



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Sidlei Gomes Gonçalves

**Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto)
submetidos a ações humanas rítmicas**

Rio de Janeiro

2011

Sidclei Gomes Gonçalves

**Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto)
submetidos a ações humanas rítmicas**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.



Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva
Coorientadores: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof. Dr. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

G635 Gonçalves, Sidclei Gomes.
Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto)
submetidos a ações humanas rítmicas / Sidclei Gomes
Gonçalves. – 2011.
92f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva
Coorientador(es): Luciano Rodrigues Ornelas de Lima,
Sebastião Arthur Lopes de Andrade.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Pisos de concreto - Dissertações. 2.
Pisos de aço - Dissertações. I. Silva, Luciano Rodrigues Ornelas
de. II. Universidade do Estado do Rio. III. Título.

CDU 692.522

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Sidclei Gomes Gonçalves

Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 21 de Dezembro de 2011.

Banca Examinadora:



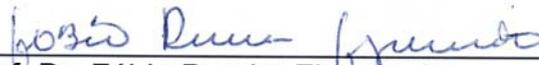
Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



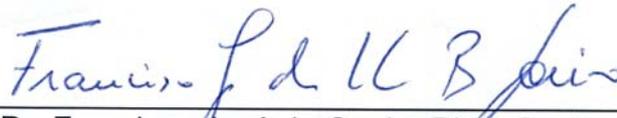
Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Coorientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Sebastião Arthur Lopes de Andrade (Coorientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Fábio Pereira Figueiredo
Pesquisador do Laboratório de Tecnologia em Computação Gráfica -
TECGRAF/PUC-Rio



Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2011

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais essa vitória, a minha esposa pela paciência, carinho e dedicação, aos meus pais, meus irmãos, a minha família e amigos, que sempre acreditaram e torceram por mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que está sempre presente nos dando a coragem, a força e a fé para continuar. A toda minha família, aos meus pais e irmãos, que sempre se faz presente pela preocupação demonstrada e torcida para êxito nesta jornada.

A minha esposa e ao meu filho, pela paciência, carinho e compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, pela confiança dedicada e principalmente paciência e dedicação desde a minha admissão no Programa, participante dos momentos mais difíceis ao longo da minha jornada.

Aos meus professores co-orientadores, Professor Luciano e Professor Sebastião, pela amizade dispensada, desde a graduação, seus conselhos e ensinamentos e por estarem sempre prestativos a solucionar os problemas encontrados.

Aos professores, funcionários e estagiários do programa de pós-graduação em engenharia civil, PGECIV, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, em especial ao professor Francisco Soeiro pelo aprendizado e tempo dispensados e ao técnico Rodolfo, que sempre me ajudou quando precisei.

Aos amigos e companheiros de mestrado, Gilvan, Elvis, Tassiana Duarte, Marcelo e Feitosa (General), que compartilharam momentos difíceis de muito trabalho e solidariedade.

A todos aqueles, que de forma direta ou indireta, contribuíram para a execução deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo, não precisa temer o resultado de cem batalhas. Se você se conhece mas não conhece o inimigo, para cada vitória ganha sofrerá também uma derrota. Se você não conhece nem o inimigo nem a si mesmo, perderá todas as batalhas.

Sun Tzu

RESUMO

Gonçalves, Sidclei Gomes. *Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Atualmente, o crescimento dos problemas de vibrações excessivas sobre pisos mistos (aço-concreto) tem conduzido à necessidade de desenvolvimento de critérios específicos para projetos estruturais submetidos à ação de atividades humanas rítmicas. Com base no desenvolvimento desta dissertação de mestrado, objetiva-se, principalmente, verificar a influência das ligações estruturais (ligações viga-viga), sobre a resposta dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) de edificações, quando submetidos a cargas dinâmicas humanas rítmicas. Deste modo, o carregamento dinâmico empregado para a simulação das atividades humanas sobre o modelo estrutural investigado foi obtido através de testes experimentais com indivíduos praticando atividades rítmicas e não rítmicas. O modelo analisado nesta dissertação corresponde a um piso misto (aço-concreto) com uma área total de 1600m^2 e consiste de um ambiente onde serão desenvolvidas atividades de ginástica aeróbica. O sistema estrutural é constituído por lajes de concreto armado apoiadas sobre vigas de aço, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto (aço-concreto) com interação total. A metodologia de análise desenvolvida emprega técnicas usuais de discretização presentes no método dos elementos finitos, com base no emprego do programa ANSYS. A modelagem do sistema contempla ligações estruturais do tipo rígidas, semirrígidas e flexíveis. Os valores das acelerações de pico foram comparados com os limites recomendados por normas de projeto, baseando-se em critérios de conforto humano. As conclusões alcançadas ao longo deste trabalho de pesquisa revelam que as ligações estruturais do tipo viga-viga não apresentam influência significativa, no que diz respeito a resposta dinâmica não-linear da estrutura. Por outro lado, as acelerações de pico obtidas com base na análise dinâmica não-linear apresentam valores elevados indicando que o piso misto (aço-concreto) investigado apresenta problemas de vibração excessiva inerentes ao conforto humano.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto); Análise dinâmica não-linear; Ligações Viga-Viga; Atividades humanas rítmicas; Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Nowadays, the increasing incidence of composite (steel-concrete) floors vibration problems due to human rhythmic activities led to a specific design criteria to be addressed in structural design. The main objective of this investigation is to evaluate the influence of the structural connections (beam-to-beam connections) on the composite floors nonlinear dynamic response, when submitted to human rhythmic dynamic loads. The dynamic loads were obtained through experimental tests with individuals carrying out rhythmic and non-rhythmic activities. The investigated structural model was based on building composite floors and consisted of a typical office building interior bay with a total area of 1600m² used for aerobics. The structural system are composed of a composite (steel-concrete) solution made of an "I" steel profile and a reinforced concrete slab. In this investigation a complete interaction between the concrete slab and steel beams was considered. The proposed analysis methodology adopted the usual mesh refinement techniques present in the finite element method simulations implemented in the ANSYS program. The structural system finite element modelling have considered rigid, semi-rigid and pinned beam-to-beam joints. The peak accelerations were compared with limits proposed by design codes and recommendations, based on human comfort criteria. The results obtained in this investigation indicated that the structural connections (beam-to-beam connections) can have a relevant influence on the composite floor nonlinear dynamic response. On the other hand, the peak accelerations obtained in this investigation, based on a nonlinear dynamic analysis, indicated that the investigated composite floor violated the human comfort criteria, as well as its vibration serviceability limit states.

Keywords: Composite (steel-concrete) floors; Non-linear dynamic analysis; Beam-to-beam connections; Human rhythmic activities; Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de exercício de ginástica aeróbica [2].	14
Figura 2 – Exemplo de exercício de saltos à vontade [1].	15
Figura 3 – Escala modificada de Reiher - Meister [17].	20
Figura 4 – Critério de conforto para vibração em pisos.	21
Figura 5 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning	27
Figura 6 – Intervalos de tempo da função adotada.	28
Figura 7 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas	29
Figura 8 – Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica	31
Figura 9 – Planta baixa do piso misto (aço-concreto) investigado. Cotas em (mm) [6]	34
Figura 10 – Planta baixa genérica do pavimento do piso em estudo.	35
Figura 11 – Seção transversal genérica do pavimento do piso em estudo.	35
Figura 12 – Curva momento versus rotação das ligações viga-viga (semirrígidas)	36
Figura 13 – Setores de carregamento (A X B)	37
Figura 14 – Casos de carregamento e pontos de análise	38
Figura 15 – Distribuição do modelo de carregamento (caso I - cotas em metro)	41
Figura 16 – Distribuição do modelo de carregamento (caso II - cotas em metro)	42
Figura 17 – Distribuição do modelo de carregamento (caso III - cotas em metro)	43
Figura 18 – Distribuição do modelo de carregamento (caso IV - cotas em metro)	44
Figura 19 – Distribuição do modelo de carregamento (caso V - cotas em metro)	45
Figura 20 – Distribuição do modelo de carregamento (caso VI - cotas em metro)	46
Figura 21 – Distribuição do modelo de carregamento (caso VII - cotas em metros)	46
Figura 22 – Elemento BEAM 44 [3]	47
Figura 23 – Elemento SHELL 63 [3]	48
Figura 24 – Elemento COMBIN7 [3]	48
Figura 25 – Elemento COMBIN39 [3]	49
Figura 26 – Excentricidade entre a laje e a viga [4]	49
Figura 27 – Malhas de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural I (rígido)	51

Figura 28 – Malha de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural II (rígido).....	52
Figura 29 – Malha de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural III (rígido).....	52
Figura 30 – Curvas de frequências do Modelo I.....	57
Figura 31 – Curvas de frequências do Modelo II.....	58
Figura 32 – Curvas de frequências do Modelo III.....	58
Figura 33 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural I: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis.....	60
Figura 34 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural II: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis.....	61
Figura 35 – Modos de vibração do modelo estrutural II: ligações semirrígidas.....	62
Figura 36 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural III.	63
Figura 37 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Rígido	68
Figura 38 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Semirrígido	69
Figura 39 – Deslocamentos e acelerações. (Nó B – Figura 16). Semirrígido.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências naturais mínimas recomendadas por Bachmann [8].....	18
Tabela 2 – Frequência natural mínima requerida por Allen, Rainer e Pernica [19]..	21
Tabela 3 – Parâmetros experimentais utilizados por Faisca [13]	28
Tabela 4 – Valores de CD Faisca [13]	30
Tabela 5 – Propriedades geométricas dos perfis de aço.	36
Tabela 6 - Frequências naturais do Modelo Estrutural I.....	56
Tabela 7 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II.....	56
Tabela 8 - Frequências naturais do Modelo Estrutural III.....	56
Tabela 9 - Acelerações de pico. Caso de carregamento I. Ginástica aeróbica	73
Tabela 10 - Acelerações de pico. Caso de carregamento II. Ginástica aeróbica	73
Tabela 11 - Acelerações de pico. Caso de carregamento III. Ginástica aeróbica	74
Tabela 12 - Acelerações de pico. Caso de carregamento IV. Ginástica aeróbica.....	74
Tabela 13 - Acelerações de pico. Caso de carregamento V. Ginástica aeróbica.....	75
Tabela 14 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI.	77
Tabela 15 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI	77
Tabela 16 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI	77
Tabela 17 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI	78
Tabela 18 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI	78
Tabela 19 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI	78
Tabela 20 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	79
Tabela 21 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	79
Tabela 22 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	79
Tabela 23 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	80
Tabela 24 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	80
Tabela 25 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
a_{lim}	Aceleração limite
a_p	Aceleração de pico
a_p/g	Razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade
CD	Coeficiente de defasagem
CEB	Committee Europeau du Béton
cm	Centímetro
cos	Cosseno
E_{qs}	Equações
f(Hz)	Frequência em hertz
f	Frequência de excitação
f_n	Frequência natural
f_{crit}	Frequência crítica
f_p	Frequência do passo
F(t)	Representação matemática do carregamento no tempo em (N)
FAD	Fator de amplificação dinâmico
FND	Força dinâmica normalizada
f_{ck}	Resistência característica à compressão
g	Gravidade
Hz	Hertz
kN	Kilonewton
N/m^2	Newton por metro quadrado
N^0	Número
T	Período da atividade em (s)
seg	Segundos
T_c	Período de contacto da atividade em (s)
T_s	Período sem contacto da atividade em (s)
Δ_t	Intervalo de tempo

LISTA DE SÍMBOLOS

b_f	Largura da mesa
d	Altura do perfil
e	Excentricidade entre laje e viga
H	Altura de coluna
i	Harmônico
K	Matriz de rigidez da estrutura
L_g	Dimensão das vigas secundárias
L_j	Dimensão das vigas principais
n	Número máximo de harmônicos
P	Peso da pessoa em (N)
t_f	Espessura da mesa
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	Coefficiente dinâmico
β	Relação entre a frequência de excitação e a frequência natural
δ	Parâmetro de amortecimento proporcional à matriz de rigidez
ξ	Taxa de amortecimento modal
ξ_i	Taxa de amortecimento do modo i
ϕ_i	Ângulo de fase
ω_{0i}	Frequência natural circular do modo i

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
1	CARREGAMENTO DINÂMICO	26
1.1	Generalidades	26
2	DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL	33
2.1	Generalidades	33
2.2	Descrição dos Sistemas Estruturais	33
2.3	Modelos de Casos de Carregamento	36
2.4	Esquema de Aplicação das Cargas Dinâmicas	39
3	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	47
3.1	Generalidades	47
3.2	Descrição dos Elementos Finitos	47
3.3	Hipóteses Simplificadoras	50
3.4	Modelagem Numérico-Computacional	51
3.5	Modelagem do Amortecimento Estrutural	53
4	ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS (AUTOVALORES) E MODOS DE VIBRAÇÃO (AUTOVETORES)	55
4.1	Generalidades	55
4.2	Análise das Frequências Naturais (Autovalores)	55
4.3	Análise dos Modos de Vibração (Autovetores)	58
5	ESTUDO DO CONFORTO HUMANO	65
5.1	Aspectos Gerais	65
5.2	Análise Dinâmica do Domínio do Tempo	65
5.3	Análise das Acelerações Máximas ou Acelerações de Pico	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6.1	Introdução	83
6.2	Conclusões alcançadas	83
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	85
	REFERÊNCIAS	87

INTRODUÇÃO

Atualmente, com o grande avanço tecnológico e de materiais no campo da construção civil e na implementação de projetos cada vez mais arrojados de edificações, necessita-se de projetos cada vez mais detalhados e atuais, que contemplem inclusive análises de vibrações. Soma-se ao fato que, cada vez mais, verifica-se a construção de edificações que contemplam ao mesmo tempo cômodos com finalidade residencial com outros destinados a entretenimento, tal como salão de festas e, até mesmo, academias de ginástica aeróbica. Verifica-se que cada vez mais os projetos de edificação necessitam de critérios de projeto para atividades que desenvolvam excitações rítmicas, devido ao surgimento corrente de problemas envolvendo vibrações em sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), especialmente aqueles que possuem frequências naturais próximas das faixas de frequências associadas às atividades humanas desenvolvidas, tais como: caminhar, correr, saltar e atividades aeróbicas. Estas vibrações resultam em desconforto para os usuários e, em casos menos comuns, até mesmo podem levar ao comprometimento da estrutura.



Figura 1 – Exemplo de exercício de ginástica aeróbica [1].

Sistemas estruturais de pisos inovadores têm sido elaborados e o conhecimento do seu comportamento deve ser cuidadosamente assimilado quando da atuação de carregamentos dinâmicos nocivos ao conforto humano dos usuários e às partes constituintes da estrutura. Para tanto, diversos estudos de pesquisa vem sendo realizados sob vários enfoques, por diversos pesquisadores nos últimos anos.

De acordo com este contexto, este trabalho de pesquisa objetiva contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia de análise para o estudo do comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), submetidos a ações dinâmicas humanas rítmicas. Deste modo, a influência das ligações estruturais (viga-coluna e viga-viga), sobre a resposta dinâmica não linear dos pisos será investigada, a partir do emprego de ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis.

A resposta dinâmica dos pisos contempla uma análise crítica acerca dos valores das acelerações máximas, considerando-se modelos estruturais rígidos, semirrígidos e flexíveis. Os resultados obtidos, em termos das acelerações de pico, são confrontados e comparados com os limites propostos por recomendações internacionais, sob o ponto de vista do conforto humano.



Figura 2 – Exemplo de exercício de saltos a vontade [2].

A definição das ações dinâmicas atuantes sobre os modelos estruturais foi feita com base em resultados experimentais, os quais levam em conta os efeitos de multidão. A análise fundamenta-se na modelagem computacional dos sistemas estruturais, através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Para tal, são empregadas técnicas usuais de discretização por meio do programa ANSYS [3].

Os exemplos, associados as Figuras 1 e 2, correspondentes respectivamente a atividade de ginástica aeróbica e saltos a vontade, demonstram a importância de se considerar nos projetos estruturais das edificações os efeitos dinâmicos gerados por atividades rítmicas (ginástica aeróbica e saltos a vontade), a fim de se obter as cargas geradas por tais atividades e verificar, de acordo com especificações em Normas, a viabilidade da execução da atividade na edificação.

Revisão bibliográfica

São apresentados, a seguir, resumos de trabalhos realizados ao longo dos anos, do assunto em estudo, ilustrando o desenvolvimento e a realização de temas para projetos baseados em análises do comportamento real de estruturas.

Langer [4], investigou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), em edificações de andares múltiplos, sob o ponto de vista de conforto humano, quando essas estruturas encontram-se submetidas às atividades rítmicas provenientes dos seres humanos. Os modelos estruturais investigados baseiam-se em edificações mistas de andares múltiplos. O sistema estrutural é do tipo misto (aço-concreto), composto por vigas de aço em seção do tipo “I” e laje de concreto armado. A análise fundamenta-se na modelagem computacional dos sistemas estruturais, através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Gonçalves [5], investigou a influência das ligações estruturais (ligações viga-coluna e ligações viga-viga), sobre a resposta dinâmica não-linear de pisos mistos de edificações a fim de verificar os problemas de vibrações excessivas sobre pisos mistos (aço-concreto) de edificações. O carregamento dinâmico foi obtido através de testes experimentais com indivíduos praticando atividades rítmicas e não rítmicas.

Lopes [6], em seu trabalho de pesquisa, investigou o efeito da interação parcial (aço-concreto) e da semi-rigidez das ligações estruturais através de conectores de cisalhamento a fim de verificar os problemas de vibração excessiva dos pisos quando submetidos a ações dinâmicas rítmicas (saltos a vontade e ginástica aeróbica). Em suas análises foram desenvolvidas estratégias de análise que consideram modelos com interação total e parcial.

Mello, [7], em seu trabalho de pesquisa, correlacionou as análises teórico-experimentais de vibrações de estruturas mistas aço-concreto sob ação de atividades humanas, na qual são consideradas a ortotropia, a interação parcial e as ligações semirrígidas, contribuindo na investigação do efeito da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica de sistemas de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações dinâmicas rítmicas.

Estudos de casos de carga dinâmica, aplicadas a passarelas, ginásios e salas de esporte, salas de dança e shows, foram feitos por Bachmann [8] e deram origem a guias para solucionar estruturas com problemas de vibração. Em sua pesquisa, o autor analisou dez exemplos práticos e concluiu que, em situações normais, a frequência fundamental da estrutura deve ser definida de acordo com a frequência da componente harmônica crítica da excitação dinâmica, ou seja, as frequências dos modos dominantes de vibração da estrutura devem-se manter fora do alcance da frequência dos harmônicos críticos de excitações de atividades humanas. O autor recomenda, ainda, frequências naturais mínimas para diferentes tipos de construções e ocupações, como mostra a Tabela 1

Ji e Ellis [10], ao estudarem carregamentos gerados por alguns tipos de danças rítmicas, concluíram que, em alguns casos, a multidão deve ser modelada como sistema massa-mola-amortecedor, por verificarem que quando há um contato relativamente curto entre as pessoas e a estrutura a massa do corpo não vibra juntamente com a estrutura. Tal consideração pode ganhar relevância 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.

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 [10] 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.

Tabela 1 – Frequências naturais mínimas recomendadas por Bachmann [8]

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

Uma importante contribuição, no Brasil, é dada por Alves [11], ao realizar estudos experimentais com atividades humanas numa plataforma rígida. Em seu trabalho, obteve os valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos da carga dinâmica, verificou que esses coeficientes estavam bem próximos dos recomendados pelo CEB [12] e verificou 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.

Faisca [13], ao dar continuidade ao trabalho de Alves [11], 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.

Em seguida, os ensaios experimentais foram realizados em uma estrutura mista (aço-concreto), como dimensões de 12,20 x 2,20 x 0,1 m e apoios em três posições diferentes para variar a rigidez da estrutura e, conseqüentemente, analisar as alterações sofridas pela carga devido à interação pessoa-estrutura. Para análise dos resultados experimentais e ajustes de um modelo analítico, são propostas funções de carregamento associadas às atividades com e sem sincronismo, permitindo que estas funções possam ser aplicadas em projetos de estruturas que contemplem grandes multidões.

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.

Wiss e Parmalee [14], com intuito de avaliar a percepção humana das vibrações que ocorrem em pisos comuns de edificações, realizaram investigações a partir de algumas funções de carregamento propostas. Em seus trabalhos de pesquisa, foi submetido um grupo de 40 pessoas a um tipo de onda projetada para simular a vibração normal encontrada em sistemas estruturais de pisos com o objetivo de estudar, experimentalmente, a reação humana às vibrações transientes verticais em termos de frequência, deslocamento máximo e amortecimento.

Murray [15] ao desenvolver uma análise de pesquisa de 100 sistemas de pisos mistos, compostos por vigas de aço e lajes de concreto, submetidos ao “heel drop test”, carregamento correspondente à caminhada, em que o indivíduo projeta seu calcanhar sobre o piso após elevá-lo a uma altura correspondente ao seu peso, classificou a percepção humana 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.

É necessário ressaltar que, apesar de o problema de vibrações em pisos decorrentes de atividades humanas terem crescido sensivelmente nos últimos anos, devido ao emprego de estruturas cada vez mais leves e esbeltas, este assunto não é um problema recente.

Reiher e Meister [17] desenvolveram ensaios experimentais com um grupo de indivíduos em pé submetidos a vibrações permanentes, com uma variação de

frequência de 1,0 Hz a 100 Hz e amplitudes variando de 0,01mm a 10 mm. Com os resultados definiu-se uma escala, calibrada em função das frequências e amplitudes de deslocamento, que permite descrever o nível de percepção e aceitabilidade humana de vibrações permanentes.

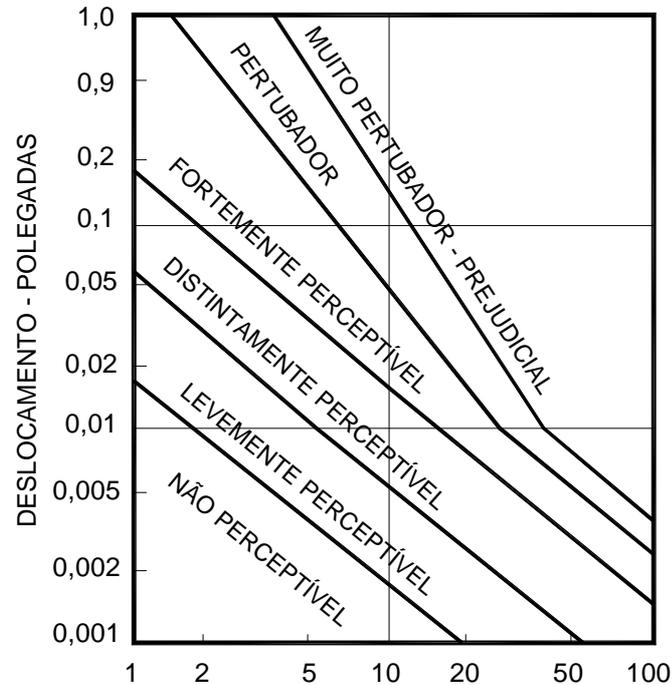


Figura 3 – Escala modificada de Reiher - Meister [17]

Outra escala para avaliação dos níveis de conforto humano também foi desenvolvida pelos pesquisadores Allen e Rainer [18]. Ao observarem que as 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) eles determinaram o pico de aceleração máxima em função da frequência natural e do amortecimento do piso, podendo ser aplicado para residências, escritórios ou escolas. A Figura 4, apresenta a escala que foi adotada, posteriormente, pelo CSA (Canadian Standards Association).

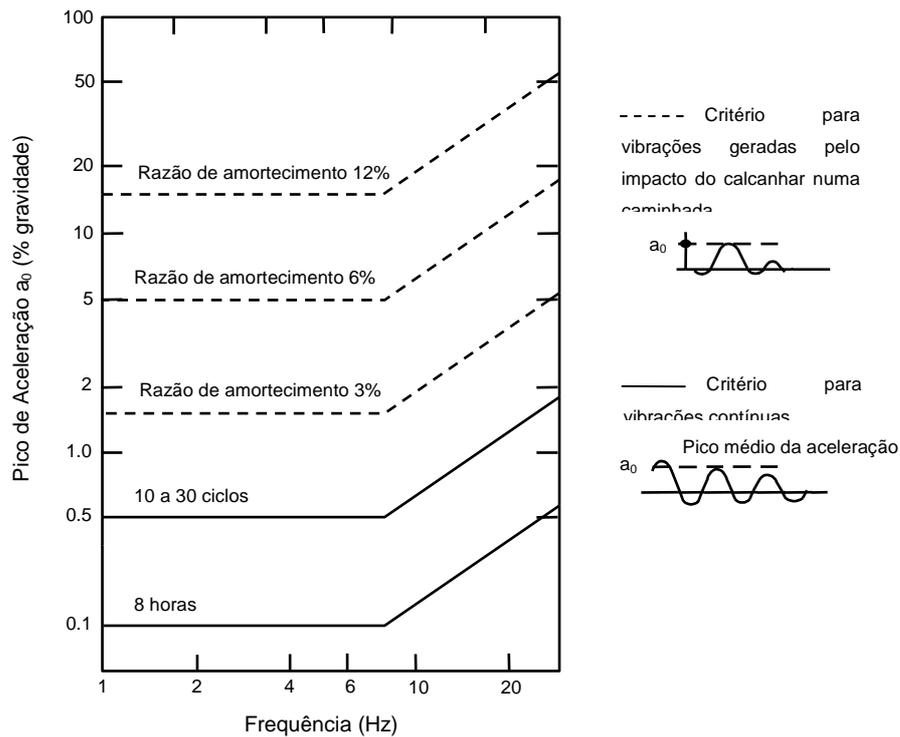


Figura 4 – Critério de conforto para vibração em pisos

Os pesquisadores Allen, Rainer e Pernica [19], ao longo de seus trabalhos de pesquisa, propõem valores mínimos recomendados para a frequência natural das estruturas, avaliadas segundo o tipo de ocupação e segundo as características da estrutura. Estes valores são baseados nos valores dos carregamentos dinâmicos gerados por atividades rítmicas como dança e exercícios aeróbicos e nos valores limites de aceleração requeridos por estas atividades.

Tabela 2 – Frequência natural mínima requerida por Allen, Rainer e Pernica [19]

Frequência natural mínima de acordo com o tipo de ocupação (Hz)		
Características dos pisos	Piso para dança e ginástica	Estádios e arenas
Construções em concreto	7,0	5,0
Construções mistas	9,0	6,0
Construções em madeira	12,0	8,0

Allen [20] desenvolveu um procedimento para análise de sistemas estruturais submetidos a atividades rítmicas, distribuídas em toda 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.

Vecci [21], comparou as frequências naturais da estrutura e uma frequência mínima exigida para garantir o conforto humano e o estado limite de utilização em pisos metálicos, no que tange a excitação rítmica.

Para análise de uma estrutura mista (aço-concreto) já existente que passaria a receber, além de cargas estáticas, cargas dinâmicas provenientes de atividades rítmicas, os pesquisadores De Paula e Queiroz [22] utilizaram um programa computacional baseado no método dos elementos finitos e simularam o carregamento dinâmico através de carregamentos harmônicos. Os resultados obtidos para as frequências naturais da estrutura, utilizando o modelo computacional, foram comparados com valores experimentais obtidos na estrutura real e foi apresentado um reforço para adequar a estrutura a sua nova ocupação, com base na avaliação dos níveis finais de esforços e acelerações.

Através de investigações experimentais, Batista e Varela [23] constataram que os problemas envolvendo excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e freqüentes em painéis contínuos que apresentam múltiplos modos de vibração, tais como os painéis contínuos de lajes mistas, lajes em grelha, lajes nervuradas e lajes pré-moldadas em concreto armado.

Moreira [24] realizou diversas análises em painéis típicos, modelados com o método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS [3], visando um melhor entendimento da influência de parâmetros estruturais como variação do vão e rigidez das vigas. Os resultados, em termos de acelerações induzidas por cargas impulsivas e decorrentes do caminhar de pessoas, foram examinados segundo Normas e Recomendações Internacionais.

Outra investigação feita por Varela [25] baseia-se nas respostas dinâmicas, semideterminísticas e aleatórias, obtidas por meio de modelos teóricos e de ensaios experimentais de estruturas reais. As cargas aleatórias produzidas por pessoas e os sistemas estruturais são descritos e avaliados com auxílio de ferramentas computacionais. São apresentadas modelagens mais adequadas e as mais simplificadas das cargas dinâmicas, produzidas por uma ou por várias pessoas. A conclusão que se chegou foi que uma nova filosofia de projeto deve ser empregada, na qual sejam considerados os necessários dispositivos de controle de vibrações.

Mello [26], em seu trabalho de pesquisa, desenvolveu diversos modelos de carregamento representativos do caminhar das pessoas, considerando a variação espacial e temporal da carga dinâmica ao longo da análise e também o efeito

transiente do impacto do calcanhar humano nos pisos. Os pisos mistos em aço-concreto foram discretizados com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), variando alguns parâmetros como o comprimento do vão, a taxa de amortecimento, a espessura da laje e a rigidez das ligações viga coluna. Os resultados dessa pesquisa indicam que níveis de acelerações elevados são alcançados, podendo gerar desconforto aos usuários.

Para Gama [27], percepção e desconforto não devem ser confundidos, uma vez que o segundo geralmente possui valores mais altos que o primeiro. Mas ele afirma que a repetição de eventos simplesmente perceptíveis também pode levar ao desconforto. Sendo assim 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.

Para análise do comportamento de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos às atividades rítmicas correspondentes a ginástica aeróbica e saltos a vontade Loose [28] obteve resultados em termos das acelerações máximas (acelerações de pico) e os comparou com os limites propostos por recomendações internacionais, sob o ponto de vista do conforto humano, para diferentes tipos de ocupação. Os pisos mistos analisados ao longo de seu trabalho de pesquisa foram submetidos a níveis de aceleração elevados e ultrapassam critérios de conforto humano.

Almeida [29] investigou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sujeito às atividades rítmicas provocadas pelas pessoas. O piso estudado era suportado por treliças metálicas e apoiado diretamente sobre paredes compostas. Ao realizar um estudo paramétrico entre os resultados numéricos e analíticos verificou que as acelerações de pico são superiores aos limites recomendados por normas de projeto.

Varela e Batista [39] discutiram os procedimentos de avaliação e adequação das ferramentas analítico-numéricas para estimar de maneira realista as amplitudes das vibrações com auxílio da análise e correlação de resultados numéricos e experimentais obtidos de ensaios de uma estrutura protótipo construída em laboratório numa escala geométrica 1:1, descrevendo uma nova função matemática das forças dinâmicas produzidas pelo caminhar humano.

Junges [40] realizou a análise do comportamento à flexão da laje mista, tanto numérica como experimentalmente, submetida a cargas estáticas, através de um estudo de vibração da laje mista submetida a solicitações dinâmicas provenientes de atividades humanas, estudando-se a punção no concreto e o cisalhamento nos perfis pultrudados das lajes submetidas a cargas concentradas.

Objetivos e motivação

Este trabalho de pesquisa objetiva verificar a influência das ligações estruturais (ligações viga-viga), sobre a resposta dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) de edificações, quando submetidos a ações humanas rítmicas. Pretende-se, ainda, desenvolver uma análise de conforto humano, via análise numérica, com base no emprego do método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS [3]. Deste modo, a partir do desenvolvimento desta dissertação de mestrado, tem-se como motivação a busca por soluções estruturais economicamente viáveis e que atendam a critérios estabelecidos por normas e recomendações internacionais de projeto [15], [32], proporcionando conforto humano aos usuários da obra.

Escopo do trabalho

Com o intuito de atender aos objetivos e à metodologia descritos anteriormente, este trabalho de pesquisa está subdividido em sete capítulos, descritos a seguir:

No capítulo um apresenta-se a metodologia adotada na modelagem dos carregamentos dinâmicos, assim como as respectivas formulações matemáticas que descrevem a atividade dinâmica. O enfoque deste estudo é para o carregamento humano rítmico correspondente à ginástica aeróbica.

O capítulo dois trata da descrição dos modelos estruturais utilizados para avaliação do conforto humano, apresentando a geometria dos modelos computacionais, as propriedades geométricas das peças e as propriedades físicas dos materiais.

O capítulo três trata da descrição dos elementos finitos empregados na análise, da definição da malha utilizada nas análises e a modelagem do amortecimento dos sistemas.

No capítulo quatro realizam-se as análises dinâmicas dos modelos estruturais através dos autovalores, frequências naturais do sistema estrutural, e autovetores, modos de vibração, apresentados.

O capítulo cinco apresenta as análises de vibração forçada, realizadas no domínio do tempo, a fim de avaliar o comportamento dinâmico das estruturas mistas (aço-concreto), quando submetidas a atividades rítmicas humanas (ginástica aeróbica), no que tange aos critérios de conforto humano.

No capítulo seis apresentam-se as conclusões deste estudo e as sugestões para trabalhos futuros, de forma a contribuir para o avanço desta linha de pesquisa.

1 CARREGAMENTO DINÂMICO

1.1 Generalidades

O conhecimento sobre o comportamento dinâmico das edificações, ainda na fase de projeto, torna-se imprescindível, tendo em vista que ações corretivas após o início das atividades não é algo desejável. Certo que os custos com material e execução dos serviços são relativamente elevados, em comparação com os lucros obtidos, especialmente quando, devido a algum erro de projeto, há a necessidade de ações corretivas implicando ainda em um período no qual a edificação não poderá ser utilizada face as ações de correções na mesma, significando grande prejuízo.

Considerando-se os aspectos mencionados no parágrafo anterior, o modelo de carregamento empregado neste trabalho foi desenvolvido para simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos a vontade), através da função Hanning. Tal função é muito utilizada em processamentos de sinais para descrever matematicamente esses carregamentos. Esta modelagem é respaldada por parâmetros experimentais realizados por Faisca [13].

Faisca [13], em sua investigação, observou que para diferentes atividades como saltos a vontade, ginástica aeróbica e show/torcida o comportamento da função de carregamento dinâmico, ao longo dos tempos, apresentam 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 função Hanning. A comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning podem ser vista na Figura 5.

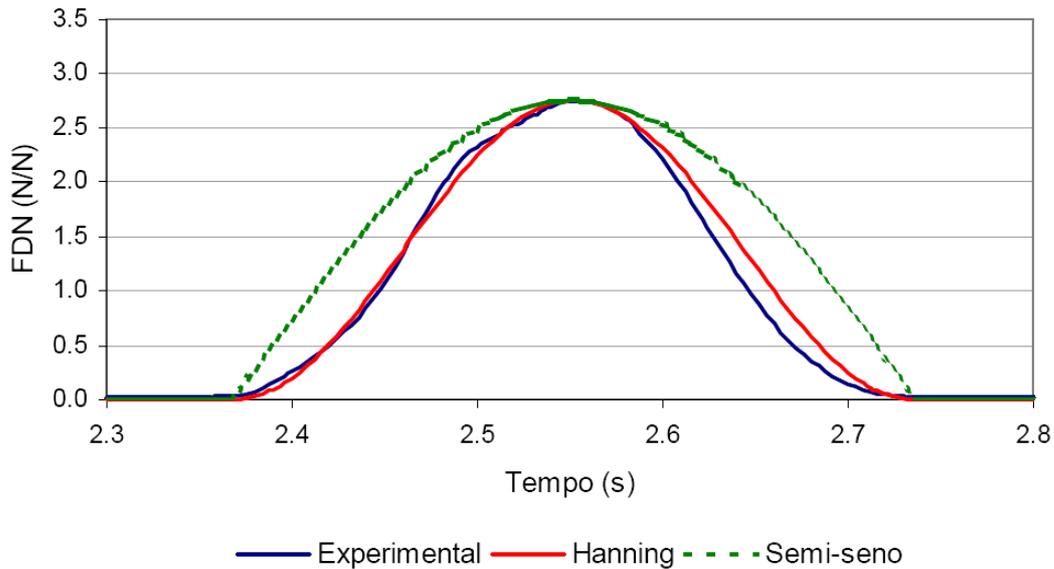


Figura 5 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning

A representação matemática de carregamento dinâmico, por meio da função Hanning, é dada pela equação (1). Em seguida, a Figura 6 facilita o entendimento da função matemática adotada, pois ilustra os dois intervalos de tempo significativos da referida função. Ressalta-se que a força dinâmica normalizada (FDN) é representada na ordenada da Figura 5.

$$\begin{aligned}
 F(t) &= CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\}, \text{ para } t \leq T_c \\
 F(t) &= 0, \text{ para } T_c < t \leq T
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

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).

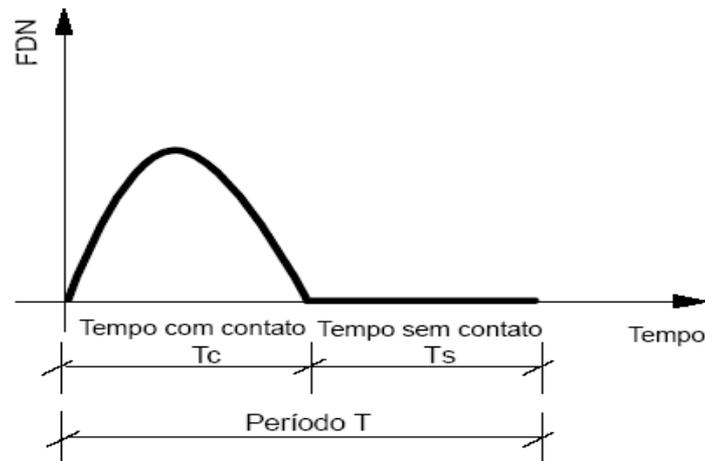


Figura 6 – Intervalos de tempo da função adotada.

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. O coeficiente K_p deve ser obtido calculando-se o pico máximo de cada salto.

A partir das diferentes situações estudadas por Faisca [13] que avaliaram a influência da flexibilidade da estrutura nas respostas, foram obtidos diferentes resultados para os parâmetros que caracterizam cada atividade. Na Tabela 3 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 – Parâmetros experimentais utilizados por Faisca [13]

Atividade	T (s)	T_c (s)	K_p
Saltos a vontade	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$
Ginástica aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$

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.

$$CD = \frac{\text{Pico do sinal da soma}}{\sum_{i=1}^n K_{pi}} \quad (2)$$

A Figura 7 representa o gráfico do coeficiente de defasagem (CD), para três atividades estudadas por Faisca [13], extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

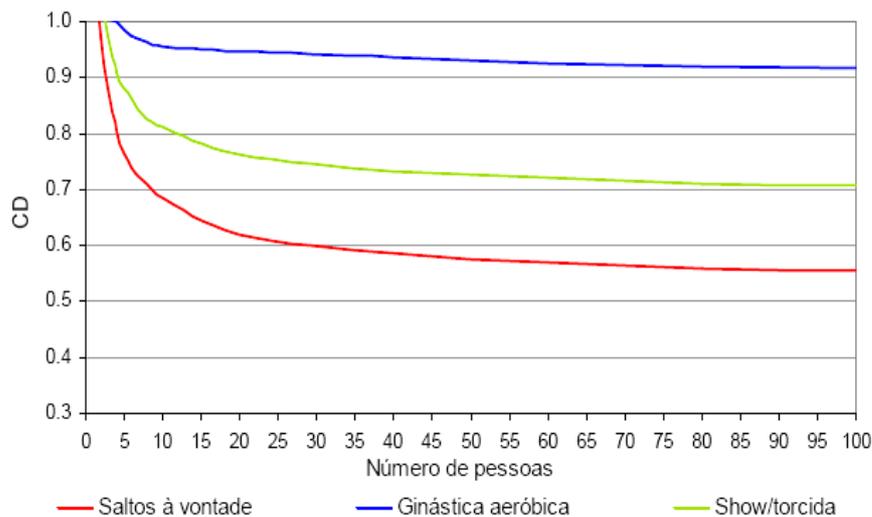


Figura 7 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas

Analisando-se a Figura 7, verifica-se que o coeficiente de defasagem não varia muito para a atividade aeróbica como varia para a atividade de saltos a vontade, na medida em que o número de pessoas é aumentado. Isso ocorre porque há um maior sincronismo na atividade aeróbica.

Destaca-se que o parâmetro CD é um coeficiente de ponderação das ações dinâmicas definidas em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam sobre a estrutura. Este coeficiente leva em conta os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam sobre a estrutura. Deste modo, a definição deste parâmetro considera possíveis defasagens e variações de ritmo que levariam a redução da intensidade do carregamento. Para as análises realizadas neste trabalho, os valores de CD adotados são apresentados na Tabela 4, estes valores foram obtidos a partir do gráfico com coeficientes propostos apresentado detalhadamente na Figura 7, de acordo com a atividade rítmica executada, e o número de pessoas.

Tabela 4 – Valores de CD Faísca [13]

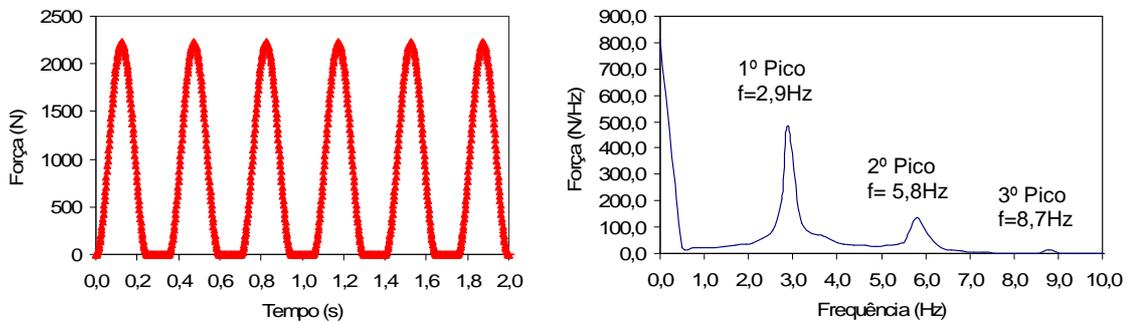
Nº Pessoas	CD	
	Ginástica aeróbica	Saltos a vontade
1	1	1
2	1	0,88
4	0,98	0,76
8	0,96	0,70
12	0,95	0,67
16	0,94	0,64
24	0,93	0,62
32	0,92	0,60

De forma a ilustrar a modelagem do carregamento dinâmico utilizado ao longo desta dissertação (ginástica aeróbica), a Figura 8 apresenta exemplos de sinais da força no tempo e o espectro de frequência da força para diferentes valores dos parâmetros T , T_c , K_p e CD , variando na faixa dos dados experimentais propostos por Faísca [13]. O peso de cada indivíduo (P) é considerado igual a 800N [9] e o amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi = 1\%$) [15].

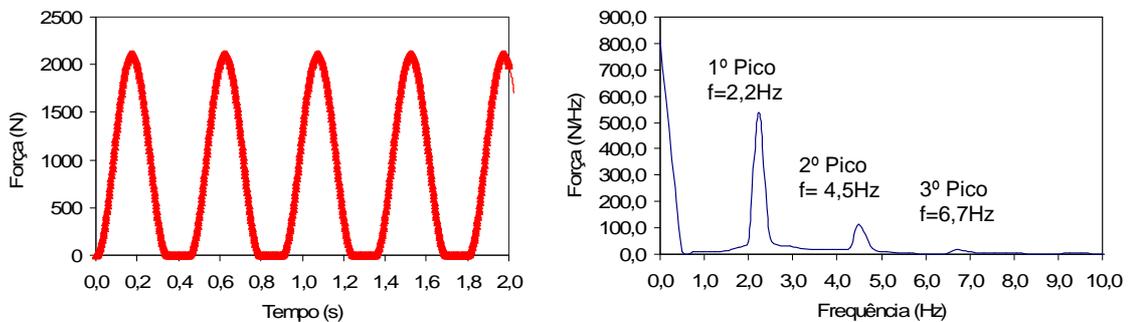
Para este trabalho de pesquisa foram considerados valores médios para os parâmetros T , T_c e K_p , no que tange ao carregamento dinâmico gerado por ginástica aeróbica e saltos a vontade, variando-se apenas o parâmetro CD de acordo com o número de pessoas. Mais precisamente, para o carregamento dinâmico gerado por ginástica aeróbica foram considerados os seguintes valores: $T = 0,44s$, $T_c = 0,34s$ e $K_p = 2,78$ e para o carregamento dinâmico gerado por atividade de saltos a vontade foram utilizados $T = 0,44s$, $T_c = 0,32s$ e $K_p = 3,17$, sendo para ambos variando-se apenas o parâmetro CD de acordo com o número de pessoas analisadas no carregamento, conforme indicado na Tabela 4.

A Figura 8 apresenta o espectro da carga dinâmica, obtido via emprego da Transformada Rápida de Fourier (TRF) [38]. Desta forma, ilustra-se a função de tempo da carga dinâmica, $F(t)$, e sua respectiva transformada no domínio da frequência, $F(\omega)$. Convém ressaltar que a ação dinâmica proveniente da ginástica aeróbica apresenta três harmônicos, perfeitamente identificados na Figura 8, de acordo com a variação do período da atividade desenvolvida pelo ser humano sobre

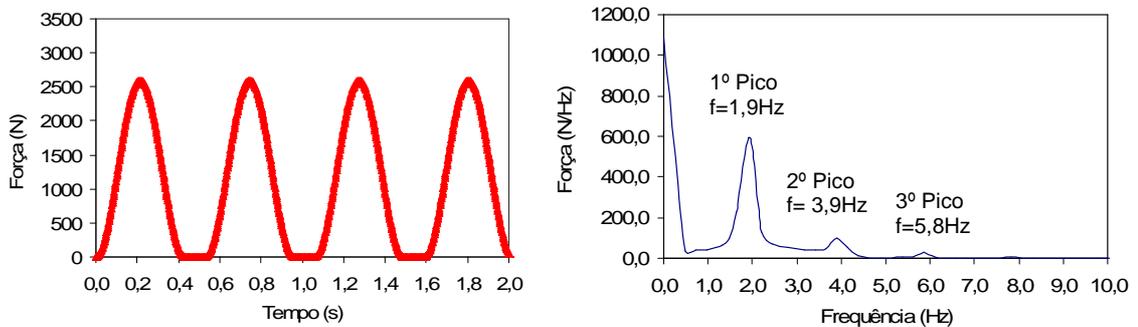
o piso. Ou seja, quando considera-se, por exemplo, $T = 0,35s$, o primeiro harmônico da carga, no domínio da frequência, associa-se ao pico com frequência de 2,9 Hz, de acordo com a Figura 8 (a).



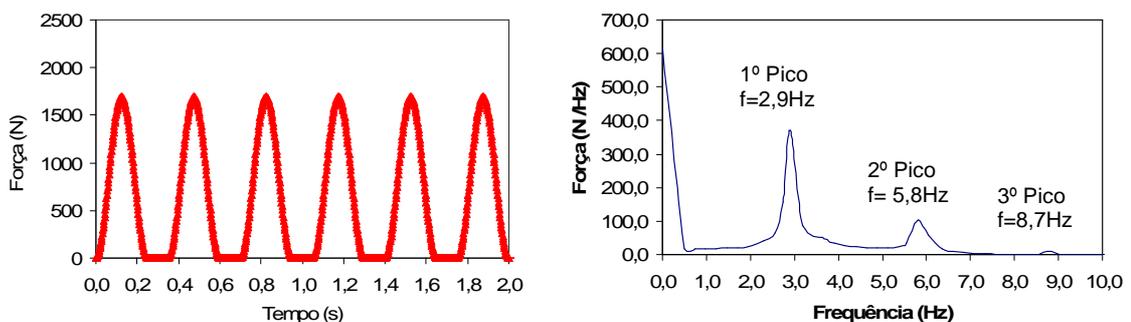
a) $T = 0,35s$, $T_c = 0,25s$, $K_p = 2,78$, $CD = 1$



b) $T = 0,45s$, $T_c = 0,35s$, $K_p = 2,78$, $CD = 0,95$



c) $T = 0,53s$, $T_c = 0,43s$, $K_p = 3,38$, $CD = 0,96$



d) $T = 0,35s$, $T_c = 0,25s$, $K_p = 2,18$, $CD = 0,97$

Figura 8 – Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica

No próximo capítulo será apresentado a descrição dos modelos estruturais adotados no presente estudo e suas respectivas características, bem como o esquema de aplicação das cargas dinâmicas.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

2.1 Generalidades

No presente capítulo apresenta-se a descrição dos modelos estruturais utilizados para avaliação do conforto humano. Para tal, são empregadas técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos, por meio do programa computacional ANSYS [3]. As vigas e colunas foram simuladas por elementos finitos que consideram os efeitos de flexão e de torção. As lajes são simuladas por meio de elementos finitos de placa. Para garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga e dos elementos de casca, ou seja, para garantir que os modelos funcionem como um sistema misto é utilizado conexões do tipo “*off-set*” na ligação entre a laje e as vigas. Considera-se também que os materiais, aço e concreto, trabalham no regime elástico-linear e assume-se a existência de interação total entre o aço e o concreto. Este capítulo apresenta a geometria dos modelos computacionais, as propriedades geométricas das peças e as propriedades físicas dos materiais, além da descrição dos elementos finitos empregados na análise da definição da malha utilizada nas análises e a modelagem do amortecimento estrutural do sistema.

2.2 Descrição dos Sistemas Estruturais

O sistema estrutural utilizado neste estudo baseia-se em um sistema de lajes maciças de concreto armado apoiado sobre vigas de aço, formando assim um sistema misto (aço-concreto). O sistema é composto por quatro vãos de 10m nas duas direções, perfazendo uma área total de 1600m². O espaçamento entre as vigas secundárias também é mantido constante e igual a 2,5m. São consideradas ligações do tipo rígidas, semirrígidas e flexíveis. As ligações semirrígidas e flexíveis são consideradas apenas nas ligações entre as vigas principais e secundárias. As ligações entre as vigas principais e as colunas são do tipo rígidas.

Ressalta-se que três modelos estruturais foram estudados: no primeiro modelo estrutural (Modelo Estrutural I), considera-se apenas o piso misto (aço-concreto), sem levar em consideração a rigidez real das colunas; no segundo modelo (Modelo Estrutural II), a rigidez real das colunas foi considerada e estas possuem altura de 4m ($H = 4,0\text{m}$); no terceiro modelo estrutural (Modelo Estrutural III), os pilares são considerados com as suas respectivas projeções para o segundo pavimento, mantendo a altura de 4m.

A Figura 9 apresenta a planta baixa do modelo estrutural estudado e as Figuras 10 e 11 ilustram respectivamente uma planta baixa e uma seção transversal genérica do piso em estudo. A área marcada na Figura 9 representa um exemplo de uma seção genérica do piso, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11.

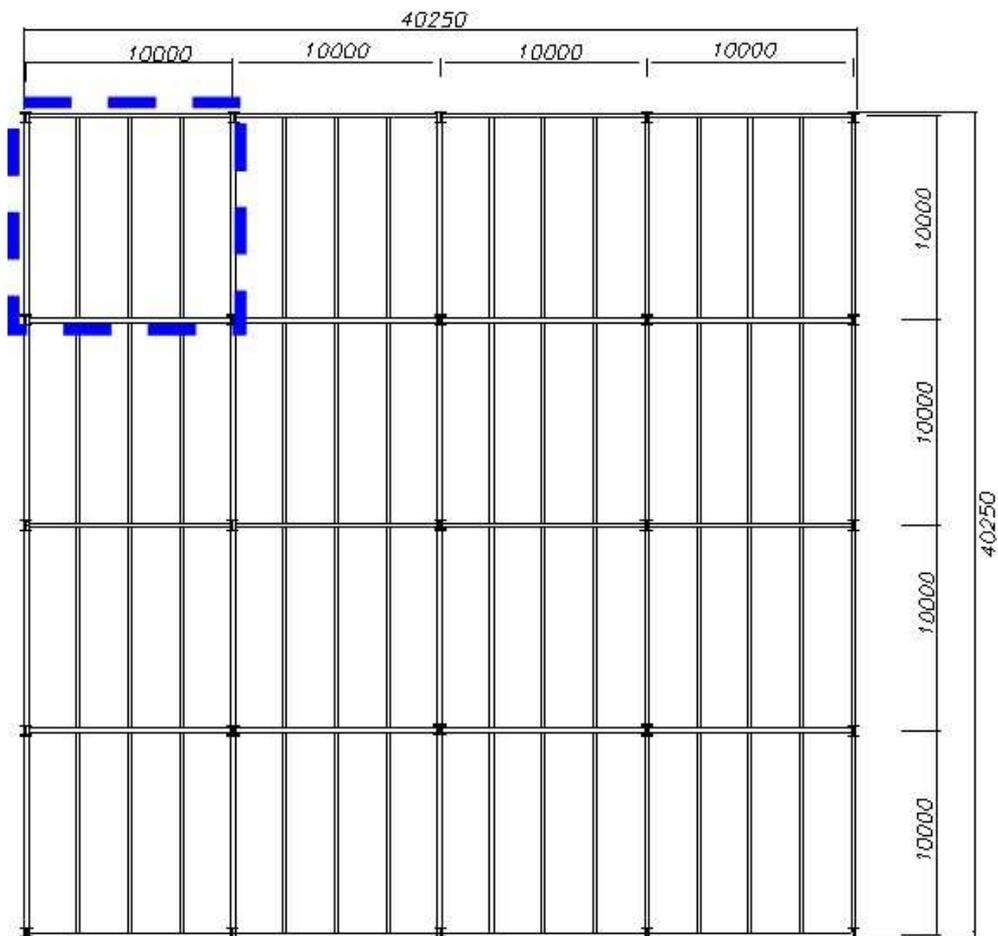


Figura 9 – Planta baixa do piso misto (aço-concreto) investigado. Cotas em (mm) [6]

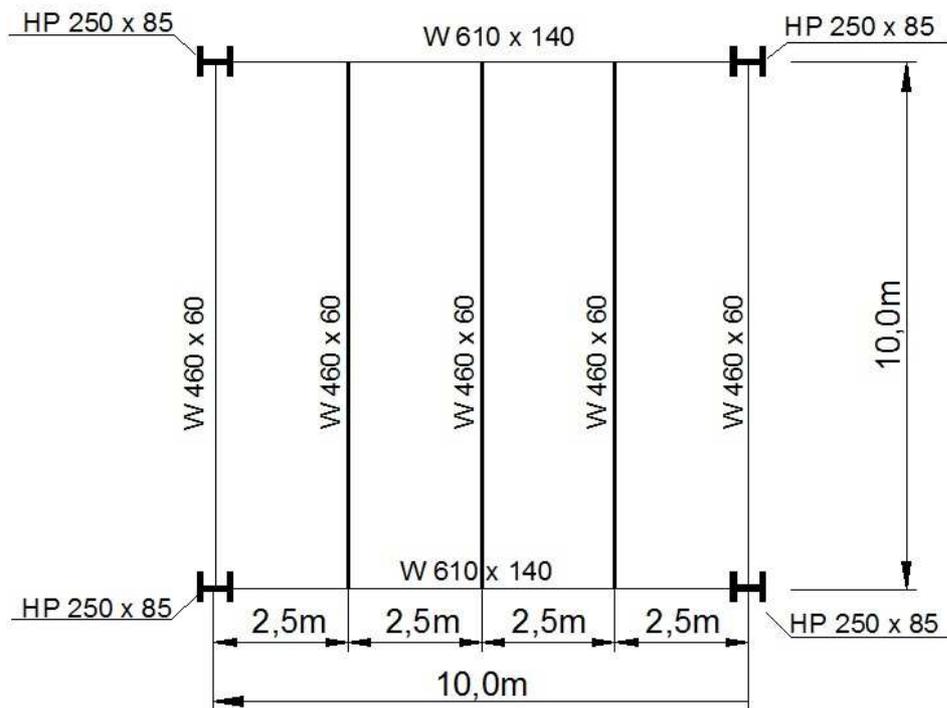


Figura 10 – Planta baixa genérica do pavimento do piso em estudo.

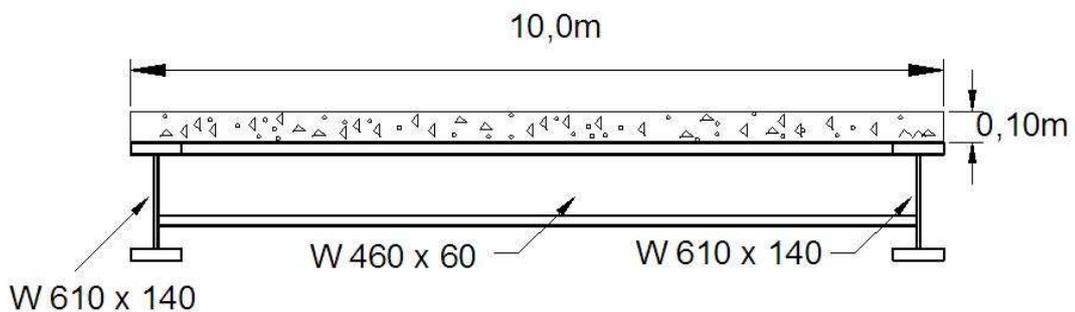
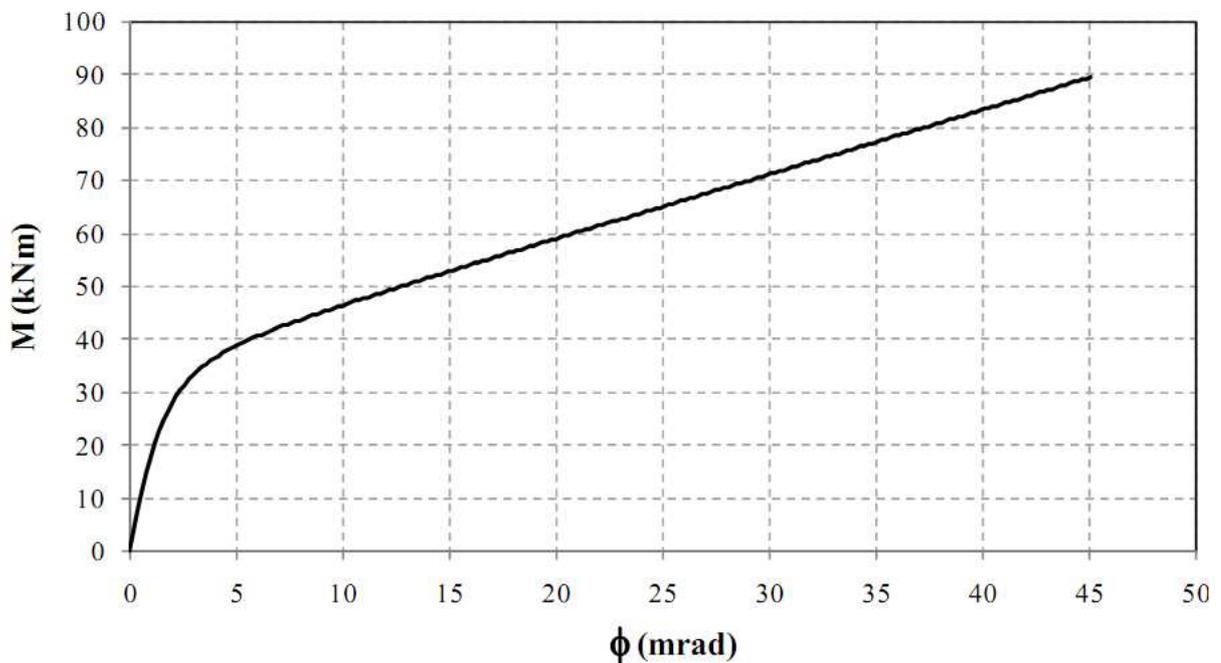


Figura 11 – Seção transversal genérica do pavimento do piso em estudo.

Os perfis metálicos do tipo “I” são constituídos por um aço com limite de escoamento de 345MPa. Para as vigas de aço foi considerado um módulo de elasticidade igual a 205GPa. A laje de concreto possui espessura de 0,10m, resistência característica a compressão de 30MPa e módulo de elasticidade igual a 26GPa. A Tabela 5 ilustra as propriedades geométricas dos perfis das vigas e colunas. A Figura 12 ilustra a curva momento fletor *versus* rotação das ligações semirrígidas obtidas, via testes experimentais realizados por Oliveira [30]. A rigidez inicial empregada para a modelagem da semi-rigidez das ligações estruturais foi de 12 kNm/rad (12000 Nm/mrad).

Tabela 5 – Propriedades geométricas dos perfis de aço.

Tipo de perfil	Altura (d)	Largura da Mesa (b_f)	Espessura da Mesa Superior (t_f)	Espessura da Mesa Inferior (t_f)	Espessura da Alma (t_w)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Viga: W 610 x 140	617	230	22,2	22,2	13,1
Viga: W 460 x 60	455	153	13,3	13,3	8,0
Coluna: HP 250 x 85	254	260	14,4	14,4	14,4

Figura 12 – Curva momento *versus* rotação das ligações viga-viga (semirrígidas) [30]

2.3 Modelos de Casos de Carregamento

Nesta dissertação de mestrado foram investigados 07 (sete) casos de carregamento, conforme ilustrado na Figura 14, a fim de possibilitar o estudo de todo o piso. Em todos os casos de carregamento apresentados foram mantidos constantes a espessura de 0,10 m da laje de concreto, as propriedades geométricas das vigas, o espaçamento entre as vigas secundárias (2,5 m) e o pé-direito de 4,0

metros. O vão de cada seção genérica de piso também foi fixado, ao longo da análise, igual a 10,0m, conforme apresentado na Figura 10.

Para facilitar o entendimento e a visualização dos pontos de carregamento e dos pontos onde a resposta dinâmica foi obtida, o piso foi dividido em setores (AxB), onde “A” significa o posicionamento do setor na direção X e “B” significa o posicionamento do setor na direção Y, conforme Figura 13.

Em seguida, na Figura 14 são apresentados os casos de carregamento estudados nesta dissertação, onde a parte grifada significa o setor onde está sendo aplicado o carregamento e os pontos A até H significam as posições onde estão sendo realizadas as análises do carregamento.

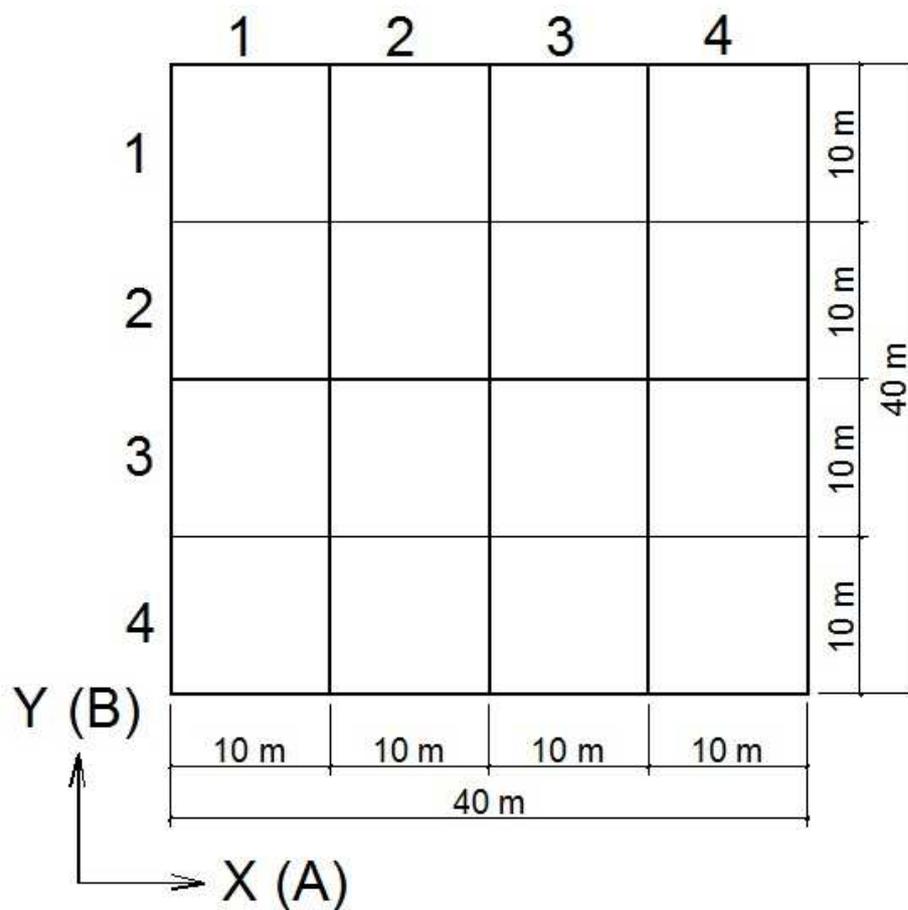


Figura 13 – Setores de carregamento (A X B)

A	B		
C			

a) Caso de carregamento I

A	B		
C			

b) Caso de carregamento II

A	B		
C			

c) Caso de carregamento III

B	A		
	C		

d) Caso de carregamento IV

A	B	C	

e) Caso de carregamento V

A	B	C	D
E	F	G	H

f) Caso de carregamento VI

A	E		
B	F		
C	G		
D	H		

g) Caso de carregamento VII

Figura 14 – Casos de carregamento e pontos de análise

As extremidades das colunas foram modeladas com apoios de segundo gênero. A incorporação das colunas no modelo computacional visa obter uma situação mais real em termos de projeto, no que tange a rigidez na ligação viga-coluna. As ligações viga-coluna são consideradas como sendo rígidas enquanto as ligações viga-viga são analisadas de 03 (três) formas a saber: rígidas, semirrígidas e flexíveis.

2.4 Esquema de Aplicação das Cargas Dinâmicas

Para este trabalho de pesquisa foram considerados sete casos de carregamento (caso de carregamento I ao VII), conforme apresentado na Figura 14, variando-se, em cada caso, o posicionamento do carregamento dinâmico, bem como, variando-se em setores, os pontos de análise das respostas dinâmicas do piso, de acordo com a Figura 14, com o intuito de avaliar a influência da vibração em toda área do piso.

As ações dinâmicas induzidas pelos seres humanos analisadas neste trabalho, ginástica aeróbica e saltos a vontade, são aplicadas sobre o piso (Figuras 15 a 21) variando-se a aplicação do carregamento em setores, cujo nó central, onde serão tomadas as leituras dos deslocamentos e acelerações, variam do nó A ao H, conforme o caso de carregamento (Figura 14). Para tanto, a parte grifada da Figura 14 corresponde ao setor de aplicação do carregamento enquanto que os nós (A ao H) correspondem a seção do piso onde são obtidas os deslocamentos e acelerações do carregamento.

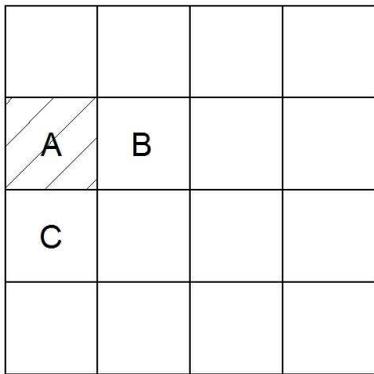
No caso de carregamento I (Figura 15), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (1x2). No caso de carregamento II (Figura 16), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x2). No caso de carregamento III (Figura 17), as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x2 e 2x2). No caso de carregamento IV (Figura 18), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x1). No caso de carregamento V (Figura 19), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (1x1), sendo, para todos os casos, o setor de carregamento verificado através da Figura 13.

No caso de carregamento VI (Figura 20), as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 2x1, 3x1 e 4x1) e no caso de carregamento VII (Figura 21), as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 1x2, 1x3 e 1x4).

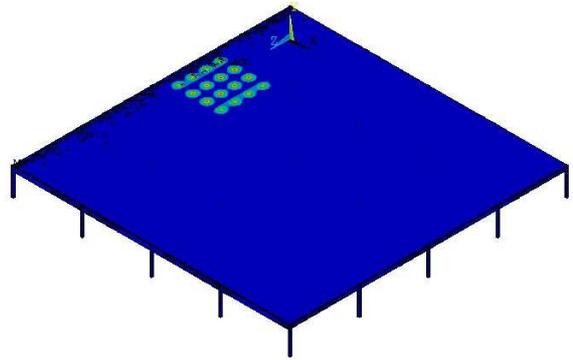
Os setores de carregamento, onde se encontram aplicados os carregamentos, podem ser verificados nas Figuras 13.

O item “a” e o item “b” das Figuras 15 a 21 apresentam respectivamente a planta baixa do caso de carregamento adotado e uma perspectiva de carregamento através da interface do programa ANSYS [3], enquanto que os demais itens destas figuras representam a variação do número de pessoas praticando atividade de ginástica aeróbica ou saltos a vontade, de acordo com o caso de carregamento.

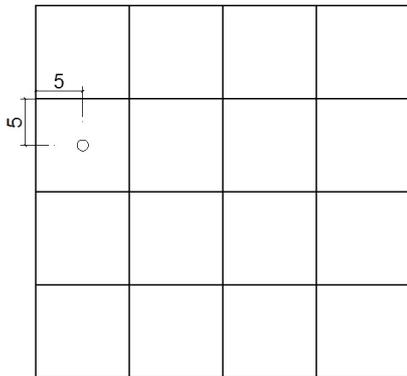
Nesta investigação foram aplicados carregamentos dinâmicos sobre os modelos estruturais correspondentes a 1 pessoa, 2 pessoas, 4 pessoas, 8 pessoas, 12 pessoas, 16 pessoas, 24 pessoas e 32 pessoas, conforme o caso de carregamento, como ilustrado nas Figura 15 a 21. A distribuição foi feita utilizando uma taxa e ocupação da ordem de 0,25 pessoas/m² [9], distribuídas em setores no painel da laje. Foi considerado, ainda, que o peso de uma pessoa é igual a 800N [9].



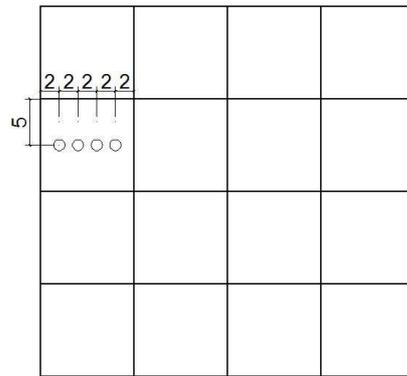
a) Caso de carregamento I



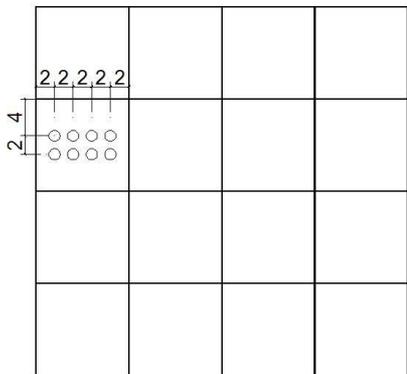
b) Posicionamento do carregamento (ANSYS)



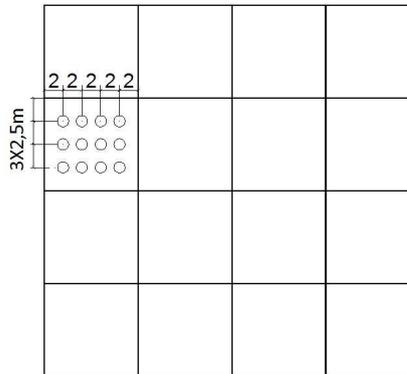
c) 1 Pessoa praticando ginástica aeróbica



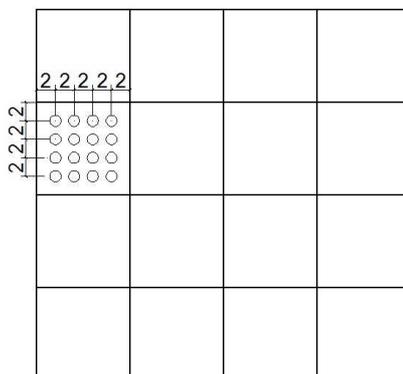
d) 4 Pessoas praticando ginástica aeróbica



e) 8 Pessoas praticando ginástica aeróbica

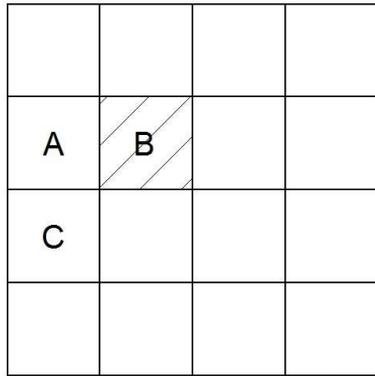


f) 12 Pessoas praticando ginástica aeróbica

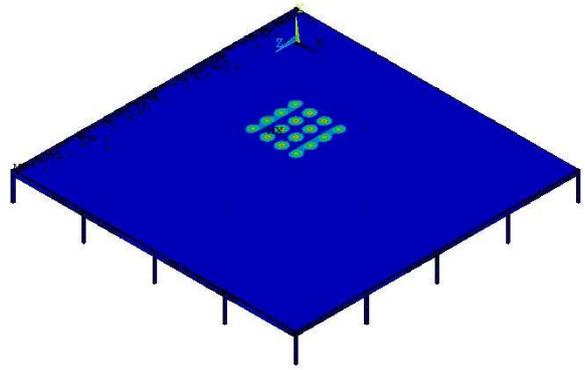


h) 16 Pessoas praticando ginástica aeróbica

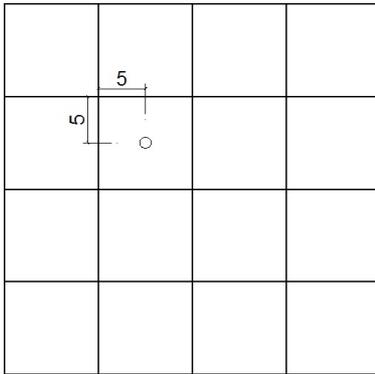
Figura 15 – Distribuição do modelo de carregamento (caso I - cotas em metro)



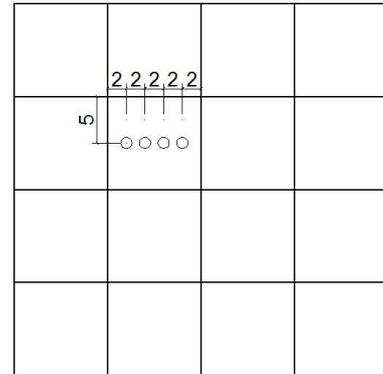
a) Caso de carregamento (caso II)



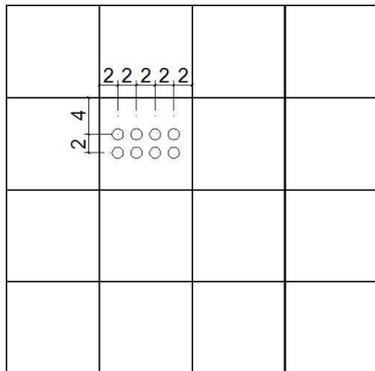
b) Posicionamento do carregamento (ANSYS)



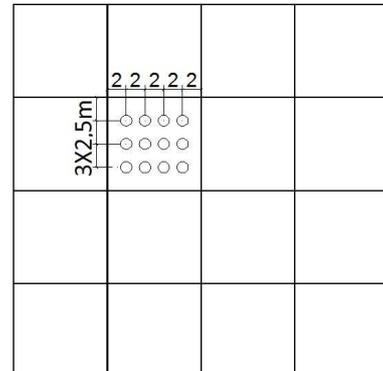
c) 1 Pessoa praticando ginástica aeróbica



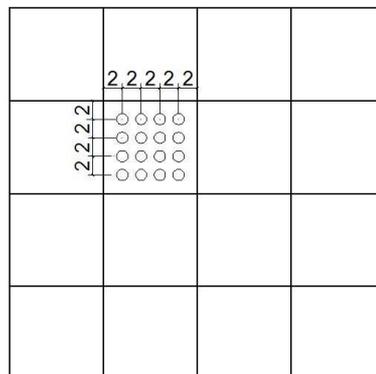
d) 4 Pessoas praticando ginástica aeróbica



e) 8 Pessoas praticando ginástica aeróbica

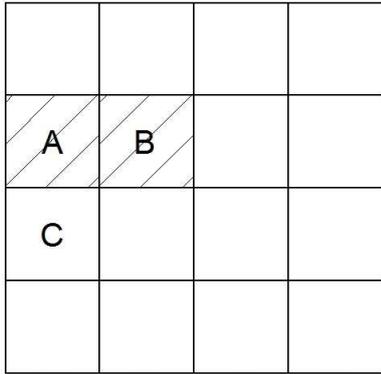


f) 12 Pessoas praticando ginástica aeróbica

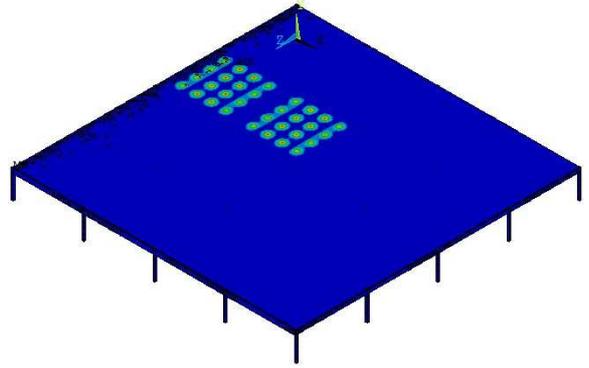


h) 16 Pessoas praticando ginástica aeróbica

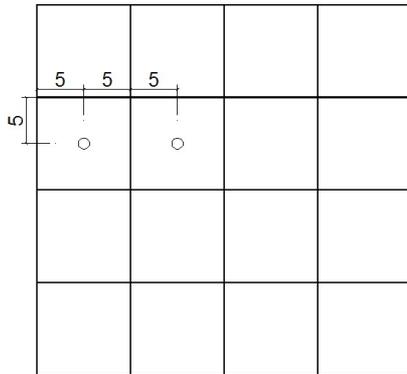
Figura 16 – Distribuição do modelo de carregamento (caso II - cotas em metro)



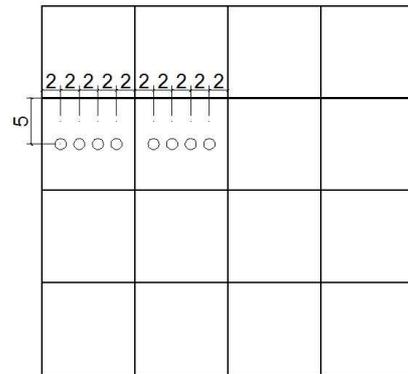
a) Caso de carregamento (caso III)



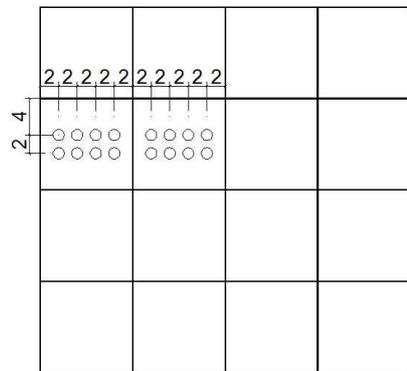
b) Posicionamento do carregamento (ANSYS)



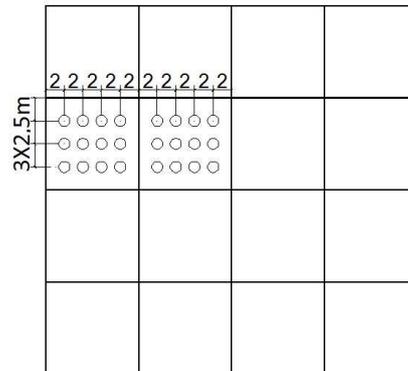
c) 2 Pessoas praticando ginástica aeróbica



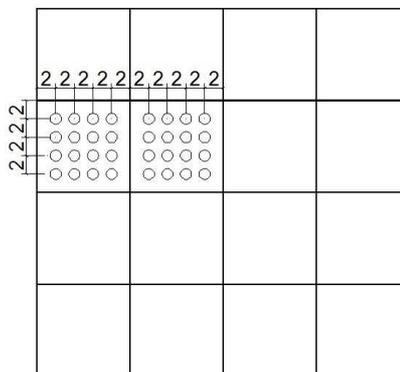
d) 8 Pessoas praticando ginástica aeróbica



e) 16 Pessoas praticando ginástica aeróbica

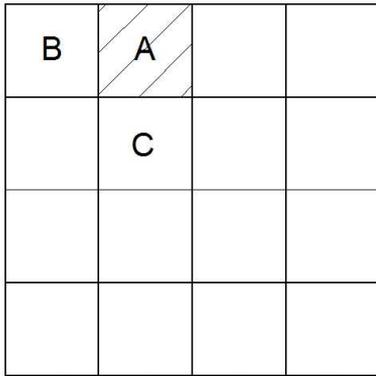


f) 24 Pessoas praticando ginástica aeróbica

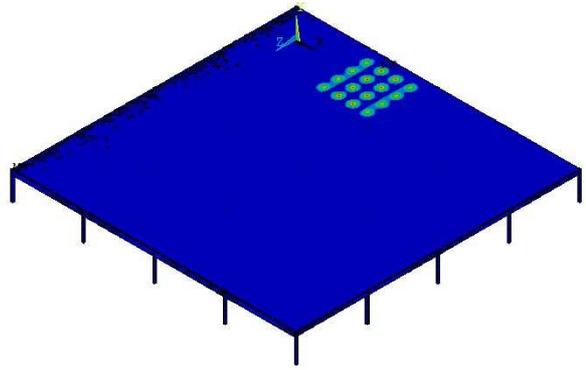


h) 32 Pessoas praticando ginástica aeróbica

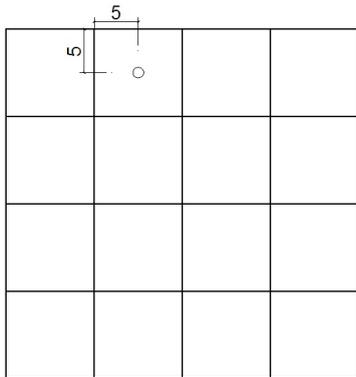
Figura 17 – Distribuição do modelo de carregamento (caso III - cotas em metro)



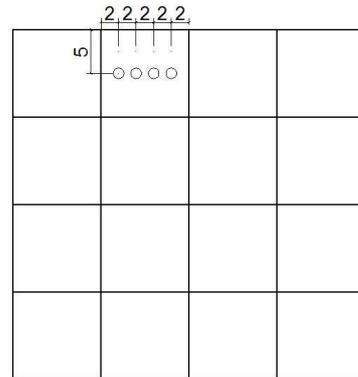
a) Caso de carregamento (caso IV)



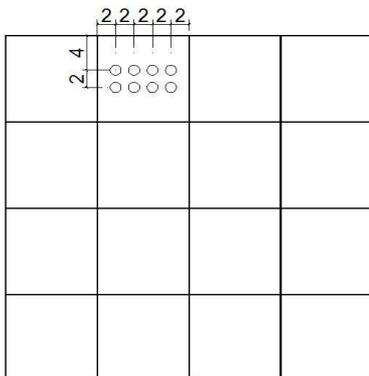
b) Posicionamento do carregamento (ANSYS)



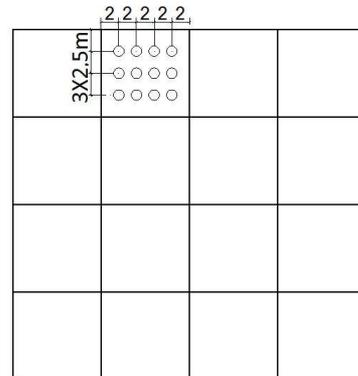
c) 1 Pessoa praticando ginástica aeróbica



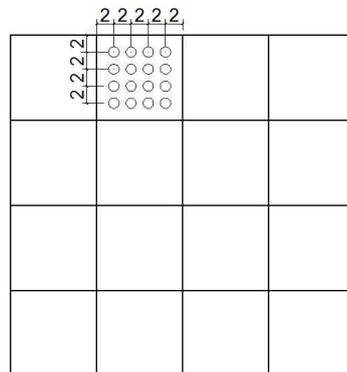
d) 4 Pessoas praticando ginástica aeróbica



e) 8 Pessoas praticando ginástica aeróbica

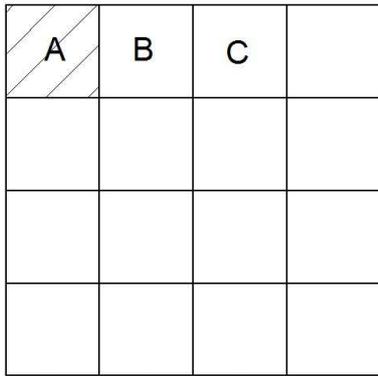


f) 12 Pessoas praticando ginástica aeróbica

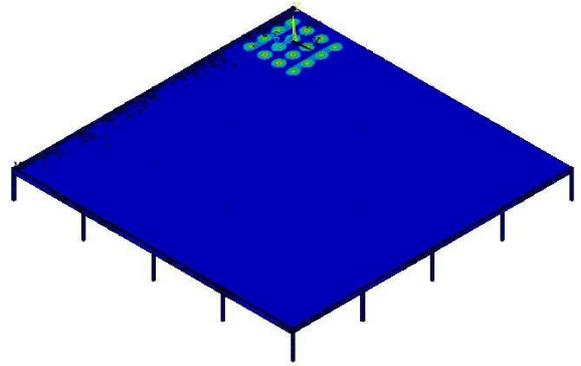


g) 16 Pessoas praticando ginástica aeróbica

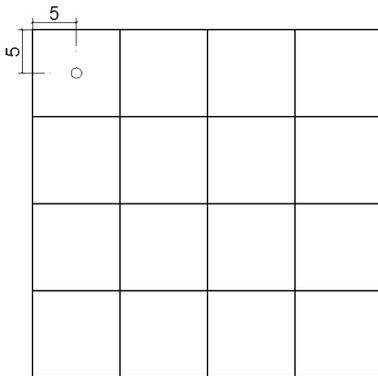
Figura 18 – Distribuição do modelo de carregamento (caso IV - cotas em metro)



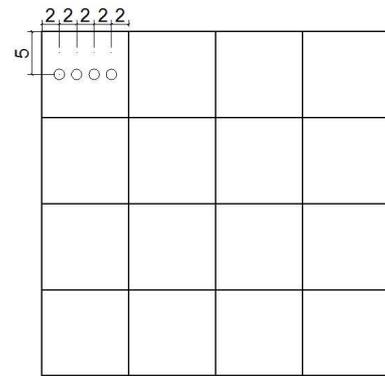
a) Caso de carregamento (caso V)



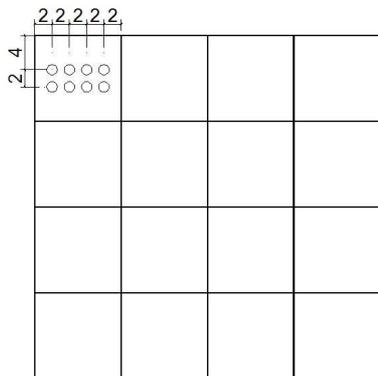
b) Posicionamento do carregamento (ANSYS)



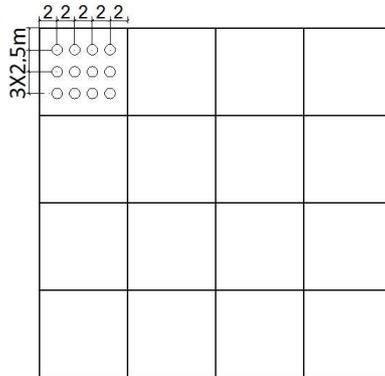
c) 1 Pessoa praticando ginástica aeróbica



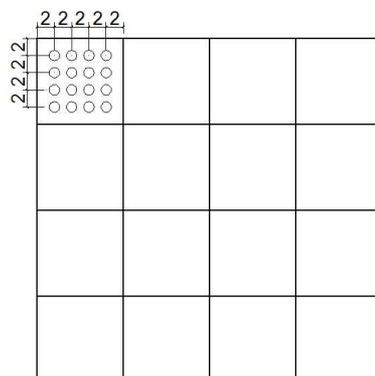
d) 4 Pessoas praticando ginástica aeróbica



e) 8 Pessoas praticando ginástica aeróbica



f) 12 Pessoas praticando ginástica aeróbica



h) 16 Pessoas praticando ginástica aeróbica

Figura 19 – Distribuição do modelo de carregamento (caso V - cotas em metro)

3 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

3.1 Generalidades

Os modelos numéricos foram desenvolvidos utilizando-se técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS [3]. Para o sistema estrutural misto (aço-concreto) com interação total, as vigas e as colunas de aço dos modelos são simuladas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM44 (Figura 22), onde os efeitos de flexão e torção são considerados. A laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca SHELL63 (Figura 23). Para a modelagem das ligações viga-viga flexíveis (ligações rotuladas) foi empregado o elemento COMBIN7 (Figura 24) e para a simulação das ligações viga-viga semirrígidas foi utilizado o elemento COMBIN39 (Figura 25).

3.2 Descrição dos Elementos Finitos

O elemento BEAM44 (Figura 22) 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 22 – .

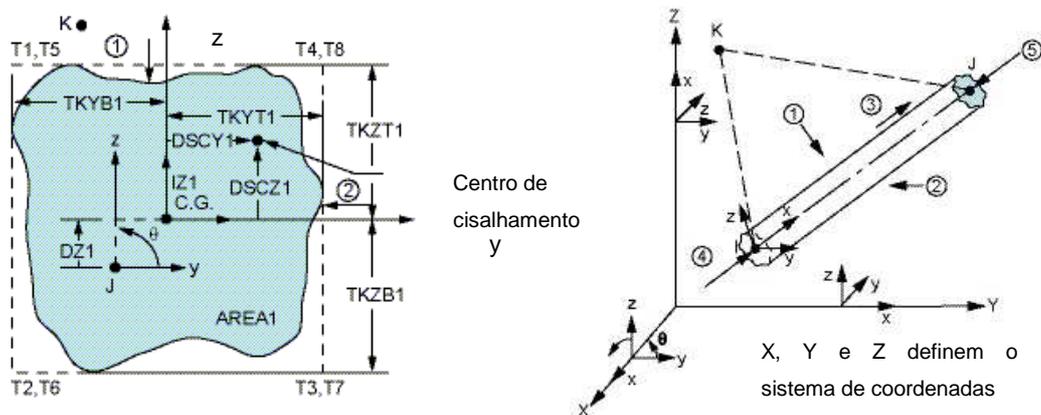


Figura 22 – Elemento BEAM 44 [3]

O elemento SHELL63 (Figura 23) é definido por quatro nós. Este 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.

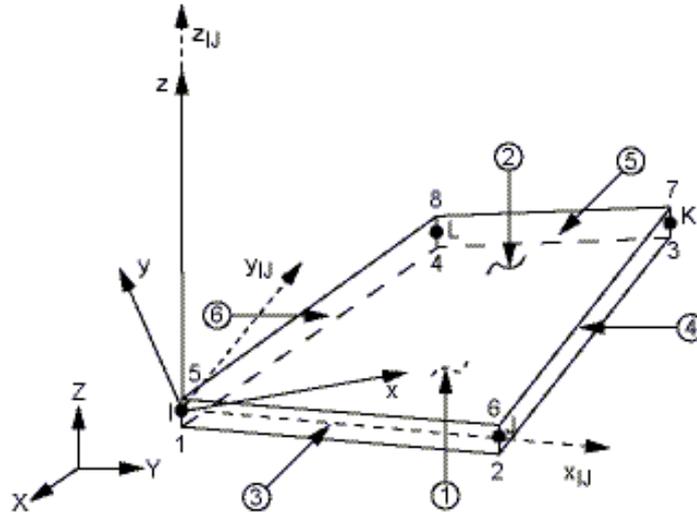


Figura 23 – Elemento SHELL 63 [3]

O elemento COMBIN7 (Figura 24) é um elemento de ligação 3-D que pode ser utilizado para conectar duas ou mais partes de um modelo em um ponto comum. O elemento possui capacidade de flexão, sendo definido por um sistema de coordenadas locais fixados, sendo largamente usado para a simulação de rótulas em sistemas estruturais.

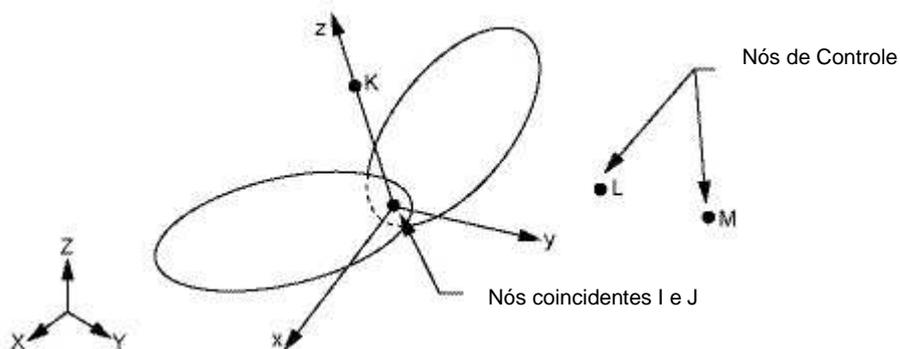


Figura 24 – Elemento COMBIN7 [3]

O elemento COMBIN39 (Figura 25) é um elemento não-linear unidirecional com capacidade de força-deflexão generalizada que pode ser usado em qualquer análise. O elemento possui grande capacidade de torção longitudinal com até três graus de liberdade em cada nó, possuindo ainda grande capacidade de deslocamento.

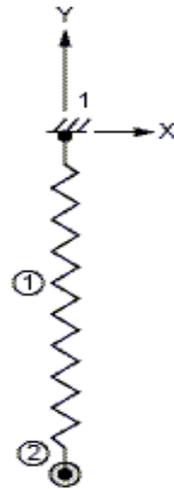


Figura 25 – Elemento COMBIN39 [3]

São utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “off-set”, de forma a se garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de casca SHELL63 e os elementos de viga tridimensionais BEAM44, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto (aço-concreto), com interação total.

A excentricidade (e) pode ser vista no esquema da Figura 26. 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.

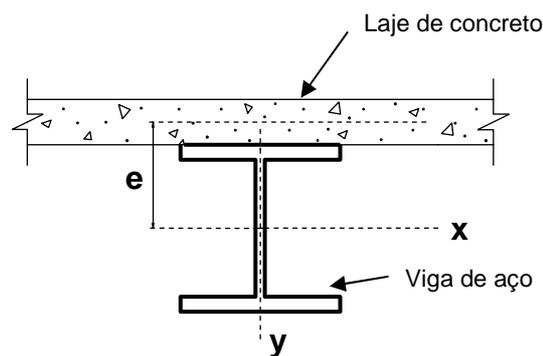


Figura 26 – Excentricidade entre a laje e a viga [4]

3.3 Hipóteses Simplificadoras

Objetivando-se a implementação computacional de um modelo matemático, mediante o emprego do método dos elementos finitos, de forma a traduzir mais realisticamente o efeito das ligações estruturais são adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras na presente análise:

- a) Assume-se a hipótese clássica de Bernoulli na qual se considera que a seção transversal dos elementos permanece plana e normal ao eixo baricêntrico destes, antes e após as deformações. Os efeitos de empenamento e distorção das seções não são considerados nesta modelagem;
- b) Considera-se que as tensões impostas não causam plastificação na seção transversal dos elementos. Todavia, efeitos de segunda ordem são levados em conta na análise, sendo esta do tipo não-linear geométrica;
- c) O material é considerado como possuindo um comportamento elástico e isotrópico. As não-linearidades são provenientes da flexibilidade das ligações viga-viga e das modificações na geometria do modelo;
- d) Considera-se que a rigidez das ligações pode ser aproximada de forma conveniente por funções matemáticas;
- e) O elemento de mola rotacional, representativo das ligações viga-viga, possui comprimento zero;
- f) Postula-se que a curva momento *versus* rotação utilizada na análise dinâmica de todos os modelos estudados é a mesma utilizada na análise estática [20]
- g) Para a análise dos modelos investigados neste trabalho foi considerado um comportamento elástico-linear para os materiais aço e concreto armado. Considera-se, também, interação completa (interação total) entre os dois materiais.

3.4 Modelagem Numérico-Computacional

Com base em ensaios numéricos realizados em trabalhos de pesquisas anteriores [4], a dimensão da malha de elementos finitos adotada para este trabalho de pesquisa foi de 0,25m (25cm), no que diz respeito aos elementos estruturais associados as vigas e colunas e 0,25m x 0,25m (25cm x 25cm) para as laje de concreto armado.

A escolha desta discretização levou em consideração a certeza de uma boa discretização da malha, no que tange à resposta dinâmica não-linear da estrutura investigada (frequências naturais, modos de vibração, deslocamentos e acelerações), como também a distribuição das pessoas sobre os pisos

Deste modo, busca-se atender a uma boa distribuição e, bem como, variação do número de pessoas aplicadas sobre o piso. Na sequência do texto, as Figuras 27, 28 e 29 apresentam os modelos analisados nesta dissertação de mestrado (Modelos I, II e III), discretizado via elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional ANSYS [3].

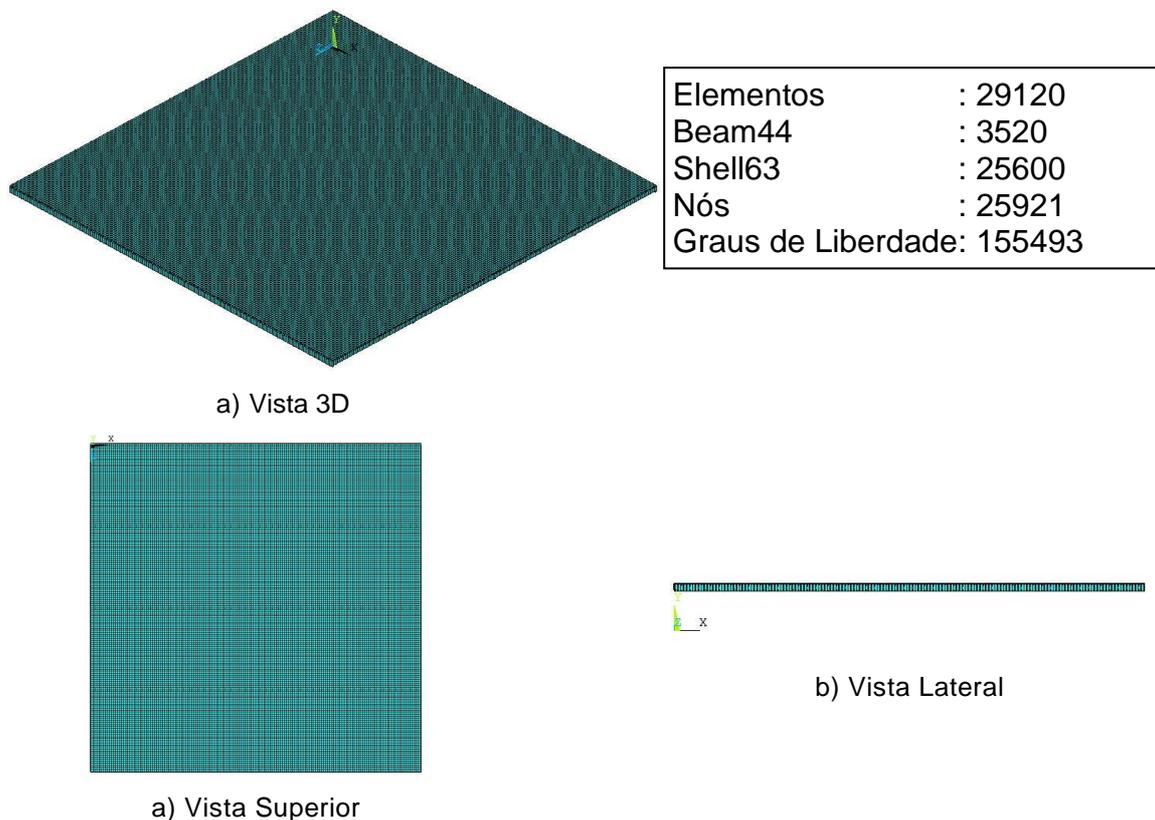


Figura 27 – Malhas de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural I (rígido)

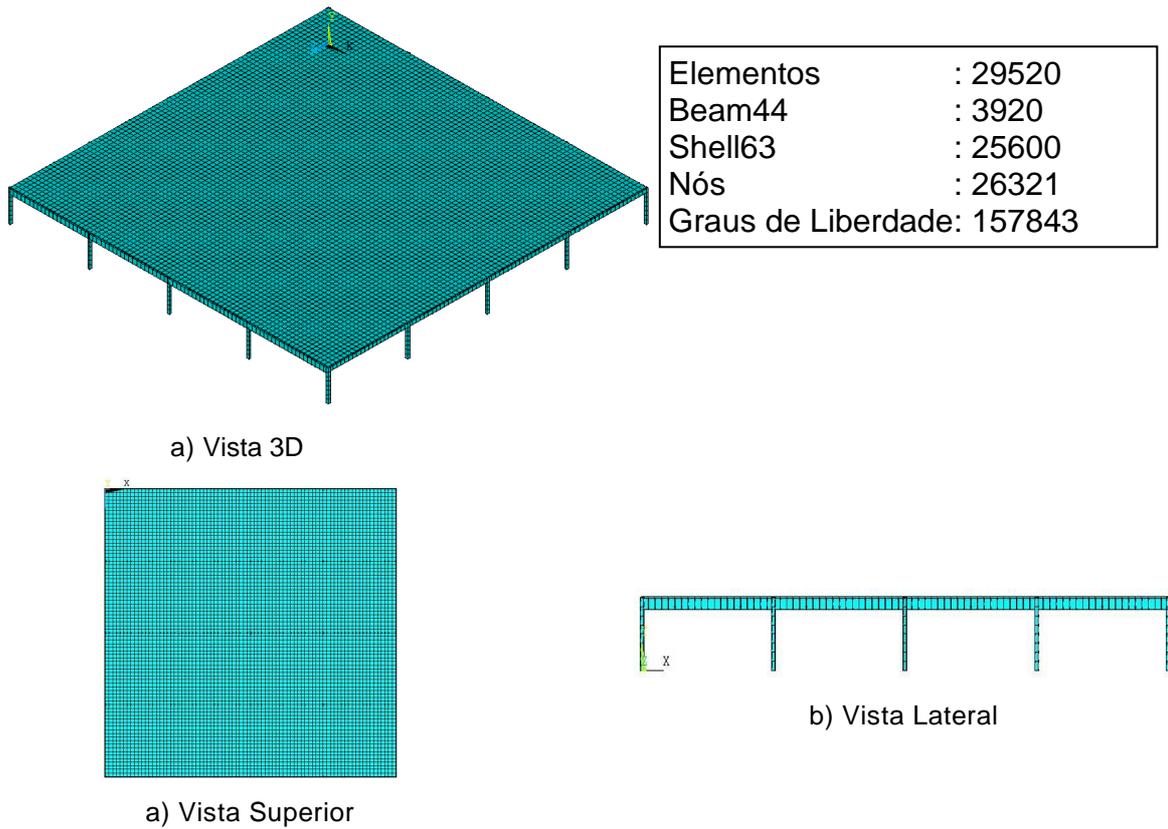


Figura 28 – Malha de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural II (rígido)

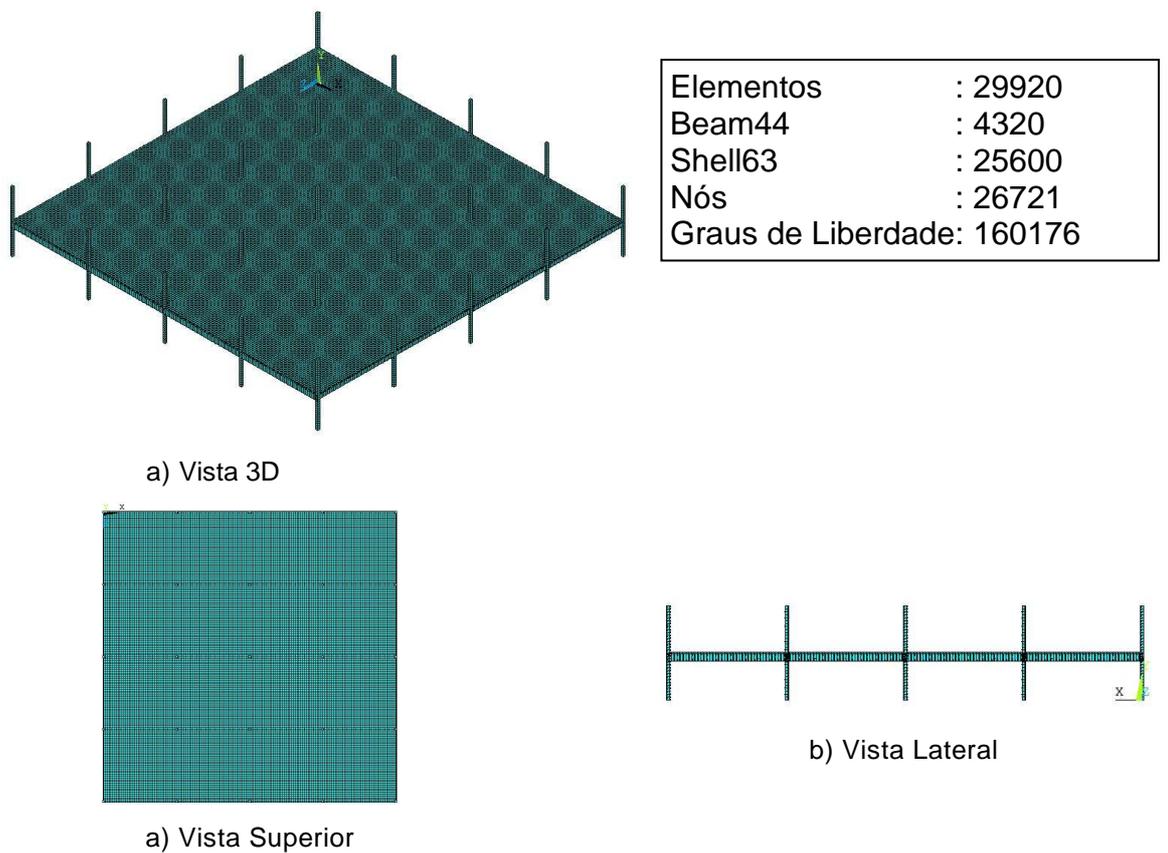


Figura 29 – Malha de elementos finitos correspondentes ao Modelo Estrutural III (rígido)

3.5 Modelagem do Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural 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.

A avaliação física do amortecimento de uma estrutura só é considerada corretamente medida se seus valores são obtidos através de ensaios experimentais. Entretanto, a realização destes ensaios muitas das vezes demanda tempo e custo que na maioria dos casos é muito elevado. Por esta razão, o amortecimento é geralmente obtido em termos de taxas de contribuição.

É usual utilizar-se a matriz de amortecimento de Rayleigh Clough e Penzien [36], que considera uma contribuição da matriz de rigidez (β) e uma taxa de contribuição da matriz de massa (α), que pode ser vista através da Equação 3. Sendo que M é a matriz de massa e K é a matriz de rigidez do sistema.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

Em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), a equação acima pode ser reescrita como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (4)$$

Onde: ξ_i : taxa de amortecimento do modo i ;

ω_{0i} : frequência natural circular do modo $i = 2 \text{ i } f_{ni}$

Isolando α e β da equação (4) para duas frequências naturais mais relevantes da análise dinâmica realizada, tem - se que:

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2 \omega_{o2} - \xi_1 \omega_{o1})}{\omega_{o2} \omega_{o2} - \omega_{o1} \omega_{o1}} \quad (6)$$

A partir de duas frequências naturais é possível descobrir os valores de α e β . Em geral, a frequência natural ω_{o1} é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e ω_{o2} como a segunda frequência mais importante no carregamento.

O guia de projeto do AISC [15], 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 1% ($\xi = 1\% = 0,01$) em todas as análises formuladas para o piso em questão.

No próximo capítulo será analisado o comportamento dinâmico das estruturas, inicialmente com base na análise de suas frequências naturais e modos de vibração.

4 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS (AUTOVALORES) E MODOS DE VIBRAÇÃO (AUTOVETORES)

4.1 Generalidades

A resposta dinâmica do piso estudado é determinada, inicialmente, mediante a obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração dos modelos. Em seguida, com o objetivo de avaliar o nível de conforto humano dos modelos estudados, de acordo com a metodologia de análise proposta, são obtidos, também, os valores das acelerações máximas dos mesmos (acelerações de pico). O problema de autovalor, associado a uma análise de vibração livre, é resolvido com base no emprego do programa computacional ANSYS [3], objetivando identificar as frequências naturais e os respectivos modos de vibração da edificação estudada.

4.2 Análise das Frequências Naturais (Autovalores)

De acordo com as análises de vibração livre realizadas, pelo programa ANSYS [3], sobre os modelos estruturais apresentados, foram obtidos os valores das frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores).

Na análise numérica foram obtidos os valores representativos das frequências naturais até o sexto modo de vibração para cada um dos modelos desenvolvidos (rígido, semirrígido e flexível). Os valores das frequências naturais dos modelos estudados estão apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 - Frequências naturais do Modelo Estrutural I

Frequências Naturais (Hz)	Modelo I – Sem coluna		
	Rígido	Semirrígido	Flexível
f_{01}	6,58	5,71	5,38
f_{02}	6,70	6,08	5,73
f_{03}	7,07	6,18	5,77
f_{04}	7,15	6,48	6,11
f_{05}	7,29	6,69	6,34
f_{06}	7,31	7,01	6,48

Tabela 7 - Frequências naturais do Modelo Estrutural II

Frequências Naturais (Hz)	Modelo II – Com coluna inferior		
	Rígido	Semirrígido	Flexível
f_{01}	0,72	0,71	0,71
f_{02}	1,20	1,19	1,19
f_{03}	1,22	1,21	1,21
f_{04}	6,75	5,82	5,48
f_{05}	6,83	6,17	5,78
f_{06}	7,19	6,18	5,82
f_{07}	7,21	6,47	6,10
f_{08}	7,25	6,81	6,37
f_{09}	7,31	6,87	6,46

Tabela 8 - Frequências naturais do Modelo Estrutural III

Frequências Naturais (Hz)	Modelo III – Com coluna inferior e superior		
	Rígido	Semirrígido	Flexível
f_{01}	1,03	1,02	1,02
f_{02}	1,74	1,73	1,73
f_{03}	1,75	1,75	1,75
f_{04}	6,69	6,19	5,60
f_{05}	7,02	6,51	5,92
f_{06}	7,34	6,56	5,95
f_{07}	7,38	6,80	6,23
f_{08}	7,46	7,08	6,49
f_{09}	7,48	7,18	6,56

Observando-se os valores das frequências naturais percebe-se uma redução nos valores destas frequências quando os modelos flexíveis e semirrígidos são comparadas com os modelos rígidos. Tal fato indica coerência, no que tange aos modelos desenvolvidos, uma vez que a diminuição da rigidez global da estrutura (com a massa da estrutura mantida constante) acarreta em uma redução das frequências naturais dos pisos, em especial da frequência fundamental da estrutura, Tabelas 6 a 8.

Deve-se ressaltar que nas Tabelas 7 e 8, as três primeiras frequências (f_{01} , f_{02} e f_{03}), correspondem, respectivamente, aos três primeiros modos de vibração com preponderância de amplitudes modais das colunas de aço dos modelos (Modelo II: Figuras 34a, 34c e 34e. Modelo III: Figuras 36a, 36c e 36e).

Em seguida, as Figuras 30 até 32 apresentam os gráficos representativos da variação da primeira frequência natural (f_{01} : frequência fundamental) dos modelos estruturais aqui estudados, segundo a parametrização da rigidez da ligação viga-viga adotada. A variação da rigidez da ligação está definida na abscissa do gráfico, enquanto que a ordenada indica a frequência fundamental em Hz.

Observando-se os gráficos (Figuras 30 a 32) constata-se que a variação da frequência fundamental apresenta um comportamento altamente não-linear até a rigidez da ligação viga-viga considerada igual a $10S_j$ (S_j : rigidez inicial da ligação), e a partir deste valor é verificado um comportamento com pouca variação, quase constante em todos os modelos. Foi verificada, também, uma variação máxima da ordem de 15% quando são comparados os valores da frequência fundamental dos modelos flexíveis, semirrígidos e rígidos.

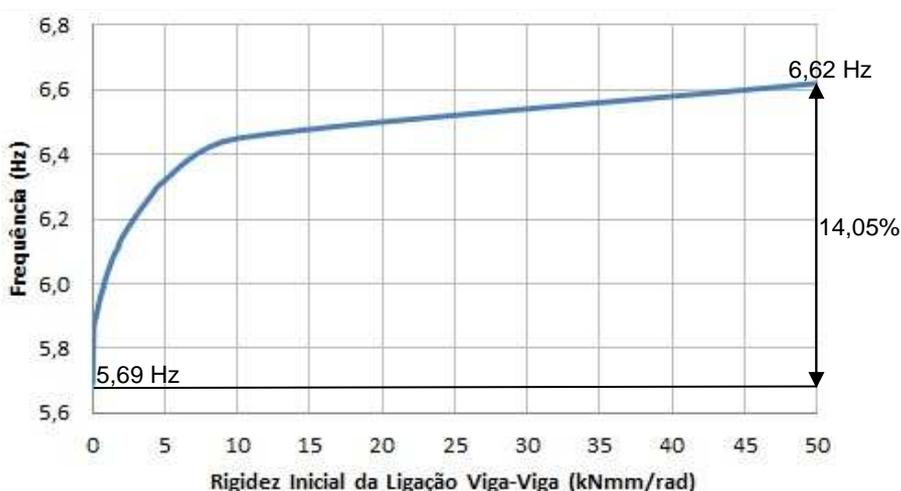


Figura 30 – Curvas de frequências do Modelo I

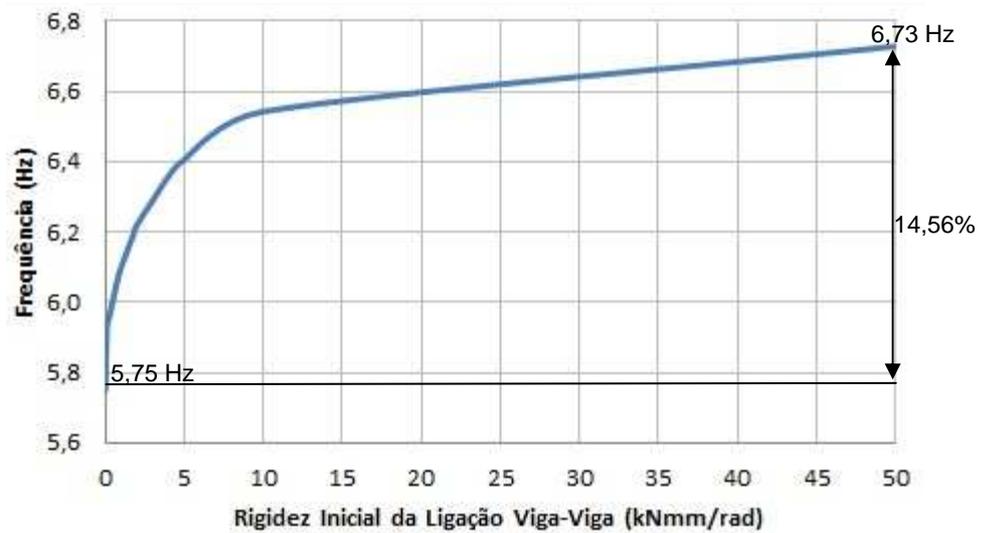


Figura 31 – Curvas de frequências do Modelo II

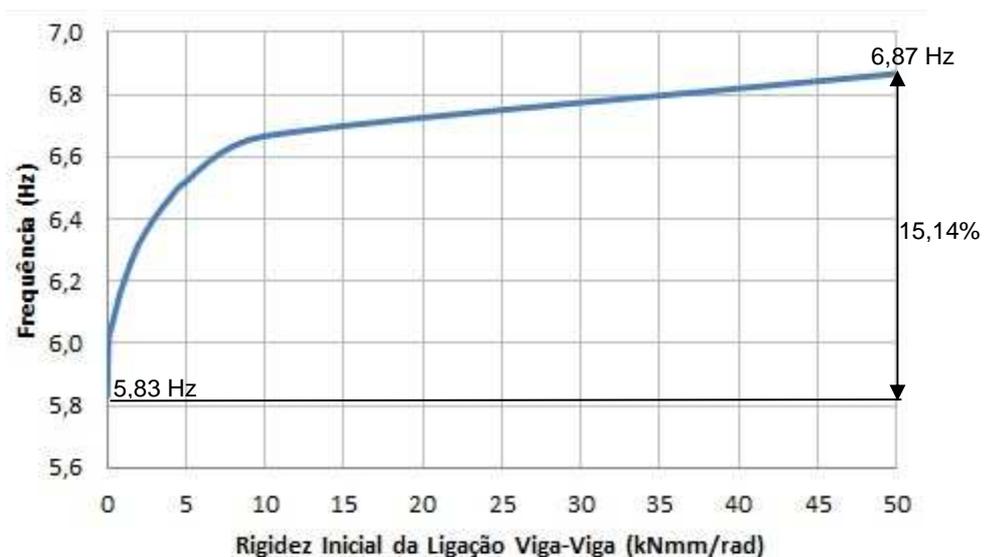


Figura 32 – Curvas de frequências do Modelo III

4.3 Análise dos Modos de Vibração (Autovetores)

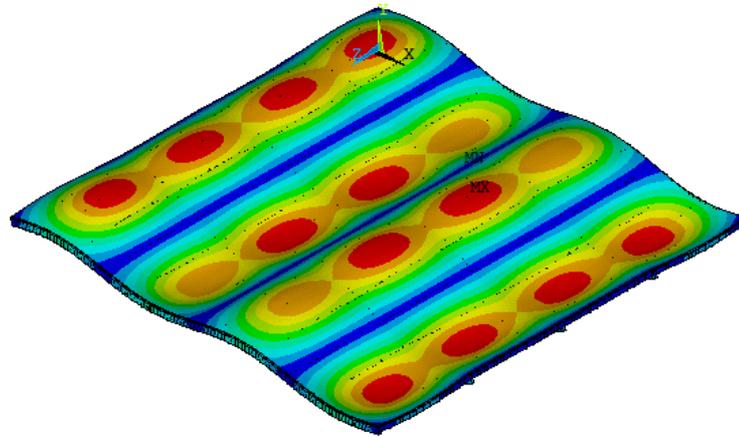
Na sequência do texto são apresentados, nas Figuras 33 a 36, as formas modais referentes a frequência fundamental (f_{01}) dos Modelos Estruturais (ME-I, ME-II e ME-III), correspondentes ao tipo de ligação estrutural analisada (rígidas, semirrígidas ou flexíveis). Em complemento, na Figura 34, são apresentadas as formas modais referentes a frequência fundamental (f_{01}), correspondente as ligações

estruturais (rígida, semirrígida e flexível) do Modelo Estrutural II, bem como os três modos representativos de coluna referente a ligação rígida deste modelo.

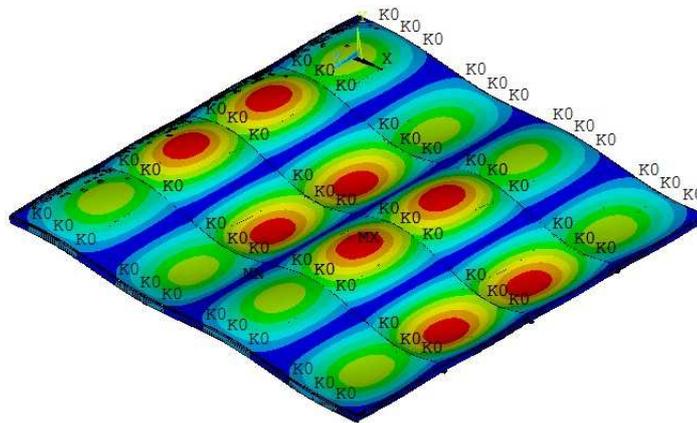
Observando as Figuras 33 a 36, percebe-se, de modo geral, que em todos os casos estudados, independentemente das ligações estruturais (rígidas, semirrígidas ou flexíveis), o primeiro modo de vibração dos modelos apresenta predominância dos efeitos de flexão e no segundo modo predomina os efeitos de torção (Figura 35). Todavia, essas formas modais apresentam modificações na medida em que a rigidez das ligações viga-viga do piso é modificada. Outro ponto a ser destacado diz respeito a pouca influência da consideração da rigidez real das colunas de aço, no que diz respeito à frequência fundamental dos modelos estruturais investigados neste trabalho de pesquisa.

Inicialmente, na Figura 33 são apresentados os modos fundamentais (f_{01}) do Modelo Estrutural I (ME-I), onde observa-se que independente da ligação estrutural analisada (rígida, semirrígida ou flexível), para este primeiro modo de vibração, ocorre a predominância dos efeitos de flexão do piso. Fato similar ocorre para os demais modelos estruturais analisados, o que se pode verificar através das Figuras 34 a 36, referentes aos Modelos Estruturais II e III.

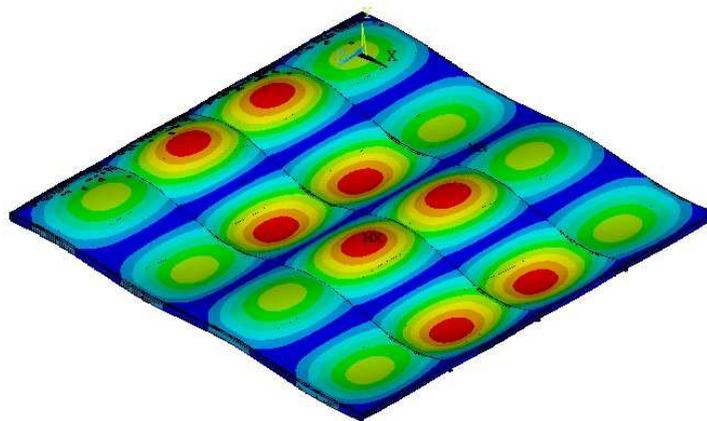
Nas Figuras 34 e 36 foram apresentados os três modos de vibração de coluna (f_{01} - coluna, f_{02} - coluna e f_{03} - coluna) respectivamente para o Modelo Estrutural II (ME-II) e Modelo Estrutural III (ME-III), onde no 2º modo de coluna observa-se o efeito de torção das colunas, enquanto no 1º e 3º modo de coluna observa-se o efeito de flexão das mesmas.



a) Modelo I: ligações rígidas ($f_{01}=6,58\text{Hz}$).

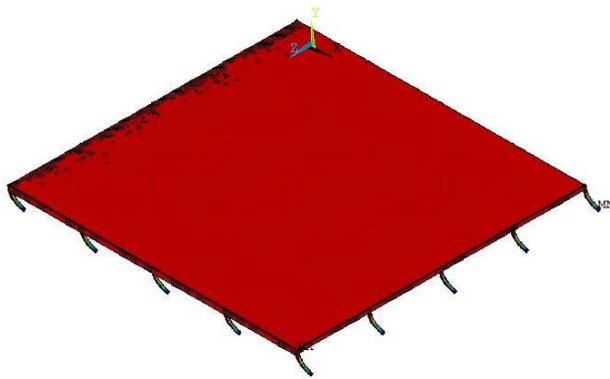


b) Modelo I: ligações semirrígidas ($f_{01}=5,71\text{Hz}$).

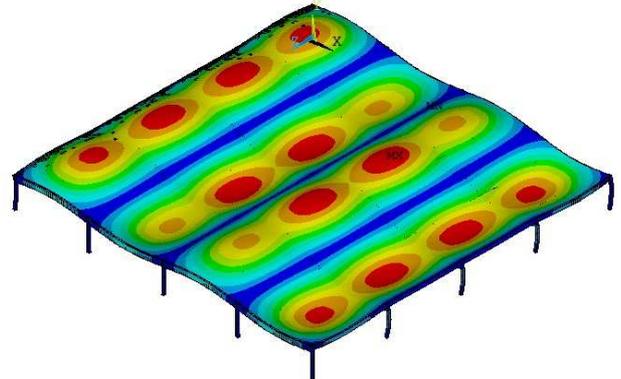


c) Modelo I: ligações flexíveis ($f_{01}=5,38\text{Hz}$).

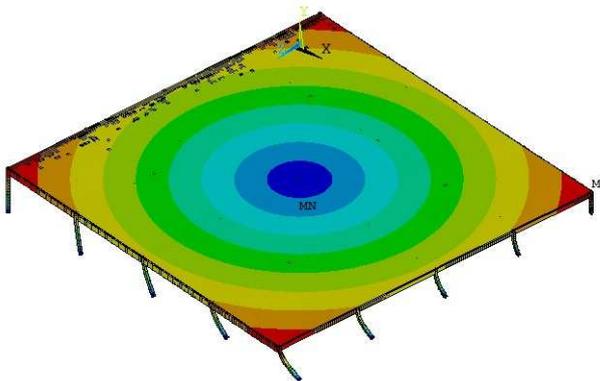
Figura 33 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural I: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis



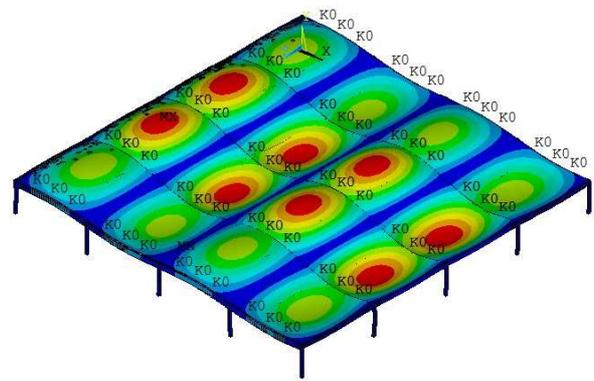
a) Modelo II: ligações rígidas
(f_{01} – coluna = 0,72Hz)



b) Modelo II: ligações rígidas ($f_{01}=6,75$ Hz).



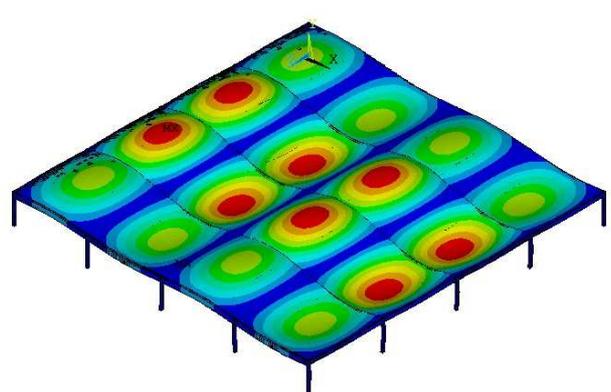
c) Modelo II: ligações rígidas
(f_{02} – coluna = 1,20Hz)



d) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{01}=5,82$ Hz)



e) Modelo II: ligações rígidas
(f_{03} – coluna = 1,22Hz)



f) Modelo II: ligações flexíveis ($f_{01}=5,48$ Hz).

Figura 34 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural II: ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis

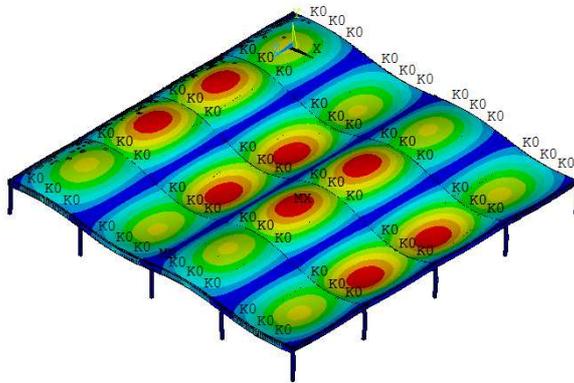
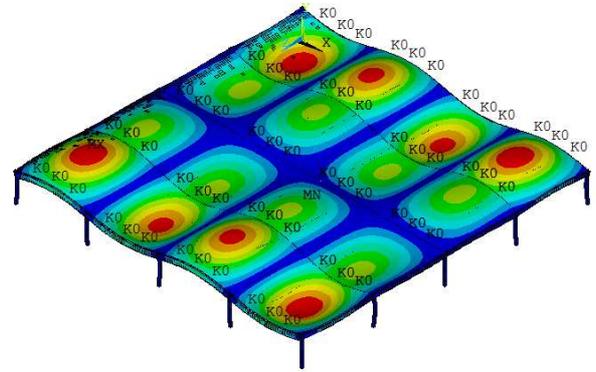
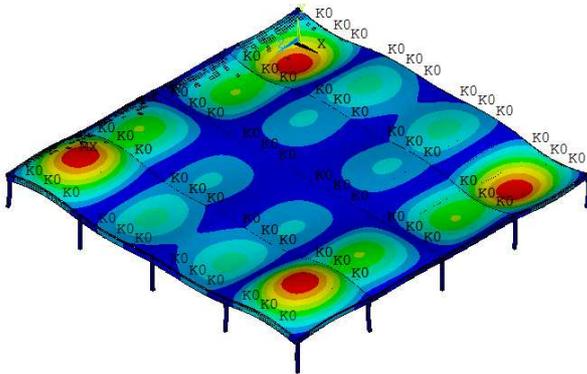
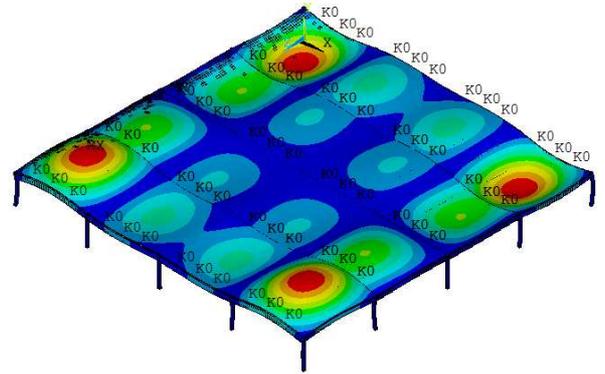
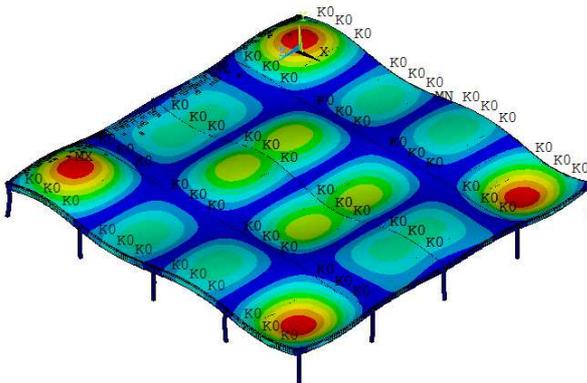
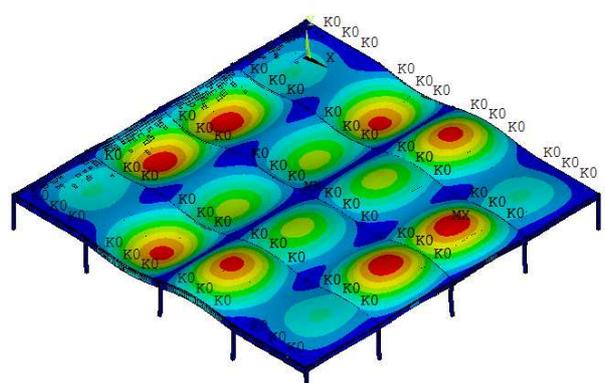
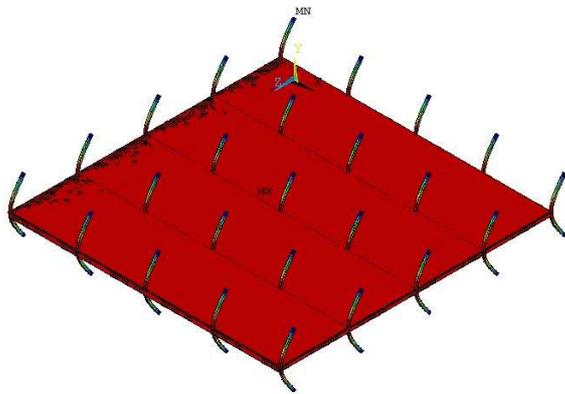
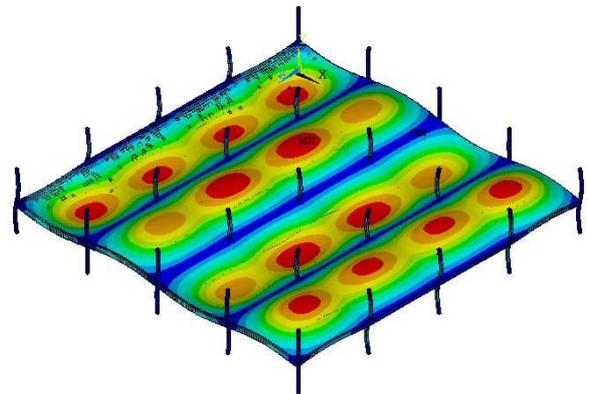
a) Modelo II: ligações semi-rígida ($f_{01} = 5,82\text{Hz}$)b) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{02} = 6,17\text{Hz}$).c) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{03} = 6,18\text{Hz}$)d) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{04} = 6,47\text{Hz}$).e) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{05} = 6,81\text{Hz}$)f) Modelo II: ligações semirrígidas ($f_{06} = 6,87\text{Hz}$).

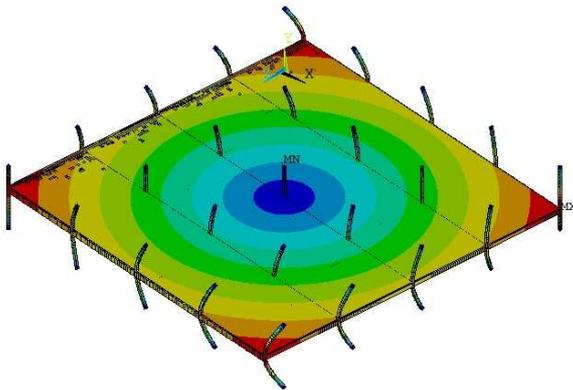
Figura 35 – Modos de vibração do modelo estrutural II: ligações semirrígidas



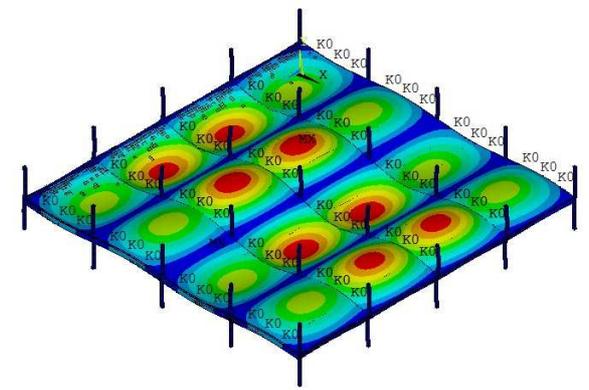
a) Modelo III: ligações flexíveis
(f_{01} – coluna = 1,02Hz)



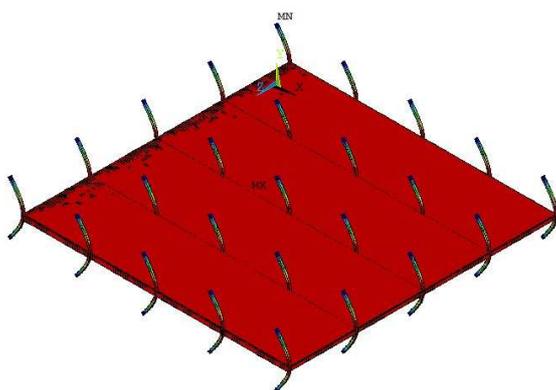
b) Modelo III: ligações rígidas ($f_{01} = 6,69$ Hz).



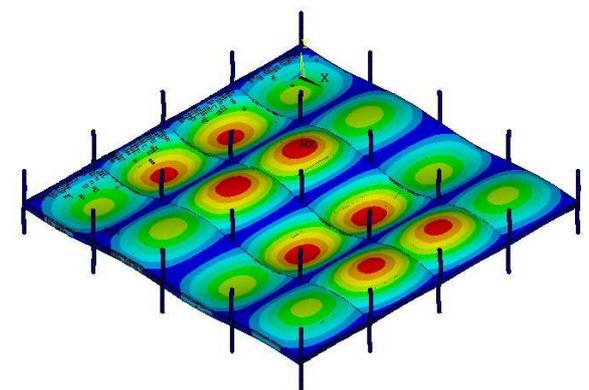
c) Modelo III: ligações flexíveis
(f_{02} – coluna = 1,73Hz)



d) Modelo III: ligações semirrígidas ($f_{01} = 6,19$ Hz).



e) Modelo III: ligações flexíveis
(f_{03} – coluna = 1,75Hz)



f) Modelo III: ligações flexíveis ($f_{01} = 5,60$ Hz).

Figura 36 – Modo fundamental de vibração. Modelo estrutural III.

Ligações: rígidas, semirrígidas e flexíveis

Finalmente, na Figura 35 foram apresentados os seis primeiros modos de vibração do Modelo Estrutural II (ME-II), ligação estrutural (viga-viga) semi-rígida, onde percebe-se que, conforme observado anteriormente, o 1º modo apresenta claramente o efeito de flexão do piso, enquanto que nos demais modos de vibração a uma predominância do efeito de torção, porém associado ao efeito de flexão.

A seguir, o capítulo seis apresenta as acelerações de pico dos modelos estruturais mistos (aço-concreto) estudados, de forma a avaliar-se o conforto humano dessas edificações.

5 ESTUDO DO CONFORTO HUMANO

5.1 Aspectos Gerais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise dinâmica não-linear geométrica do Modelo Estrutural II. As análises procuraram avaliar o comportamento dinâmico do piso, no que tange ao desconforto humano oriundo de ações dinâmicas provenientes de ações humanas (ginástica aeróbica e saltos a vontade). Ressalta-se que as acelerações verticais máximas do piso são calculados e comparados com os limites propostos por normas e recomendações de projeto [15], [31] e [32]. Para tanto, são realizadas análises de vibração forçada através da utilização do programa computacional ANSYS [3].

5.2 Análise Dinâmica do Domínio do Tempo

Na sequência do estudo, as Figuras 37 a 39 apresentam a resposta dinâmica não-linear geométrica do piso, ao longo do tempo, em termo dos deslocamentos translacionais verticais e das acelerações dos modelos estruturais, a fim de avaliar o comportamento dinâmico das estruturas mistas (aço-concreto), quando submetidas a atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos a vontade), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações. As respostas dinâmicas foram obtidas no centro dos setores identificados na Figura 13, de acordo com o caso de carregamento (Figura 14) e o modelo estrutural analisado (Figuras 27 a 29), considerando-se ainda, o tipo de ligação estrutural apresentado (rígida, semi-rígida ou flexível).

Nesta dissertação de mestrado foram realizadas análises de vibração forçada. Todas as análises são realizadas por meio do programa computacional ANSYS [3]. Os resultados das análises de vibração forçada são obtidos em termos dos deslocamentos e acelerações máximas, provenientes da aplicação dos carregamentos dinâmicos descritos anteriormente.

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 [31], ISO 2631-2 [32] e AISC [15] e são expressos em função da aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), ou seja, em porcentagem de g (% g).

Neste trabalho de pesquisa foram realizados 87 (oitenta e sete) análises de carregamento, sendo setenta e cinco para os casos de carregamento de I a V e doze para os casos de carregamento VI e VII (Figuras 14), cabendo ressaltar que todas as análises de carregamento foram realizadas para o Modelo Estrutural II (Figura 28).

Para os casos de carregamento de I a V, foram realizados setenta e cinco análises, sendo quinze para cada caso, variando-se o número de pessoas em 1, 2, 4, 8, 12, 24 e 32 pessoas, cuja posição varia em posições simétricas em relação ao centro do setor analisado, de acordo com o caso de carregamento, utilizando-se uma taxa de distribuição de $0,25 \text{ pessoas/m}^2$, sendo ainda todos esses casos analisados para a atividade rítmica de ginástica aeróbica, variando-se ainda o tipo de ligação estrutural (rígida, semi-rígida ou flexível).

Para os casos de carregamento VI e VII, foram realizados doze análises, sendo seis para cada caso, utilizando 32 pessoas distribuídas uniformemente sobre o piso, de acordo com as Figuras 20 e 21, conforme o caso de carregamento, sendo ainda todos esses casos analisados para as atividades rítmicas de ginástica aeróbica e saltos a vontade, variando-se ainda o tipo de ligação estrutural (rígida, semi-rígida ou flexível).

As grandezas de deslocamentos e acelerações foram obtidas considerando-se os casos de carregamento citados anteriormente, onde os carregamentos são aplicados simetricamente em relação ao centro do referido setor, de acordo com uma taxa de distribuição de $0,25 \text{ pessoas/m}^2$. Para tal foram utilizados os seguintes parâmetros médios: $T_{\text{médio}}$ ($T=0,44\text{s}$, $T_c=0,34\text{s}$ e $K_p=2,78$, (Tabela 3) e o coeficiente CD obtido de acordo com o número de pessoas, conforme descrito na Tabela 4. O peso de um ser humano foi considerado como sendo igual a 800N [9]. O amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi = 1\% = 0,01$) [15].

Na ordenada dos gráficos referentes as Figuras 37 a 39, são apresentados os valores dos deslocamentos translacionais verticais (parte da esquerda) e das

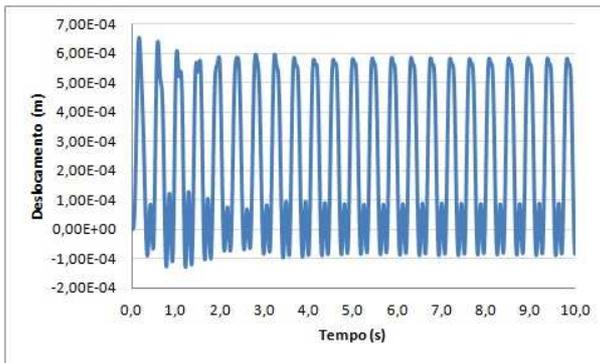
respectivas acelerações (parte da direita). O tempo é ilustrado no eixo das abcissas. Verifica-se que os sinais no tempo, apresentados nessas figuras, apresentam um trecho inicial correspondente à fase transiente dos modelos. Neste trecho dos gráficos alguns picos se apresentam com maior preponderância, mas percebe-se que a resposta dinâmica tem o seu valor amortecido, ao longo do tempo, e a fase permanente é alcançada rapidamente.

Os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 37 e 38 referem-se ao Modelo Estrutural II, caso de carregamento VI (Figura 14), ligação estrutural rígida e semi-rígida respectivamente, para o carregamento de 32 pessoas praticando a atividade de ginástica aeróbica e os resultados apresentados nos gráficos da Figura 39 referem-se ao Modelo Estrutural II, caso de carregamento II (Figura 14), ligação estrutural Semi-rígida, para o carregamento de 4, 8, 12 e 16 pessoas praticando a atividade de ginástica aeróbica. Devido ao fato que o caráter geral da resposta dinâmica dos demais modelos não é modificado de forma significativa, em termos qualitativos, no que tange aos aspectos quantitativos da resposta, associados aos valores das acelerações de pico de cada modelo estrutural, estes serão analisados de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 9 a 25.

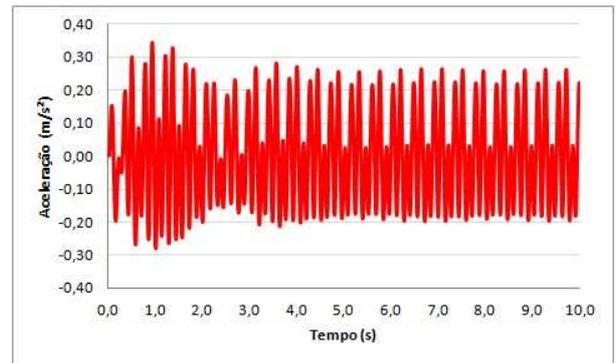
O intervalo de integração utilizado nas análises numéricas foi igual a 0,002 s ($\Delta t = 2 \times 10^{-3} \text{ s} = 0,002 \text{ s}$), pois foi verificado que esse intervalo de integração atende convenientemente às características dinâmicas dos modelos e, também, à representação dos carregamentos propostos.

É importante ressaltar que todos os pisos estudados nesta seção foram verificados estaticamente quanto ao método do estado limite, com base na NBR 8800 [37]. Esta metodologia de cálculo não é apresentada, pois o objetivo principal desse trabalho é a análise dinâmica dos modelos.

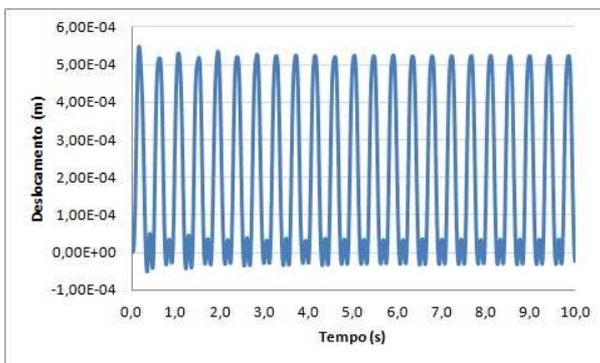
Com base nos resultados obtidos nos gráficos da Figura 39 pode-se observar que os valores dos deslocamentos e das acelerações aumentam com o aumento do número de pessoas praticando atividade dinâmica rítmica, ginástica aeróbica, ou seja, os valores mínimos foram obtidos nos casos de carregamentos referentes a uma pessoa e os valores máximos foram obtidos para carregamentos referentes a dezesseis pessoas, para todos os casos de carregamento analisados neste trabalho de pesquisa, concluindo que os valores dos deslocamentos e das acelerações do piso são proporcionais ao número de pessoas que pratica a atividade rítmica.



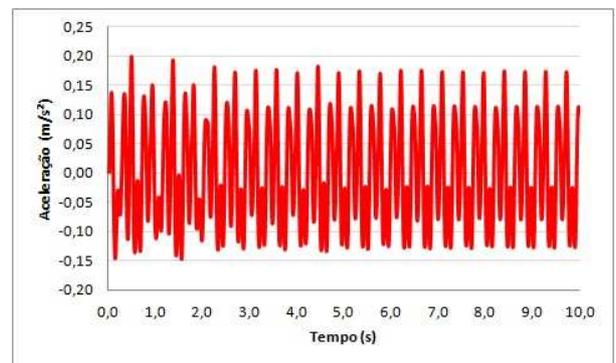
a) Deslocamento (Nó A)



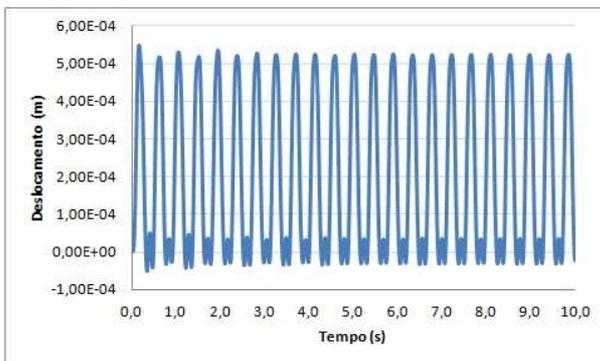
b) Aceleração (Nó A)



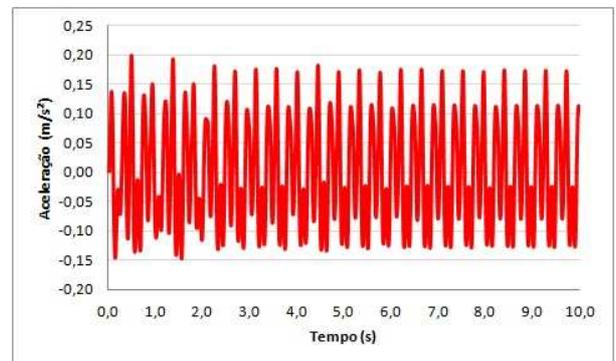
c) Deslocamento (Nó B)



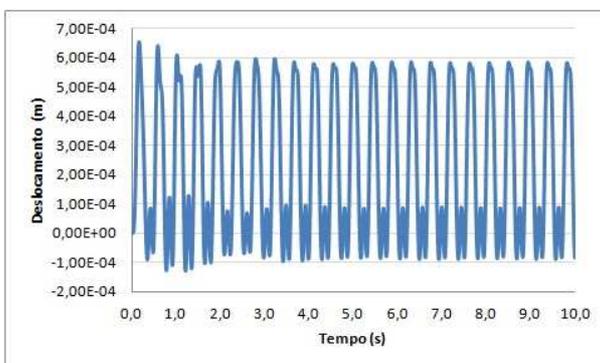
d) Aceleração (Nó B)



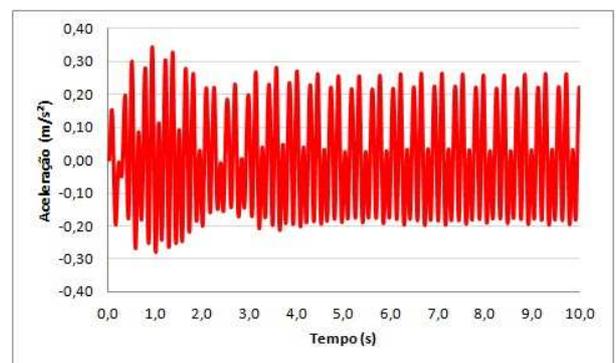
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)

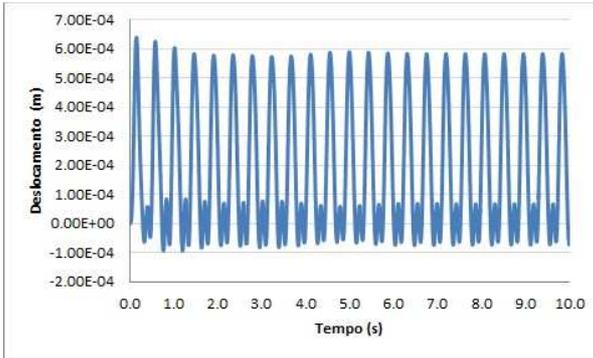


g) Deslocamento (Nó D)

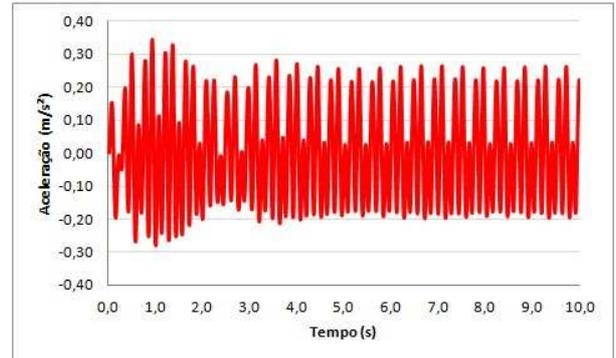


h) Aceleração (Nó D)

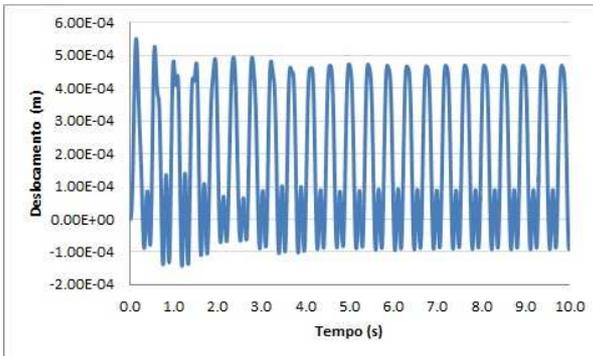
Figura 37 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Rígido
Modelo Estrutural II. Caso de Carregamento VI. Ginástica Aeróbica



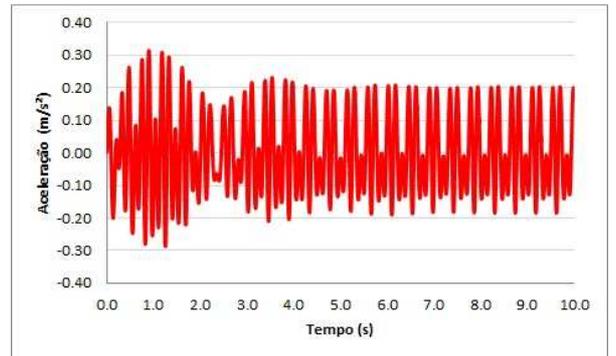
a) Deslocamento (Nó A)



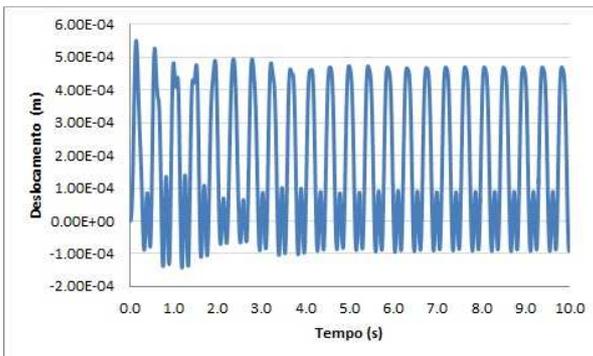
b) Aceleração (Nó A)



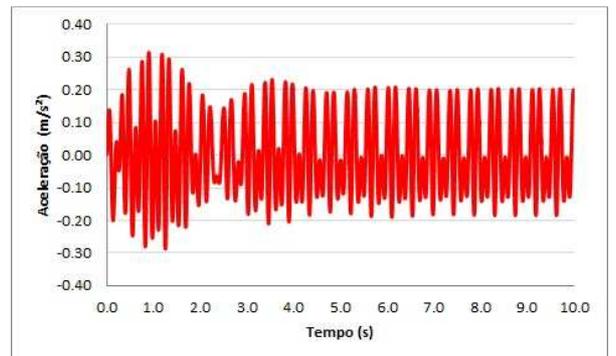
c) Deslocamento (Nó B)



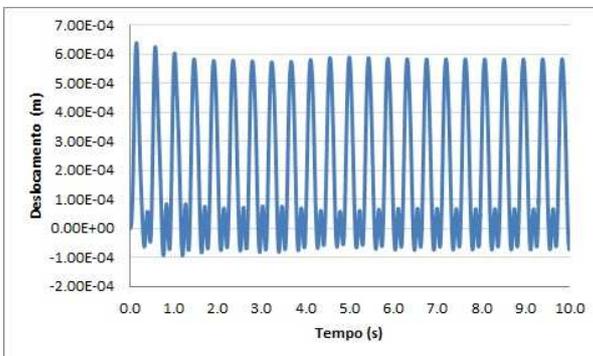
d) Aceleração (Nó B)



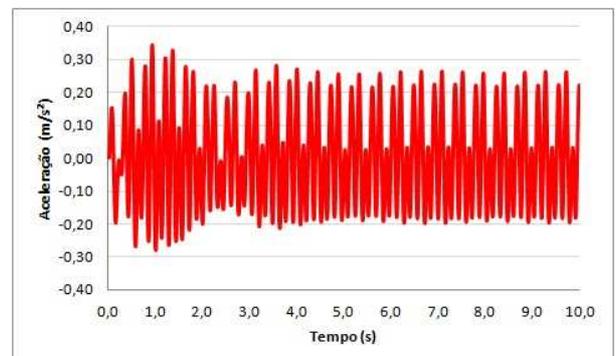
e) Deslocamento (Nó C)



f) Aceleração (Nó C)

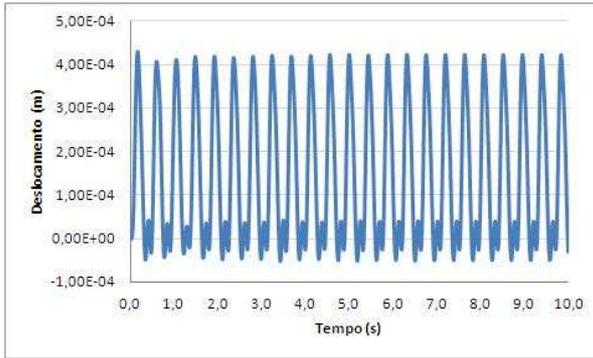


g) Deslocamento (Nó D)

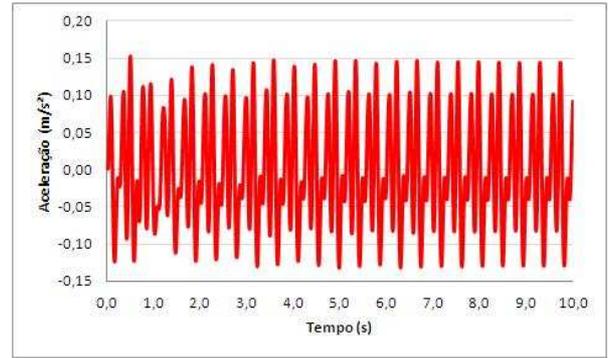


h) Aceleração (Nó D)

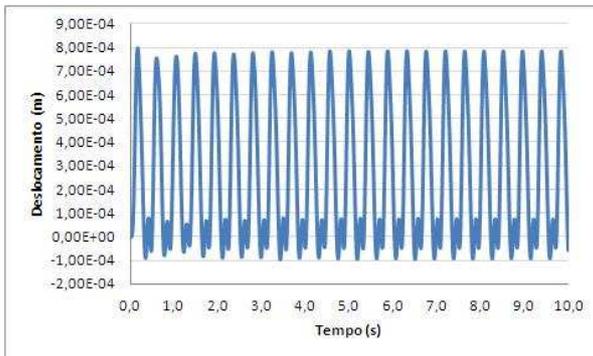
Figura 38 – Deslocamentos e acelerações. 32 Pessoas. Semirrígido Modelo Estrutural II. Caso de Carregamento VI. Ginástica Aeróbica



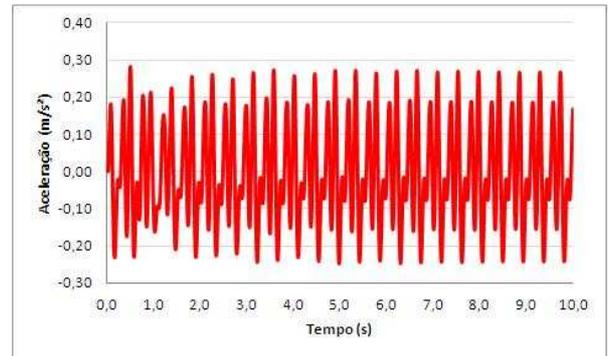
a) Deslocamento 4 pessoas



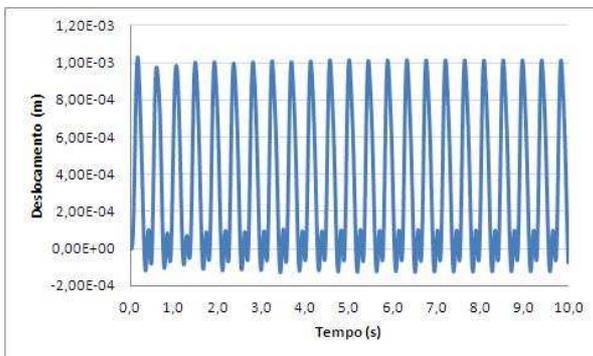
b) Aceleração 4 Pessoas



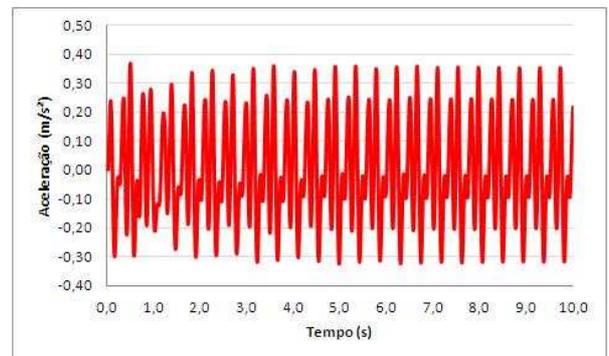
c) Deslocamento 8 pessoas



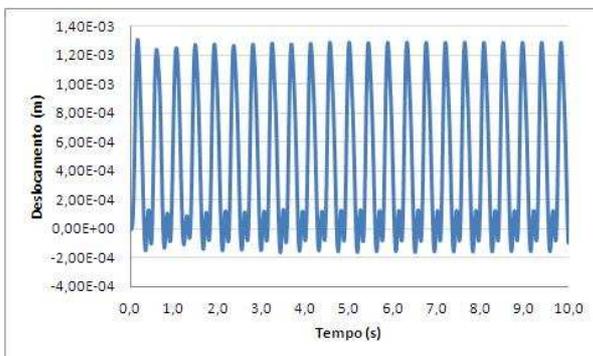
d) Aceleração 8 pessoas



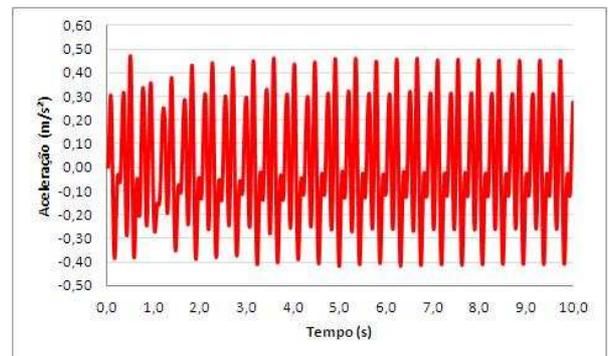
e) Deslocamento 12 pessoas



f) Aceleração 12 pessoas



g) Deslocamento 16 pessoas



h) Aceleração 16 pessoas

Figura 39 – Deslocamentos e acelerações. (Nó B – Figura 16). Semirrígido
Modelo Estrutural II. Caso de Carregamento II. Ginástica Aeróbica

Observando-se os valores apresentados nas Figuras 37 e 38, percebe-se, claramente, um aumento nos valores das acelerações de pico dos modelos estruturais quando o modelo semirrígidos é comparado com os modelo rígido, sendo que esse fato já era esperado quando da avaliação dos valores das frequências dos modelos, descritos nas Tabelas 6 a 8, onde observa-se que a frequência dos modelos rígidos são maiores do que as frequências dos modelos semirrígidos.

Ressalta-se, também, que as ligações semirrígidas e flexíveis são consideradas apenas nas ligações entre as vigas principais e secundárias (ligações viga-viga). As ligações entre as vigas principais e as colunas são do tipo rígidas (ligações viga-coluna). Por outro lado, os modelos computacionais que consideram todas as ligações como sendo rígidas (modelos rígidos), inclusive as ligações viga-viga, serviram apenas para um estudo numérico, no âmbito da análise paramétrica, pois sabe-se que na prática corrente de projeto as ligações viga-viga são consideradas, geralmente, como sendo rotuladas.

5.3 Análise das Acelerações Máximas ou Acelerações de Pico

Na sequência, são apresentados os valores das acelerações de pico dos modelos estruturais analisados, com o objetivo de avaliar o nível de conforto humano dos modelos estruturais mistos (aço-concreto), quando submetidas a atividades rítmicas humanas (ginástica aeróbica e saltos a vontade), no que tange ao desconforto humano oriundo das vibrações.

As respostas dinâmicas foram obtidas no centro dos setores identificados na Figura 13, de acordo com o caso de carregamento (Figura 14) e o modelo estrutural analisado, considerando-se ainda, o tipo de ligação estrutural apresentado (rígida, semi-rígida ou flexível).

Foram utilizados os seguintes parâmetros para a definição da ação dinâmica, correspondente a ginástica aeróbica: $T_{\text{médio}}$: $T=0,44\text{s}$, $T_c=0,34\text{s}$ e $K_p=2,78$ (Tabela 3) e o coeficiente CD obtido de acordo com o número de pessoas (Tabela 4). O peso de um ser humano foi considerado como sendo igual a 800N [9] e o amortecimento estrutural em todas as análises foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi = 1\% = 0,01$) [15].

Na sequência, as Tabelas 9 a 13 apresentam os valores obtidos para as acelerações de pico, a_p , no que tange ao Modelo Estrutural II, para os respectivos casos de carregamento descritos abaixo:

Caso de carregamento I (Tabela 9), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (1x2), para o carregamento dinâmico de 1, 4, 8, 12 e 16 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme ilustrado na Figura 15, e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x2), nó B no setor (2x2) e nó C no setor (1x3).

Carregamento II (Tabela 10), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x2), para o carregamento dinâmico de 1, 4, 8, 12 e 16 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme ilustrado na Figura 16 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x2), nó B no setor (2x2) e nó C no setor (1x3).

Caso de carregamento III (Tabela 11), as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x2 e 2x2), para o carregamento dinâmico de 2, 8, 16, 24 e 32 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme ilustrado na Figura 17 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x2), nó B no setor (2x2) e nó C no setor (1x3).

Caso de carregamento IV (Tabela 12), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (2x1), para o carregamento dinâmico de 1, 4, 8, 12 e 16 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme ilustrado na Figura 18 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (2x1), nó B no setor (1x1) e nó C no setor (2x2).

Caso de carregamento V (Tabela 13), as cargas estão aplicadas no setor de carregamento (1x1), para o carregamento dinâmico de 1, 4, 8, 12 e 16 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme ilustrado na Figura 19 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x1), nó B no setor (1x2) e nó C no setor (1x3).

Tabela 9 - Acelerações de pico. Caso de carregamento I. Ginástica aeróbica

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,03	0,02	0,01	0,06	0,03	0,02	0,07	0,04	0,03
4	0,10	0,05	0,03	0,17	0,07	0,08	0,18	0,08	0,10
8	0,19	0,08	0,05	0,33	0,14	0,15	0,34	0,15	0,17
12	0,25	0,12	0,07	0,43	0,18	0,21	0,44	0,19	0,25
16	0,32	0,16	0,08	0,55	0,24	0,25	0,60	0,26	0,31
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 10 - Acelerações de pico. Caso de carregamento II. Ginástica aeróbica

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,02	0,03	0,01	0,03	0,05	0,02	0,04	0,08	0,03
4	0,05	0,10	0,02	0,07	0,14	0,04	0,08	0,21	0,06
8	0,08	0,18	0,04	0,13	0,27	0,08	0,14	0,37	0,09
12	0,11	0,23	0,06	0,18	0,35	0,11	0,19	0,44	0,12
16	0,15	0,30	0,08	0,23	0,45	0,14	0,24	0,55	0,15
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 11 - Acelerações de pico. Caso de carregamento III. Ginástica aeróbica

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,03	0,03	0,01	0,08	0,06	0,03	0,09	0,09	0,04
4	0,08	0,07	0,02	0,20	0,17	0,08	0,21	0,24	0,09
8	0,15	0,13	0,03	0,40	0,34	0,18	0,45	0,40	0,19
12	0,20	0,17	0,04	0,51	0,45	0,25	0,55	0,50	0,26
16	0,25	0,22	0,05	0,65	0,55	0,30	0,68	0,77	0,32
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 12 - Acelerações de pico. Caso de carregamento IV. Ginástica aeróbica

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,05	0,03	0,02	0,07	0,03	0,05	0,12	0,04	0,04
4	0,10	0,08	0,05	0,20	0,10	0,26	0,23	0,10	0,11
8	0,27	0,15	0,11	0,31	0,17	0,37	0,42	0,17	0,19
12	0,36	0,21	0,15	0,51	0,25	0,27	0,55	0,24	0,27
16	0,44	0,26	0,23	0,60	0,30	0,29	0,70	0,30	0,30
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 13 - Acelerações de pico. Caso de carregamento V. Ginástica aeróbica

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,06	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,06	0,03	0,016
4	0,18	0,08	0,08	0,20	0,10	0,081	0,30	0,10	0,080
8	0,40	0,17	0,09	0,45	0,18	0,10	0,43	0,18	0,09
12	0,46	0,21	0,20	0,51	0,25	0,25	0,55	0,26	0,13
16	0,53	0,28	0,27	0,61	0,32	0,30	0,65	0,30	0,15
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Analisando-se os valores das acelerações de pico (Tabelas 9 a 13), percebe-se que o valor máximo encontrado no presente estudo foi da ordem de $0,77\text{m/s}^2$ (Tabela 12), no que diz respeito ao modelo flexível (ligações viga-viga flexíveis). Este valor de aceleração máxima foi obtido no centro do painel de laje onde foi aplicado o carregamento dinâmico associado a 16 pessoas (Caso de carregamento III: nó B – Figura 14c).

Foi verificado que quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo semirrígidas, o valor máximo de aceleração no referido painel (Caso de carregamento III: nó B – Figura 14c) foi reduzido para $0,55\text{m/s}^2$ (Tabela 12), constatando-se a influência positiva destas ligações sobre a resposta dinâmica não-linear geométrica do piso. De outra forma, quando estas ligações são consideradas do tipo rígidas, o valor de aceleração de pico é reduzido ainda mais assumindo o valor de $0,22\text{m/s}^2$. (Tabela 12).

Considerando-se os valores das frequências naturais (ver Tabela 7) do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II – Figura 28), correspondentes aos modos de vibração com preponderância das amplitudes modais das lajes de concreto do piso, constata-se que estes valores encontram-se relativamente

próximos da frequência do terceiro harmônico da ação dinâmica humana rítmica ($f = 3 \times 2\text{Hz} = 6\text{Hz}$), o que ocasiona valores elevados para as acelerações, em determinadas situações, em consonância com o aumento do número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso.

Considerando-se o parágrafo acima, foi observado que quanto maior o número de pessoas praticando ginástica aeróbica, com frequência de excitação igual ou mesmo próximas de frequências naturais do piso, relacionadas a modos de vibração com preponderância de amplitudes modais das lajes de concreto, maiores serão os valores das acelerações de pico. Tal fato caracteriza o fenômeno da ressonância.

Finalmente, constata-se que, em várias situações, os valores das acelerações de pico obtidos nesta investigação encontram-se acima do limite estabelecido em normas e recomendações de projeto ($a_{\text{lim}} = 0,5\text{m/s}^2$ [15] e [32]), o que acarreta em violação dos critérios de conforto humano, no que tange as atividades de ginástica aeróbica.

Investigando-se, agora, os resultados apresentados nas Tabelas 14 a 25, as quais apresentam os valores obtidos para as acelerações de pico, a_p , no que tange ao Modelo Estrutural II, para os respectivos casos de carregamento descritos abaixo:

Caso de carregamento VI, as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 2x1, 3x1 e 4x1), para o carregamento dinâmico de 32 pessoas praticando ginástica aeróbica (Tabelas 14 a 16) e Saltos a vontade (Tabelas 17 a 19), conforme ilustrado na Figura 20 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x1), nó B no setor (2x1), nó C no setor (3x1), nó D no setor (4x1), nó E no setor (1x2), nó F no setor (2x2), nó G no setor (3x2) e nó H no setor (4x2).

Caso de carregamento VII, as cargas estão aplicadas nos setores de carregamento (1x1, 1x2, 1x3 e 1x4), para o carregamento dinâmico de 32 pessoas praticando ginástica aeróbica (Tabelas 20 a 22) e Saltos a vontade (Tabelas 23 a 25), conforme ilustrado na Figura 21 e as acelerações de pico foram obtidas na fase permanente de resposta, com referência ao centro do setor analisado do piso, sendo nó A no setor (1x1), nó B no setor (1x2), nó C no setor (1x3), nó D no setor (1x4), nó E no setor (2x1), nó F no setor (2x2), nó G no setor (2x3) e nó H no setor (2x4).

Tabela 14 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI.
Ginástica aeróbica. nós A, B e C

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
32	0,26	0,17	0,17	0,28	0,20	0,20	0,30	0,44	0,43
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 15 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI
Ginástica aeróbica. nós D, E e F

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F
32	0,26	0,035	0,035	0,28	0,087	0,036	0,30	0,088	0,09
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 16 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI
Ginástica aeróbica. nós G e H

Número de Pessoas	Modelo Rígido		Modelo Semirrígido		Modelo Flexível	
	a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)	
	G	H	G	H	G	H
32	0,09	0,04	0,1	0,08	0,23	0,09
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²						

Tabela 17 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI
Saltos a vontade. nós A, B e C

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
32	0,15	0,11	0,11	0,18	0,20	0,20	0,30	0,44	0,44
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 18 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI
Saltos a vontade. nós D, E e F

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F
32	0,15	0,04	0,02	0,18	0,08	0,03	0,30	0,09	0,23
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 19 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VI
Saltos a vontade. nós G e H

Número de Pessoas	Modelo Rígido		Modelo Semirrígido		Modelo Flexível	
	a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)	
	G	H	G	H	G	H
32	0,02	0,04	0,04	0,08	0,23	0,09
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²						

Tabela 20 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Ginástica aeróbica. nós A, B e C

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
32	0,32	0,34	0,33	0,44	0,45	0,37	0,54	0,55	0,56
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 21 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Ginástica aeróbica. nós D, E e F

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F
32	0,31	0,29	0,24	0,32	0,40	0,40	0,55	0,41	0,42
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 22 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Ginástica aeróbica. nós G, e H

Número de Pessoas	Modelo Rígido		Modelo Semirrígido		Modelo Flexível	
	a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)	
	G	H	G	H	G	H
32	0,23	0,29	0,24	0,30	0,30	0,34
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²						

Tabela 23 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Saltos a vontade. nós A, B e C

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
32	0,23	0,24	0,24	0,31	0,37	0,37	0,54	0,53	0,56
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 24 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Saltos a vontade. nós D, E e F

Número de Pessoas	Modelo Rígido			Modelo Semirrígido			Modelo Flexível		
	a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)			a_p (m/s ²)		
	D	E	F	D	E	F	D	E	F
32	0,23	0,16	0,13	0,31	0,24	0,22	0,55	0,33	0,25
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²									

Tabela 25 - Acelerações de pico. Caso de carregamento VII
Saltos a vontade. nós G, e H

Número de Pessoas	Modelo Rígido		Modelo Semirrígido		Modelo Flexível	
	a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)		a_p (m/s ²)	
	G	H	G	H	G	H
32	0,13	0,16	0,22	0,24	0,25	0,33
Aceleração Limite [15], [32]: $a_{lim} = 0,50$ m/s ²						

Com referência a ginástica aeróbica, analisando-se os valores das acelerações máximas, verifica-se, novamente, que estes valores foram obtidos no modelo flexível (ligações viga-viga flexíveis), sendo da ordem de $0,55\text{m/s}^2$ (Tabelas 20 e 21). Estes valores máximos foram obtidos no centro de cada painel de laje onde foi aplicada ação dinâmica associada a 32 pessoas (Caso de carregamento VII: Nós A, B, C e D – Figura 14g). Por outro lado, quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo semirrígidas, o valor máximo de aceleração nestes painéis sofreu pouca redução, no caso para $0,45\text{m/s}^2$ (Tabelas 20 e 21). Quando estas ligações são consideradas do tipo rígidas, o valor de aceleração de pico é reduzido ainda mais, assumindo o valor da ordem de $0,30\text{m/s}^2$.(Tabelas 20 e 21).

Considerando-se, agora, a atividade humana correspondente aos saltos a vontade, os valores das acelerações de pico ocorrem nos modelos flexíveis (ligações viga-viga flexíveis), sendo da ordem de $0,55\text{m/s}^2$ (Tabelas 23 e 24). Estes valores máximos foram obtidos, novamente, no centro de cada painel de laje onde foi aplicada ação dinâmica associada a 32 pessoas (Caso de carregamento VII: Nós A, B, C e D – Figura 14g). De outra forma, quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo semirrígidas, o valor máximo de aceleração nestes painéis sofreu uma redução para $0,35\text{m/s}^2$ (Tabelas 23 e 24). No caso das ligações do tipo rígidas, o valor de aceleração de pico é reduzido ainda mais assumindo o valor da ordem de $0,20\text{m/s}^2$.(Tabelas 23 e 24).

Convém chamar a atenção do leitor, mais uma vez, para o fato de que a partir dos valores das frequências naturais (ver Tabela 7) do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II – Figura 28), correspondentes aos modos de vibração com preponderância das amplitudes modais das lajes de concreto do piso, foi verificado que estes valores encontram-se relativamente próximos da frequência do terceiro harmônico da ação dinâmica humana rítmica ($f = 3 \times 2\text{Hz} = 6\text{Hz}$), o que ocasiona valores elevados para as acelerações, em determinadas situações, em consonância com o aumento do número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso.

Observa-se, mais uma vez, que quanto maior o número de pessoas praticando ginástica aeróbica, com frequência de excitação igual ou mesmo próximas de frequências naturais do piso, relacionadas a modos de vibração com preponderância de amplitudes modais das lajes de concreto, maiores serão os valores das acelerações de pico. Tal fato caracteriza o fenômeno da ressonância.

Verifica-se, novamente, que os valores das acelerações de pico obtidos na análise destes modelos de carregamento dinâmico compostos por 32 pessoas (Figuras 14f e 14g), praticando ginástica aeróbica ou mesmo saltos a vontade sobre o piso misto (aço-concreto) investigado encontram-se acima do limite estabelecido em normas e recomendações de projeto ($a_{lim} = 0,5m/s^2$ [15] e [32]), o que acarreta em violação dos critérios de conforto humano, no que tange as atividades de ginástica aeróbica.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões deste estudo e as sugestões para trabalhos futuros, de forma a contribuir para o avanço desta linha de pesquisa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo uma verificação sobre a influência das ligações estruturais (ligações viga-viga), sobre a resposta dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) de edificações, quando submetidos a ações humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos a vontade). Para tal, desenvolve-se uma extensa análise de conforto humano, com base no emprego do método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS [3]. Assim sendo, a partir do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, tem-se como motivação a busca por soluções estruturais economicamente viáveis e que atendam a critérios estabelecidos por normas e recomendações internacionais de projeto [15], [32], proporcionando conforto humano aos usuários da edificação.

6.2 Conclusões alcançadas

A metodologia de análise proposta considera o estudo do comportamento dinâmico em regime de serviço de pisos mistos (aço-concreto). Assim sendo, foi possível avaliar o nível de vibração dos pisos, quando submetidos à ginástica aeróbica e saltos a vontade, com base na obtenção da resposta dinâmica não-linear geométrica dos modelos, em termos das acelerações máximas (acelerações de pico).

Considerando-se os resultados obtidos com base na análise dos valores das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) dos modelos estruturais analisados, percebe-se uma redução nos valores destas frequências quando os modelos compostos por ligações estruturais viga-viga flexíveis e semirrígidas são comparadas com os modelos rígidos (ligações viga-viga rígidas). Tal fato indica coerência, no que tange aos modelos numéricos desenvolvidos, uma vez que a diminuição da rigidez global da estrutura (com a

massa da estrutura mantida constante) acarreta em uma redução das frequências naturais dos pisos, em especial da frequência fundamental da estrutura.

Foi constatado que a variação da frequência fundamental dos modelos investigados apresenta um comportamento altamente não-linear até a rigidez da ligação viga-viga considerada igual a $10S_j$, e a partir deste valor é verificado um comportamento com pouca variação, quase constante em todos os modelos. Foi verificada, também, uma variação máxima da ordem de 15% quando são comparados os valores da frequência fundamental dos modelos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Tal fato pode vir a ser relevante para condições de ressonância.

Considerando-se os valores das acelerações de pico obtidos ao longo de toda a dissertação (ginástica aeróbica e saltos a vontade), os resultados da análise dinâmica não-linear geométrica revelaram que o valor máximo encontrado no presente estudo foi da ordem de $0,77\text{m/s}^2$, no que diz respeito ao modelo flexível (ligações viga-viga flexíveis). Foi verificado que quando as ligações viga-viga da estrutura foram modeladas como sendo semirrígidas, o valor máximo de aceleração no referido painel foi reduzido para $0,55\text{m/s}^2$, constatando-se a influência positiva destas ligações sobre a resposta dinâmica não-linear do piso. De outra forma, quando estas ligações são consideradas do tipo rígidas, o valor de aceleração de pico é reduzido ainda mais assumindo o valor de $0,22\text{m/s}^2$.

Considerando-se os valores das frequências naturais (ver Tabela 7) do modelo estrutural investigado (Modelo Estrutural II – Figura 28), correspondentes aos modos de vibração com preponderância das amplitudes modais das lajes de concreto do piso, percebe-se que estes valores encontram-se relativamente próximos da frequência do terceiro harmônico da ação dinâmica humana rítmica ($f = 3 \times 2\text{Hz} = 6\text{Hz}$), o que ocasiona valores elevados para as acelerações, em determinadas situações, em consonância com o aumento do número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso.

A análise de conforto humano realizada ao longo desta dissertação de mestrado permitiu concluir que quanto maior o número de pessoas praticando atividades rítmicas (ginástica aeróbica ou saltos a vontade), com frequências de excitação igual ou mesmo próximas de frequências naturais do modelo estrutural, relacionadas a modos de vibração com preponderância de amplitudes modais das lajes de piso, mais elevados serão os valores das acelerações de pico. Tal fato

caracteriza o fenômeno da ressonância e pode ser determinante para um estudo de conforto humano sobre pisos mistos de edificações.

Deve-se ressaltar que, em várias situações, os valores das acelerações de pico obtidos nesta investigação encontram-se acima do limite estabelecido em normas e recomendações de projeto ($a_{lim} = 0,5m/s^2$ [15], [32]), o que acarreta em violação dos critérios de conforto humano, no que tange as atividades de ginástica aeróbica.

Foi verificado que o tipo de ligação entre as vigas (ligações viga-viga), para o piso investigado, em algumas situações práticas de projeto, pode vir a alterar de forma significativa os valores finais das acelerações de pico. Cabe ressaltar, também, que para os casos de carregamento dinâmico considerados ao longo desta investigação (ginástica aeróbica e saltos a vontade) as ações dinâmicas possuem valores elevados, e para o projeto estrutural uma situação ideal seria a de afastar a frequência fundamental do piso das frequências inerentes a excitação humana rítmica.

O quadro global investigado nesta dissertação demonstra, claramente, um indicativo de que os critérios de projeto devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação e, especialmente, a influência das ligações estruturais (viga-viga e viga-coluna), no que tange a verificação dos estados limites de utilização (vibrações excessivas) associados ao comportamento estrutural dos pisos mistos de edificações.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, são relacionadas algumas sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros sobre os temas aqui tratados e outros correlatos.

- Realizar testes experimentais que tornariam possível uma comparação entre os resultados numéricos (frequências naturais e acelerações), com os valores obtidos experimentalmente;

- Variar outros parâmetros do carregamento tais como o período de contato e o coeficiente de impacto, além do número de pessoas representativas da ação dinâmica;
- Variar outros parâmetros associados a geometria dos modelos estruturais investigados, tais como o vão das vigas de aço ou mesmo a espessura das lajes de concreto;
- Considerar uma interação parcial entre as vigas de aço e a laje de concreto, variando o tipo de conector de cisalhamento utilizado;
- Incorporar na metodologia de análise a modelagem numérica associada a representação de dispositivos para controle das vibrações estruturais, objetivando analisar o desempenho desses dispositivos, em termos dos valores finais das acelerações de pico.

REFERÊNCIAS

- [1] INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Publicado em 07 de abril de 2011, disponível em: http://www.ifpi.edu.br/Sitio/publico/sitio_abrirNoticia;jsessionid=676587A09982CBB8429A7231A6D37622?idBusca=792. Acesso em 05 de dezembro de 2011.
- [2] CENTRO CULTURAL DE BENFICA. Publicado em 08 de maio de 2010, disponível em: <http://www.ccbenfica.net/destaques.htm> , acesso em 05 de Dezembro de 2011.
- [3] ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.
- [4] LANGER, N. A. S. Estudo do Conforto Humano em Pisos Mistos (Aço-Concreto) Submetidos a Ações Humanas Rítmicas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [5] GONÇALVES, S. G.; SILVA, J. G. S. da; LIMA, L. R. O. de; LOPES, E. D. C.; ANDRADE, S. A. L. de. Efeito das Ligações Estruturais sobre a Resposta Dinâmica Não-Linear de Pisos Mistos (Aço-Concreto). In: Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia - CMNE 2011, 2011, Coimbra. Anais do Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia - CMNE 2011. Coimbra : Editora da Universidade de Coimbra, 2011. v. 1. p. 1-14.
- [6] LOPES E. D. C., SILVA, J. G. S. da, S.A.L. de. Influência das Ligações Estruturais sobre A Resposta Dinâmica de Pisos Mistos (Aço-Concreto). CILAMCE 2010: XXXI Iberian Latin American on Computational Methods in Engineering and MECOM 2010: IX Argentinean Congress on Computational Mechanics, 2010, Buenos Aires.: Editora da AMCA (Argentine Association for Computational Mechanics), 2010. v. XXIX. p. 7399-7410

- [7] MELLO, A.V. de A. Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [8] BACHMANN, H. - Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations - Journal of Structural Engineering, Vol.118, Nº.3, 631-647, March, 1992.
- [9] BACHMANN, H e AMMANN, W, Vibrations in structures induced by man and machines, IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987.
- [10] 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.
- [11] ALVES, N. K. C.. Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- [12] CEB - Comité Euro-International du Beton, Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines, Bullitin d'information, nº 209, 1991
- [13] FAISCA, R. G., Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [14] 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.
- [15] MURRAY, T.M., ALLEN, D.E. e UNGAR, E.E., Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series, American Institute of Steel Construction, AISC, 2003.

- [16] MURRAY, T. M., Design to Prevent Floor vibration. In: Engineering Journal, v. 12, nº. 3, p. 82-87, 1975
- [17] REIHER, H. E, MEISTER, F. J., The Effect of Vibration on people. Traduzido da Forsch Geb, p 381-386, Ohio, 1946.
- [18] 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.
- [19] ALLEN, D. E.; RAINER, J. H.; PERNICA, G.. Vibration criteria for assembly occupancies. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 12, 1985, 617-623 p.
- [20] ALLEN, D. E., Floor Vibrations from Aerobics, Canadian Journal of Civil Engineering, v. 17, n. 5, pp. 771-779, 1990.
- [21] 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.
- [22] PAULA, F. A. de, 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.
- [23] BATISTA, R. C., VARELA, W. D., Medidas Corretivas para Vibrações de Painéis Contínuos de Lajes de Edifícios, XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, TRB0282, Brasília, DF, Maio, 2002.
- [24] MOREIRA, B. C., Avaliação Comparativa de Pisos e Edificações em Estrutura Metálica quanto ao Critério de Vibração, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2004.

- [25] VARELA, W. D., Modelo Teórico-Experimental para Análises de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [26] MELLO, A.V. de A.. Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PGECIV, Faculdade de Engenharia, FEN. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [27] 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>.
- [28] LOOSE, J. K.. Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos a atividades humanas rítmicas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2007.
- [29] ALMEIDA, R. R.de, Análise de Vibrações em Sistemas Estruturais para Pisos Mistos com Joists Submetidos a Atividades Humanas Rítmicas, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PGECIV, Faculdade de Engenharia, FEN. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2008.
- [30] OLIVEIRA, T.J.L., Pisos Mistos Aço-Concreto com Ligações Semirrígidas sob Ação de Cargas de Gravidade: Análise Estática Não Linear e Dinâmica, Experimental e Numérica. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2007.
- [31] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 2631-1: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Part 1: General Requirements*, Switzerland, 1985.

- [32] 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)*. International Standard, 1989.
- [33] MELLO, A.V. de A.; DA SILVA, J.G.S. da.; LIMA, L.R.O. de. Dynamical analysis for the walking induced vibrations of composite floors. CC 2005 - The Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Roma, Itália, CD-ROM, 2005, 1-15 p.
- [34] MELLO, A.V. de A. et al. Estudo do Conforto Humano em Pisos Mistos (Aço-Concreto). *Revista da Escola de Minas*, v. 60, 2007, 409-418 p.
- [35] MELLO, A.V. de A. et al. Dynamic Analysis of Composite Systems Made of Concrete Slabs and Steel Beams, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, 2008, 125-151 p.
- [36] CLOUGH, R. W. e PENZIEN, J., *Dynamics of Structures*, Mc.Graw-Hill, 1975
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Norma Brasileira para Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios - Projeto de Revisão*, Rio de Janeiro, 2008.
- [38] BRIGHAM, E.O, *The Fast Fourier Transform and its Applications*. Prentice Hal International Edition, USA, 1988.
- [39] BATISTA, R. C., VARELA, W. D., Um Modelo para Estimativa Realista das Vibrações em Estruturas Induzidas por Pessoas Caminhando. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Passo Fundo, v. 6, n. 1, 2009.
- [40] JUNGES, P, *Análise de Vibrações de uma Laje Mista de Concreto e Perfis de PRFV Induzidas por Atividades Humanas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC.

Faculdade de Engenharia, FEN. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2010.