades humanas têm se tornado freqüentes nos dias de hoje, por isso é de grande importância conhecer as metodologias desenvolvidas para a análise de estruturas submetidas a esse tipo de carregamento. Estas metodologias têm o objetivo de servir como base na elaboração de projetos ou mesmo auxiliar na correção de problemas de vibração que porventura existam.

Esta seção apresenta alguns critérios estabelecidos por normas, referentes à análise de pisos submetidos às ações dinâmicas oriundas de atividades humanas, além de critérios relativos à análise do conforto humano.

2.2 Norma Brasileira – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado: NBR 6118/2003 [23]

Segundo a norma brasileira NBR 6118/2003 - *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado* [23], a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. A norma recomenda que para estruturas sujeitas à vibração, deve-se afastar a freqüência natural da estrutura (f_n) ao máximo possível da freqüência crítica ($f_{crítica}$), que depende do tipo de ocupação da edificação em estudo. A norma recomenda que seja:

$$f_n > 1,2f_{crítica} \quad (2.1)$$

O comportamento de estruturas que se encontram sujeitas às ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações, pode ser modificado por meio de alterações de alguns fatores, como ações dinâmicas, freqüência natural (pela mudança da rigidez da estrutura ou da massa em vibração) e o aumento das taxas de amortecimento estrutural. Na falta de valores determinados experimentalmente, adota-se os valores indicados na Tabela 2.1 para a $f_{crítica}$.

Tabela 2.1 – Freqüência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas à vibração pela ação de pessoas [23].

Caso	$f_{\text{crítica}}$ (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeira fixa	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5

Em casos especiais a norma sugere que sejam realizadas análises dinâmicas mais acuradas com base em recomendações internacionais, enquanto não houver norma brasileira específica que trate desse assunto.

2.3 Norma Brasileira – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios – Projeto de Revisão: NBR 8800/1986 [24]

O projeto de revisão da NBR 8800 de setembro de 2006 [24], anexo M, prevê que as estruturas formadas por vãos muito grandes e amortecimento reduzido podem provocar desconforto, quando submetidas a atividades humanas normais. Ele apresenta uma avaliação simplificada para pisos submetidos a vibrações causadas por atividades humanas normais.

Nos pisos em que as pessoas caminham regularmente, como os de residências, escritórios e similares, a menor freqüência natural não pode ser inferior a 4 Hz. Essa condição fica satisfeita se o deslocamento vertical total for menor que 20 mm. Esse deslocamento é calculado considerando as ações permanentes, incluindo a parcela dependente do tempo, e as ações variáveis, considerando a viga como biapoiada e usando as combinações freqüentes de serviço propostas pela norma.

Já em pisos onde as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academias de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esportes, a menor freqüência natural não pode ser inferior a 6 Hz. Caso a atividade seja muito repetitiva, como a ginástica aeróbica, a freqüência natural deverá ser aumentada para 8 Hz. Essas condições ficam satisfeitas, respectivamente, se o deslocamento vertical total for menor que 9 mm e 5 mm. Esse deslocamento é calculado considerando as ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e as ações variáveis, considerando a viga como biapoiada e usando as combinações freqüentes.

Apesar disso, a norma [24] deixa a critério do projetista a opção pelo tipo de avaliação a ser realizada, sendo que para uma avaliação mais criteriosa o projetista deverá proceder a uma análise dinâmica que leve em conta os seguintes itens:

- a) as características e a natureza das excitações dinâmicas, como por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividades rítmicas;
- b) os critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso;
- c) a frequência natural da estrutura do piso;
- d) a razão de amortecimento modal;
- e) os pesos efetivos do piso.

Para análises mais precisas, a norma [24] cita e recomenda algumas publicações internacionais.

2.4 Guia Prático do AISC – Floor Vibrations Due to Human Activity 11 (Steel Design Guide Series) [21]

Esse guia de projeto foi desenvolvido pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar [21] e faz parte de uma série de livros denominada Steel Design Guide Series, desenvolvida no American Institute of Steel Construction (AISC). Ele tem como objetivo básico fornecer uma ferramenta analítica para avaliar sistemas de pisos e passarelas submetidas a atividades humanas, quanto à capacidade de serviço.

No procedimento proposto por este guia, considera-se que uma componente harmônica dependente do tempo se iguala à frequência natural da estrutura, na tentativa de causar a ressonância, como mostra a equação (2.2):

$$F(t) = P\alpha_i \cos(2\pi f_p t) \quad (2.2)$$

Onde:

$F(t)$: força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N);

P : peso do indivíduo;

i : múltiplo harmônico da frequência do passo;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;

f_p : frequência do passo da atividade (Hz);

t : tempo (s).

Os valores da frequência do passo da atividade (f_p) e coeficientes dinâmicos (α_i) podem ser vistos na Tabela 2.2, considerando diversos tipos de atividades, como a caminhada, a atividade aeróbica e a dança.

Tabela 2.2 – Faixas de frequência das atividades [21].

Frequência de excitação do passo (f_p) e coeficientes dinâmicos* (α_i)						
Harmônico	Caminhada		Atividade aeróbica		Dança	
i	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i
1	1,6 a 2,2	0,5	2,0 a 2,75	1,5	1,5 a 3,0	0,5
2	3,2 a 4,4	0,2	4,0 a 5,5	0,6	-	-
3	4,8 a 6,6	0,1	6,0 a 8,25	0,1	-	-
4	6,4 a 8,8	0,05	-	-	-	-

* Coeficiente dinâmico significa o pico da força senoidal dividido pelo peso da pessoa.

Para a avaliação da estrutura quanto a atividades rítmicas, calcula-se a relação a_p/g (g é a aceleração da gravidade), dada pela equação (2.3), na ressonância, ou seja, fazendo a frequência do passo se igualar à frequência natural da estrutura ($f_p = f_n$).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p}{2\xi w_t} \quad (2.3)$$

Onde:

a_p/g : razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;

w_p : carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso;

w_t : carga total por unidade de área do piso, incluindo os ocupantes;

ξ : taxa de amortecimento modal.

Os valores obtidos da relação a_p/g são então comparados com os valores limites definidos na curva base da ISO [26], que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis.

Os valores limites podem ser vistos na Figura 2.1. Estes valores são ajustados de acordo com a intenção da ocupação. As curvas sugeridas para os vários tipos de ocupação estão em função da curva base de aceleração em rms (*root mean square*), Figura 2.1, podendo apresentar variações numa faixa de 0,8 a 1,5 vezes dos valores recomendados de acordo com a duração e a frequência da vibração.

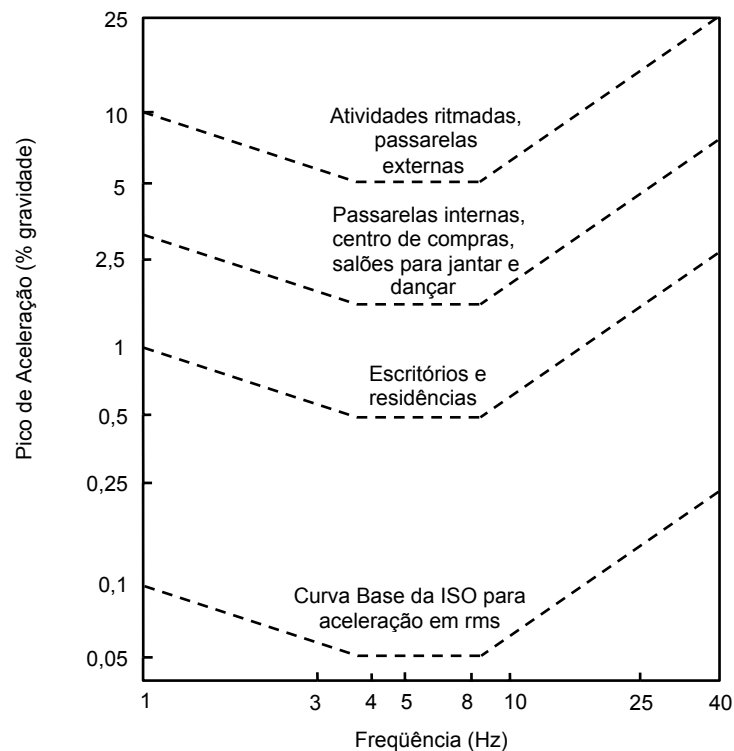


Figura 2.1 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano [21].

2.4.1 Procedimentos Adotados na Solução de Problemas de Vibração

O guia fornece alguns procedimentos na tentativa de resolver o problema de vibrações excessivas numa estrutura existente.

2.4.1.1 Redução de Efeitos

Em algumas situações, não é necessário fazer modificações no sistema estrutural para que o problema de vibrações seja resolvido. A solução pode estar na eliminação da fonte causadora da perturbação e remoção ou alteração de alguns elementos não estruturais que vibram em ressonância com o movimento do piso.

2.4.1.2 Relocação

Existem casos em que a fonte causadora das vibrações pode ser transferida para outro local. No caso de vibrações provocadas por equipamentos, o problema pode ser resolvido através da retirada da fonte causadora para uma área mais isolada do resto da estrutura.

Já na situação em que pessoas executam atividades aeróbicas, por exemplo, a relocação das atividades de um dado piso, para uma área no primeiro andar ou térreo da edificação,

poderia resolver o problema, dependendo do tipo da atividade e da disponibilidade de espaço.

2.4.1.3 Redução da massa

A redução da massa não é usualmente muito efetiva, pois também resulta numa diminuição da resistência inercial ao impacto ou à vibração ressonante. Mas, ocasionalmente, a redução da massa de um sistema estrutural pode levar a um aumento da frequência natural, afastando a estrutura da ressonância.

2.4.1.4 Enrijecimento

Aumentar a rigidez da estrutura pode levar a um aumento das frequências naturais reduzindo a possibilidade da ressonância. Mas, um aumento na rigidez pode ser uma medida bastante trabalhosa e custosa, requerendo um trabalho especializado. Essa opção de solução deve ser direcionada sempre na utilização de materiais leves e rígidos para que não promova um aumento considerável da massa do sistema, já que isso não contribuiria para o aumento da frequência natural da estrutura.

2.4.1.5 Aumento do Nível de Amortecimento

As vibrações causadas por atividades humanas podem ser reduzidas através do aumento do amortecimento da estrutura. O amortecimento depende das propriedades físicas inerentes dos materiais que compõe a estrutura, mas também dos elementos não-estruturais, tais como acabamentos, divisórias, forros, móveis e etc.

Uma maneira eficaz de aumentar o amortecimento é a introdução de elementos não-estruturais, que interagem com a estrutura e podem fornecer um acréscimo no amortecimento.

2.4.1.6 Dispositivo Mecânico de Controle Passivo

Este tipo de dispositivo é um atenuador da vibração chamado de TMD (*Tuned Mass Damper*). O TMD constitui um sistema simples, composto por massas, molas e amortecedores. Através de seu movimento com frequência próxima, mas em oposição de fase com o da estrutura, gera forças de inércia que se contrapõem às forças de inércia produzidas na estrutura pelas ações externas. É posicionado no ponto de máxima amplitude de vibração do painel de piso, contrapondo-se ao movimento do piso.

O TMD é efetivo quando sua frequência se aproxima da frequência causadora da vibração. Além disso, é considerada uma solução barata, pois não precisa de energia elétrica para atuar, visto que entram em funcionamento acionados pelo próprio movimento da estrutura. Não interferem na arquitetura do ambiente, pois podem ser facilmente ocultados no forro.

2.4.1.7 Sistemas de Controle Ativo

Um dos sistemas de controle ativo utilizado é o atuador de massa. Este tipo de sistema se vale de energia externa para controlar os efeitos de vibrações indesejáveis. O atuador é um sistema que recebe um sinal de entrada decorrente das medições de acelerômetros existentes na estrutura, e que responde, após processamento em um computador, em oposição ao movimento do piso, reduzindo assim suas amplitudes de vibração. Sua instalação requer manutenção periódica. O uso de energia elétrica constante eleva o seu custo de utilização.

2.5 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations): ISO 2631/1 [25]

A norma ISO 2631/1 define métodos de medida da vibração de corpo inteiro e indica os principais fatores que determinam o grau de aceitabilidade à exposição da vibração.

Ela traz informações e orienta quanto aos possíveis efeitos da vibração sobre a saúde, o conforto, o limite de percepção, na faixa de 0.5 a 80Hz, e de enjôo, para frequências entre 0.1 e 0.5 Hz. Ela classifica a resposta humana às vibrações em três categorias:

- a) Limite da redução do conforto: quando as vibrações já são sentidas e o conforto começa a ser prejudicado.
- b) Limite de eficiência: quando os níveis de vibrações prejudicam a eficiência na realização de atividades, podendo chegar a causar fadiga nos usuários dependendo do tempo de exposição às vibrações.
- c) Limite do tempo de exposição: significa o limite de exposição que um indivíduo esteja submetido sem que as vibrações causem danos à saúde ou até mesmo comprometa à segurança.

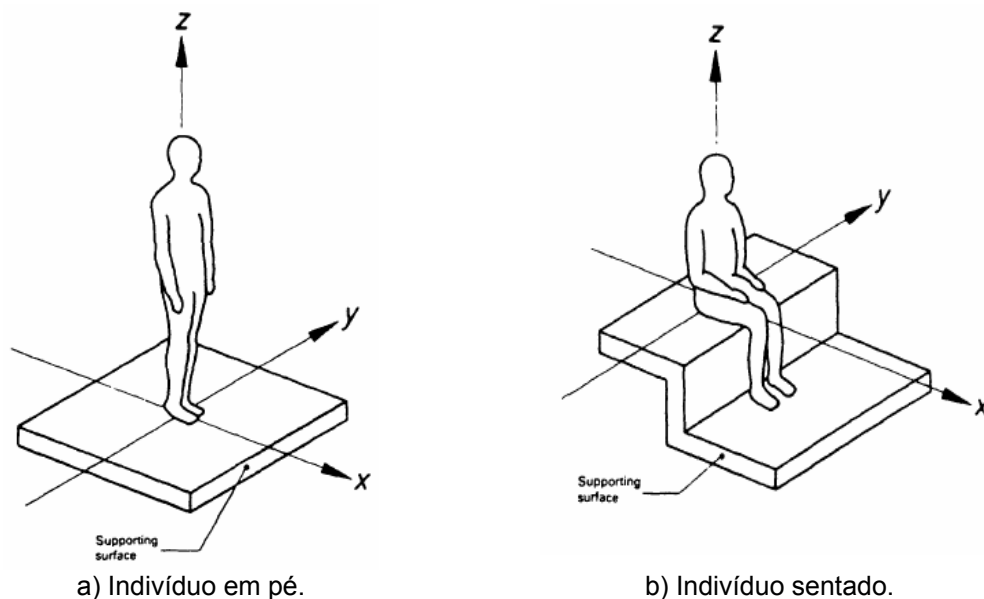
Apesar da norma classificar as vibrações e fornecer um método para se estabelecer o grau de severidade das vibrações em edifícios, ela não estabelece limites específicos de aceitação.

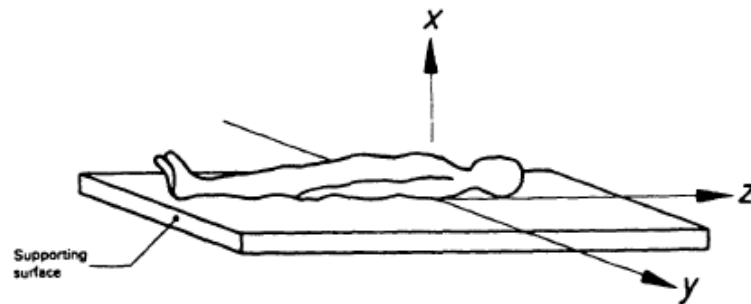
2.6 Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations – Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings (1 to 80 Hz): ISO 2631/2 [26]

Essa norma apresenta procedimentos de medição e critérios de aceitabilidade em edificações sujeitas a vibrações que podem levar ao desconforto humano. Ela estabelece limites para avaliação de vibrações, em função do tipo de vibração e do tipo de ocupação da edificação.

Além disso, ela define e fornece valores numéricos dos limites de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano, na amplitude de frequências entre 1 e 80 Hz, para vibrações periódicas e não periódicas. A norma sugere que se deve medir as vibrações na região onde exista o contato do usuário com a estrutura, seja em um ponto ou em vários pontos da edificação, onde as vibrações ocorram com maior intensidade.

A norma propõe que um fator importante na percepção das vibrações está relacionado com a posição em que o indivíduo se encontra quando as sente. A norma considera que a direção de propagação das vibrações no corpo humano se relaciona diretamente com o grau de percepção das vibrações. Para isso ela estabelece três direções principais: a direção dos pés a cabeça corresponde ao eixo Z, a direção das costas ao peito corresponde ao eixo X e a direção do lado direito ao lado esquerdo corresponde ao eixo Y. A Figura 2.2 ilustra essas três direções de propagação.





c) Indivíduo deitado.

Figura 2.2 – Direções de propagação das vibrações no corpo humano [26].

Além disso, de acordo com essa norma, as vibrações podem causar desconforto aos usuários de acordo com a frequência e o comportamento ao longo do tempo, se contínua, intermitente ou transitória.

São propostos níveis aceitáveis de vibrações em função do tipo de vibração, do período diurno ou noturno e do tipo de ocupação da edificação. Estes limites estão especificados em termos de frequência vibratória, grandeza de aceleração, tempo de exposição e a direção da vibração em relação ao tronco humano. São apresentadas na Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5 as curvas das acelerações em rms (root mean square), e na Tabela 2.3 são apresentados os multiplicadores destas curvas, em função do tipo de ocupação, do período diurno ou noturno e do tipo de vibração.

Tabela 2.3 – Faixa dos fatores de multiplicação usados em vários países para estimar satisfatoriamente os níveis de vibrações em edificações, no que se refere ao conforto humano [26].

Local	Tempo	Vibrações contínuas ou intermitentes	Vibrações transientes (excitações com várias ocorrências por dia)
Áreas de trabalho críticas (ex.: salas de operação em hospitais, laboratórios de alta precisão, etc.)	Dia e Noite	1	1
Residências	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Dia e Noite	4	60 a 128
Salas de conferências	Dia e Noite	8	90 a 128

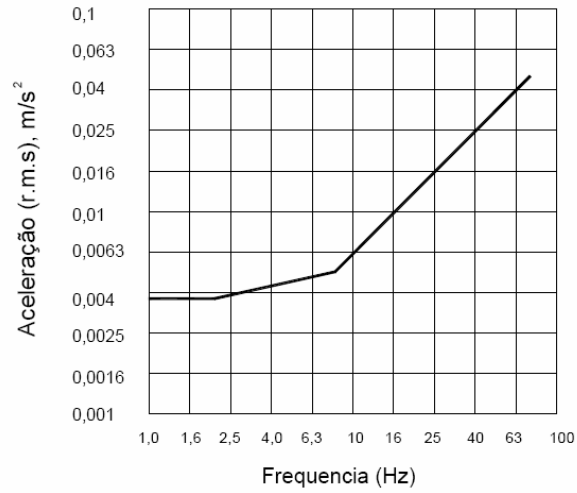


Figura 2.3 – Curva base de aceleração em direções combinadas (eixo x, y e z) [26].

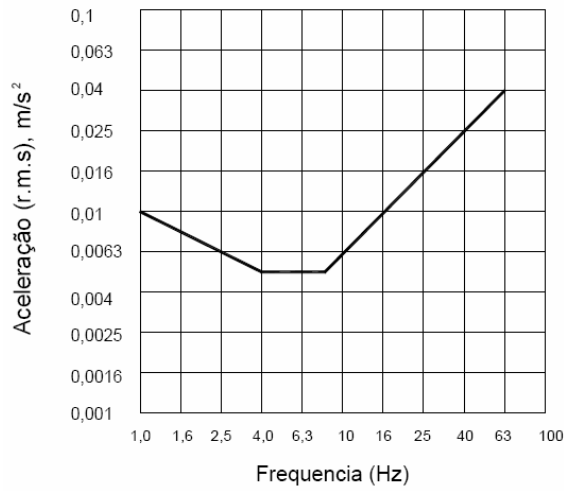


Figura 2.4 – Curva base de aceleração no eixo z [26].

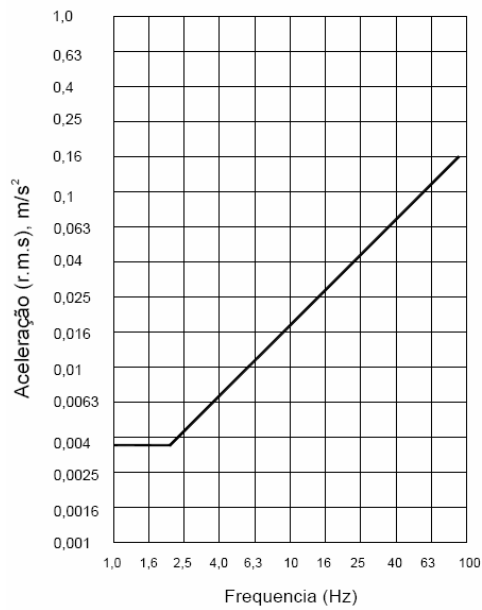


Figura 2.5 – Curva base de aceleração nos eixos x e y [26].

CAPÍTULO 3

Carregamentos Dinâmicos

3.1 Generalidades

Carregamentos dinâmicos, por definição, são carregamentos em que a magnitude, direção e posição podem variar ao longo do tempo. Conseqüentemente, as respostas da estrutura, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração também irão variar ao longo do tempo.

Várias são as fontes geradoras de carregamentos dinâmicos, como exemplo, pode-se citar a ação dinâmica do vento, a atuação de equipamentos, as ações sísmicas, o tráfego de veículos, as ações causadas por atividades humanas como caminhar, dançar e pular, entre outras.

Para análise dos efeitos causados por cargas dinâmicas, o primeiro passo é conhecer e descrever corretamente as cargas que irão atuar no sistema estrutural. Em se tratando de atividades humanas, podemos tratar esses carregamentos como periódicos, ou seja, a variação da carga é repetida durante vários ciclos sucessivos.

De acordo com Alves [7], as cargas geradas por atividades humanas podem ser classificadas em duas categorias. A primeira categoria se refere àquelas atividades sem a perda de contato com a estrutura, por exemplo: a caminhada e a dança de salão. A outra categoria se refere àquelas atividades em que existe a perda de contato com a estrutura, como exemplo pode-se citar a ginástica aeróbica e a corrida.

Neste estudo pretende-se tratar de atividades onde existe a perda de contato com a estrutura. As atividades estudadas são propriamente, a ginástica aeróbica e os saltos à vontade.

3.2 Caracterização das Ações Dinâmicas

A descrição do carregamento produzido por pessoas em movimento é bastante complexa, pois envolve características próprias de cada indivíduo como a idade, o peso, a habilidade física, o tipo de calçado e ainda a forma como cada indivíduo realiza tal atividade.

No caso das ações dinâmicas que envolvem a perda de contato do indivíduo com a estrutura, o movimento realizado se configura por fases alternadas de contato, ou seja, durante um determinado período o indivíduo está em contato com a estrutura e por alguns instantes ele se mantém no ar.

Entre as atividades que envolvem a perda de contato com a estrutura, pode-se citar a ginástica aeróbica e aquelas realizadas por platéias em shows e torcidas. Todas, porém, são caracterizadas pela execução de saltos e são diferenciadas principalmente pelo grau de sincronismo em que atuam os participantes.

Em se tratando dos saltos, observam-se quatro fases distintas que caracterizam essa ação, (Figura 3.1).

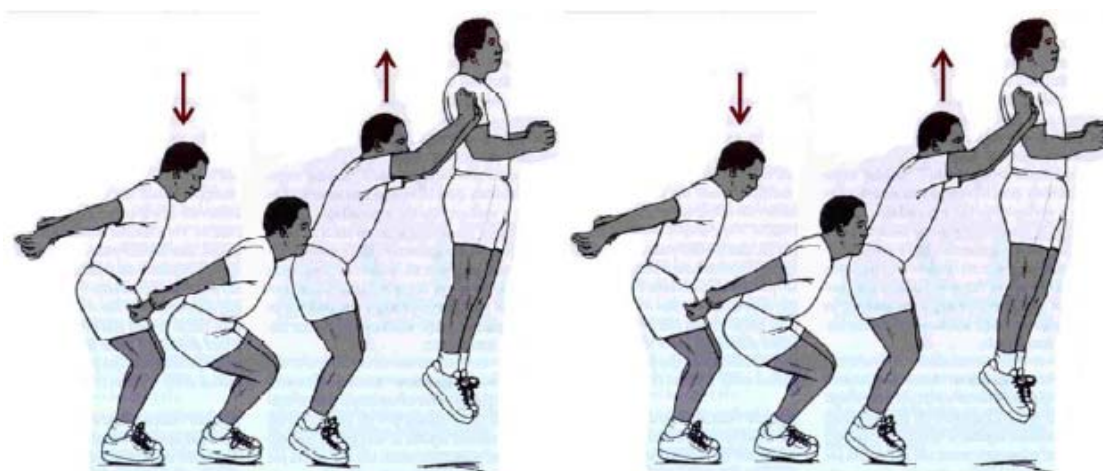


Figura 3.1 – Movimentos de um indivíduo durante um salto [28] *apud* [9].

A primeira fase mostra a pessoa na posição inicial, numa fase de preparação. A segunda fase é a impulsão. Nessa fase, primeiro o indivíduo flexiona os joelhos com extensão dos membros superiores, projeta-se para frente e para cima e eleva os membros superiores a fim de impor uma velocidade inicial ao corpo. A terceira fase é a elevação, ou seja, a fase onde o corpo perde o contato com o solo e segue uma trajetória no espaço. A quarta e última fase é a aterrissagem, quando o corpo retoma o contato com o solo, ocorrendo nova flexão dos joelhos, retornando à posição inicial para o início de um novo salto.

Os saltos podem ocorrer seguidos de movimentos horizontais, e podem ser executados, estando o indivíduo inicialmente parado ou em movimento. A Figura 3.2, mostra a força aplicada em uma estrutura durante a execução de um salto.

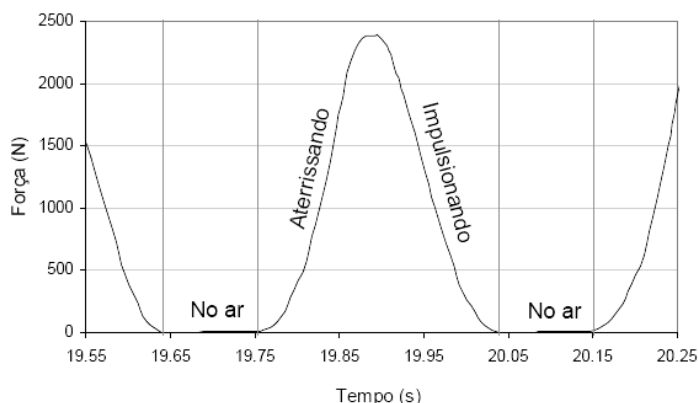


Figura 3.2 – Força aplicada numa estrutura durante um salto [9].

Percebe-se através da Figura 3.2, que quando o indivíduo está no ar, a força aplicada sobre a estrutura vale zero. Na medida em que o indivíduo aterrissa, a força vai crescendo até atingir seu pico, nesse instante o indivíduo começa a impulsionar para realizar o próximo salto.

3.3 Modelo de Carregamento I (MC-I)

Este modelo de carregamento trata da formulação associada às ações dinâmicas induzidas por ginástica aeróbica e saltos à vontade. Para tal, a função Hanning [29] *apud* [9], muito utilizada em processamentos de sinais, foi proposta por Faisca [9] para descrever matematicamente esses carregamentos. Esta modelagem é respaldada por parâmetros experimentais também realizados por Faisca [9].

Em sua investigação, Faisca [9] observou que para diferentes atividades como saltos à vontade, ginástica aeróbica e show/torcida, os gráficos da *força x tempo* apresentaram características bem semelhantes, ocorrendo variações apenas na amplitude máxima e no período das atividades. Isso possibilitou o emprego de uma única metodologia para o processamento dos sinais.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente, verificou-se que a função semi-seno, usualmente empregada por vários autores, não é tão adequada para representar esse tipo de carregamento. Através de um estudo com várias funções, foi sugerida a função conhecida como janela Hanning [29] *apud* [9]. Essa função foi a que melhor representou o

signal da força obtido experimentalmente. A comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning pode ser vista na Figura 3.3.

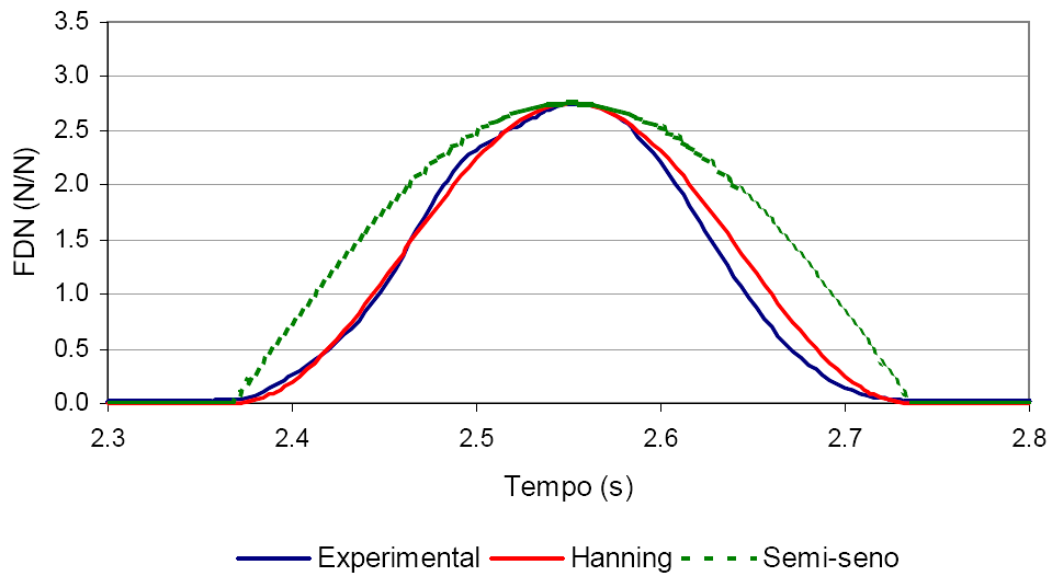


Figura 3.3 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning [9]¹.

A representação matemática desse carregamento, por meio da função Hanning, é dada pela equação (3.1), a seguir:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\}, \text{ para } t \leq T_c \\
 F(t) &= 0, \text{ para } T_c < t \leq T
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Onde:

$F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo (N);

CD: coeficiente de defasagem;

K_p : coeficiente de impacto;

P: peso da pessoa (N);

T: período da atividade (s);

T_c : período de contato da atividade (s);

t: tempo (s).

A Figura 3.4 facilita o entendimento da função adotada. Ela mostra os dois intervalos de tempo significativos da função.

¹ FDN é a *Força Dinâmica Normalizada*, que é a razão entre a amplitude da carga dinâmica e a carga estática (peso do indivíduo).

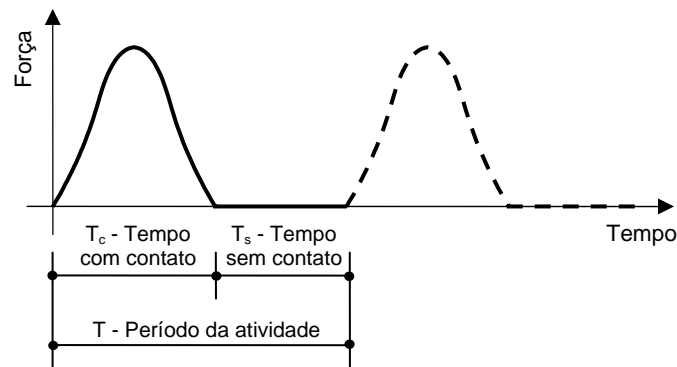


Figura 3.4 – Intervalos de tempo da função adotada.

Dos parâmetros citados anteriormente, o coeficiente de impacto (K_p), é um coeficiente de majoração da carga, que considera o impacto do salto sobre a estrutura. Já o coeficiente de defasagem (CD), é um coeficiente de ponderação da carga, determinado em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam. Esse parâmetro leva em consideração os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam na estrutura. Através dele são consideradas possíveis defasagens, variações de ritmo, etc., que levariam à redução do carregamento.

A Figura 3.5 representa o gráfico do coeficiente de defasagem (CD), para três atividades estudadas por Faisca [9], extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

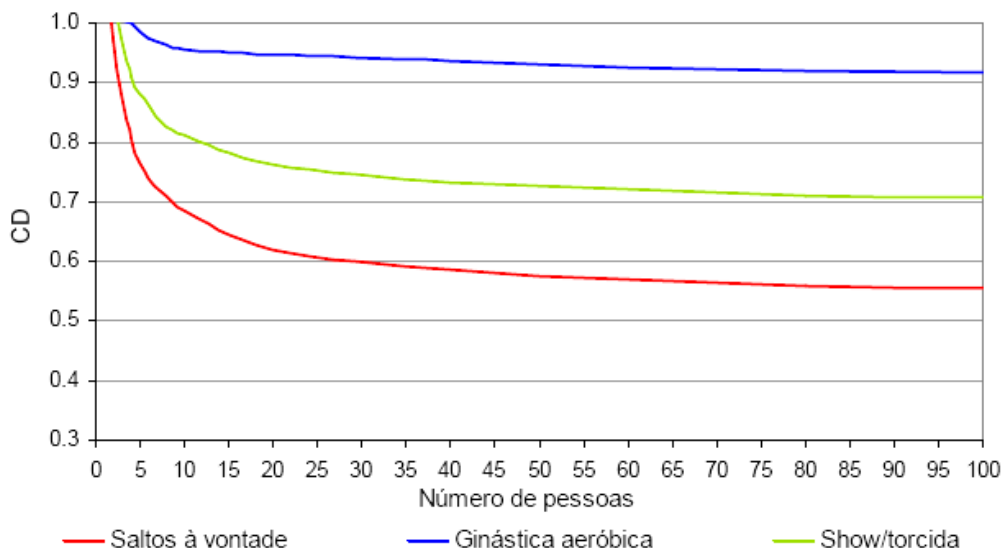


Figura 3.5 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas [9].

Percebe-se através da Figura 3.5, que o coeficiente de defasagem não varia muito para a atividade aeróbica como varia para a atividade de saltos à vontade, na medida em que o

número de pessoas é aumentado. Isso ocorre porque há um maior sincronismo na atividade aeróbica, cujo CD fica entre os valores de 0,9 a 1,0. Na atividade de saltos à vontade os valores de CD estão aproximadamente entre 0,56 e 1,0.

A partir das curvas mostradas na Figura 3.5 foi montada a Tabela 3.1, onde são apresentados os valores numéricos de CD relacionados com o número de pessoas que será aplicado nesta investigação, de acordo com cada atividade (ginástica aeróbica e saltos à vontade).

Tabela 3.1 – Valores de CD utilizados nas análises [9].

Nº Pessoas	CD	
	Ginástica aeróbica	Saltos à vontade
1	1	1
3	1	0,88
6	0,97	0,74
9	0,96	0,70
12	0,95	0,67

A partir das diferentes situações estudadas por Faisca [9] que avaliaram a influência da flexibilidade da estrutura nas respostas, foram obtidos diferentes resultados para os parâmetros que caracterizam cada atividade. Na Tabela 3.2 são apresentados os valores das médias e desvios-padrão dos parâmetros T, T_c e K_p adotados neste trabalho para representar as atividades mencionadas.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados nas análises [9].

Atividade	T (s)	T _c (s)	K _p
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60

De forma a ilustrar a modelagem deste tipo de carregamento dinâmico e utilizando-se os dados experimentais propostos por Faisca [9], a Figura 3.6 apresenta exemplos de sinais da força no tempo correspondente à ginástica aeróbica. O peso de cada indivíduo (P) é considerado igual a 800N [30].

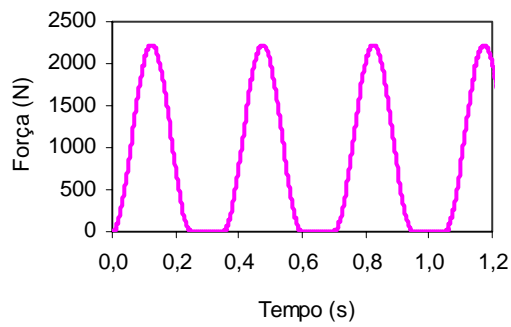
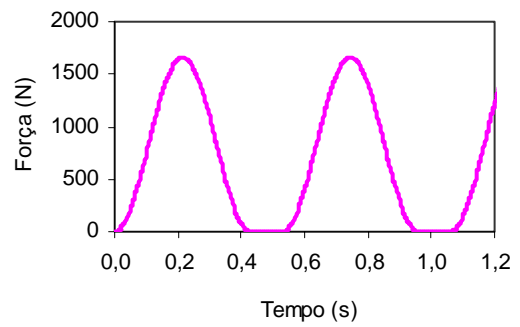
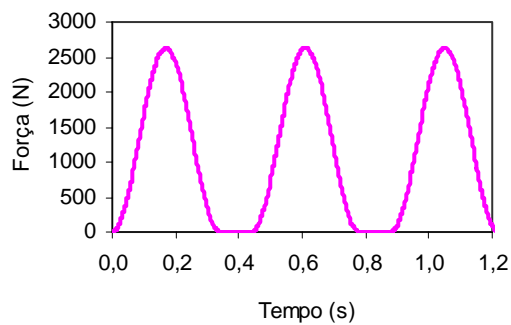
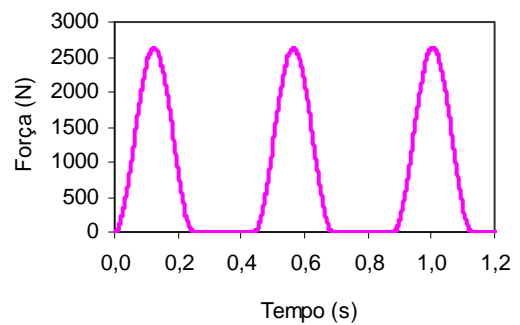
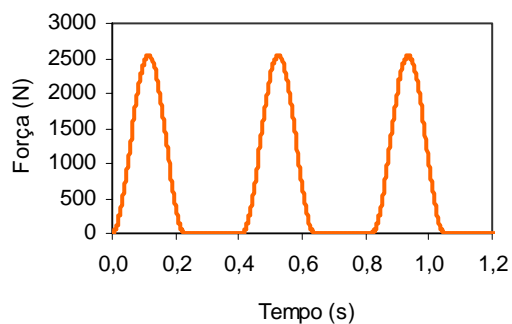
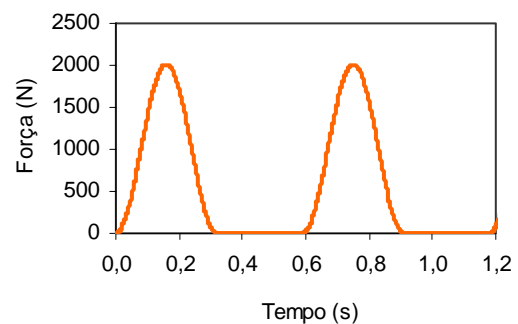
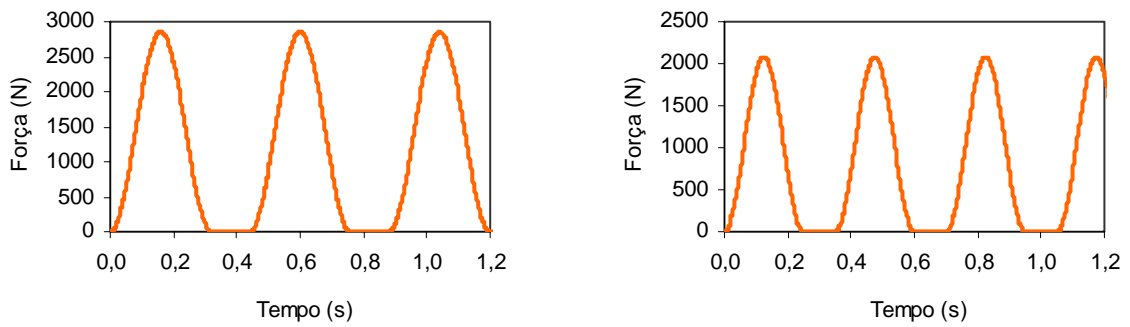
a) Para $T=0,35s$, $T_c=0,25s$, $k_p=2,78$ e $CD=1$.b) Para $T=0,53s$, $T_c=0,43s$, $k_p=2,18$ e $CD=0,95$.c) Para $T=0,44s$, $T_c=0,34s$, $k_p=3,38$ e $CD=0,97$.d) Para $T=0,44s$, $T_c=0,25s$, $k_p=3,38$ e $CD=0,97$.

Figura 3.6 – Sinais de força no tempo para atividade aeróbica.

A Figura 3.7 apresenta alguns sinais no tempo da força correspondente a atividade de saltos à vontade. Ressalta-se que para a atividade de saltos à vontade a função de carregamento é a mesma, somente os parâmetros T , T_c , K_p e CD são modificados.

a) Para $T=0,41s$, $T_c=0,23s$, $k_p=3,17$ e $CD=1$.b) Para $T=0,59s$, $T_c=0,32s$, $k_p=2,59$ e $CD=0,97$.



c) Para $T=0,44s$, $T_c=0,30s$, $k_p=3,75$ e $CD=0,95$.

d) Para $T=0,35s$, $T_c=0,25s$, $k_p=2,60$ e $CD=1$.

Figura 3.7 – Sinais de força no tempo para atividade de saltos à vontade.

Foram calculadas as transformadas de Fourier $F(w)$ da função associada ao modelo de carregamento I, para diferentes parâmetros de T , T_c e K_p . Em todos os espectros de frequência foi verificada a presença de vários picos representativos da atividade, correspondentes aos seus harmônicos. A Figura 3.8 apresenta o gráfico de $F(w)$ da função apresentada na Figura 3.7 (a) com os cinco primeiros picos (principais picos).

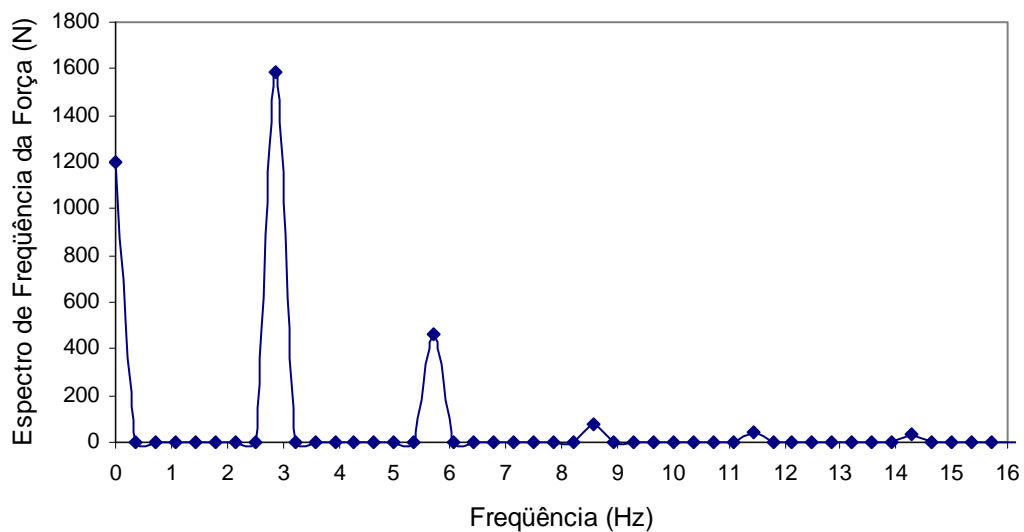


Figura 3.8 – Espectro de frequência da força proveniente do MC-I.

Para outros valores de T_c e de T , mudam a frequência da atividade e seus harmônicos, mas a configuração do espectro é semelhante ao apresentado na Figura 3.7.

3.4 Modelo de Carregamento II (MC-II)

Essa formulação propõe a representação do carregamento através de uma série de Fourier com três termos, definida pela equação (3.2). Nessa formulação, considera-se que uma componente harmônica se iguale à frequência natural da estrutura, na tentativa de causar o fenômeno da ressonância.

$$F(t) = P + P \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(2\pi f_p t + \phi_i) \right] \quad (3.2)$$

Onde:

F(t): representação matemática para o carregamento no tempo (N);

P: peso da pessoa (N);

n: número de harmônicos considerados para representar a força relativa ao tipo de atividade humana;

α_i : coeficiente dinâmico do i-ésimo harmônico da frequência da força (relação entre o pico da força e o peso do indivíduo);

i: número do i-ésimo harmônico da frequência da força;

f_p : frequência do passo da atividade;

t: tempo (s)

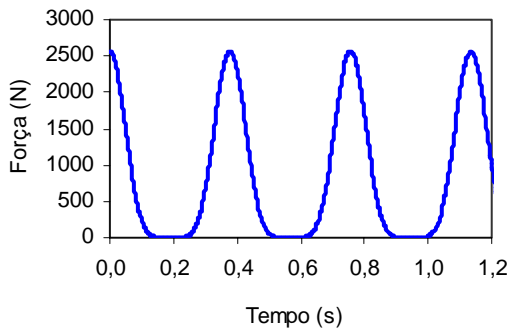
ϕ_i : ângulo de fase entre o i-ésimo e o primeiro harmônico.

Os valores recomendados para os coeficientes dinâmicos e as respectivas faixas de frequências para cada harmônico são fornecidas na Tabela 3.3. Os valores dos ângulos de fase utilizados nas análises correspondem a $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$. Esses valores levaram à forma mais próxima do carregamento estudado, correspondente à atividade aeróbica. O valor do peso considerado para cada indivíduo (P), é igual a 800N [30].

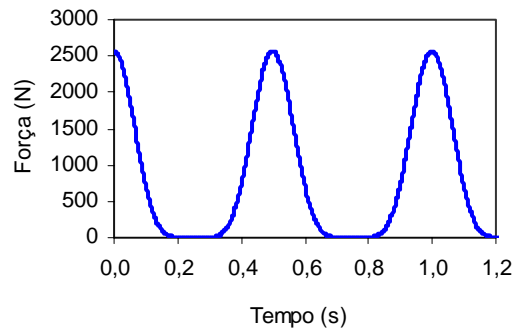
Tabela 3.3 – Coeficientes dinâmicos e harmônicos do passo para atividade aeróbica [21].

Harmônico	Atividade aeróbica	
	f_p (Hz)	α_i
1	2,0 a 2,75	1,5
2	4,0 a 5,5	0,6
3	6,0 a 8,25	0,1

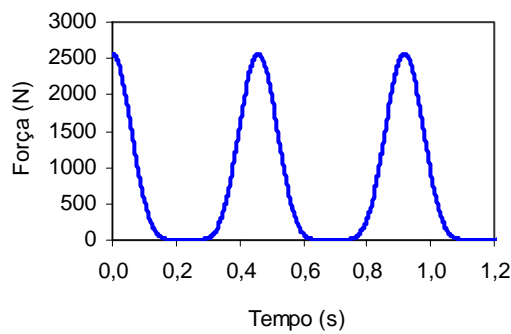
Utilizando os dados apresentados anteriormente, são mostrados na Figura 3.9 exemplos do sinal da força no tempo, utilizando na modelagem do carregamento o modelo de carregamento II (MC-II), correspondente à atividade aeróbica.



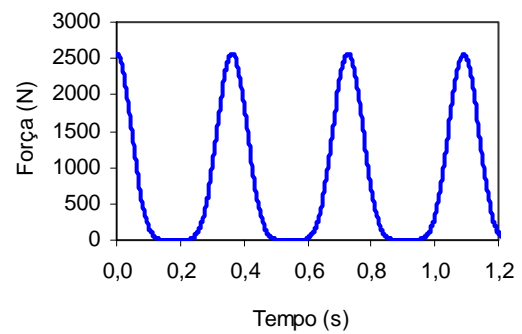
a) Para $n=3$, $f_p=2,643\text{Hz}$ e $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$.



b) Para $n=3$, $f_p=2,001\text{Hz}$ e $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$.



c) Para $n=3$, $f_p=2,170\text{Hz}$ e $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$.



d) Para $n=3$, $f_p=2,750\text{Hz}$ e $\phi_1=\phi_2=\phi_3=0$.

Figura 3.9 – Sinal da força no tempo para atividade aeróbica.

As transformadas de Fourier $F(w)$ da função associada ao modelo de carregamento II, apresentam três picos representativos da atividade, associados aos três harmônicos. A Figura 3.10 apresenta o gráfico de $F(w)$ da função apresentada na Figura 3.7 (a).

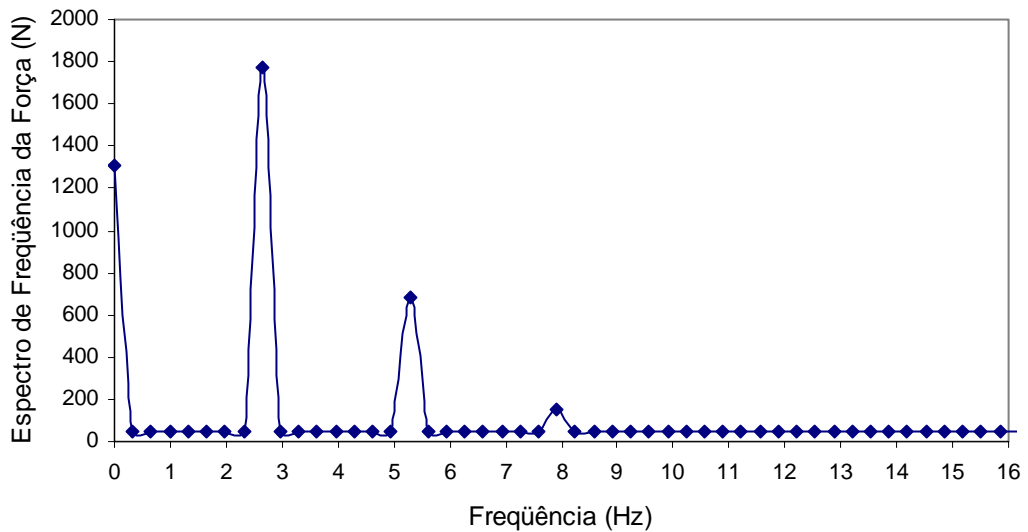


Figura 3.10 – Espectro de frequência da força proveniente do MC-II.

CAPÍTULO 4

Modelagem do Sistema

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a descrição dos modelos estruturais utilizados para avaliação do conforto humano. Tratam-se de modelos desenvolvidos e modificados a partir da geometria de um exemplo numérico descrito no *Steel Design Guide Series*, número 11, desenvolvido pelo *American Institute of Steel Construction (AISC)* [21]. Nesta pesquisa são estudados modelos mistos compostos por vigas de aço e laje maciça de concreto.

Nestes modelos são empregadas técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos, por meio do programa computacional Ansys [27]. Na modelagem, as vigas e os pilares são simulados por elementos finitos que consideram os efeitos de flexão e de torção. As lajes são simuladas por meio de elementos finitos de placa. Além disso, para garantir que os modelos funcionem como um sistema misto, são utilizadas conexões do tipo “off-set” na ligação entre a laje e as vigas. Isso é feito para garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga e dos elementos de casca. Considera-se também, que os materiais, aço e concreto, trabalham no regime elástico-linear.

Este capítulo apresenta a geometria dos modelos computacionais, as propriedades geométricas das peças e as propriedades físicas dos materiais. É também apresentada a descrição dos elementos finitos empregados na análise, a definição da malha utilizada nas análises e a modelagem do amortecimento dos sistemas.

4.2 Descrição dos Sistemas Estruturais

O modelo estrutural é composto por dois painéis de laje apoiados em vigas de aços formadas por perfis I soldados. As vigas primárias são formadas por perfis VS 550 x 64 e as vigas secundárias são formadas por perfis VS 450 x 51. Os pilares também são formados por perfis I soldados do tipo CS 300 x 62, para os modelos idealizados com pilares. A Figura 4.1 apresenta a planta baixa da estrutura e a Tabela 4.1 apresenta as propriedades geométricas dos perfis de aço.

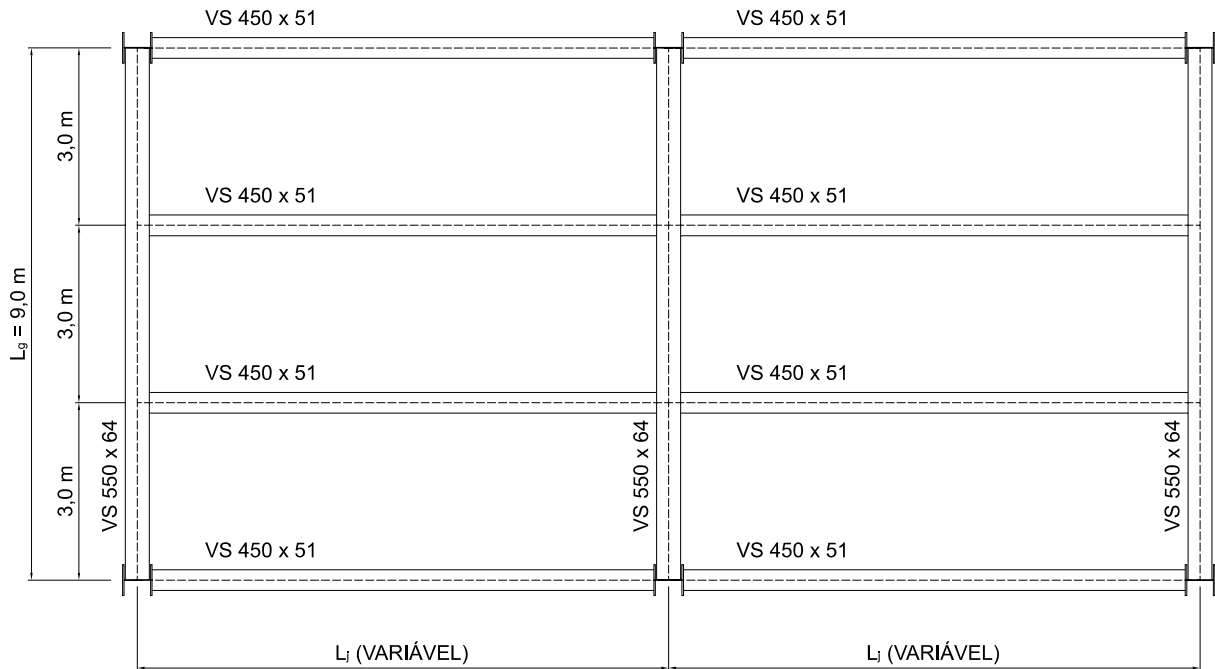


Figura 4.1 – Modelo estrutural genérico dos pisos.

A dimensão do vão denominado “ L_g ” é 9,0m, sendo mantida constante. Os vãos denominados de “ L_j ” têm sua dimensão variada de 5,0 a 10,0m (de 1,0 em 1,0m), simultaneamente.

Tabela 4.1 - Propriedades geométricas dos perfis.

Perfil	Altura d (mm)	Largura das mesas b_f (mm)	Espessura das mesas t_f (mm)	Espessura da alma t_w (mm)
I 550 x 64	550	250	9,5	6,3
I 450 x 51	450	200	9,5	6,3
I 300 x 62	300	300	9,5	8,0

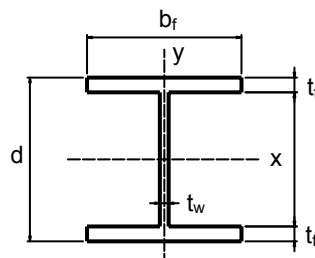


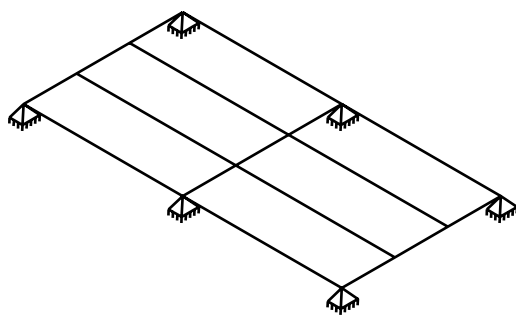
Figura 4.2 – Seção genérica dos perfis.

Os perfis de aço têm limite de escoamento de 300MPa, módulo de elasticidade igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e massa específica igual a 7850 Kg/m³. A laje de concreto possui espessura de 0,15 m, resistência característica a compressão de 30 MPa,

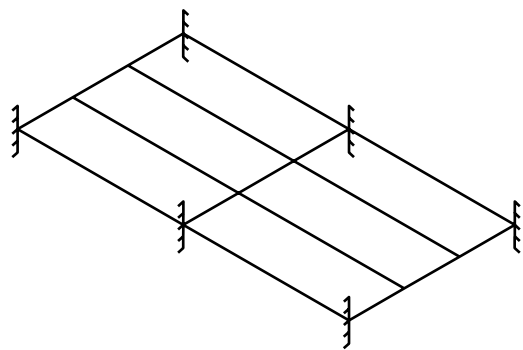
módulo de elasticidade igual a 24 GPa, coeficiente de Poisson de 0,1 e massa específica igual a 2550 Kg/m³. Considera-se que os materiais, aço e concreto, trabalham no regime elástico-linear.

4.3 Modelos Estruturais Considerados

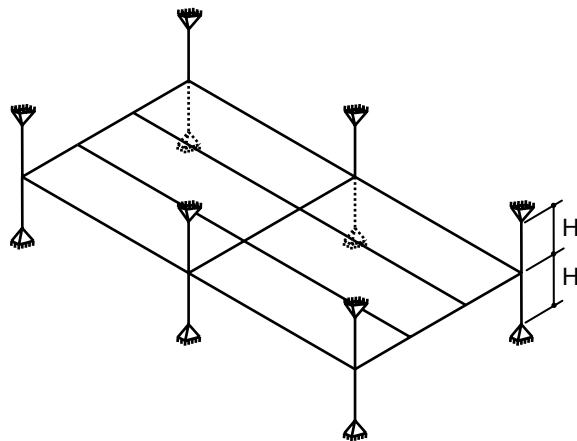
Os modelos de pisos mistos (aço-concreto) foram desenvolvidos considerando três situações de apoio distintas. O modelo I, Figura 4.3 (a), é o modelo estrutural com apoios do segundo gênero, o modelo II, Figura 4.3 (b), é o modelo estrutural engastado e o modelo III, Figura 4.3 (c), é o modelo estrutural onde se consideram pilares apoiados.



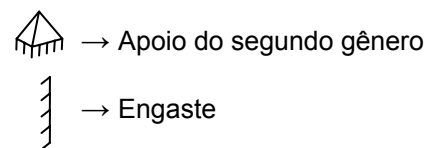
a) Modelo estrutural I.



b) Modelo estrutural II.



c) Modelo estrutural III.



d) Tipos de apoios.

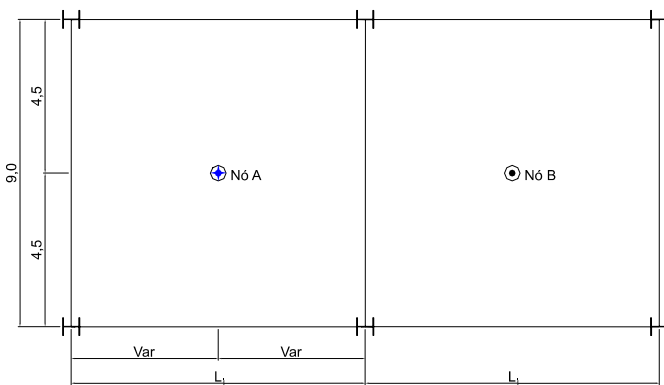
Figura 4.3 – Modelos Estruturais.

No modelo III, a altura dos pilares é variada em 3,0 m, 4,0 m e 5,0 m. As extremidades dos pilares foram modeladas com apoios de segundo gênero. A incorporação dos pilares ao modelo visa obter uma situação mais real em termos da rigidez na ligação viga-pilar.

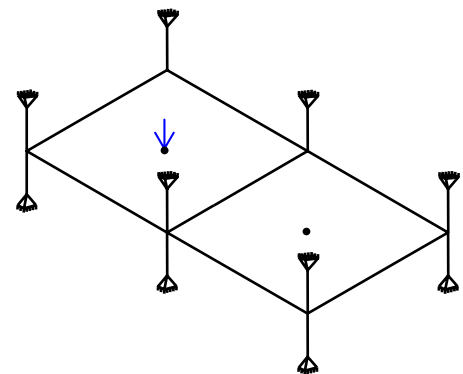
4.4 Esquema da Aplicação das Cargas

São consideradas ao longo do estudo, diversas situações distintas para a aplicação dos carregamentos nos pisos. Foram aplicadas nos modelos carregamentos correspondentes a 1 pessoa, 3 pessoas, 6 pessoas, 9 pessoas e 12 pessoas sobre os pisos. A Figura 4.4 (a até j)), ilustra detalhadamente todos os esquemas em planta, da distribuição das pessoas e seu posicionamento sobre os pisos, assim como a vista em perspectiva dessa distribuição. Esta distribuição e posicionamento foram definidos através de uma taxa de 0,25 pessoas/m² [30], tendo como referência o centro do painel.

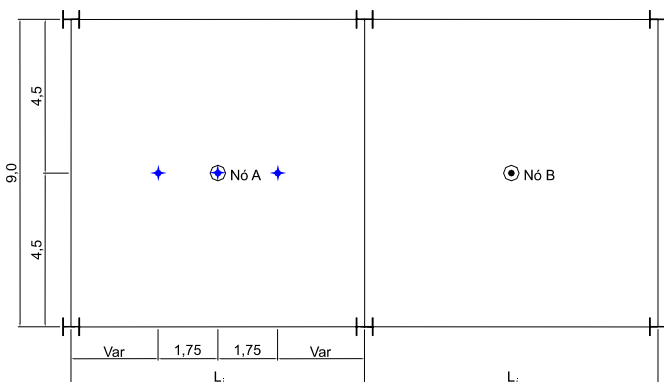
As cargas são aplicadas no primeiro painel, denominado painel A, onde se encontra o nó A. As respostas em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações máximas são obtidas no nó A, a fim de se avaliar os níveis de perturbações no piso onde são aplicadas as cargas. Já o outro painel, adjacente ao painel A, denomina-se painel B, onde se encontra o nó B. As respostas em termos dos deslocamentos e acelerações obtidos no nó B, têm a função de avaliar a influência causada pelas cargas em um painel adjacente ao de aplicação.



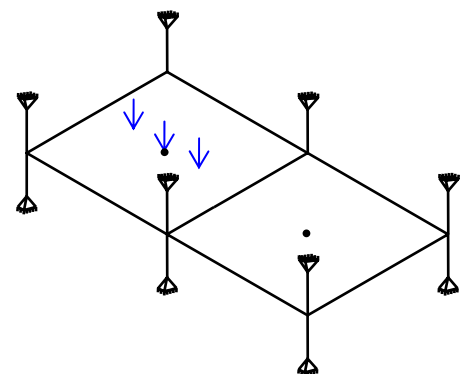
a) Planta referente à aplicação de 1 pessoa.



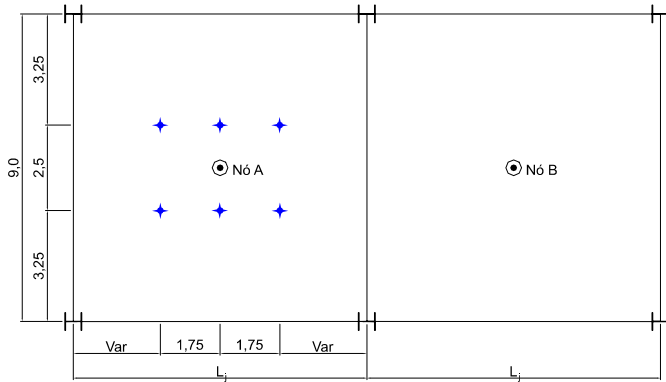
b) Perspectiva referente à aplicação de 1 pessoa.



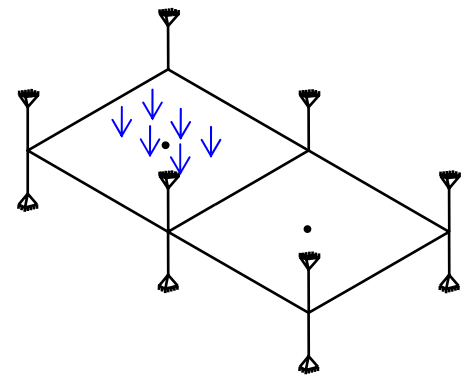
c) Planta referente à aplicação de 3 pessoas.



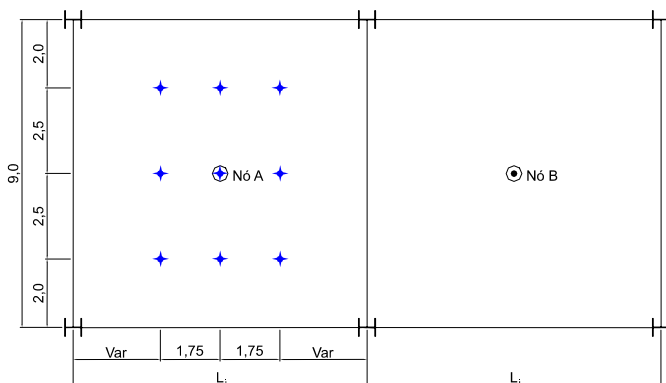
d) Perspectiva referente à aplicação de 3 pessoas.



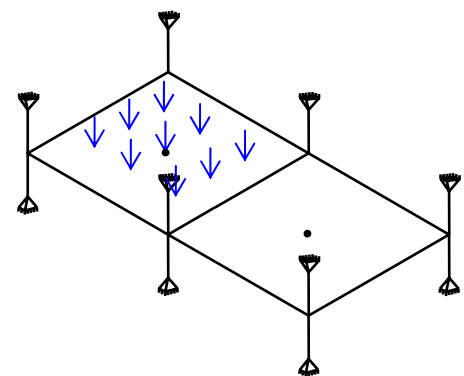
e) Planta referente à aplicação de 6 pessoas.



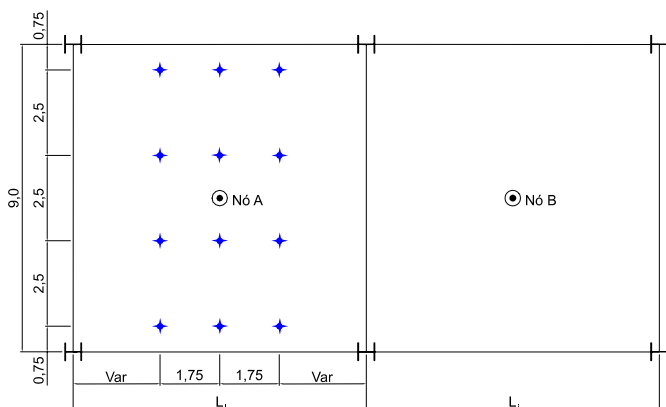
f) Perspectiva referente à aplicação de 6 pessoas.



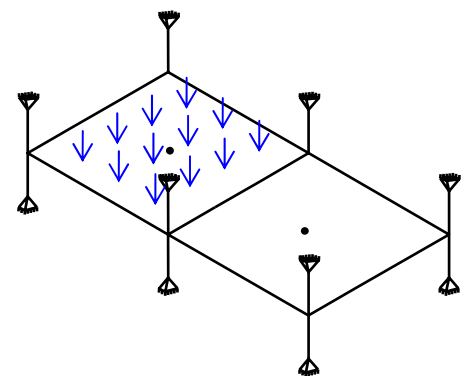
g) Planta referente à aplicação de 9 pessoas.



h) Perspectiva referente à aplicação de 9 pessoas.



i) Planta referente à aplicação de 12 pessoas.



j) Perspectiva referente à aplicação de 12 pessoas.

Figura 4.4 – Distribuição dos carregamentos aplicados no modelo III genérico.

4.5 Descrição dos Elementos Finitos

Na construção dos modelos são empregadas técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos, por meio do programa computacional Ansys [27]. Na modelagem, as vigas e os pilares são simulados por elementos finitos que consideram os efeitos de flexão e de torção e as lajes são simuladas por meio de elementos finitos de

casca. Foi utilizado o elemento BEAM 44 [27] para representar as vigas e os pilares, e o elemento SHELL 63 [27] para representar a laje de concreto.

O elemento BEAM 44 está ilustrado na Figura 4.5 . Ele possui seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações nas direções x , y e z . A orientação do elemento vai do nó I para o nó J, estando orientado sobre o eixo x . Os eixos principais y e z podem ser visualizados na Figura 4.5 .

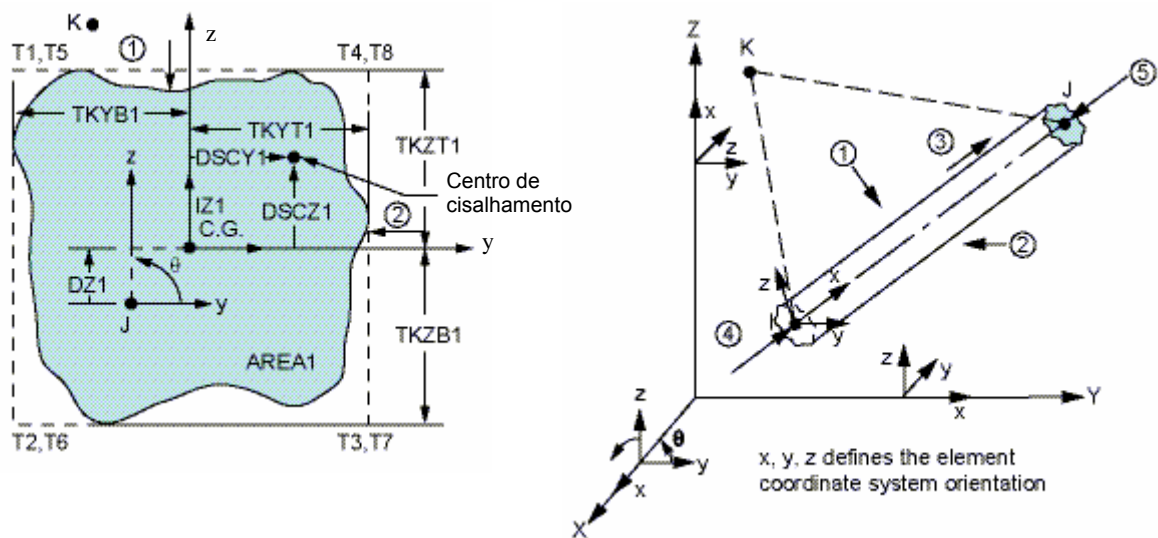


Figura 4.5 – Elemento BEAM 44 [27].

Para garantir que os modelos funcionem como um sistema misto são utilizadas conexões do tipo “off-set” na ligação entre a laje e as vigas, isso possibilita que seus nós estejam distanciados do eixo do centróide das vigas, visto que laje e vigas não estão posicionadas no mesmo eixo. Essa excentricidade (e) pode ser vista esquematizada na Figura 4.6. Essa consideração é de fundamental importância, pois garante a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga tridimensionais e os elementos de placa.

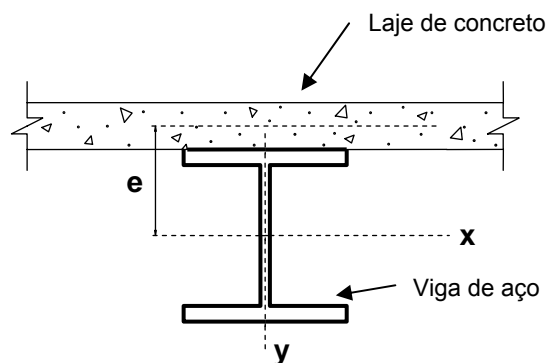


Figura 4.6 – Excentricidade entre a laje e a viga.

O elemento SHELL 63 [27], Figura 4.7, é definido por quatro nós e quatro espessuras. Esse elemento considera efeitos de membrana e/ou flexão. O elemento possui seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z.

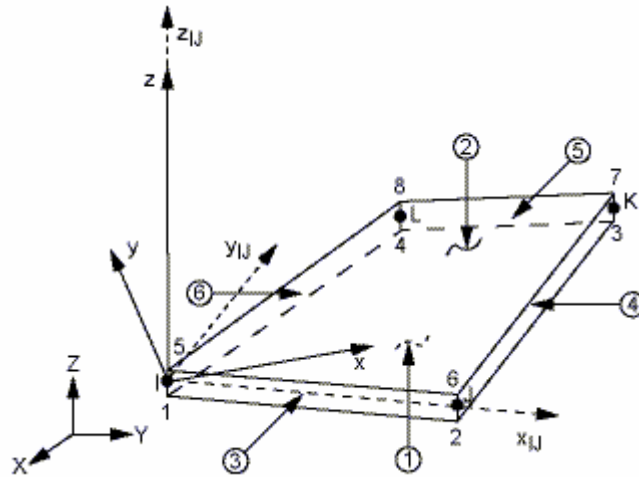


Figura 4.7 – Elemento SHELL 63 [27].

4.6 Modelagem Computacional

Para a validação da dimensão da malha de elementos finitos utilizada nas análises, foi realizada análise de vibração livre nos pisos, com vários tamanhos de malha até que as respostas (frequências naturais e modos de vibração), não variassem mais. A Figura 4.8 mostra os resultados das frequências fundamentais obtidas para um dos pisos, ao longo da variação da malha.

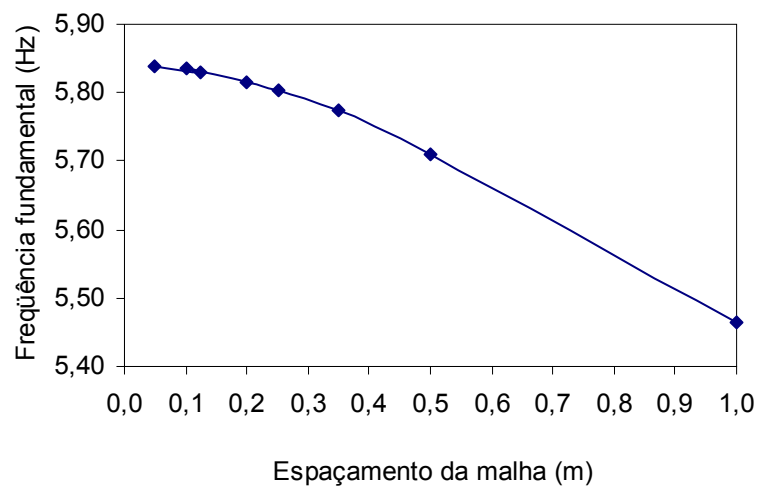


Figura 4.8 – Refinamento da malha.

É possível perceber que na medida em que o tamanho da malha é reduzido, o valor da frequência natural vai convergindo para um determinado valor. Esse comportamento ocorre para todos os pisos estudados.

A partir dos resultados obtidos através do estudo da convergência da malha, foi adotada a dimensão de 0,25m para os elementos de viga e pilar, e 0,25m x 0,25m para os elementos de laje. Essa escolha também levou em consideração a distribuição das pessoas sobre os pisos, ou seja, buscou atender à distribuição e à variação do número de pessoas aplicadas, definido na seção anterior.

Análises de convergência foram realizadas em vários outros modelos, mas não estão aqui representadas, pois apresentam resultados similares ao apresentado na Figura 4.8.

A Figura 4.9 apresenta um modelo estrutural discretizado em elementos finitos, utilizando o programa computacional Ansys [27].

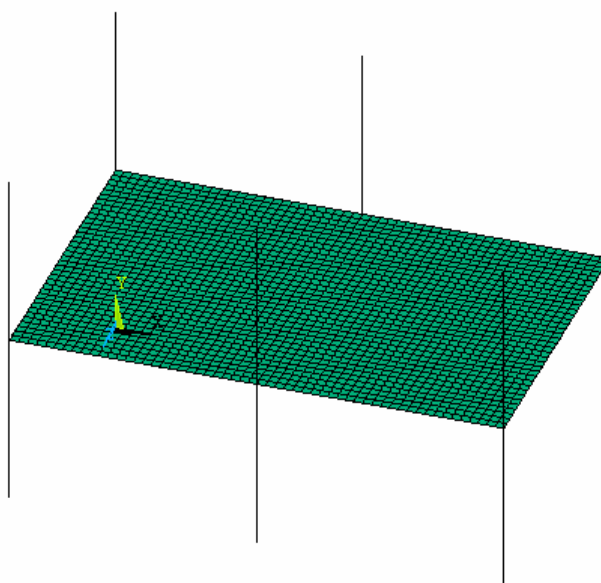


Figura 4.9 – Exemplo de um dos modelos em elementos finitos.

4.7 Modelagem do Amortecimento

O amortecimento é definido como sendo o processo pelo qual a energia proveniente do movimento vibratório é dissipada. Entretanto, avaliar o amortecimento de uma estrutura é tarefa bastante difícil, pois o amortecimento não depende apenas das propriedades intrínsecas dos materiais que compõem a estrutura, mas também de materiais e elementos que estejam acoplados à estrutura, tais como alvenaria, acabamentos, divisórias e mobiliários.

Para avaliar corretamente o amortecimento de uma estrutura seria necessário realizar ensaios experimentais, situação que demanda um alto custo. Por isso, o amortecimento é usualmente obtido através da matriz de amortecimento de Rayleigh [32], que considera uma contribuição da matriz de rigidez (δ) e uma contribuição da matriz de massa (α), que pode ser visto através da equação (4.1). Sendo que M é a matriz de massa e K é a matriz de rigidez do sistema.

$$C = \alpha M + \delta K \quad (4.1)$$

Em termos da taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), a equação

(4.2) pode ser escrita como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\delta\omega_{0i}}{2} \quad (4.2)$$

Onde:

ξ_i : taxa de amortecimento do modo i ;

ω_{0i} : frequência natural circular do modo i ;

Isolando α e δ da equação

(4.2) para duas frequências naturais importantes, tem-se:

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \delta\omega_{01}\omega_{01} \quad (4.3)$$

$$\delta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}\omega_{02} - \omega_{01}\omega_{01}} \quad (4.4)$$

A partir de duas frequências naturais é possível descobrir os valores de α e δ . Em geral, a frequência natural ω_{01} é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e ω_{02} como a segunda frequência mais importante no carregamento. O AISC [21] indica valores para a taxa de amortecimento modal de acordo com as condições do piso. A partir de tais indicações, foi considerado um coeficiente de amortecimento de 3% ($\xi = 3\%$) em todos os pisos. Essa taxa leva em conta a existência de poucos elementos que contribuem com o amortecimento da estrutura.

CAPÍTULO 5

Análise Dinâmica dos Modelos

5.1 Generalidades

Este capítulo apresenta as análises dinâmicas dos modelos estruturais, a fim de avaliar o comportamento dinâmico das estruturas mistas (aço-concreto), quando submetidas a atividades rítmicas humanas. As análises são realizadas ao longo da variação do comprimento das vigas secundárias dos pisos (L_j), Figura 4.1.

São realizadas análises de vibração livre, e a partir delas obtém-se as frequências naturais e os modos de vibração dos pisos. Também são realizadas análises harmônicas a fim de conhecer as frequências e modos mais significativos na resposta dinâmica da estrutura. E, por fim são realizadas análises de vibração forçada. Todas as análises são realizadas por meio do programa computacional Ansys [27].

Os resultados das análises de vibração forçada são obtidos em termos dos deslocamentos e acelerações máximos, provenientes da aplicação dos dois tipos de carregamentos, MC-I e MC-II, a partir das equações (3.1) e (3.2).

Os resultados obtidos, em termos das acelerações máximas, são comparados e confrontados com os valores limites sob o ponto de vista do conforto humano. Esses valores limites são fornecidos por recomendações técnicas internacionais: ISO 2631/1 [25], ISO 2631/2 [26] e AISC [21].

5.2 Análise de Autovalores e Autovetores

Foram realizadas análises de vibração livre no modelo estrutural I, no modelo estrutural II e no modelo estrutural III. No modelo estrutural III, considera-se a variação da altura dos pilares (H), sendo adotadas as alturas de 3,0 m, 4,0 m e 5,0 m. O vão L_g , correspondente às vigas primárias (VS 550 x 64), é mantido constante e igual a 9,0 m. Varia-se o vão L_j , correspondente às vigas secundárias (VS 450 x 51), de 5,0 m a 10,0 m, de 1,0 m em 1,0 m.

Os valores das frequências naturais obtidas através da análise modal até o décimo modo de vibração, para os modelos I, II e III, são apresentados da Tabela 5.1 à Tabela 5.5, ao longo da variação do vão das vigas secundárias.

Tabela 5.1 – Frequências naturais do modelo I ao longo da variação do vão L_j .

L_j (m)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	f_7 (Hz)	f_8 (Hz)	f_9 (Hz)	f_{10} (Hz)
5,0	6,99	10,28	19,00	21,86	22,69	28,24	34,38	36,22	39,74	41,37
6,0	6,35	8,86	15,57	17,66	18,83	21,27	27,77	28,70	33,09	34,53
7,0	5,83	7,67	13,34	14,08	16,18	16,88	22,68	23,65	28,72	29,48
8,0	5,40	6,63	11,50	11,77	13,88	14,04	18,79	20,04	25,68	25,93
9,0	5,02	5,71	9,60	10,56	11,92	12,15	15,87	17,35	23,38	23,44
10,0	4,67	4,91	8,17	9,59	10,29	10,83	13,69	15,27	20,65	21,40

Tabela 5.2 – Frequências naturais do modelo II ao longo da variação do vão L_j .

L_j (m)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	f_7 (Hz)	f_8 (Hz)	f_9 (Hz)	f_{10} (Hz)
5,0	12,42	15,06	25,72	26,49	27,32	35,21	37,51	40,13	48,51	48,86
6,0	11,07	12,69	21,88	21,89	22,24	28,04	30,75	32,94	40,29	40,84
7,0	9,91	10,71	18,02	18,81	19,18	23,33	25,68	27,83	34,34	34,89
8,0	8,90	9,08	15,14	16,03	17,13	20,02	21,78	23,92	29,94	30,45
9,0	7,77	7,99	12,93	13,77	15,47	17,53	18,78	20,78	26,66	27,13
10,0	6,70	7,16	11,18	11,93	14,09	15,58	16,46	18,20	24,20	24,64

Tabela 5.3 – Frequências naturais do modelo III de $H = 3,0\text{m}$, ao longo da variação do vão L_j .

L_j (m)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	f_7 (Hz)	f_8 (Hz)	f_9 (Hz)	f_{10} (Hz)
5,0	8,53	11,78	20,71	22,67	23,28	28,58	34,04	36,80	39,76	42,26
6,0	7,69	10,07	17,27	18,19	19,37	22,11	27,72	29,31	33,54	35,43
7,0	7,00	8,60	14,59	14,97	16,56	17,98	22,91	24,27	29,25	30,43
8,0	6,41	7,33	11,99	13,28	14,17	15,27	19,23	20,66	26,15	26,83
9,0	5,89	6,25	10,06	11,95	12,18	13,41	16,45	17,93	23,83	24,15
10,0	5,34	5,42	8,60	10,54	10,85	12,05	14,38	15,79	21,49	21,95

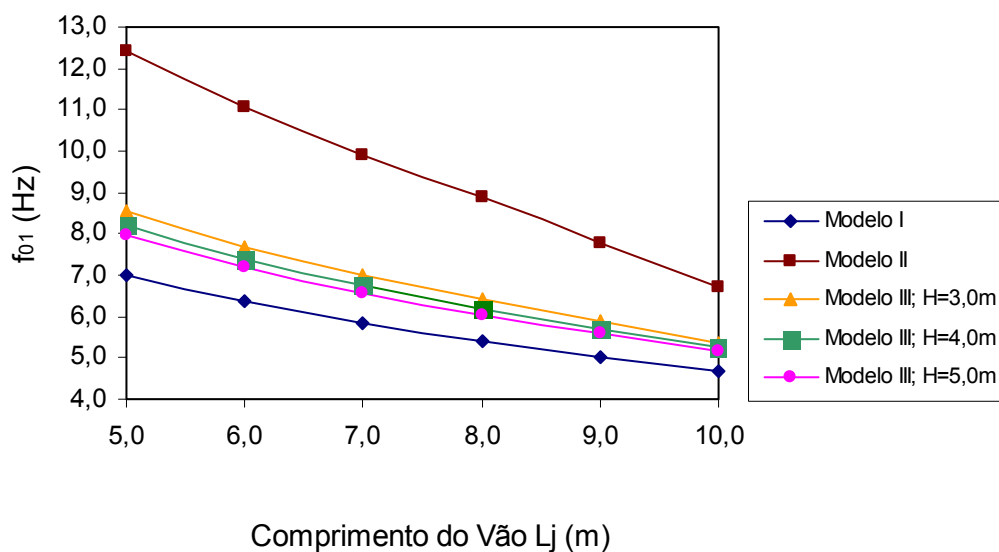
Tabela 5.4 – Frequências naturais do modelo III de $H = 4,0\text{m}$, ao longo da variação do vão L_j .

L_j (m)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	f_7 (Hz)	f_8 (Hz)	f_9 (Hz)	f_{10} (Hz)
5,0	8,21	11,47	20,25	22,25	22,96	27,89	33,54	36,47	38,23	41,42
6,0	7,41	9,82	16,86	17,95	19,06	21,64	27,37	29,01	32,79	34,83
7,0	6,75	8,41	14,39	14,60	16,33	17,60	22,64	24,02	28,82	29,99
8,0	6,20	7,19	11,82	12,95	14,00	14,94	19,01	20,44	25,88	26,48
9,0	5,71	6,13	9,92	11,65	12,05	13,11	16,26	17,75	23,65	23,86
10,0	5,24	5,26	8,47	10,43	10,58	11,78	14,20	15,63	21,21	21,77

Tabela 5.5 – Frequências naturais do modelo III de $H = 5,0\text{m}$, ao longo da variação do vão L_j .

L_j (m)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)	f_6 (Hz)	f_7 (Hz)	f_8 (Hz)	f_9 (Hz)	f_{10} (Hz)
5,0	7,98	11,23	19,87	21,86	22,57	26,47	31,78	32,24	33,63	33,87
6,0	7,21	9,64	16,53	17,71	18,79	21,07	26,78	28,62	30,53	32,29
7,0	6,58	8,27	14,22	14,31	16,14	17,23	22,31	23,75	27,93	29,12
8,0	6,05	7,08	11,69	12,69	13,86	14,65	18,79	20,24	25,44	26,00
9,0	5,58	6,05	9,81	11,43	11,94	12,87	16,09	17,59	23,39	23,53
10,0	5,15	5,18	8,38	10,35	10,38	11,58	14,05	15,50	20,98	21,51

A Figura 5.1 apresenta a variação da frequência fundamental (f_{01}) ao longo da variação do vão L_j para todos os modelos considerados. Os valores desse gráfico foram obtidos da Tabela 5.1 à Tabela 5.5.

Figura 5.1 – Frequências fundamentais dos modelos em função do vão L_j .

Observa-se através da Figura 5.1 que os valores das frequências naturais diminuem na medida em que o vão L_j das vigas é aumentado. Isso porque o aumento do vão diminui a

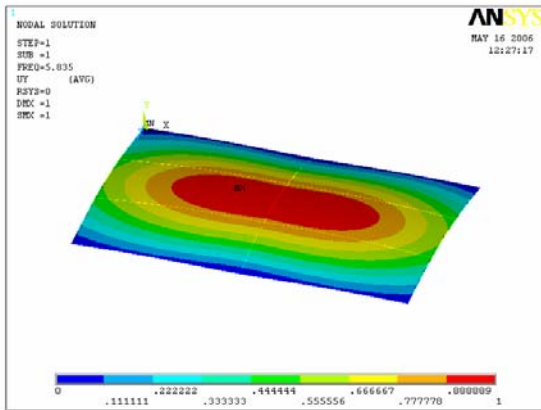
rigidez das vigas, tornando os pisos mais flexíveis e fazendo com que as frequências diminuam. Esse fato era previsto e garante a coerência dos resultados.

Percebe-se que os menores valores obtidos para frequência fundamental foram do modelo estrutural I, modelo com apoios do segundo gênero, e os maiores valores foram do modelo estrutural II, modelo engastados. Esses resultados estão de acordo com as expectativas, pois correspondem, respectivamente, ao modelo cujas ligações são mais flexíveis e ao modelo cujas ligações são mais rígidas.

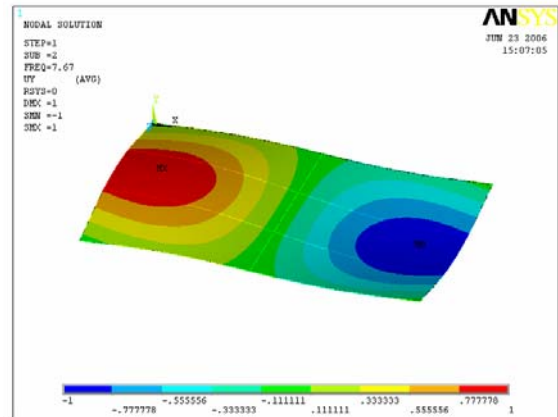
Em relação aos resultados obtidos com o modelo III, onde os pilares são incorporados, percebe-se que para as três situações de altura dos pilares, os valores das frequências naturais estão entre os valores obtidos com os modelos I e II. Isso pode ser explicado pelo fato de que essa modelagem da ligação encontra-se intermediária à condição totalmente engastada do modelo II e à condição apoiada do modelo I, e portanto, mais próxima da situação real.

Considera-se que o modelo que incorpora pilares é mais adequado para as próximas análises, pois simula uma condição mais real de ligação entre o piso e os apoios. Devido a isso, será adotado o modelo III com pilares de altura igual a 5,0 m, porque dentre os valores de frequências obtidos com a variação da altura dos pilares, os menores valores foram obtidos através do modelo III de $H = 5,0$ m, portanto a situação mais crítica.

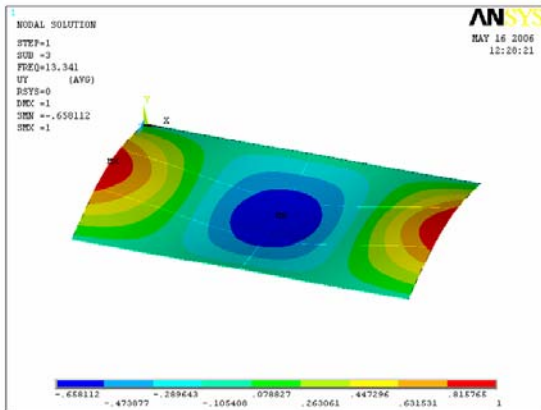
A seguir são apresentados na Figura 5.2 à Figura 5.6, os seis primeiros modos de vibração referentes aos modelos I, II e III, para os pisos de dimensões 9,0 m x 7,0 m. Os modos de vibração dos outros modelos não serão aqui apresentados pois são bastante similares, não apresentando mudanças significativas.



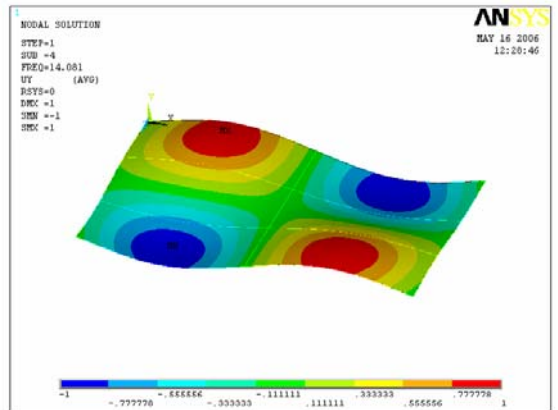
a) Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural: $f_1= 5,83$ Hz



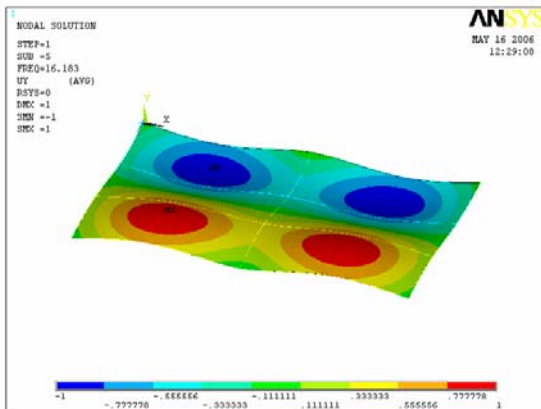
b) Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural: $f_2=7,67$ Hz



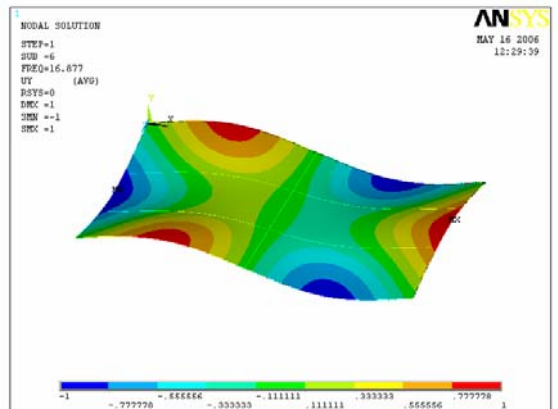
c) Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural: $f_3=13,34$ Hz



d) Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural: $f_4=14,08$ Hz

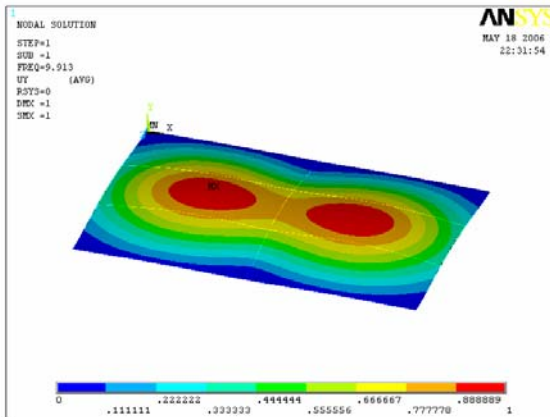


e) Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural: $f_5=16,18$ Hz

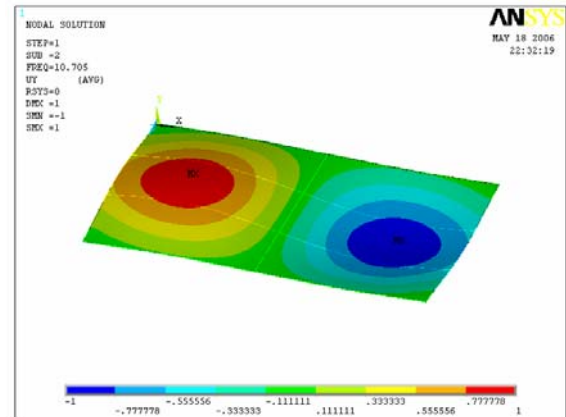


f) Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural: $f_6=16,88$ Hz

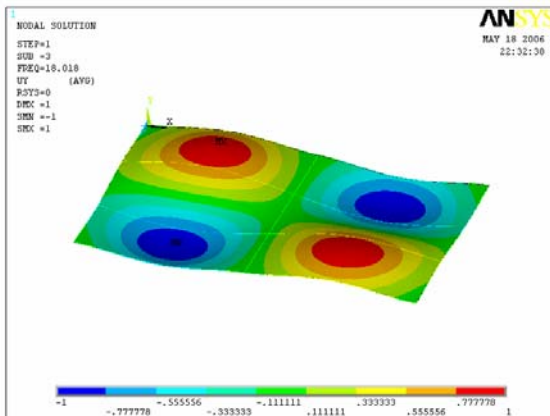
Figura 5.2 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural I.



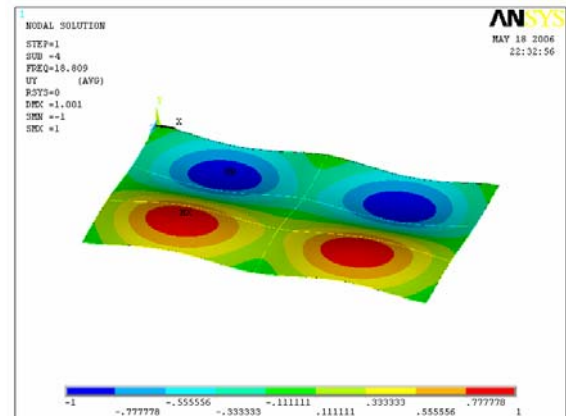
a) Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural: $f_1=9,91$ Hz



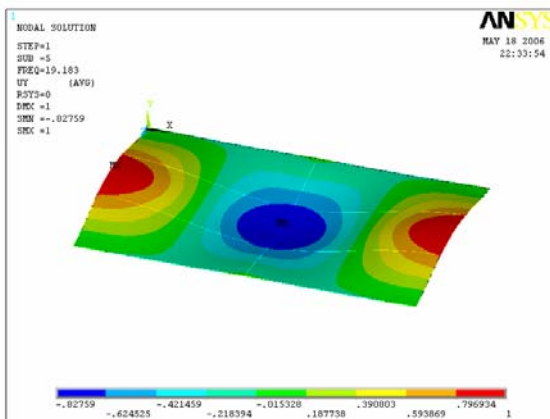
b) Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural: $f_2=10,71$ Hz



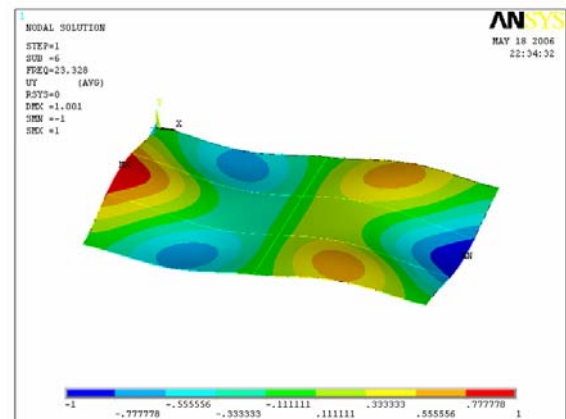
c) Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural: $f_3=18,02$ Hz



d) Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural: $f_4=18,81$ Hz

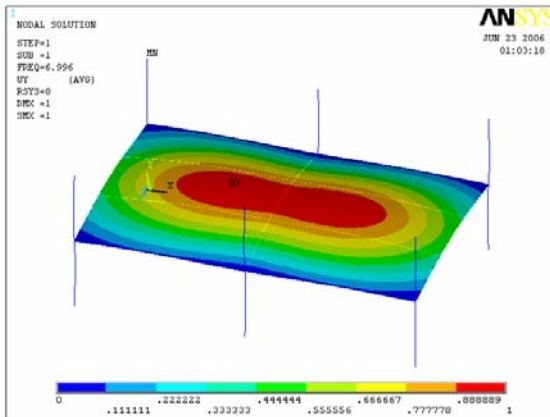


e) Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural: $f_5=19,18$ Hz

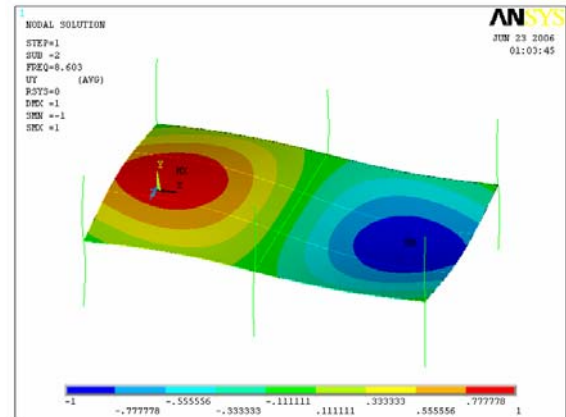


f) Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural: $f_6=23,33$ Hz

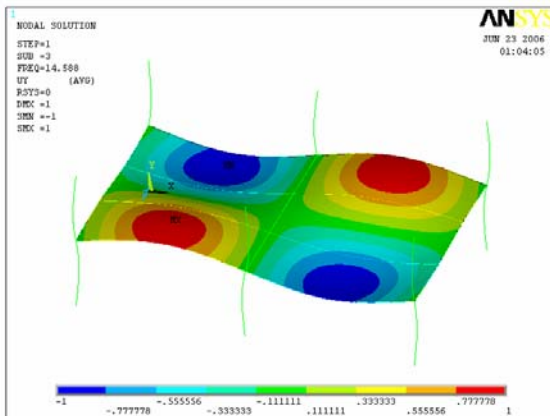
Figura 5.3 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural II.



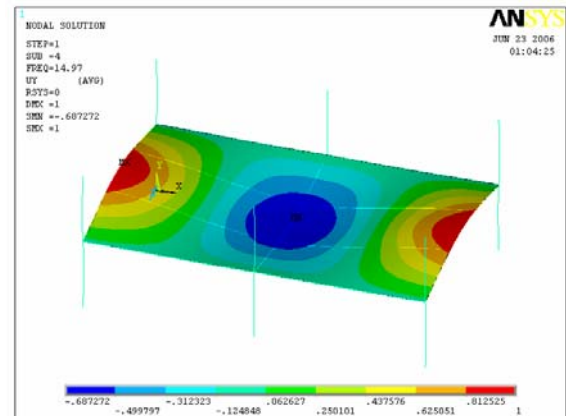
a) Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural: $f_1=7,00$ Hz



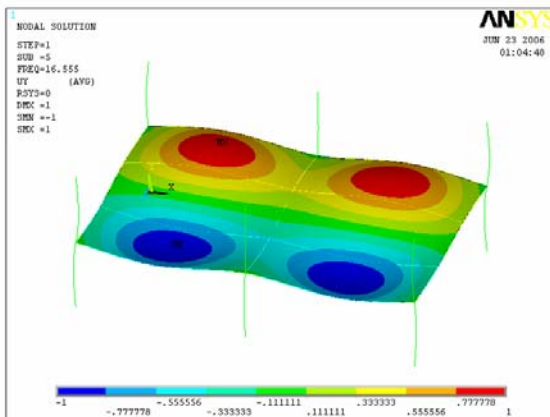
b) Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural: $f_2=8,60$ Hz



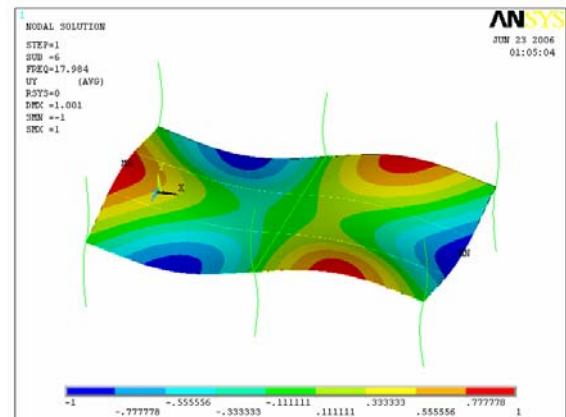
c) Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural: $f_3=14,59$ Hz



d) Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural: $f_4=14,97$ Hz

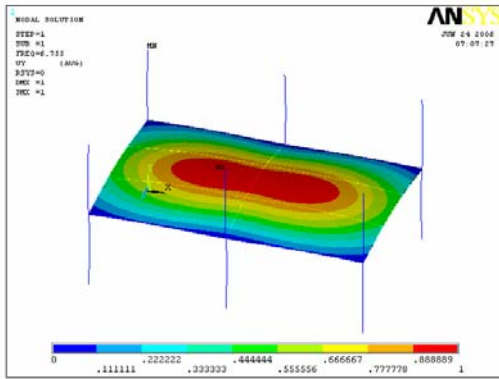


e) Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural: $f_5=16,56$ Hz

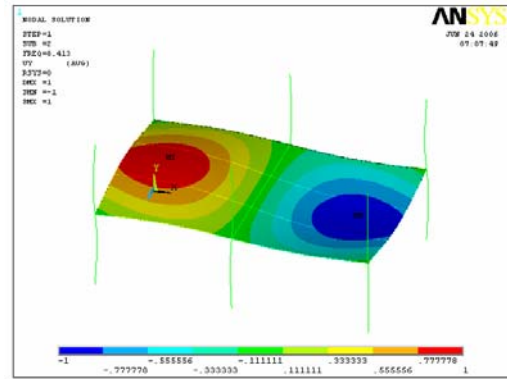


f) Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural: $f_6=17,98$ Hz

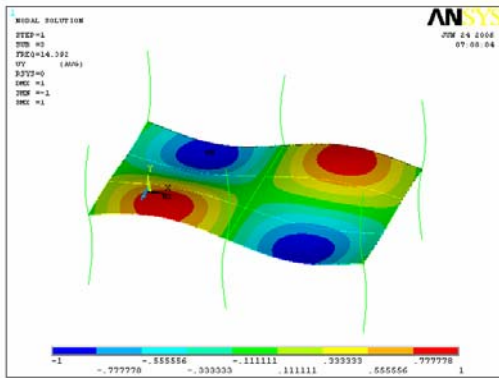
Figura 5.4 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 3,0$ m.



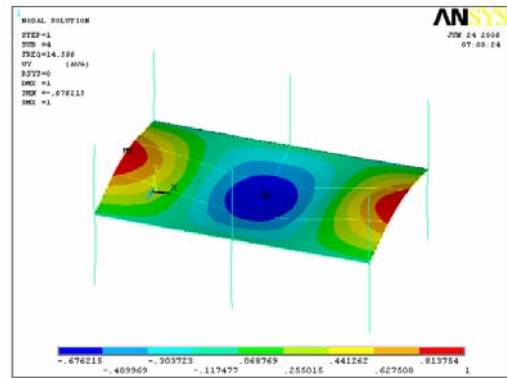
a) Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural: $f_1=6,75$ Hz



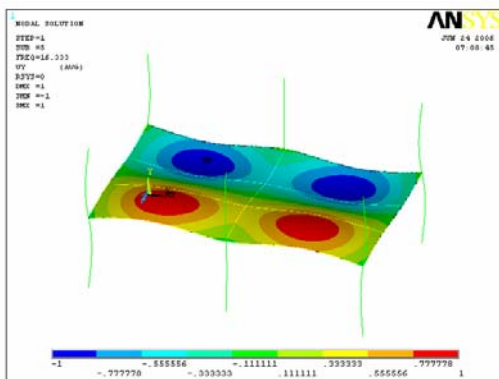
b) Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural: $f_2=8,41$ Hz



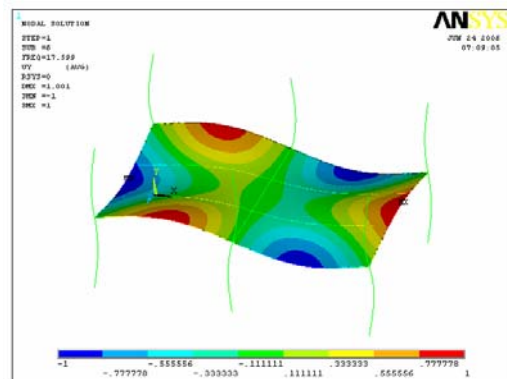
c) Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural: $f_3=14,39$ Hz



d) Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural: $f_4=14,60$ Hz

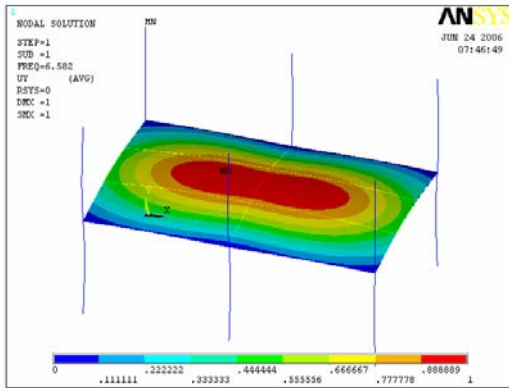


e) Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural: $f_5=16,33$ Hz

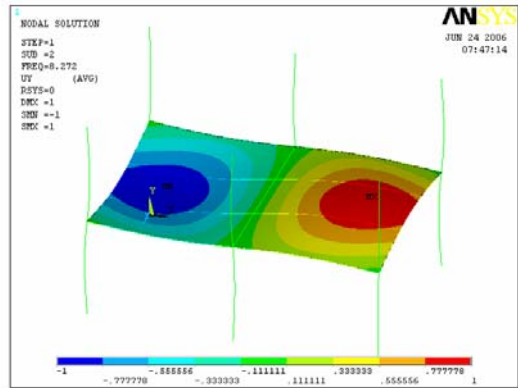


f) Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural: $f_6=17,60$ Hz

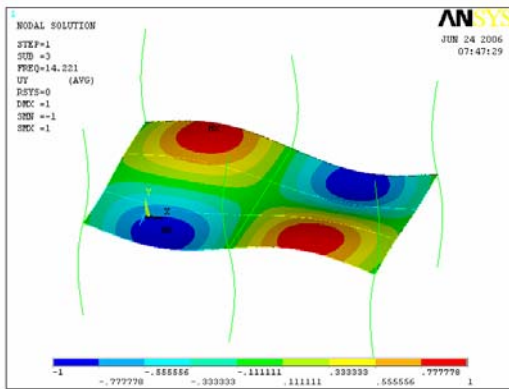
Figura 5.5 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 4,0$ m.



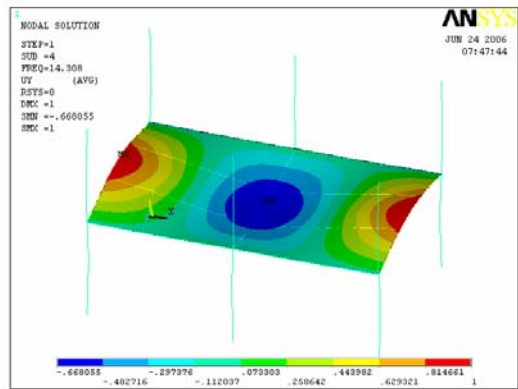
a) Modo de vibração correspondente à primeira frequência natural: $f_1=6,58$ Hz



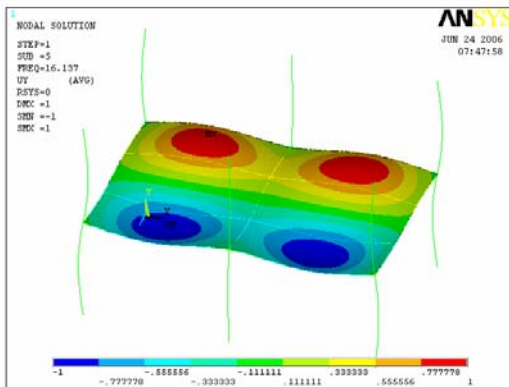
b) Modo de vibração correspondente à segunda frequência natural: $f_2=8,27$ Hz



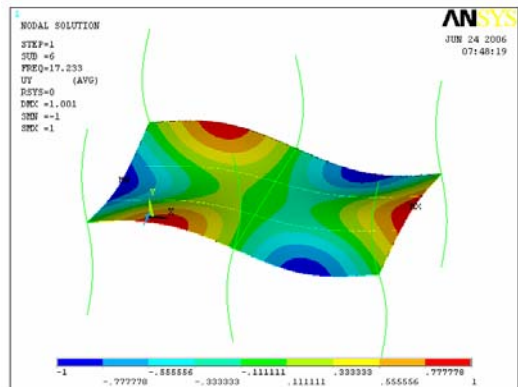
c) Modo de vibração correspondente à terceira frequência natural: $f_3=14,22$ Hz



d) Modo de vibração correspondente à quarta frequência natural: $f_4=14,31$ Hz



e) Modo de vibração correspondente à quinta frequência natural: $f_5=16,14$ Hz



f) Modo de vibração correspondente à sexta frequência natural: $f_6=17,23$ Hz

Figura 5.6 – Modos de vibração referentes ao modelo estrutural III com $H = 5,0$ m.

Através das figuras, observa-se que para os modelos estruturais I, II e III (com pilares de altura iguais a 3,0 m, 4,0 m e 5,0 m), o primeiro e o segundo modo de vibração têm o mesmo comportamento para todos os modelos, prevalecendo o modo de flexão nesses modos.

Os modos de vibração dos outros pisos, ao longo da variação do vão L_j de 5,0m a 10,m (de 1,0m em 1,0m), não são aqui mostrados, pois as características são bastante semelhantes as apresentadas através da Figura 5.2 à Figura 5.6, não acrescentando qualitativamente nessa discussão.

5.3 Análise Harmônica

A análise harmônica é realizada com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem na resposta dinâmica estrutural. Para essa análise é aplicada uma força senoidal no centro do painel, denominado no capítulo 4 de nó "A", Figura 4.4 (a), correspondente ao peso de uma pessoa igual a 800 N [30]. Varia-se o valor da frequência aplicada de 0 a 50 Hz. Considerou-se nos pisos analisados, uma taxa de amortecimento modal de 3% ($\xi = 3\%$), de acordo com as recomendações do AISC [21], para pisos com alguns elementos não-estruturais, típico de áreas onde existem divisórias desmontáveis.

As análises seguintes são realizadas no modelo estrutural III, com altura de pilar igual 5,0m. Nessas análises o vão das vigas secundárias (L_j), é variado de 5,0 a 10,0 m (de 1,0 em 1,0 m), e o vão das vigas primárias (L_g), é mantido constante e igual a 9,0 m.

A seguir, através da Figura 5.7, são apresentados os espectros das respostas. Esses espectros apresentam na ordenada do gráfico o FAD (fator de amplificação dinâmico), e na abscissa o parâmetro β . O FAD significa a relação entre o deslocamento dinâmico máximo e o deslocamento estático máximo no ponto analisado ($FAD = v_D/v_E$), nesse caso o nó A, definido anteriormente. O parâmetro β é a relação entre a frequência de excitação e a frequência natural do piso ($\beta = f/f_{01}$).

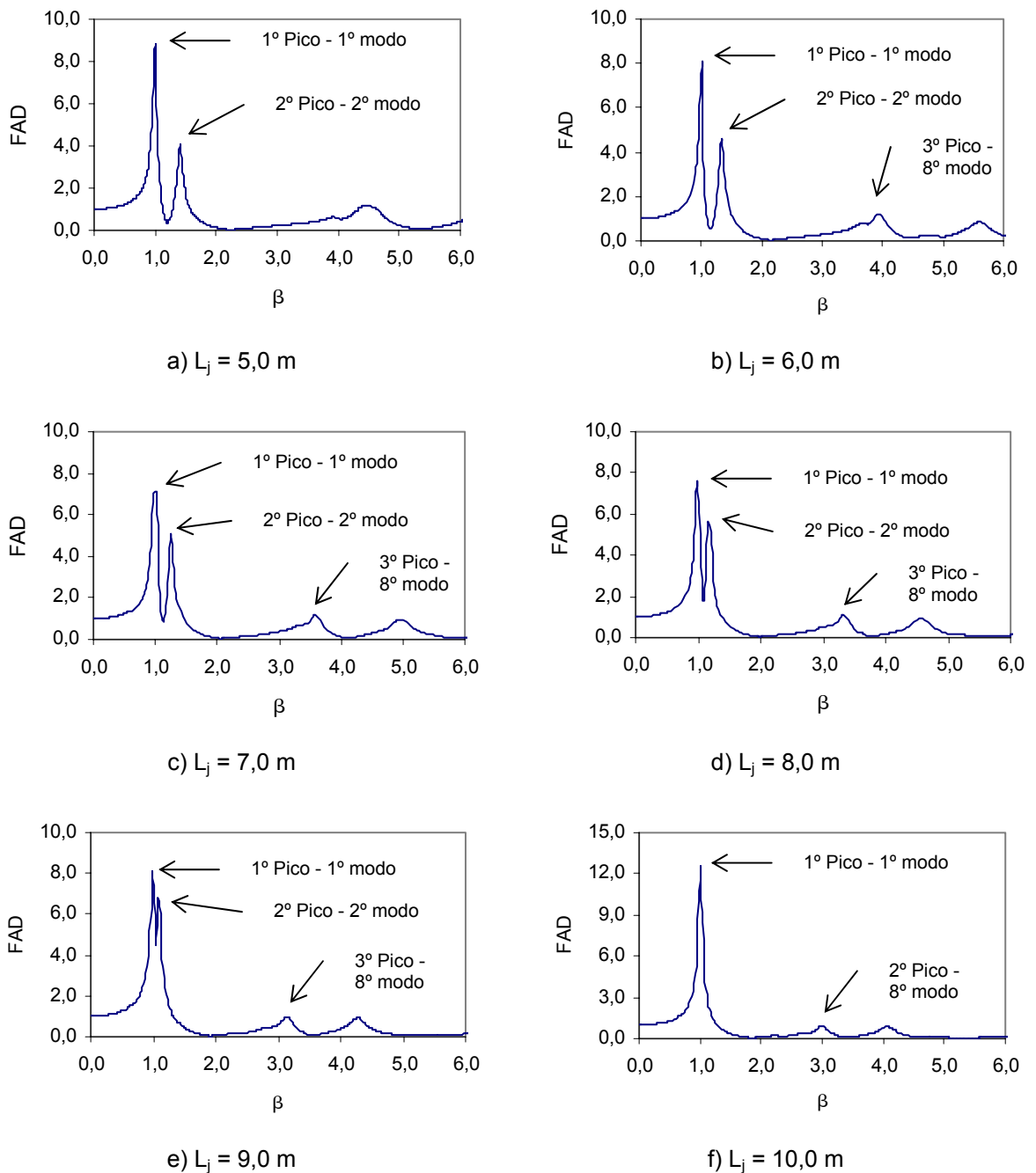


Figura 5.7 – Gráficos do FAD em função de β para o modelo III com altura de pilar igual 5,0m.

Verifica-se através dos gráficos apresentados na Figura 5.7 (a até f), que na medida em que β tende ao valor um ($\beta = 1$), ocorre a amplificação do deslocamento no nó A. Isso porque a frequência de excitação se aproxima da frequência natural do piso.

Outro ponto importante, visualizado através da Figura 5.7 (a até f), é que o primeiro modo de vibração é o mais significativo em todos os casos. Na maioria dos casos, o segundo pico mais importante é o correspondente ao segundo modo de vibração. Os outros picos se

referem aos modos mais elevados, que participam de forma menos significativa na resposta dinâmica dos modelos.

Percebe-se também, que na medida em que se aumenta o vão L_j , as freqüências dos dois primeiros modos de vibração vão se tornando cada vez mais próximas, pois os picos referentes às primeiras freqüências vão se “aproximando”. Este fato ocorre de forma especial para o piso com $L_j = 10,0\text{m}$, pois as duas primeiras freqüências praticamente se igualam, aparecendo apenas um pico ao invés de dois.

Observa-se através da Tabela 5.6 que os valores do deslocamento dinâmico para o primeiro pico, aumentam na medida em que se aumenta a dimensão L_j . O mesmo acontece com o deslocamento estático. Já o FAD (fator de amplificação dinâmico), encontra-se entre sete e oito vezes o deslocamento estático, com exceção do piso cujo L_j é igual a 10,0 m. Para este piso o FAD está em torno de doze vezes o deslocamento estático. Isso ocorre porque os valores das duas primeiras freqüências praticamente se igualam, fazendo com que os deslocamentos se somem.

Tabela 5.6 – Valores do FAD para o primeiro pico ($\beta=1$).

L_j (m)	Deslocamento dinâmico - v_D (m)	Deslocamento estático - v_E (m)	FAD - v_D/v_E
5,0	3,23E-04	3,67E-05	8,81
6,0	3,28E-04	4,11E-05	7,98
7,0	3,29E-04	4,61E-05	7,13
8,0	3,96E-04	5,19E-05	7,63
9,0	4,11E-04	5,86E-05	7,01
10,0	8,32E-04	6,63E-05	12,55

5.4 Estudo do Conforto Humano

5.4.1 Aspectos Gerais

O estudo a seguir tem como objetivo verificar as condições dos sistemas estruturais mistos sob a atuação de cargas rítmicas humanas, no que se refere ao conforto humano. Para isso são realizadas análises de vibração forçada a fim de obter deslocamentos e acelerações máximos.

As análises são realizadas nos pisos correspondentes ao modelo estrutural III, com altura de pilar igual a 5,0 m. A dimensão L_j dos pisos, correspondente às vigas secundárias, é variada de 5,0 a 10,0 m (de 1,0 em 1,0 m), como mostrado na Figura 4.1.

São aplicadas duas metodologias de carregamento, sendo que a primeira utiliza dados experimentais propostos por Faisca [9], e a segunda utiliza parâmetros propostos por Murray *et al.* [21]. Os carregamentos aplicados correspondem à aplicação de 1 pessoa, 3 pessoas, 6 pessoas, 9 pessoas e 12 pessoas sobre os pisos, apresentado na Figura 4.4, obedecendo à taxa de ocupação de 0,25 pessoas/m² [30]. Não é considerada a variação espacial da carga.

O intervalo de integração foi de 0,002 s ($\Delta t = 0,002s$). Foi verificado que esse intervalo de integração atende convenientemente às características dinâmicas dos modelos e à representação dos carregamentos propostos.

A taxa de amortecimento modal considerada nessas análises é de 3% ($\xi = 3\%$). A Tabela 5.7 apresenta os parâmetros α e $\bar{\delta}$ utilizados nas análises de vibração forçada, para a modelagem do amortecimento dos pisos.

Tabela 5.7 – Parâmetros usados na análise de vibração forçada, segundo a variação do vão L_j .

L_j (m)	f_p (Hz)	Harmônico	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	α	$\bar{\delta}$
5,0	2,661	3°	7,984	11,231	1,7593101	0,0004970
6,0	2,404	3°	7,211	9,636	1,5548833	0,0005668
7,0	2,194	3°	6,583	8,272	1,3818784	0,0006429
8,0	2,017	3°	6,050	7,078	1,2296542	0,0007274
9,0	2,750	2°	5,579	6,047	1,0939420	0,0008214
10,0	2,575	2°	5,149	5,176	0,9730737	0,0009249

Ao final, os resultados, em termos das acelerações, são comparados com os valores limites fornecidos pela literatura técnica disponível, ISO 2631/2 [26] e AISC [21], no diz respeito ao conforto humano. Esses valores são expressos em função da aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), ou seja, em porcentagem de g (% g).

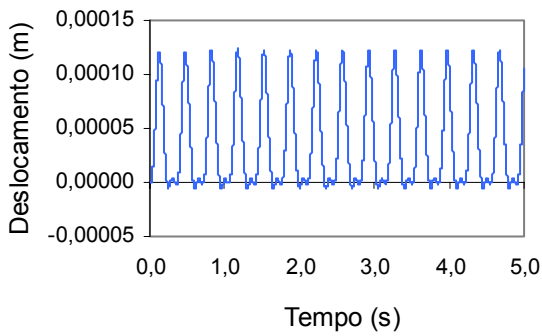
É importante ressaltar que todos os pisos estudados nesta seção foram verificados estaticamente quanto ao método do estado limite, com base na NBR 8800 [24]. Porém os cálculos não são apresentados, pois o objetivo principal desse trabalho é a análise dinâmica dos sistemas.

5.4.2 Aplicação do Modelo de Carregamento I (MC-I)

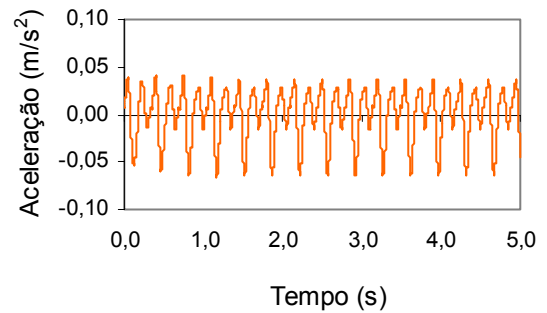
5.4.2.1 Estudo do Comportamento Geral

Essa metodologia de carregamento utiliza a função Hanning dada pela equação (3.1), e utiliza os parâmetros experimentais propostos por Faisca [9].

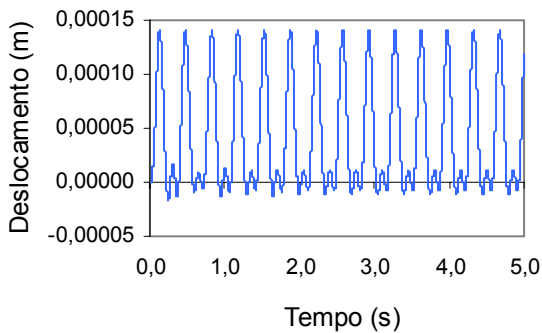
Primeiramente, buscou-se avaliar o comportamento dos pisos submetidos a essa condição de carregamento. Para isso foram utilizados os seguintes parâmetros: $T_c = 0,25s$, $T_s = 0,10s$, $K_p = 2,78$ e $CD=1$. As respostas, em termos dos sinais de deslocamentos e acelerações obtidas no nó A, são apresentados na Figura 5.8 (a até d), para todos os pisos estudados, correspondente à aplicação de uma pessoa centralizada no painel A de cada piso.



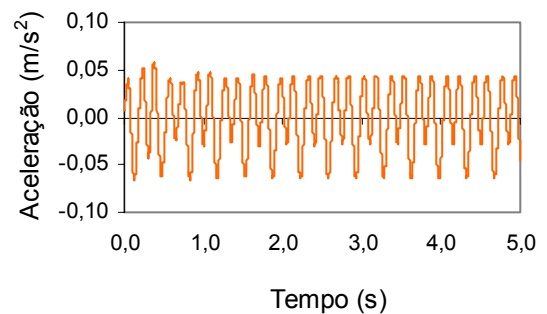
a) Deslocamento no piso com $L_j = 5,0m$



b) Aceleração no piso com $L_j = 5,0m$



c) Deslocamento no piso com $L_j = 6,0m$



d) Aceleração no piso com $L_j = 6,0m$

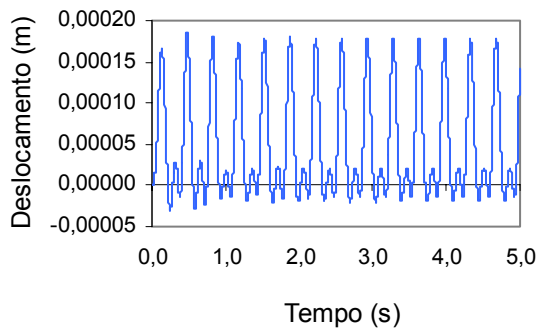
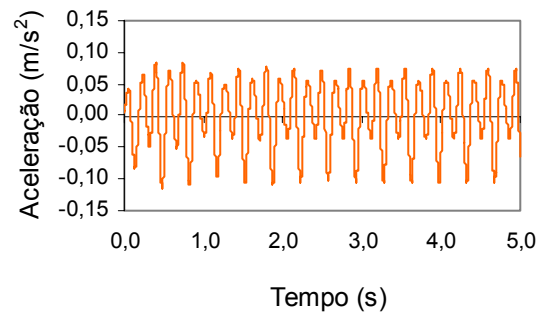
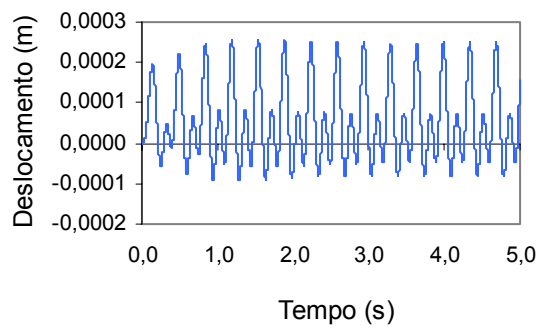
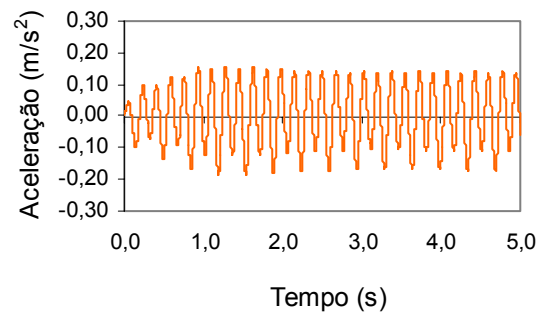
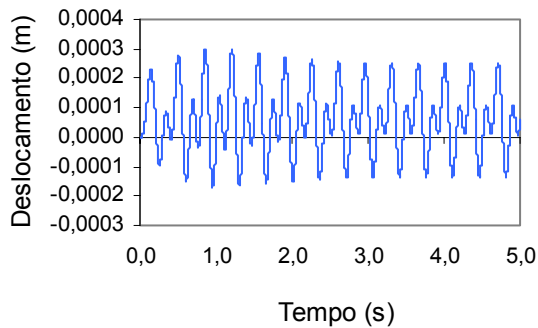
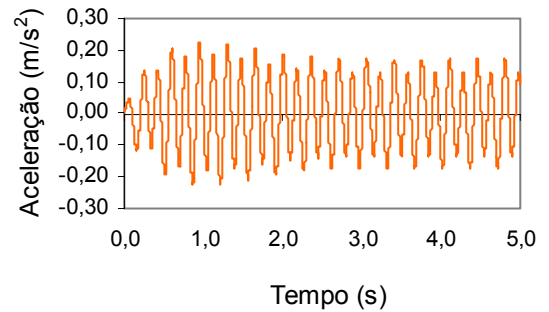
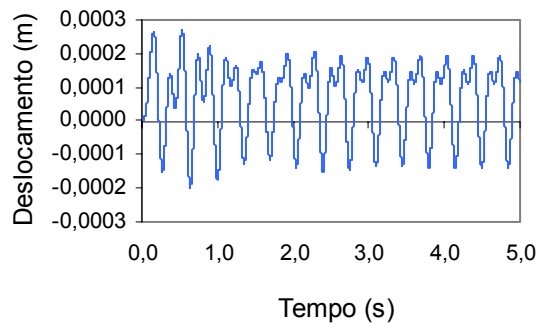
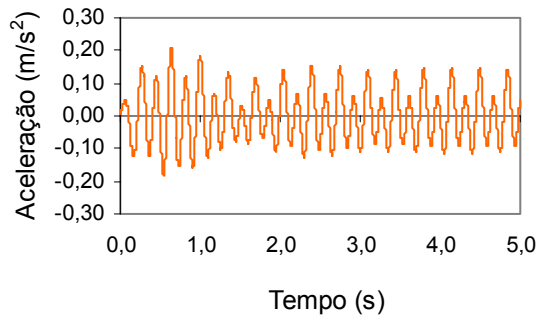
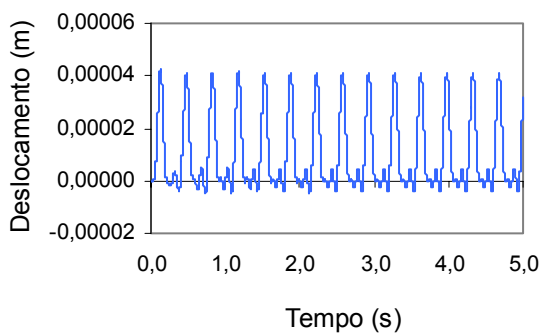
e) Deslocamento no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ f) Aceleração no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ g) Deslocamento no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ h) Aceleração no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ i) Deslocamento no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ j) Aceleração no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ k) Deslocamento no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ l) Aceleração no piso com $L_j = 10,0\text{m}$

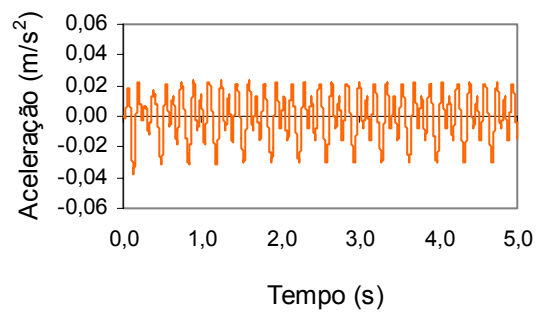
Figura 5.8- Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó A, segundo a variação do vão L_j .

Os sinais no tempo mostrados na Figura 5.8, em termos dos deslocamentos e das acelerações, apresentam um trecho correspondente à fase transiente. Nesse trecho alguns picos se apresentam mais altos, mas percebe-se que as respostas têm seu valor amortecido ao longo do tempo e a fase permanente é rapidamente atingida. Os valores das respostas dinâmicas consideradas correspondem aos picos obtidos na fase permanente dos sinais.

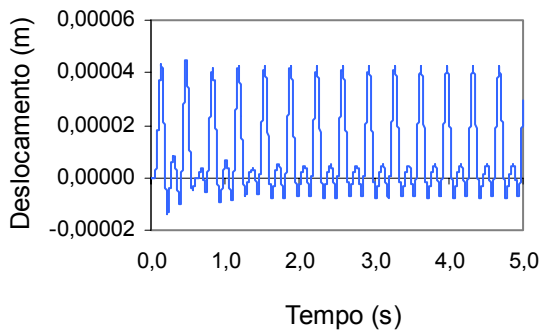
Na Figura 5.9 (a até f), são apresentados os sinais dos deslocamentos e acelerações obtidas no nó B, para toda a faixa de pisos correspondente à aplicação de uma pessoa centralizada no painel A de cada piso.



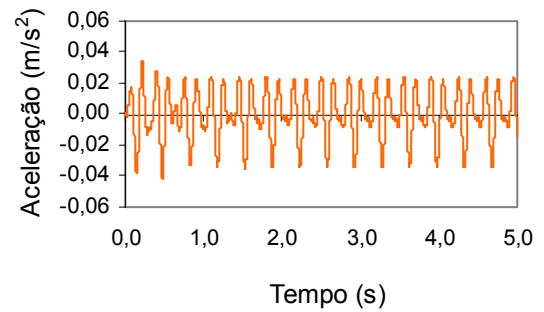
a) Deslocamento no piso com $L_j = 5,0\text{m}$



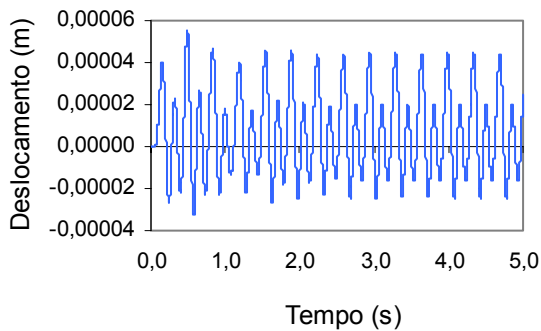
b) Aceleração no piso com $L_j = 5,0\text{m}$



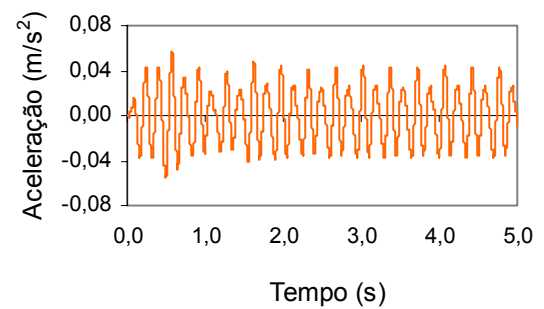
c) Deslocamento no piso com $L_j = 6,0\text{m}$



d) Aceleração no piso com $L_j = 6,0\text{m}$



e) Deslocamento no piso com $L_j = 7,0\text{m}$



f) Aceleração no piso com $L_j = 7,0\text{m}$

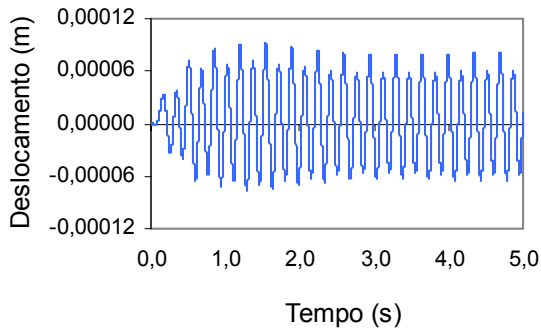
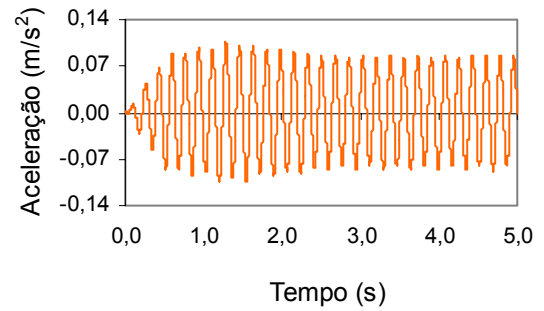
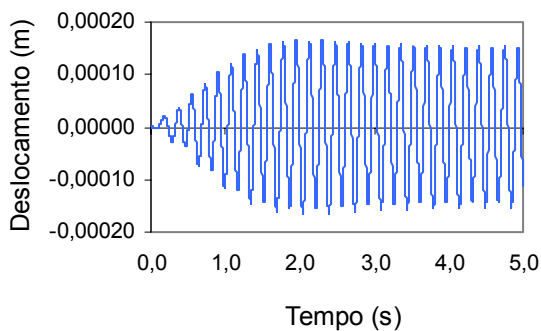
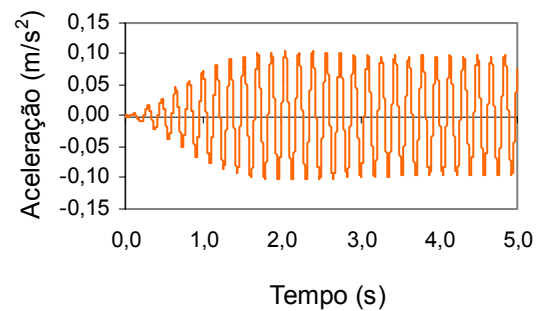
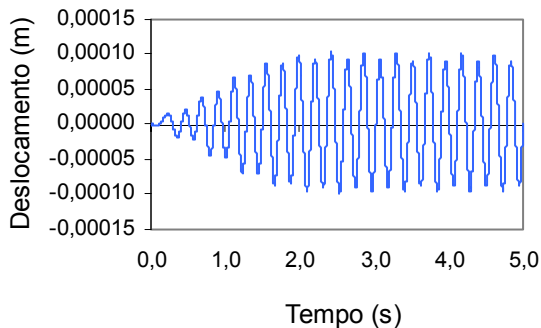
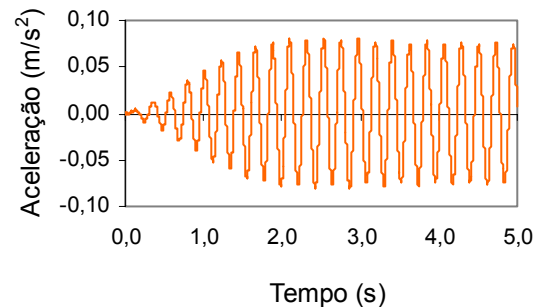
g) Deslocamento no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ h) Aceleração no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ i) Deslocamento no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ j) Aceleração no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ k) Deslocamento no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ l) Aceleração no piso com $L_j = 10,0\text{m}$

Figura 5.9 - Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó B, segundo a variação do vão L_j .

Os sinais no tempo mostrados na Figura 5.9, em termos dos deslocamentos e das acelerações, apresentam um trecho correspondente à fase transiente. Nesse trecho alguns picos se apresentam mais altos, mas percebe-se que as respostas têm seu valor amortecido ao longo do tempo e a fase permanente é atingida.

Resultados similares, no que se refere ao comportamento dos pisos, foram encontrados na aplicação de 3, 6, 9 e 12 pessoas. Os gráficos não serão aqui mostrados, pois não acrescentam na avaliação qualitativa das análises.

5.4.2.2 Estudo Paramétrico

5.4.2.2.1 Variação do Período de Contato (T_c)

Dando seqüência ao estudo, buscou-se avaliar o comportamento dos pisos para diferentes valores do período de contato (T_c). Como os dados disponíveis são experimentais, o procedimento adotado foi realizar análises utilizando o valor médio, o valor médio mais o desvio-padrão e o valor médio menos o desvio-padrão. Esses valores estão na Tabela 3.2 e correspondem à atividade aeróbica.

Para estudar o comportamento dos pisos ao longo da variação do período de contato, foram mantidos constantes outros parâmetros, como o coeficiente de impacto ($K_p = 2,78$), e o valor do período sem contato ($T_s = 0,10s$). Já o valor de CD (coeficiente de defasagem), é variado de acordo com o número de pessoas aplicadas e com o tipo de atividade (Figura 3.5).

Os resultados das acelerações de pico (a_p) obtidos no nó A, encontram-se da Tabela 5.8 à Tabela 5.13, para os diferentes valores do período de contato, juntamente com o valor limite recomendado para áreas sujeitas a atividades rítmicas. Esses resultados são apresentados para todos os pisos estudados, com L_j variando de 5,0 m a 10,0 m.

Tabela 5.8 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 5,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s^2)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s^2)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,064	0,023	0,017	0,5
3	0,164	0,057	0,044	0,5
6	0,271	0,093	0,072	0,5
9	0,340	0,115	0,089	0,5
12	0,340	0,115	0,089	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.9 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 6,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,064	0,037	0,018	0,5
3	0,166	0,099	0,047	0,5
6	0,274	0,168	0,077	0,5
9	0,345	0,213	0,096	0,5
12	0,349	0,219	0,096	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.10 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 7,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,105	0,045	0,020	0,5
3	0,278	0,120	0,052	0,5
6	0,469	0,202	0,088	0,5
9	0,597	0,255	0,113	0,5
12	0,620	0,262	0,119	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.11 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 8,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,171	0,045	0,032	0,5
3	0,470	0,119	0,087	0,5
6	0,811	0,207	0,150	0,5
9	1,043	0,274	0,194	0,5
12	1,104	0,301	0,208	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.12 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 9,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s^2)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s^2)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,173	0,066	0,044	0,5
3	0,485	0,176	0,120	0,5
6	0,866	0,303	0,207	0,5
9	1,135	0,394	0,267	0,5
12	1,239	0,429	0,286	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.13 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 10,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s^2)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s^2)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,144	0,091	0,047	0,5
3	0,404	0,249	0,129	0,5
6	0,737	0,440	0,226	0,5
9	1,005	0,588	0,300	0,5
12	1,164	0,665	0,336	0,5

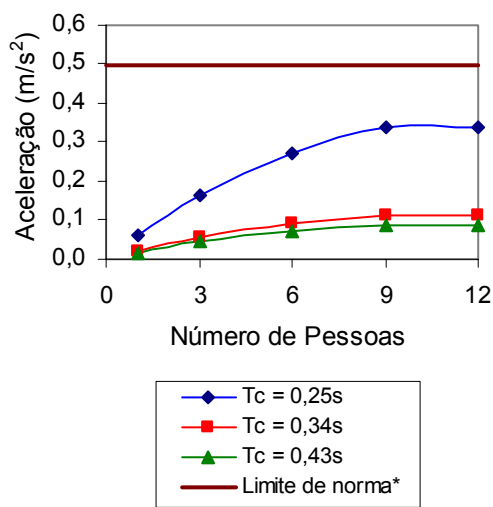
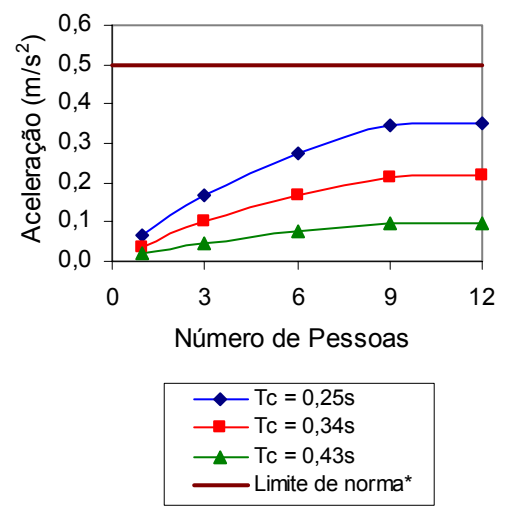
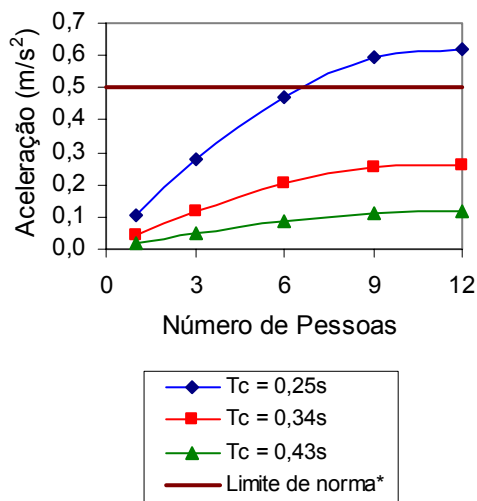
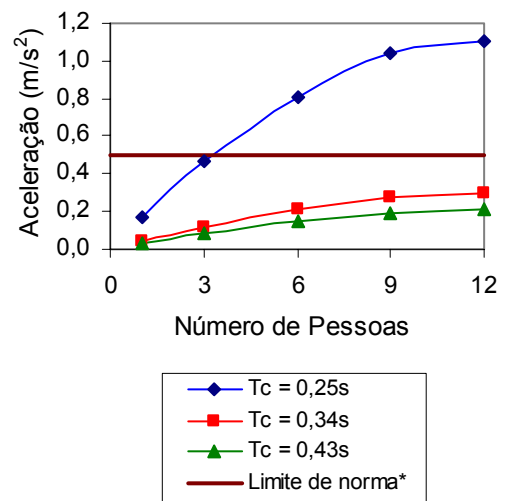
* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

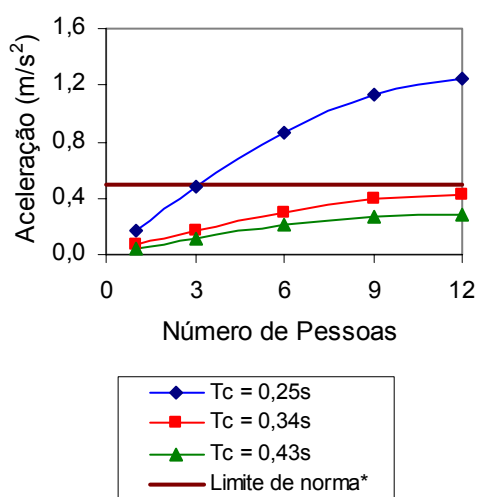
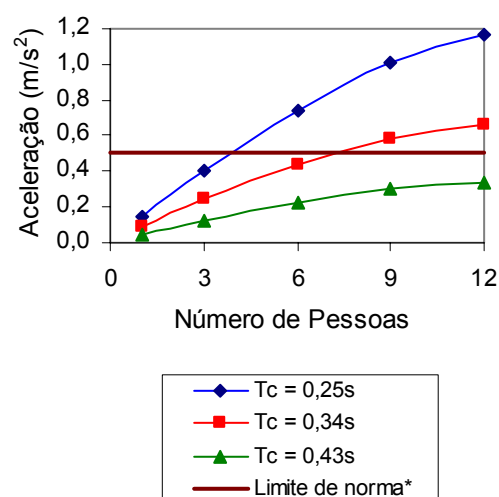
Percebe-se, que na maioria dos casos, os valores das acelerações máximas aumentam na medida em que se aumenta o número de pessoas aplicadas sobre a estrutura. Mas observa-se que para o piso com $L_j = 5,0\text{m}$, não houve diferença entre a aplicação de 9 pessoas e 12 pessoas, e para o piso com $L_j = 6,0\text{m}$, a diferença entre os valores foi muito pequena. Isso porque, de acordo com a taxa de distribuição de $0,25$ pessoas/ m^2 , quando se aplicam 12 pessoas sobre o piso, não há uma pessoa aplicada exatamente no centro do painel A, Figura 4.4 (j). Já na configuração onde se aplicam 9 pessoas sobre o piso, Figura 4.4 (h), existe uma carga aplicada no centro do painel A. Isso mostra que para os pisos mais rígidos o aumento de 9 pessoas para 12 pessoas não foi significativo. Entretanto, na medida em que a dimensão L_j aumenta, a diferença entre esses resultados fica maior, pois as cargas ficam mais distantes dos apoios, enquanto os pisos ficam mais flexíveis e, conseqüentemente mais suscetíveis ao aumento do carregamento.

As acelerações máximas obtidas da aplicação de 12 pessoas foram: $0,340\text{m/s}^2$ para $L_j=5,0\text{m}$; $0,349\text{m/s}^2$ para $L_j=6,0\text{m}$; $0,620\text{m/s}^2$ para $L_j=7,0\text{m}$; $1,104\text{m/s}^2$ para $L_j=8,0\text{m}$;

1,239m/s² para $L_j=9,0\text{m}$; 1,164m/s² para $L_j=10,0\text{m}$. Isso significa que para os pisos mais rígidos ($L_j = 5,0\text{m}$ e $6,0\text{m}$), o limite recomendado para áreas sujeitas a atividades rítmicas (0,5 m/s²) não é ultrapassado. Já para os outros pisos as acelerações de pico são superiores ao limite.

A fim de visualizar melhor os resultados obtidos para os diferentes valores do período de contato, são apresentados na Figura 5.10 (a até f), os gráficos correspondentes às aceleração de pico ao longo da variação do número de pessoas aplicadas, para todos os pisos investigados.

a) $L_j = 5,0\text{m}$ b) $L_j = 6,0\text{m}$ c) $L_j = 7,0\text{m}$ d) $L_j = 8,0\text{m}$

e) L_j = 9,0mf) L_j = 10,0mFigura 5.10 - Acelerações de pico no nó A, para diferentes valores de T_c.

Através da Figura 5.10 (a até f), é possível analisar o comportamento dos pisos, em termos das acelerações de pico, para os diferentes períodos de contato. Verifica-se que em todos os sistemas estudados as acelerações máximas obtidas no nó A, foram maiores utilizando T_c = 0,25s. Essa diminuição do período de contato leva à diminuição do período da atividade, conseqüentemente isso acarreta o aumento da freqüência da atividade. Esse aumento na freqüência da atividade aproxima mais a freqüência de excitação da freqüência natural de cada piso, levando a valores de acelerações mais altos. É importante lembrar que foram mantidos constantes os valores de T_s (período sem contato) e de K_p (coeficiente de impacto).

Sob o aspecto do conforto humano podemos concluir, com base na curva que mostra o limite recomendado para áreas sujeitas a atividades rítmicas, que os pisos mais rígidos (L_j = 5,0m e 6,0m) apresentam acelerações de pico inferiores ao limite para os três valores do período de contato. Para pisos mais flexíveis, com L_j = 7,0m, 8,0m e 9,0m, o limite foi ultrapassado somente pela curva onde T_c = 0,25s. Já para o piso com L_j = 10,0m, o limite foi ultrapassado pelas curvas formadas por T_c = 0,25s e 0,34s.

Como as respostas foram maiores para T_c = 0,25s, a Figura 5.11 mostra o gráfico das acelerações de pico ao longo da variação do vão L_j.

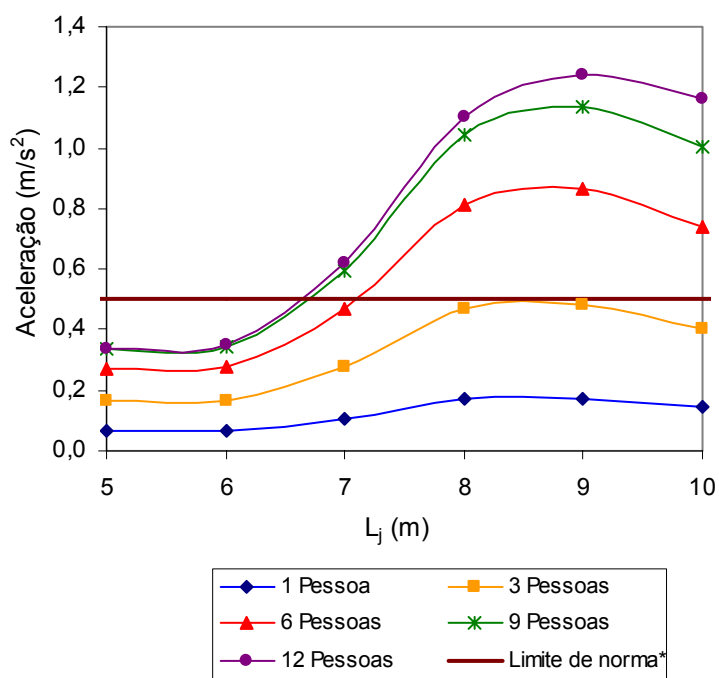


Figura 5.11 – Acelerações de pico no nó A para $T_c=0,25s$.

Percebe-se que as acelerações de pico são maiores com o aumento do número de pessoas, porém não são necessariamente maiores com o aumento do vão L_j . Isso se deve a interação entre a excitação e as características dinâmicas dos modelos, ou seja, os outros harmônicos do carregamento podem influenciar os outros modos de vibração de forma diferente para cada piso.

São apresentados a seguir, da Tabela 5.14 à Tabela 5.19, os resultados das acelerações de pico (a_p) obtidos no nó B, para os diferentes valores do período de contato. Também é apresentado o valor limite recomendado pela ISO 2631/2 [26], para áreas sujeitas a atividades rítmicas. Esses resultados são apresentados para todos os pisos estudados, com L_j variando de 5,0 m a 10,0 m.

Tabela 5.14 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 5,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,030	0,014	0,011	0,5
3	0,088	0,037	0,032	0,5
6	0,152	0,064	0,055	0,5
9	0,188	0,080	0,069	0,5
12	0,190	0,081	0,069	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.15 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 6,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,035	0,023	0,012	0,5
3	0,100	0,065	0,033	0,5
6	0,175	0,113	0,057	0,5
9	0,219	0,142	0,071	0,5
12	0,222	0,145	0,072	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.16 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 7,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,043	0,032	0,010	0,5
3	0,124	0,092	0,029	0,5
6	0,218	0,160	0,050	0,5
9	0,276	0,202	0,063	0,5
12	0,286	0,209	0,065	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.17 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 8,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,087	0,034	0,014	0,5
3	0,254	0,097	0,039	0,5
6	0,445	0,171	0,069	0,5
9	0,562	0,222	0,088	0,5
12	0,579	0,239	0,091	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.18 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 9,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,097	0,030	0,008	0,5
3	0,274	0,087	0,025	0,5
6	0,488	0,154	0,043	0,5
9	0,642	0,198	0,055	0,5
12	0,707	0,212	0,057	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.19 – Acelerações máximas no nó B, para $L_j = 10,0\text{m}$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$T_c = 0,25$	$T_c = 0,34$	$T_c = 0,43$	
1	0,077	0,014	0,002	0,5
3	0,227	0,038	0,003	0,5
6	0,400	0,067	0,006	0,5
9	0,507	0,095	0,013	0,5
12	0,528	0,127	0,028	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

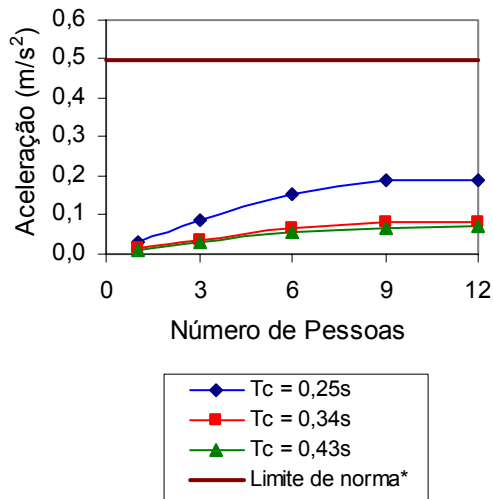
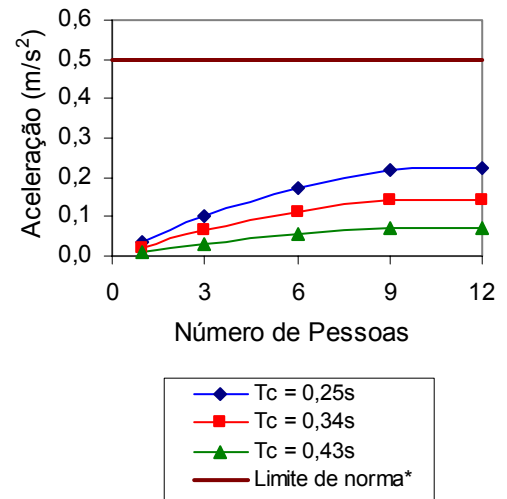
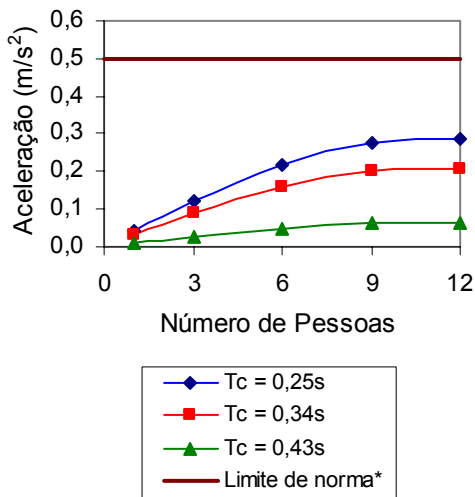
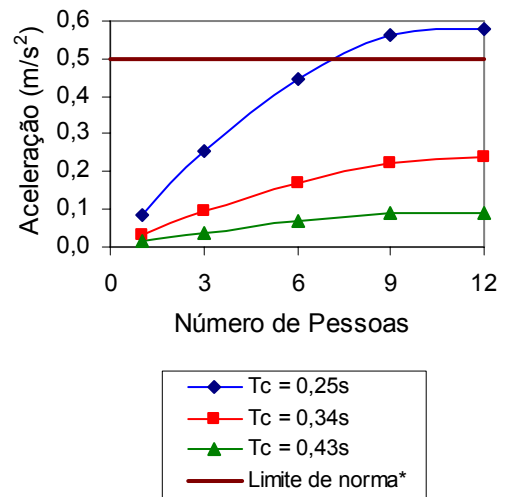
Os resultados encontrados no nó B são claramente inferiores aos encontrados no nó A, para todos os pisos (com L_j variando de 5,0 m a 10,0 m). Isso porque o nó A encontra-se no painel de aplicação das cargas, enquanto o nó B encontra-se no painel adjacente.

De acordo com os resultados obtidos no nó B, observa-se que na maioria dos casos, os valores das acelerações máximas também aumentam na medida em que se aumenta o número de pessoas aplicadas sobre a estrutura. Porém, para pisos mais rígidos ($L_j = 5,0$ e $6,0\text{m}$), não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos a partir da aplicação de 9 e 12 pessoas. Isso porque, de acordo com a taxa de distribuição de 0,25 pessoas/m², quando se aplicam 12 pessoas sobre o piso, não há uma pessoa aplicada exatamente no centro do painel A, Figura 4.4 (j). No caso de 9 pessoas aplicadas, existe uma pessoa aplicada no centro do painel de aplicação das cargas (painel A).

As acelerações máximas obtidas da aplicação de 12 pessoas foram: 0,190m/s² para $L_j = 5,0\text{m}$; 0,222m/s² para $L_j = 6,0\text{m}$; 0,286m/s² para $L_j = 7,0\text{m}$; 0,579m/s² para $L_j = 8,0\text{m}$; 0,707m/s² para $L_j = 9,0\text{m}$; 0,528m/s² para $L_j = 10,0\text{m}$. Esses resultados demonstram que,

para os pisos com $L_j = 8,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$, o limite recomendado para áreas sujeitas a atividades rítmicas ($0,5 \text{ m/s}^2$), é ultrapassado. Já para os pisos mais rígidos, as acelerações de pico são inferiores ao limite.

A Figura 5.12 (a até f) apresenta os gráficos correspondentes aos valores de aceleração de pico no nó B ao longo da variação do número de pessoas aplicadas, para os diferentes valores do período de contato, para todos os pisos estudados.

a) $L_j = 5,0\text{m}$ b) $L_j = 6,0\text{m}$ c) $L_j = 7,0\text{m}$ d) $L_j = 8,0\text{m}$

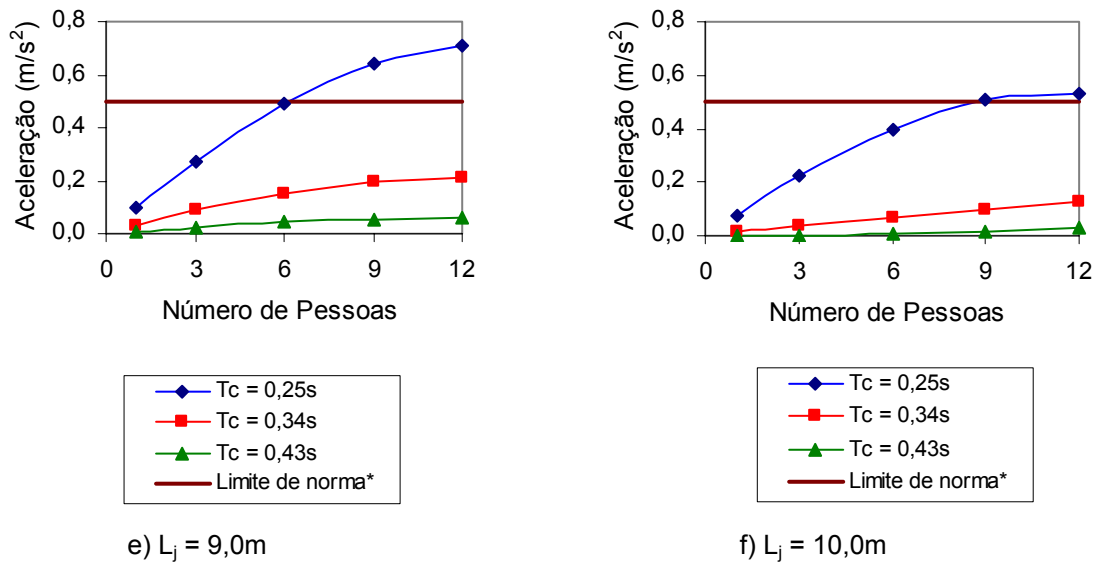


Figura 5.12 – Acelerações de pico no nó B, para diferentes valores de T_c .

A Figura 5.12 (a até f) apresenta o resultado das acelerações de pico para os diferentes períodos de contato. Verifica-se que, de forma semelhante aos resultados obtidos no nó A, em todos os sistemas estudados as acelerações de pico obtidas foram maiores utilizando $T_c = 0,25\text{s}$.

Da mesma forma que no nó A, a diminuição do período de contato leva à diminuição do período da atividade, o que aumenta a frequência de excitação. Com isso, a frequência da atividade se aproxima mais da frequência natural de cada piso, gerando acelerações mais altas.

Sob o aspecto do conforto humano pode-se concluir, com base no limite recomendado para áreas sujeitas a atividades rítmicas, que os pisos mais rígidos ($L_j = 5,0\text{m}$, $6,0\text{m}$ e $7,0\text{m}$) apresentam acelerações de pico inferiores ao limite para os três valores do período de contato. Para os pisos com $L_j = 8,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$, o limite foi ultrapassado somente pela curva onde $T_c = 0,25\text{s}$, a partir da aplicação de 9 pessoas.

Como as respostas também foram maiores para $T_c = 0,25\text{s}$, a Figura 5.13 mostra o gráfico das acelerações de pico ao longo da variação do vão L_j .

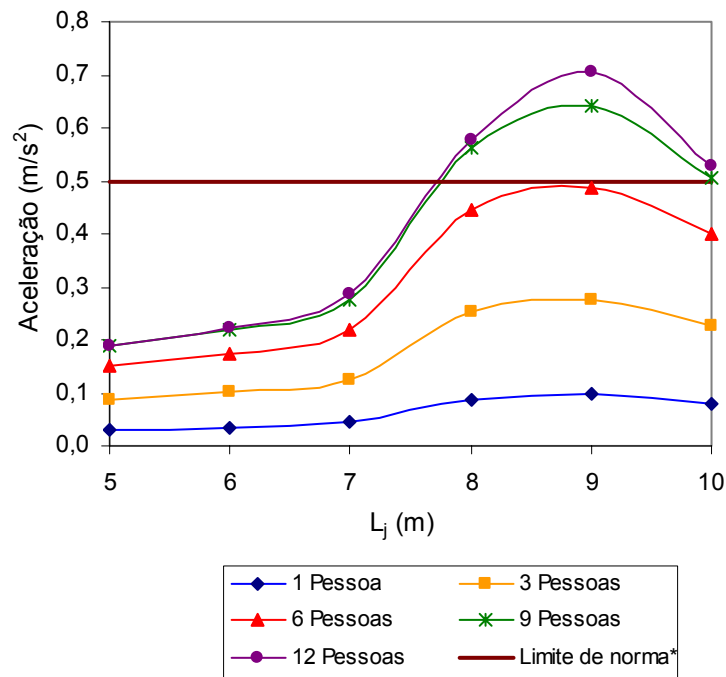


Figura 5.13 – Acelerações de pico no nó B para $T_c=0,25s$.

De forma semelhante ao nó A, as acelerações de pico são maiores com o aumento do número de pessoas, porém não são necessariamente maiores com o aumento do vão L_j . Isso também se deve a interação entre a excitação e as características dinâmicas dos modelos, pois os outros harmônicos do carregamento podem influenciar os outros modos de vibração de forma diferente para cada piso.

5.4.2.2.2 Variação do Coeficiente de Impacto (K_p)

Nesta seção, o objetivo é avaliar o comportamento dos pisos ao longo da faixa de variação do coeficiente de impacto (K_p), para dois tipos de atividades: atividade aeróbica e atividade de saltos à vontade.

Baseado nas análises anteriores, foi adotado o valor de 0,25s para o período de contato ($T_c= 0,25s$), pois as acelerações de pico encontradas com esse valor de T_c foram maiores em toda faixa de variação de L_j , nos nós A e B. Além disso, tanto a atividade aeróbica quanto a atividade de saltos à vontade podem ser caracterizadas utilizando o período de contato igual 0,25s, de acordo com a Tabela 3.2. O valor de CD é variado de acordo com o número de pessoas aplicadas e com o tipo de atividade (Tabela 3.1).

Nessas análises, é mantido constante o valor do período sem contato ($T_s= 0,10s$). O coeficiente de impacto (K_p) é variado utilizando o valor médio, o valor médio mais o desvio-padrão e o valor médio menos o desvio-padrão, de acordo com cada atividade estudada.

Da Tabela 5.20 à Tabela 5.25, são apresentados as acelerações de pico correspondentes à fase permanente do sinal, para os pisos com L_j variando de 5,0m a 10,0m obtidos no nó A.

Tabela 5.20 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 5,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,050	0,064	0,078	0,059	0,073	0,086	0,5
3	0,129	0,164	0,200	0,135	0,165	0,195	0,5
6	0,213	0,271	0,330	0,193	0,236	0,279	0,5
9	0,266	0,340	0,413	0,231	0,282	0,334	0,5
12	0,267	0,340	0,413	0,223	0,273	0,323	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.21 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 6,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,050	0,064	0,078	0,059	0,073	0,086	0,5
3	0,130	0,166	0,202	0,136	0,167	0,197	0,5
6	0,215	0,274	0,333	0,195	0,239	0,282	0,5
9	0,271	0,345	0,420	0,234	0,287	0,339	0,5
12	0,274	0,349	0,425	0,230	0,281	0,332	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.22 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 7,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,082	0,105	0,128	0,098	0,120	0,142	0,5
3	0,218	0,278	0,338	0,228	0,279	0,330	0,5
6	0,368	0,469	0,570	0,333	0,408	0,483	0,5
9	0,468	0,597	0,726	0,406	0,496	0,587	0,5
12	0,486	0,620	0,754	0,407	0,498	0,590	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.23 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 8,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,134	0,171	0,208	0,159	0,195	0,231	0,5
3	0,368	0,470	0,571	0,385	0,471	0,558	0,5
6	0,636	0,811	0,986	0,577	0,706	0,835	0,5
9	0,818	1,043	1,268	0,709	0,867	1,026	0,5
12	0,866	1,104	1,343	0,726	0,888	1,051	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.24 – Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 9,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,136	0,173	0,211	0,162	0,198	0,234	0,5
3	0,380	0,485	0,590	0,398	0,487	0,576	0,5
6	0,679	0,866	1,053	0,616	0,754	0,891	0,5
9	0,890	1,135	1,380	0,771	0,944	1,117	0,5
12	0,972	1,239	1,506	0,814	0,996	1,179	0,5

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.25– Acelerações máximas no nó A, para $L_j = 10,0m$.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	Ginástica aeróbica			Saltos à Vontade			
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$	$K_p = 2,59$	$K_p = 3,17$	$K_p = 3,75$	
1	0,113	0,144	0,175	0,134	0,164	0,194	0,5
3	0,317	0,404	0,491	0,331	0,405	0,479	0,5
6	0,578	0,737	0,896	0,524	0,641	0,758	0,5
9	0,788	1,005	1,222	0,683	0,836	0,989	0,5
12	0,913	1,164	1,415	0,765	0,936	1,108	0,5

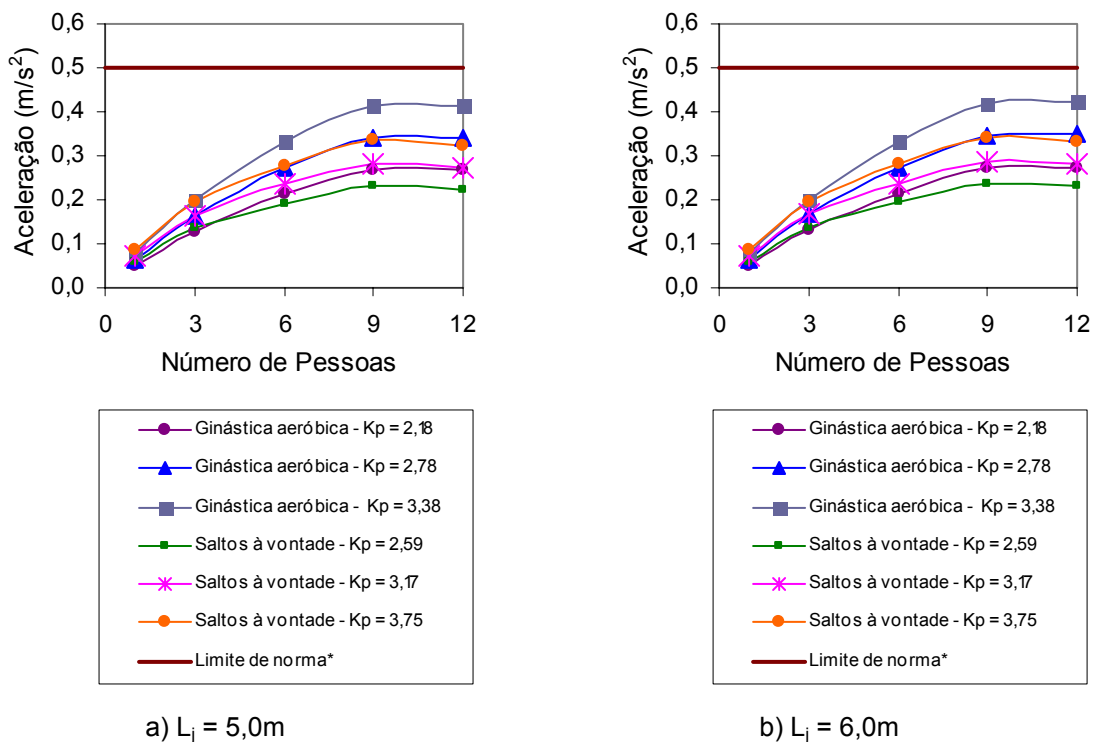
* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

No que se refere à atividade aeróbica, as acelerações máximas obtidas da aplicação de 12 pessoas, para o maior valor de K_p ($K_p = 3,38$) foram: $0,413m/s^2$ para $L_j = 5,0m$; $0,425m/s^2$

para $L_j = 6,0\text{m}$; $0,754\text{m/s}^2$ para $L_j = 7,0\text{m}$; $1,343\text{m/s}^2$ para $L_j = 8,0\text{m}$; $1,506\text{m/s}^2$ para $L_j = 9,0\text{m}$; $1,415\text{m/s}^2$ para $L_j = 10,0\text{m}$. De acordo com o limite recomendado ao conforto humano em áreas sujeitas a atividades rítmicas, que é de $0,5\text{ m/s}^2$, somente os pisos mais rígidos ($L_j = 5,0\text{m}$ e $6,0\text{m}$) apresentam acelerações inferiores ao limite. Para os outros pisos ($L_j = 7,0\text{m}$, $8,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$), o limite é ultrapassado.

As acelerações máximas obtidas da atividade de saltos à vontade, a partir da aplicação de 12 pessoas com o maior valor de K_p ($k_p = 3,75$) foram: $0,323\text{m/s}^2$ para $L_j = 5,0\text{m}$; $0,352\text{m/s}^2$ para $L_j = 6,0\text{m}$; $0,590\text{m/s}^2$ para $L_j = 7,0\text{m}$; $1,051\text{m/s}^2$ para $L_j = 8,0\text{m}$; $1,179\text{m/s}^2$ para $L_j = 9,0\text{m}$; $1,108\text{m/s}^2$ para $L_j = 10,0\text{m}$. Da mesma forma que na ginástica aeróbica os pisos mais rígidos ($L_j = 5,0\text{m}$ e $6,0\text{m}$) apresentam acelerações dentro do limite para a atividade de saltos à vontade. Para os outros pisos ($L_j = 7,0\text{m}$, $8,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$), o limite também é ultrapassado.

A Figura 5.14 (a até f) apresenta os gráficos correspondentes aos valores de aceleração de pico ao longo da variação do número de pessoas aplicadas, para os pisos com L_j variando de $5,0\text{ m}$ a $10,0\text{ m}$, obtidos no nó A.



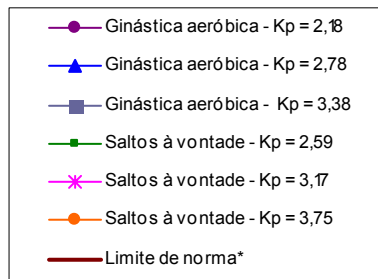
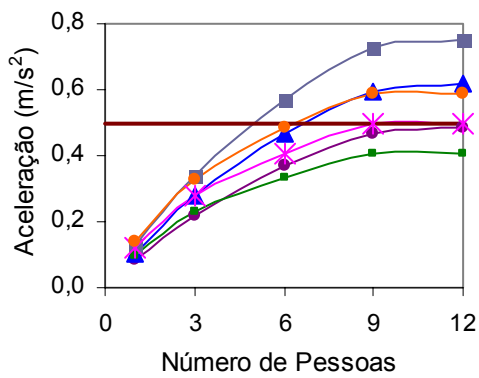
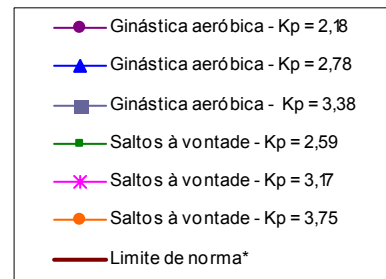
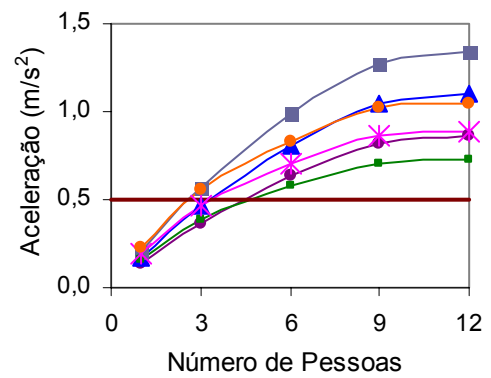
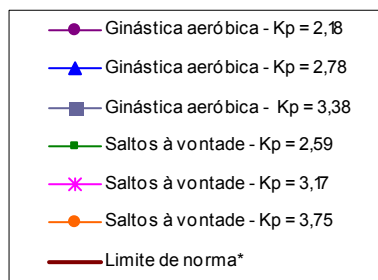
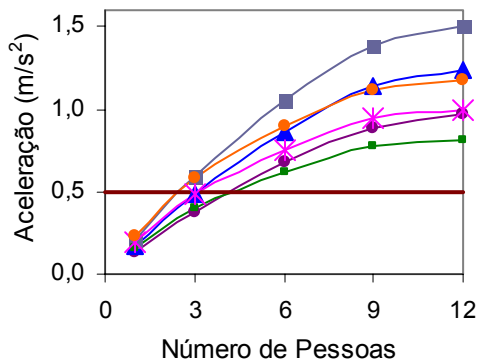
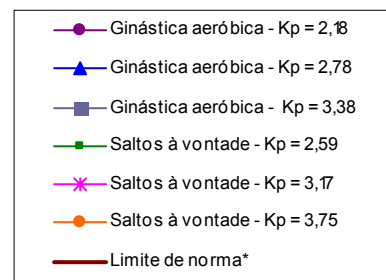
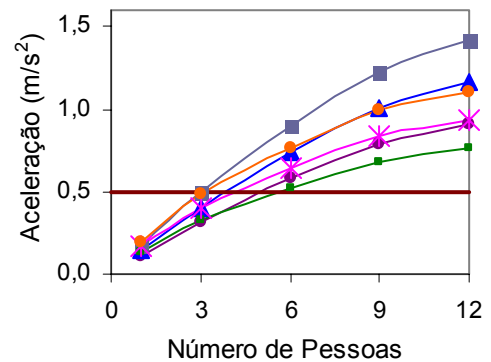
c) $L_j = 7,0m$ d) $L_j = 8,0m$ e) $L_j = 9,0m$ f) $L_j = 10,0m$

Figura 5.14 – Acelerações de pico para atividade aeróbica e saltos à vontade, ao longo da variação do número de pessoas.

Percebe-se através dos gráficos, o comportamento dos pisos sob os diferentes valores de K_p . Os maiores resultados são obtidos para a atividade aeróbica. Esses resultados são maiores em todos os casos estudados, para L_j variando de 5,0 a 10,0m. Esse fato ocorre porque a atividade aeróbica é mais sincronizada que a atividade de saltos à vontade.

De acordo com a Figura 5.14 (a, b), os pisos mais rígidos apresentam acelerações de pico inferiores ao limite de conforto para toda a faixa de variação do parâmetro K_p . Isso ocorre tanto para a atividade aeróbica quanto para a atividade de saltos à vontade.

Na Figura 5.14 (c), para o piso com $L_j = 7,0\text{m}$, somente nos casos onde o parâmetro K_p é menor, as acelerações de pico obtidas são inferiores ao limite de conforto ao longo de toda a variação do número de pessoas, para as duas atividades estudadas.

Na Figura 5.14 (d, e, f), para os pisos com $L_j = 8,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$ a partir da aplicação de 6 pessoas sobre o piso, as acelerações de pico obtidas já ultrapassam o limite de conforto em toda faixa de variação do parâmetro K_p , nas duas atividades estudadas.

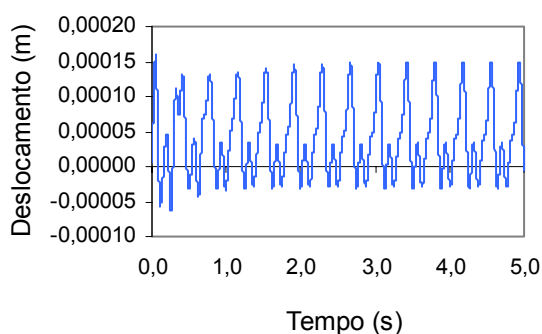
Os resultados para o nó B não são aqui mostrados, mas apresentam comportamentos semelhantes. A atividade aeróbica também gera valores de acelerações de pico maiores que a atividade de saltos à vontade.

5.4.3 Aplicação do Modelo de Carregamento II (MC-II)

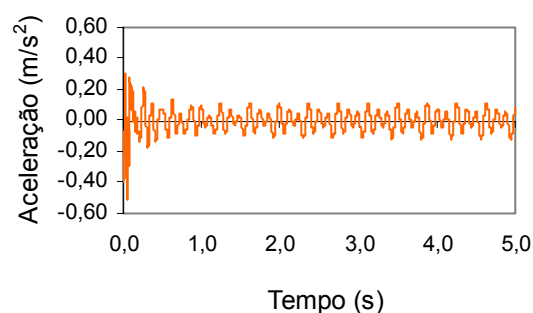
5.4.3.1 Estudo do Comportamento Geral

Essa metodologia de carregamento utiliza uma série de Fourier, apresentada na equação (3.2), e baseia-se nos parâmetros propostos por Murray *et al.* [21], descritos na Tabela 2.2, para representar a atividade aeróbica. As análises dinâmicas foram realizadas no intuito de forçar a situação de ressonância.

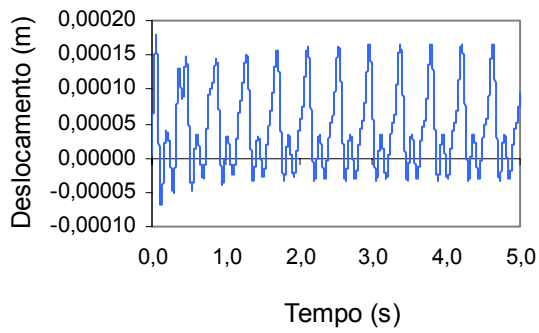
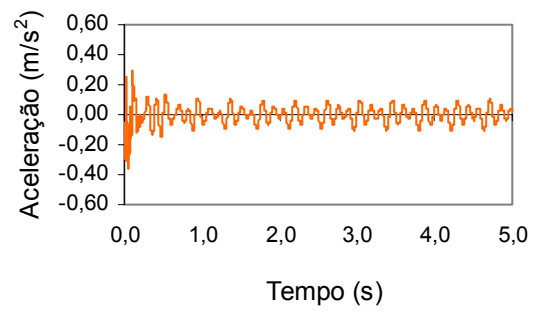
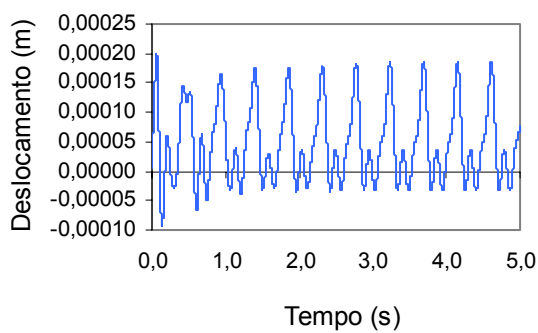
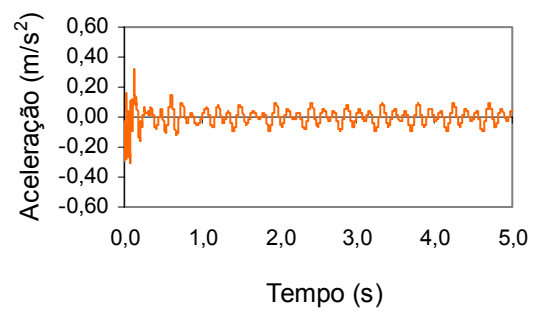
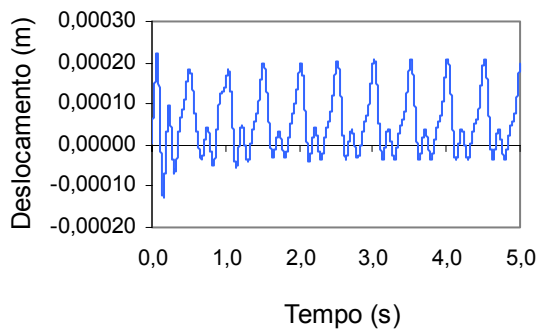
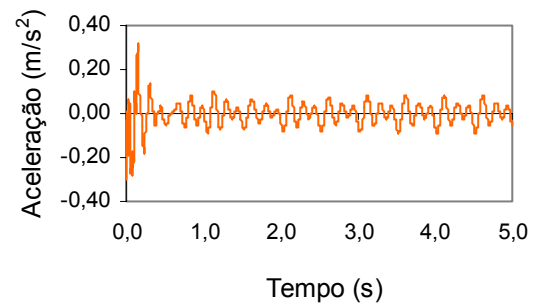
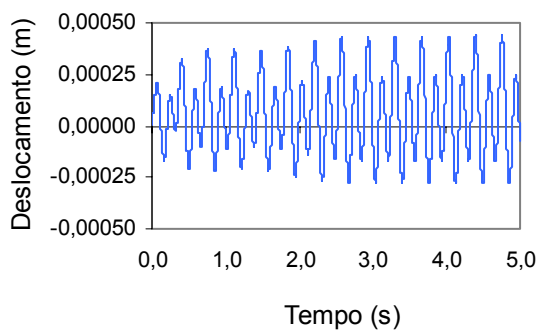
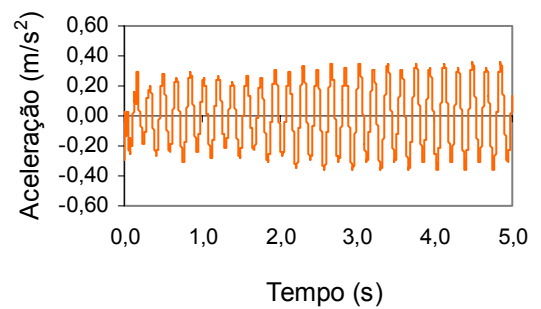
São apresentados na Figura 5.15 (a até l), os sinais dos deslocamentos e das acelerações obtidas no nó A, para toda a faixa de pisos correspondente à aplicação de uma pessoa centralizada no painel A de cada piso.

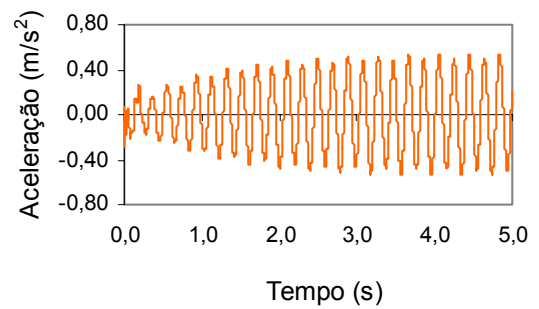
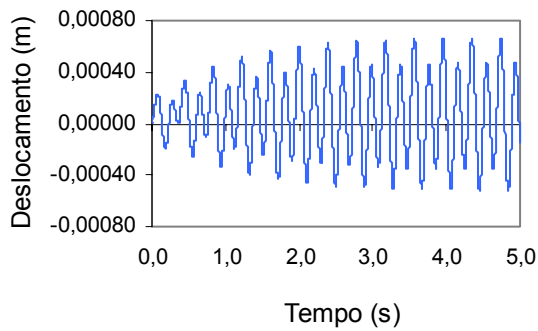


a) Deslocamento no piso com $L_j = 5,0\text{m}$



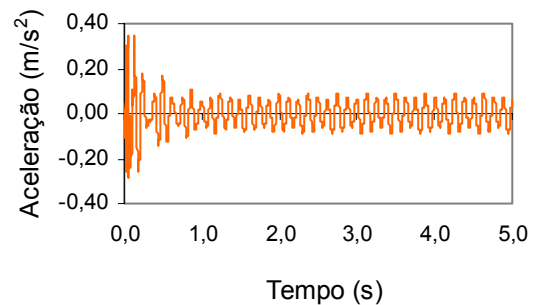
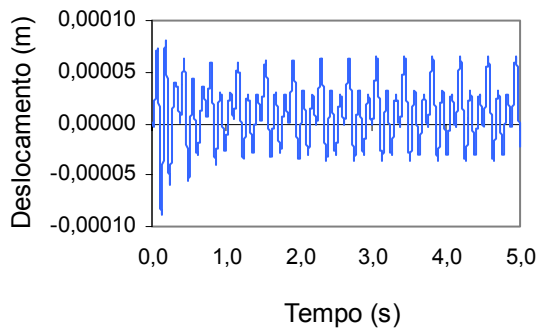
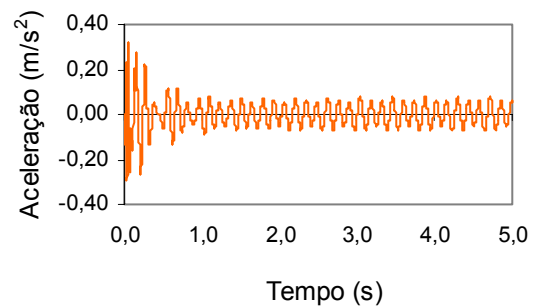
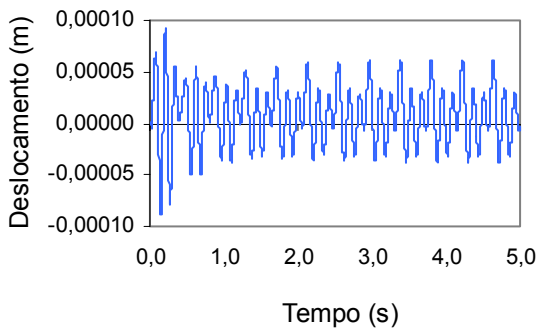
b) Aceleração no piso com $L_j = 5,0\text{m}$

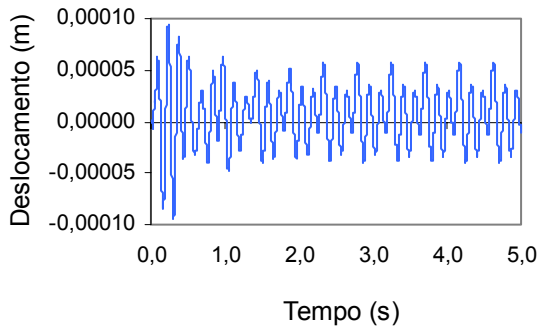
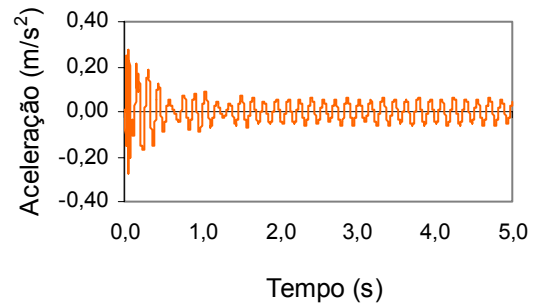
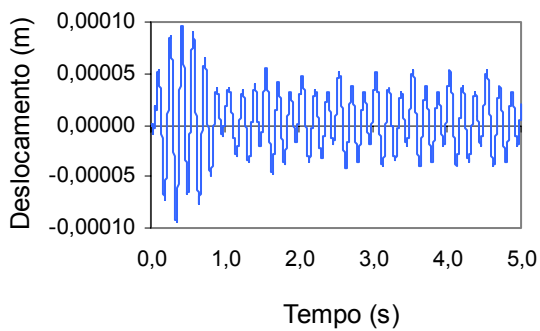
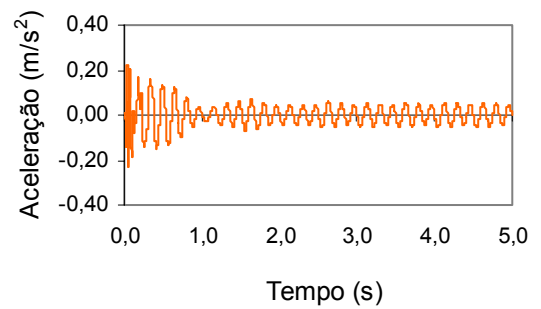
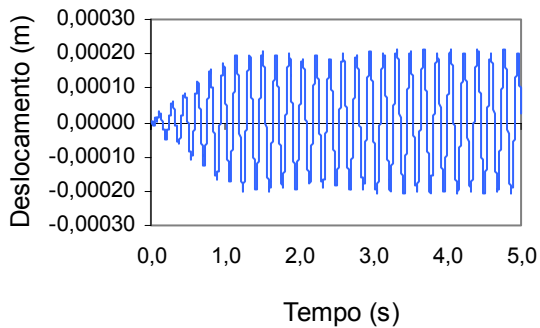
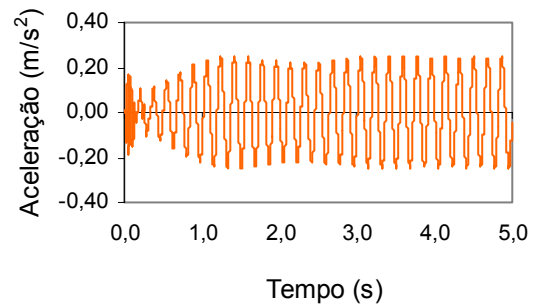
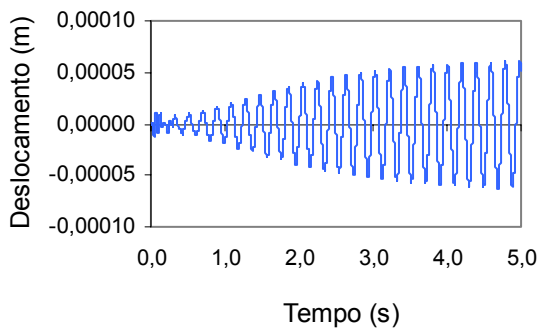
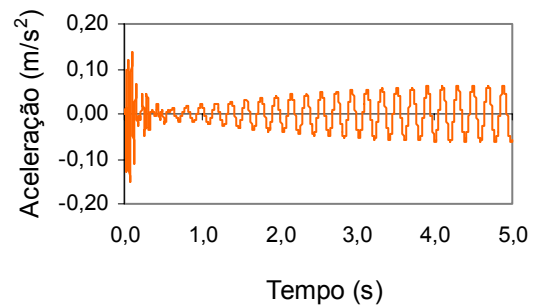
c) Deslocamento no piso com $L_j = 6,0\text{m}$ d) Aceleração no piso com $L_j = 6,0\text{m}$ e) Deslocamento no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ f) Aceleração no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ g) Deslocamento no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ h) Aceleração no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ i) Deslocamento no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ j) Aceleração no piso com $L_j = 9,0\text{m}$

k) Deslocamento no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ l) Aceleração no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ Figura 5.15 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó A, segundo a variação do vão L_j .

Os sinais no tempo mostrados na Figura 5.15, em termos dos deslocamentos e das acelerações, apresentam uma fase transitória, mas a fase permanente é rapidamente atingida.

São apresentados na Figura 5.16 (a até l), os sinais dos deslocamentos e das acelerações obtidas no nó B, para toda a faixa de pisos correspondente à aplicação de uma pessoa centralizada no painel A de cada piso.

a) Deslocamento no piso com $L_j = 5,0\text{m}$ b) Aceleração no piso com $L_j = 5,0\text{m}$ c) Deslocamento no piso com $L_j = 6,0\text{m}$ d) Aceleração no piso com $L_j = 6,0\text{m}$

e) Deslocamento no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ f) Aceleração no piso com $L_j = 7,0\text{m}$ g) Deslocamento no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ h) Aceleração no piso com $L_j = 8,0\text{m}$ i) Deslocamento no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ j) Aceleração no piso com $L_j = 9,0\text{m}$ k) Deslocamento no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ l) Aceleração no piso com $L_j = 10,0\text{m}$ Figura 5.16 – Gráficos dos deslocamentos e acelerações no nó B, segundo a variação do vão L_j .

Os sinais no tempo mostrados na Figura 5.16, em termos dos deslocamentos e acelerações, apresentam uma fase transiente mais evidente do que os resultados obtidos do nó A. Mas a fase permanente também é rapidamente atingida. Os valores das respostas dinâmicas consideradas correspondem aos picos obtidos na fase permanente dos sinais. Para os outros casos onde se aplicam 3, 6, 9 e 12 pessoas os sinais se comportaram de forma semelhante, por isso não estão sendo mostrados.

5.4.3.2 Estudo Paramétrico

Nesta seção são apresentadas as acelerações de pico obtidas no nó A (nó referente ao painel de aplicação das cargas), e no nó B (nó referente ao painel adjacente ao painel de aplicação das cargas), ao longo da variação da dimensão das vigas secundárias (L_j), de 5,0m a 10,0m.

Na Tabela 5.26 são apresentadas as acelerações máximas obtidas no nó A, para todos os pisos estudados referentes ao modelo III com altura dos pilares igual 5,0m. Os resultados estão em função da dimensão L_j e do número de pessoas aplicadas sobre os pisos.

Tabela 5.26 – Acelerações de pico no nó A.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$L_j = 5,0m$	$L_j = 6,0m$	$L_j = 7,0m$	$L_j = 8,0m$	$L_j = 9,0m$	$L_j = 10,0m$	
1	0,117	0,103	0,094	0,088	0,366	0,540	0,5
3	0,316	0,279	0,254	0,240	1,026	1,517	0,5
6	0,553	0,488	0,446	0,425	1,866	2,829	0,5
9	0,698	0,620	0,572	0,550	2,461	3,859	0,5
12	0,711	0,638	0,596	0,585	2,704	4,468	0,5

* Limite recomendado para locais submetidos a atividades rítmicas.

Na Tabela 5.27 são apresentadas as acelerações máximas obtidas no nó B, para todos os pisos estudados referentes ao modelo III com altura dos pilares igual 5,0m. Os resultados estão em função da dimensão L_j e do número de pessoas aplicadas sobre os pisos.

Tabela 5.27 – Acelerações de pico no nó B.

Nº Pessoas	a_p (m/s ²)						Limite* ISO [26], AISC [21] (m/s ²)
	$L_j = 5,0\text{m}$	$L_j = 6,0\text{m}$	$L_j = 7,0\text{m}$	$L_j = 8,0\text{m}$	$L_j = 9,0\text{m}$	$L_j = 10,0\text{m}$	
1	0,093	0,078	0,066	0,057	0,247	0,064	0,5
3	0,265	0,223	0,191	0,165	0,712	0,184	0,5
6	0,476	0,400	0,344	0,299	1,296	0,336	0,5
9	0,600	0,508	0,439	0,385	1,685	0,460	0,5
12	0,615	0,524	0,457	0,405	1,809	0,603	0,5

* Limite recomendado para locais submetidos a atividades rítmicas.

Os resultados das acelerações de pico encontradas no nó A são claramente superiores aos encontrados no nó B, a partir da comparação dos pisos de mesma dimensão L_j . Isso porque o nó A encontra-se no painel de aplicação das cargas (painel A), enquanto o nó B encontra-se no painel adjacente. As perturbações causadas pelo carregamento dinâmico ocorrem de forma mais crítica no painel de aplicação das cargas.

Observa-se também, que os valores das acelerações de pico obtidas nos nós A e B, aumentam na medida em que se aumenta o número de pessoas aplicadas sobre a estrutura, para todos os pisos estudados. Porém, não há diferenças significativas entre a aplicação de 9 pessoas e 12 pessoas, tanto para o nó A quanto para o nó B. Isso ocorre porque no caso da aplicação de 12 pessoas, não há uma pessoa aplicada exatamente no centro do painel A, Figura 4.4 (j). Já na configuração onde se aplicam 9 pessoas sobre o piso, Figura 4.4 (h), existe uma carga aplicada no centro do painel A. Entretanto, na medida em que a dimensão L_j aumenta, a diferença entre esses resultados fica maior, pois as cargas ficam mais distantes dos apoios, enquanto os pisos ficam mais flexíveis e, conseqüentemente mais suscetíveis ao aumento do carregamento.

As acelerações máximas obtidas da aplicação de 12 pessoas, para o nó A foram: 0,711m/s² para $L_j= 5,0\text{m}$; 0,638m/s² para $L_j= 6,0\text{m}$; 0,596m/s² para $L_j=7,0\text{m}$; 0,585m/s² para $L_j= 8,0\text{m}$; 2,704m/s² para $L_j= 9,0\text{m}$; 4,468m/s² para $L_j= 10,0\text{m}$. Para todos os pisos, essas acelerações de pico são superiores ao limite recomendado para áreas submetidas a atividades rítmicas.

Já as acelerações de pico obtidas no nó B da aplicação de 12 pessoas, foram: 0,615m/s² para $L_j= 5,0\text{m}$; 0,524m/s² para $L_j= 6,0\text{m}$; 0,457m/s² para $L_j=7,0\text{m}$; 0,405m/s² para $L_j= 8,0\text{m}$; 1,809m/s² para $L_j= 9,0\text{m}$; 0,528m/s² para $L_j= 10,0\text{m}$. Diante desses resultados somente os

pisos de 7,0m e 8,0m apresentam valores de acelerações de pico inferiores ao limite de conforto, os outros pisos ($L_j = 5,0\text{m}$, $6,0\text{m}$, $9,0\text{m}$ e $10,0\text{m}$) apresentam valores superiores ao limite de conforto para áreas submetidas a atividades rítmicas.

A Figura 5.17 e a Figura 5.18 apresentam os gráficos construídos com base nos valores das acelerações de pico apresentadas na Tabela 5.26 e Tabela 5.27, respectivamente, obtidas a partir da aplicação do modelo de carregamento II, ao longo da variação do vão L_j .

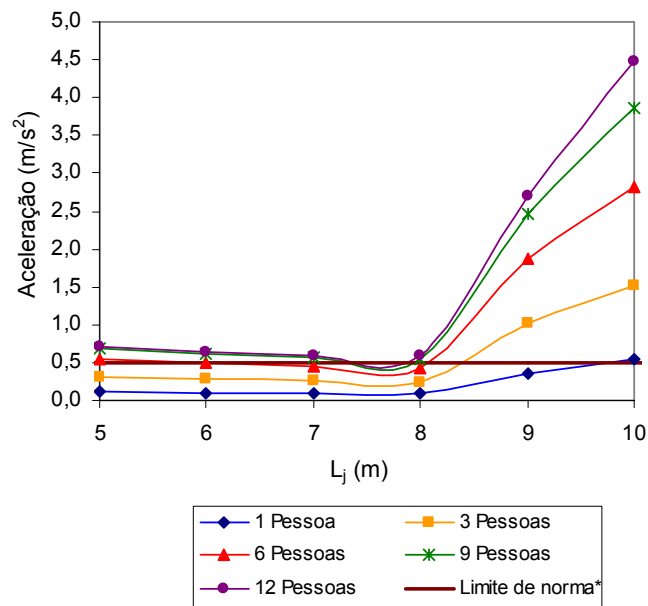


Figura 5.17 – Acelerações de pico no nó A, segundo a variação do vão L_j .

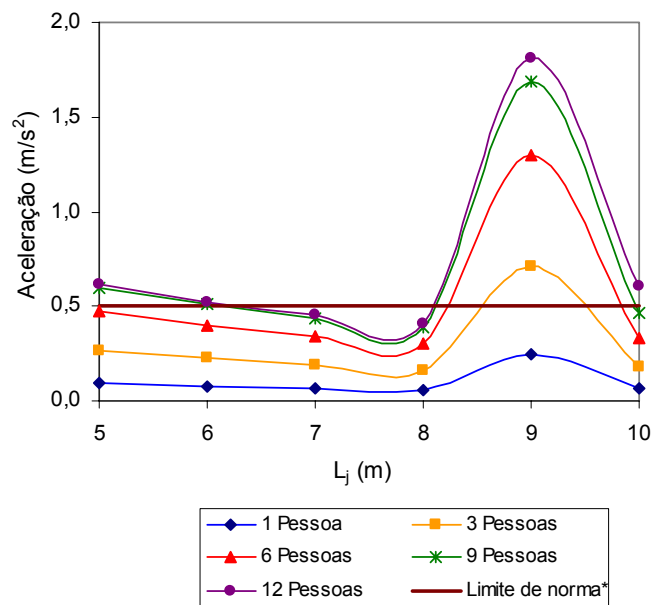


Figura 5.18 – Acelerações de pico no nó B, segundo a variação do vão L_j .

5.4.4.1 Respostas Dinâmicas no Pannel A

Nesta seção são comparados os valores para as acelerações de pico no nó A, provenientes das duas metodologias de carregamento no que diz respeito à atividade aeróbica. Ressalta-se que as acelerações de pico correspondentes ao modelo de carregamento I (MC-I), apresentadas nesta seção, foram obtidas com $T_c=0,25s$ e $T_s=0,10s$.

Os resultados estão apresentados em %g (g é a aceleração da gravidade e seu valor é igual a $9,81 \text{ m/s}^2$). Esses resultados são comparados com o limite de conforto humano para áreas submetidas a atividades rítmicas, que corresponde a $5,0\%g$.

Da Tabela 5.28 até a Tabela 5.33 são mostrados os resultados para o nó A, para todos os pisos, com L_j variando de 5,0 m a 10,0 m.

Tabela 5.28– Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 5,0 \text{ m}$.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g)	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	0,510	0,650	0,791	1,193	5,0
3	1,312	1,673	2,034	3,225	5,0
6	2,168	2,765	3,361	5,633	5,0
9	2,716	3,463	4,211	7,120	5,0
12	2,717	3,465	4,213	7,245	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.29 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 6,0 \text{ m}$.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g)	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	0,510	0,651	0,791	1,051	5,0
3	1,328	1,693	2,058	2,845	5,0
6	2,192	2,795	3,398	4,975	5,0
9	2,759	3,518	4,277	6,324	5,0
12	2,794	3,563	4,332	6,501	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.30 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 7,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g))	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	0,839	1,069	1,300	0,954	5,0
3	2,223	2,835	3,446	2,594	5,0
6	3,751	4,783	5,815	4,550	5,0
9	4,772	6,085	7,398	5,826	5,0
12	4,955	6,319	7,682	6,078	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.31 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 8,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g))	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	1,367	1,743	2,119	0,898	5,0
3	3,754	4,788	5,821	2,448	5,0
6	6,485	8,270	10,055	4,329	5,0
9	8,338	10,632	12,927	5,603	5,0
12	8,829	11,258	13,688	5,964	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.32 – Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 9,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g))	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	1,387	1,769	2,150	3,727	5,0
3	3,879	4,946	6,014	10,456	5,0
6	6,925	8,831	10,736	19,022	5,0
9	9,075	11,573	14,071	25,089	5,0
12	9,905	12,631	15,357	27,561	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

Tabela 5.33– Relação a_p/g no nó A, para $L_j = 10,0$ m.

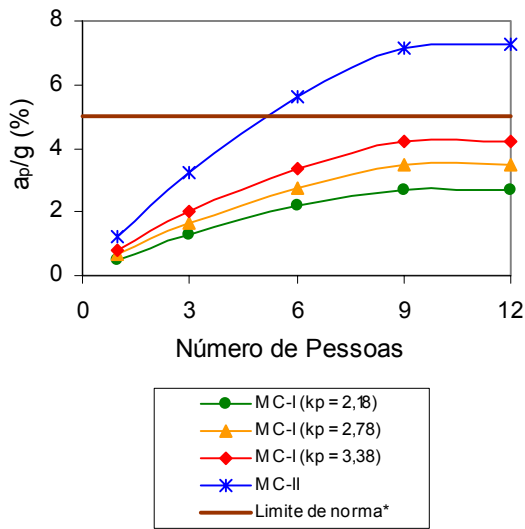
Nº Pessoas	a_p/g (%)			Limite recomendado* ISO [26], AISC [21] (%g)	
	MC-I				MC-II
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$		
1	1,152	1,469	1,787	5,509	5,0
3	3,229	4,117	5,006	15,461	5,0
6	5,890	7,511	9,132	28,833	5,0
9	8,034	10,245	12,456	39,338	5,0
12	9,306	11,867	14,429	45,548	5,0

* Limite recomendado em locais submetidos a atividades rítmicas.

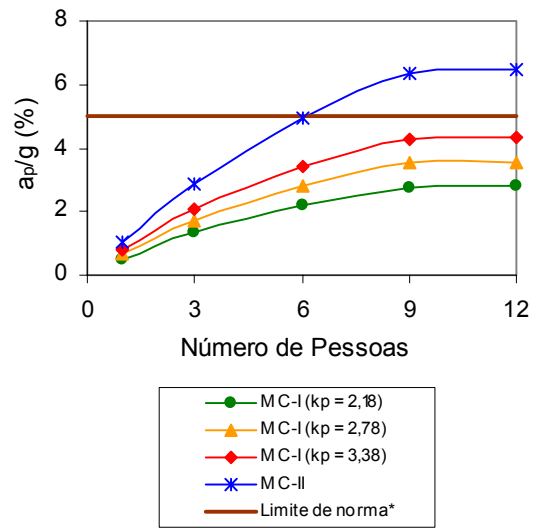
As relações a_p/g máximas obtidas no nó A, a partir da aplicação do modelo de carregamento I, correspondente a 12 pessoas e considerando o maior coeficiente de impacto ($K_p = 3,38$), foram: 4,213%g para $L_j = 5,0$ m; 4,332%g para $L_j = 6,0$ m; 7,682%g para $L_j = 7,0$ m; 13,688%g para $L_j = 8,0$ m; 15,357%g para $L_j = 9,0$ m; 14,429%g para $L_j = 10,0$ m. Para os pisos com $L_j = 7,0$ m, 8,0m, 9,0m e 10,0m, os resultados são superiores ao limite recomendado para áreas submetidas a atividades rítmicas, de 5%g. Para o piso com $L_j = 9,0$ m, o valor é aproximadamente três vezes maior que o limite recomendado. Para os pisos mais rígidos, com $L_j = 5,0$ m e 6,0m, os resultados não ultrapassaram o limite.

As relações a_p/g máximas obtidas a partir da aplicação do modelo de carregamento II correspondente a 12 pessoas, para o nó A foram: 7,245%g para $L_j = 5,0$ m; 6,501%g para $L_j = 6,0$ m; 6,078%g para $L_j = 7,0$ m; 5,964%g para $L_j = 8,0$ m; 27,561%g para $L_j = 9,0$ m; 45,548%g para $L_j = 10,0$ m. Para todos os pisos, estes resultados são superiores ao limite recomendado para áreas submetidas a atividades rítmicas, de 5%g, sendo que para o piso mais flexível ($L_j = 10,0$ m), o resultado chega a ser nove vezes maior que o limite recomendado.

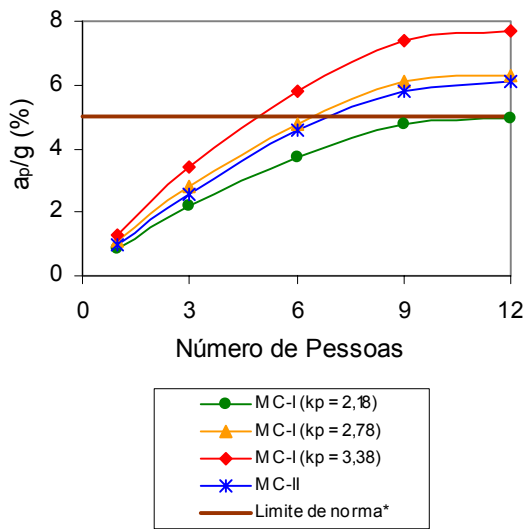
A seguir, a Figura 5.20 (a até f), apresenta os resultados da relação a_p/g no nó A para cada piso. São apresentadas as curvas dos resultados obtidos com a aplicação dos dois modelos de carregamentos, assim como a curva referente ao limite recomendado pela norma [26].



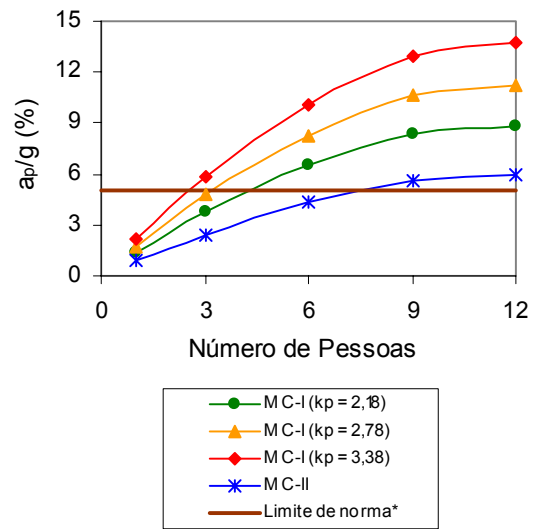
a) $L_j = 5,0m$



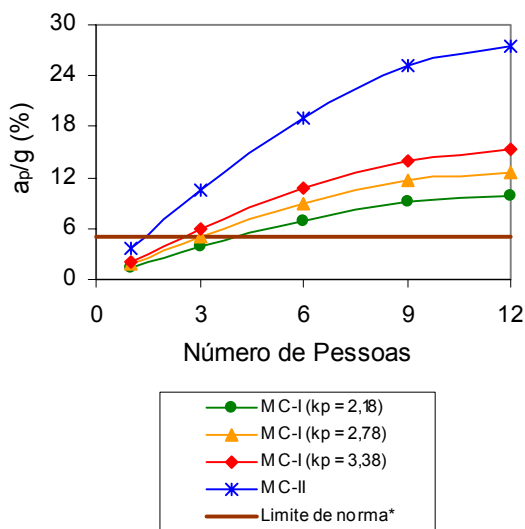
b) $L_j = 6,0m$



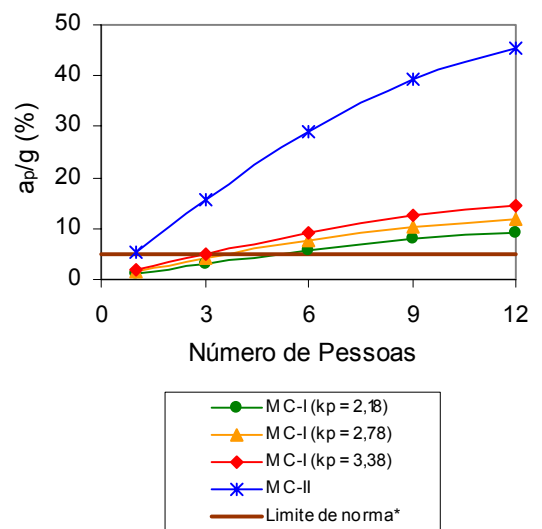
c) $L_j = 7,0m$



d) $L_j = 8,0m$



e) $L_j = 9,0m$



f) $L_j = 10,0m$

Figura 5.20 – Relação a_p/g no nó A.

Verifica-se que, para os pisos com L_j igual 5,0m e 6,0m, todos os resultados obtidos com o modelo de carregamento I, ficaram abaixo do limite de norma ($5,0\%g$), inclusive considerando as variações de K_p . Para o modelo de carregamento II o resultado do piso com L_j igual 5,0m superou o limite já a partir de 6 pessoas e para o piso com L_j igual 6,0m, o limite foi ultrapassado a partir de 9 pessoas. Percebe-se ainda, que para os pisos com L_j igual 5,0m e 6,0m, todos os resultados obtidos com o modelo de carregamento II são superiores aos obtidos com o modelo de carregamento I.

Para o piso com L_j igual 7,0m, os resultados obtidos com o modelo de carregamento I, foram superiores aos resultados do modelo de carregamento II, para o K_p médio e o K_p mais o desvio-padrão. Esses valores superaram o limite da norma, a partir de 9 pessoas.

Para o piso com L_j igual 8,0m, os resultados obtidos com o modelo de carregamento I, foram todos superiores aos resultados do modelo de carregamento II, inclusive considerando as variações de K_p , e superaram o limite da norma de $5,0\%g$, a partir de 6 pessoas aplicadas. Enquanto que para o modelo de carregamento II, os resultados ultrapassaram o limite proposto, a partir da aplicação de 9 pessoas.

Os resultados dos pisos com L_j igual 7,0m e 8,0m contrariam a tendência dos outros pisos, que apresentaram resultados do modelo de carregamento II sempre superiores aos resultados do modelo de carregamento I. Mas, como citado anteriormente, a interação entre a excitação proveniente do MC-II e as características dinâmicas desses modelos (frequências naturais e modos de vibração), não levou ao aumento das acelerações de pico.

Já os resultados dos pisos com L_j igual 9,0m e 10,0m, a partir da aplicação do modelo de carregamento II, superaram bastante os resultados obtidos com o modelo de carregamento I. Porém, as duas metodologias de carregamento ultrapassaram o limite da norma de $5,0\%g$, a partir de 6 pessoas aplicadas sobre o piso.

Os resultados encontrados para as acelerações são, de fato, preocupantes. Para os pisos mais flexíveis, ($L_j = 8,0m$ a $10,0m$), o critério de conforto já é ultrapassado a partir da aplicação de 6 pessoas sobre o piso.

5.4.4.2 Respostas Dinâmicas no Painel B

Nesta seção, são apresentados os valores das acelerações de pico no nó B, provenientes das duas metodologias de carregamento. Os resultados são apresentados em %g (g é a aceleração da gravidade). Esses resultados estão apresentados da Tabela 5.34 até a Tabela 5.39, ao longo da variação da dimensão L_j .

Também estão relacionados nessas tabelas os limites de conforto para dois tipos de ocupações, sendo que o limite de 1,5%g está relacionado à ambientes de lojas, restaurantes e passarelas internas e o limite de 0,5%g, está relacionado a áreas de escritórios e residências.

Tabela 5.34 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 5,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)				Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I			MC-II		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,240	0,306	0,372	0,943	1,5	0,5
3	0,700	0,892	1,085	2,703	1,5	0,5
6	1,214	1,549	1,883	4,849	1,5	0,5
9	1,505	1,920	2,334	6,116	1,5	0,5
12	1,519	1,937	2,355	6,266	1,5	0,5

** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

Tabela 5.35 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 6,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)				Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I			MC-II		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,277	0,354	0,430	0,791	1,5	0,5
3	0,803	1,024	1,245	2,272	1,5	0,5
6	1,395	1,780	2,164	4,081	1,5	0,5
9	1,747	2,228	2,709	5,179	1,5	0,5
12	1,777	2,266	2,755	5,342	1,5	0,5

** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

Tabela 5.36– Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 7,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)				Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I			MC-II		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,347	0,443	0,539	0,676	1,5	0,5
3	0,995	1,269	1,543	1,948	1,5	0,5
6	1,739	2,218	2,696	3,507	1,5	0,5
9	2,206	2,813	3,420	4,478	1,5	0,5
12	2,284	2,913	3,542	4,661	1,5	0,5

** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

Tabela 5.37– Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 8,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)				Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I			MC-II		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,697	0,889	1,081	0,584	1,5	0,5
3	2,033	2,593	3,153	1,687	1,5	0,5
6	3,554	4,532	5,510	3,049	1,5	0,5
9	4,488	5,724	6,959	3,920	1,5	0,5
12	4,624	5,897	7,170	4,125	1,5	0,5

** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

Tabela 5.38 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 9,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)				Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I			MC-II		
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,778	0,992	1,206	2,519	1,5	0,5
3	2,194	2,798	3,402	7,261	1,5	0,5
6	3,905	4,979	6,054	13,211	1,5	0,5
9	5,130	6,542	7,954	17,178	1,5	0,5
12	5,654	7,211	8,767	18,442	1,5	0,5

** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

Tabela 5.39 – Relação a_p/g no nó B, para $L_j = 10,0$ m.

Nº Pessoas	a_p/g (%)			MC-II	Limite recomendado** ISO [26], AISC [21] (%g)	Limite recomendado*** ISO [26], AISC [21] (%g)
	MC-I					
	$K_p = 2,18$	$K_p = 2,78$	$K_p = 3,38$			
1	0,619	0,789	0,959	0,649	1,5	0,5
3	1,816	2,316	2,816	1,876	1,5	0,5
6	3,194	4,073	4,952	3,421	1,5	0,5
9	4,054	5,169	6,285	4,689	1,5	0,5
12	4,220	5,381	6,543	6,148	1,5	0,5

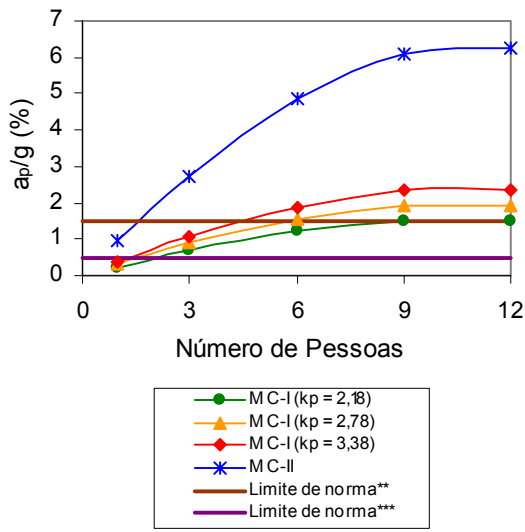
** Limite recomendado para área de lojas, restaurantes e passarelas internas.

*** Limite recomendado para área de escritórios e residências.

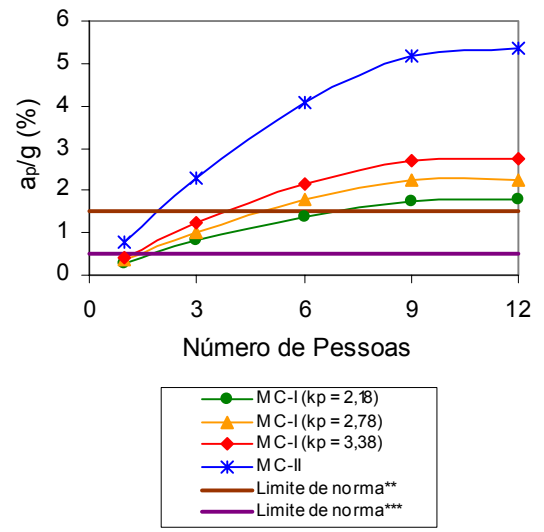
As porcentagens máximas das acelerações obtidas no nó B, a partir da aplicação do modelo de carregamento I correspondente a 12 pessoas e considerando o maior coeficiente de impacto ($K_p = 3,38$), foram: 2,355%g para $L_j = 5,0$ m; 2,755%g para $L_j = 6,0$ m; 3,542%g para $L_j = 7,0$ m; 7,170%g para $L_j = 8,0$ m; 8,767%g para $L_j = 9,0$ m; 6,543%g para $L_j = 10,0$ m. Em todos esses resultados, a relação a_p/g é superior ao limite recomendado para áreas de escritórios e residências (0,5%g), e para áreas de lojas, restaurantes e passarelas internas (1,5%g).

As porcentagens máximas das acelerações obtidas da aplicação do modelo de carregamento II correspondente a 12 pessoas, para o nó B foram: 6,266%g para $L_j = 5,0$ m; 5,342%g para $L_j = 6,0$ m; 4,661%g para $L_j = 7,0$ m; 4,125%g para $L_j = 8,0$ m; 18,442%g para $L_j = 9,0$ m; 6,148%g para $L_j = 10,0$ m. Esses resultados também são superiores ao limite recomendado para áreas de escritórios e residências (0,5%g), e também para áreas de lojas, restaurantes e passarelas internas (1,5%g).

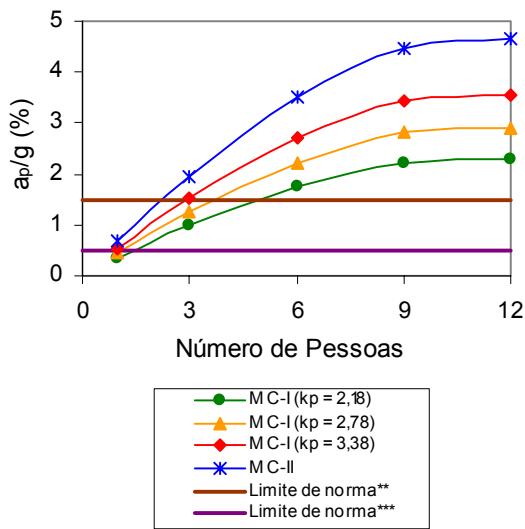
A Figura 5.21 (a até f), apresenta as curvas da relação a_p/g (%) em função do número de pessoas para cada piso. São também traçadas as curvas dos limites recomendados pela norma [26] ao conforto humano nas diferentes condições de utilização.



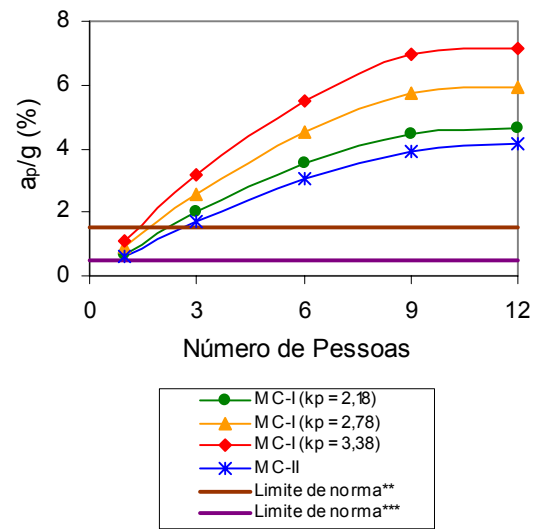
a) $L_j = 5,0m$



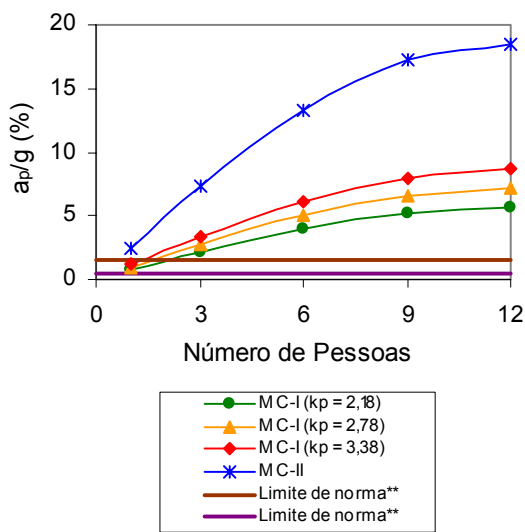
b) $L_j = 6,0m$



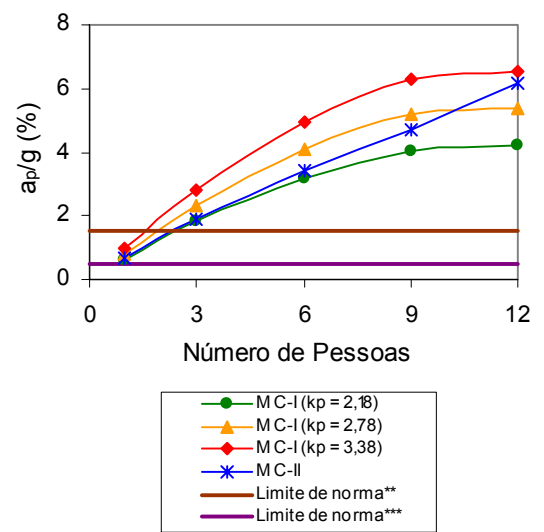
c) $L_j = 7,0m$



d) $L_j = 8,0m$



e) $L_j = 9,0m$



f) $L_j = 10,0m$

Figura 5.21 – Relação a_p/g para os pisos no nó B.

Verifica-se que para os três primeiros pisos, ou seja, L_j igual 5,0m, 6,0m e 7,0m, todos os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de carregamento II, foram bastante superiores ao modelo de carregamento I, mostrando-se mais conservador na avaliação dos pisos. Além disso, os resultados do modelo de carregamento II, ultrapassam os dois limites da norma, de 1,5%g e de 0,5%g, já a partir de 3 pessoas aplicadas.

Em se tratando ainda dos três primeiros pisos, os resultados do modelo de carregamento II, foram superiores ao limite de norma de 0,5%g já a partir da aplicação de 3 pessoas, para todos os pisos, inclusive considerando as variações de K_p . Já com relação ao outro limite proposto, de 1,5%g, os resultados variam para cada piso e para cada valor de K_p .

Para o piso com L_j igual 7,0m, os resultados obtidos com o modelo de carregamento I, também foram superiores aos resultados da outra metodologia de carregamento para toda a faixa de valores de K_p . Esses resultados, provenientes das duas metodologias de carregamento, superaram os dois limites da norma a partir de 6 pessoas aplicadas.

Já para o piso com L_j igual 8,0m, os resultados obtidos com o modelo de carregamento I, foram todos superiores aos resultados da outra metodologia, inclusive considerando as variações de K_p . Esse resultado, assim como no nó A, contraria a tendência dos outros pisos, que apresentaram resultados do modelo de carregamento II sempre superiores aos resultados do modelo de carregamento I. Mas, como visto anteriormente, o aumento da dimensão L_j dos pisos não implica necessariamente no aumento das acelerações de pico. Vale ressaltar que os resultados de ambos os modelos de carregamento, superaram os dois limites da norma de 0,5%g e 1,5%g a partir de 3 pessoas aplicadas.

Os resultados para o piso com L_j igual 9,0m, obtidos com o modelo de carregamento II, superaram bastante os resultados obtidos pelo modelo de carregamento I, chegando a ser três vezes maior que o máximo obtido com o modelo de carregamento I. Porém todos, ultrapassaram os dois limites de norma a partir de 3 pessoas aplicadas. Esses resultados mostram que a transmissão das perturbações geradas em um piso próximo é de fato significativa e demanda preocupação.

Os resultados para o piso com L_j igual a 10,0m, são maiores com a aplicação do modelo de carregamento I. Entretanto todos, ultrapassam os dois limites de conforto já a partir de 3 pessoas.

Em geral, as respostas demonstram que as perturbações causadas pela aplicação de cargas rítmicas em painéis próximos, são preocupantes. Mesmo considerando diferentes

tipos de ocupações, os limites de conforto são facilmente ultrapassados, alguns, a partir de 6 pessoas aplicadas e outros a partir de 3 pessoa aplicadas.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

6.1 Introdução

Este trabalho buscou avaliar o comportamento de pisos mistos em aço e concreto, quando submetidos a carregamentos dinâmicos provenientes das atividades humanas rítmicas, como a ginástica aeróbica e os saltos à vontade. Para isso, foram apresentadas duas propostas de carregamentos, a fim de representar de forma realista as cargas em estudo. O primeiro modelo de carregamento utiliza uma função matemática que incorpora parâmetros obtidos experimentalmente [9], que levam em consideração os efeitos de multidão. O outro modelo de carregamento utiliza outra função matemática que incorpora parâmetros reconhecidos pela literatura internacional [21]. As análises numéricas foram realizadas por meio do programa computacional Ansys [27], através do método dos elementos finitos.

6.2 Conclusões Obtidas ao Longo do Trabalho

São apresentados a seguir, os resultados alcançados com as análises dinâmicas realizadas, de acordo com a metodologia da análise proposta.

6.2.1 Modelagem Computacional

- **Variação do vão das vigas secundárias:**

Percebe-se através dos resultados obtidos com a análise de autovalores (frequências naturais), que o aumento do vão das vigas secundárias leva à diminuição das frequências naturais. Tal fato era esperado visto que, o simples aumento dos vãos das vigas, sem modificar outras características estruturais, faz com que a rigidez das vigas diminua, tornando os pisos mais flexíveis, e portanto, mais susceptíveis a vibrações.

Percebe-se também, que o aumento da dimensão das vigas secundárias não leva, necessariamente, ao aumento das acelerações de pico. Isso foi verificado nos resultados das acelerações a partir da aplicação das duas metodologias de carregamento.

- **Condições dos apoios:**

Percebe-se que as condições de apoio dos modelos influenciam bastante nos resultados das frequências naturais dos pisos. O modelo computacional que considera engastes como apoios das vigas apresentou frequências naturais muito maiores que os outros modelos. Em contrapartida, o modelo computacional que considera apoios do segundo gênero, apresentou os menores valores de frequências naturais.

Já a modelagem das colunas teve grande influência nos resultados obtidos das frequências naturais, mas não modificou significativamente os modos de vibração. Os modelos computacionais que incorporam as colunas geraram valores de frequências naturais intermediários entre o modelo rotulado e o modelo engastado. Considera-se, então, que a modelagem das colunas nos sistemas estruturais representa melhor uma estrutura real. Percebe-se que o tipo de ligação exerce grande influência nas respostas dinâmicas.

6.2.2 Comparação entre as Metodologias de Carregamentos

Em se tratando da comparação entre as duas metodologias de carregamentos, em grande parte dos resultados encontrados utilizando o modelo de carregamento II, as acelerações máximas foram superiores aos resultados obtidos utilizando o modelo de carregamento I. Isso porque a metodologia do modelo de carregamento II, que utiliza uma série de Fourier com os parâmetros propostos por Murray *et al.* [21], visa provocar a condição de ressonância nos pisos. Já a metodologia do modelo de carregamento I utiliza o CD (coeficiente de defasagem), que considera o grau de sincronismo entre as pessoas. Na maioria dos casos, os resultados mostraram que a análise na ressonância é mais conservadora, pois levou a valores de acelerações de pico bem superiores aos resultados alcançados com o modelo de carregamento I. Na prática, a condição de ressonância pode não chegar a ocorrer devido a influência de fatores externos, por isso o modelo de carregamento I fornece uma proposta mais econômica e, dependendo de cada caso, mais realista na avaliação de sistemas estruturais.

No que tange às acelerações de pico, tanto para os resultados obtidos com ao modelo de carregamento I, quanto para os resultados obtidos com o modelo de carregamento II, o aumento do vão não leva necessariamente ao aumento das acelerações. Isso porque se considera uma interação entre a excitação e as características dinâmicas dos modelos estruturais analisados, ou seja, a influência de outros harmônicos, tanto para o modelo de carregamento I quanto para o modelo de carregamento II, podem influenciar outros modos de vibração dos pisos.

Além disso, a partir dos gráficos das acelerações de pico ao longo da variação do vão das vigas secundárias correspondente ao modelo de carregamento I, percebe-se pouca dispersão dos resultados das acelerações, tanto para o painel de aplicação das cargas, quanto para o painel adjacente. Mas não houve, necessariamente, o crescimento das acelerações de pico com o aumento dos vãos.

Já as acelerações de pico devido à aplicação do modelo de carregamento II, apresentaram variações marcantes ao longo da variação do vão, com grande dispersão dos resultados, tanto para o painel de aplicação das cargas, quanto para o painel adjacente. Não ocorrendo, necessariamente, o crescimento das acelerações de pico com o aumento dos vãos.

6.2.3 Análise do Conforto Humano

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram que pisos mistos em aço e concreto, quando submetidos a atividades rítmicas, são levados a níveis de acelerações bastante altos. Com base em limites estabelecidos por norma [26], estes resultados apontam que os limites de conforto humano são ultrapassados em muitos casos e podem, de fato, comprometer a aceitabilidade desses pisos.

Verifica-se que as acelerações de pico obtidas no painel de aplicação são, em muitos casos, superiores ao limite proposto por recomendações internacionais onde o nível de aceitação de vibrações é maior. Verifica-se também, que a atuação dessas cargas gera perturbações bastante significativas em pisos adjacentes. É importante ressaltar que a influência causada por cargas dinâmicas em ambientes próximos pode comprometer o conforto humano, dependendo do tipo de ocupação a que se destina. Na maioria dos casos, os resultados provenientes de ambas as metodologias de carregamento ultrapassaram os limites propostos, inclusive para diferentes tipos de ocupação, antes mesmo de chegar à aplicação de 12 pessoas.

Outro ponto importante das análises é o número de pessoas atuando sobre a estrutura. Sabe-se que o número de pessoas praticando atividades aeróbicas pode ser maior que 12 pessoas. Um número maior de pessoas pode levar a níveis de acelerações ainda maiores, podendo não só comprometer os critérios de conforto, como também a segurança da estrutura. Além disso, a relação de distribuição das pessoas sobre o piso adotada neste trabalho foi de 0,25 pessoas/m², que significa 1 pessoa em 4,0 metros quadrados. Numa situação real essa distribuição de pessoas pode ser maior e, podendo inclusive gerar níveis de acelerações mais críticos.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar testes experimentais, que tornariam possível a comparação dos resultados numéricos, em termos dos deslocamentos, velocidades e acelerações com os valores obtidos experimentalmente, a fim de validar as análises obtidas nesse trabalho.
- Modelar a carga levando em consideração a variação da posição, estabelecendo traçados para caracterizar cada atividade. Isso porque as atividades estudadas nessa pesquisa também podem ter essa característica.
- Variar outros parâmetros do carregamento como o período de contato, o período sem contato, o coeficiente de impacto, além do número de pessoas aplicadas.
- Verificar a influência de outros parâmetros como a rigidez das vigas e a rigidez da ligação viga-pilar.
- Analisar modelos com a incorporação de dispositivos passivos de controle de amortecimento e verificar como eles modificam a resposta da estrutura, em termos das frequências naturais.
- Modelar diferentes sistemas estruturais através da incorporação de outros painéis de laje, com diferentes concepções. Como exemplo, pode-se citar, sistemas de pisos com mais de um andar.
- Analisar os modelos numéricos no domínio da frequência.

Referências Bibliográficas

1. ALLEN, D.E., RAINER, J.H., PERNICA, G., **Vibration Criteria for Assembly Occupancies**, Canadian Journal of Civil Engineering, v. 12, Nº 3, Abr, pp. 617-623, 1985.
2. EBRAHIMPOUR, A.; SACK, R. L., **Modeling Dynamic Occupant Loads**, ASCE Journal of Structural Engineering, v. 115, n. 6, pp. 1476 – 1495, 1989.
3. EBRAHIMPOUR, A.; SACK, R. L., **Design Live Load for Coherent Crowd Harmonic Movements**, ASCE Journal of Structural Engineering, v.118, n.4, pp. 1121 – 1136, 1992.
4. BACHMANN, H. – **Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations** – Journal of Structural Engineering, Vol.118, Nº.3, 631-647, March, 1992.
5. JI, T.; ELLIS, B. R., **Floor Vibration Induced by Dance-Type Loads: Theory and Verification**, The Structural Engineer, v. 72, n. 3 (Fev), pp. 37-50, 1994.
6. EBRAHIMPOUR, A. *et al*, **Measuring and Modeling Dynamic Loads Imposed by Moving Crowds**, ASCE Journal of Structural Engineering, v. 122, n.12, pp. 1468 – 1474, 1996.
7. ALVES, N. K. C., **Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento**, 97f. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
8. CEB – Comité Euro-International du Béton, **Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines**, Bullitin d'information, n. 209, 1991.
9. FAISCA, R. G., **Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas**, 230f. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
10. REIHER, H. E, MEISTER, F. J., **The Effect of Vibration on people**. Traduzido da Forsch Geb, p 381-386, Ohio, 1946.
11. WISS, J. F., PARMALEE, R. A. **Human Perception of Transient Vibration**. In: Journal of the Structural Division, v. 100, nº ST4, ASCE, p. 773-787, 1974.
12. MURRAY, T. M., **Design to Prevent Floor vibration**. In: Engineering Journal, v. 12, nº. 3, p. 82-87, 1975.
13. ALLEN, D.E., RAINER, J.H., **Vibration Criteria for Long Span Floors**, Canadian Journal of Civil Engineering, The National Research Council of Canada, Vol. 3, No. 2, Jun., 1976.
14. ALLEN, D. E.; RAINER J.H., **CBD – 173 Floor Vibration** – Canadian Building Digest. Disponível em: <www.nrc.ca/irc/cbd/cbd173e.html>. Acesso em: 26 Jun. 2006.

15. ALLEN, D. E., **Floor Vibrations from Aerobics**, Canadian Journal of Civil Engineering, v. 17, n. 5, pp. 771-779, 1990.
16. LENZEN, K. H., **Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors**. In: Engineering journal, v. 3(3), p. 133-136, 1996.
17. VECCI, M. A. M., FAKURY, R. H., MAGALHÃES, M. C., **Análise do Comportamento Dinâmico de Pisos Metálicos Submetidos a Excitações Rítmicas** – Anais do II Simpósio de Mecânica Computacional, Ouro Preto, 1998.
18. DE PAULA, F.A., QUEIROZ, G., **Uso do MEF na Adaptação de uma Estrutura para Resistir a Solicitações Oriundas de Atividades Rítmicas** – Anais do II Simpósio de Mecânica Computacional, Ouro Preto, 1998.
19. MELLO, A. V. A., **Vibrações em Pisos de Edificações Induzidas por Atividades Humanas**, Tese de M.Sc., UERJ, Rio de Janeiro, 2005.
20. GAMA, C. D., PANEIRO, G., **A Incomodidade Humana Perante As Vibrações e sua Caracterização Absoluta e Relativa**, Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal. Disponível em: <cegeo.ist.utl.pt/html/publicações.shtml>. Acesso em: 26 Jan. 2007.
21. MURRAY T. M., ALLEN D. E., UNGAR E. E., **Floor Vibration Due to Human Activity**, *Steel Design Guide Series*, nº 11, AISC, Chicago, 1989.
22. VARELA, W. D., **Modelo Teórico-Experimental para Análises de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios**, 309f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
23. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto**, 2003.
24. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800 – Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios - Projeto de Revisão**, Rio de Janeiro, Setembro de 2006.
25. International Standard Organization. **ISO 2631/1: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration – Part 1: General Requirements**, Switzerland, 1985.
26. International Standard Organization. **ISO 2631-2: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Part 2: Human Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings (1 to 80Hz)**, Switzerland, 1989.
27. ANSYS, Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 5.5, Basic analysis procedures, Second edition, 1998.

28. HAMILL, J., KNUTZEN, K. M., **Biomechanical Basis of Human Movement**, Lippincott Williams & Wilkins, USA, 1999.
29. BRIGHAM, E. O., **The Fast Fourier Transform and its Applications**, Prentice-Hall International Editions, USA, 1988.
30. BACHMANN, H., AMMANN, W., **Vibration in Structures Induced by Man and Machines**, Structural Engineering Document n^o. 3e, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, Zürich, Switzerland, 1987.
31. DE CARVALHO, F. W. L., **Procedimento Experimental para Avaliação do Fator de Amortecimento em Estruturas**, Tese de M.Sc., UFMG, Minas Gerais, 2002.
32. CLOUGH, R. W. e PENZIEN, J., **Dynamics of Structures**, McGraw-Hill, Auckland, 1975.