

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE NUMÉRICA DO CONTROLE DE VIBRAÇÕES
EM LAJES DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO
AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS

MARCOS DANIEL SOUZA DOS SANTOS

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

CO-ORIENTADORA: SUZANA MOREIRA AVILA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

Publicação: E.D.M – 011A/09

BRASÍLIA/DF, setembro de 2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM
LAJES DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO AMORTECEDORES DE
MASSA SINTONIZADOS**

Eng.º MARCOS DANIEL SOUZA DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

**Profª GRACIELA N. DOZ DE CARVALHO (ENC-UnB)
(ORIENTADORA)**

**Prof MAURA ANGELICA MILFONT SHZU (FGA-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. ANDREA BRASILIANO SILVA (UFPB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA (DF), SETEMBRO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, MARCOS DANIEL SOUZA

Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados [Distrito Federal]2009.

xxi, 171, 297 mm(ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil,2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Dinâmica Estrutural

2. Controle de Vibrações

3.Amortecedor de Massa Sintonizado

4.Lajes de Concreto

I. ENC/FT/UnB

II. Título(série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, M.D.S.(2009). Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados, Publicação: EDM – 011A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília,DF, xxi, 171 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcos Daniel Souza dos Santos

TÍTULO: Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados

GRAU: Mestre

ANO: 2009

È concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcos Daniel Souza dos Santos

SHIN, CA 05, Bloco C3, Apt. 511. Lago Norte

CEP: 71503-505 – Brasília,DF

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por guiar-me sempre.

As orientadoras deste trabalho, professoras Graciela N. Doz de Carvalho e Suzana Moreira Ávila, pela paciência, apoio e idéias durante o desenvolvimento desta pesquisa. A confiança e a sinceridade que ambas tiveram em mim foi de fundamental importância para concretização deste sonho.

Aos meus pais, familiares e amigos que me ajudaram das mais variadas formas antes e durante o mestrado, os quais sei que estarão sempre apoiando minhas futuras empreitadas.

Aos colegas de mestrado, em especial Mônica, Fabrício, Marcos Honorato e Kellen, juntos formamos uma verdadeira equipe de estudo e amigos.

A Murilo Heitor que participou de toda esta etapa

A Pedro Marra por sempre afirmar que daria certo

Finalmente, em especial, aos irmãos que fiz em Brasília, Arthur, Cris e Leandro, que foram minha família nesse período e por quem sou eternamente grato.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICA DO CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM LAJES DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS.

Autor: Marcos Daniel Souza dos Santos

Orientadora: Graciela N. Doz de Carvalho

Co-orientadora: Suzana Moreira Ávila

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, setembro de 2009.

Este trabalho apresenta um estudo do problema de vibrações em lajes de concreto armado, utilizadas em geral em edifícios residenciais e comerciais. Mesmo lajes bem dimensionadas nos estados limites de utilização e de ruptura podem estar susceptíveis a vibrações excessivas que levam a um desconforto dos seus usuários. A investigação sobre este problema é iniciada a partir da obtenção das frequências naturais e modos de vibração de modelos teórico-computacionais de lajes tipo convencional com diversas configurações de apoio. Foram obtidos quatro modelos com geometria/configuração de apoio que levaram a valores baixos de frequência natural, permitindo assim uma análise no domínio do tempo, por se tratar de estrutura bastante flexível. Foi então simulado um carregamento dinâmico a partir de uma carga harmônica e em seguida, simulado um carregamento humano. No caso da ocorrência de vibrações excessivas ocorreu propor uma solução de controle por meio do uso do Amortecedor de Massa Sintonizado - AMS buscando qual a configuração mais indicada que leva a uma redução mais eficiente das vibrações através deste sistema de controle. Foram obtidos os parâmetros para o projeto mais eficiente de AMS em cada um dos quatro modelos bem como foi analisado, para o primeiro modelo de laje, a alteração que poderia ocorrer com o acréscimo de vigas e pilares na resposta dinâmica. Por fim, analisado os quatro modelos de lajes, os parâmetros obtidos foram aplicados a um exemplo prático de uma laje de academia de ginástica.

Palavras-Chave: Dinâmica das Estruturas, Controle Estrutural, Lajes, Amortecedor de Massa Sintonizado.

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF VIBRATION CONTROL IN SLABS OF BUILDINGS USING TUNED MASS DAMPER.

Autor: Marcos Daniel Souza dos Santos

Orientadora: Graciela N. Doz de Carvalho

Co-orientadora: Suzana Moreira Ávila

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, setembro de 2009.

This paper presents a study of the problem of vibration in slabs of concrete, used often in residential and commercial buildings. Even well-sized slabs in the limit state use and rupture may be susceptible to excessive vibrations that lead to discomfort of its users. Research on this problem starts from the obtainment of natural frequencies and vibration modes of theoretical and computational models of conventional type slabs with various configurations of support. We obtained four models with geometry / configuration of support that led to low natural frequency, thus allowing an analysis in time domain, because it is very flexible structure. Was then simulated a dynamic loading from a harmonic load and then simulated a human load. In the case of the occurrence of excessive vibration occurred propose a control solution through the use of Tuned Mass Damper - TMD looking to see what the most appropriate setting that leads to more efficient reduction of vibrations through this control system. Parameters were obtained for the project more efficient of TMD on each of the four models and was tested for the first slab model, a change that could occur with the addition of beams and columns in the dynamic response. Finally, considering the four models of slabs, the parameters obtained were applied to a practical example of a slab of the gym.

Keywords: Dynamics of Structures, Structural Control, Slabs, Tuned Mass Damper (TMD).

INDICE

1	INTRODUÇÃO.....	26
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	26
1.2	OBJETIVOS.....	27
1.3	METODOLOGIA	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
2.2	VIBRAÇÕES INDUZIDAS A PARTIR DE ATIVIDADES HUMANAS.....	30
2.3	CONTROLE ESTRUTURAL	36
2.4	AMORTECEDOR DE MASSA SINTONIZADO.....	40
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	45
3.1	MOVIMENTO HUMANO DE CAMINHAR E CORRER.....	45
3.2	FUNÇÃO PARA A ATIVIDADE DE PULAR.....	50
3.3	PRINCÍPIOS DO AMORTECEDOR DE MASSA SINTONIZADO	51
4	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E METODOLOGIA UTILIZADA.....	56
4.1	PROGRAMA ANSYS 10.0.....	56
4.2	DISCRETIZAÇÃO.....	57
4.2.1	Elemento <i>SHELL63</i>	57
4.2.2	Elemento <i>BEAM4</i>	57
4.2.3	Elemento <i>COMBIN14</i>	58
4.2.4	Elemento <i>MASS21</i>	58
4.3	ETAPAS E METODOLOGIA DA ANÁLISE NUMÉRICA	59
4.4	ESCOLHA DOS MODELOS DE LAJE.....	61
4.5	ANÁLISE ESTÁTICA	62

4.6	ANÁLISE MODAL	62
4.7	CARREGAMENTO HARMÔNICO	63
4.8	CARREGAMENTO HUMANO.....	63
4.9	MODELOS COM AMORTECEDORES	64
5	ANÁLISE NUMÉRICA	65
5.1	LAJE 01	65
5.1.1	Análise Modal	65
5.1.2	Análise para um carregamento harmônico	67
5.1.3	Análise para um carregamento humano	83
5.1.4	Discussão dos Resultados.....	92
5.2	LAJE 02	96
5.2.1	Análise Modal	96
5.2.2	Análise para um carregamento harmônico	97
5.2.3	Análise para um carregamento humano	101
5.2.4	Discussão dos Resultados.....	111
5.3	LAJE 03	113
5.3.1	Análise Modal	113
5.3.2	Análise para um carregamento harmônico	114
5.3.3	Análise para um carregamento humano	120
5.3.4	Discussão dos Resultados.....	126
5.4	LAJE 04	129
5.4.1	Análise Modal	129
5.4.2	Análise para um carregamento harmônico	130
5.4.3	Análise para um carregamento humano	136
5.4.4	Discussão dos Resultados.....	139
6	LAJE 05 (COM VIGAS E PILARES).....	141
6.1	Propostas de Controle.....	146
6.1.1	Proposta A.....	146
6.1.2	Proposta B.....	147
6.1.3	Proposta C.....	147
6.1.4	Proposta D.....	148

7	APLICAÇÃO PARA UM CASO PRÁTICO.....	151
7.1	LAJE DE UMA ACADEMIA DE GINÁSTICA.....	151
7.2	NOVA PROPOSTA DE CONTROLE PARA A LAJE DA ACADEMIA.....	156
7.2.1	Propostas para 1AMS.....	156
7.2.2	Propostas para 2AMS.....	159
7.2.3	Propostas para 3AMS.....	161
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	165
8.1	CONCLUSÕES.....	165
8.2	SUGESTÕES.....	167
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos representativos de atividades humanas e suas aplicações para diferentes atividades e tipos de estrutura (CEB nº209,1991).	31
Tabela 3.1 – Valores típicos de frequência do caminhar humano apresentados por outros autores (Zivanovic <i>et al</i> , 2005).....	49
Tabela 4.1 – Frequência naturais dos modelos iniciais de laje	60
Tabela 4.2 – Propriedades físicas e geométricas das Lajes.....	62
Tabela 4.3 – Deslocamentos máximos admissíveis para os 4 modelos adotados.....	62
Tabela 5.1 – Frequências naturais da Laje 01	66
Tabela 5.2 – Resposta máxima sem controle no nó central (Nó 946)	67
Tabela 5.3 – Variação de α para 1 AMS.....	69
Tabela 5.4 – Variação de ξ para 1 AMS	69
Tabela 5.5 – Variação de μ para 1 AMS.....	69
Tabela 5.6 – Parâmetros mais indicados no Estudo 01.....	70
Tabela 5.7 – Variação de α para 2 AMS.....	72
Tabela 5.8 – Variação de ξ para 2 AMS	73
Tabela 5.9 – Variação de μ para 2 AMS.....	73
Tabela 5.10 – Parâmetros mais indicados do Estudo 02.....	73
Tabela 5.11 – Variação de α para 3 AMS.....	75
Tabela 5.12 – Variação de ξ para 2 AMS	75
Tabela 5.13 – Parâmetros mais indicados do Estudo 03.....	76
Tabela 5.14 – Resposta máxima sem controle.....	77

Tabela 5.15 – Variação de α para 3 AMS.....	78
Tabela 5.16 – Resposta máxima sem controle.....	79
Tabela 5.17 – Variação de α para 1 AMS.....	79
Tabela 5.18 – Variação de α para 3 AMS.....	80
Tabela 5.19 – Resposta máxima sem controle.....	81
Tabela 5.20 – Variação de α para 1 AMS.....	81
Tabela 5.21 – Variação de α para 3 AMS.....	82
Tabela 5.22 – Resposta máxima sem controle.....	84
Tabela 5.23 – Variação de α para 1 AMS.....	85
Tabela 5.24 – Variação de ξ para 1 AMS.....	85
Tabela 5.25 – Variação de μ para 1 AMS.....	85
Tabela 5.26 – Variação de α para 3 AMS.....	87
Tabela 5.27 – Variação de α para 2 AMS.....	88
Tabela 5.28 – Variação de α para 3 AMS.....	90
Tabela 5.29 – Variação de α para 2 AMS.....	91
Tabela 5.30 – Variação de α para 1 AMS.....	92
Tabela 5.31 – Resumo dos estudos realizados na Laje 01 e as melhores reduções obtidas.....	95
Tabela 5.32 - Freqüências naturais da Laje 02.....	96
Tabela 5.33 – Resposta máxima sem controle.....	98
Tabela 5.34 – Variação de α para 1 AMS.....	99

Tabela 5.35 – Resposta máxima sem controle.....	100
Tabela 5.36 – Variação de α para 2 AMS.....	100
Tabela 5.37 – Resposta máxima sem controle.....	102
Tabela 5.38 – Variação de α para 2 AMS.....	103
Tabela 5.39 – Variação de α para 2 AMS.....	105
Tabela 5.40 – Variação de α para 2 AMS (40cm do bordo).....	107
Tabela 5.41 – Variação de α para 2 AMS (1,40m do bordo)	107
Tabela 5.42 – Variação da posição de 4 AMS (Nó 57 e 126).....	109
Tabela 5.43 – Variação da posição de 4 AMS (Nó 271 e 1141).....	110
Tabela 5.44 - Resumo dos estudos realizados na Laje 02 e as melhores reduções obtidas.....	112
Tabela 5.45 – Frequências naturais da Laje 03	113
Tabela 5.46 – Resposta máxima sem controle.....	115
Tabela 5.47 – Variação de α para 1 AMS.....	116
Tabela 5.48 – Variação de α para 1 AMS.....	118
Tabela 5.49 – Variação de α para 1 AMS.....	119
Tabela 5.50 – Resposta máxima sem controle.....	121
Tabela 5.51 – Variação de α para 1 AMS.....	121
Tabela 5.52 – Variação de α para 1 AMS.....	123
Tabela 5.53 – Variação de α para 1 AMS.....	124
Tabela 5.54 – Variação de α para 3 AMS.....	126

Tabela 5.55 - Resumo dos estudos realizados na Laje 03 e as melhores reduções obtidas.....	128
Tabela 5.56 – Frequências naturais da Laje 04.....	129
Tabela 5.57 – Resposta máxima sem controle.....	131
Tabela 5.58 – Variação de α para 1 AMS.....	132
Tabela 5.59 – Variação de α para 1 AMS.....	134
Tabela 5.60 – Variação de α para 3 AMS.....	135
Tabela 5.61 – Resposta máxima sem controle.....	137
Tabela 5.62 – Variação de α para 1 AMS.....	138
Tabela 5.63 - Resumo dos estudos realizados na Laje 04 e as melhores reduções obtidas.....	140
Tabela 6.1 – Propriedades para o elemento BEAM 4.....	142
Tabela 6.2 – Resposta máxima sem controle.....	144
Tabela 6.3 – Comparativo entre os primeiros modos de vibração da Laje 01 e Laje 05.	145
Tabela 6.4 – Comparativo entre as respostas dinâmicas sem controle da Laje 01 e Laje 05.....	146
Tabela 6.5 – Resposta máxima sem controle e com controle e as reduções.....	147
Tabela 6.6 – Resposta máxima sem controle e com controle e as reduções.....	147
Tabela 6.7 – Resposta máxima sem controle e com 2 AMS e as reduções.....	148
Tabela 6.8 – Variação de α para 1 AMS.....	149
Tabela 6.9 – Variação de ξ para 1 AMS.....	149
Tabela 6.10 – Variação de μ para 1 AMS.....	150

Tabela 6.11 – Variação de α para 1 AMS.....	150
Tabela 7.1 – Resposta máxima sem controle nos nós em que os deslocamentos tem maior amplitude.	154
Tabela 7.2 – Resultados encontrados na melhor proposta de LIMA (2007)	156
Tabela 7.3 – Propriedades do amortecedor para Modelo A1 e A2	157
Tabela 7.4 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A1 e A2	157
Tabela 7.5 – Propriedades do amortecedor para Modelo A3 e A4	158
Tabela 7.6 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A3 e A4	158
Tabela 7.7 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6	159
Tabela 7.8 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6	160
Tabela 7.9 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A7 e A8	160
Tabela 7.10 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A7 e A8	161
Tabela 7.11 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6	162
Tabela 7.12 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6	162
Tabela 7.13– Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6	163
Tabela 7.14 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6	163
Tabela 7.15 – Comparativo dos resultados da proposta de Lima (2007) com o presente estudo.....	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Simulação do carregamento humano na plataforma experimental. (Faísca, 2003).....	33
Figura 2.2 – Reticulado espacial composto utilizado por Varela (2004).....	34
Figura 2.3 - Western Approach Footbridge, Plymouth. (Brownjohn e Pavic, 2007).....	35
Figura 2.4 – Estrutura com três painéis de lajes e os modos de vibrar 1, 2 e 6 (Brownjohn e Middleton, 2007).	35
Figura 2.5 – Torre do aeroporto internacional de Tóquio. http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:HND_control_tower.jpg	37
Figura 2.6 – Exemplo de amortecedor líquido sintonizado, instalado na torre do aeroporto de Nagasaki (Tamura <i>et al.</i> , 1995)	38
Figura 2.7 – Edifício de vinte andares representado por <i>shear frame</i> (Shukla e Datta, 1999)	38
Figura 2.8 - Trecho horizontal da passarela sobre a via EPIA.....	39
Figura 2.9 – Disposição dos amortecedores que formam o AMSM na passarela com travamento.....	40
Figura 2.10 - Atenuador desenvolvido para a Ponte Rio-Niterói	41
Figura 2.11 – Atenuador Dinâmico Sintonizado instalado (Varela,2004).....	42
Figura 2.12 – Estrutura do pavimento da academia com o trecho analisado em destaque. LIMA (2007).....	43
Figura 3.1 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal. (Zivanovic <i>et al.</i> , 2005).....	46
Figura 3.2 – Distribuição de forças em uma estrutura, provocada por uma pessoa caminhando (a) ou correndo (b) (Zivanovic <i>et al.</i> , 2005).....	47

Figura 3.3 - Evolução da força vertical de um caminhar lento até o correr (Zivanovic <i>et al</i> , 2005).....	48
Figura 3.4 – Correlação entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr dada por Wheeler (1982).	48
Figura 3.5 – Função de carga para pedestre para os movimentos de caminhar e correr	51
Figura 3.6 – Fator de impacto k_p versus t_p / T_p	51
Figura 3.7 – Modelo de um sistema estrutural com um AMS instalado.....	52
Figura 3.8 – Modelo estrutural de um sistema principal equipado com AMSM	54
Figura 4.1 – Elemento <i>SHELL63</i> (ANSYS,1995)	57
Figura 4.2 – Elemento <i>BEAM4</i> (ANSYS, 1995).	58
Figura 4.3 – Elemento <i>COMBIN14</i> (ANSYS, 1995).....	58
Figura 4.4 – Elemento <i>MASS21</i> (ANSYS, 1995).	59
Figura 4.5 – Primeiros modelos de laje com suas respectivas configurações de apoio.....	59
Figura 4.6 – Geometria e condições de contorno dos 4 modelos de laje analisados.....	61
Figura 5.1 – Modelo de LAJE 01	65
Figura 5.2 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais.....	66
Figura 5.3 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó central da laje (Nó 946).....	67
Figura 5.4 – AMS posicionado no Nó 946 destacado na laje e carregamento aplicado	68

Figura 5.5 - Deslocamentos em função do tempo com 1 AMS instalado no nó central para os parâmetros $\alpha= 0,96$, $\mu = 0,10$ e $\xi= 0,4\%$	70
Figura 5.6 – Influência de α na redução dos deslocamentos (para $\mu = 0,10$ e $\xi= 0,4\%$).....	70
Figura 5.7 – Influência de ξ na redução dos deslocamentos (para $\mu = 0,10$ e $\alpha=0,96$).....	71
Figura 5.8 – Influência de μ na redução dos deslocamentos (para $\xi= 0,4\%$)e $\alpha=0,96$).....	71
Figura 5.9 – AMS nos nós 942 e 950 destacados na laje e carregamento aplicado no centro.	72
Figura 5.10 - Deslocamentos em função do tempo com 2 AMS instalados nos nós 942 e 950 para os parâmetros $\alpha_{1e2}= 1,00$, $\mu_{1e2}= 0,10$ e $\xi_{1e2} = 0,4\%$	74
Figura 5.11 – AMS nos nós 946, 926 e 966 destacados na laje.....	75
Figura 5.12 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos nós 946, 926 e 966 para os parâmetros $\alpha_{1e2}= 1,10$, $\alpha_3= 1,00$, $\mu = 0,10$ e $\xi = 0,4\%$	76
Figura 5.13 – AMS no nó 942 e carregamento aplicado nos nós 926 e 966.....	79
Figura 5.14 – AMS nos nós 942, 926 e 966 e carregamento aplicado nos nós 926 e 966.....	80
Figura 5.15 – AMS no Nó 942 e carregamento aplicado nos nós 942, 926 e 966.	81
Figura 5.16 – AMS nos nós 942, 926 e 966 e carregamento aplicado nos mesmos nós.....	82
Figura 5.17 – Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.	84
Figura 5.18 – AMS no nó central 946.....	84

Figura 5.19 - Deslocamentos em função do tempo com 1 AMS instalado no Nó 946.	86
Figura 5.20 – AMS nos Nós 946, 926 e 966.....	86
Figura 5.21 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos Nó 946,926 e 966.....	87
Figura 5.22 – AMS nos Nós 942, 950.....	88
Figura 5.23 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos Nó 942 e 950.....	89
Figura 5.24 – AMS nos nós 940, 951 e 946.....	90
Figura 5.25 – AMS nos Nós 1190 e 702.....	91
Figura 5.26 – AMS no Nó central 946.....	92
Figura 5.27 - Deslocamentos em função do tempo para 1 carga senoidal.....	93
Figura 5.28 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano	94
Figura 5.29 – Condições de apoio do modelo de Laje 02	96
Figura 5.30 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.	97
Figura 5.31 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó do bordo livre da laje.....	98
Figura 5.32 – AMS no Nó 706 destacado na laje	99
Figura 5.33 – AMS nos Nós 271 e 1141 e carregamento aplicado nos Nós 271 e 1141.	100
Figura 5.34 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e duas cargas harmônicas.	101

Figura 5.35 - Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.	102
Figura 5.36 – AMS nos Nós 271 e 1141	103
Figura 5.37 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e carregamento humano.	104
Figura 5.38 – AMS nos Nós 57 e 126.....	104
Figura 5.39 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e carregamento humano.	105
Figura 5.40 – AMS nos Nós 184 e 1228 (40 cm do bordo).....	106
Figura 5.41 – AMS nos Nós 1083 e 329 (1,40m do bordo).....	106
Figura 5.42 – Deslocamentos para 2 AMS (40cm do bordo) instalados e carregamento humano.....	108
Figura 5.43 – Deslocamentos para 2 AMS (1,40m do bordo) instalados e carregamento humano.....	108
Figura 5.44 – AMS nos Nós 57, 126 (bordo) e 271,1141 (1m do bordo).....	109
Figura 5.45 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano	111
Figura 5.46 – Condições de apoio do modelo de Laje 03.....	113
Figura 5.47 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.	114
Figura 5.48 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó do bordo livre da laje.....	115
Figura 5.49 – AMS no Nó 600 destacado na laje	116
Figura 5.50 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico no nó central.	117

Figura 5.51 – AMS no Nó 591 destacado na laje	117
Figura 5.52 - Evolução dos deslocamentos do nó de bordo em função do tempo para o carregamento harmônico.....	118
Figura 5.53 – AMS no Nó 22 destacado na laje	119
Figura 5.54 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico	120
Figura 5.55 - Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.	121
Figura 5.56 – AMS no Nó 594 destacado na laje	121
Figura 5.57 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano	122
Figura 5.58 – AMS no Nó 591 destacado na laje	122
Figura 5.59 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano.	123
Figura 5.60 – AMS no Nó 22 destacado na laje	124
Figura 5.61 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano.....	125
Figura 5.62 – AMS no Nó 22 destacado na laje	125
Figura 5.63 - Deslocamentos em função do tempo para uma carga harmônica	127
Figura 5.64 - Deslocamentos em função do tempo para um carregamento humano.....	127
Figura 5.65 – Condições de apoio do modelo de Laje 04	129
Figura 5.66 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.	130

Figura 5.67 – Resposta em frequência no nó central da laje.....	131
Figura 5.68 – AMS no Nó 1905 destacado na laje	132
Figura 5.69 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico	133
Figura 5.70 – AMS nos Nós 1889 e 1922 destacados na laje.....	133
Figura 5.71 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico.	134
Figura 5.72 – AMS nos Nós 1883, 1928 e 1928 destacados na laje.....	135
Figura 5.73 - Evolução dos deslocamentos no tempo do nó central para o carregamento harmônico.....	136
Figura 5.74 – Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular	137
Figura 5.75 – AMS no Nó central destacados na laje e o carregamento humano	138
Figura 5.76 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano	138
Figura 5.77 - Deslocamentos em função do tempo para 1 carga senoidal.....	139
Figura 6.1 – Geometria da Laje 05 com detalhamento das vigas e pilares.....	141
Figura 6.2 - Modos de vibração da Laje 05 e suas frequências naturais.....	143
Figura 6.3 – Deslocamentos verticais na Laje 05 submetida ao carregamento humano.....	144
Figura 6.4 – Acelerações verticais na Laje 05 submetida ao carregamento humano.....	145
Figura 6.5 – Um AMS na direção Y posicionado no nó central.....	146

Figura 6.6 – Dois amortecedores posicionados na laje.....	148
Figura 7.1 – Geometria do trecho da laje da academia de ginástica estudado por LIMA (2007).....	152
Figura 7.2 - Modos de vibração da estrutura de LIMA (2007) e suas frequências naturais.....	153
Figura 7.3 – Simulação do carregamento dinâmico.....	154
Figura 7.4 - Posição dos amortecedores na melhor proposta de controle obtida por LIMA (2007).	155
Figura 7.5 – Laje 05 com o amortecedor localizado no Nó 386.....	157
Figura 7.6 – Laje com os amortecedores localizados nos Nó 386 e Nó 396 ...	159
Figura 7.7 – Laje 05 com os amortecedores localizados nos Nós 386 , 396 e 472	161

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- A: área da seção transversal, em m^2
- AMS: amortecedor de massa sintonizado
- AMSM: amortecedor de massa sintonizado múltiplo
- a_{max} : aceleração máxima ou de pico
- a_z : aceleração nodal máxima, em m/s^2
- b: largura da viga ou do pilar, conforme o caso
- C: amortecimento do sistema principal
- C : matriz $n \times n$ de amortecimento do sistema
- c : amortecimento do AMS
- ct: tempo de contato
- ci: coeficiente de impacto
- c_{AMS} : amortecimento do AMS
- c_i : amortecimento do i-ésimo amortecedor
- d : amplitude do deslocamento, em mm
- F(t): função de carregamento variando com o tempo
- $F(t)$: vetor de força externa
- $F_p(t)$: força devido ao ato de pular
- $F_{p,max}$: carga dinâmica de pico
- f : frequência de vibração ou razão de passo
- $f(t)$: excitação dinâmica atuando no sistema principal
- f_{EST} : frequência natural da estrutura
- f_i : frequência do i-ésimo amortecedor (Hz)
- F_s : razão de passo
- f_s : velocidade de avanço
- G : peso do indivíduo
- g: aceleração da gravidade, em m/s^2
- h: altura da viga ou do pilar, conforme o caso
- I: nó do elemento
- I: momento de inércia, em m^4
- I_{xx} : momento de inércia com relação ao eixo X, em m^4
- I_{yy} : momento de inércia com relação ao eixo Y, em m^4

I_{zz} : momento de inércia com relação ao eixo Z , em m^4
 i : índice que representa o número do harmônico
 i : índice do modo de vibração
 J : nó do elemento
 K : rigidez do sistema principal
 \mathbf{K} : matriz $n \times n$ de rigidez do sistema
 K_{EST} : rigidez da estrutura
 k : rigidez do AMS
 k_{AMS} : rigidez do AMS
 k_p : coeficiente de impacto
 l : vão livre da laje
 M : massa do sistema principal
 \mathbf{M} : matriz $n \times n$ de massa do sistema
 M_{EST} : massa da estrutura
 M_n : massa modal
 m : massa do AMS
 m_{AMS} : massa do AMS
 m_i : massa do i -ésimo amortecedor
 n : número do n -ésimo harmônico
 n : número de amortecedores de um AMSM
 $P_n(t)$: força modal
 P_0 : peso estático de uma pessoa ($P_0 = 800$ N é o valor usual)
 s_l : comprimento de passo (stride length)
 t : tempo
 t_p : tempo de contato
 T_p : período de passo
 U_z : deslocamento nodal máximo na direção z (vertical)
 \ddot{u} : vetor de aceleração nodal
 \dot{u} : vetor de velocidade nodal
 u : vetor de deslocamento nodal
 V_z : velocidade nodal máxima na direção z (vertical)
 v : velocidade, em mm/s
 $\dot{Y}_n(t)$: deslocamento modal
 $\ddot{Y}_n(t)$: velocidade modal

$Y_n(t)$: aceleração modal

$y(t)$: deslocamento do sistema principal com relação à sua base

$\dot{y}(t)$: velocidade do sistema principal com relação à sua base

$\ddot{y}(t)$: aceleração do sistema principal com relação à sua base

$z(t)$: deslocamento relativo entre o AMS e o sistema principal

$\alpha_{\text{ótimo}}$: razão de frequências ótima

μ : razão entre a massa do AMS (m) e a massa do sistema principal (M)

ω_{AMS} : frequência do AMS

ω_{EST} : frequência da estrutura

ω : frequência

ω_i : frequência do i -ésimo amortecedor (rad/s)

ω_n : frequência natural circular modal do n -ésimo modo

ξ : taxa de amortecimento

ξ_i : taxa de amortecimento modal do i -ésimo modo

$\xi_{\text{ótimo}}$: razão de amortecimento ótima

$\xi_{T\text{ótimo}}$: razão de amortecimento ótima entre o AMSM e o sistema principal

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Várias pesquisas vêm sendo realizadas ao redor do mundo a respeito das vibrações induzidas em lajes de edifícios por atividades humanas. Estes estudos têm se intensificado ultimamente por uma série de motivos, entre eles: (1) a crescente utilização de materiais mais resistentes que permitem lajes vencendo grandes vãos, mais esbeltas e flexíveis; (2) a utilização das estruturas para atividades que não haviam sido previstas inicialmente nos projetos originais; (3) a mudança comportamental das pessoas com o aumento recente de atividades rítmicas tais como ginástica, dança de salão, shows, práticas esportivas, torcidas organizadas, entre outros motivos. Estes fatores têm contribuído, com maior frequência, para o surgimento de problemas de vibrações excessivas nas estruturas e, em particular, nas lajes.

Mesmo as lajes bem dimensionadas em relação aos estados limites de utilização e de ruptura podem estar susceptíveis a vibrações excessivas levando a um desconforto dos seus usuários, uma vez que os carregamentos humanos ocorrem essencialmente em baixas frequências, por vezes muito próximas às frequências naturais da estrutura, portanto, faz-se necessário uma intervenção nestas estruturas para atenuar tais vibrações indesejáveis.

Vários são os mecanismos existentes para o controle de vibrações excessivas já empregados com eficácia em estruturas, entre estes a literatura apresenta vários casos bem sucedidos na prática do Amortecedor de Massa Sintonizado – AMS para atenuação das vibrações (Soong & Dargush, 1997). O desempenho dos AMS é influenciado pela frequência com a qual o dispositivo foi sintonizado, que deve ser próxima à frequência natural do sistema, para que o mesmo vibre fora de fase e assim transfira para este a energia de vibração.

Tem-se empregado também com grande eficiência em controle estrutural os Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos – AMSM, que são constituídos por amortecedores sintonizados em frequências distribuídas em torno da frequência natural correspondente ao modo a ser controlado. Alguns autores apontam uma maior eficácia dos AMSM em relação a um único AMS (Carneiro, 2004).

O grande número de implementações práticas de controle estrutural com o uso de AMS revela o bom desempenho destes quando instalados em estruturas com vibrações excessivas; todavia, percebe-se uma carência de estudos paramétricos específicos quanto ao projeto deste mecanismo para ser instalado em lajes. Alguns estudos do emprego dos AMS em lajes vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos com resultados satisfatórios com relação à diminuição das vibrações, todavia, os autores destacam a complexidade deste estudo quando envolve o carregamento humano e suas variáveis de resposta nas lajes, portanto, existe a necessidade de uma análise mais aprofundada destes parâmetros que influenciam na eficiência do uso dos AMS em lajes.

1.2 OBJETIVOS

Com base no exposto, os objetivos deste trabalho são:

a) Analisar alguns modelos teórico-computacionais de lajes tipo convencionais, com diferentes configurações de apoio e dimensões, para avaliar as respostas dinâmicas quando submetidas ao carregamento oriundo das atividades humanas de pular e dançar. A partir das respostas dinâmicas pretende-se obter parâmetros para avaliar a interação destas atividades humanas com esse tipo de estrutura.

b) Propor um sistema de controle por meio do uso do Amortecedor de Massa Sintonizado - AMS buscando qual a configuração ótima que leva a uma redução mais eficiente das vibrações.

c) Identificar quais os parâmetros principais que governam esse problema a partir de modelos simples de lajes, mas que podem contribuir para o entendimento do problema de controle de vibrações em lajes de estruturas mais complexas.

1.3 METODOLOGIA

A investigação numérica sobre o problema de vibrações em lajes inicia-se através da obtenção das frequências naturais e modos de vibração de várias lajes com diversas configurações de apoio, que resulta na adoção de quatro modelos diferenciados para estudo detalhado.

Definido os quatro modelos e suas propriedades, a etapa seguinte é do estudo paramétrico, que consiste da aplicação de carregamentos harmônicos e de

carregamentos que simulam a atividade humana de pular. A proposta desta etapa é realizar várias tentativas de controle variando-se os parâmetros de razão de massa, razão de frequências, razão de amortecimento e posição dos amortecedores, de forma a otimizar o AMS reduzindo as vibrações nos quatro modelos de laje.

Para verificar a eficiência dos parâmetros obtidos, o estudo é complementado com a introdução do AMS em um modelo de laje que inclui vigas e pilares de forma a analisar a alteração da resposta dinâmica quando esses dois elementos estruturais são incorporados na estrutura.

A eficiência dos valores obtidos no estudo paramétrico também é testada num modelo real de laje de uma academia de ginástica, anteriormente estudado por Lima (2007), de forma a verificar se ocorre melhor desempenho dos amortecedores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Vários casos de vibrações induzidas em lajes de edifícios por atividades humanas vêm sendo estudados ao longo dos anos. A ocorrência de vibrações excessivas nestas estruturas pode ocorrer mesmo em lajes bem dimensionadas nos estados limites de utilização e de ruptura, pois os carregamentos humanos ocorrem essencialmente em baixas frequências, por vezes muito próximas às frequências naturais da estrutura, causando vibrações perceptíveis ao ser humano.

Uma alternativa para o problema de vibrações excessivas em estruturas, amplamente estudada nas últimas décadas, é o controle estrutural. Esta tecnologia promove alterações nas propriedades de rigidez e amortecimento do sistema, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela ação de forças externas (Avila,2002).

O Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS) é um dispositivo de controle bastante utilizado na prática em estruturas como edifícios altos, passarelas de pedestres, torres, etc. (Soong & Dargush, 1997). Trata-se de um sistema massa-mola-amortecedor conectado à estrutura que, devidamente sintonizado na frequência adequada, vibra fora de fase com a mesma, ocorrendo assim a transferência de energia para o dispositivo de controle, reduzindo a amplitude das vibrações do sistema principal.

A aplicação deste dispositivo para redução de vibrações em lajes já vêm sendo objeto de estudo de alguns pesquisadores (Varela, 2004; Lima, 2007 e Setareh *et al* 2007); no entanto, restam ainda diversos aspectos a serem aprofundados, entre eles a questão da escolha dos parâmetros do AMS para otimizar a sua eficiência.

O objetivo do presente trabalho é analisar alguns modelos teórico-computacionais de lajes de concreto tipo convencional, para avaliar seu comportamento dinâmico e propor uma solução de controle por meio do uso de Amortecedores de Massa Sintonizados – AMS, buscando saber os melhores parâmetros do dispositivo que levam a uma redução mais eficiente das vibrações. Esse estudo, utilizando modelos simples de lajes e carregamentos simplificados, visa contribuir para o entendimento do sistema de controle em lajes de edifícios.

2.2 VIBRAÇÕES INDUZIDAS A PARTIR DE ATIVIDADES HUMANAS

A tendência de se ter lajes com baixas frequências naturais próximas às frequências que caracterizam o carregamento gerado pela atividade humana levam à ocorrência de vibrações excessivas. Como dito anteriormente, é um conjunto de fatores como esbeltez de projeto, utilização da estrutura para atividades não previstas no projeto original, e ocorrência de atividades rítmicas, que contribuem para esses problemas de vibrações em lajes.

Originam-se destes fatores a importância de entender o comportamento dinâmico das estruturas, em especial das lajes, bem como a natureza das cargas dinâmicas que atuam sobre elas. Tais cargas dinâmicas podem produzir vibrações elevadas num nível que pode provocar desconforto humano e até comprometer a segurança da própria estrutura. Casos de problemas ocorridos em estruturas com carregamento humano são bastante conhecidos mundialmente, como o caso da Millennium Footbridge (Dallard *et al.*, 2001).

O colapso de arquibancadas em estádios, nos anos 20, levou o American Standards Association (ASA, atual ANSI – American National Standards Institute) a formar um comitê para padronizações de segurança para este tipo de estrutura. Décadas depois, autores como Tuan *et al.* (1985) e Rainer *et al.* (1988) *apud* Faisca (2003) passaram a descrever o carregamento gerado por algumas atividades humanas a partir de uma série de Fourier considerando a soma de uma parcela devida à carga estática (peso do indivíduo), e outra devida à carga dinâmica gerada pela atividade praticada pelo indivíduo ou grupo de pessoas.

O CEB - Comite Euro-International du Beton , em 1991, lançou um boletim com algumas recomendações que consideram cargas dinâmicas induzidas por pessoas para diversos tipos de estruturas: estádios, salões de dança, passarelas, entre outras. Na Tabela 2.1 são apresentadas as atividades correlacionadas às faixas de frequência do harmônico fundamental.

Tabela 2.1 - Tipos representativos de atividades humanas e suas aplicações para diferentes atividades e tipos de estrutura (CEB nº209,1991).

Tipos Representativos de Atividades			Faixa de Aplicabilidade		
Designação	Definição	Taxa de Projeto da Atividade e (Hz)	Atividade real	Taxa da Atividade (Hz)	Tipo de Estrutura
Caminhar	Caminhar , contato contínuo com o piso	1,6 – 2,4	Caminhar devagar Caminhar normal Caminhar rápido	≈ 1,7 ≈ 2,0 ≈ 2,3	- Estruturas para pedestres (passarelas, escadas, embarcadomo, etc.) - Prédios de escritório, etc.
Correr	Correr, contato descontínuo com o piso	2,0 – 3,5	Correr lento Correr normal Correr rápido	≈ 2,1 ≈ 2,5 ≈ 3,0	- Passarelas para pedestres em trilhas de corrida
Pular	Ritmo normal acelerado. Pular no mesmo lugar com contato simultâneo de ambos os pés no chão	1,8 – 3,4	Aulas de ginástica com pulos ; Saltando e correndo com músicas rítmicas Aulas de jazz	≈ 1,5-3,4 ≈ 1,8-3,5	- Ginásios, salas de esportes - Salas de ginástica
Dançar	Equivale aproximadamente ao caminhar rápido	1,5 – 3,0	Eventos sociais com danças clássicas e modernas (valsa, rumba, etc.)	≈ 1,5-3,0	- Salas de dança - Salas de concerto e outras salas comunitárias sem assentos fixos
Bater palmas de pé com o corpo balançando	Aplausos rítmicos na altura o peito ou sobre a cabeça, enquanto balança verticalmente devido ao movimento dos joelhos, de cerca de 50mm, para frente e para trás	1,5 – 3,0	Concertos populares com audiência entusiasmada	≈ 1,5-3,0	- Salas para concerto e galeria de espectadores sem e com assentos fixos e de música hard pop
Bater Palmas	Bater palmas ritmicamente com as mãos em frente ao peito	1,5 – 3,0	Concertos clássicos e de música soft pop	≈ 1,5-3,0	- Salas de concerto com assentos fixos (sem concertos de música hard pop)
Oscilação lateral do corpo	Oscilação rítmica lateral do corpo estando sentado ou de pé	0,4 – 0,7	Concertos , eventos sociais	-	- Galerias de expectadores

Grande contribuição sobre vibrações induzidas pela atividade humana pode ser encontrada nos estudos feitos em passarelas de pedestres. Baltar (2000), por exemplo, avaliou os níveis de segurança e conforto das principais passarelas de pedestres existentes na cidade de Brasília a partir de análises numéricas. Foram levantadas as 10 primeiras frequências naturais de 10 passarelas e seus respectivos modos de vibração. As duas passarelas mais flexíveis foram submetidas a análises numéricas em vibrações forçadas nas quais foram simuladas cargas induzidas pelas atividades humanas de caminhar e correr. Foram simulados casos que compreendiam de 1 a 8 pessoas

caminhando ou correndo sobre as passarelas. As acelerações encontradas foram comparadas aos limites máximos sugeridos pelas normas BS 5400 (1978), ONT (1983), ISO DIS 10137 (1963) e CEB (1991). Apenas no caso da passarela 1 – passarela de pedestres sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento (EPIA), trecho Cruzeiro Novo/CEASA, foram registrados casos em que as acelerações encontradas superaram os limites máximos de uma ou mais das normas citadas acima.

O estudo experimental desenvolvido por Faisca (2003), focado no carregamento humano, resultou na descrição das cargas dinâmicas geradas por atividades com perda de contato com a estrutura. De acordo com Faisca (2003) os carregamentos gerados por pessoas sofrem alterações devido à flexibilidade da estrutura, isto é, estas cargas sofrem alterações devido à interação pessoa-estrutura. A plataforma de ensaio instrumentada, em que os indivíduos realizavam as atividades (Figura 2.1), permitiu concluir que as pessoas não conseguiam realizar as atividades da mesma maneira por muito tempo e/ou em dias diferentes, variando o ritmo e a forma da atividade. Estas variações geraram sinais com características distintas e com grandes desvios, mostrando a importância da consideração da média e dos desvios-padrão dos parâmetros que descrevem o carregamento humano.

Um aspecto analisado por Faisca (2003) foi o carregamento de multidão, situação característica de grandes estruturas, tais como passarelas, ginásios, estádios, entre outras. Foi possível visualizar os movimentos de todos os indivíduos do grupo e observou-se que as pessoas não conseguiam manter o sincronismo dos movimentos. Sobre este assunto é desenvolvido um estudo referente às atividades que envolvem ou não sincronismo (pular) e verificaram-se variações no ritmo por parte dos indivíduos participantes, os quais não conseguiam manter os movimentos, mostrando que a proximidade da frequência da atividade com a frequência natural da estrutura pode contribuir para esta falta de ritmo.

Chegou-se também a conclusão de que a soma dos carregamentos gerados pelos testes de multidão apresentaram características bem distintas em relação à atividade que estava sendo realizada, estas diferenças foram constatadas tanto na forma, como na amplitude do sinal, sendo apontada como principal causa, a defasagem existente entre os indivíduos do grupo. Conclui-se no estudo de Faisca (2003) que, até mesmo

pequenas defasagens entre os indivíduos do grupo podem contribuir com a diminuição do carregamento atuante.



Figura 2.1 - Simulação do carregamento humano na plataforma experimental. (Fáisca, 2003).

Varela (2004) fez um estudo sobre os efeitos do carregamento humano correlacionando o modelo matemático com os resultados experimentais. O trabalho apresenta inicialmente um histórico a respeito do que já foi desenvolvido em termos de funções que descrevem matematicamente o caminhar humano e seus efeitos estruturais, e em seguida, é desenvolvida uma série de testes estáticos e dinâmicos – experimentais e numéricos - num protótipo, mostrado na Figura 2.2, de um sistema estrutural para pisos com grandes vãos, típico de edifícios de centros comerciais.

A conclusão de Varela (2004) com os estudos no protótipo é que passos mais largos, associados a maiores frequências dessa atividade, implicam em maior intensidade das forças de impacto produzidas pelos calcanhares. Este argumento independe do tipo de calçado usado, embora calçados com solado macio atenuem os impactos sobre o corpo humano quando passos são dados sobre superfícies rígidas. Assim, existe uma tendência de maior energia ou impulsão – e não picos de impacto – ser gerada por pessoas em passos largos com calçados de solado macio. Obviamente, passos curtos, associados a menores frequências dessa atividade, produzem menores forças de impacto dos calcanhares.



Figura 2.2 – Reticulado espacial composto utilizado por Varela (2004).

Ebrahimipour e Sack (2005) levantaram os vários tipos de controle de vibração estrutural, começando pelo amortecedor de massa sintonizado e apresentaram os estudos em que o AMS foi satisfatoriamente aplicado para atenuar as vibrações excessivas geradas por carregamentos humanos em pisos, em passarelas e em outras estruturas. Ressaltam no estudo que o amortecedor de massa sintonizado apenas é efetivo numa estreita faixa de valores de frequência, tendo que ser sintonizado numa frequência natural em particular.

Zivanovic *et al* (2005) realizou uma extensa revisão bibliográfica com respeito a limites de serviços para vibrações em passarelas de pedestres sob excitações induzidas pelo homem, cerca de 200 referências bibliográficas foram pesquisadas, contribuindo desta forma, nesta linha de estudo de vibrações em estruturas devido à atividade humana.

Já Brownjohn e Pavic (2007) estudaram quatro passarelas com o intuito de aplicar um método de estimativa da massa modal das respostas correspondentes à excitação humana. Uma das quatro passarelas estudadas foi a Western Approach Footbridge, em Plymouth (Figura 2.3), que interliga um estacionamento a um shopping. Os valores de massa modal medidos na passarela foram comparados aos simulados numericamente em elementos finitos e apresentam pouquíssima diferença.



Figura 2.3 - Western Approach Footbridge, Plymouth. (Brownjohn e Pavic, 2007)

Uma avaliação das vibrações excessivas em lajes de edifício devido ao caminhar humano foi realizado por Brownjohn e Middleton (2007) que apresentaram no seu estudo uma classificação de acordo com a frequência do primeiro modo de vibração das lajes, classificam-as em lajes de baixa frequência e de alta frequência. Simularam o carregamento humano atuando na laje de um auditório de forma a verificar a resposta da estrutura. Contribuíram também na discussão sobre o nível de detalhamento necessário na modelagem das lajes considerando os vários painéis existentes num andar de um edifício submetido a vibrações excessivas. Através de um modelo hipotético de painéis, eles simularam as vibrações a fim de verificar se é suficiente modelar um número reduzido de painéis ao invés de representar o sistema estrutural completo, ver Figura 2.5. Observaram que para uma estrutura com vários painéis de laje, a diferença nas respostas dinâmicas é mínima quando se analisa somente o trecho de laje mais solicitado pela atividade humana ao invés do conjunto todo de painéis de laje.

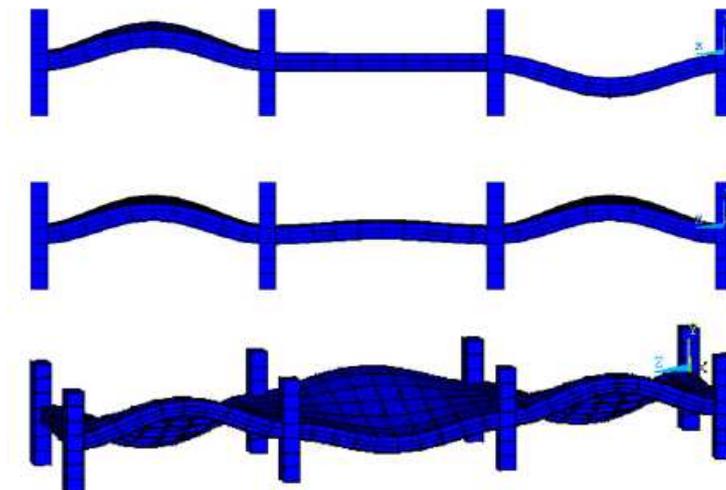


Figura 2.4 – Estrutura com três painéis de lajes e os modos de vibrar 1, 2 e 6 (Brownjohn e Middleton, 2007).

2.3 CONTROLE ESTRUTURAL

Descreveram-se, no item anterior, alguns estudos sobre a problemática de vibrações em estruturas devido à atividade humana. A crescente ocorrência de casos de vibrações excessivas em estruturas devidas não somente à atividade humana, mas também devidas à ação do vento e terremotos levou à busca de soluções para este fenômeno.

O controle estrutural consiste em uma alteração nas propriedades de rigidez e amortecimento de determinada estrutura, a partir da adição de dispositivos externos e/ou forças externas. Esses sistemas de controle podem ser classificados em: passivo, ativo, semi-ativo e híbrido.

O controle denominado passivo tem como princípio transferir parte da energia a ser dissipada pela estrutura para dispositivos de controle, reduzindo o desconforto causado pelas vibrações excessivas. O dispositivo de controle dissipa uma parte da energia convertendo-a em calor ou transfere a mesma para um dispositivo auxiliar.

Soong e Dargush (1997) descrevem os principais mecanismos de controle passivo em: isolamento de base, amortecedores metálicos, amortecedores de fricção, amortecedores viscofluidos, amortecedores líquidos sintonizados e os AMS.

Neste trabalho foi utilizado o Amortecedor de Massa Sintonizado, ou AMS, que tem como vantagens em relação aos outros sistemas, a não dependência de fontes de energia externa, nem a de manutenção freqüente e especializada e apresenta um histórico confiável de casos eficazes quanto a sua utilização na prática. Uma descrição mais detalhada deste sistema será realizada nos itens seguintes deste trabalho.

O controle ativo, diferente do controle passivo, necessita de fontes de energia para a aplicação de forças à estrutura através de atenuadores. A partir de algoritmos de controle ativo, a magnitude das forças aplicadas pelos atenuadores à estrutura é calculada, e esse cálculo é realizado em função da resposta da estrutura medida através de sensores em tempo real.

O controle semi-ativo não adiciona energia ao sistema estrutural controlado, porém possui propriedades – controladas de forma ótica – que reduzem a resposta do sistema. A vantagem desse tipo de sistema é a de possuir adaptabilidade dos

controladores ativos sem demandar grandes quantidades de energia, podendo, em muitas aplicações, operar com baterias de emergência, no caso de falta de energia (Ávila, 2002).

O controle híbrido é uma forma de controle que reúne simultaneamente as características do controle ativo e passivo. A vantagem está no fato de exigir forças de magnitude bem menores nos atuadores, o que gera uma considerável redução no custo, além de um desempenho mais eficiente comparado ao sistema passivo, uma vez que amplia a faixa de frequência em que o mesmo funciona de forma eficiente.

Tamura *et al* (1995) *apud* Gomes (2006) estudaram amortecedores fluidos sintonizados sob excitação do vento. Embora o estudo não envolvesse vibrações oriundas de atividades humanas, contribuiu para examinar os limites de percepção humana com relação às vibrações. Os casos estudados foram a torre do aeroporto de Nagasaki, a torre marinha em Yokohama, o Prince Hotel em Shin-Yokohama e a torre do aeroporto internacional de Tóquio. Em todos os casos analisados houve medições em escala real que apresentaram resultados satisfatórios. Concluíram que os amortecedores utilizados podem melhorar significativamente os limites de serviço dos edifícios.

As Figuras 2.5 e 2.6 mostram, respectivamente, a torre do aeroporto de Tóquio e o amortecedor fluido sintonizado instalado na torre do aeroporto de Nagasaki. Segundo Tamura *et al*. (1995), o princípio de funcionamento desse tipo de amortecedor é a absorção da energia pelo movimento do líquido contido num recipiente, a energia é dissipada pela fricção que ocorre entre as partículas do próprio líquido e pela fricção do líquido com a superfície interna do recipiente no qual está contido.



Figura 2.5 – Torre do aeroporto internacional de Tóquio.
http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:HND_control_tower.jpg

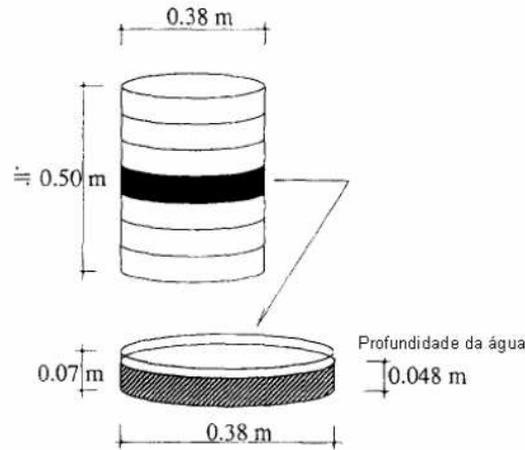


Figura 2.6 – Exemplo de amortecedor líquido sintonizado, instalado na torre do aeroporto de Nagasaki (Tamura *et al.*, 1995)

Carneiro (2004) estudou a eficiência de um sistema de Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos (AMSM), que são conjuntos formados por mais de um dispositivo massa-mola (AMS) podendo ser interligados (I) ou não-interligados (NI). Este tipo de dispositivo foi aplicado para o caso de edifícios altos, analisando os efeitos do número de massas e de sua interligação. Foi utilizado um exemplo de edifício de vinte andares, considerando-o como um *shear frame* (Figura 2.7). Um estudo paramétrico foi realizado a fim de verificar os efeitos da variação dos valores dos parâmetros envolvidos para a estrutura sem amortecedor, com um AMS e com vários amortecedores, não-interligados e interligados. O caso que se mostrou mais satisfatório em termos de eficiência na redução das amplitudes máximas devido ao carregamento dinâmico imposto foi o sistema controlado pelo AMSM interligado.

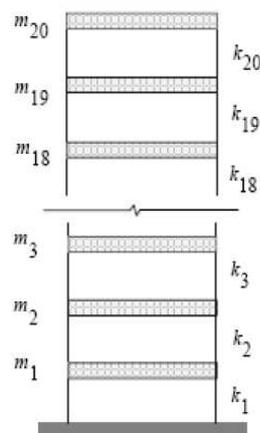


Figura 2.7 – Edifício de vinte andares representado por *shear frame* (Shukla e Datta, 1999)

Gomes (2006) estudou numericamente o comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília, sobre a via EPIA, quando submetida às ações humanas de caminhar e correr. A passarela estudada, ver Figura 2.8, apresentava vibrações perceptíveis aos pedestres na direção vertical.



Figura 2.8 - Trecho horizontal da passarela sobre a via EPIA.

O estudo de Gomes (2006) concentrou-se em um vão inclinado típico da passarela EPIA, pois possuía maior comprimento que um vão típico horizontal. Observou-se, inicialmente, na análise de vibrações livres que as seis primeiras frequências naturais dessa estrutura encontravam-se dentro do intervalo crítico sugerido pela literatura (abaixo de 5 Hz). Foram realizadas simulações com diferentes números de pedestres caminhando ou correndo sobre a passarela de forma assíncrona e em seguida de forma síncrona. A partir dessas análises Gomes (2006) propôs a instalação de um sistema de controle estrutural do tipo AMSM e procurou desenvolver um sistema para combater as vibrações verticais, que no caso dessa estrutura tem maior amplitude e, portanto são mais críticas.

O sistema de controle proposto por Gomes (2006) indicado na Figura 2.9, foi eficaz em combater a ressonância da estrutura quando submetida a carregamentos provocados por pedestres correndo na frequência do primeiro modo de flexão vertical, o caso mais desfavorável. A introdução de barras para travamento da estrutura também melhorou os resultados.

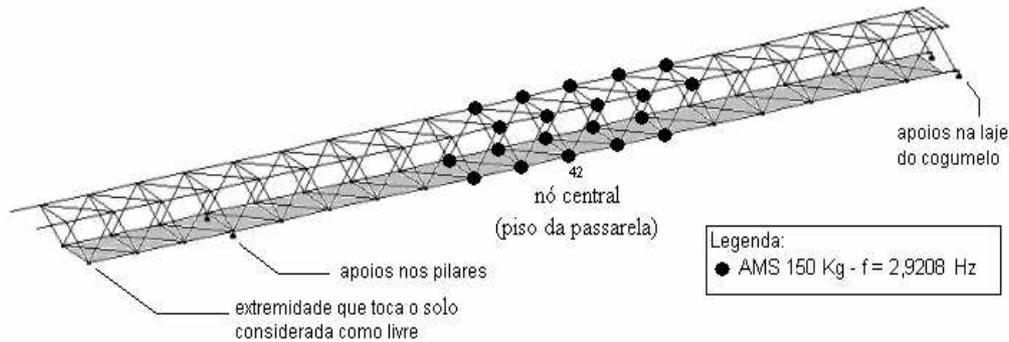


Figura 2.9 – Disposição dos amortecedores que formam o AMSM na passarela com travamento.

2.4 AMORTECEDOR DE MASSA SINTONIZADO

Neste trabalho, será dada ênfase ao AMS que consiste em um dispositivo massa-mola-amortecedor ligado a um sistema principal vibrante a fim de atenuar vibrações indesejáveis. O AMS é um dos mais antigos dispositivos de controle estrutural existente, e seu princípio de funcionamento consiste em sintonizar o dispositivo numa frequência próxima à frequência natural do sistema, fazendo com que o dispositivo entre em ressonância, vibrando fora de fase e com isso transfira a energia de vibração.

A aplicação do AMS iniciou-se na engenharia mecânica, vindo a ser empregado na engenharia civil a partir da década de 60 com seu uso em pontes, edifícios altos, torres e chaminés industriais para controle de vibrações causadas pelo vento. Atualmente, seu uso tem se estendido pelo mundo todo e com maior frequência. Países como Estados Unidos e Japão, por exemplo, aplicam bastante esse dispositivo para atenuar as vibrações causadas por terremotos e vento. O AMS também tem sido utilizado para atenuar vibrações induzidas por atividades humanas, como no caso da já citada passarela de pedestres estudada por Gomes (2006).

Ocorre com grande frequência também, o uso de amortecedor de massa sintonizado múltiplo (AMSM) que consiste em vários amortecedores com frequências distribuídas em volta da frequência natural correspondente ao modo a ser controlado. Tal solução é amplamente estudada, com trabalhos também no Brasil, como o de Battista e Pfeil (2005) *apud* Lima (2007) que projetaram um mecanismo de vários amortecedores, por eles denominados de atenuadores dinâmicos sincronizados, ver

Figura 2.10, para diminuir as amplitudes de oscilações registradas na Ponte Rio - Niterói provocadas pelo vento. O uso desse sistema de vários amortecedores na ponte levou a resultados satisfatórios comprovados experimentalmente e numericamente.



Figura 2.10 - Atenuador desenvolvido para a Ponte Rio-Niterói

<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=475>. Acesso em 09 fev 2009.

O crescente número de casos de vibrações indesejáveis em lajes devido ao movimento humano tem contribuído também para o aumento do número de publicações nesta área de estudo, com relatos de casos particulares e análises experimentais e/ou numéricas. Os resultados publicados revelam a eficácia do uso de Amortecedores de Massa Sintonizados para o controle de vibrações em lajes e suas vantagens quanto à manutenção e custos.

Diferentes configurações de AMS tem sido usadas ao longo das décadas, Lezen (1966) *apud* Setareh *et al* (2006), por exemplo, usou pequenos amortecedores com massa em torno de 2% da massa da laje sintonizados a uma frequência em torno de 1,0 Hz a menos que a frequência da laje e com uma razão de amortecimento de 7,5 %. Setareh e Hanson (1992) usaram um método para representar um modelo que pudesse otimizar os parâmetros do AMS usando um número reduzido de modos de vibração, eles obtiveram um bom resultado para casos de vibrações onde há pouquíssima diferença entre os intervalos de frequência dos modos dominantes.

Webster e Vaicaitis (1992) utilizaram os AMS no edifício Park Building, no andar onde havia uma pista de dança. Eles sintonizaram os amortecedores nos primeiros modos de vibração otimizando os parâmetros do AMS pelo método de Reed's. Após a

instalação dos mesmos houve uma diminuição de 60% das vibrações, embora o previsto seria de 70%.

Varela (2004) apresentou um caso prático de uso de atenuadores dinâmicos sincronizados num edifício destinado para escritórios e salas de reuniões, com vigas metálicas e lajes celulares mistas ortotrópicas, ver Figura 2.11. A laje apresentava vibrações excessivas conforme a ISO 2631/1 e 2 (1985), NBR 8800 e NB-14-ABNT. Com o uso dos atenuadores instalados nos 4 painéis das lajes houve uma considerável diminuição das amplitudes de aceleração verticais, com reduções variando entre 49% a 58%.



Figura 2.11 – Atenuador Dinâmico Sintonizado instalado (Varela,2004)

Setareh *et al.* (2007) descrevem a aplicação de um pêndulo passivo como amortecedor de massa em dois casos de lajes com vibrações excessivas. Durante esse estudo, eles destacam a influência da interação homem-estrutura nos resultados experimentais obtidos. As lajes eram em prédios de escritórios e apresentavam ambas frequências dominantes na faixa de 4 a 5 Hz, nas quais os amortecedores foram sintonizados, obtendo redução de amplitudes na ordem de 50 a 70%.

Lima (2007) para verificar as vibrações produzidas pelas atividades aeróbicas numa academia de ginástica realizou uma análise numérica no piso da academia, ver Figura 2.12. Primeiramente foi realizada a análise modal da laje e verificou-se que no primeiro modo de vibração, a laje se desloca horizontalmente na direção do eixo Y e que, no segundo e terceiro modos, a laje se desloca paralelamente ao seu próprio plano, girando em torno do eixo vertical paralelo ao eixo Z. Os valores das frequências nesses

três primeiros modos apresentavam valores próximos da frequência do carregamento humano e os deslocamentos verticais ocorriam a partir do quarto modo porém com valores de frequências maiores que do carregamento humano.

Lima (2007) simulou então as atividades humanas de pular e andar na laje, mais especificamente no trecho crítico onde ocorriam as atividades aeróbicas, e verificou altos níveis de vibração quando comparadas com os valores recomendados nos códigos internacionais vigentes.

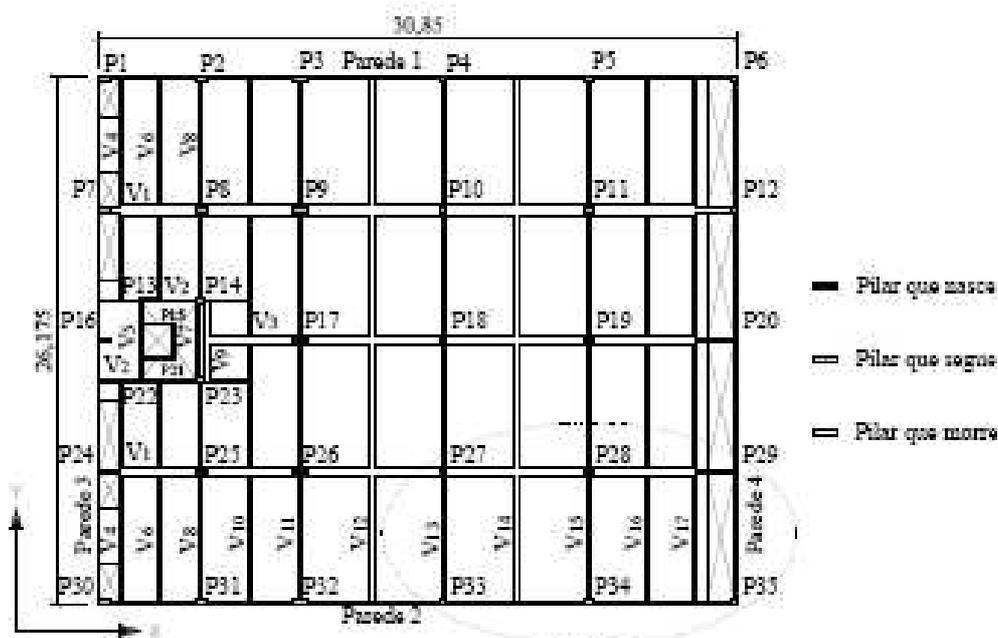


Figura 2.12 – Estrutura do pavimento da academia com o trecho analisado em destaque. LIMA (2007)

Foram simuladas numericamente algumas soluções de controle por meio da instalação de AMS, variando-se a quantidade, a posição e as propriedades dos amortecedores. Lima (2007) realizou 15 tentativas de controle com o uso de amortecedores instalados nos nós da estrutura onde ocorriam os maiores deslocamentos modais. A proposta com melhor resultado foi com o uso de três amortecedores atuando na direção vertical e três na horizontal, porém, obteve-se redução significativa somente nas velocidades e acelerações verticais e pouquíssima redução nos deslocamentos.

Mesmo com casos bem sucedidos do uso do AMS, ainda há necessidade de aprofundar o estudo desses dispositivos, por exemplo, no que diz respeito à otimização dos parâmetros dos amortecedores de massa sintonizados para lajes de edifícios. Setareh *et al* (2007) apontaram em seus estudos a existência de variações no desempenho dos

amortecedores quando as estruturas são simuladas computacionalmente e quando são instaladas de fato nas estruturas. Concluíram ainda, em seus estudos, que medições a partir de carregamentos humanos reais diferem quando massas de equivalente peso são colocadas no lugar de pessoas e que o acréscimo no número de pessoas na laje também influencia no desempenho dos amortecedores. Tais fatores comprovam a complexidade do estudo de amortecedores de massa em lajes e a necessidade de aprofundamento nos parâmetros dos AMS.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os seres humanos são muito sensíveis a níveis de vibração tão baixos como 0,001 mm. Essa sensibilidade, em geral, provoca problemas de estado limite de serviço muito antes que os níveis de vibração sejam sequer remotamente suficientes para causar dano à estrutura. (Zivanovic *et al.*, 2005) .

Pisos de edifícios comerciais apresentam uma suscetibilidade a forças dinâmicas induzidas por pessoas dependendo das atividades neles realizadas, como no exemplo de uma academia de ginástica em que ocorrem atividades rítmicas. Desta forma, o entendimento da atividade humana e das forças por ela gerada auxilia no estudo das vibrações em estruturas e por conseqüência no estudo dos mecanismos de controle estrutural.

A seguir é apresentado um estudo do movimento humano de caminhar, correr e dançar, responsáveis pelas forças dinâmicas analisadas nas estruturas desse trabalho. São apresentadas as formulações matemáticas relacionadas às forças geradas por estas atividades humanas e os princípios de funcionamento do sistema de controle por AMS, sistema este utilizado nas estruturas analisadas deste estudo.

3.1 MOVIMENTO HUMANO DE CAMINHAR E CORRER

O pedestre produz, ao caminhar, uma força que varia no tempo e no espaço, que tem componentes nas direções vertical e horizontal (lateral e longitudinal), sendo a mais importante componente a vertical. A Figura 3.1 mostra a evolução de cada uma dessas três forças ao longo do tempo.

A força gerada pelo caminhar humano apresenta, como mencionado, parcelas em várias direções, e em geral se considera apenas a parcela vertical para pisos com rigidez suficiente em seu plano para que as demais parcelas possam ser desprezadas. É o que acontece, por exemplo, numa laje de um edifício comum (Lima, 2007). O mesmo não pode ser feito, em geral, em uma passarela, na qual os efeitos das componentes horizontais podem ser importantes, uma vez que pode ser bastante flexível nas demais direções.

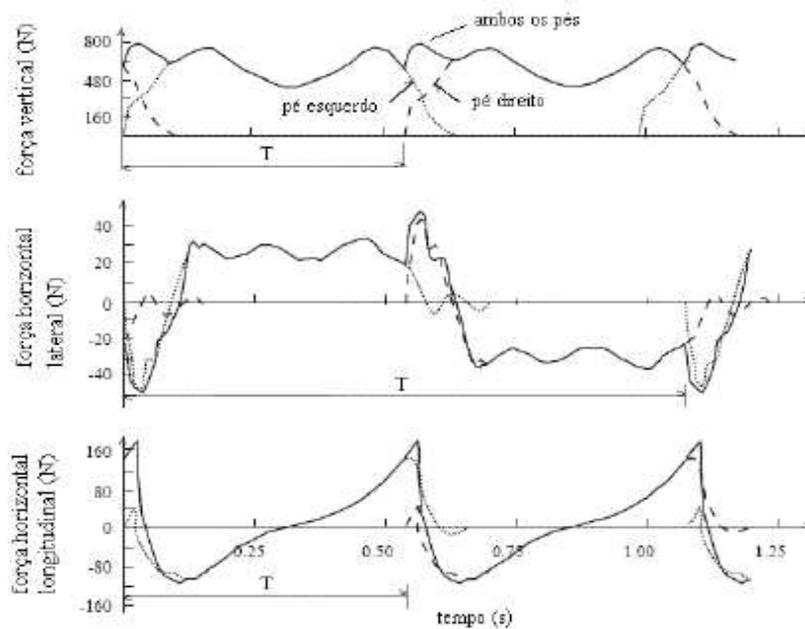


Figura 3.1 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal. (Zivanovic *et al.*, 2005).

Os principais parâmetros que caracterizam os movimentos de caminhar e correr são:

- Razão ou frequência de passo (f): Representa o número de passos dados por segundo, ou seja, a frequência de excitação, que é expressa em Hz.

- Comprimento de passo (sl): É a distância percorrida por um passo. Essa distância varia de pessoa para pessoa.

- Velocidade de avanço (fs): Representa a velocidade média de uma pessoa. Está relacionada com a razão de passo e o comprimento de passo. Para uma mesma velocidade de avanço, pessoas diferentes apresentam razões de passo e comprimentos de passo distintos.

- Tempo de contato (ct): É o tempo em que o pé do pedestre permanece em contato com o piso.

- Coeficiente de impacto (ci): Representa a razão entre a força de pico e o peso estático da pessoa.

A Figura 3.2, mostra a distribuição de forças em uma estrutura, provocada pelo movimento de uma pessoa. Observa-se que no movimento de caminhar (Fig. 3.2a), o tempo de contato (c_t) é maior do que o período de um passo (T). Devido a isso existe um pequeno período de tempo em que os dois pés do pedestre estão em contato com o piso. No movimento de correr (Fig.3.2b), o tempo de contato (c_t) é menor do que o período do passo (T). Nesse caso, os dois pés nunca estão ao mesmo tempo em contato com o piso e existe um período de tempo em que nenhum dos pés está em contato com o piso.

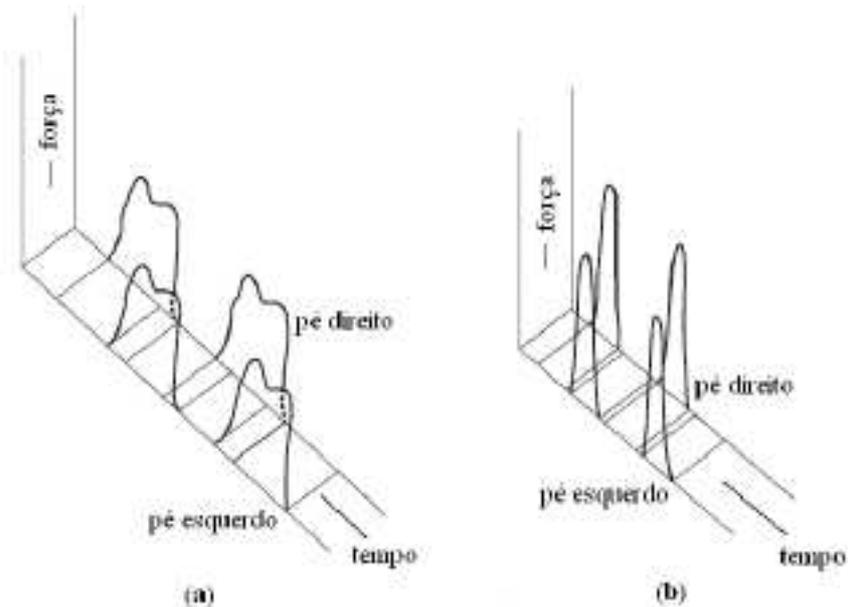


Figura 3.2 – Distribuição de forças em uma estrutura, provocada por uma pessoa caminhando (a) ou correndo (b) (Zivanovic *et al*, 2005).

A Figura 3.3 mostra como a função de carregamento se modifica em função do tipo de movimento do pedestre.

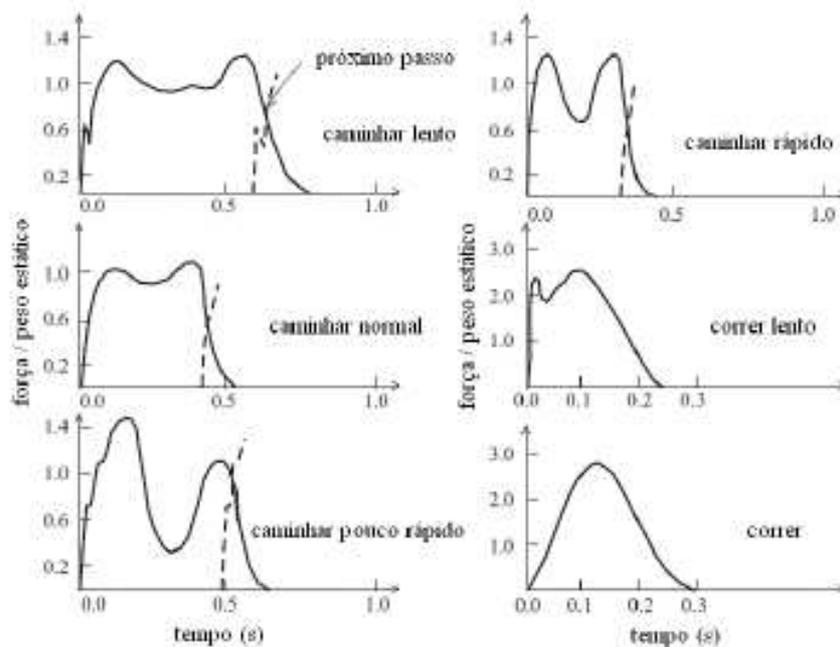


Figura 3.3 - Evolução da força vertical de um caminhar lento até o correr (Zivanovic *et al*, 2005).

Wheeler (1982) apresentou valores médios para a correlação entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr. Os resultados foram obtidos de testes experimentais. Na Figura 3.4 são mostrados os gráficos dessa correlação.

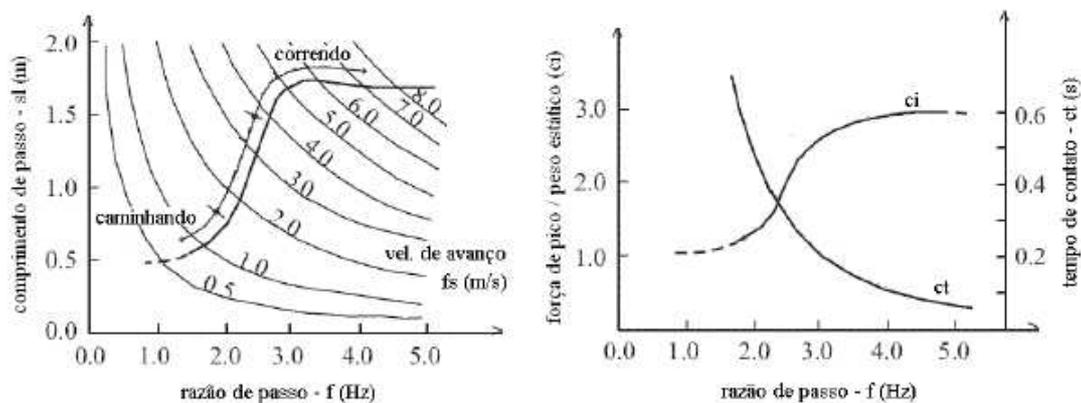


Figura 3.4 – Correlação entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr dada por Wheeler (1982).

De uma forma geral, observa-se nos gráficos de Wheeler (1982) que com o aumento da frequência de passo, aumenta-se o comprimento de passo, a velocidade de avanço, a força de pico e o coeficiente de impacto, enquanto diminui-se o tempo de contato com o piso.

Existem outros parâmetros que também exercem influência na força dinâmica produzida por uma pessoa que caminha ou que corre, segundo Bachmann e Ammann (1987) *apud* Baltar (2000), esses parâmetros são: particularidades do passo, peso, sexo do indivíduo, tipo de calçado e condições da superfície do piso.

Diversos estudos foram realizados no sentido de caracterizar-se a frequência dos principais tipos de movimentos produzidos por pessoas. Bachmann et al (1987), afirmam que o caminhar humano gera uma ação dinâmica que se caracteriza por uma frequência que varia entre 1,5 Hz e 2,5 Hz. As corridas, em geral, têm frequência variando entre 2,4 Hz e 2,7 Hz nas situações mais lentas, podendo chegar até 5,0 Hz nas situações mais rápidas. Já Baltar (2000), com base nos casos por ela analisados, afirma que a razão de passo ou a frequência do carregamento gerado pelo caminhar humano raramente excede o valor correspondente a 5 Hz.

Zivanovic *et al* (2005) cita em seu estudo diversos valores típicos de frequência do caminhar humano apresentados por vários autores, conforme indica a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores típicos de frequência do caminhar humano apresentados por outros autores (Zivanovic *et al*, 2005)

Autor	Frequência típica (Hz)
Leonard (1966)	1,7 a 2,3
Matsumoto <i>et al</i> (1978)	2,0
Bachmann <i>et al</i> (1995)	1,6 a 2,4
Kerr & Bishop (2001)	1,9

A partir das observações referentes à atividade de caminhar e correr e dos estudos realizados ao longo do tempo por diversos autores aqui apresentados, constatou-se que existe uma relativa concordância das faixas de valores de frequência para o caminhar humano e o correr.

Neste trabalho, foi dedicada maior atenção à atividade humana de pular, por ser uma atividade que produz carregamentos críticos (Bachmann *et al*, 1987), possibilitando assim a análise dos modelos de laje propostos em situações bastante desfavoráveis com relação à vibração induzida por atividades humanas.

3.2 FUNÇÃO PARA A ATIVIDADE DE PULAR

Foram discutidos anteriormente os principais parâmetros envolvidos nas ações humanas de caminhar e correr e as faixas de frequência típicas dessas atividades, porém, existe a necessidade de um modelo analítico para expressar essas ações corretamente assim como um modelo analítico para a atividade de pular.

Para a atividade de pular, Bachmann *et al* (1987) afirmam que esta atividade produz carregamentos críticos e que deve ser entendida em termos de frequência de salto. Deve ser considerado um fator de impacto, que se relaciona com o período e a frequência do salto. Desta forma, os principais parâmetros que afetam o carregamento devido à atividade de pular, em função do tempo, são a frequência, a intensidade e o peso da pessoa. Para fins de cálculo a faixa de frequência mais usual a ser considerada é de 1,8 Hz a 3,4 Hz,

A função, apresentada por Bachmann *et al* (1987), a qual será utilizada para descrever a força que surge na estrutura quando nela há pessoas pulando é a mesma usada para descrever pessoas correndo. Trata-se de uma função com seqüência de pulsos semi-senoidais:

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \text{sen}(\pi \cdot t / t_p) & \text{para } t \leq t_p \\ 0 & \text{para } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (3.1)$$

onde:

$k_p = F_{p,\max} / G =$ fator de impacto dinâmico;

$F_{p,\max} =$ carga dinâmica de pico

$G =$ peso do indivíduo (em geral tomado como $G = 800\text{N}$)

$t_p =$ duração do contato

$T_p = 1/f_s =$ período do passo

$f_s = 1/ T_p =$ razão de passo ou frequência (Hz).

A Figura 3.5, a seguir, representa o gráfico desta função, e o fator de impacto k_p é representado na Figura 3.6, variando em função da razão t_p / T_p .

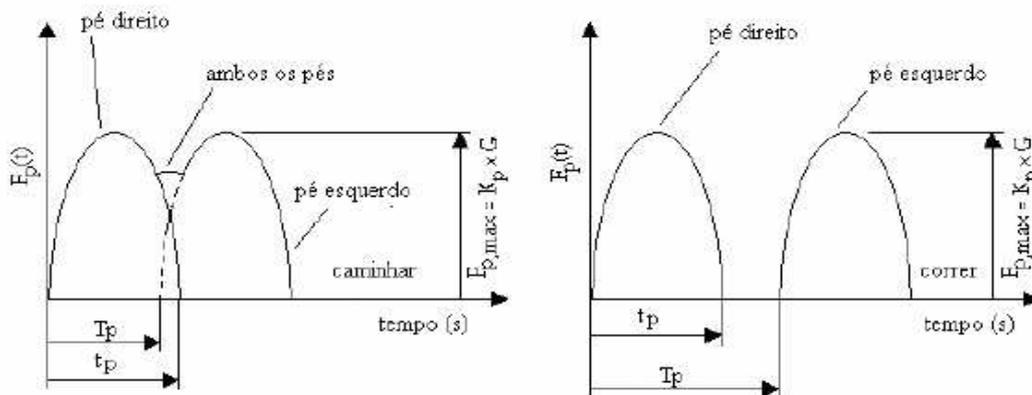


Figura 3.5 – Função de carga para pedestre para os movimentos de caminhar e correr

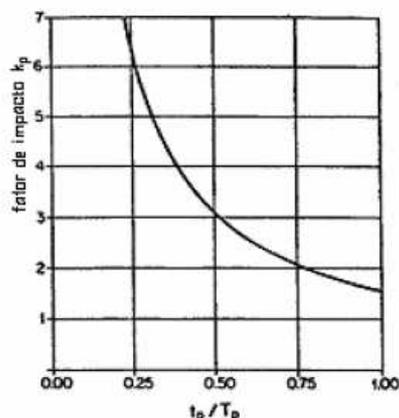


Figura 3.6 – Fator de impacto k_p versus t_p / T_p

3.3 PRINCÍPIOS DO AMORTECEDOR DE MASSA SINTONIZADO

Após breve estudo da atividade humana de caminhar e correr e em especial da formulação matemática para a atividade de pular, entende-se a necessidade de um estudo das formulações sobre o sistema de controle por AMS, que é o dispositivo de controle adotado neste trabalho para atenuar as vibrações devido à atividade humana de pular na estrutura.

O objetivo do AMS é reduzir a demanda de dissipação de energia dos membros estruturais submetidos à ação de carregamentos dinâmicos, tal redução ocorre com a transferência de parte da energia vibratória da estrutura para o AMS.

Para edifícios altos, a resposta do primeiro modo da estrutura com um AMS sintonizado na frequência deste modo pode ser reduzida consideravelmente, mas, em

geral, as respostas associadas aos modos mais altos são apenas levemente reduzidas ou, até mesmo, amplificadas. Para vencer essa limitação, mais de um AMS pode ser instalado na estrutura, podendo cada AMS destes ser sintonizado em uma frequência dominante (Housner *et al*, 1997 *apud* Ávila, 2002).

Matematicamente, a influência de um AMS no comportamento estrutural de um sistema pode ser descrita da seguinte forma: considerando-se um sistema principal de um grau de liberdade, com uma massa M , um amortecimento C , uma rigidez K , no qual se aplica uma força dinâmica $f(t)$ e ao qual é acoplado um AMS de massa m , amortecimento c e rigidez k , conforme Figura 3.7.

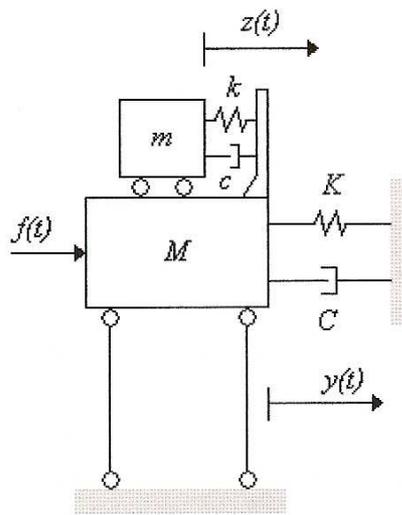


Figura 3.7 – Modelo de um sistema estrutural com um AMS instalado.

As equações de movimento do sistema estrutural são dadas por:

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + Ky(t) = c \dot{z}(t) + kz(t) + f(t) \quad (3.2)$$

$$m \ddot{z}(t) + c \dot{z}(t) + kz(t) = -m \ddot{y}(t) \quad (3.3)$$

onde:

$\ddot{y}(t)$: aceleração do sistema principal em relação a base

$\dot{y}(t)$: velocidade do sistema principal em relação a base

$y(t)$: deslocamento do sistema principal em relação a base

$z(t)$: deslocamento relativo entre o AMS e o sistema principal

Quando instalado um AMS, busca-se trazer a amplitude do pico de ressonância para o seu mais baixo valor possível de forma que as amplificações menores atinjam uma faixa mais ampla de frequência. Para tanto, deve-se obter os parâmetros ótimos dos AMS de forma a otimizar o desempenho do sistema, ou seja, obter menores picos de ressonância.

Os parâmetros utilizados na otimização do AMS são a massa, a rigidez e o amortecimento do amortecedor. Den Hartog (1956) desenvolveu uma técnica de otimização de parâmetros objetivando minimizar o deslocamento da estrutura, considerando que o sistema no qual o amortecedor atua é não-amortecido e submetido a uma excitação harmônica senoidal. Baseado no critério de minimização da amplitude do pico de ressonância da estrutura foram geradas as seguintes expressões:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3.4)$$

onde:

$\alpha_{\text{ótimo}}$ é a razão ótima de frequência entre a frequência do AMS e a do sistema principal

μ é a razão entre a massa do AMS e a massa do sistema principal.

Calculada a frequência f_{AMS} e a massa m_{AMS} do amortecedor, pode-se então calcular sua frequência circular ω_{AMS} e sua rigidez k_{AMS} , como:

$$\omega_{AMS} = 2 \cdot \pi f_{AMS} \quad (3.5)$$

$$k_{AMS} = \omega_{AMS}^2 \cdot m_{AMS} \quad (3.6)$$

O amortecimento poder ser calculado da seguinte forma:

$$c_{AMS} = 2 \cdot \xi_{AMS} \cdot m_{AMS} \cdot \omega_{AMS} \quad (3.7)$$

Com já foi comentado anteriormente, existem os chamados amortecedores de massa sintonizados AMSM, que é um sistema de controle que consiste em um grande número de pequenos amortecedores com frequências distribuídas em volta da frequência natural correspondente ao modo a ser controlado.

Matematicamente, a influência de um AMSM no comportamento estrutural de um sistema pode ser descrito da seguinte forma: considerando-se sistema principal amortecido com rigidez K , massa M e amortecimento C e um número n de amortecedores de massa sintonizados com características dinâmicas diversas, como mostra a Figura 3.8

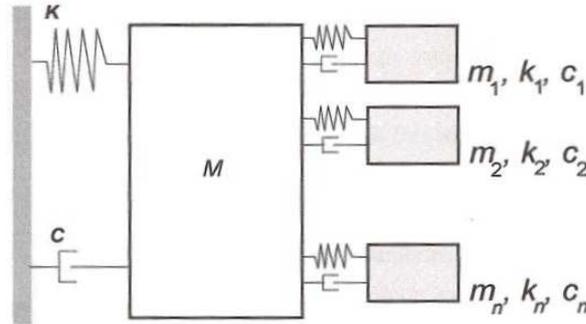


Figura 3.8 – Modelo estrutural de um sistema principal equipado com AMSM

Os parâmetros do j -ésimo AMS são a massa m_j , o amortecimento c_j e a rigidez k_j . As frequências naturais do amortecedor de massa sintonizado múltiplo são uniformemente distribuídas ao redor da frequência média. As equações de movimento do sistema estrutural da Figura 3.8 são dadas por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.8)$$

onde $\mathbf{y}(t)$ é o vetor $(n+1)$ dos deslocamentos relativos à base, onde o primeiro componente correspondente à resposta da massa principal e as componentes restantes correspondem aos n amortecedores. As $(n+1) \times (n+1)$ matrizes \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, dadas por

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M + \sum_{j=1}^n m_j & m_1 & \dots & m_n \\ m_1 & m_1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ m_n & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & K_n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$C = \begin{bmatrix} C & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

O lado direito da equação 3.8 representa a excitação externa $F(t)=[f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)]^T$. A resposta harmônica permanente do sistema é obtida substituindo-se $f_i(t)=f_i e^{-i\omega t}$ para $i = 1\dots n$ e $y(t) = Y(\omega)e^{-i\omega t}$ na equação 3.8 e isolando $Y(\omega)$

$$Y(\omega) = (\omega^2 \mathbf{M} - i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \mathbf{F} \quad (3.12)$$

Admitindo-se, por exemplo, que a excitação seja uma aceleração na base, $f_i = m_i$, tem-se que o primeiro elemento de $Y(\omega)$ representa a amplitude da resposta harmônica $y(\omega)$ da massa principal, dada por:

$$y(\omega) = \frac{M - (i\omega)^{-1} Z(\omega)}{K - \omega^2 M - i\omega C - i\omega Z(\omega)} \quad (3.13)$$

Com

$$Z(\omega) = -i\omega \sum_{j=1}^n \frac{m_j (k_j - i\omega c_j)}{k_j - i\omega c_j - \omega^2 m_j} \quad (3.14)$$

Onde $Z(\omega)$ é a impedância do sistema, definida como a amplitude da força necessária para produzir uma velocidade harmônica unitária na base do AMS.

4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS E METODOLOGIA UTILIZADA

4.1 PROGRAMA ANSYS 10.0

Neste capítulo é abordada a metodologia utilizada na modelagem numérica das lajes realizada no programa ANSYS 10.0. A proposta é de analisar o controle das vibrações em lajes de concreto induzidas pela atividade humana de pular por meio de simulações numéricas.

O ANSYS 10.0 pode ser utilizado no cálculo de análises dinâmicas e vem sendo bastante utilizado em diversos campos de pesquisas produzindo bons resultados, como nos estudos de Gomes (2006) e Lima (2007), que trabalharam a simulação de carregamentos humanos atuando em estruturas de concreto e mistas. O programa apresenta uma ampla bibliografia e tutoriais que auxiliam no entendimento das análises realizadas, além de permitir a realização de uma grande seqüência de simulações em pouco tempo, fator este fundamental neste trabalho uma vez que serão realizadas várias análises com a variação de parâmetros.

O programa ANSYS 10.0 não se resume apenas a análises dinâmicas, ele é um pacote utilizado para modelagem em elementos finitos que permite várias análises, como problemas de transferência de calor, de fluídos, acústicos, eletromagnéticos e as análises dinâmicas e estáticas (análises lineares e não-lineares).

Na resolução de problemas no ANSYS 10.0 pode-se subdividir o processo em três estágios:

Pré-processamento: etapa em que é definido o problema e é realizada a discretização da estrutura, com a definição das dimensões, nós da malha de elementos finitos, tipos de elementos adotados e as propriedades físicas e geométricas dos materiais constituintes.

Processamento: etapa em que é especificado o tipo de carregamento e os pontos de aplicação na estrutura, assim como são definidas as restrições aos movimentos translacionais e rotacionais e por fim, a solução do sistema de equações resultantes.

Pós-processamento: estágio mais avançado da análise realizada pelo programa, nesta etapa é realizada a análise dos resultados que permite, por exemplo, ver os

deslocamentos nodais, forças e momentos resultantes nos elementos, deflexões e os diagramas que relacionam os deslocamentos da estrutura em função do tempo ou em função da frequência .

4.2 DISCRETIZAÇÃO

O Programa ANSYS 10.0 apresenta em sua biblioteca uma série de elementos finitos que, em conjunto, permitiram simular a estrutura estudada. Os elementos utilizados neste trabalho estão descritos a seguir.

4.2.1 Elemento *SHELL63*

O elemento *SHELL63* possui quatro nós (I, J, K e L) com translação no eixo X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos, totalizando seis graus de liberdade em cada nó. Este elemento foi utilizado para modelar a laje, pois é adequado para simular o comportamento de uma membrana e permite carregamentos tanto no seu plano quanto normal a ele (Figura 4.1). Para o *SHELL63* é necessário definir a espessura nos quatro nós, o módulo de elasticidade, a densidade e o módulo de Poisson.

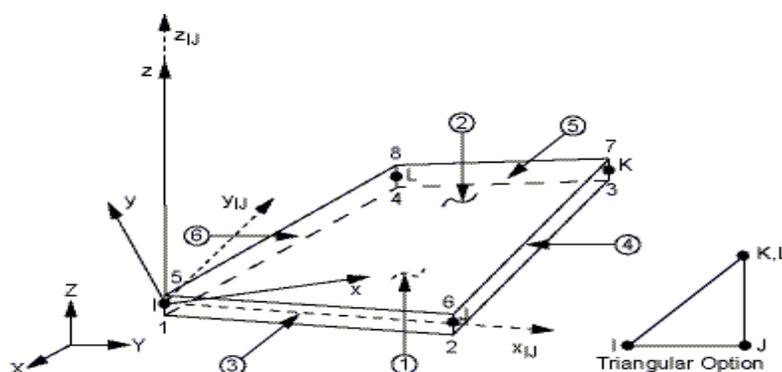


Figura 4.1 – Elemento *SHELL63* (ANSYS,1995)

4.2.2 Elemento *BEAM4*

O elemento *BEAM4* foi utilizado apenas no final do estudo quando foram acrescentadas vigas e pilares nas lajes (Figura 4.2). Tal elemento possui seis graus de liberdade em cada um dos seus dois nós (I e J), de forma que possui translação em X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos. É um elemento uniaxial apto para modelar tração, compressão, torção e dobramento.

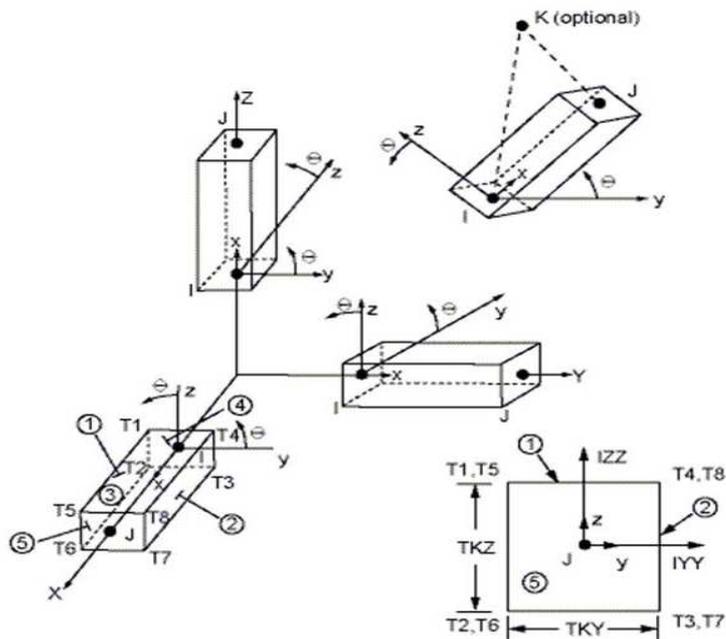


Figura 4.2 – Elemento *BEAM4* (ANSYS, 1995).

4.2.3 Elemento *COMBIN14*

O elemento *COMBIN14* simula o amortecedor e a mola (Figura 4.3). É definido por dois nós (I e J), com translação em X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos, totalizando seis graus de liberdade em cada nó. As variáveis que precisam ser definidas para este sistema mola-amortecedor são a constante de rigidez da mola (K) e o coeficiente de amortecimento do amortecedor (C). Este elemento foi utilizado na análise para simular o sistema de mola-amortecedor existente no AMS.

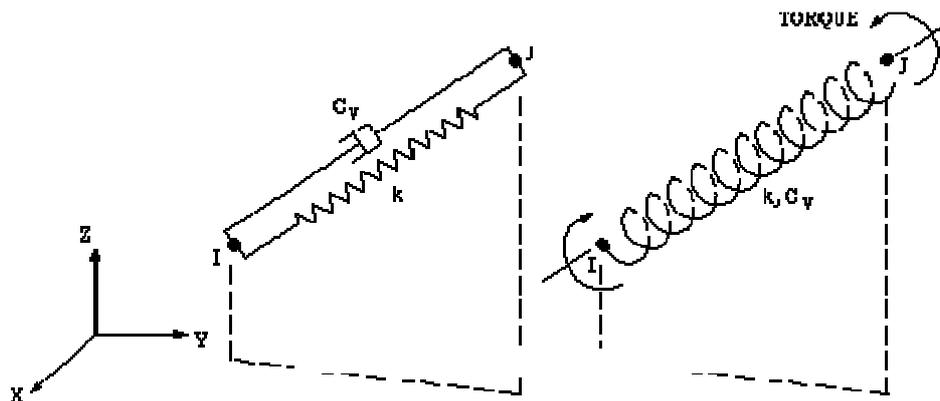


Figura 4.3 – Elemento *COMBIN14* (ANSYS, 1995).

4.2.4 Elemento *MASS21*

É um elemento pontual apto para simular massa e inércia, tanto translacional quanto rotacional (Figura 4.4). Possui seis graus de liberdade, sendo três rotações e três translações. O elemento *MASS21* simulou no trabalho a massa do AMS, a massa é

definida e aplicada no nó terminal do elemento *COMBIN14*. Para este estudo não foi considerada a inércia rotacional no elemento *MASS21*, a única variável introduzida foi a massa do mesmo.

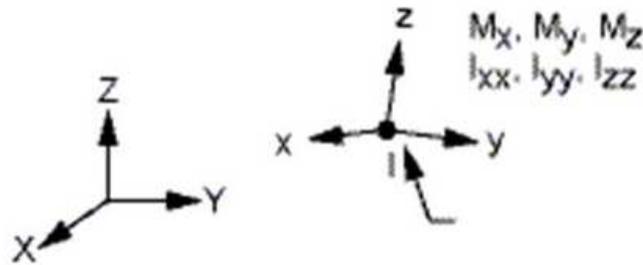


Figura 4.4 – Elemento *MASS21*(ANSYS, 1995).

4.3 ETAPAS E METODOLOGIA DA ANÁLISE NUMÉRICA

É importante destacar que para a análise do controle de vibrações em lajes com o uso de AMS utilizou-se o programa ANSYS 10.0 como ferramenta computacional para simular as estruturas, os carregamentos aplicados e os mecanismos de controle.

A análise numérica é iniciada com a definição dos elementos finitos usados, conforme indicado no item 4.2 anterior. A partir de um modelo inicial de laje foi testada a discretização da malha e feita uma análise estática para validar o modelo numérico. Em seguida, veio a etapa de simular vários modelos de laje, de forma aleatória, variando-se suas dimensões em largura, comprimento, espessura e configuração de apoio.

A Figura 4.5 mostra alguns dos vários modelos iniciais de laje que foram simulados variando-se suas configurações de apoio. Nestes cinco primeiros, a dimensão das lajes é 5m x 4m, espessura de 0,07m, módulo de elasticidade de 29GPa, Coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 2500kg/m³. No plano XY das lajes foi aplicada uma carga distribuída de 2000 N/m² a fim de simular uma sobrecarga de revestimento.

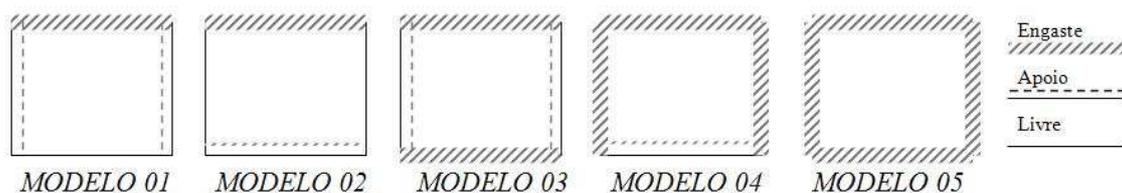


Figura 4.5 – Primeiros modelos de laje com suas respectivas configurações de apoio.

Para os modelos de lajes apresentados na figura anterior, obtiveram-se os cinco primeiros modos de vibração e suas respectivas frequências naturais, conforme indica a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Frequências naturais dos modelos iniciais de laje

MODELO 01	1° modo de vibração 2° modo de vibração 3° modo de vibração 4° modo de vibração 5° modo de vibração	$f_1 = 6,670 \text{ Hz}$ $f_2 = 19,88 \text{ Hz}$ $f_3 = 20,98 \text{ Hz}$ $f_4 = 35,04 \text{ Hz}$ $f_5 = 42,27 \text{ Hz}$
MODELO 02	1° modo de vibração 2° modo de vibração 3° modo de vibração 4° modo de vibração 5° modo de vibração	$f_1 = 10,93 \text{ Hz}$ $f_2 = 13,54 \text{ Hz}$ $f_3 = 22,50 \text{ Hz}$ $f_4 = 35,56 \text{ Hz}$ $f_5 = 38,74 \text{ Hz}$
MODELO 03	1° modo de vibração 2° modo de vibração 3° modo de vibração 4° modo de vibração 5° modo de vibração	$f_1 = 15,31 \text{ Hz}$ $f_2 = 33,90 \text{ Hz}$ $f_3 = 34,82 \text{ Hz}$ $f_4 = 52,67 \text{ Hz}$ $f_5 = 61,41 \text{ Hz}$
MODELO 04	1° modo de vibração 2° modo de vibração 3° modo de vibração 4° modo de vibração 5° modo de vibração	$f_1 = 17,84 \text{ Hz}$ $f_2 = 35,48 \text{ Hz}$ $f_3 = 41,47 \text{ Hz}$ $f_4 = 57,87 \text{ Hz}$ $f_5 = 62,55 \text{ Hz}$
MODELO 05	1° modo de vibração 2° modo de vibração 3° modo de vibração 4° modo de vibração 5° modo de vibração	$f_1 = 21,44 \text{ Hz}$ $f_2 = 35,66 \text{ Hz}$ $f_3 = 49,14 \text{ Hz}$ $f_4 = 64,01 \text{ Hz}$ $f_5 = 64,06 \text{ Hz}$

A partir das respostas da análise modal dos primeiros modelos de laje, outros modelos foram propostos variando-se as dimensões da laje a fim de se obter frequências iniciais baixas. Depois de escolhidos os modelos de laje, a próxima etapa era aplicar um carregamento harmônico e analisar o desempenho dos amortecedores de massa instalados na laje. A etapa seguinte consistiu em aplicar uma carga simulando a atividade de pular e também estudar o desempenho do AMS instalado na laje.

A análise numérica tinha como objetivo realizar várias simulações de propostas de controle com AMS variando-se os parâmetros μ (razão de massa), α (razão de frequência) e ξ (taxa de amortecimento) e obter resultados satisfatórios na redução das vibrações, principalmente nos deslocamentos da laje em função do tempo.

4.4 ESCOLHA DOS MODELOS DE LAJE

Como foi mencionado anteriormente, a etapa inicial foi criar vários modelos de laje com diferentes tamanhos e configurações de apoio e obter as frequências naturais de cada modelo, de forma a se obter baixas frequências iniciais, de valores próximos a frequência de 3,40 Hz. Dentre os vários modelos simulados, quatro modelos foram escolhidos para realizar as análises estruturais e estão indicados na Figura 4.6.

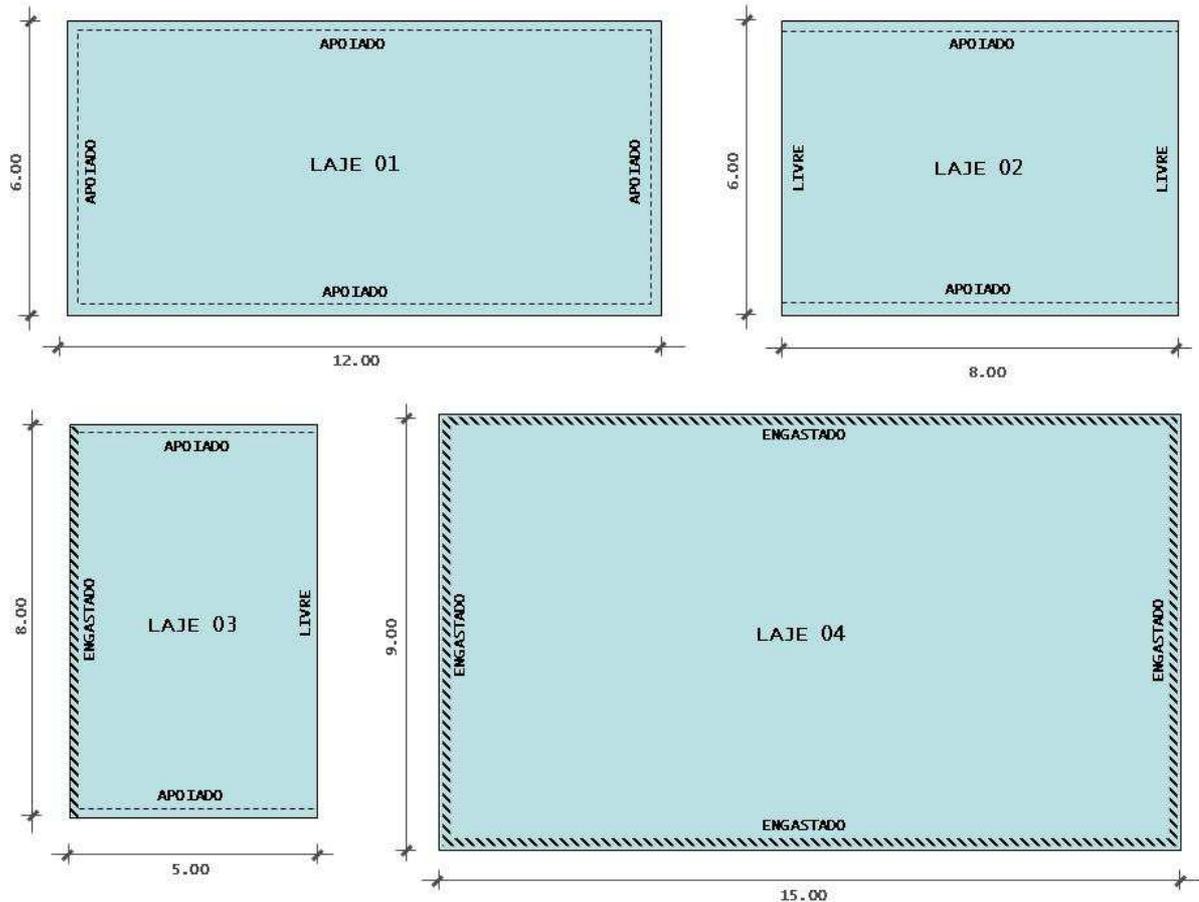


Figura 4.6 – Geometria e condições de contorno dos 4 modelos de laje analisados.

O critério de escolha destes quatro modelos não se limitou apenas às frequências naturais da laje, mas também, à configuração de apoio. Buscou-se modelos de diferentes configurações e que apresentassem na análise modal deslocamentos diferenciados.

As propriedades físicas e geométricas dos quatro modelos de laje estão indicadas na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e geométricas das Lajes

Propriedades	Valor
Módulo de Elasticidade (GPa)	29
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade do Concreto (Kg/m ³)	2500
Espessura (m)	0,07

4.5 ANÁLISE ESTÁTICA

Segundo a tabela 4.1 da norma NBR6118(2003), pelo efeito “Aceitabilidade sensorial”, o deslocamento admissível em lajes é $l/250$, onde l é o comprimento do vão da laje. Considerando os quatro modelos de laje adotados, tem-se na Tabela 4.3 o deslocamento máximo admissível para cada laje assim como a deslocamento máximo quando aplicada uma carga distribuída sobre os nós do plano XY de 2500 N/m².

Tabela 4.3 – Deslocamentos máximos admissíveis para os 4 modelos adotados

Modelo	Dimensões (m)	Deslocamento Máximo Admissível (mm)	Deslocamento máximo na análise estática (mm)
Laje 01	12x6	24	9
Laje 02	8x6	24	13,98
Laje 03	5x8	20	17,44
Laje 04	15x9	36	10,6

Importante destacar que como o objetivo do trabalho é realizar um estudo paramétrico dos amortecedores de massa sintonizados, alguns modelos hipotéticos simulados neste estudo buscaram uma situação bastante crítica de carregamento, com casos de deslocamentos maiores que os admissíveis. Tais modelos foram simulados de maneira que pudesse ser feita uma comparação dos parâmetros dos AMS devido à diferença do tipo de carregamento aplicado com as diferentes configurações de apoio dos quatro modelos de lajes.

4.6 ANÁLISE MODAL

É realizada a análise modal das estruturas, que tem como objetivo determinar os parâmetros modais do sistema: as frequências naturais, os modos de vibração e os fatores de amortecimento modal.

A obtenção das frequências naturais e modos de vibração dos vários modelos de lajes foram realizados através da análise modal por elementos finitos no ANSYS 10.0 pelo algoritmo de extração de autovalor e autovetor de *Block Lanczos* até a seleção das

quatro lajes, esse método foi utilizado por obter uma rápida convergência (ANSYS,1995).

Foram apresentados no estudo paramétrico os primeiros 5 primeiros modos naturais de vibração dos 4 modelos de lajes visto que nos primeiros modos os valores das frequências são próximos aos associados aos carregamentos dinâmicos gerados pela atividade de pular.

4.7 CARREGAMENTO HARMÔNICO

O primeiro carregamento harmônico é representado pela expressão:

$$f(t)=P_0\text{sen}\omega t \quad (4.1)$$

onde P_0 é a amplitude da força e ω é a frequência da excitação.

Foi o primeiro carregamento aplicado nos nós que apresentaram maiores deslocamentos verticais (direção Z) quando realizada a análise modal. A intenção, com isto era de se induzir o estado mais crítico de carregamento. Em alguns casos, mais de um carregamento harmônico foi aplicado no mesmo instante de tempo na laje, de forma a avaliar a resposta dinâmica sem controle e com controle.

No estudo paramétrico para os quatro modelos de laje, a amplitude da força P_0 adotada foi de 1000 N, já a frequência de excitação ω adotada foi a mesma da primeira frequência natural de cada laje, uma vez que a intenção era simular a situação mais desfavorável.

4.8 CARREGAMENTO HUMANO

Foi aplicado, por fim, um carregamento dinâmico simulando a atividade de pular pela equação 3.1, sugerida por Bachmann *et al.* (1987).

O carregamento foi aplicado na laje durante 8s, intervalo de tempo suficiente para realização de uma rápida seqüência de pulos consecutivos e rápidos. Esse intervalo tempo foi subdividido em intervalos de tempo ou passos de tempo de 0,01s. Dependendo das dimensões de cada um dos quatro modelos de laje foi definido o número de pessoas pulando sobre a estrutura supondo uma atividade numa sala de ginástica e respeitando o espaçamento entre os indivíduos. Para cada um dos modelos

de laje foram obtidos os pares de tempo e suas respectivas cargas associadas aplicadas em nós específicos.

De acordo com a resposta dinâmica obtida com este carregamento para os quatro modelos de laje, identificaram-se os nós que provavelmente apresentariam as condições mais críticas de deslocamento, velocidade e aceleração verticais.

4.9 MODELOS COM AMORTECEDORES

A partir das respostas obtidas na análise dinâmica foram propostas diferentes configurações de amortecedores de massa sintonizados, que permitiram um estudo detalhado da influência dos principais parâmetros envolvidos no processo.

Para os valores iniciais do estudo paramétrico foram utilizados como referência os resultados obtidos nos estudos de Ávila (2002) e Carneiro (2004) para a razão de massa μ , razão entre frequência α e para a taxa de amortecimento ξ . O estudo paramétrico iniciava-se para cada modelo com a variação do valor da razão de frequência α até a obtenção da melhor redução no deslocamento vertical máximo (direção Z), então se seguia o estudo dos demais parâmetros (μ e ξ) fixando-se o valor mais indicado de α obtido.

A variação dos valores dos parâmetros na simulação era aleatória até a obtenção de resultados considerados satisfatórios. É importante destacar que a partir dos resultados obtidos no estudo dos modelos iniciais, os demais modelos passavam a seguir a orientação dos resultados já obtidos, de maneira a diminuir o número de simulações realizadas no ANSYS e comparar com as observações já realizadas nos modelos iniciais.

5 ANÁLISE NUMÉRICA

A análise numérica dos quatro modelos de laje desenvolvidos neste trabalho foi realizada a partir de um estudo paramétrico dos AMS instalados nas lajes, de forma a verificar qual a proposta de controle que melhor se aplica em cada modelo de laje.

Neste capítulo é apresentado primeiramente a análise modal das lajes com seus respectivos modos e frequências naturais. Em seguida é realizada a análise do carregamento harmônico aplicado nas lajes com o estudo dos parâmetros dos AMS. Concluindo, é aplicada a carga que representa atividade de pular e o estudo paramétrico dos AMS para este tipo de carregamento.

Essa sequência de análises é apresentada para cada um dos quatro modelos de laje selecionados de forma a organizar os estudos paramétricos de cada modelo e permitir uma melhor comparação dos resultados.

5.1 LAJE 01

5.1.1 Análise Modal

O primeiro modelo de laje analisado, apresentado na Figura 5.1, possui além de frequências naturais baixas, uma configuração de apoio bastante utilizada na prática com os quatro bordos apoiados. Suas dimensões são de 12x6m e espessura de 7 cm. O modelo numérico possui malha com 1891 nós a cada 20 cm no plano XY. As frequências naturais deste modelo obtidas através da análise modal estão indicadas na Tabela 5.1. Nota-se que a primeira frequência é próxima daquelas do carregamento humano.

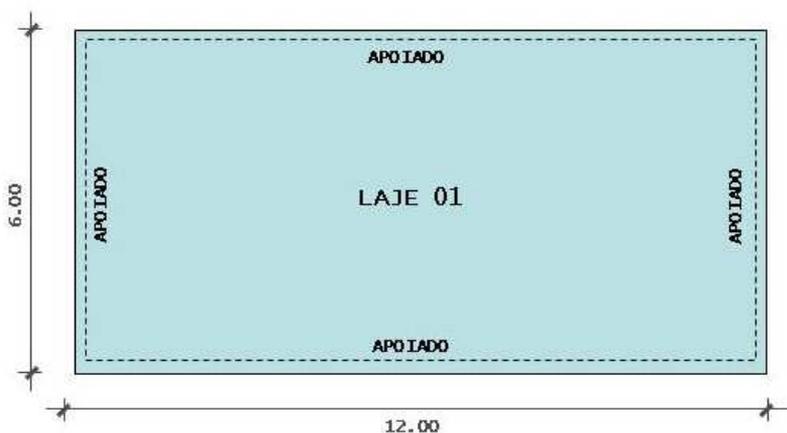


Figura 5.1 – Modelo de LAJE 01 .

Tabela 5.1 – Frequências naturais da Laje 01

	FREQUÊNCIA NATURAL
1° MODO	3,934 Hz
2° MODO	6,294 Hz
3° MODO	10,226 Hz
4° MODO	13,375 Hz
5° MODO	15,731 Hz
6° MODO	15,731 Hz
7° MODO	19,656 Hz
8° MODO	22,807 Hz
9° MODO	25,151 Hz
10° MODO	29,105 Hz

Os três primeiros modos de vibração da Laje 01, que são modos de flexão na vertical, estão apresentados na Figura 5.2.

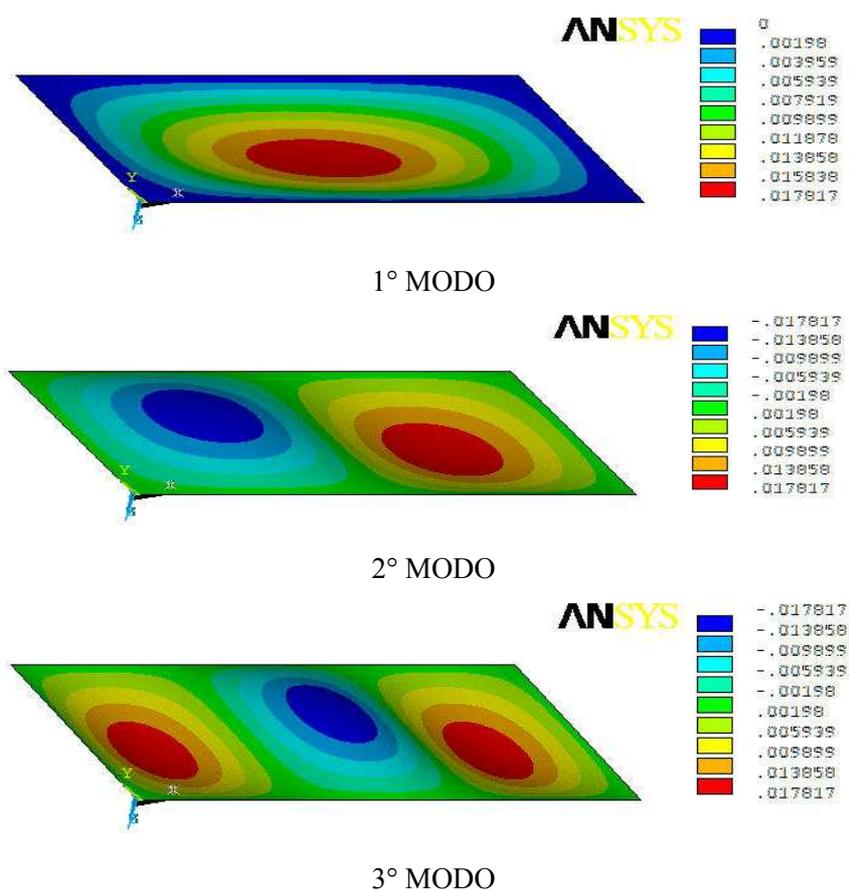


Figura 5.2 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais.

No primeiro modo, os maiores deslocamentos se concentram no centro do vão, já no segundo modo e terceiro modo, os deslocamentos verticais se distribuem em outros pontos da laje.

5.1.2 Análise para um carregamento harmônico

Uma carga senoidal, conforme a Equação 4.1 anteriormente apresentada foi aplicada no ponto central da laje para obtenção da evolução da resposta dinâmica em função da frequência. A Figura 5.3 apresenta a resposta em frequência do deslocamento vertical do nó central da laje para este carregamento, a partir da qual se pode verificar que os modos que mais influenciam a resposta dinâmica neste caso são o primeiro e terceiro modos.

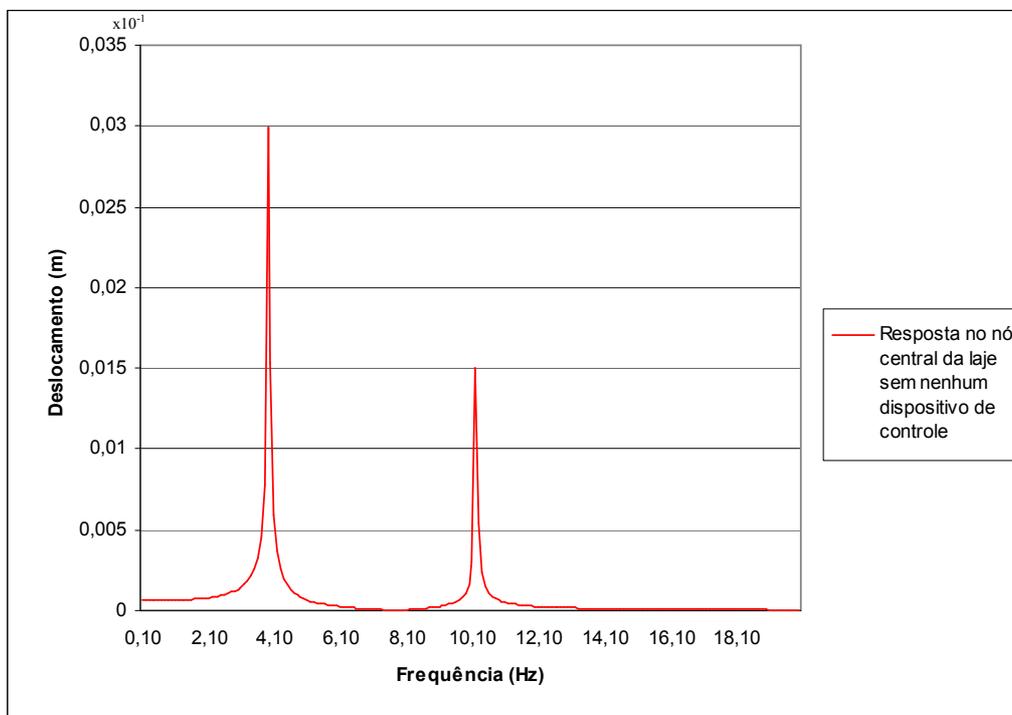


Figura 5.3 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó central da laje (Nó 946).

Para obtenção da evolução da resposta dinâmica em função do tempo foi aplicada nos estudos seguintes uma carga senoidal com uma frequência igual à frequência mais baixa da estrutura ($f = 3,93$ Hz). A Tabela 5.2 apresenta os valores máximos do deslocamento U_z , velocidade V_z e aceleração a_z no nó central da laje.

Tabela 5.2 – Resposta máxima sem controle no nó central (Nó 946)

U_z (mm)	V_z (m/s)	a_z (m/s ²)
2,812	0,0687	1,68

Visando a redução das vibrações decorrentes deste carregamento harmônico aplicado, partiu-se para o estudo da redução das vibrações a partir do controle estrutural feito com o uso do AMS. São analisadas propostas de controle com o uso de um ou mais amortecedores, variando-se parâmetros do AMS e sua posição conforme os critérios adotados em cada estudo.

5.1.2.1 Estudo 01

Inicialmente o estudo para o projeto do sistema de controle estrutural utilizando AMS previu um único amortecedor instalado no ponto central da Laje 01, posição esta escolhida por ser a de maior amplitude de deslocamento modal, conforme indica a Figura 5.4. Na falta de diretivas de projeto na literatura para determinação dos parâmetros do AMS para lajes, foi realizado um estudo paramétrico variando-se suas propriedades e verificando quais as que melhoravam o desempenho do AMS. As tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as reduções (Δ %) das respostas obtidas variando-se a razão de massa μ , a razão entre frequências α e a taxa de amortecimento ξ . Verificou-se que o valor de α mais adequado foi $\alpha = 0,96$, isto é, sintonizando-se o AMS bem próximo à frequência natural da laje correspondente. No caso da taxa de amortecimento, verificou-se que ao aumentá-la prejudica-se a eficiência do amortecedor. Quanto maior a massa do amortecedor, relativa ao parâmetro μ estudado, melhor sua eficiência. No entanto, este parâmetro requer especial atenção porque o aumento do peso do amortecedor pode levar à flechas excessivas e comprometer a segurança da estrutura, por este motivo adotar-se-á $\mu = 0,1$.

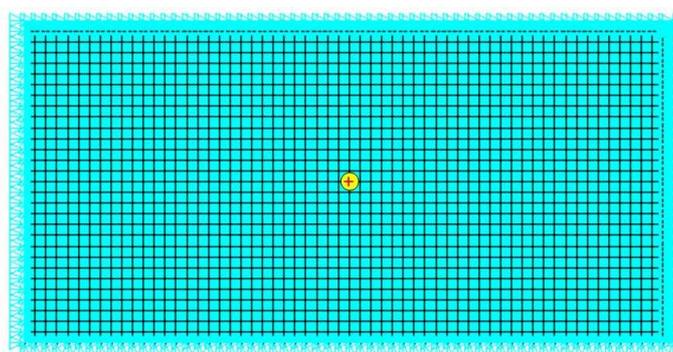


Figura 5.4 – AMS posicionado no Nó 946 destacado na laje e carregamento aplicado

Tabela 5.3 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha = 0,80$	0,817	70,9469
$\alpha = 0,85$	0,740	73,6629
$\alpha = 0,90$	0,726	74,1821
$\alpha = 0,94$	0,720	74,3634
$\alpha = 0,95$	0,720	74,3883
$\alpha = 0,96$	0,719	74,4061
$\alpha = 0,97$	0,722	74,3243
$\alpha = 0,99$	0,727	74,1323
$\alpha = 1,00$	0,730	74,0398
$\alpha = 1,10$	0,770	72,6174

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Tabela 5.4 – Variação de ξ para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\xi = 0,4\%$	0,7148	74,5804
$\xi = 0,5\%$	0,7157	74,5484
$\xi = 0,6\%$	0,7165	74,5199
$\xi = 0,8\%$	0,7181	74,4630
$\xi = 0,9\%$	0,7189	74,4346
$\xi = 1,0\%$	0,7197	74,4061
$\xi = 2,0\%$	0,7273	74,1358
$\xi = 3,0\%$	0,7386	73,7340

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\alpha = 0,96\%$

Tabela 5.5 – Variação de μ para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\mu = 0,05$	0,9481	66,2838
$\mu = 0,75$	0,8225	70,7504
$\mu = 0,10$	0,7148	74,5804
$\mu = 0,15$	0,5652	79,9004
$\mu = 0,20$	0,5235	81,3834

Valores obtidos para: $\xi = 0,4\%$ e $\alpha = 0,96\%$

A partir da análise deste primeiro estudo realizado, os parâmetros mais indicados para o caso de 1 AMS no nó central da laje e com o carregamento considerado estão apresentados na Tabela 5.6. A evolução dos deslocamentos neste caso, e sem controle, é apresentada na Figura 5.5 .

Tabela 5.6 – Parâmetros mais indicados no Estudo 01.

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha = 0,96$ $\mu = 0,10$ $\xi = 0,4\%$	0,7148	74,5804

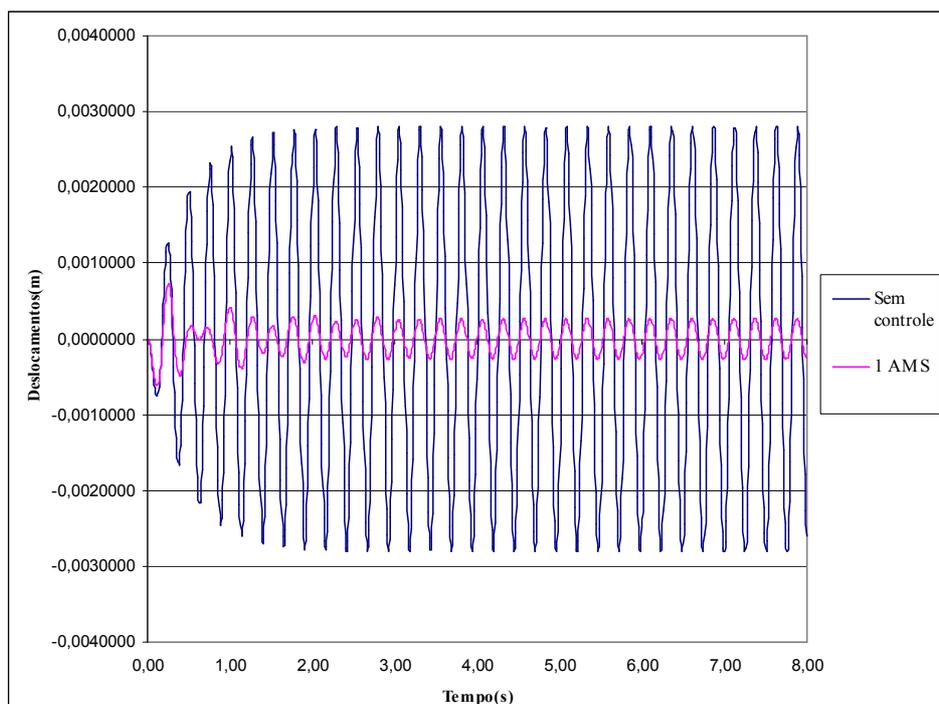


Figura 5.5 - Deslocamentos em função do tempo com 1 AMS instalado no nó central para os parâmetros $\alpha = 0,96$, $\mu = 0,10$ e $\xi = 0,4\%$.

A influência dos parâmetros α , ξ e μ na porcentagem de redução dos deslocamentos (Δ %) é indicada, respectivamente, nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

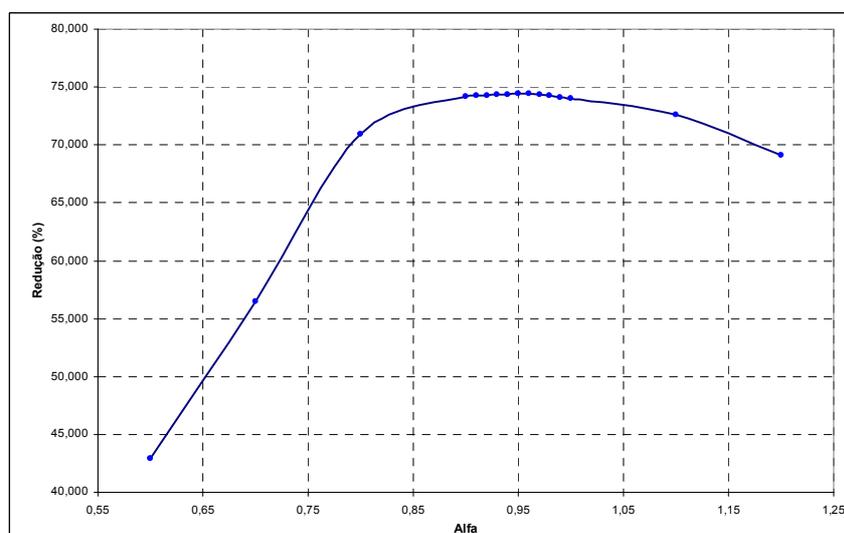


Figura 5.6 – Influência de α na redução dos deslocamentos (para $\mu = 0,10$ e $\xi = 0,4\%$).

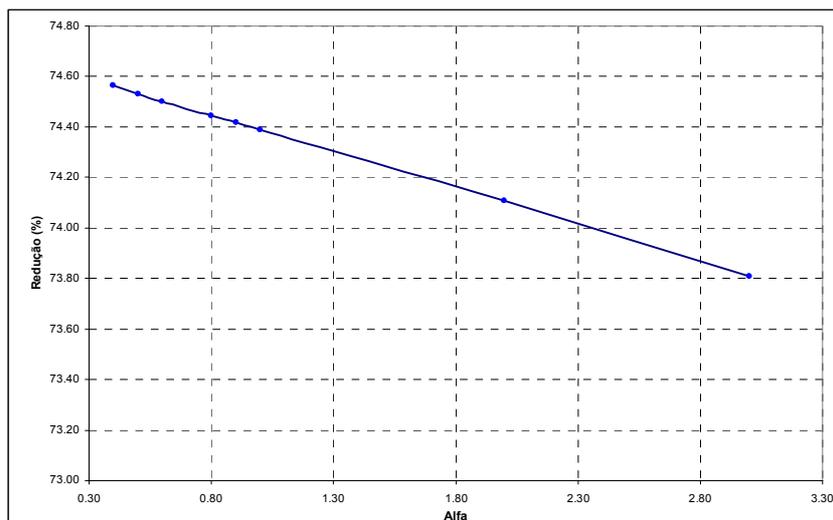


Figura 5.7 – Influência de ξ na redução dos deslocamentos (para $\mu = 0,10$ e $\alpha=0,96$).

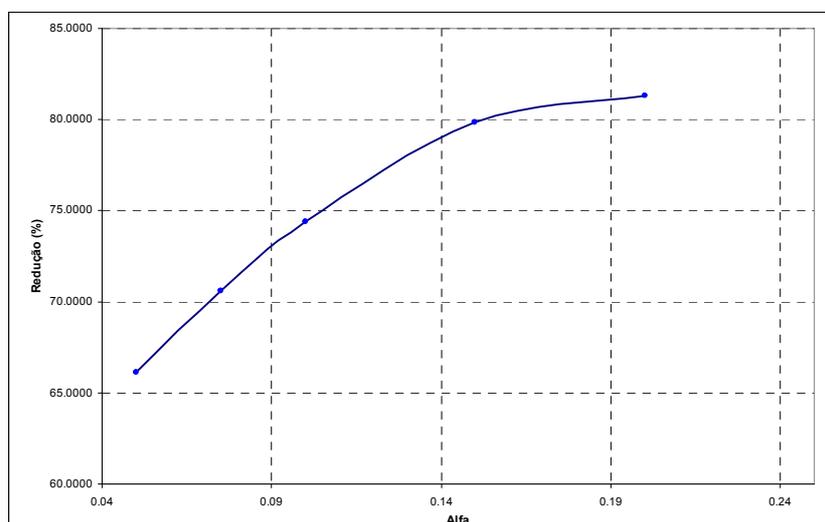


Figura 5.8 – Influência de μ na redução dos deslocamentos (para $\xi= 0,4\%$ e $\alpha=0,96$).

Pelos gráficos apresentados acima, verifica-se o gráfico da razão de frequência α que a eficiência é muito parecida para uma faixa de 0,85 a 1,05. O gráfico que representa a taxa de amortecimento mostra que as reduções aumentam quando se diminui o valor de ξ . Para a razão de massa verifica-se a melhora da eficiência com o aumento da massa.

5.1.2.2 Estudo 02

Neste estudo, analisou-se o desempenho de dois AMS instalados ao invés de um único amortecedor. Estes foram posicionados próximos ao nó central da laje, cerca de 80 cm deste ponto, conforme mostra a Figura 5.9 e a massa foi dividida igualmente

entre os dois AMS. Foi aplicado novamente no nó central o carregamento senoidal considerado anteriormente. As tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os resultados de um novo estudo paramétrico para o caso de 2 AMS na forma dos deslocamentos máximos do nó central (Nó 946) juntamente com a redução da resposta alcançada.

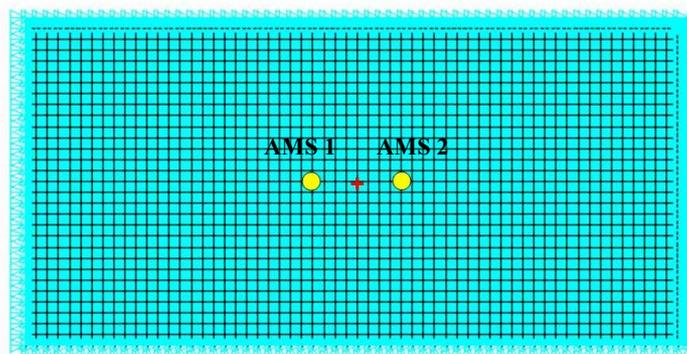


Figura 5.9 – AMS nos nós 942 e 950 destacados na laje e carregamento aplicado no centro.

Tabela 5.7 – Variação de α para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	0,7567	73,0903
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 1,00$	0,7497	73,3393
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$	0,7499	73,3321
$\alpha_1 = 1,05$ $\alpha_2 = 1,05$	0,7500	73,3286
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 1,00$	0,7437	73,5526
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	0,7424	73,5989
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,10$	0,7530	73,2219
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	0,7683	72,6778
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	0,8487	69,8186

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Tabela 5.8 – Variação de ξ para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\xi_1 = 4,0 \%$ $\xi_2 = 4,0 \%$	0,764	72,830
$\xi_1 = 3,0 \%$ $\xi_2 = 3,0 \%$	0,757	73,079
$\xi_1 = 2,0 \%$ $\xi_2 = 2,0 \%$	0,749	73,335
$\xi_1 = 1,0 \%$ $\xi_2 = 1,0 \%$	0,742	73,598
$\xi_1 = 0,6 \%$ $\xi_2 = 0,6 \%$	0,739	73,709
$\xi_1 = 0,4 \%$ $\xi_2 = 0,4 \%$	0,737	73,766

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$; $\alpha_{\text{AMS1}} = 1,00$ e $\alpha_{\text{AMS2}} = 1,00$

Tabela 5.9 – Variação de μ para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\mu_1 = 0,06$ $\mu_2 = 0,06$	0,9119	67,571
$\mu_1 = 0,08$ $\mu_2 = 0,08$	0,8196	70,853
$\mu_1 = 0,10$ $\mu_2 = 0,10$	0,7377	73,766
$\mu_1 = 0,20$ $\mu_2 = 0,20$	0,5341	81,006

Valores obtidos para: $\xi = 0,4 \%$; $\alpha_{\text{AMS1}} = 1,00 \%$ e $\alpha_{\text{AMS2}} = 1,00 \%$

A partir dos resultados das tabelas anteriores, chegou-se aos valores mais indicados de parâmetros neste caso, conforme Tabela 5.10. O gráfico que mostra a evolução dos deslocamentos está indicado na Figura 11 a seguir.

Tabela 5.10 – Parâmetros mais indicados do Estudo 02.

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha_{1e2} = 1,00$ $\mu_{1e2} = 0,10$ $\xi_{1e2} = 0,4\%$	0,7377	73,766

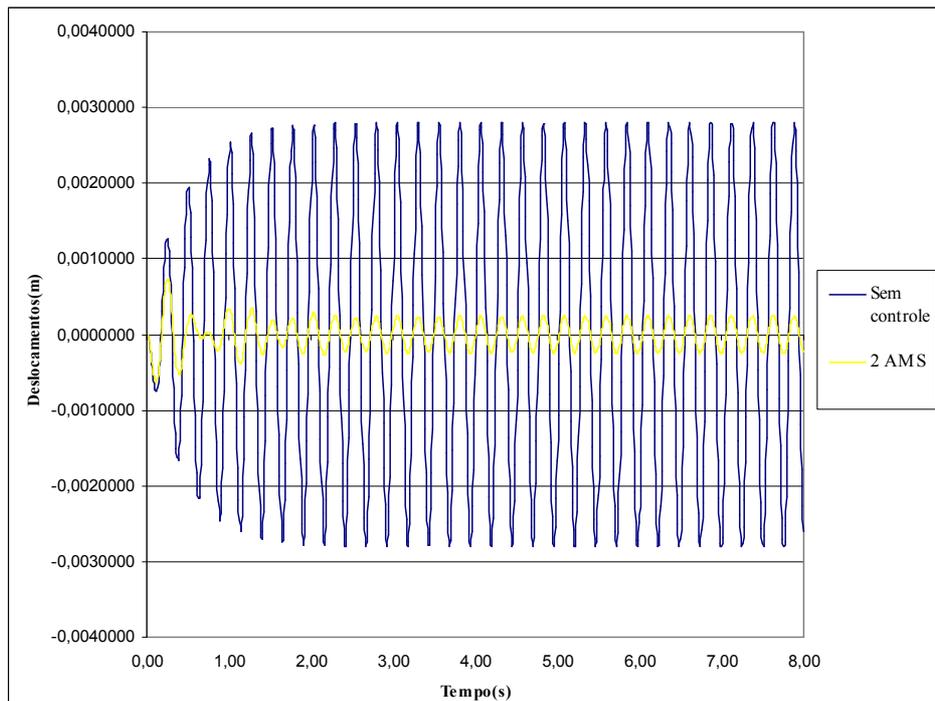


Figura 5.10 - Deslocamentos em função do tempo com 2 AMS instalados nos nós 942 e 950 para os parâmetros $\alpha_{1e2} = 1,00$, $\mu_{1e2} = 0,10$ e $\xi_{1e2} = 0,4\%$.

Comparando os resultados deste estudo e o anterior, verifica-se que com somente um único amortecedor a redução de 74,58 % foi obtida com $\alpha = 0,96$. Para dois amortecedores instalados, a redução de 73,66% foi obtida com $\alpha = 1,00$ nos dois amortecedores.

5.1.2.3 Estudo 03

No Estudo 03 foram posicionados 3 AMS nos pontos de maior amplitude modal do terceiro modo, conforme indica a Figura 5.11. Os AMS 1 e 2 foram posicionados a 2m da extremidade (com 25% da massa total dos amortecedores) e AMS 3 (com 50% da massa total dos amortecedores) foi posicionado no centro. A Tabela 5.11 apresenta os valores dos deslocamentos máximos e as respectivas reduções na resposta variando-se as relações de frequência α dos três amortecedores.

A partir deste estudo e nos estudos paramétricos seguintes para o carregamento harmônico na Laje 01 se adotará a razão entre massa $\mu = 0,1$, pois como observado nos dois estudos anteriores, o aumento da razão entre massas melhora o desempenho do amortecedor, todavia, o aumento do peso do amortecedor pode levar à flechas excessivas.

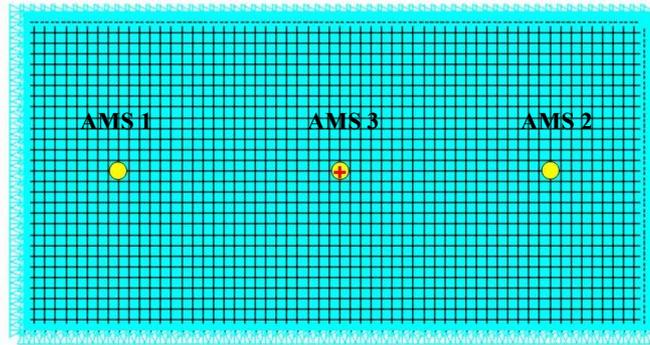


Figura 5.11 – AMS nos nós 946, 926 e 966 destacados na laje

Tabela 5.11 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 1,00$	0,922	67,230
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 1,00$	0,912	67,564
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$ $\alpha_3 = 1,00$	0,895	68,190
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 1,00$	0,903	67,895
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,96$	0,902	67,923

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Logo em seguida são apresentadas as taxas de amortecimento ξ para os três amortecedores. O valor mais indicado na Tabela 5.12 é 0,4% o mesmo do estudo anterior.

Tabela 5.12 – Variação de ξ para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\xi_1 = 0,4\%$ $\xi_2 = 0,4\%$ $\xi_3 = 0,4\%$	0,8909	68,3179
$\xi_1 = 0,8\%$ $\xi_2 = 0,8\%$ $\xi_3 = 0,8\%$	0,8933	68,2326
$\xi_1 = 1,0\%$ $\xi_2 = 1,0\%$ $\xi_3 = 1,0\%$	0,8945	68,1899

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$; $\alpha_{\text{AMS1}} = 1,10$ e $\alpha_{\text{AMS2}} = 1,10$ e $\alpha_{\text{AMS3}} = 1,00$

A partir dos resultados das tabelas anteriores, chegou-se a valores mais indicados de parâmetros para o caso de 3 AMS com carga senoidal, conforme Tabela 5.13. O gráfico com os deslocamentos para este caso está indicado na Figura 5.12.

Tabela 5.13 – Parâmetros mais indicados do Estudo 03

	$U_{m\acute{a}x}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,812	-
$\alpha_{1\&2} = 1,10$ e $\alpha_3 = 1,00$ $\mu = 0,10$ $\xi = 0,4\%$	0,890	68,3179

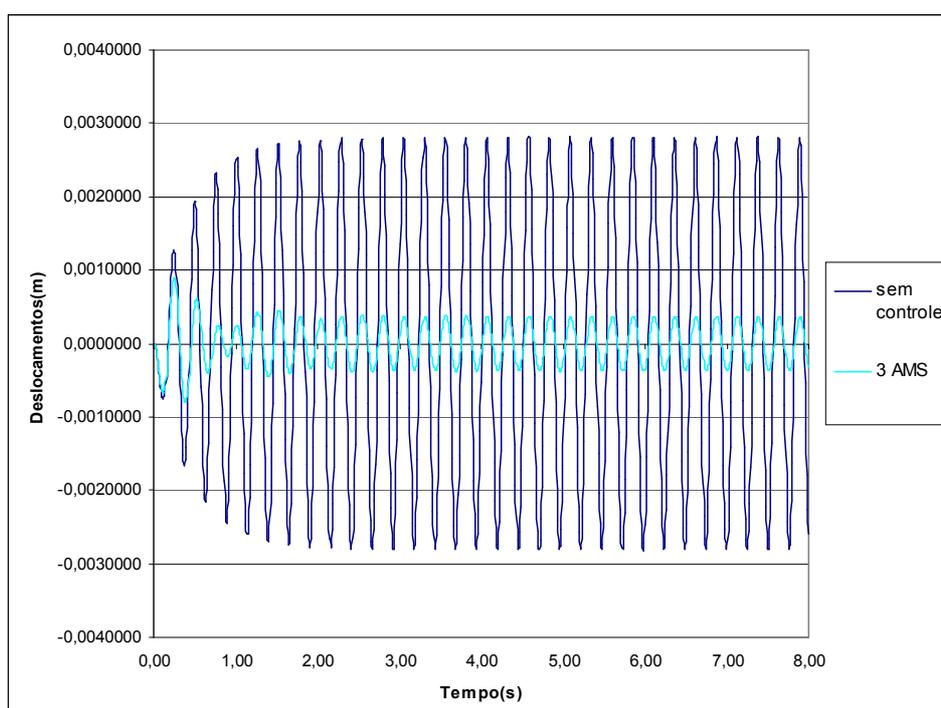


Figura 5.12 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos nós 946, 926 e 966 para os parâmetros $\alpha_{1\&2} = 1,10$, $\alpha_3 = 1,00$, $\mu = 0,10$ e $\xi = 0,4\%$

Os três estudos iniciais permitem verificar a princípio, que a razão entre frequências α é o parâmetro com maior sensibilidade à mudança de posição dos AMS na laje. Para 1 AMS instalado, a razão entre frequências mais indicada foi $\alpha = 0,96$, para 2 AMS, $\alpha_1 = 1,00$ e $\alpha_2 = 1,00$ e para 3 AMS, teve-se $\alpha_1 = 1,10$ e $\alpha_2 = 1,10$ e $\alpha_3 = 1,00$. A taxa de amortecimento nos três casos se comportou de forma semelhante e entende-se que a diminuição da taxa de amortecimento melhora o desempenho do amortecedor. Pelo princípio de funcionamento do AMS, entende-se que uma menor taxa de amortecimento implica que o amortecedor recebe maior energia de vibração transferida da laje e, portanto vibra mais.

Dessa forma, nos estudos seguintes com carregamento harmônico será explorada a variação da razão entre frequência dos amortecedores devido à posição destes na laje e a influência dos pontos de aplicação da carga no desempenho dos AMS. Para isso, fixou-se a taxa de amortecimento em $\xi=1\%$, apenas como padrão, uma vez que a diferença dos resultados em relação a $\xi=0,4\%$ não é tão expressiva e uma razão entre massas $\mu=0,1$.

5.1.2.4 Estudo 04

Dando prosseguimento ao estudo modificou-se o carregamento senoidal aplicado no centro da laje :

$$f(t) = 1000\text{sen}(3,93t) + 1000\text{sen}(10,23t) \quad (5.1)$$

Para o carregamento em questão, utilizou-se a frequência do primeiro modo (3,93Hz) e a frequência do terceiro modo (10,23 Hz). Esta proposta foi pensada uma vez que os modos mais representativos nos deslocamentos desta laje são o primeiro e terceiro modo.

A resposta dinâmica da estrutura para esse novo carregamento está indicada na Tabela 5.14. Foi mantida a mesma posição dos 3 AMS da ultima análise. A redução nos deslocamentos para este caso está destacada na Tabela 5.15 obtida variando o parâmetro α .

Tabela 5.14 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	az(m/s ²)
3,004	0,0802	2,371

Tabela 5.15 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	3,004	-
$\alpha_1 = 2,34$ $\alpha_2 = 2,60$ $\alpha_3 = 0,9$	0,9345	68,8915
$\alpha_1 = 2,34$ $\alpha_2 = 2,60$ $\alpha_3 = 1,1$	0,9351	68,8715
$\alpha_1 = 2,60$ $\alpha_2 = 2,08$ $\alpha_3 = 1,0$	0,8620	71,3049
$\alpha_1 = 1,0$ $\alpha_2 = 1,0$ $\alpha_3 = 1,0$	0,8356	72,1838
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,96$	0,8098	73,0426
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$ $\alpha_3 = 0,96$	0,8104	73,0226
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 0,96$	0,8510	71,6711

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Verificou-se neste estudo que para o AMS posicionado no meio do vão, o valor da razão de frequência α_3 mais indicado é 0,96, e para os outros dois amortecedores, tanto 0,96 quanto 1,00 levaram a bons resultados. Considerando o aspecto construtivo, sintonizar os três amortecedores com $\alpha=0,96$ é mais vantajoso.

Comparando-se ao Estudo 03, nota-se que os amortecedores das extremidades tiveram valor diferenciado, com $\alpha_1 = 1,10$ e $\alpha_2 = 1,10$, e o amortecedor posicionado no centro (mesmo ponto de aplicação do carregamento) $\alpha_3 = 1,00$. Tal diferença nos parâmetros pode ter ocorrido devido à mudança no carregamento embora o ponto de aplicação e a posição dos amortecedores sejam os mesmos para os dois estudos.

5.1.2.5 Estudo 05

Foram aplicadas neste estudo duas cargas senoidais no mesmo instante de tempo, na frequência do primeiro modo natural ($f = 3,93$ Hz) aplicadas a dois metros dos bordos. Os valores máximos do deslocamento U_z , velocidade V_z e aceleração a_z no nó central da laje neste caso estão apresentados na Tabela 5.16. Inicialmente foi

posicionado 1 AMS no nó central, conforme a Figura 5.13. Os resultados da redução dos deslocamentos variando-se α estão destacados na Tabela 5.17.

Tabela 5.16 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	az(m/s ²)
2,762	0,0674	1,649

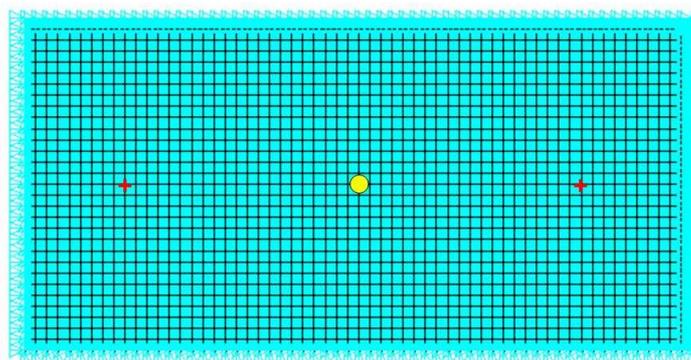


Figura 5.13 – AMS no nó 942 e carregamento aplicado nos nós 926 e 966.

Tabela 5.17 – Variação de α para 1 AMS

	U _{máx} (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,762	-
$\alpha = 0,80$	0,787	71,506
$\alpha = 0,90$	0,695	74,837
$\alpha = 0,95$	0,678	75,453
$\alpha = 1,00$	0,668	75,815
$\alpha = 1,10$	0,673	75,648
$\alpha = 1,20$	0,748	72,925
$\alpha = 1,40$	0,972	64,819

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Diferentemente do modelo de laje com somente um carregamento senoidal (Estudo 01) aplicado e um amortecedor, onde α foi 0,96 e a redução dos deslocamentos de 74,402%, o valor de α para duas cargas aplicadas e somente um único amortecedor posicionado no centro do vão foi de 1,00, com redução de 75,815% nos deslocamentos.

5.1.2.6 Estudo 06

Para o mesmo carregamento considerado anteriormente no Estudo 05, foram sintonizados 3 AMS, posicionados nos pontos de maior amplitude modal do terceiro modo e no centro, conforme mostra a Figura 5.14 (AMS do centro, com 50%

da massa total dos amortecedores e 25% da massa para os AMS das extremidades). O melhor desempenho do sistema de controle variando-se a relação entre os α de cada AMS está destacado na Tabela 5.18.

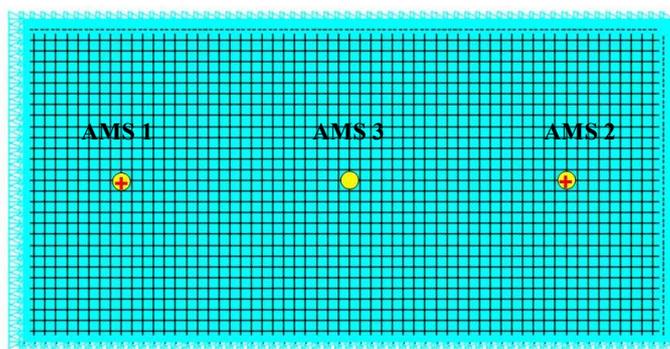


Figura 5.14 – AMS nos nós 942, 926 e 966 e carregamento aplicado nos nós 926 e 966.

Tabela 5.18 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,762	
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 1,00$	0,819	70,362
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 1,00$	0,812	70,590
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$ $\alpha_3 = 1,00$	0,819	70,358
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 1,00$	0,812	70,590
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$ $\alpha_3 = 1,10$	0,913	66,959
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$ $\alpha_3 = 0,96$	0,817	70,4200
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,96$	0,817	70,3910

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

No modelo de laje anteriormente estudados com somente uma carga senoidal e três amortecedores instalados (Estudo 03), os valores mais indicados da razão de frequência foram $\alpha_1 = 1,10$, $\alpha_2 = 1,10$ e $\alpha_3 = 1,00$ e redução de 68,190% nos deslocamentos. Para este Estudo 06, com duas cargas senoidais e também três

amortecedores posicionados nos Nós 942, 926 e 966, tais valores de razão de frequência foram um pouco diferentes, e o mais indicado para este caso foram $\alpha_1 = 1,00$, $\alpha_2 = 1,00$ e $\alpha_3 = 1,00$ por aspectos construtivos pois ocorreu outra proposta com o mesmo desempenho.

5.1.2.7 Estudo 07

Foram aplicadas 3 cargas senoidais na frequência do primeiro modo natural ($f=3,93$ Hz), todas aplicadas no mesmo instante de tempo. Uma das cargas foi aplicada no centro do vão e as outras duas a 2m dos bordos. Os valores máximos de U_z , V_z e a_z no nó central da laje são apresentadas na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Resposta máxima sem controle

$U_z(\text{mm})$	$V_z(\text{m/s})$	$a_z(\text{m/s}^2)$
5,565	0,136	3,324

Para este novo carregamento, a solução sugerida foi sintonizar 1 AMS no centro da laje, conforme mostra a Figura 5.15. A Tabela 5.20 apresenta os valores dos deslocamentos máximos e as respectivas reduções na resposta variando-se α .

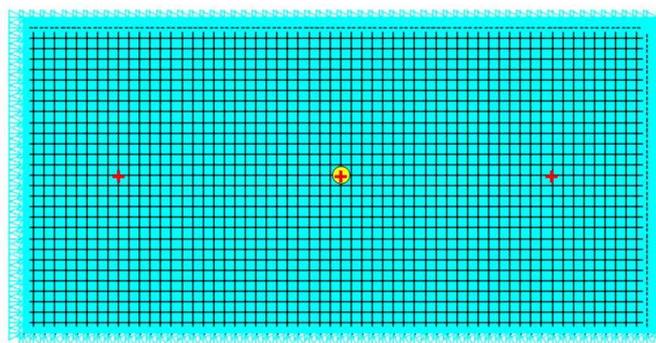


Figura 5.15 – AMS no Nó 942 e carregamento aplicado nos nós 942, 926 e 966.

Tabela 5.20 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}} (\text{mm})$	$\Delta (\%)$
Sem controle	5,565	-
$\alpha = 0,80$	1,605	71,159
$\alpha = 0,90$	1,419	74,501
$\alpha = 0,95$	1,396	74,915
$\alpha = 0,96$	1,396	74,915
$\alpha = 1,00$	1,399	74,861
$\alpha = 1,10$	1,443	74,070
$\alpha = 1,20$	1,618	70,925

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

Neste estudo com três cargas senoidais e um amortecedor, os valores da razão de frequência mais indicados foram semelhantes dos estudos com somente um carregamento senoidal, assim como as reduções nos deslocamentos foram quase semelhantes e na ordem de aproximadamente 75%.

5.1.2.8 Estudo 08

Para o mesmo carregamento do Estudo 07, foram sintonizados três AMS, posicionados nos dois pontos de maior amplitude modal do terceiro modo e no centro, conforme Figura 5.16 (AMS do centro, com 50% da massa total dos amortecedores e 25% da massa para os AMS da extremidade). Variando-se a relação entre os α de cada AMS tem-se os resultados conforme apresenta a Tabela 5.21.

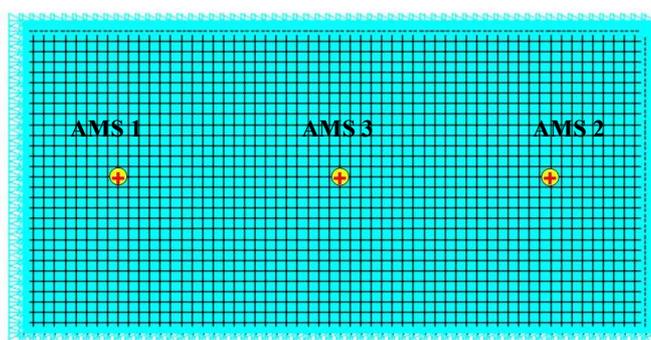


Figura 5.16 – AMS nos nós 942, 926 e 966 e carregamento aplicado nos mesmos nós.

Tabela 5.21 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	5,565	-
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 1,00$	1,721	69,024
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 1,00$	1,704	69,330
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$ $\alpha_3 = 1,00$	1,695	69,492
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 1,00$	1,695	69,492
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,96$	1,693	69,577
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$ $\alpha_3 = 1,10$	1,808	67,459

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Para o caso de três AMS instalados na laje, para três carregamentos senoidais, os valores da razão de frequência mais indicados foram $\alpha_1 = 1.00$, $\alpha_2 = 1.00$ e $\alpha_3 = 0.96$, embora fique evidenciado que nas propostas realizadas neste, a diferença entre cada proposta não foi tão expressiva. Estes valores de razão de frequência foram semelhantes aos do Estudo 04, com uma única carga senoidal aplicada (com a soma das parcelas do primeiro modo e terceiro modo) e os três amortecedores posicionados nos mesmos pontos. Com relação aos deslocamentos, o comparativo entre os dois estudos mostra semelhança aproximada nas porcentagens de redução, que foram da ordem de 68 a 69%.

5.1.3 Análise para um carregamento humano

Foi simulado um carregamento dinâmico de pessoas praticando a atividade de dançar e pular sobre a laje. Neste estudo, considerou-se a atividade de pular com um valor de frequência de $f_s = 3,40$ Hz e $T_p = 0,294$ s. Arbitrou-se uma relação $t_p/T_p = 0,5$, isto é, considerando-se que o tempo de contato é metade do período do carregamento, chegando-se a $k_p = 3,0$. Pela mesma relação, encontrou-se $t_p = 0,147$ s. Com estes valores de f_s , k_p , t_p obteve-se para cada intervalo de tempo os pares de tempo e suas respectivas cargas associadas aplicadas em nós específicos.

Considerou-se neste caso a atuação durante oito segundos de doze pessoas pulando sobre a laje ao mesmo tempo. Esse tempo foi subdividido em intervalos de tempo de 0,01s. Logo, para cada um desses intervalos foram obtidos 800 pares de tempo e suas respectivas cargas associadas aplicadas em cada nó específico.

Os nós onde foram aplicados as cargas representando as doze pessoas, distanciadas dois metros entre si, foram os nós 616, 626, 636, 646, 656, 666, 1226, 1236, 1246, 1256, 1266, 1276, conforme indica a Figura 5.17. Considerou-se um raio de um metro para o movimento de cada pessoa durante a atividade rítmica. A Tabela 5.22 apresenta os valores máximos da resposta dinâmica da laje no nó central, neste caso.

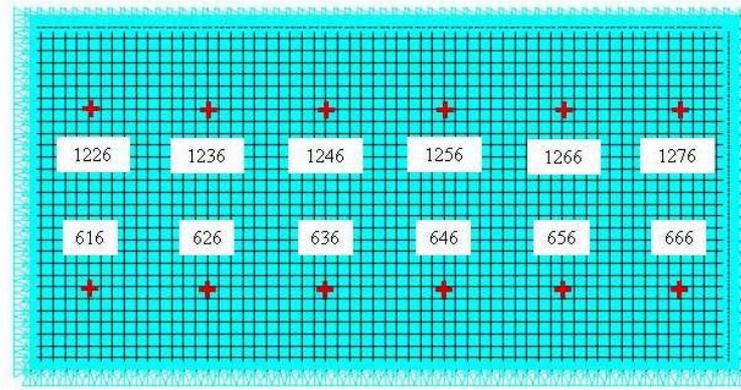


Figura 5.17 – Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.

Tabela 5.22 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	az(m/s ²)
18,04	0,3743	8,065

5.1.3.1 Estudo 09

Devido a mudança de carregamento, retomou-se o estudo paramétrico de α , ξ e μ , a primeira proposta de controle utilizando um único AMS, posicionado no centro da laje está indicado na Figura 5.18. A Tabela 5.23 apresenta as reduções das respostas obtidas variando-se a razão entre frequências α . Neste estudo, o melhor parâmetro obtido para a razão de frequência foi $\alpha=0,98$, diferente ao Estudo 01, para o carregamento harmônico, onde α com melhor desempenho também foi 0,96, o que demonstra que o melhor valor deste parâmetro é sensível ao tipo de carregamento aplicado.

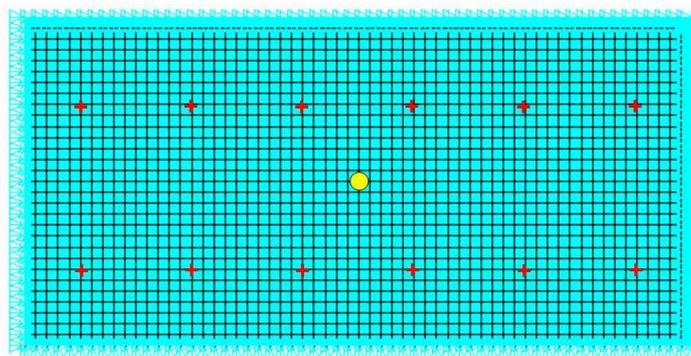


Figura 5.18 – AMS no nó central 946

Tabela 5.23 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	-
$\alpha = 0,80$	10,010	44,512
$\alpha = 0,90$	9,871	45,283
$\alpha = 0,94$	9,835	45,482
$\alpha = 0,95$	9,827	45,527
$\alpha = 0,96$	9,820	45,565
$\alpha = 0,97$	9,814	45,599
$\alpha = 0,98$	9,808	45,632
$\alpha = 0,99$	10,03	44,401
$\alpha = 1,00$	10,26	43,126
$\alpha = 1,10$	12,16	32,594

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Em seguida apresenta-se a variação dos parâmetros ξ e μ dos amortecedores em função dos deslocamentos indicados nas tabelas 5.24 e 5.25.

Tabela 5.24 – Variação de ξ para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	
$\xi = 0,4\%$	9,795	45,704
$\xi = 0,7\%$	9,802	45,665
$\xi = 1,0\%$	9,808	45,632
$\xi = 2,0\%$	9,878	45,244

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\alpha = 0,98\%$

Tabela 5.25 – Variação de μ para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	
$\mu = 0,05$	13,130	27,217
$\mu = 0,07$	11,130	38,304
$\mu = 0,10$	9,795	45,704
$\mu = 0,15$	9,025	49,972

Valores obtidos para: $\xi = 0,4\%$ e $\alpha = 0,98\%$

No Estudo 01, para a carga harmônica, a redução nos deslocamentos obtida com $\alpha=0,96$ foi de 74,5804%, já neste estudo para carga humana a redução foi de 45,704% para $\alpha=0,98$. Com relação aos valores de ξ e μ , os valores mais indicados foram semelhantes ao do Estudo 01, onde $\xi = 0,4\%$ e $\mu = 0,1$. Verifica-se então que o parâmetro α é mais sensível que ξ e μ quando ocorre variação de carregamento.

Os valores mais indicados de parâmetros para o caso de um único AMS neste estudo foram $\alpha=0,98$, $\xi = 0,4\%$ e $\mu = 0,1$. O gráfico com a evolução dos deslocamentos para a eficiência no controle está indicado na Figura 5.19.

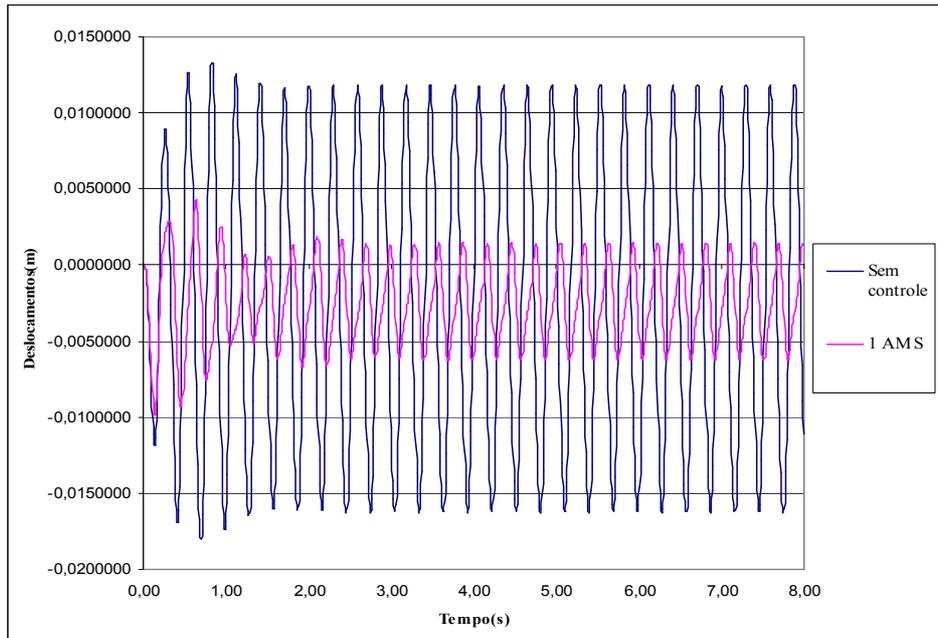


Figura 5.19 - Deslocamentos em função do tempo com 1 AMS instalado no Nó 946.

5.1.3.2 Estudo 10

Neste estudo, a proposta foi a utilização de 3 AMS posicionados nos pontos de maior amplitude modal do terceiro modo, conforme indica a Figura 5.20. Os AMS 1 e 2 posicionados 2m das extremidades (com 25% da massa total dos amortecedores) e o AMS 3 (com 50% da massa total dos amortecedores) posicionado no centro. A Tabela 5.26 apresenta os valores dos deslocamentos máximos e as reduções correspondentes. Considerou-se para este estudo $\mu = 0,1$, assim como nos estudos seguintes, que tal parâmetro será fixado neste valor, pois depende da flecha permitida na laje. Já a taxa de amortecimento será fixada em $\xi=0,4\%$ pois como foi dito anteriormente, valores mais baixos de ξ melhoram o desempenho do amortecedor.

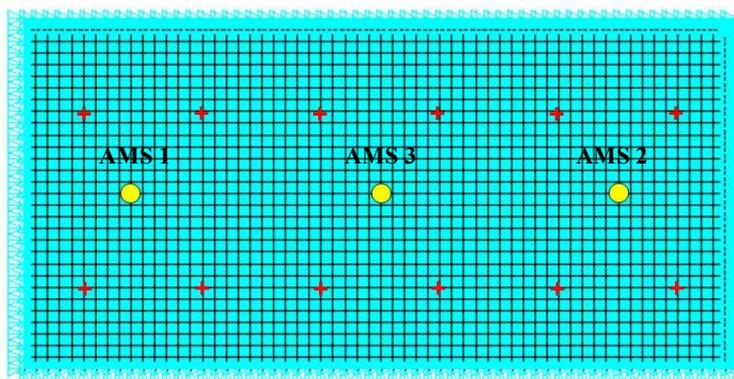


Figura 5.20 – AMS nos Nós 946, 926 e 966.

Tabela 5.26 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	-
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 0,98$	11,400	36,807
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 0,95$	10,620	41,130
$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$ $\alpha_3 = 0,95$	11,250	37,639
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 0,95$	10,880	39,690
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 1,00$	12,00	33,481

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

A partir do resultado da tabela anterior, apresenta-se o gráfico na Figura 5.21 com os deslocamentos para os valores de razão de frequência $\alpha_1 = 0,80$, $\alpha_2 = 0,80$ e $\alpha_3 = 0,95$.

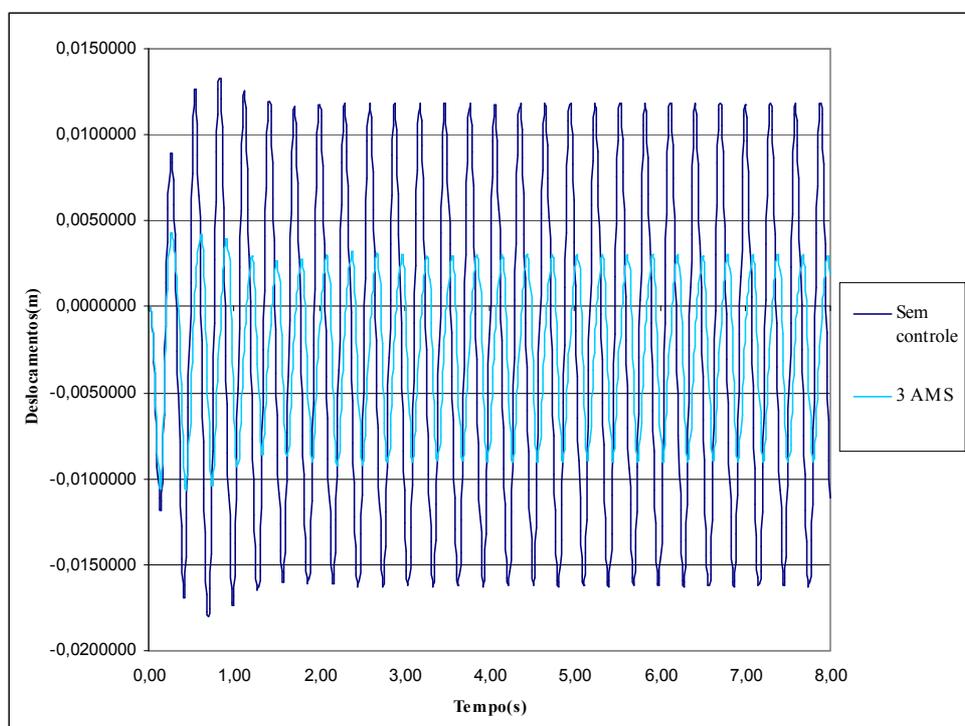


Figura 5.21 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos Nódos 946, 926 e 966.

Neste estudo para o carregamento humano, o uso de três amortecedores reduziu em 41,130% os deslocamentos para os valores de razão de frequência $\alpha_1 = 0,80$, $\alpha_2 = 0,80$ e $\alpha_3 = 0,95$. Se comparado ao Estudo 03, para uma única carga harmônica e três amortecedores, têm-se valores diferenciados para os amortecedores, com $\alpha_1 = 1,10$ e $\alpha_2 = 1,10$, e $\alpha_3 = 1,00$ e uma redução de 68,190%.

5.1.3.3 Estudo 11

Em seguida, analisou-se o desempenho de 2 AMS que foram posicionados próximos ao nó central da laje (a 80 cm do nó central) conforme mostra a Figura 5.22, a massa foi dividida igualmente entre os dois AMS. A Tabela 5.27 apresenta os resultados deste estudo paramétrico com as reduções obtidas.

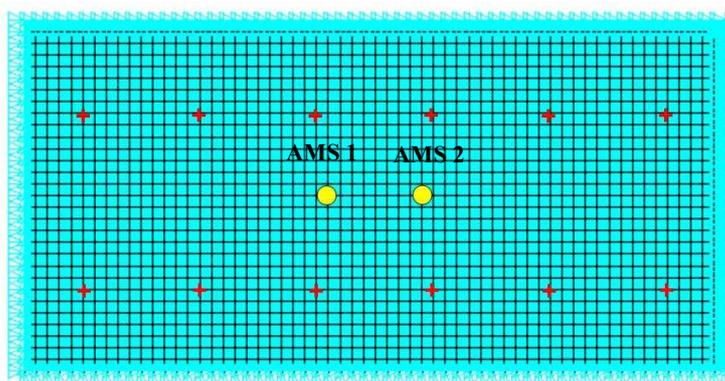


Figura 5.22 – AMS nos Nós 942, 950

Tabela 5.27 – Variação de α para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$	10,120	43,902
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	9,972	44,723
$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$	9,922	45,000
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$	9,914	45,044
$\alpha_1 = 0,98$ $\alpha_2 = 0,98$	10,200	43,459
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	10,640	41,020
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	12,510	30,654

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Comparando o desempenho de dois amortecedores para o carregamento humano, com o desempenho de dois amortecedores para uma única carga harmônica (em ambos amortecedores posicionados a 80 cm do centro do vão) tem-se que a razão de frequência variou. Para uma única carga harmônica, os amortecedores com $\alpha_1 = 1,00$ e $\alpha_2 = 1,00$ tiveram melhor desempenho, com uma redução dos deslocamentos de 73,57%. Já neste caso para o carregamento harmônico, $\alpha_1 = 0,96$ e $\alpha_2 = 0,96$, reduziram em 45,044%, o que comprova novamente a sensibilidade deste parâmetro à mudança de carregamento. O gráfico com as reduções nos deslocamentos deste estudo está indicado na Figura 5.23 a seguir.

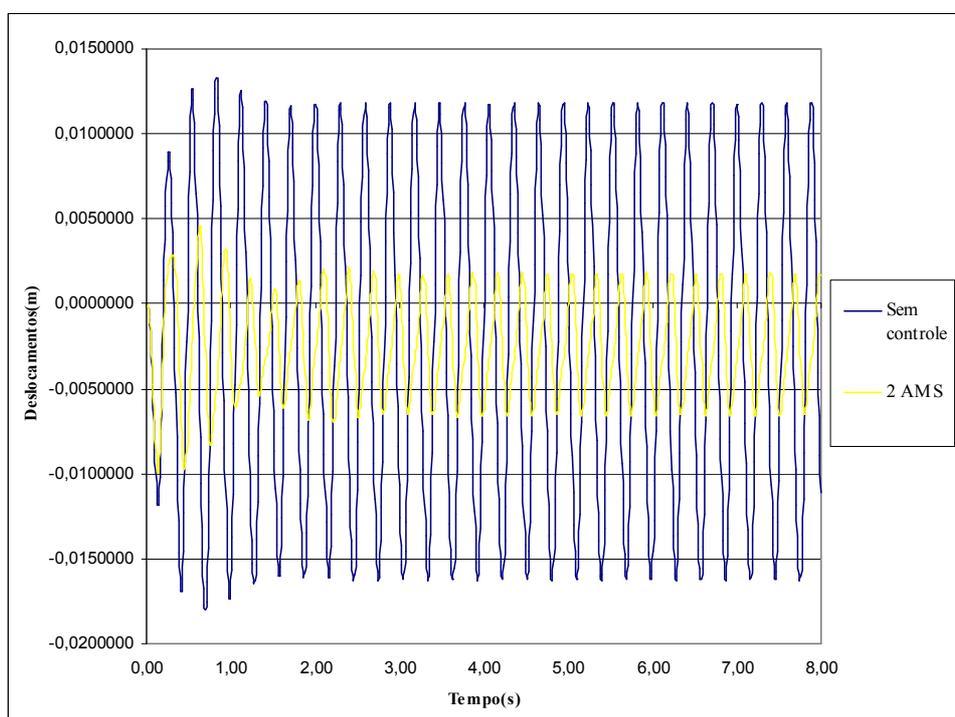


Figura 5.23 - Deslocamentos em função do tempo com 3 AMS instalados nos Nódos 942 e 950.

5.1.3.4 Estudo 12

Três AMS foram posicionados na laje, dois deles a 1,20m do centro (com 25% da massa total dos amortecedores) e o terceiro AMS no Nódulo central da laje (com 50% da massa total dos amortecedores), conforme ilustra Figura 5.24. A Tabela 5.28 apresenta as respostas dinâmicas com melhor performance em relação aos três amortecedores do Estudo 10 (dois amortecedores posicionados nas extremidades e o outro posicionado no centro) para o mesmo carregamento humano.

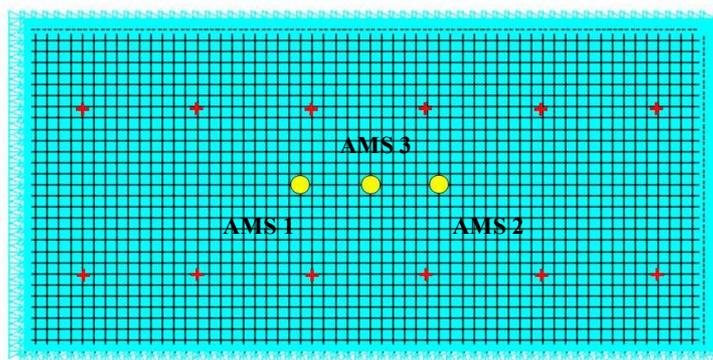


Figura 5.24 – AMS nos nós 940, 951 e 946.

Tabela 5.28 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	-
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$ $\alpha_3 = 0,95$	10,020	44,457
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 0,95$	9,948	44,856
$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$ $\alpha_3 = 0,95$	9,922	45,000
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$ $\alpha_3 = 0,96$	10,620	41,131
$\alpha_1 = 0,98$ $\alpha_2 = 0,98$ $\alpha_3 = 0,98$	10,280	43,015
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,95$	10,130	43,847
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$ $\alpha_3 = 0,95$	11,07	38,636

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

A redução obtida no Estudo 10, com dois dos amortecedores nos pontos de maior amplitude modal do terceiro modo (4m do centro do vão), foi de 41,130%, e neste estudo, com dois dos amortecedores posicionados a 1,20m do centro do vão foi de 45,044%, provavelmente, por que neste ultimo os três amortecedores estão próximos entre si e concentrando a massa no centro do vão. Percebe-se que a concentração da massa no centro da laje melhora a eficiência do AMS, pois no estudo com somente um

único amortecedor concentrando toda a massa no centro do vão, a redução nos deslocamento foi, até o presente momento, o melhor resultado.

5.1.3.5 Estudo 13

Em seguida analisou-se o desempenho de dois AMS, variando-se a posição. Posicionaram-se distantes 80 cm cada um do nó central, conforme mostra a Figura 5.25. Os resultados desse estudo paramétrico se encontram na Tabela 5.29, e não mostraram melhoria na redução dos deslocamentos se comparado com o caso anterior utilizando dois AMS (Estudo 11) que apresentou melhor redução.

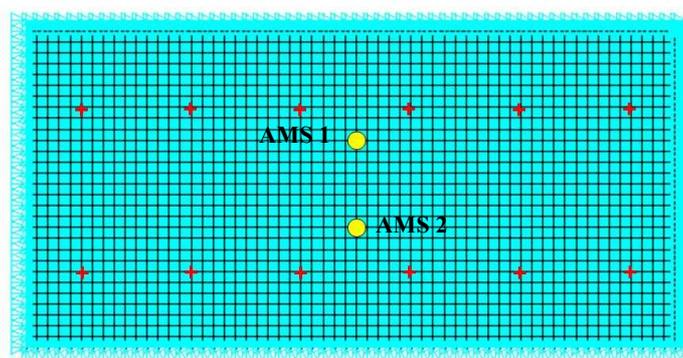


Figura 5.25 – AMS nos Nós 1190 e 702

Tabela 5.29 – Variação de α para 2 AMS

	U_{\max} (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	
$\alpha_1 = 0,80$ $\alpha_2 = 0,80$	10,300	42,905
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	10,170	43,625
$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$	10,120	43,902
$\alpha_1 = 0,96$ $\alpha_2 = 0,96$	10,120	43,902
$\alpha_1 = 0,98$ $\alpha_2 = 0,98$	10,520	41,685
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	10,960	39,246
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	13,480	25,277

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

5.1.3.6 Estudo 14

Outra alternativa para buscar um melhor desempenho do controle foi sintonizar o AMS na frequência do carregamento humano e não na frequência do primeiro modo. Foi posicionado 1 AMS no Nó central da laje, conforme mostra a Figura 5.26. Verificou-se a partir dos resultados na Tabela 5.30 uma redução dos deslocamentos semelhante a obtida no Estudo 09, caso semelhante a este e que utilizou-se somente um único amortecedor.

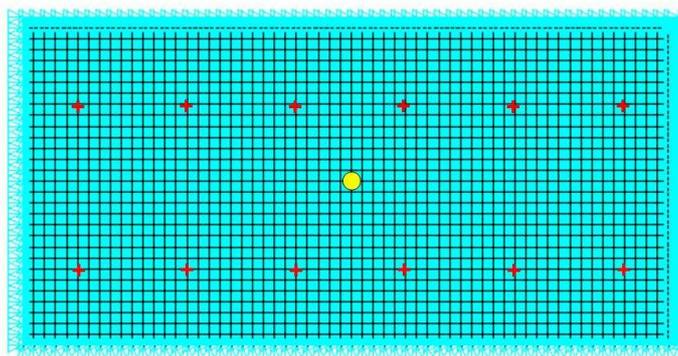


Figura 5.26 – AMS no Nó central 946

Tabela 5.30 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	18,04	
$\alpha = 0,80$	10,240	43,237
$\alpha = 0,90$	10,040	44,346
$\alpha = 0,95$	9,971	44,728
$\alpha = 1,00$	9,911	45,061
$\alpha = 1,10$	9,826	45,532
$\alpha = 1,20$	10,14	43,792

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Para $\alpha = 1,10$, a redução obtida foi de 45,532%. A tentativa de sintonizar o amortecedor na frequência do carregamento e não na frequência do 1º modo (como no Estudo 09) resultou em um desempenho semelhante, pois a redução foi de 45,632%, ou seja, o AMS, nos dois casos, teve o mesmo valor de frequência.

5.1.4 Discussão dos Resultados

Viu-se que para este modelo de laje, onde os deslocamentos verticais eram maiores no centro do vão, o melhor valor da razão de frequência α para um AMS instalado foi de 0,96, para a carga senoidal, e 0,98, para a carga humana. Para mais de

um amortecedor instalado, variando a posição destes, tais valores se diferenciavam, todavia os valores da razão de frequência variavam em torno de 0,90 a 1,10, ou seja, a frequência do amortecedor mais indicada é de um valor próximo a frequência natural do 1º modo.

A seguir, na Figura 5.27, temos o gráfico dos deslocamentos em função do tempo para 01 carga senoidal e as respostas sem controle, com 1 AMS (Estudo 01), 2 AMS (Estudo 02) e 3 AMS (Estudo 03). O gráfico apresenta a comparação entre os três resultados a partir dos parâmetros mais indicados obtidos em cada estudo.

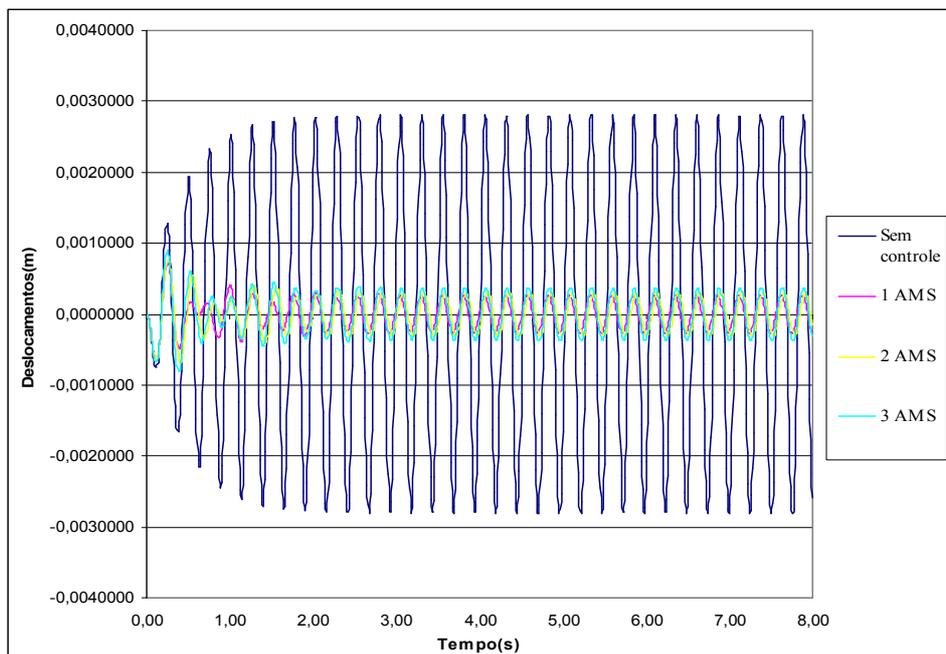


Figura 5.27 - Deslocamentos em função do tempo para 1 carga senoidal.

Abaixo, na Figura 5.28, temos o gráfico dos deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano e as respostas sem controle, com 1 AMS (Estudo 09), 2 AMS (Estudo 11) e 3 AMS (Estudo 10).

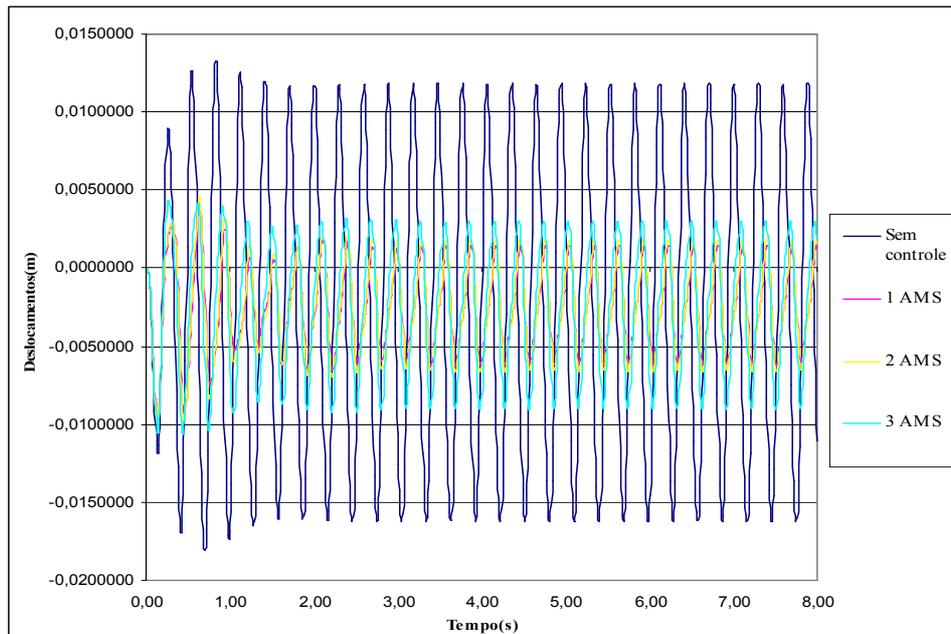


Figura 5.28 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano

Os dois gráficos anteriores que mostram a redução dos deslocamentos em função do tempo indicam que para somente um único amortecedor, que concentra a massa no centro do vão, o sistema de controle apresenta melhor eficiência do que quando usado mais de um AMS.

Para o estudo com carga harmônica, percebeu-se que a melhor posição para o AMS é próximo ao ponto de maior deslocamento U_z . Mesmo com mais de um amortecedor e posicionando-se os AMS nas posições de maior amplitude do segundo e terceiro modo, o melhor desempenho dos amortecedores ocorre na posição mais próxima ao centro, seja com o carregamento senoidal ou com a carga humana. A variação de μ vai depender da análise da flecha máxima permitida devido o acréscimo da massa do AMS. Já o valor da taxa ξ , percebeu-se que quanto mais baixo, melhor o desempenho. Nota-se que o melhor desempenho é para um único AMS, e que a melhor frequência para os amortecedores varia em valores próximos a frequência natural do 1º modo.

É importante destacar nesse primeiro estudo, que as máximas reduções dos deslocamentos utilizando o AMS para a laje submetida ao carregamento harmônico (74,915%) foram maiores que as máximas reduções obtidas com o AMS para o carregamento humano (45,704%), mostrando que o parâmetro α é sensível ao tipo de carregamento aplicado.

Na Tabela 5.31 a seguir, é apresentado um resumo das reduções obtidas com os parâmetros mais indicados. Percebe-se na tabela a diferença na redução dos deslocamentos em virtude do tipo de carregamento e do número de amortecedores instalados. As melhores propostas de controle foram as que usavam somente um único amortecedor, mesmo quando mais de um carregamento era aplicado.

Tabela 5.31 – Resumo dos estudos realizados na Laje 01 e as melhores reduções obtidas

Laje	Carregamento	Nº de Amortecedores	Melhor valor obtido para α	Redução ΔU_z (%)
<i>Estudo 01</i>	01 carga senoidal	01 (centro)	0,96	74,580
<i>Estudo 02</i>	01 carga senoidal	02 (80 cm do centro)	1,00 e 1,00	73,766
<i>Estudo 03</i>	01 carga senoidal	03 (centro e 2m do bordo)	1,10, 1,10 e 1,00	68,318
<i>Estudo 04</i>	01 carga senoidal	03 (centro e 2m do bordo)	0,96, 0,96 e 0,96	73,043
<i>Estudo 05</i>	02 cargas senoidais	01 (centro)	1,00	75,815
<i>Estudo 06</i>	02 cargas senoidais	03 (centro e 2m do bordo)	1,00, 1,00 e 1,00	70,590
<i>Estudo 07</i>	03 cargas senoidais	01 (centro)	0,96	74,915
<i>Estudo 08</i>	03 cargas senoidais	03 (centro e 2m do bordo)	1,00, 1,00 e 0,96	69,577
<i>Estudo 09</i>	Carga humana (12 pessoas)	01 (centro)	0,98	45,704
<i>Estudo 10</i>	Carga humana (12 pessoas)	03 (centro e 2m do bordo)	0,80, 0,80 e 0,95	41,130
<i>Estudo 11</i>	Carga humana (12 pessoas)	02 (80 cm do centro)	0,96 e 0,96	45,044
<i>Estudo 12</i>	Carga humana (12 pessoas)	03 (centro e 1.20 m)	0,95, 0,95 e 0,95	45,000
<i>Estudo 13</i>	Carga humana (12 pessoas)	02 (80cm do centro)	0,96 e 0,96	43,902
<i>Estudo 14</i>	Carga humana (12 pessoas)	01 (centro)	1,10	45,532

5.2 LAJE 02

5.2.1 Análise Modal

O segundo modelo de laje estudado apresenta as dimensões de 8x6m, espessura de 7 cm, dois bordos livres e dois bordos simplesmente apoiados, conforme indica a Figura 5.29. Possui malha de elementos finitos com 1271 nós a cada 20 cm no plano XY. Este modelo foi escolhido por apresentar frequências naturais iniciais baixas, conforme indica a Tabela 5.32, e próximas da faixa de frequência da atividade humana de caminhar e pular. Nesta laje, os deslocamentos verticais nos primeiros modos são maiores nos bordos livres e não no centro do vão, conforme pode ser visto na Figura 5.30 que apresenta os modos de vibração desta laje.

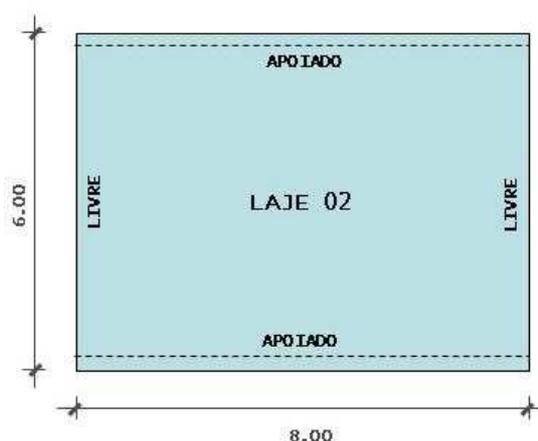


Figura 5.29 – Condições de apoio do modelo de Laje 02 .

Tabela 5.32 - Frequências naturais da Laje 02

	FREQUÊNCIA NATURAL
1º MODO	3,008 Hz
2º MODO	4,374 Hz
3º MODO	8,290 Hz
4º MODO	12,463 Hz
5º MODO	13,906 Hz
6º MODO	15,259 Hz
7º MODO	18,471 Hz
8º MODO	25,696 Hz
9º MODO	25,979 Hz
10º MODO	28,134 Hz

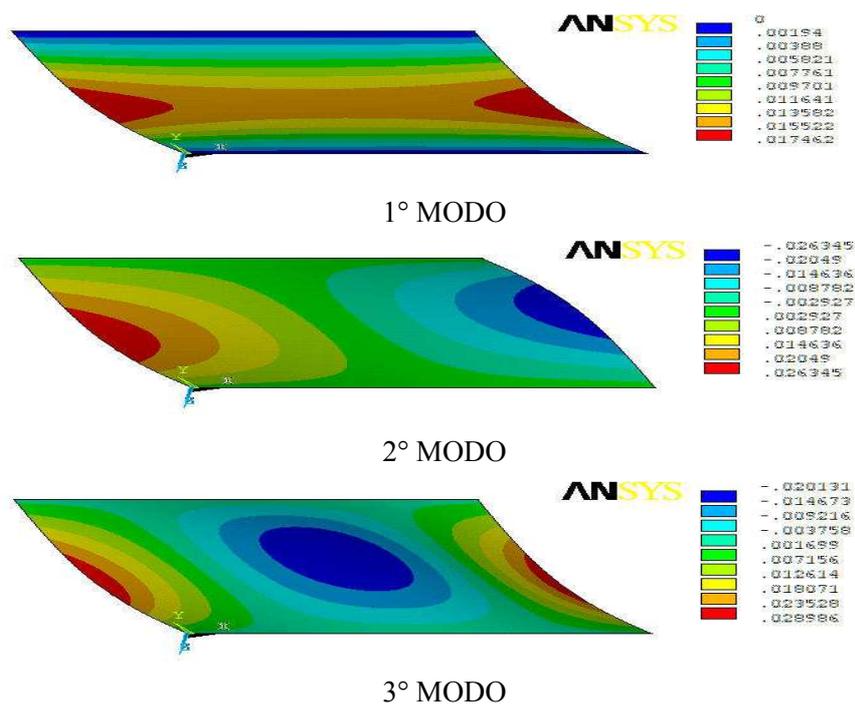


Figura 5.30 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.

5.2.2 Análise para um carregamento harmônico

Uma carga harmônica senoidal foi aplicada no ponto central da laje, para obtenção da evolução da resposta dinâmica em função da frequência. A Figura 5.31 apresenta a resposta em frequência do deslocamento vertical do nó central da laje analisada devido uma carga senoidal aplicada em seu centro. Pode-se verificar que os modos que mais influenciam na resposta dinâmica neste caso são o primeiro e terceiro modos, assim como ocorreu no caso da laje anterior.

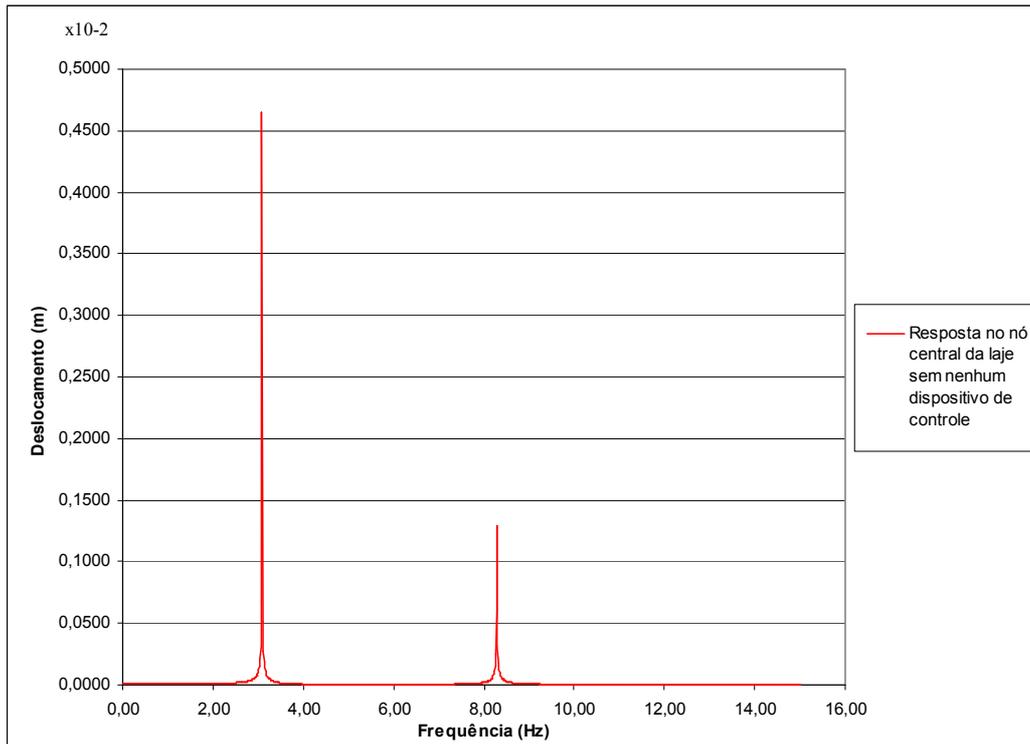


Figura 5.31 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó central da laje

Para a análise das respostas dinâmicas em função do tempo adotou-se a frequência do carregamento senoidal igual à frequência do primeiro modo ($f = 3,08$ Hz). A Tabela 5.33 apresenta os valores máximos do deslocamento U_z , velocidade V_z e aceleração a_z no nó central da laje (Nó 706).

Tabela 5.33 – Resposta máxima sem controle

$U_z(\text{mm})$	$V_z(\text{m/s})$	$a_z(\text{m/s}^2)$
4,623	0,0889	1,709

Objetiva-se da mesma forma obter neste estudo a redução das vibrações devido ao carregamento aplicado. São analisadas a seguir propostas de controle com o uso de um ou mais AMS, para uma carga senoidal, variando-se a razão de frequência α e a posição dos amortecedores. Conforme o que já foi observado no estudo da laje anterior, o parâmetro α é o que se comporta de forma mais sensível no estudo paramétrico, comparando-se com a razão de massa μ e com a taxa de amortecimento ξ , desta forma, o estudo deste novo modelo de laje irá se concentrar na variação de α e na posição dos amortecedores.

5.2.2.1 Estudo 15

Para esta laje, na primeira proposta de controle foi posicionado um único AMS no nó central, como mostra a Figura 5.32. A Tabela 5.34 apresenta as reduções das respostas obtidas variando-se a razão de frequência e fixando-se a razão de massa μ em 0,1 e a taxa de amortecimento ξ em 1 %.

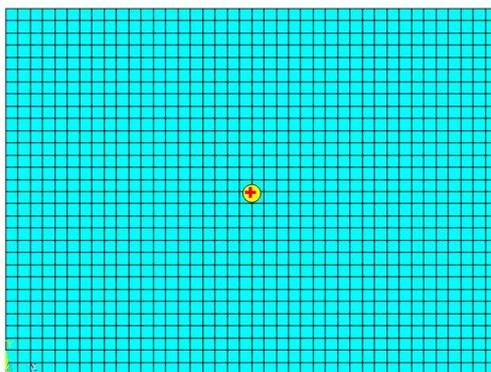


Figura 5.32 – AMS no Nó 706 destacado na laje

Tabela 5.34 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	4,623	-
$\alpha = 0,80$	1,933	58,187
$\alpha = 0,90$	1,335	71,123
$\alpha = 1,00$	1,290	72,096
$\alpha = 1,10$	1,330	71,231

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1$ %

O melhor desempenho do amortecedor ocorreu quando sintonizado na frequência igual a do 1º modo, ou seja, com $\alpha = 1,00$, a redução nos deslocamentos obtida com esse parâmetro foi de 72,096%. Embora essa primeira simulação tenha apresentado um bom desempenho na redução dos deslocamentos, decidiu-se analisar uma situação mais crítica para este modelo de laje, uma vez que a partir da análise modal verificou-se que nos bordos livres são onde ocorrem os maiores deslocamentos modais, portanto decidiu-se modificar o ponto de aplicação do carregamento.

5.2.2.2 Estudo 16

Na busca de uma situação mais desfavorável e de acordo com a forma modal da laje, optou-se por aplicar duas cargas senoidais na frequência de 3,08 Hz próximos ao

ponto de maior amplitude modal nos bordos livres (1m do bordo) e a partir das respostas, propor a melhor solução para AMS. A Tabela 5.35 apresenta os valores máximos de U_z , V_z e a_z no nó de bordo (Nó 57).

Tabela 5.35 – Resposta máxima sem controle

$U_z(\text{mm})$	$V_z(\text{m/s})$	$a_z(\text{m/s}^2)$
10,18	0,1957	3,764

Foram posicionados dois AMS (com massas iguais) nos nós coincidentes aos de aplicação da carga senoidal, conforme mostra a Figura 5.33. As respostas com controle e a redução nos deslocamentos estão apresentados na Tabela 5.36, onde foram fixados a razão de massa $\mu = 0,1$ e a taxa de amortecimento $\xi = 1\%$.

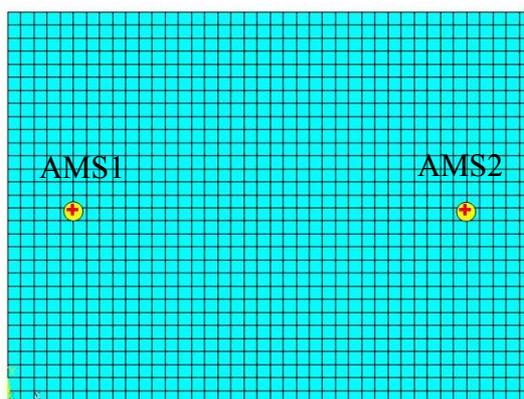


Figura 5.33 – AMS nos Nós 271 e 1141 e carregamento aplicado nos Nós 271 e 1141.

Tabela 5.36 – Variação de α para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	10,18	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	2,787	72,623

$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$	2,755	72,937
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	2,738	73,104
$\alpha_1 = 1,03$ $\alpha_2 = 1,03$	2,735	73,134
$\alpha_1 = 1,05$ $\alpha_2 = 1,05$	2,736	73,124
$\alpha_1 = 1,08$ $\alpha_2 = 1,08$	2,798	73,075
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	2,749	72,996
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	3,529	65,334

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

Percebe-se que ambos os amortecedores apresentaram desempenho satisfatório na redução dos deslocamentos nos bordos livres. O melhor caso ocorreu com os dois AMS sintonizados em uma frequência muito próxima a do 1º modo da laje, com $\alpha = 1,03$, o que reduziu os deslocamentos em 73,134% nos bordos livres. Na Figura 5.34, apresenta-se o gráfico da evolução dos deslocamentos para o melhor parâmetro α obtido.

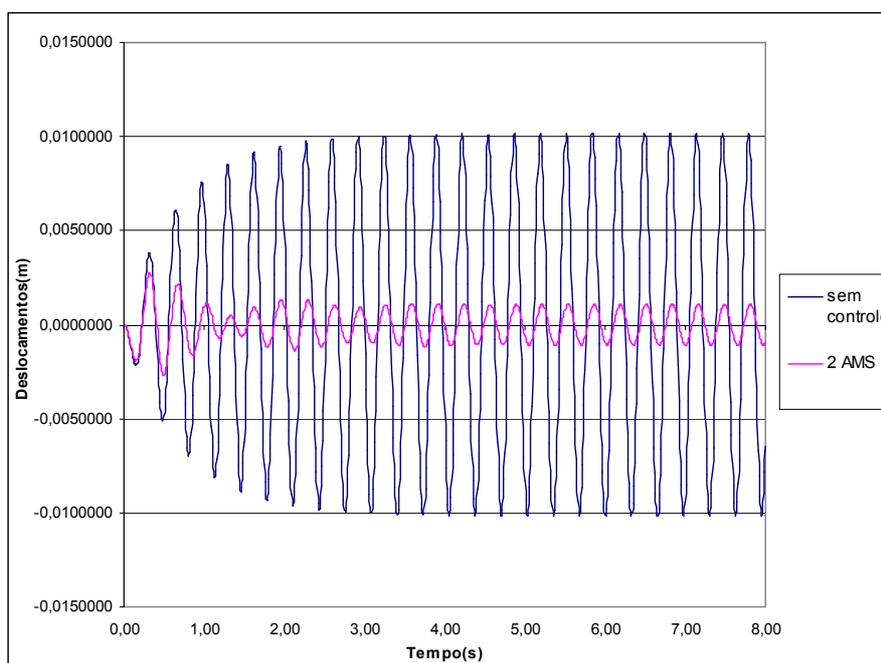


Figura 5.34 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e duas cargas harmônicas.

5.2.3 Análise para um carregamento humano

Simulou-se um carregamento dinâmico, assim como no estudo da laje anterior, pessoas praticando a atividade de pular e dançar sobre a laje. Para esse estudo,

considerou-se a atividade de pular, com um valor de frequência de $f_s=3,40$ Hz e $T_p = 0,294$ s. Arbitrou-se uma relação $t_p/T_p = 0,5$, isto é, considerando-se que o tempo de contato é metade do período do carregamento, chegando-se a $k_p = 3,0$ e a $t_p = 0,147$ s a partir da equação (3.1) apresentada anteriormente.

Para esta laje, considerou-se que as 8 pessoas atuavam 8 segundos pulando sobre a laje. Esse tempo, tal como na laje anterior, foi subdividido em intervalos de tempo de 0,01s.

Os nós onde foram aplicados as cargas representando as 8 pessoas, distantes entre si de 2 m, foram os nós 261, 551, 841, 1131, 281, 571, 861, 1151, conforme indica a Figura 5.35. O critério de posicionamento das pessoas na laje foi o de ocupar a área total da laje mantendo um espaço que permitisse a realização da atividade rítmica. A Tabela 5.37 apresenta os valores máximos da resposta dinâmica da laje.

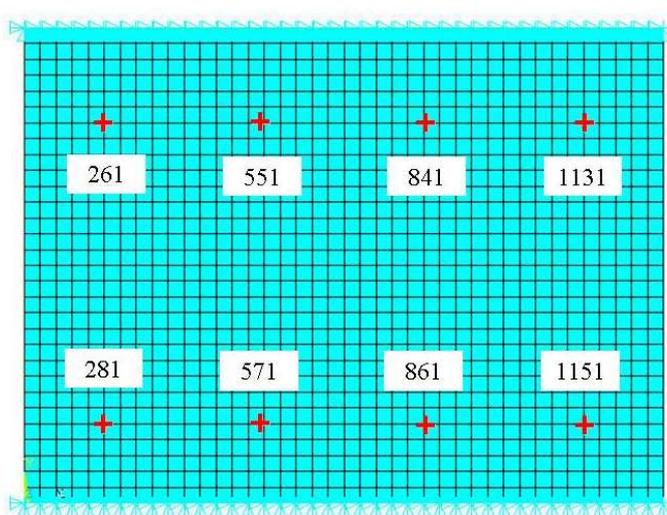


Figura 5.35 - Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.

Tabela 5.37 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	Az(m/s ²)
16,790	0,3227	6,629

5.2.3.1 Estudo 17

Para este carregamento humano, a primeira proposta de controle foi posicionar dois amortecedores levando-se em consideração o resultado obtido no estudo com a

carga harmônica. Com massas iguais, os dois amortecedores foram posicionados nos nós próximos ao bordo livre a 1m do bordo, conforme mostra a Figura 5.36. Na Tabela 5.38 estão as respostas variando o parâmetro α .

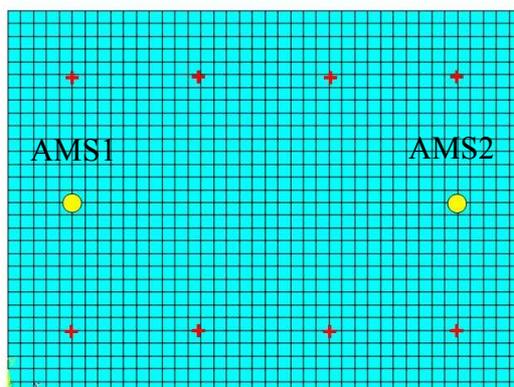


Figura 5.36 – AMS nos Nós 271 e 1141

Tabela 5.38 – Variação de α para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	10,780	35,795
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	8,020	52,233
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	7,942	52,698
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	7,885	53,038
$\alpha_1 = 1,30$ $\alpha_2 = 1,30$	8,312	50,494

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

Diferente do estudo anterior para duas cargas harmônicas, onde α mais indicado foi 1,03, este estudo apontou valores maiores para a razão de frequência. Os dois amortecedores sintonizados a uma razão de frequência 1,20 em ambos, permitiram uma redução de 53,038% nos deslocamentos, redução esta, menor que a obtida para o carregamento harmônico, que foi da ordem de 73,134%.

Na Figura 5.37, a seguir, é apresentado o gráfico da evolução dos deslocamentos para o melhor parâmetro α obtido que foi 1,20.

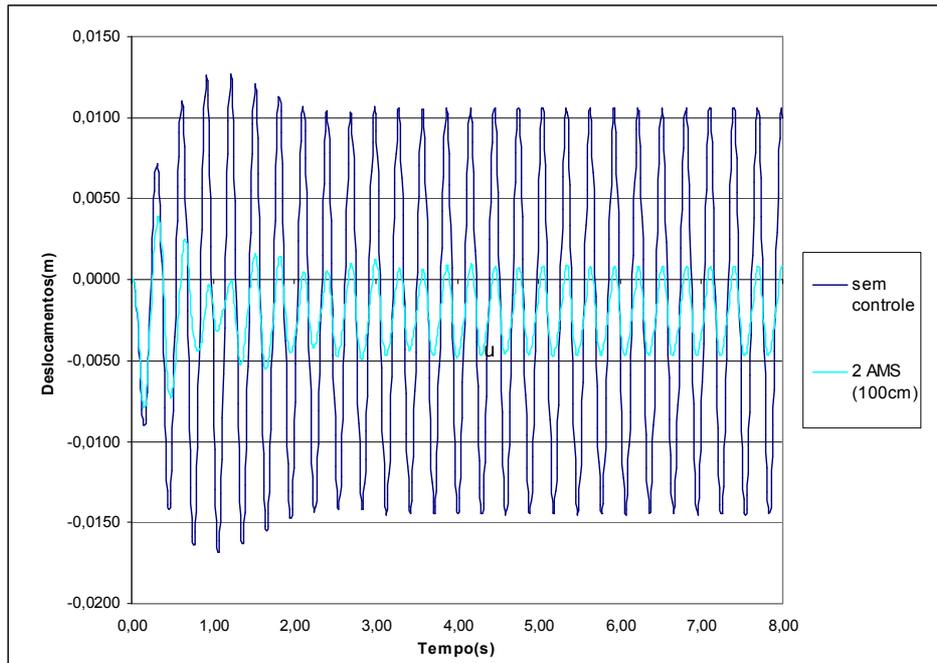


Figura 5.37 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e carregamento humano.

5.2.3.2 Estudo 18

Novamente, dois amortecedores, de massas iguais, foram utilizados e desta vez, posicionados no bordo livre, conforme mostra a Figura 5.38. Foi realizada então a variação da razão de frequência α para esta nova posição dos dois amortecedores, resultando em novos valores de redução de deslocamentos conforme indica a Tabela 5.39.

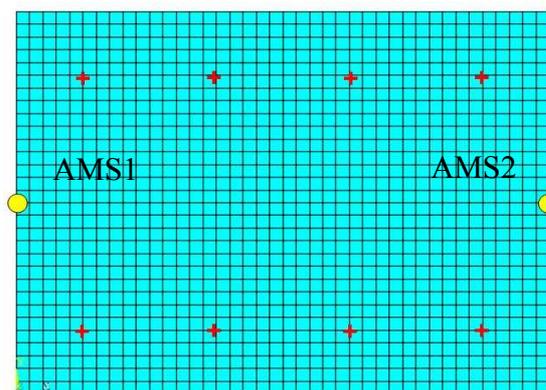


Figura 5.38 – AMS nos Nós 57 e 126.

Tabela 5.39 – Variação de α para 2 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	10,050	40,143
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	7,646	54,461
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	7,614	54,652
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	7,617	54,634

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

No estudo anterior, os dois amortecedores estavam posicionados a 1 m do bordo, e o valor de α mais indicado para os dois amortecedores foi 1,20, com redução de 53,038%. Já neste caso, com os amortecedores em cima do bordo livre, α mais indicado para os dois amortecedores foi 1,10, com uma redução um pouco maior, de 54,652%. Nota-se que a aproximação dos amortecedores do bordo livre melhorou o desempenho dos amortecedores e que houve pouquíssima diferença no desempenho comparando com as propostas para $\alpha_{1e2} = 1,00$ e $\alpha_{1e2}=1,20$.

Na Figura 5.39, observa-se o gráfico com a evolução dos deslocamentos para o melhor parâmetro α obtido que foi 1,10.

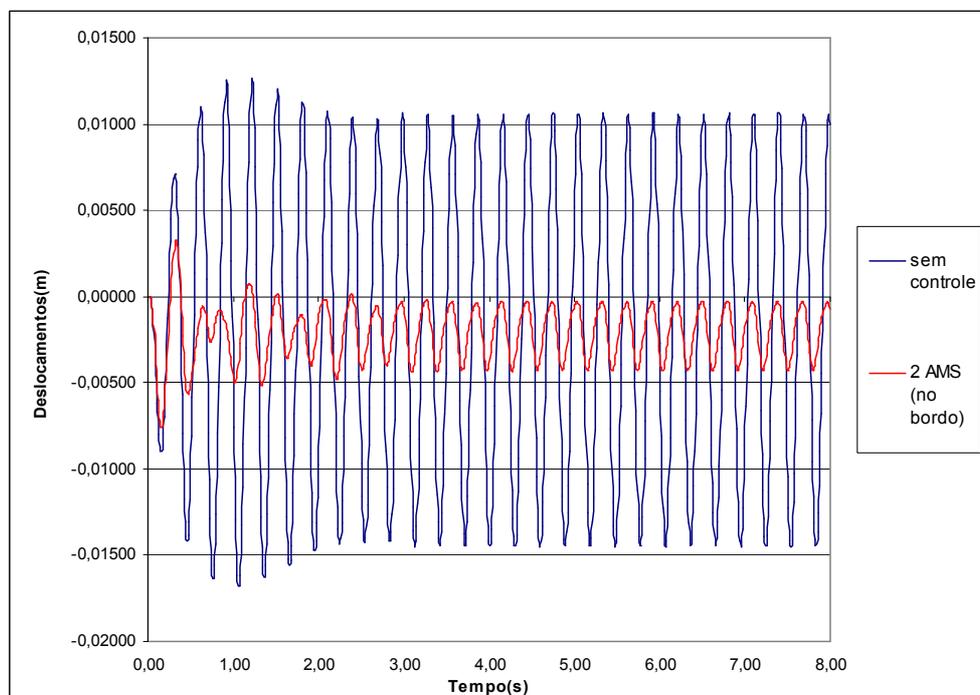


Figura 5.39 – Deslocamentos para 2 AMS instalados e carregamento humano.

5.2.3.3 Estudo 19

Verificou-se que ao posicionar os dois AMS em cima do bordo livre, houve o melhor desempenho e ao mesmo tempo, uma mudança no valor de α em comparação ao estudo com os amortecedores a 1m do bordo. Por este motivo, decidiu-se variar ainda a posição dos dois AMS, afastando-os do bordo para verificar como se comportava a alteração de α devido ao afastamento dos amortecedores do bordo livre e ao mesmo tempo, verificar se haveria alguma melhora na redução da resposta. Primeiramente, os dois AMS foram posicionados a 40 cm do bordo livre, conforme indicado na Figura 5.40 em seguida, a 1,40m do bordo, como mostra a Figura 5.41.

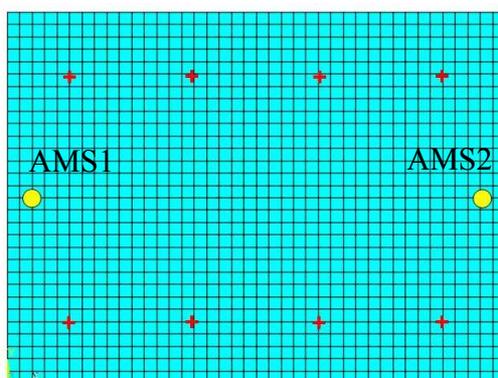


Figura 5.40 – AMS nos Nós 184 e 1228 (40 cm do bordo)

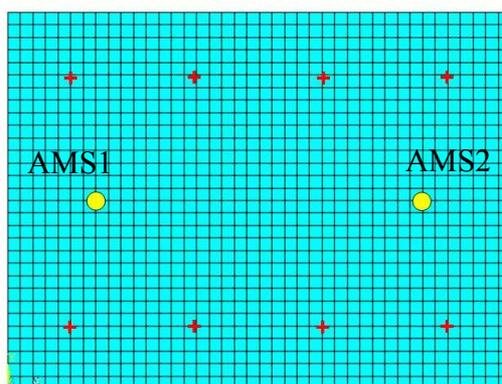


Figura 5.41 – AMS nos Nós 1083 e 329 (1,40m do bordo)

Os deslocamentos obtidos para este caso estão indicados nas Tabelas 5.40 e 5.41.

Tabela 5.40 – Variação de α para 2 AMS (40cm do bordo)

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	10,290	38,714
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	7,804	53,520
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	7,752	53,830
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	7,746	53,865
$\alpha_1 = 1,30$ $\alpha_2 = 1,30$	8,121	51,632

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Tabela 5.41 – Variação de α para 2 AMS (1,40m do bordo)

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$	11,170	33,472
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$	8,140	51,519
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$	8,060	51,995
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$	7,996	52,376
$\alpha_1 = 1,30$ $\alpha_2 = 1,30$	8,260	50,804

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Verificou-se que o valor de α mais indicado para os dois amortecedores se manteve em 1,2, exceto quando posicionado em cima do bordo livre que diminuiu para 1,1. Teve-se, portanto, para 2 AMS posicionados na laje a 1,40 m, 1,00m, 0,40m e no bordo, as respectivas reduções nos deslocamentos de 52,376%, 53,038%, 53,865% e 54,652%, ou seja, afastando-se do bordo a redução não variou significativamente.

Ficou evidenciado pelos estudos, que as reduções nos deslocamentos devido aos amortecedores melhorava quando estes foram posicionados nos bordos livres, ou seja, do ponto onde ocorre maior deslocamento. Os gráficos referentes à evolução dos deslocamentos em função do tempo para estes dois últimos casos estudados estão na Figura 5.42 e 5.43.

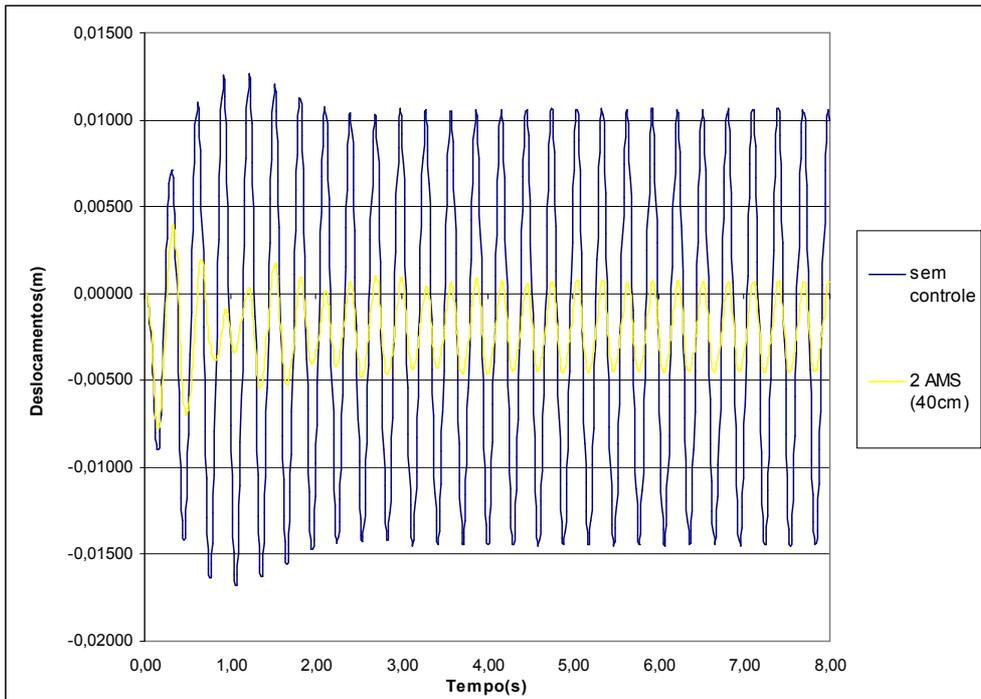


Figura 5.42 – Deslocamentos para 2 AMS (40cm do bordo) instalados e carregamento humano.

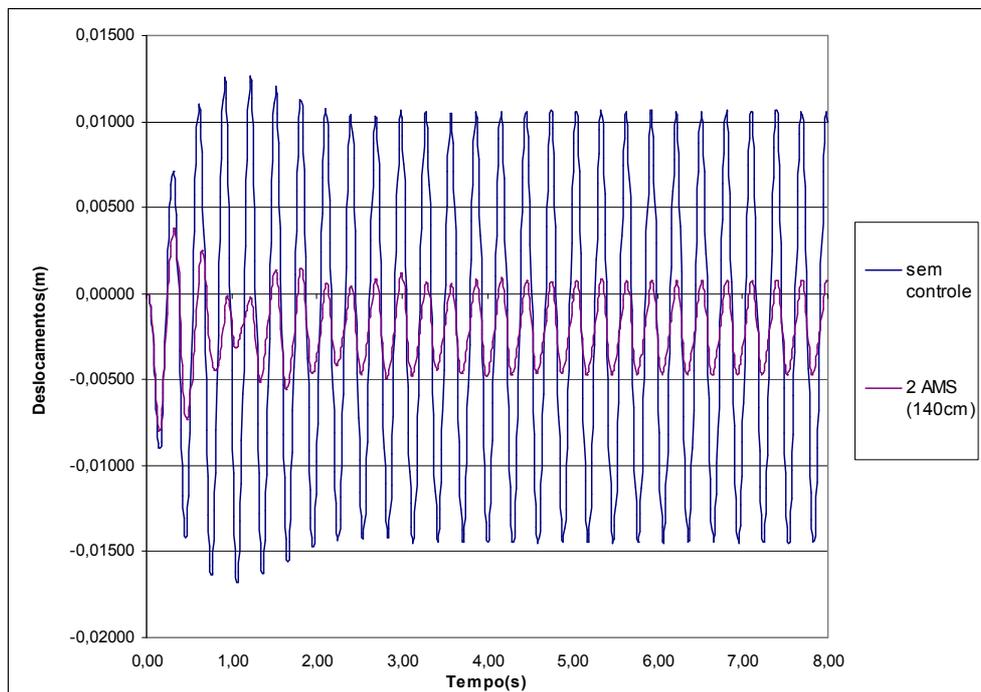


Figura 5.43 – Deslocamentos para 2 AMS (1,40m do bordo) instalados e carregamento humano.

5.2.3.4 Estudo 20

Dando continuidade ao estudo anterior, foi simulado o posicionamento de 4 AMS na laje, dois posicionados em cima do bordo e os outros dois distando do bordo livre em 40cm inicialmente, e depois em 1m e 1,40m. A Figura 5.44 mostra a disposição dos quatro amortecedores. Na Tabela 5.42 estão os valores dos deslocamentos calculados no Nó 57 e 126 para três propostas de posicionamento dos quatro amortecedores, tais resultados levaram em consideração que a massa foi distribuída igualmente nos quatro AMS.

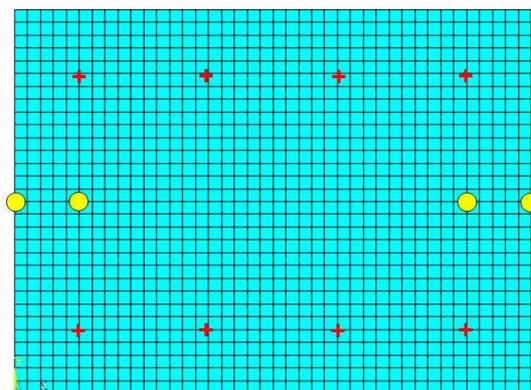


Figura 5.44 – AMS nos Nós 57, 126 (bordo) e 271,1141 (1m do bordo)

Tabela 5.42 – Variação da posição de 4 AMS (Nó 57 e 126)

Distância do AMS ao bordo (m)	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (0,40) Ams4 (0,40)	7,678	54,270
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (1,00) Ams4 (1,00)	7,738	53,913
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (1,40) Ams4 (1,40)	7,766	53,746

Valores obtidos para:

$\xi = 1\%$; α_1 e $\alpha_2 = 1,10$, α_3 e $\alpha_4 = 1,20$; $m_1, m_2, m_3, m_4 = 210\text{kg}$

Nota: A massa dos 4 amortecedores é igual e cada uma representa 1/4 da massa total.

Pela tabela anterior, nota-se que quanto maior a distância do bordo, menor a eficiência dos amortecedores. A melhor proposta de posicionamento dos amortecedores foi com dois amortecedores no bordo e os outros dois a 40 cm do bordo, ou seja, concentrando os AMS na região que sofre maior deslocamento e fica situada na proximidade do bordo livre. A redução nos deslocamentos obtida para esta proposta foi de 54,270%, um percentual pouquíssimo inferior ao obtido com somente dois amortecedores no bordo livre, que foi de 54,652%.

Visando ainda melhorar o desempenho dos 4 AMS, modificou-se a distribuição das massas nos quatro amortecedores. Na Tabela 5.43 apresentam-se os valores dos deslocamentos calculados no Nó 57 e 126 para as três propostas de posicionamento dos 4 AMS, modificando-se os valores das massas dos mesmos, que desta vez foram distribuídas de tal forma que os amortecedores sobre os bordos tivessem uma massa maior que os amortecedores afastados dos bordos, já que é no ponto sobre o bordo que os amortecedores atuaram com melhor eficiência.

Tabela 5.43 – Variação da posição de 4 AMS (Nó 271 e 1141).

Distância do AMS ao bordo (m)	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	16,790	-
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (0,40) Ams4 (0,40)	7,656	54,401
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (1,00) Ams4 (1,00)	7,695	54,169
Ams1 (0,00) Ams2 (0,00) Ams3 (1,40) Ams4 (1,40)	7,713	54,062

Valores obtidos para: $\xi = 1\%$; α_1 e $\alpha_2 = 1,10$, α_3 e $\alpha_4 = 1,20$;
 m_1 e $m_2 = 280\text{kg}$ m_3 e $m_4 = 140\text{kg}$

Nota: As massas para o AMS₃ e AMS₄ representam em conjunto 1/3 da massa de todos os amortecedores

Houve pouca melhora na redução dos deslocamentos com essa intervenção nas massas dos 4 AMS. A redução anterior obtida foi de 54,270% e nesta foi de 54,401%, porém a redução obtida com dois AMS no bordo foi um pouco melhor, com 54,652% de redução, sendo mais indicada portanto essa última opção com 2 AMS.

5.2.4 Discussão dos Resultados

Na Figura 5.45, observa-se o gráfico da evolução dos deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano e as respostas dinâmicas variando-se a posição em relação aos bordos livres. O gráfico mostra o melhor desempenho em cada estudo.

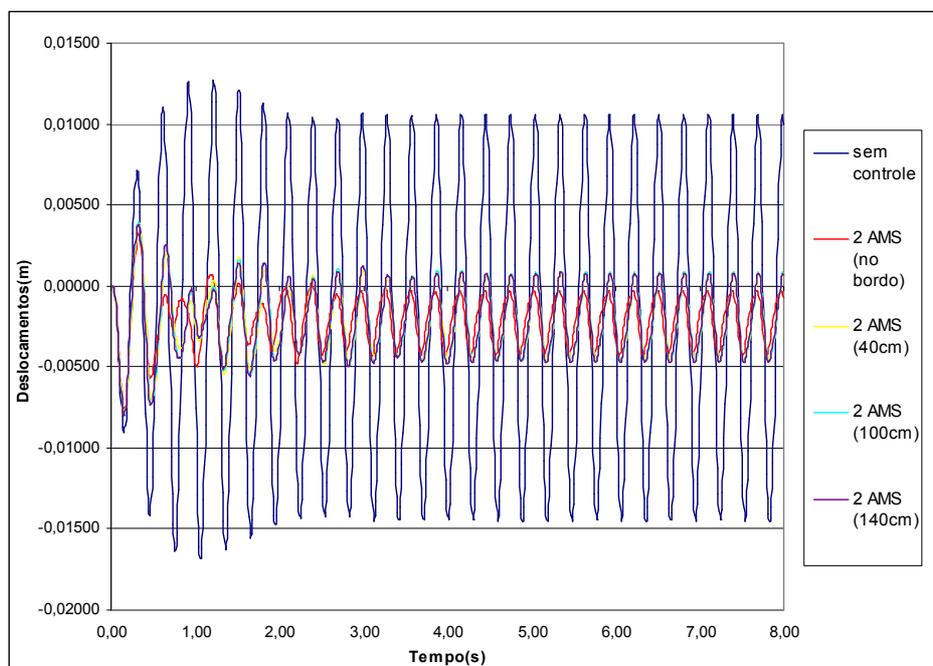


Figura 5.45 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano

Para este segundo modelo de laje, os nós de maior deslocamento são os localizados nos bordos livres, e foram nestes pontos que os amortecedores tiveram melhor desempenho tanto para a carga harmônica como para o carregamento humano. Variou-se a posição dos amortecedores afastando-os dos bordos livres e notou-se a redução do desempenho destes, mesmo mantendo-se a razão de frequência α .

Em relação à razão de frequência, os valores ótimos do α ficam entre 1,00 e 1,20, diferente do que ocorreu na laje anterior, em que os valores mais indicados de α ficaram na faixa de 0,90 a 1,10. Com a laje submetida a carga senoidal, as melhores resultados para a redução dos deslocamentos foram para razões de frequência α próximos a 1,00, já no carregamento humano os melhores desempenhos foram para α próximos de 1,20.

Na Tabela 5.44 é apresentada as melhores reduções obtidas nos estudos realizados para esse segundo modelo de laje.

Tabela 5.44 - Resumo dos estudos realizados na Laje 02 e as melhores reduções obtidas.

Laje	Carregamento	Nº de Amortecedores	Melhor valor obtido para α	Redução ΔU_z (%)
<i>Estudo 15</i>	01 carga senoidal	01 (centro)	1,00	72,096
<i>Estudo 16</i>	02 carga senoidal	02 (1m do bordo)	1,03 e 1,03	73,124
<i>Estudo 17</i>	Carga humana (08 pessoas)	02 (1m do bordo)	1,20 e 1,20	53,038
<i>Estudo 18</i>	Carga humana (08 pessoas)	02 (no bordo)	1,10 e 1,10	54,652
<i>Estudo 19</i>	Carga humana (08 pessoas)	02 (1,4m do bordo)	1,20 e 1,20	53,865
<i>Estudo 20</i>	Carga humana (08 pessoas)	04 (no bordo e 1m do bordo)	1,10 ,1,10 e 1,20,1,20	54,401

5.3 LAJE 03

5.3.1 Análise Modal

O terceiro modelo de laje estudado apresenta as dimensões de 8x5m, espessura de 7cm, um bordo livre, um bordo engastado e dois bordos apoiados, conforme indica Figura 5.46. O modelo numérico tem malha de elementos finitos com 1066 nós a cada 20 cm no plano XY. A laje em estudo com esta geometria, dimensões e condições de apoio possui frequências naturais com valores próximos aos das frequências da atividade humana de pular e dançar. As 10 primeiras frequências naturais desta laje são apresentadas na Tabela 5.45.

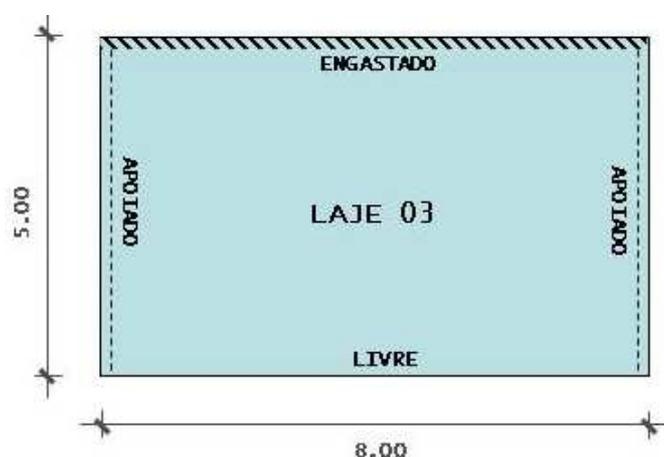


Figura 5.46 – Condições de apoio do modelo de Laje 03.

Tabela 5.45 – Frequências naturais da Laje 03

	FREQUÊNCIA NATURAL
1º MODO	3,207 Hz
2º MODO	8,299 Hz
3º MODO	12,178 Hz
4º MODO	16,996 Hz
5º MODO	17,835 Hz
6º MODO	26,747 Hz
7º MODO	29,268 Hz
8º MODO	30,253 Hz
9º MODO	35,916 Hz
10º MODO	39,032 Hz

Os três primeiros modos de vibração da Laje 03 estão representados na Figura 5.47.

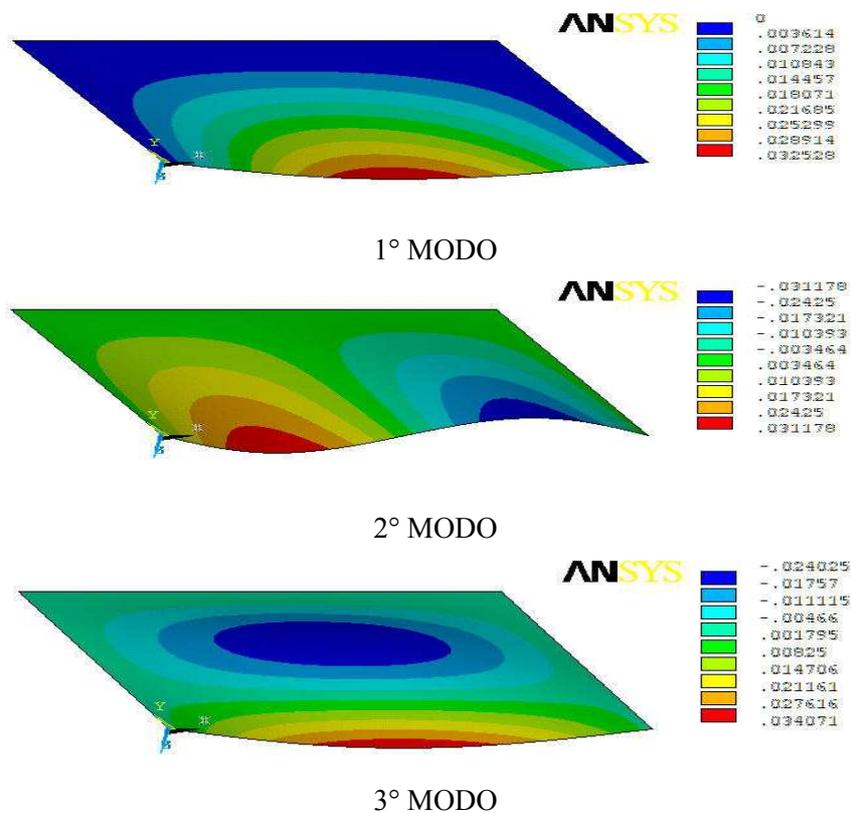


Figura 5.47 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.

A partir da análise dos primeiros modos verifica-se que trata-se de modos verticais. No primeiro modo, as maiores amplitudes ocorrem nos nós do bordo livre da laje, especificamente no centro deste bordo. No segundo modo de vibração as maiores amplitudes concentram-se em duas regiões da laje que estão localizadas também no bordo livre. Já no terceiro modo de vibração estas amplitudes deixam de se concentrar somente no bordo e ocorrem também no vão central da laje.

5.3.2 Análise para um carregamento harmônico

Assim como foi realizado nos dois modelos analisados anteriormente, o estudo deste terceiro modelo inicia-se com a análise da aplicação de uma carga harmônica senoidal, aplicada no ponto central da laje para obtenção da evolução da resposta dinâmica em função da frequência. A Figura 5.48 destaca estes deslocamentos medidos no bordo livre da laje (Nó 22).

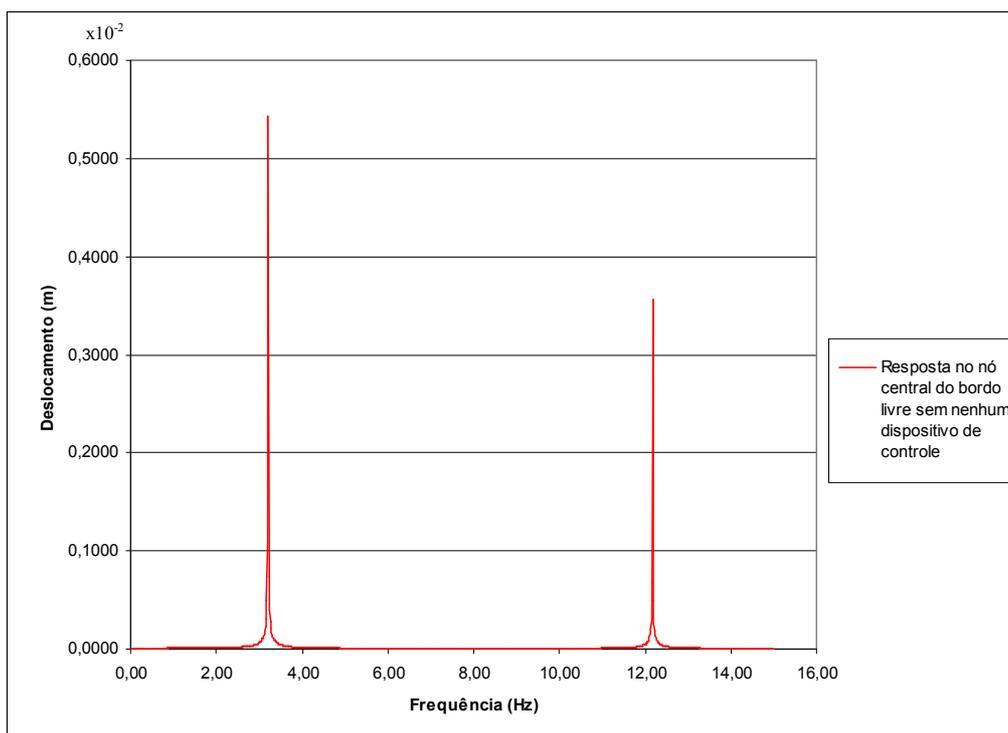


Figura 5.48 – Resposta dinâmica em função da frequência no nó do bordo livre da laje

Verifica-se nesta figura, que os picos de deslocamentos ocorrem na faixa de frequência do primeiro modo de vibração e do terceiro modo de vibração da laje, assim como ocorreu nos dois modelos anteriores de laje estudados, porém os maiores deslocamentos ocorrem na frequência do terceiro modo.

A frequência do carregamento adotada para analisar a situação foi igual à primeira frequência natural da laje ($f = 3,20$ Hz). A Tabela 5.46 apresenta os valores máximos do deslocamento U_z , velocidade V_z e aceleração a_z no nó central do bordo livre da laje (Nó 22).

Tabela 5.46 – Resposta máxima sem controle

$U_z(\text{mm})$	$V_z(\text{m/s})$	$a_z(\text{m/s}^2)$
5,423	0,1083	2,162

Em seguida, realiza-se o estudo dos parâmetros dos AMS para o carregamento harmônico aplicado e obtem-se os valores mais indicados para este caso, em especial, analisando a variação da razão de frequência α e a melhor posição dos amortecedores de forma a reduzir ao máximo a resposta dinâmica.

5.3.2.1 Estudo 21

Para o presente caso, a proposta inicial de controle foi utilizar um único AMS posicionado no nó central, como indica a Figura 5.49. A análise consistiu em avaliar a melhor razão de frequência α para tanto foram fixados novamente os valores da taxa de amortecimento em $\xi = 1,0\%$ e da razão de massa em $\mu = 0,1$. A Tabela 5.47 apresenta as reduções das respostas obtidas para este caso.

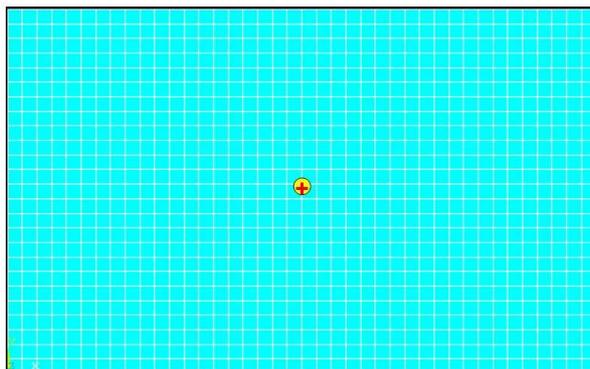


Figura 5.49 – AMS no Nó 600 destacado na laje

Tabela 5.47 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	5,423	-
$\alpha = 0,80$	3,400	37,304
$\alpha = 0,90$	2,283	57,902
$\alpha = 1,00$	2,265	58,233
$\alpha = 1,10$	2,494	54,011
$\alpha = 1,20$	3,192	41,140

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Verifica-se que sintonizando o AMS na primeira frequência natural da laje obteve-se a melhor performance para a proposta de controle em questão. A Figura 5.50 apresenta a evolução do deslocamento do nó central neste caso, comparando-se com a resposta sem controle.

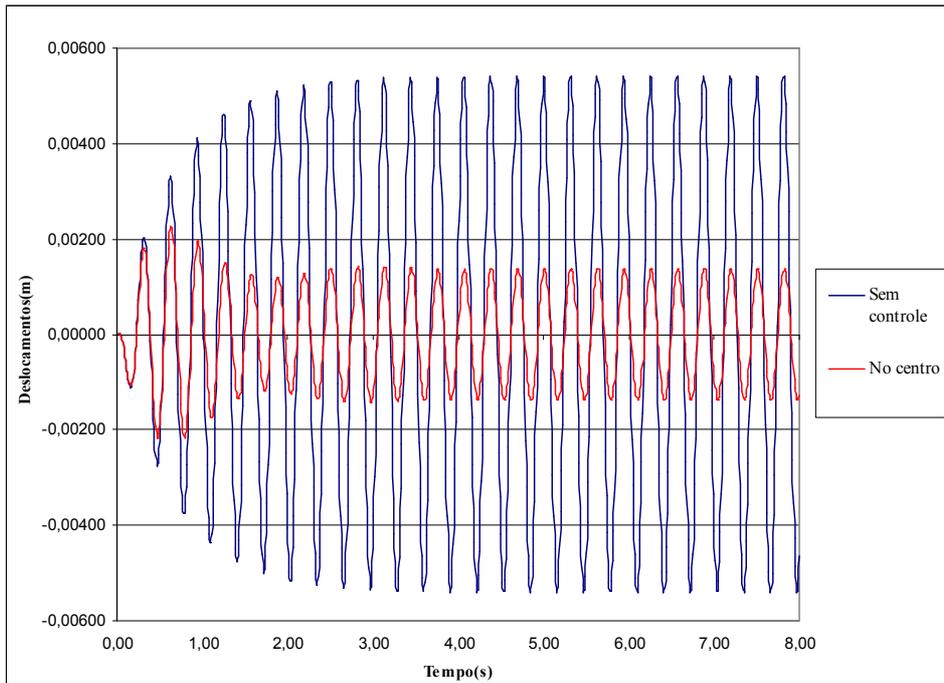


Figura 5.50 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico no nó central.

5.3.2.2 Estudo 22

Para o mesmo carregamento do estudo anterior e mantendo-se os mesmos parâmetros ξ e μ , variou-se a posição do AMS, como pode ser visto na Figura 5.51. A proposta foi aproximar o amortecedor do bordo livre (80 cm do bordo) que é a região de maior amplitude modal. A Tabela 5.48 apresenta as reduções das respostas obtidas variando-se a razão de massa α , verifica-se que o desempenho do AMS foi superior ao do estudo anterior, uma vez que o amortecedor está mais próximo aos nós com maiores deslocamentos.

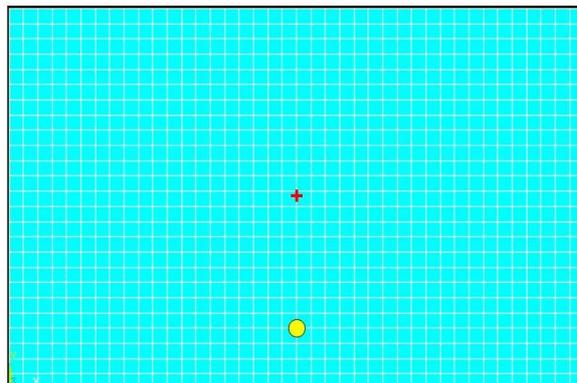


Figura 5.51 – AMS no Nó 591 destacado na laje

Tabela 5.48 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	5,423	-
$\alpha = 0,80$	1,245	77,042
$\alpha = 0,90$	1,142	78,942
$\alpha = 1,00$	1,090	79,900
$\alpha = 1,20$	1,397	74,239

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Os resultados deste estudo demonstram que a mudança de posicionamento do AMS interferiu consideravelmente na eficiência do controle.

A Figura 5.52, apresenta o gráfico da evolução dos deslocamentos em função do tempo no bordo para o melhor caso obtido neste estudo ($\alpha = 1,00$).

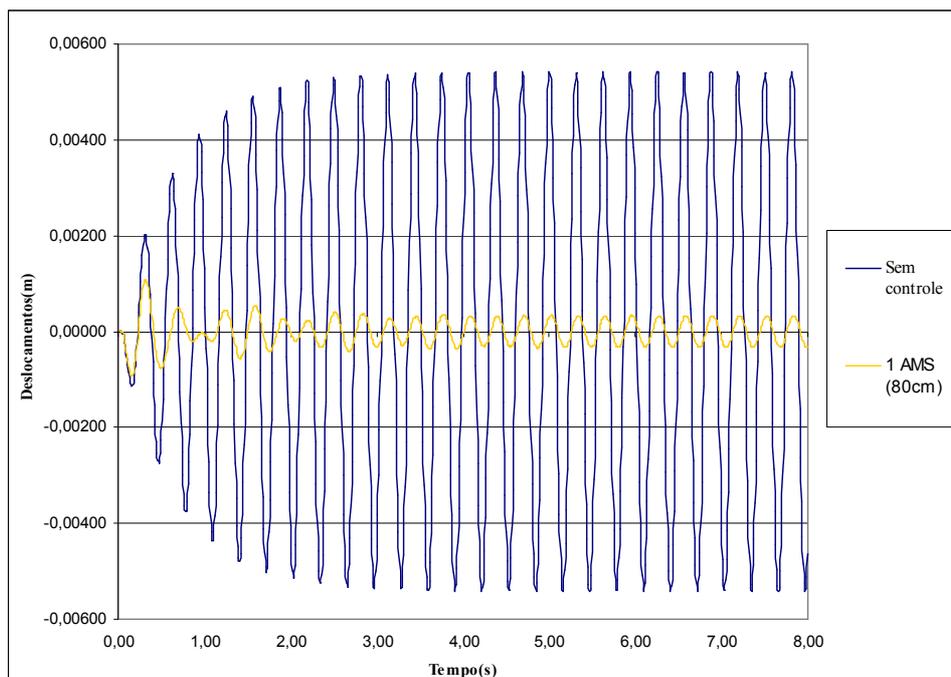


Figura 5.52 - Evolução dos deslocamentos do nó de bordo em função do tempo para o carregamento harmônico.

5.3.2.3 Estudo 23

Com o objetivo de verificar a influência da posição do AMS, mantém-se o carregamento, os parâmetros μ e ξ , e posiciona-se o AMS sobre o bordo livre. A Tabela 5.49 apresenta as reduções dos deslocamentos obtidos neste caso variando-se a razão de frequência α . Verifica-se que o desempenho do AMS foi superior devido à mudança de posição.

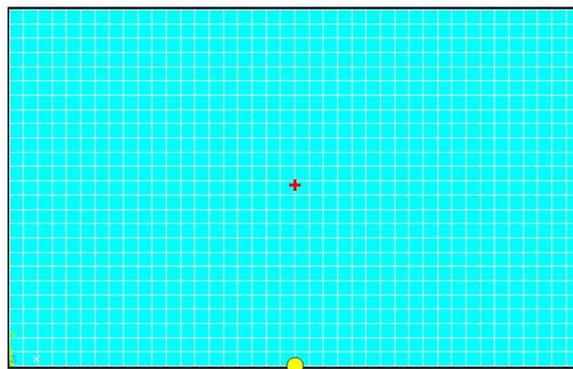


Figura 5.53 – AMS no Nó 22 destacado na laje

Tabela 5.49 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	5,423	-
$\alpha = 0,80$	0,8798	83,7765
$\alpha = 0,90$	0,8198	84,8829
$\alpha = 1,00$	0,7941	85,3568
$\alpha = 1,12$	0,7772	85,6684
$\alpha = 1,15$	0,7745	85,7182
$\alpha = 1,17$	0,7965	85,3126
$\alpha = 1,20$	0,8896	83,5958
$\alpha = 1,30$	1,0220	81,1543

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Os resultados obtidos indicam que a melhor redução obtida para o amortecedor posicionado sobre o bordo livre foi de 85,718%, enquanto que as reduções para as análises anteriores foram de 79,900% (AMS a 80 cm do bordo) e 58,233% (AMS no centro do vão). Desta forma, verifica-se que o posicionamento do amortecedor influencia consideravelmente na eficiência do AMS. Semelhante ao que ocorreu no estudo anterior da Laje 02, o desempenho do amortecedor foi melhor quando posicionado sobre o nó do bordo livre, que é o nó onde ocorrem as maiores amplitudes

modais. Na Figura 5.54, a evolução dos deslocamentos no nó de bordo para $\alpha = 1,15$ e sem controle.

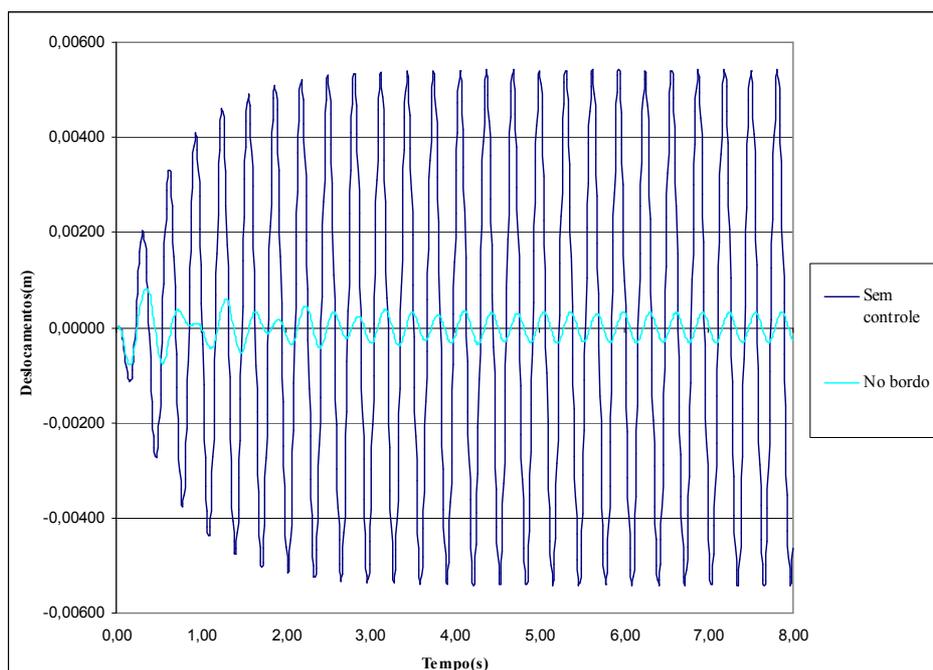


Figura 5.54 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico

5.3.3 Análise para um carregamento humano

Dando continuidade aplicou-se um carregamento dinâmico que representasse a atividade humana de pular e dançar sobre a laje. Neste estudo, considerou-se a atividade de pular com um valor de frequência de $f_s=3,40$ Hz e $T_p = 0,294$ s. Arbitrou-se a relação t_p/T_p em 0,5, chegando-se a $k_p = 3,0$. Por esta relação encontrou-se $t_p = 0,147$ s. Com estes valores de f_s , k_p , t_p obteve-se para cada intervalo de tempo a força que representam a carga gerada pela atividade humana de pular e dançar.

Consideraram-se 8 pessoas realizando atividade rítmica sobre a laje num intervalo de tempo de 8s. Esse tempo foi subdividido em intervalos de tempo ou passos de tempo de 0,01 s.

Os nós onde foram aplicados as cargas representando as 8 pessoas, espaçadas entre si de 2m, foram os nós 231, 471, 711, 951, 246, 486, 726, 966. A posição das 8 pessoas na laje está representada na Figura 5.55. Na Tabela 5.50 são apresentados os valores máximos da resposta dinâmica da laje neste caso.

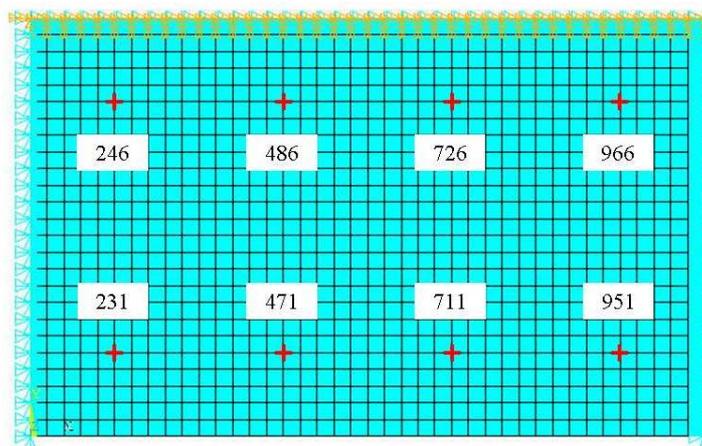


Figura 5.55 - Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular.

Tabela 5.50 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	az(m/s ²)
38,90	0,7565	15,37

5.3.3.1 Estudo 24

Para este caso de carregamento, a primeira proposta de controle foi posicionar o AMS no nó 594 situado a 1,6m do bordo livre, conforme indica a Figura 5.56. Na Tabela 5.51 estão as respostas obtidas variando o parâmetro α .

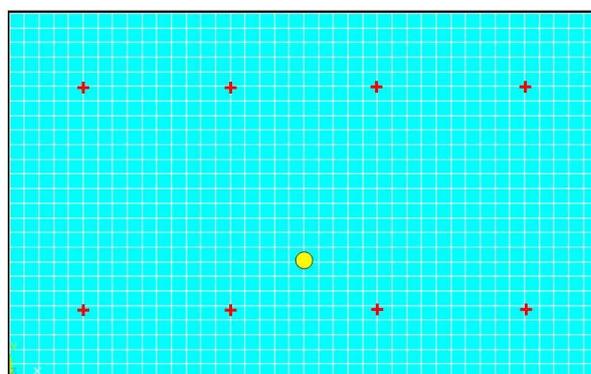


Figura 5.56 – AMS no Nó 594 destacado na laje

Tabela 5.51 – Variação de α para 1 AMS

	U _{máx} (mm)	Δ (%)
Sem controle	38,90	-
$\alpha = 0,90$	17,620	54,704
$\alpha = 1,00$	16,120	58,560
$\alpha = 1,20$	15,770	59,460
$\alpha = 1,40$	17,440	55,167
$\alpha = 1,60$	19,320	50,334

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

A razão de frequência mais indicado para este caso foi de $\alpha = 1,20$, reduzindo a resposta em quase 60%.

A Figura 5.57 apresenta o gráfico da evolução dos deslocamentos em função do tempo do nó de bordo para $\alpha=1,2$ e sem controle algum.

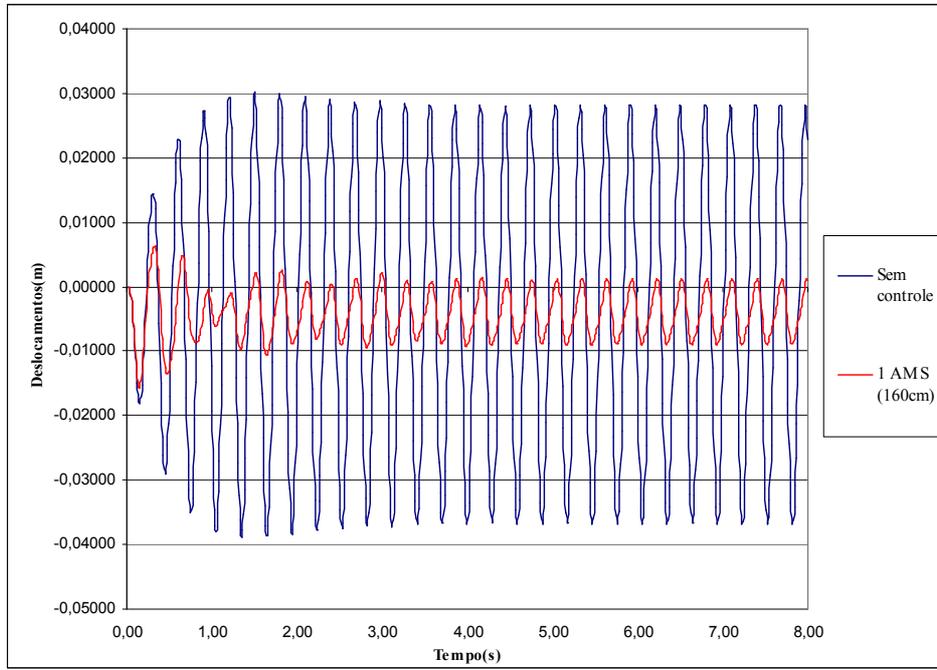


Figura 5.57 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano

5.3.3.2 Estudo 25

No presente estudo, mantiveram-se os parâmetros μ e ξ e variou-se a posição do amortecedor, para um ponto mais próximo ao bordo livre (1,0 m) no nó 591, conforme indica a Figura 5.58. Os resultados para essa proposta estão na Tabela 5.52 e neste caso, o valor de α mais interessante foi 1,4.

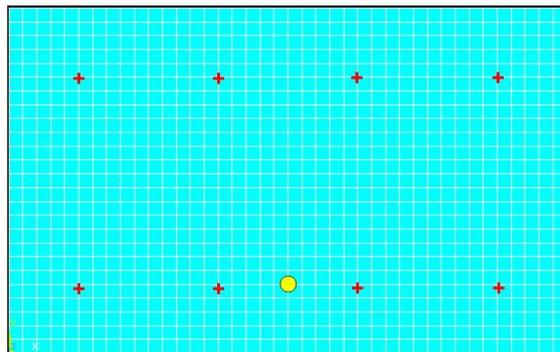


Figura 5.58 – AMS no Nó 591 destacado na laje

Tabela 5.52 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	38,90	-
$\alpha = 0,90$	15,300	60,668
$\alpha = 1,00$	15,000	61,440
$\alpha = 1,20$	14,610	62,442
$\alpha = 1,40$	14,470	62,802
$\alpha = 1,60$	16,260	58,201

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1 \%$

Houve uma mudança no valor da razão de frequência α que teve melhor desempenho em relação à análise anterior com o AMS instalado no centro da laje. Houve também, devido a mudança de posição do AMS, melhora nas reduções dos deslocamentos para 62,802%. A Figura 5.59 apresenta o gráfico da evolução dos deslocamentos no nó do bordo livre para o melhor parâmetro obtido neste caso e para o caso sem controle.

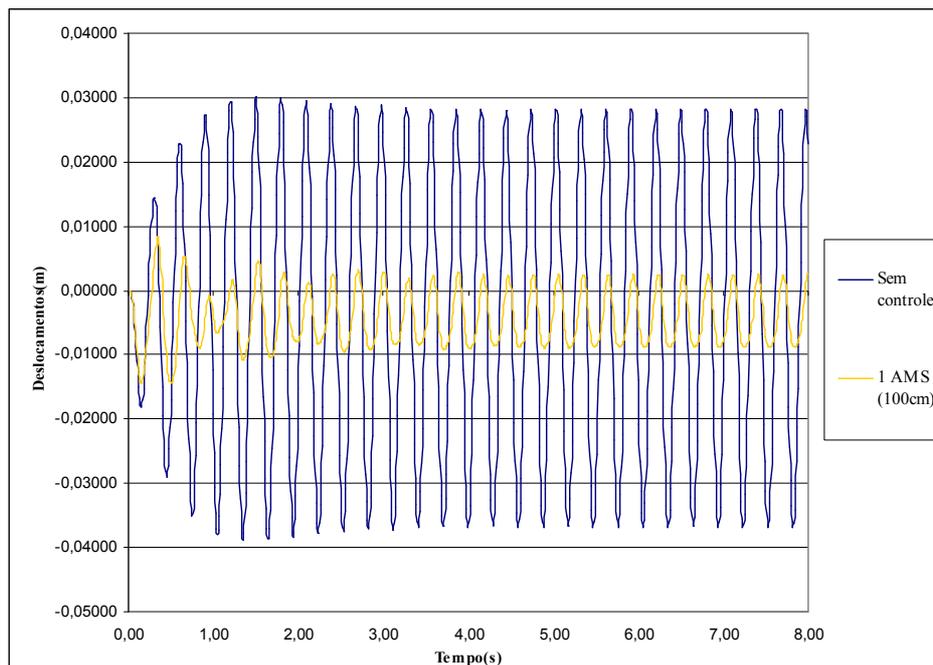


Figura 5.59 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano.

5.3.3.3 Estudo 26

Neste estudo, posicionou-se o AMS sobre o bordo livre (Nó 22), conforme indica a Figura 5.60, mantendo-se os parâmetros μ e ξ e obteve-se o melhor desempenho na redução dos deslocamentos. A Tabela 5.53 apresenta as respostas máximas obtidas. O melhor valor para α foi 1,25 que levou a uma redução de 67%.

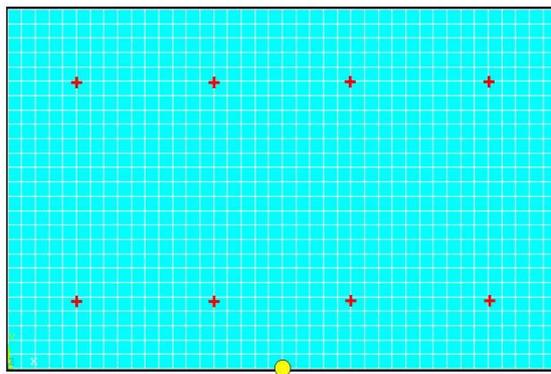


Figura 5.60 – AMS no Nó 22 destacado na laje

Tabela 5.53 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	38,90	-
$\alpha = 1,00$	12,970	66,658
$\alpha = 1,20$	12,620	67,558
$\alpha = 1,25$	12,590	67,635
$\alpha = 1,40$	12,760	67,198
$\alpha = 1,60$	13,220	66,015

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

O gráfico da evolução dos deslocamentos do nó no bordo livre para $\alpha = 1,25$ e para o caso sem controle está representado na Figura 5.61. Pelo gráfico e comparando com os estudos anteriores, percebe-se o bom desempenho na redução dos deslocamentos no nó de bordo quando o amortecedor muda de posição e verifica-se com isso como o posicionamento do AMS influencia na resposta dinâmica da estrutura.

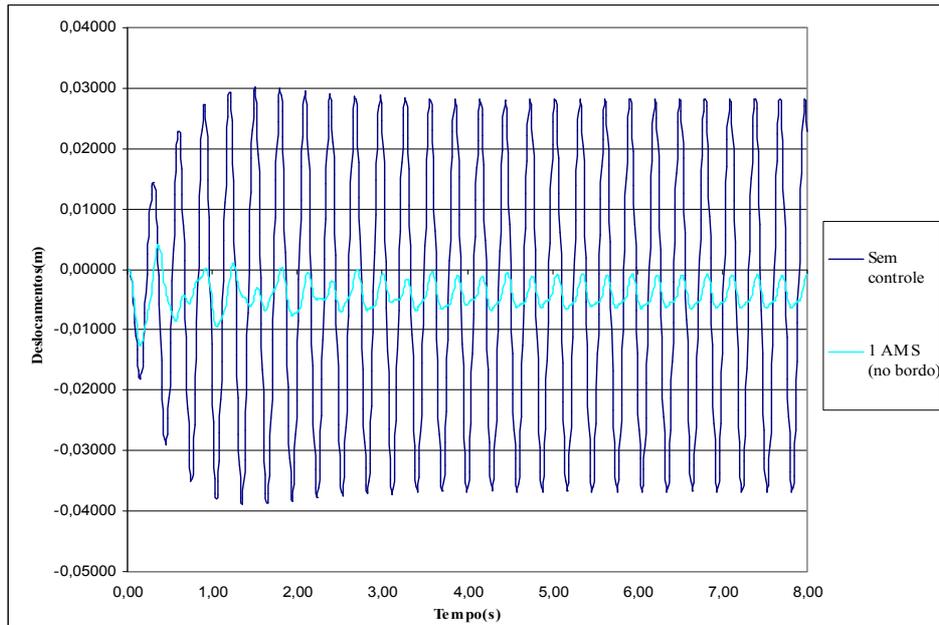


Figura 5.61 - Evolução dos deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano

5.3.3.4 Estudo 27

A proposta no presente estudo foi variar o número de amortecedores. Três AMS foram posicionados no bordo livre, o AMS1 com 50% da massa total dos amortecedores e posicionado no meio do bordo livre e os outros dois (AMS2 e AMS3) com 25% da massa total dos amortecedores e afastados 1m do AMS1. O esquema da posição dos amortecedores está na Figura 5.62. As respostas máximas dos deslocamentos obtidas neste estudo apresentam-se na Tabela 5.54

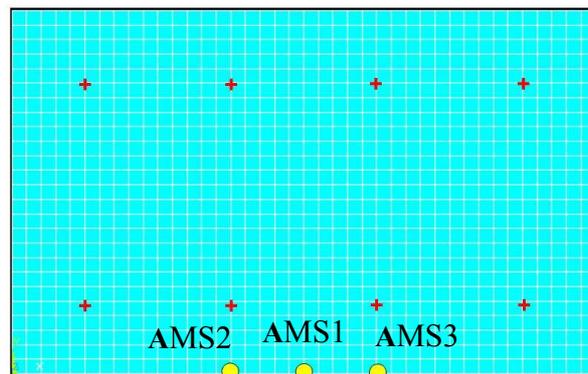


Figura 5.62 – AMS no Nó 22 destacado na laje

Tabela 5.54 – Variação de α para 3 AMS

	Umáx (mm)	Δ (%)
Sem controle	38,90	-
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 1,40$	12,970	66,658
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 1,20$	13,060	66,427
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$ $\alpha_3 = 1,20$	12,900	66,838
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 1,10$	13,020	66,530

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 1\%$

Embora tenha-se aumentado o número de AMS posicionando os mesmos sobre o bordo livre, a redução não foi superior a do estudo anterior, com um único AMS no bordo, mostrando que neste caso não há vantagem em utilizar mais de um AMS. Tem-se para esse caso, que o melhor valor da razão de frequência α foi 1,20.

5.3.4 Discussão dos Resultados

Concluída a análise para a carga harmônica e para a carga humana, é apresentado a seguir, na Figura 5.63, o gráfico da evolução dos deslocamentos para carga harmônica e sem controle e com um AMS para os casos estudados, variando-se sua posição em relação ao bordo livre. O gráfico apresenta as respostas com melhor desempenho para cada posição estudada.

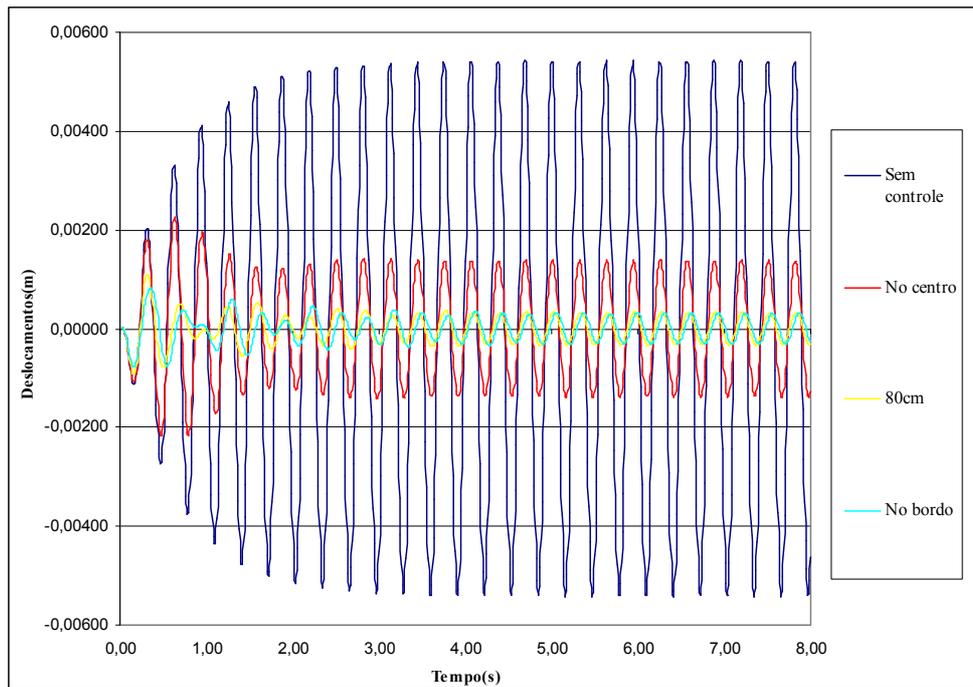


Figura 5.63 - Deslocamentos em função do tempo para uma carga harmônica

Na Figura 5.64, apresenta-se o gráfico da evolução dos deslocamentos para o carregamento humano, sem controle e com um AMS, variando-se sua posição em relação ao bordo livre. O gráfico apresenta as respostas com o melhor desempenho para cada posição estudada

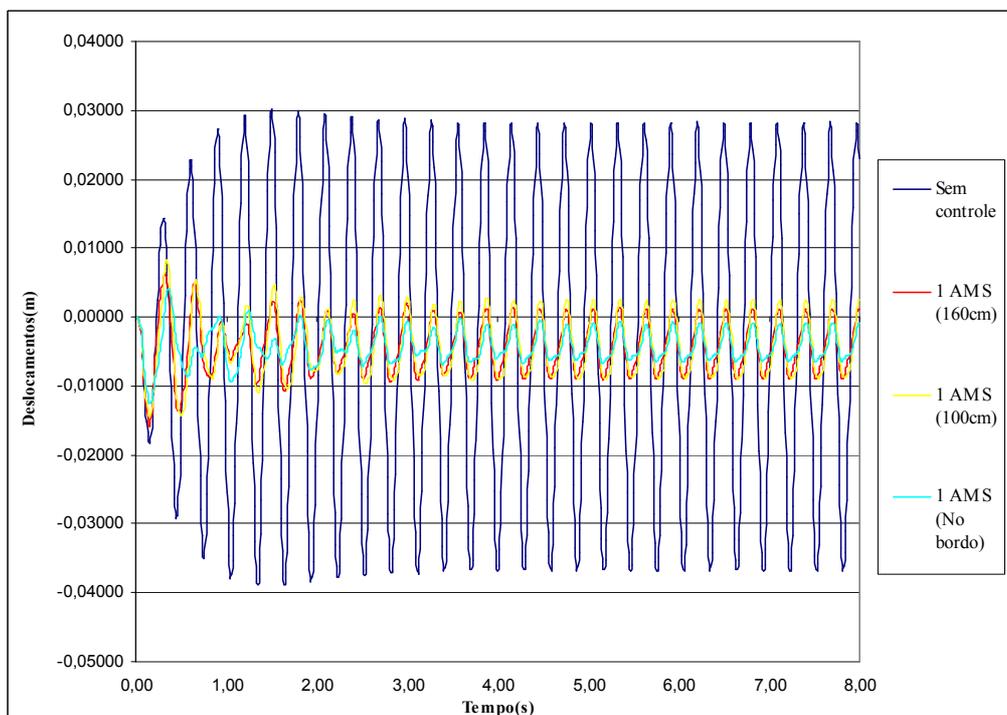


Figura 5.64 - Deslocamentos em função do tempo para um carregamento humano.

Este terceiro modelo de laje apresenta deslocamentos máximos no bordo livre, conforme o modelo de Laje 02. Verifica-se que o desempenho dos amortecedores aumenta à medida que estes se posicionam próximos ao bordo livre e que os melhores valores para a razão de frequência α estão no intervalo entre 1,00 e 1,40.

Para o carregamento senoidal, os valores mais indicados para α foram àqueles próximos a 1,00, já para o carregamento humano, oscilou entre 1,20 e 1,40.

Na Tabela 5.55 apresentam-se os melhores resultados obtidos nos estudos realizados para este modelo de laje.

Tabela 5.55 - Resumo dos estudos realizados na Laje 03 e as melhores reduções obtidas.

Laje	Carregamento	Nº de Amortecedores	Melhor valor obtido para α	Redução Δ Uz (%)
Estudo 21	01 carga senoidal	01 (centro)	1,00	58,233
Estudo 22	01 carga senoidal	01 (80cm do bordo)	1,00	79,900
Estudo 23	01 carga senoidal	01 (no bordo)	1,15	85,718
Estudo 24	Carga humana (08 pessoas)	01 (1,6m do bordo)	1,20	59,460
Estudo 25	Carga humana (08 pessoas)	01 (1,0m do bordo)	1,40	62,802
Estudo 26	Carga humana (08 pessoas)	01 (no bordo)	1,25	67,635
Estudo 27	Carga humana (08 pessoas)	03 (no bordo)	1,2, 1,2 e 1,2	66,838

5.4 LAJE 04

5.4.1 Análise Modal

No quarto modelo estudado, uma laje com 15x9m e espessura de 7cm, é analisada. Esta possui os quatro bordos engastados, conforme mostra a Figura 5.65. Possui malha com 3496 nós a cada 20 cm no plano XY. Este modelo foi escolhido por apresentar uma configuração de apoio diversa das três configurações de apoio das lajes anteriormente estudadas. As dez primeiras frequências naturais de vibração desta laje estão na Tabela 5.56.

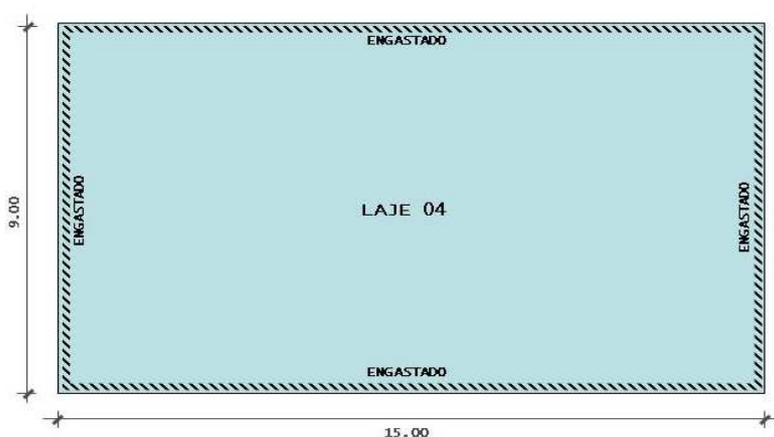


Figura 5.65 – Condições de apoio do modelo de Laje 04 .

Tabela 5.56 – Frequências naturais da Laje 04

	FREQUÊNCIA NATURAL
1º MODO	3,669 Hz
2º MODO	5,281 Hz
3º MODO	8,064 Hz
4º MODO	9,235 Hz
5º MODO	10,754 Hz
6º MODO	11,957 Hz
7º MODO	13,358 Hz
8º MODO	16,909 Hz
9º MODO	17,065 Hz
10º MODO	17,626 Hz

Na Figura 5.66, são apresentados os três primeiros modos de vibração da Laje 04 com suas respectivas frequências naturais

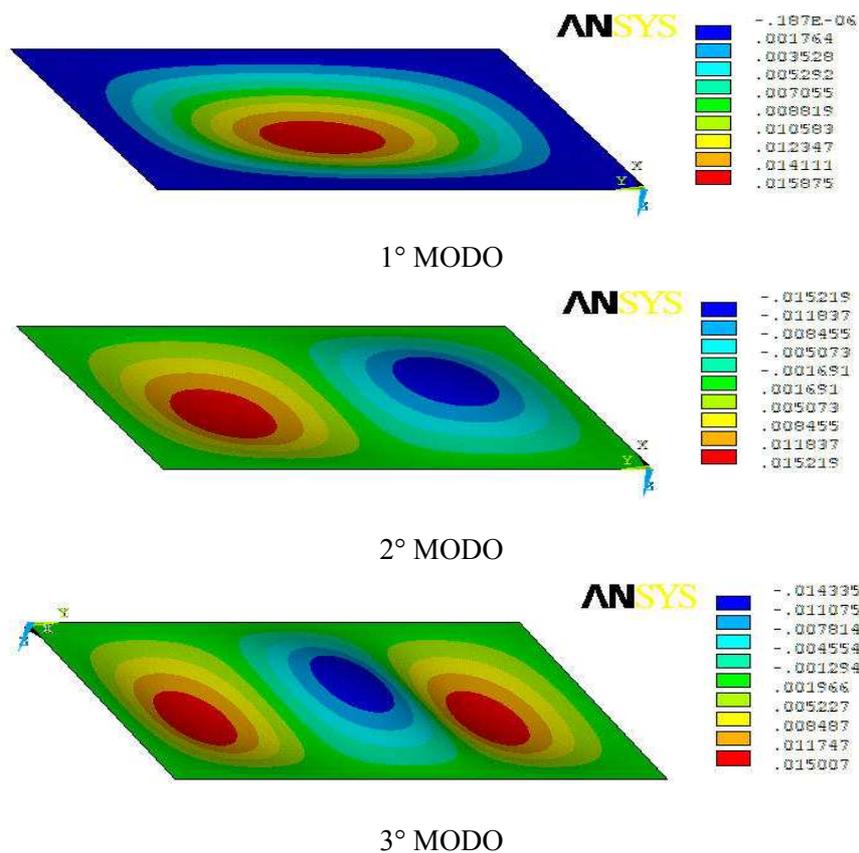


Figura 5.66 - Primeiros 3 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração.

Comparando com a Laje 01, que possuía os quatro bordos simplesmente apoiados, este modelo apresentou amplitudes parecidas. Os primeiros três modos naturais de vibração são verticais sendo que no primeiro modo as maiores amplitudes se concentram no centro do vão, tal como na Laje 01.

5.4.2 Análise para um carregamento harmônico

Uma carga harmônica senoidal foi aplicada no ponto central da laje, para obtenção da evolução da resposta dinâmica no tempo, assim como nos três modelos estudados anteriormente. A frequência do carregamento adotada, para analisar a situação mais desfavorável é igual à frequência mais baixa da estrutura ($f = 3,66$ Hz). Na Tabela 5.57 são apresentados os valores máximos do deslocamento U_z , velocidade V_z e aceleração A_z no nó central da laje para este carregamento.

Tabela 5.57 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	Az(m/s ²)
2,756	0,0629	1,439

A Figura 5.67 apresenta a resposta em frequência dos deslocamentos verticais no nó central da laje.

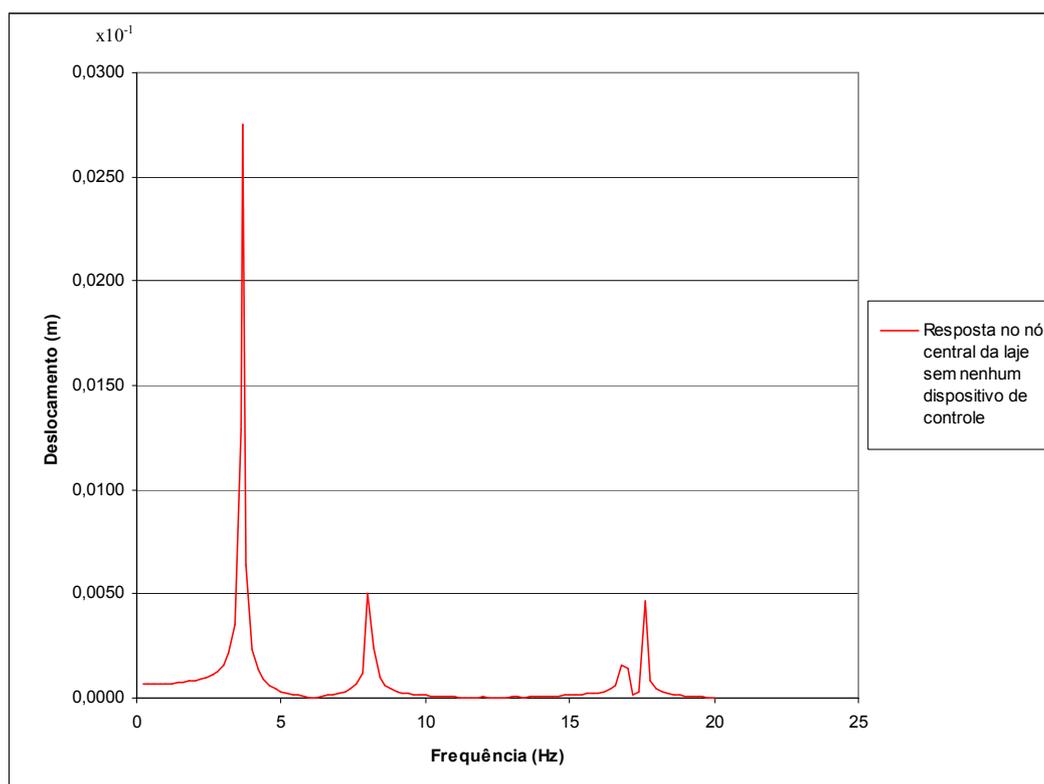


Figura 5.67 – Resposta em frequência no nó central da laje

5.4.2.1 Estudo 28

Para esta laje, a primeira proposta de controle foi instalar um único AMS no nó central, como mostra a Figura 5.68. Para este único AMS foi realizado o estudo paramétrico da razão de frequência α de forma a obter qual seria o valor mais eficiente para a redução dos deslocamentos. Foi fixada uma taxa de amortecimento ξ de 0,4%, já a razão de massa μ adotada foi 0,05, um valor menor devido às dimensões da laje e sua massa total, de forma a não comprometer a flecha máxima permitida. A Tabela 5.58 apresenta as reduções dos deslocamentos calculados no centro da laje com a instalação do AMS. Comparando este estudo com o Estudo 1 (com os quatro bordos apoiados),

onde a laje tinha deformações semelhantes a esta, verificou-se que para a mesma situação de carregamento e controle, o valor de α mais indicado foi próximo a frequência natural do 1º modo. Na Figura 5.69, é apresentado o gráfico com a evolução dos deslocamentos do nó central da laje com amortecedor e sem controle.

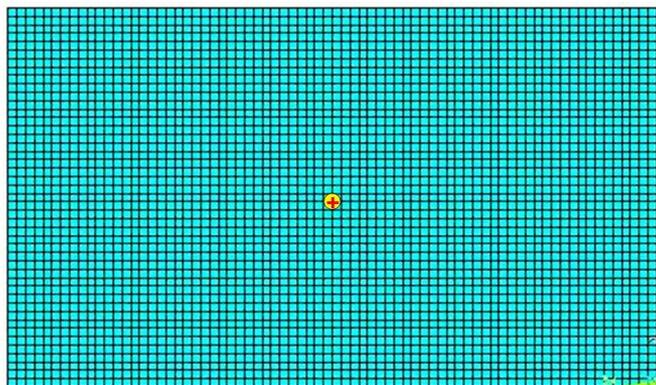


Figura 5.68 – AMS no Nó 1905 destacado na laje

Tabela 5.58 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,756	-
$\alpha = 0,80$	0,952	65,457
$\alpha = 0,90$	0,770	72,072
$\alpha = 0,95$	0,769	72,097
$\alpha = 0,96$	0,770	72,072
$\alpha = 0,97$	0,771	72,025
$\alpha = 0,98$	0,772	71,974
$\alpha = 1,00$	0,775	71,880
$\alpha = 1,20$	0,953	65,421

Valores obtidos para: $\mu = 0,05$ e $\xi = 1\%$

De acordo com a tabela acima que apresenta as reduções nos deslocamentos, tem-se que a melhor redução nos deslocamentos obtida para a carga senoidal aplicada no centro do vão, coincidente com a posição do amortecedor foi de 72,097%, para $\alpha = 0,95$. A melhor redução obtida no Estudo 01 foi de 74,580% para $\alpha = 0,96$.

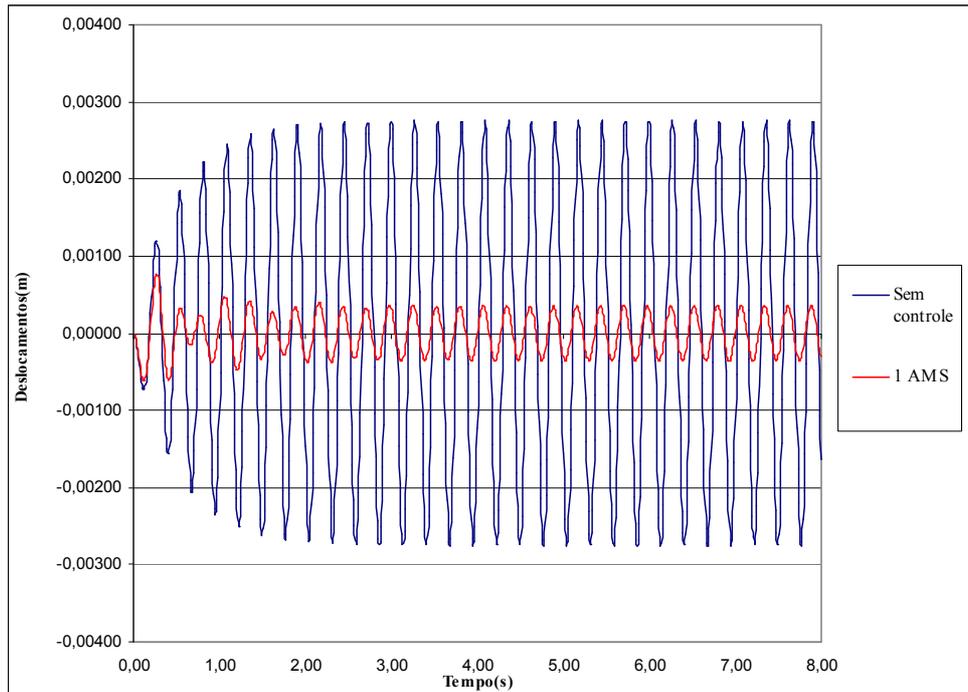


Figura 5.69 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico

5.4.2.2 Estudo 29

A tentativa neste novo estudo foi verificar o desempenho de 2 AMS com massas iguais, posicionados nos pontos de maior amplitude do 2º modo de vibração observados na análise modal. A posição dos amortecedores está indicada na Figura 5.70. Foi realizado um estudo com a variação da razão de frequência α nos dois amortecedores de forma a verificar quais os melhores parâmetros. As respostas obtidas, conforme indica a Tabela 5.59, mostram um desempenho inferior dos dois amortecedores posicionados nestes pontos, comparando com o caso anterior.

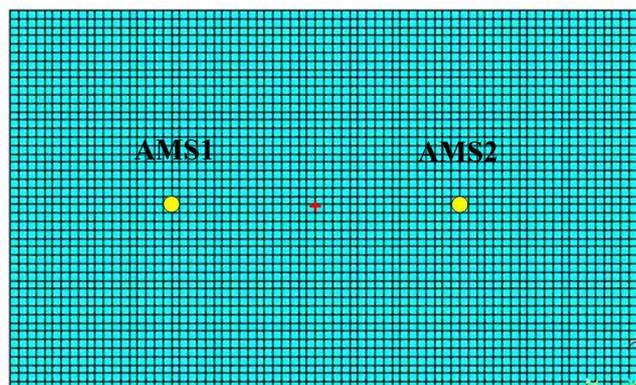


Figura 5.70 – AMS nos Nós 1889 e 1922 destacados na laje

Tabela 5.59 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,756	-
$\alpha = 0,80$ $\alpha = 0,80$	1,819	33,999
$\alpha = 0,90$ $\alpha = 0,90$	1,307	52,576
$\alpha = 0,95$ $\alpha = 0,95$	1,178	57,257
$\alpha = 1,00$ $\alpha = 1,00$	1,143	58,527
$\alpha = 1,10$ $\alpha = 1,10$	1,088	60,522
$\alpha = 1,20$ $\alpha = 1,20$	1,063	61,430
$\alpha = 1,30$ $\alpha = 1,30$	1,133	58,890

Valores obtidos para: $\mu = 0,05$ e $\xi = 1\%$

A Figura 5.71, apresenta o gráfico da evolução dos deslocamentos do nó central da laje com $\alpha_1 = 1,20$ e $\alpha_2 = 1,20$ e sem os amortecedores.

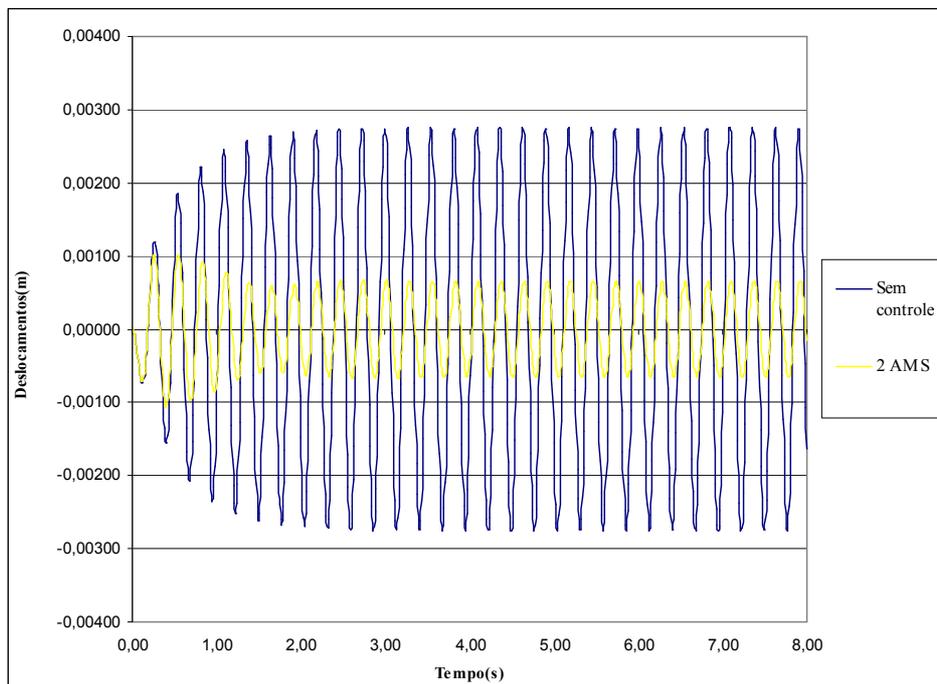


Figura 5.71 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento harmônico.

5.4.2.3 Estudo 30

Esta terceira proposta de controle foi com uso de três AMS instalados nos picos de amplitude do 3º modo de vibração observados na análise modal. A posição dos amortecedores está indicada na Figura 5.72, onde se tem os AMS1 e AMS2 com 25% da massa total, já o AMS3 possui 50% da massa total. Foi realizada o estudo de variação da razão de frequência α a fim de se obter quais os valores mais indicados. Na Tabela 5.60 apresenta-se as respostas máximas dos deslocamentos e as reduções obtidas no centro da laje neste caso.

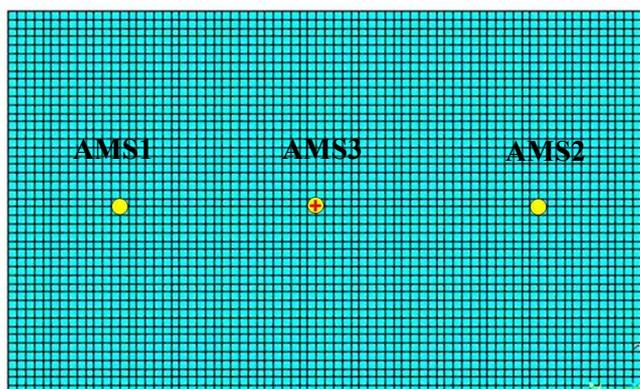


Figura 5.72 – AMS nos Nós 1883, 1928 e 1928 destacados na laje.

Tabela 5.60 – Variação de α para 3 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	2,756	-
$\alpha_1 = 0,90$ $\alpha_2 = 0,90$ $\alpha_3 = 0,95$	0,9359	66,041
$\alpha_1 = 0,95$ $\alpha_2 = 0,95$ $\alpha_3 = 0,95$	0,9322	66,176
$\alpha_1 = 1,00$ $\alpha_2 = 1,00$ $\alpha_3 = 0,95$	0,9295	66,274
$\alpha_1 = 1,10$ $\alpha_2 = 1,10$ $\alpha_3 = 0,95$	0,9239	66,477
$\alpha_1 = 1,20$ $\alpha_2 = 1,20$ $\alpha_3 = 0,95$	0,9187	66,665

Valores obtidos para: $\mu = 0,05$ e $\xi = 1\%$

Conforme a tabela anterior observa-se que a melhor redução obtida foi de 66,665% para $\alpha_1 = 1,20$, $\alpha_2 = 1,20$ e $\alpha_3 = 0,95$. Tal redução não foi superior à redução obtida para um único amortecedor, porém observa-se que para o AMS3 $\alpha_3 = 0,95$, semelhante ao valor do estudo com somente um amortecedor, já os outros dois AMS tiveram melhor desempenho quando $\alpha_1 = 1,20$, $\alpha_2 = 1,20$, valores semelhantes ao estudo anterior com somente dois AMS.

A Figura 5.73 a seguir, apresenta o gráfico com a evolução os deslocamentos para o caso com três AMS com $\alpha_1 = 1,20$, $\alpha_2 = 1,20$ e $\alpha_3 = 0,95$ e para o caso sem amortecedor.

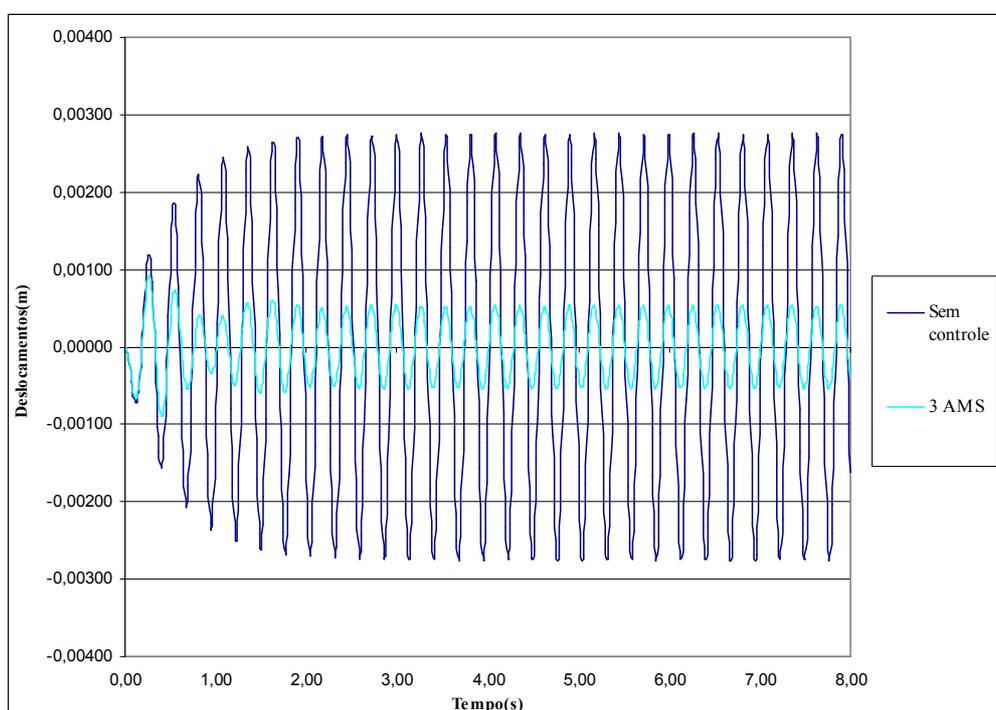


Figura 5.73 - Evolução dos deslocamentos no tempo do nó central para o carregamento harmônico

5.4.3 Análise para um carregamento humano

Neste caso foi simulado a situação de 15 pessoas praticando a atividade de dançar e pular sobre a laje. Semelhante aos outros três estudos anteriores, considerou-se a atividade de dançar e pular com um valor de frequência de $f_s=3,40$ Hz e $T_p = 0,294$ s. Arbitrou-se uma relação $t_p/T_p = 0,5$, chegando-se a $k_p = 3,0$ e $t_p = 0,147$ s. Foi considerado as 15 pessoas praticando a atividade de dançar e pular realizaram esta atividade durante 8s, o que permitiu subdividir este tempo em intervalos de 0,01s. Para

cada um desses intervalos foram obtidos 800 pares de tempo e suas respectivas cargas associadas.

As 15 pessoas foram posicionadas de forma a existir um espaço para movimentação num raio de 1 m para cada uma. As 15 pessoas foram posicionadas nos nós 993, 1005, 1017, 1029, 1041, 1881, 1893, 1905, 1917, 1929, 2769, 2781, 2793, 2805 e 2817, conforme indica a Figura 5.74. A Tabela 5.61 apresenta os valores máximos da resposta dinâmica da laje no nó central sem controle.

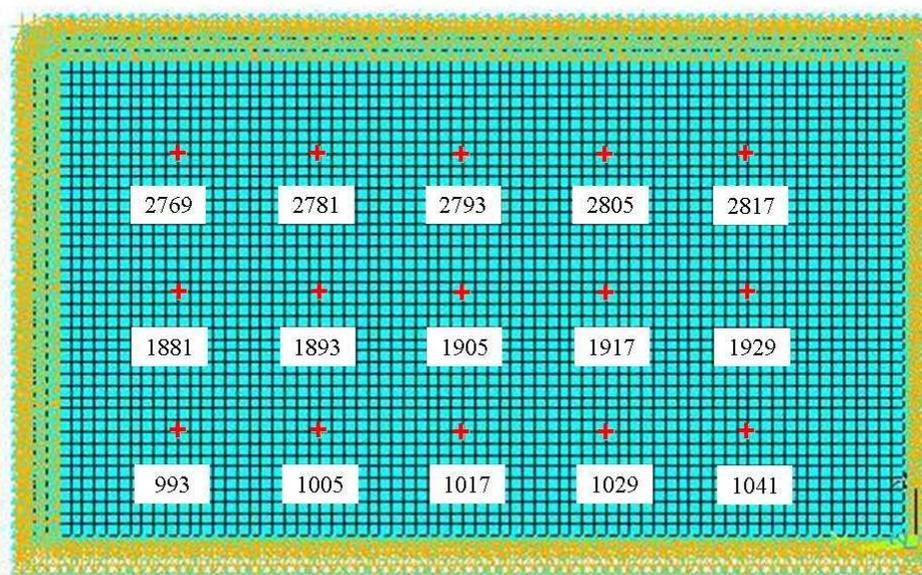


Figura 5.74 – Nós de aplicação das cargas simulando a atividade humana de pular

Tabela 5.61 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	Az(m/s ²)
21,07	0,4287	9,076

5.4.3.1 Estudo 31

A proposta de controle é utilizar 1 AMS posicionando no centro da laje, conforme mostra a Figura 5.75. A Tabela 5.62 apresenta as reduções das respostas obtidas variando-se α .

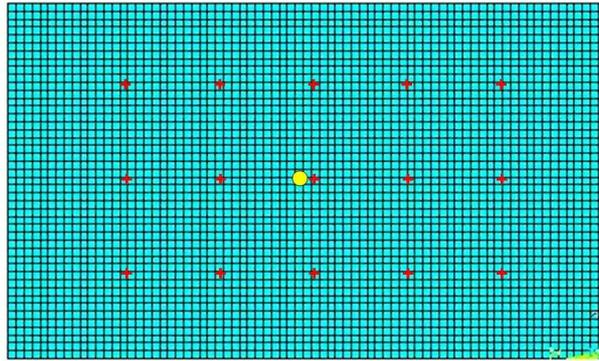


Figura 5.75 – AMS no Nó central destacados na laje e o carregamento humano

Tabela 5.62 – Variação de α para 1 AMS

	$U_{\text{máx}}$ (mm)	Δ (%)
Sem controle	21,07	-
$\alpha = 0,80$	9,360	55,577
$\alpha = 0,90$	9,221	56,236
$\alpha = 0,95$	9,167	56,493
$\alpha = 0,97$	9,167	56,493
$\alpha = 1,00$	9,123	56,701
$\alpha = 1,10$	10,250	51,353

Valores obtidos para: $\mu = 0,05$ e $\xi = 1\%$

A melhor redução obtida neste estudo foi de 56,701% para uma razão de frequência de 1,00. O valor do α mais indicado para este caso com a carga humana foi diferente do mais indicado para a carga senoidal, fato este que ocorreu também nos modelos estudados anteriormente. A Figura 5.76 apresenta o gráfico da evolução dos deslocamentos obtidos com o uso do AMS para $\alpha = 1,00$ e sem controle.

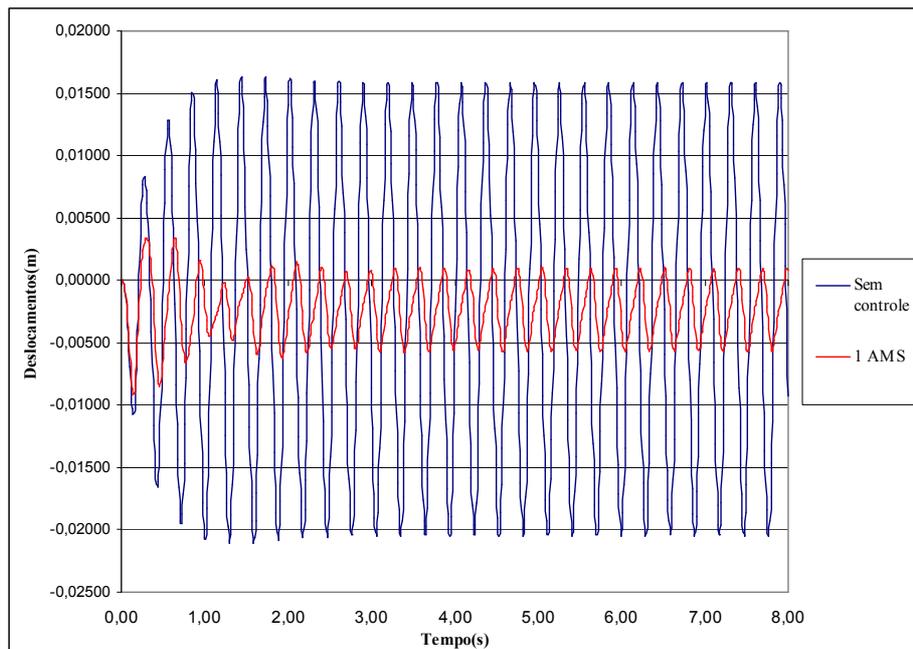


Figura 5.76 - Deslocamentos em função do tempo para o carregamento humano

5.4.4 Discussão dos Resultados

Na Figura 5.77, é apresentado o gráfico da evolução dos deslocamentos do nó central para a carga senoidal e as respostas sem controle, com 1 AMS, 2 AMS e 3 AMS. O gráfico apresenta o melhor desempenho do amortecedor para os três estudos.

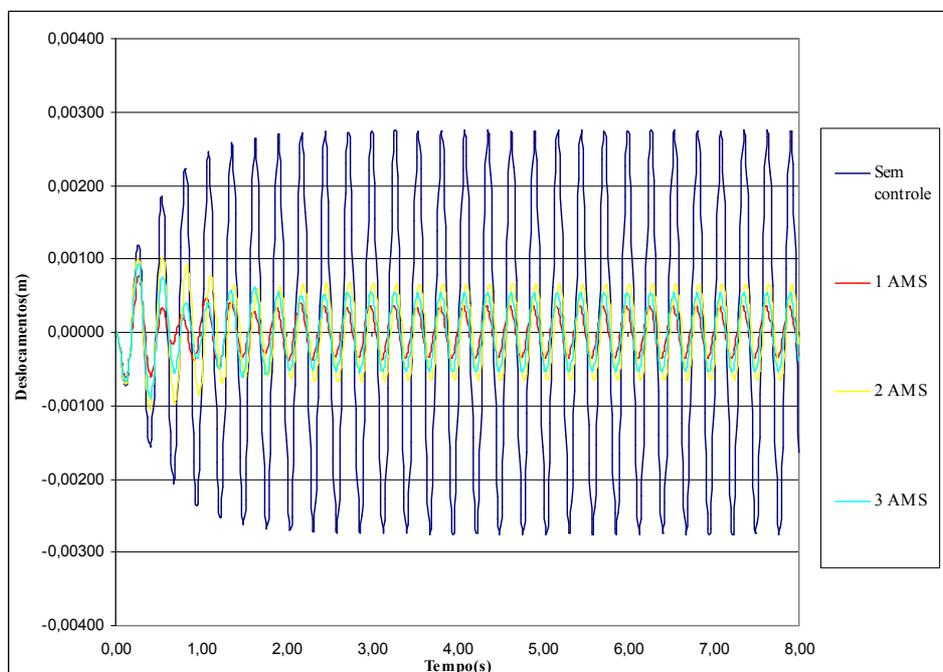


Figura 5.77 - Deslocamentos em função do tempo para 1 carga senoidal

Nota-se que a melhor proposta de controle foi para somente um único AMS, posicionado no centro do vão e no nó onde ocorreram os maiores deslocamentos, nó este coincidente com o ponto de aplicação da carga senoidal. A melhor proposta deste estudo se assemelha a proposta do estudo da Laje 01, que possuía os quatro bordos apoiados. Com relação a razão de frequência, os valores de α também oscilaram entre 0.90 e 1.00, semelhante ao ocorrido no Estudo 01.

Devido a essas observações, este estudo o modelo de Laje 04 não envolveu a quantidade de estudos realizados no modelo de Laje 01 em que se aplicou mais de uma carga senoidal e foram propostas variadas posições e quantidades de AMS. Percebe-se que tanto os deslocamentos quanto o comportamento dos amortecedores e seus parâmetros foram semelhantes, mesmo para condições de apoio diferentes.

A seguir, é apresentada a Tabela 5.63 com as melhores reduções nos deslocamentos obtidas nos estudos realizados neste modelo de laje.

Tabela 5.63 - Resumo dos estudos realizados na Laje 04 e as melhores reduções obtidas

Laje	Carregamento	Nº de Amortecedores	Melhor valor obtido para α	Redução ΔU_z (%)
Estudo 28	01 carga senoidal	01 (centro)	0,95	72,097
Estudo 29	01 carga senoidal	02 (3,4m do centro)	1,2 e 1,2	61,430
Estudo 30	01 carga senoidal	03 (centro e 2,6m do bordo)	1,20, 1,2 e 0,95	66,665
Estudo 31	Carga humana (08 pessoas)	01 (centro)	1,00	56,701

6 LAJE 05 (COM VIGAS E PILARES)

Os parâmetros obtidos no estudo dos quatro modelos de lajes, no capítulo anterior, mostraram que a razão de frequência α mais indicada variou de acordo com a geometria e as condições de apoio da laje, já os outros parâmetros, razão de amortecimento ξ e razão de massa μ , menos influentes na eficiência, foram mantidos fixos. Como a proposta deste estudo é aplicar os resultados obtidos no estudo paramétrico num caso prático, verificou-se o desempenho do AMS com esses parâmetros para um modelo de laje considerando a interação com vigas e pilares.

A fim de realizar uma comparação com um caso anteriormente estudado, optou-se por utilizar a Laje 01 e seus resultados. Para a mesma geometria da Laje 01, incorporou-se para esse modelo vigas e pilares conforme mostra a Figura 6.1, e realizou-se uma análise modal deste novo modelo estrutural.

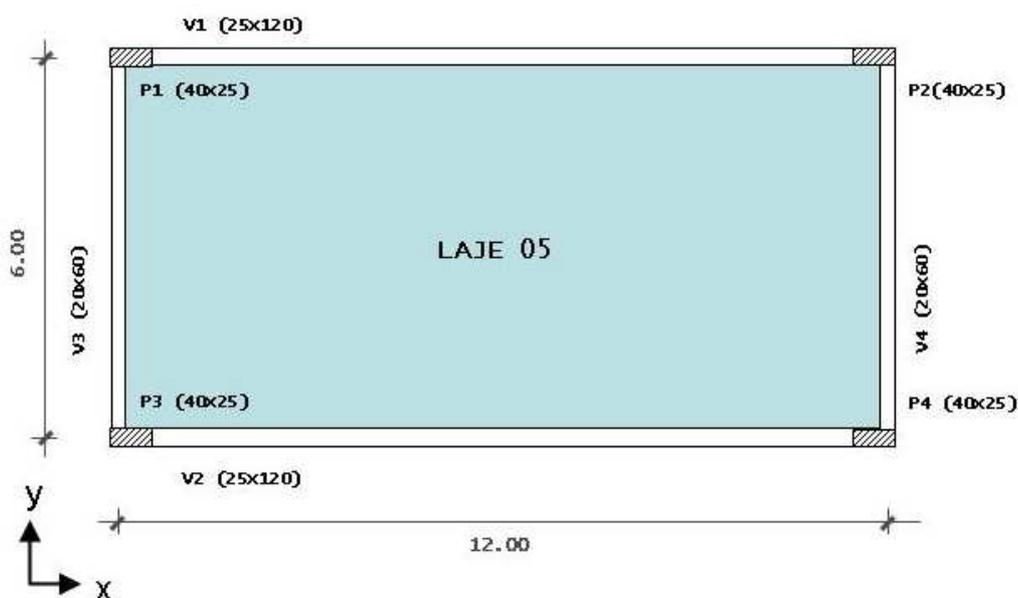


Figura 6.1 – Geometria da Laje 05 com detalhamento das vigas e pilares

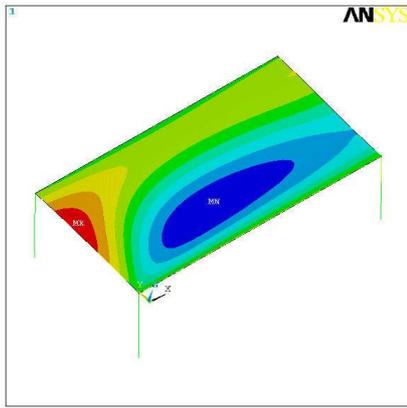
As dimensões adotadas para vigas e pilares foram calculadas de forma que não se aumentassem tanto a rigidez do conjunto e ao mesmo tempo permitisse que as frequências naturais mais baixas permanecessem próximas às frequências do carregamento gerado pela atividade de pular. As vigas V1 e V2 possuem 25x120 cm cada e as vigas V3 e V4 possuem 20x60cm cada, já os pilares P1, P2 P3 e P4 possuem 40x25cm cada, com 3,15 m de altura. Todos estes elementos estruturais foram

modelados a partir do elemento BEAM 4 do ANSYS 10.0 e as propriedades adotadas para as vigas e pilares estão indicadas na Tabela 6.1 abaixo.

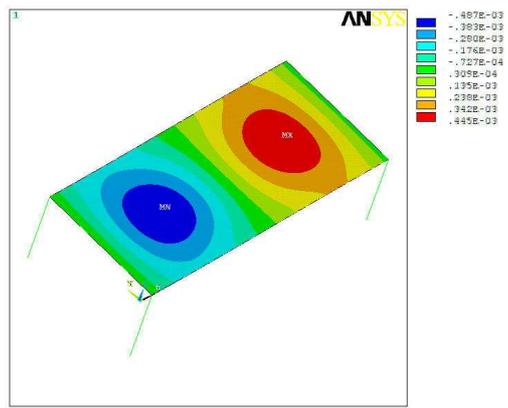
Tabela 6.1 – Propriedades para o elemento BEAM 4

PROPRIEDADES	VALOR
V1 e V2 (25x120cm)	
Área da seção transversal (m ²)	0,30
Momento de inércia com respeito ao eixo Z (m ⁴)	0,00156
Módulo de Elasticidade (GPa)	29
Coefficiente de Poisson	0,3
Massa Específica (kg/m ³)	2500
V3 e V4 (20x60cm)	
Área da seção transversal (m ²)	0,120
Momento de inércia com respeito ao eixo Z (m ⁴)	0,0004
Módulo de Elasticidade (GPa)	29
Coefficiente de Poisson	0,3
Massa Específica (kg/m ³)	2500
P1,P2,P3 E P4 (40x25x315cm)	
Área da seção transversal (m ²)	0,10
Momento de inércia com respeito ao eixo Z (m ⁴)	0,00051
Módulo de Elasticidade (GPa)	29
Coefficiente de Poisson	0,3
Massa Específica (kg/m ³)	2500

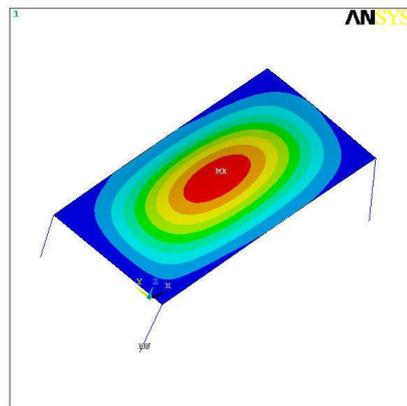
A Figura 6.2 apresenta os seis primeiros modos de vibração desta estrutura e suas frequências naturais. Nota-se com a análise modal que o primeiro modo de vibração é predominantemente horizontal, com flexão nos pilares a uma frequência de 3.63 Hz. O segundo modo apresenta também amplitudes na vertical e a flexão nos pilares. Somente no terceiro modo que as amplitudes verticais são mais significativas e concentram-se no centro do vão.



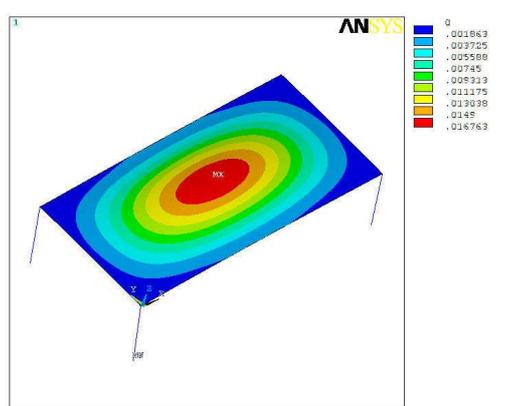
1° Modo ($f= 3,63$ Hz)



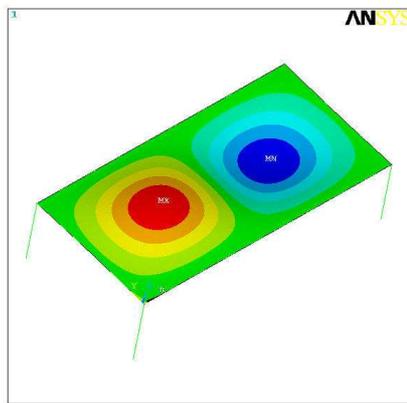
2° Modo ($f= 6,29$ Hz)



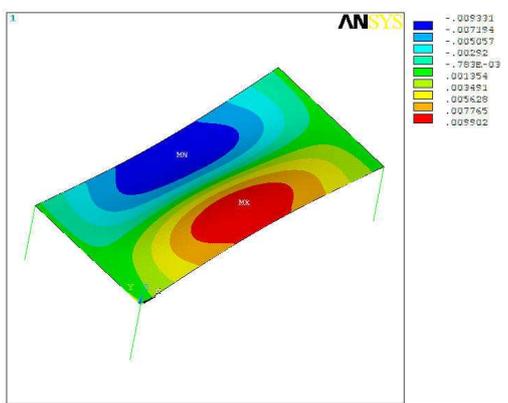
3° Modo ($f= 6,47$ Hz)



4° Modo ($f= 6,59$ Hz)



5° Modo ($f= 9,74$ Hz)



6° Modo ($f= 11,78$ Hz)

Figura 6.2 - Modos de vibração da Laje 05 e suas frequências naturais.

Neste modelo de laje, verificou-se uma mudança nos modos de vibração com relação à Laje 01, que não levava em consideração vigas e pilares. Os modos verticais surgem somente a partir do 3º modo de vibração.

Prosseguindo a análise, aplicou-se o mesmo carregamento humano aplicado na Laje 01, com o mesmo número de pessoas e no mesmo intervalo de tempo. A resposta máxima sem controle com o deslocamento, velocidade e aceleração está apresentada na Tabela 6.2 , assim como os gráficos da evolução dos deslocamento e aceleração em função do tempo estão representados na Figura 6.3 e Figura 6.4 , respectivamente.

Tabela 6.2 – Resposta máxima sem controle

Uz(mm)	Vz(m/s)	Az(m/s ²)
4,219	0,1183	3,854

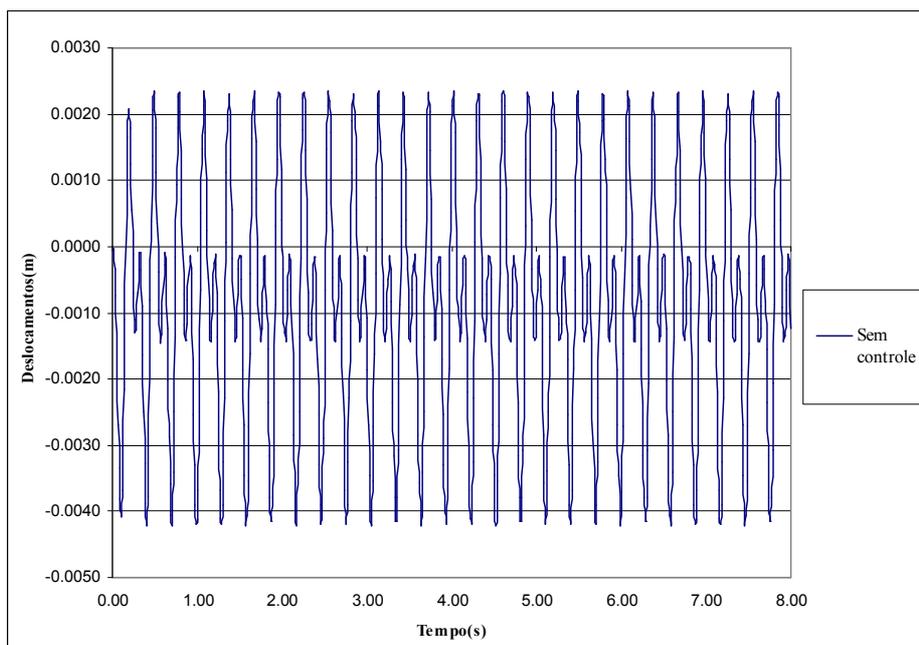


Figura 6.3 – Deslocamentos verticais na Laje 05 submetida ao carregamento humano

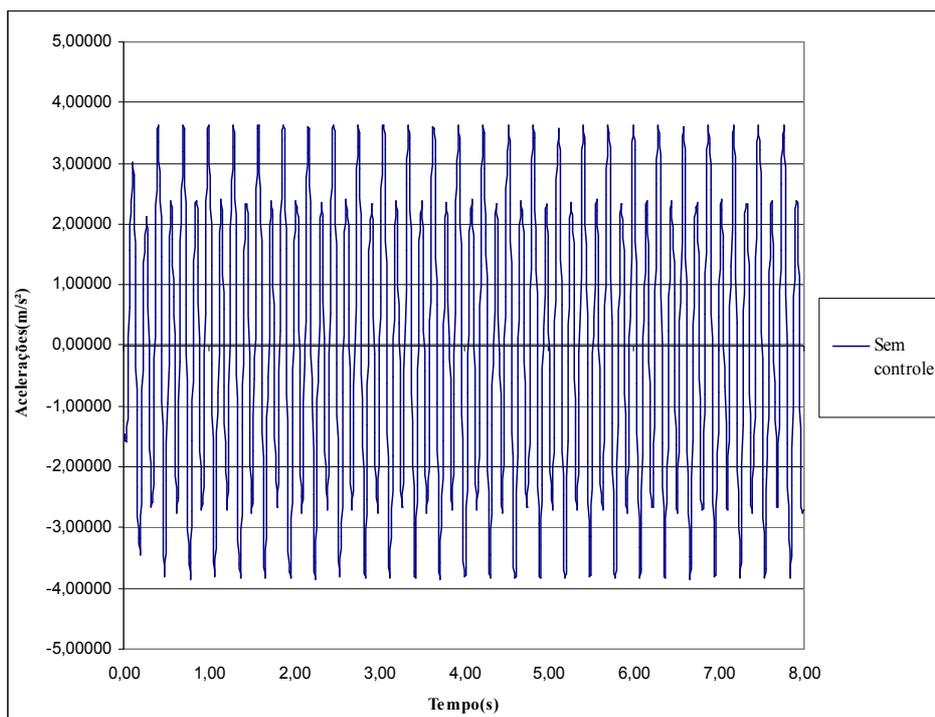


Figura 6.4 – Acelerações verticais na Laje 05 submetida ao carregamento humano

Comparando a variação das frequências associadas aos modos verticais deste modelo de laje com a Laje 01 (sem vigas e pilares) percebe-se que neste modelo as frequências iniciais variam diferenciadamente e em menor proporção, conforme indica a Tabela 6.3. Outra comparação importante entre este modelo e o da Laje 01 é da resposta dinâmica, observa-se na Tabela 6.4 que para o modelo sem vigas e pilares os deslocamentos, velocidades e acelerações são maiores que deste modelo.

Tabela 6.3 – Comparativo entre os primeiros modos de vibração da Laje 01 e Laje 05.

Laje 01 (6x12 m)		Laje 05 com vigas e pilares(6x12 m)	
	FREQUÊNCIA NATURAL		FREQUÊNCIA NATURAL
1° MODO	3,934 Hz	1° MODO	3,63 Hz
2° MODO	6,294 Hz	2° MODO	6,29 Hz
3° MODO	10,226 Hz	3° MODO	6,47 Hz
4° MODO	13,375 Hz	4° MODO	6,59 Hz
5° MODO	15,731 Hz	5° MODO	9,74 Hz
6° MODO	15,731 Hz	6° MODO	11,78 Hz

Tabela 6.4 – Comparativo entre as respostas dinâmicas sem controle da Laje 01 e Laje 05.

Laje 01		Laje 05	
Uz	18,04 mm	Uz	4,219 mm
Vz	0,3743 m/s	Vz	0,1183 m/s
az	8,065 m/s ²	az	3,854 m/s ²

6.1 PROPOSTAS DE CONTROLE

6.1.1 Proposta A

Como a proposta é verificar a sensibilidade do parâmetro α ao acréscimo de pilares e vigas na análise, foi considerado para esta laje um único AMS com os parâmetros mais indicados obtidos no Estudo 09 (um único AMS instalado no centro da laje para um carregamento humano), que foram $\xi=0,4\%$, $\alpha=0,98$ e $\mu=0,1$, sintonizados a partir da frequência do primeiro modo (3,63 hz). O AMS foi posicionado no meio do vão, como no Estudo 09, todavia, o amortecedor foi instalado de forma a atuar na direção Y (horizontal). O carregamento humano aplicado e a posição do amortecedor estão indicados na Figura 6.5 .

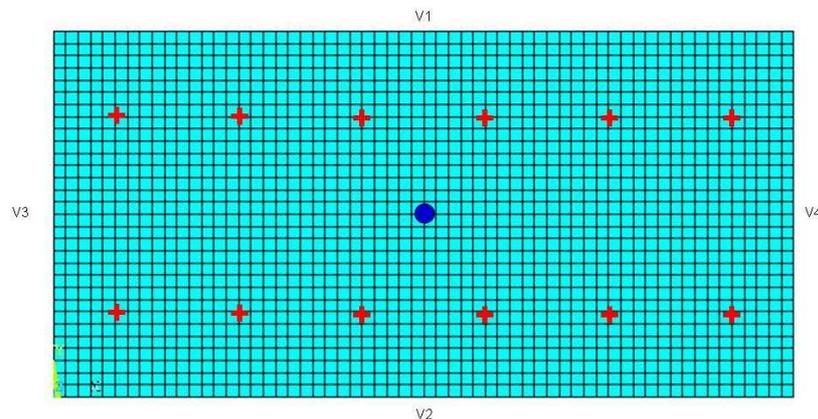


Figura 6.5 – Um AMS na direção Y posicionado no nó central

As respostas máximas obtidas no nó 946 estão na Tabela 6.5, que indica também a porcentagem de redução de Uz, Vz e az.

Tabela 6.5 – Resposta máxima sem controle e com controle e as reduções

Valores Máximos	Sem Controle	Com 1 AMS	Redução Δ %
Uz(mm)	4,219	4,217	0,047
az(m/s ²)	3,854	3,854	0,000

Verificou-se que o desempenho dos parâmetros do AMS para esta laje, usando os parâmetros mais indicados obtidos no Estudo 09 não foi o mesmo quando a laje não apresentava vigas e pilares, não ocorrendo redução significativa nos deslocamentos Uz.

6.1.2 Proposta B

A tentativa seguinte foi utilizar o mesmo AMS da proposta A, com os parâmetros $\xi=0,4\%$, $\alpha=0,98$ e $\mu=0,1$ e na mesma posição, porém, atuando na direção Z.

As respostas máximas obtidas no nó 946, destacados na Tabela 6.6, demonstraram pouca melhoria na redução dos deslocamentos e acelerações, mas para este caso, as reduções foram melhores se comparadas com a proposta A, (amortecedor atuando na direção Y).

Tabela 6.6 – Resposta máxima sem controle e com controle e as reduções

Valores Máximos	Sem Controle	Com 1 AMS	Redução Δ %
Uz(mm)	4,219	4,008	5,001
Az(m/s ²)	3,854	3,028	21,432

6.1.3 Proposta C

Em seguida, optou-se pelo uso de dois amortecedores na estrutura, cada um deles atuando numa direção. Conforme a representação da Figura 6.6, temos que no centro do vão, nó 946, o AMS atuou na direção Z (ponto amarelo) e na viga V2, nó 31, o amortecedor atuou na direção Y (ponto azul). Os parâmetros adotados foram os mesmos, com $\xi=0,4\%$, $\alpha=0,98$ e $\mu=0,1$. A massa para o amortecimento foi distribuída igualmente entre os dois amortecedores.

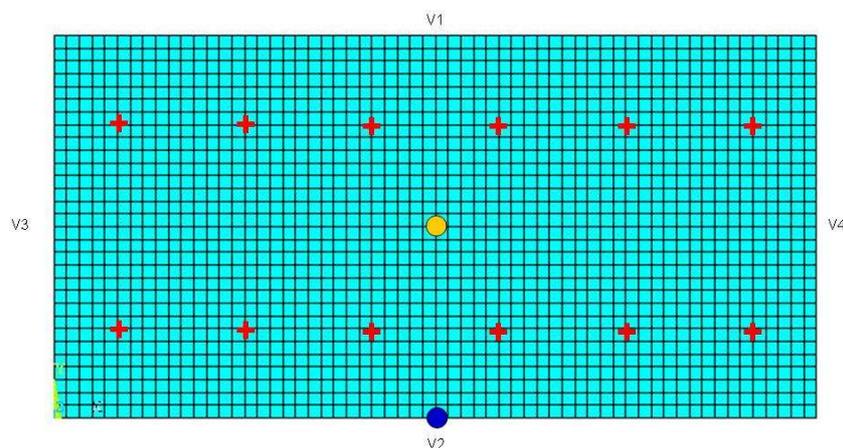


Figura 6.6 – Dois amortecedores posicionados na laje

A resposta máxima obtida no nó 946 com o uso de dois amortecedores está indicada na Tabela 6.7. Percebe-se que não houve redução nos deslocamentos e sim aumento destes, já as acelerações apresentaram menor redução do que na proposta anterior.

Tabela 6.7 – Resposta máxima sem controle e com 2 AMS e as reduções

Valores Máximos	Sem Controle	Com 1 AMS	Redução Δ %
$U_z(\text{mm})$	4,219	4,499	-6,636
$A_z(\text{m/s}^2)$	3,854	3,551	7,861

6.1.4 Proposta D

Devido ao baixo desempenho dos amortecedores com o uso dos parâmetros mais indicados obtidos no Estudo 09, partiu-se então para um estudo paramétrico do comportamento da razão de frequência α , da taxa de amortecimento ξ e da razão entre massas μ , visto que a consideração das vigas e pilares na análise alterou consideravelmente o desempenho dos amortecedores.

Neste estudo, foi um único amortecedor instalado no centro do vão, que atuou na direção Z e que foi sintonizado a partir da frequência do primeiro modo (3,63 Hz). A variação da razão de frequência α com relação às reduções obtidas no nó 946 foi a primeira análise feita, e é apresentada na Tabela 6.8 a seguir, onde foram adotados, $\xi=0,4\%$ e $\mu=0,1$.

Tabela 6.8 – Variação de α para 1 AMS.

α	Uz(mm)	Az(m/s ²)	Δ Uz (%)	Δ Az (%)
Sem controle	4,219	3,854	-	-
0,80	3,683	3,189	12,704	17,255
0,81	3,677	3,131	12,847	18,760
0,82	3,675	3,108	12,894	19,357
0,83	3,684	3,080	12,681	20,083
0,85	3,706	3,020	12,159	21,640
0,87	3,735	2,982	11,472	22,626
0,90	3,790	2,963	10,168	23,119
0,98	4,008	3,028	5,001	21,432
1,00	4,141	3,082	1,849	20,031

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\xi = 0,4$ %

Nota-se que diferente do estudo da laje sem as vigas e pilares, o valor de α mais indicado foi 0,82 para a redução nos deslocamentos, que permitiu reduções de 12,894%, porém, com relação as acelerações, a melhor redução foi obtida para $\alpha = 0,90$, com 23,119 %.

A fim de se verificar o comportamento da taxa de amortecimento foi realizada também uma análise da variação de ξ , considerando agora $\alpha=0,82$ e $\mu=0,1$. As reduções obtidas no nó 946 estão indicadas na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Variação de ξ para 1 AMS.

ξ (%)	Uz(mm)	Az(m/s ²)	Δ Uz (%)	Δ Az (%)
Sem controle	4,219	3,854	-	-
0,40	3,675	3,108	12,894	19,357
0,60	3,677	3,100	12,847	19,564
0,80	3,680	3,094	12,776	19,720
1,00	3,682	3,088	12,728	19,875
1,10	3,683	3,085	12,704	19,953

Valores obtidos para: $\mu = 0,1$ e $\alpha = 0,82$

Percebe-se pela tabela acima, que as reduções nos deslocamentos foram melhores quanto menor fosse a taxa de amortecimento ξ , porém a redução nas acelerações foi melhor quando ξ aumentou.

Finalmente, foi realizada a análise da variação da razão entre massas μ , usando $\alpha=0,82$ e $\xi=0,4$ %. As respostas no nó 946 estão indicadas na Tabela 6.10 com suas respectivas reduções nos deslocamentos e acelerações.

Tabela 6.10 – Variação de μ para 1 AMS.

μ	Uz(mm)	Az(m/s ²)	Δ Uz (%)	Δ Az (%)
Sem controle	4,219	3,854	-	-
0,05	3,992	3,458	5,380	10,275
0,08	3,809	3,239	9,718	15,957
0,10	3,675	3,108	12,894	19,357
0,12	3,635	3,050	13,842	20,861

Valores obtidos para: $\xi = 0,4\%$ e $\alpha = 0,82$

Diferente do ocorrido com os quatros modelos de lajes estudados anteriormente e que não consideravam vigas e pilares na análise, as reduções nos deslocamentos neste modelo de laje foram bem menores. Os valores mais indicados para a razão de frequência do amortecedor foram diferentes dos obtidos para a laje sem vigas e pilares, mesmo que para o mesmo carregamento, o que sugere dizer que a consideração das vigas e pilares alterou os resultados obtidos. Para a Laje 01 (com 12x6m e sem vigas e pilares) a redução obtida para o carregamento humano foi de 45,704%, para $\alpha=0,98$, $\xi=0,4\%$ e $\mu=0,1$, enquanto que no estudo atual, a redução foi de 12,894% para $\alpha=0,82$, $\xi=0,4\%$ e $\mu=0,1$.

A fim de tentar melhorar a performance do AMS na laje em estudo, foi realizado uma série de simulações variando a razão de frequência α do amortecedor, na faixa de valores entre 0,81 e 0,83 de forma a observar se o refinamento desses valores contribuiria significativamente na melhoria das reduções dos deslocamentos. Os resultados obtidos com essa análise complementar estão indicados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Variação de α para 1 AMS.

α	Uz(mm)	Az(m/s ²)	Δ Uz (%)	Δ Az (%)
Sem controle	4,219	3,854	-	-
0,810	3,677	3,131	12,847	18,760
0,813	3,675	3,138	12,894	18,578
0,815	3,674	3,130	12,918	18,786
0,817	3,673	3,121	12,941	19,019
0,819	3,674	3,112	12,918	19,253
0,820	3,675	3,108	12,894	19,357
0,825	3,679	3,093	12,799	19,746
0,830	3,684	3,080	12,681	20,083

Valores obtidos para: $\mu = 0,10$ e $\xi = 0,4\%$

7 APLICAÇÃO PARA UM CASO PRÁTICO

7.1 LAJE DE UMA ACADEMIA DE GINÁSTICA

Os estudos paramétricos realizados nos quatro modelos de laje mostraram que para uma laje submetida ao carregamento senoidal, o desempenho do AMS é melhor que nas lajes submetidas ao carregamento humano, mesmo com diferentes configurações de apoio. Verificou-se que a taxa de amortecimento ξ e razão de massa μ não sofreram variação considerável nos quatro modelos de forma que o parâmetro que mereceu maior atenção e influenciou mais em cada caso foi a razão de frequência α .

Antes de aplicar as conclusões obtidas no estudo paramétrico em um modelo de um caso prático, foi realizada a análise de uma laje considerando desta vez vigas e pilares e verificou-se a modificação nos resultados na redução das vibrações da estrutura com o uso do AMS. Observou-se que ao considerar a interação com as vigas e pilares diminuiu a eficiência dos amortecedores de massa em comparação com os quatro modelos anteriores em que não se consideravam vigas e pilares.

Para dar maior consistência ao estudo paramétrico do AMS conduzido nas análises realizadas até agora no presente trabalho, decidiu-se estender o estudo para um caso prático de vibrações induzidas por atividades humanas em lajes de edifício. Lima (2007) fez uma simulação computacional, por elementos finitos, da laje de uma academia de ginástica localizada em um prédio comercial na cidade de Brasília e que apresentava vibrações excessivas.

O edifício comercial possui 5 andares, distribuídos em um pavimento de subsolo, térreo, 1º e 2º pavimentos e cobertura, todos em estrutura de concreto armado com fck de 15 MPa, com lajes maciças de 7cm de espessura apoiadas em vigas de seção retangular, estas, apoiadas em pilares de seção retangular também. Para o estudo de LIMA, o interesse era em um trecho retangular da estrutura situado no pavimento térreo, com dimensões 14,074x6,49 m, e pé direito de 3,15m, destacado na Figura 7.1. Neste trecho está localizado o salão de ginástica da academia.

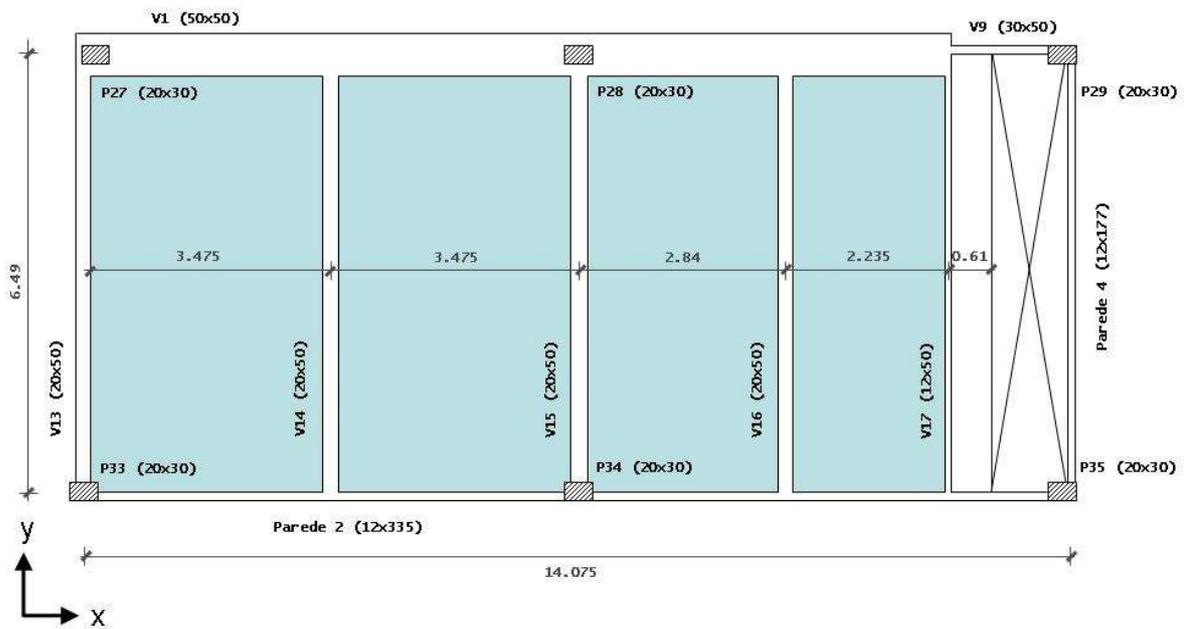


Figura 7.1 – Geometria do trecho da laje da academia de ginástica estudado por Lima (2007)

As propriedades físicas atribuídas ao modelo desta estrutura foram semelhantes as adotadas nos modelos do estudo paramétrico, onde o módulo de elasticidade E foi de 29GPa, a densidade de 2500 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,3.

A superfície da laje foi modelada com uma malha de nós no plano XY, unidos pelo elemento SHELL63. As vigas foram modeladas utilizando o elemento BEAM4, assim como os pilares também foram modelados utilizando este mesmo elemento do ANSYS. É importante destacar que nas análises realizadas por Lima (2007) foi imposto que nos nós que serviram de base para os pilares haveria restrição aos movimentos de translação ao longo dos eixos X, Y e Z e também na rotação em torno dos mesmos, de forma a simular a situação de engaste que os pilares têm em sua base.

No resultado da análise modal realizada no modelo da academia de ginástica, verificaram-se que a estrutura apresentava frequências naturais consideravelmente baixas, próximas as frequências de carregamento devido à atividade humana. Os três primeiros modos de vibração ocorrem na direção horizontal, com flexão dos pilares no primeiro modo e com flexão e torção dos pilares no segundo e no terceiro modos. Somente a partir do quarto modo que aparecem deslocamentos verticais na estrutura, conforme se vê na Figura 7.2.

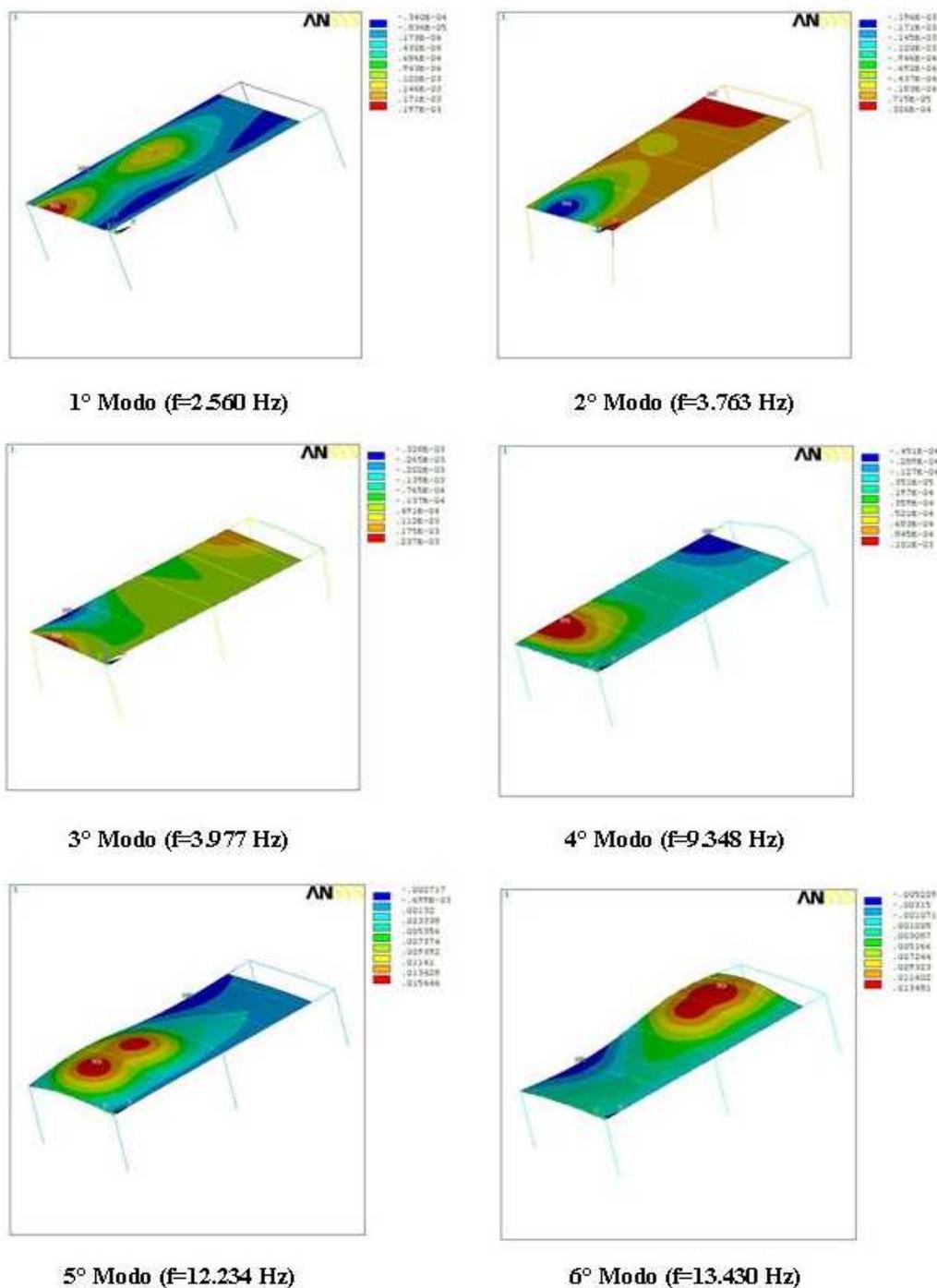


Figura 7.2 - Modos de vibração da estrutura de Lima (2007) e suas frequências naturais.

Pela análise modal realizada observa-se na figura anterior que os três primeiros modos naturais de vibração ocorrem na direção horizontal. A vibração relativa aos três primeiros modos ocorre com flexão dos pilares no primeiro modo e com flexão e torção nos pilares no segundo e no terceiro modos, de forma que a laje vibra paralelamente ao seu próprio modo. As frequências de vibração associadas aos três primeiros modos têm

valores próximos aos associados aos carregamentos dinâmicos gerados pelas pessoas praticando a atividade de pular e dançar.

Lima (2007) realizou a análise transiente simulando o carregamento de pessoas pulando. Foi adotado, assim como no estudo paramétrico deste trabalho, um peso G de 800N para as pessoas, $k_p = 3,0$ e $t_p = 0,147s$. O carregamento dinâmico simulou a atividade de 19 pessoas, nos nós: 57, 233, 239, 244, 250, 256, 261, 461, 467, 478, 484, 489, 689, 695, 700, 706, 712 e 717. A Figura 7.3 indica os nós onde as pessoas estariam pulando.

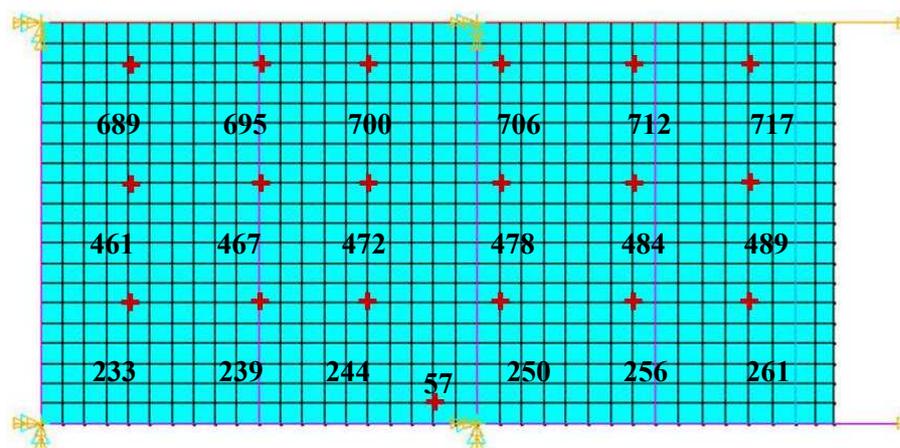


Figura 7.3 – Simulação do carregamento dinâmico

Na Tabela 7.1 a seguir, são apresentados os valores máximos da resposta dinâmica obtida por Lima (2007), nos nós que sofreram maior deslocamento vertical na análise transiente simulando a atividade das 19 pessoas na academia.

Tabela 7.1 – Resposta máxima sem controle nos nós em que os deslocamentos tem maior amplitude.

Nó	U_z (m)	V_z (m/s)	A_z (m/s ²)
386	0,712	0,0157	0,6214
396	0,759	0,0167	0,6735
472	0,790	0,0172	0,6694

Foi realizada também por Lima (2007) uma análise estática do modelo em que aplicou-se uma carga distribuída sobre os nós no plano XY de 2500 N/m². O deslocamento máximo observado na análise foi de 5,314mm, sendo o deslocamento máximo admissível de 13,9mm.

Para atenuar as vibrações excessivas foram utilizados os amortecedores de massa sintonizados, todavia na ausência de estudos paramétricos de AMS específicos para lajes, foram adotados os critérios de Jangid e Den Hartog para definir os parâmetros dos amortecedores. Sobre a adoção destes critérios, Lima (2007) destaca no seu estudo que entende que os parâmetros Den Hartog foram desenvolvidos para sistemas de um grau de liberdade e os de Jangid, para estruturas de edifícios altos e não para lajes.

Foram apresentadas no estudo 15 propostas de controle utilizando amortecedores de massa sintonizados, variando-se a quantidade, a posição e as propriedades dos amortecedores. Os nós escolhidos para instalar o AMS foram definidos por se localizarem nos locais com maiores deslocamentos modais. De todas estas propostas, a ultima proposta foi que apresentou melhor desempenho e fez uso de 6 amortecedores de massa, onde 3 estavam sintonizados na frequência do primeiro modo de vibração (2,56 Hz) e atuando na direção Y (horizontal) e os outros 3 sintonizados na frequência do quarto modo de vibração (9,35 Hz) e atuando na direção Z (vertical). Os amortecedores que atuaram na direção Y foram instalados individualmente no centro do vão das vigas V14, V15 e V16, isto é, nos Nós 391, 401, 409. Os amortecedores que atuaram na direção Z foram instalados nos Nós 386, 396 e 405, ou seja, no centro dos vãos dos três panos de laje, nos estes que sofreram maiores deslocamentos modal.

Na Figura 7.4, a seguir, os pontos em amarelo representam os amortecedores atuando na direção Z, e os pontos em azul os amortecedores atuando na direção Y.

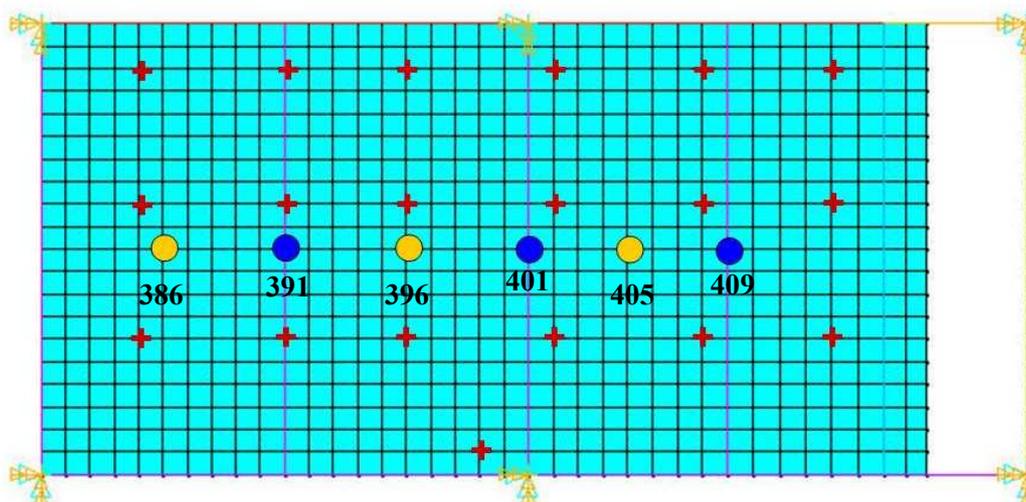


Figura 7.4 - Posição dos amortecedores na melhor proposta de controle obtida por Lima (2007).

Do trabalho de Lima (2007) foram extraídos os resultados obtidos na proposta 15. A Tabela 7.2 apresenta os respectivos resultados com o percentual de redução.

Tabela 7.2 – Resultados encontrados na melhor proposta de Lima (2007)

Nó		Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ (%)
396	U_z (mm)	0,760	0,824	- 8,421
	A_z (m/s ²)	0,674	0,513	23,887
	A_{zrms} (m/s ²)	0,477	0,363	23,899
472	U_z (mm)	0,790	0,827	-4,683
	A_z (m/s ²)	0,669	0,521	22,122
	A_{zrms} (m/s ²)	0,472	0,368	22,034

7.2 NOVA PROPOSTA DE CONTROLE PARA A LAJE DA ACADEMIA

Novas propostas com o uso do AMS foram realizadas, utilizando as conclusões fornecidas pelo estudo paramétrico realizado. Os nós escolhidos para instalar os amortecedores foram os nós 386, 396 e 472, considerando a direção Z, ou seja, no centro dos vãos dos três trechos de laje, nós estes que sofreram maiores deslocamentos modais verticais.

7.2.1 Propostas para 1AMS

Instalou-se o amortecedor no Nó 386 que fica localizado no centro do vão entre as vigas V13 e V 14, conforme indica a Figura 7.5. A razão de frequência adotada foi $\alpha = 0,98$. A razão de massa $\mu = 0,10$ e a razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$. Esse valor de α foi adotado, por o deslocamento se situar no centro de um dos vãos, que se assemelha ao deslocamento sofrido no estudo da Laje 01, no capítulo 6.1. Para um AMS, testou-se sintonizá-lo na frequência do 1º modo (Modelo A1) e também do 4º modo (Modelo A2), ver Tabela 7.3. O carregamento aplicado foi o mesmo adotado por LIMA (2007) com 19 pessoas realizando atividade de pular.

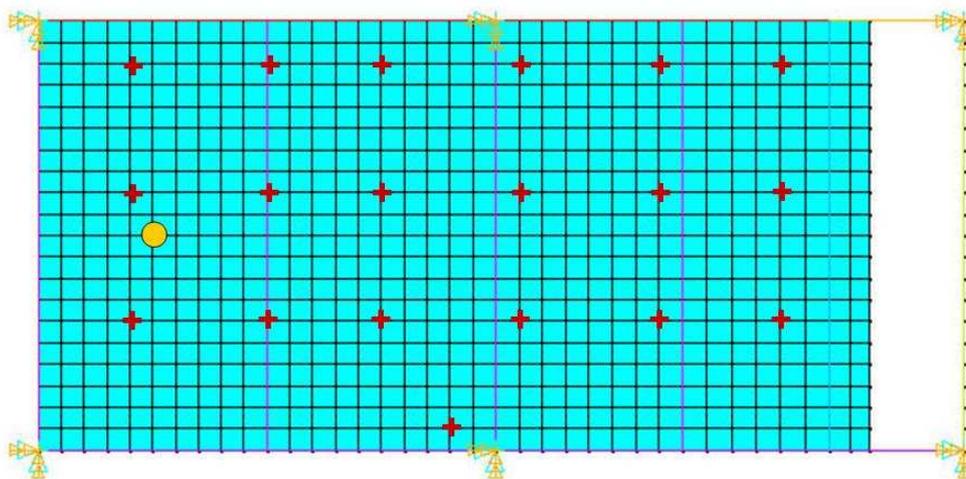


Figura 7.5 – Laje 05 com o amortecedor localizado no Nó 386

Tabela 7.3 – Propriedades do amortecedor para Modelo A1 e A2 .

Modelo	Nº AMS	f_{est} (Hz)	M_{est} (kg)	μ	ξ	α	ω_{est} (rad/s)	ω_{AMS} (rad/s)	k_{AMS} (N/m)	m_{AMS} (kg)	C_{AMS} (N.s/m)
A1	1	2,56	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	15,44	1.073.751,52	45.034,7	556,31
A2	1	9,35	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	56,40	14.323.431,69	45.034,7	2031,83

As respostas máximas estão indicadas na Tabela 7.4. Percebe-se que a melhor alternativa obtida foi para o Modelo A1 (386) com 10,449% de redução do deslocamento e 12,995% de redução na aceleração. O Modelo A2(386) embora tenha apresentado redução de 20,560% na aceleração, teve aumento de 16,15% nos deslocamentos e não redução destes.

Tabela 7.4 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A1 e A2

Modelo	Nó		Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %
A1	386	U_z (mm)	0,712	0,638	10,449
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,541	12,955
	396	U_z (mm)	0,760	0,751	1,158
		A_z (m/s ²)	0,674	0,673	0,223
A2	386	U_z (mm)	0,712	0,827	-16,15
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,494	20,56
	396	U_z (mm)	0,760	0,737	3,026
		A_z (m/s ²)	0,674	0,665	1,409

Ainda utilizando somente um único AMS posicionado no mesmo ponto, optou-se por sintonizar o amortecedor a partir dos parâmetros obtidos com o estudo da laje com vigas e pilares, uma vez que se trata de um modelo desse tipo. O valor adotado para a razão de frequência foi $\alpha = 0,82$, razão de massa $\mu = 0,10$ e a razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$, conforme indica a Tabela 7.5 em que A3 é o modelo para o AMS sintonizado na frequência do 1º modo e A4 o AMS sintonizado na frequência do 4º modo.

Tabela 7.5 – Propriedades do amortecedor para Modelo A3 e A4 .

Modelo	Nº. AMS	f_{est} (Hz)	M_{est} (kg)	μ	ξ	α	ω_{est} (rad/s)	ω_{AMS} (rad/s)	k_{AMS} (N/m)	m_{AMS} (kg)	C_{AMS} (N.s/m)
A3	1	2,56	45.034,7	0,10	0,004	0,82	16,08	13,19	783.409,85	4.503,47	475,18
A4	1	9,35	45.034,7	0,10	0,004	0,82	48,17	48,17	10.450.385,71	4.503,47	1735,52

As respostas dinâmicas da estrutura estão indicadas na Tabela 7.6. Percebe-se, assim como na proposta anterior, que o melhor desempenho foi para o amortecedor sintonizado na frequência do 1º modo, neste caso o Modelo A3 (386) foi o mais eficiente, com 7,514% de redução nos deslocamentos e 9,881% de redução nas acelerações. O Modelo A4 (386) embora tenha apresentado maior redução nas acelerações teve aumento dos deslocamentos. Esta segunda proposta foi menos eficiente que a proposta anterior.

Tabela 7.6 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A3 e A4

Modelo	Nó		Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %
A3	386	U_z (mm)	0,712	0,6585	7,514
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,6500	9,881
	396	U_z (mm)	0,760	0,7530	0,921
		A_z (m/s ²)	0,674	0,6727	0,193
A4	386	U_z (mm)	0,712	0,7817	-9,789
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,4376	29,578
	396	U_z (mm)	0,760	0,7477	1,618
		A_z (m/s ²)	0,674	0,6661	1,929

7.2.2 Propostas para 2AMS

No caso de utilizar dois AMS, estes foram posicionados nos Nós 386 e 396, conforme Figura 7.6. A razão de frequência adotada foi $\alpha = 0,96$. A razão de massa $\mu=0,10$ e a razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$. Para os dois AMS, sintonizou-se na frequência do 1º modo (Modelo A5) e também na frequência do 4º modo (Modelo A6), como indica a Tabela 7.7.

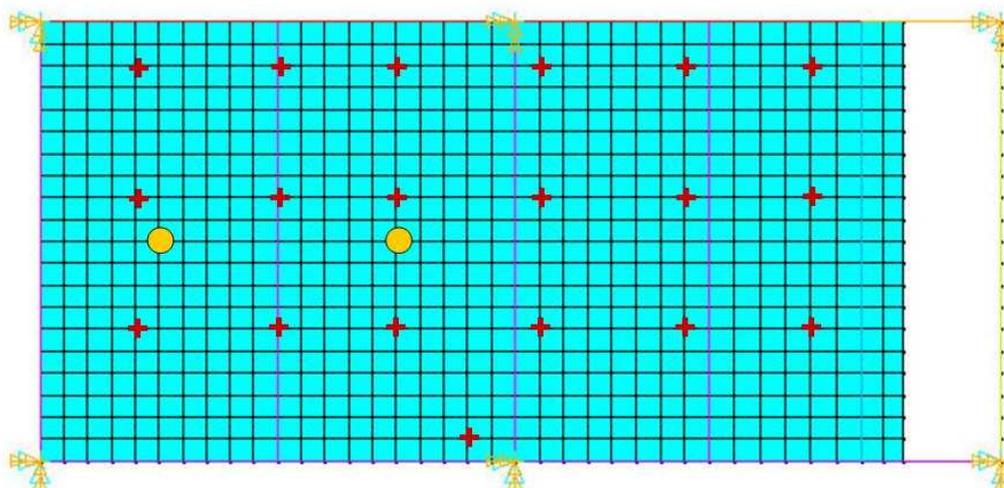


Figura 7.6 – Laje com os amortecedores localizados nos Nó 386 e Nó 396

Tabela 7.7 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6 .

Modelo	Nº. AMS	f_{est} (Hz)	M_{est} (kg)	μ	ξ	α	ω_{est} (rad/s)	ω_{AMS} (rad/s)	k_{AMS} (N/m)	m_{AMS} (kg)	C_{AMS} (N.s/m)
A5	2	2,56	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	15,44	596.528,62	2.501,93	309,06
								15,44	477.222,90	2.001,54	247,25
A6	2	9,35	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	56,40	7.957.462,05	2.501,92	1128,8
								56,40	6.365.969,64	2.001,54	903,04

As respostas máximas obtidas estão indicadas na Tabela 7.8, a redução dos deslocamentos foi inferior ao da proposta com somente um único amortecedor bem como as acelerações. O melhor desempenho foi para o Modelo A5 (386) com os amortecedores sintonizados na frequência do 1º modo. Novamente, para o modelo sintonizado no 4º modo houve melhoria na redução das acelerações porém aumento dos deslocamentos.

Tabela 7.8 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6

Modelo	Nó		Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %
A5	386	U_z (mm)	0,712	0,669	6,081
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,578	7,580
	396	U_z (mm)	0,760	0,755	0,724
		A_z (m/s ²)	0,674	0,673	0,163
A6	386	U_z (mm)	0,712	0,800	-12,360
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,507	18,442
	396	U_z (mm)	0,760	0,744	2,132
		A_z (m/s ²)	0,674	0,667	1,009

A análise seguinte adotou-se o valor de $\alpha = 0,82$, o mesmo obtido no estudo da laje com vigas e pilares, razão de massa $\mu = 0,10$ em ambos os amortecedores e razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$. No modelo A7 os dois amortecedores foram sintonizados para a frequência do 1º modo, já no modelo A8 foram sintonizados para a frequência do 4º modo, conforme mostra a Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A7 e A8 .

Modelo	Nº. AMS	f_{est} (Hz)	M_{est} (kg)	μ	ξ	α	ω_{est} (rad/s)	ω_{AMS} (rad/s)	k_{AMS} (N/m)	m_{AMS} (kg)	C_{AMS} (N.s/m)
A7	2	2,56	45.034,7	0,10	0,004	0,82	16,08	13,19	391.704,93	2.251,74	237,59
								13,19	391.704,93	2.251,74	237,59
A8	2	9,35	45.034,7	0,10	0,004	0,82	16,08	48,17	5.225.192,85	2.251,74	867,76
								48,17	5.225.192,85	2.251,74	867,76

A seguir, na Tabela 7.10, são apresentada as respostas máximas para os casos analisados.

Tabela 7.10 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A7 e A8

Modelo	Nó		Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %
A7	386	U_z (mm)	0,712	0,6812	4,326
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,5893	5,166
	396	U_z (mm)	0,760	0,7560	0,526
		A_z (m/s ²)	0,674	0,6731	0,134
A8	386	U_z (mm)	0,712	0,759	-6,601
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,4176	32,797
	396	U_z (mm)	0,760	0,7452	1,947
		A_z (m/s ²)	0,674	0,6688	0,772

A redução obtida nos deslocamentos usando $\alpha = 0,82$ foi inferior a obtida com $\alpha = 0,96$. Como nas propostas anteriores, os amortecedores sintonizados no 4° levaram a um acréscimo nos deslocamento.

7.2.3 Propostas para 3AMS

Considerou-se três amortecedores instalados nos Nós 386, 396 e 472, conforme Figura 7.7. A razão de frequência adotada foi $\alpha = 0,96$ a razão de massa $\mu = 0,10$ e a razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$. Para os 3 AMS testou-se sintonizar na frequência do 1° modo (Modelo A9) e também na frequência do 4° modo (Modelo A10), as propriedades dos amortecedores são apresentadas na Tabela 7.11.

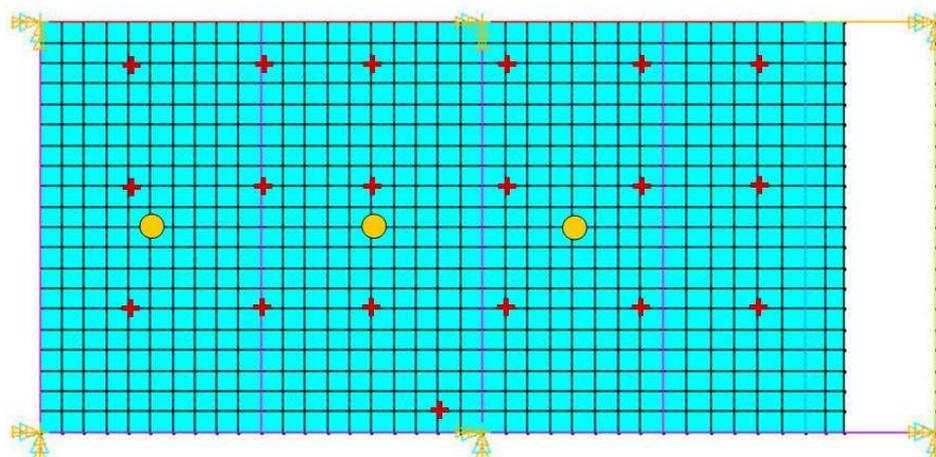


Figura 7.7 – Laje 05 com os amortecedores localizados nos Nós 386 , 396 e 472

Tabela 7.11 – Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6 .

Modelo	Nº. AMS	f_{est} (Hz)	M_{est} (kg)	μ	ξ	α	ω_{est} (rad/s)	ω_{AMS} (rad/s)	k_{AMS} (N/m)	m_{AMS} (kg)	C_{AMS} (N.s/m)
A9	3	2.56	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	15,44	447.396,47	1876,44	231,80
								15,44	357.917,17	1501,15	185,44
								15,44	268.437,88	1125,87	139,08
A10	3	9.35	45.034,7	0,10	0,004	0,96	16,08	56,40	7.957.462,1	2501,928	1128,79
								56,40	6.365.968,9	2001,54	903,04
								56,40	636.106,46	200	90,23

As respostas máximas estão indicadas na Tabela 7.12 baixo, percebe que as reduções obtidas também não evoluíram consideravelmente quando comparadas as reduções obtidas com somente um único amortecedor.

Tabela 7.12 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6

Modelo	Nó	Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %	
A9	386	U_z (mm)	0,712	0,678	4,775
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,585	5,858
	396	U_z (mm)	0,760	0,755	0,632
		A_z (m/s ²)	0,674	0,673	0,178
	472	U_z (mm)	0,790	0,786	0,506
		A_z (m/s ²)	0,669	0,668	0,149
A10	386	U_z (mm)	0,712	0,800	-12,360
		A_z (m/s ²)	0,6214	0,507	18,297
	396	U_z (mm)	0,760	0,744	2,105
		A_z (m/s ²)	0,674	0,666	1,187
	472	U_z (mm)	0,790	0,774	2,025
		A_z (m/s ²)	0,669	0,661	1,136

Para o caso de 3 AMS, foram sintonizados agora os três amortecedores com $\alpha = 0,82$, razão de massa $\mu = 0,10$ em ambos os amortecedores e razão de amortecimento $\xi = 0,4\%$. No modelo A11 os dois amortecedores foram sintonizados para a frequência do primeiro modo, já no modelo A12 foram sintonizados para a frequência do quarto modo, conforme mostra a Tabela 7.13.

Tabela 7.13– Propriedades dos amortecedores para os Modelos A5 e A6 .

Modelo	N ^o . AMS	f _{est} (Hz)	M _{est} (kg)	μ	ξ	α	ω _{est} (rad/s)	ω _{AMS} (rad/s)	k _{AMS} (N/m)	m _{AMS} (kg)	C _{AMS} (N.s/m)
A11	3	2,56	45.034,7	0,10	0,004	0,82	16,08	13,19	326.420,77	1876,45	197,99
								13,19	261.136,62	1501,16	158,39
								13,19	195.852,46	1125,87	118,79
A12	3	9,35	45.034,7	0,10	0,004	0,82	16,08	48,17	4.354.327,38	1876,446	723,13
								48,17	3.483.461,90	1501,157	578,51
								48,17	2.612.596,43	1125,868	433,88

As respostas máximas estão indicadas na Tabela 7.14 e nota-se que para três amortecedores o melhor desempenho também ocorre quando estes são sintonizados na frequência do 1^o modo.

Tabela 7.14 – Respostas e reduções obtidas nos Modelos A5 e A6

Modelo	Nó	Sem amortecimento	Com amortecimento	Redução Δ %	
A11	386	U _z (mm)	0,712	0,6856	3,708
		A _z (m/s ²)	0,6214	0,5944	4,345
	396	U _z (mm)	0,760	0,7559	0,539
		A _z (m/s ²)	0,674	0,6730	0,148
	472	U _z (mm)	0,790	0,7869	0,392
		A _z (m/s ²)	0,669	0,6687	0,045
A12	386	U _z (mm)	0,712	0,7486	-4,691
		A _z (m/s ²)	0,6214	0,4411	-7,354
	396	U _z (mm)	0,760	0,7454	1,500
		A _z (m/s ²)	0,674	0,6671	34,555
	472	U _z (mm)	0,790	0,7762	1,747
		A _z (m/s ²)	0,669	0,6622	1,016

Para as propostas com 3 AMS, a melhor redução obtida foi de U_z = 5,858% e A_z = 34,555%. Para 2 AMS, o melhor resultado foi de U_z = 7,580% e A_z = 32,797% e para 1 AMS o melhor resultado foi de U_z = 10,449% e A_z = 29,578%.

Pelos resultados, ficou evidente que a redução nos deslocamentos teve melhor desempenho quando o AMS foi sintonizado na frequência do 1° modo. Os melhores resultados obtidos na redução das acelerações foram aqueles em que α foi sintonizado na frequência do 4° modo, porém, nestes casos, havia aumento dos deslocamentos, conseqüência esta não desejada para a estrutura. Assim, considera-se como melhor solução a proposta de controle do Modelo A1, com somente um único amortecedor sintonizado na frequência do 1° modo.

Comparando os resultados das propostas de controle de Lima (2007) com deste estudo final, é apresentada a Tabela 7.15 com os melhores resultados dos dois estudos.

Tabela 7.15 – Comparativo dos resultados da proposta de Lima (2007) com o presente estudo

PROPOSTAS	N° AMS	Nó	Uz (mm) Δ (%)	Az (m/s²) Δ (%)
Presente Estudo (Modelo A1)	01	386	10,449	12,955
Proposta de Lima (2007)	06	396	- 8,421	23,887

A tabela mostra que este trabalho obteve melhor redução nos deslocamentos, comparando com o trabalho de Lima (2007), cuja proposta de controle aumentava os deslocamentos e não os reduzia. Com relação às acelerações, a proposta de Lima (2007) garantiu melhor desempenho, porém, essa melhora não representa compensação da proposta uma vez que acarretaria aumento nos deslocamentos e, portanto, maior risco estrutural.

Desta forma, verifica-se uma evolução no desempenho do AMS para este caso prático de uma academia de ginástica estudado por Lima (2007), pois houve na recente proposta, redução tanto nos deslocamentos quanto na aceleração. Como foi comentado anteriormente, no estudo da laje da academia de ginástica Lima (2007) utilizou critérios de otimização de parâmetros para AMS que não foram deduzidos especificamente para lajes, desta forma, o uso dos parâmetros obtidos no presente trabalho permitiram uma melhora dos resultados, uma vez que este estudo paramétrico foi direcionado exclusivamente a lajes de concreto para edifícios.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo paramétrico de Amortecedores de Massa Sintonizados - AMS instalados em lajes de concreto tipo convencionais, utilizando a ferramenta computacional baseada no método dos elementos finitos ANSYS 10.0. A proposta foi analisar modelos de lajes com configurações de apoio diferenciadas e a partir da análise modal destes modelos, verificar se as lajes apresentavam frequências naturais baixas com valores próximos aos das frequências da atividade humana de pular e dançar.

Quatro modelos de laje foram adotados para realização do estudo paramétrico em que foram aplicados carregamentos harmônicos e carregamentos humanos. Para os quatro modelos iniciais, percebeu-se que a melhor posição para o AMS é próximo ao ponto de maior deslocamento U_z , para os dois casos de carregamento, mesmo usando mais de um amortecedor ou mesmo quando os pontos de maior deslocamento modal fossem em bordos livres.

A variação da razão de massa μ do AMS depende da análise estática da laje, de forma a não gerar flechas excessivas, pois quanto maior este parâmetro, melhor é o desempenho do amortecedor. Já o valor da taxa de amortecimento ξ , percebeu-se que quanto menor for o valor deste parâmetro, melhor o desempenho.

Foi observado no estudo paramétrico que as reduções dos deslocamentos utilizando o AMS para a laje submetida ao carregamento harmônico foram maiores (70 a 80% de redução) que as obtidas com o AMS para o carregamento humano (40 a 50% de redução) e que essa diferença pode ser atribuída ao tipo de carregamento aplicado.

O parâmetro que sofreu maior variação entre os quatro modelos de laje foi a razão de frequência α , não somente devido ao modelo de laje e suas configurações de apoio, mas também, pelo tipo de carregamento aplicado. Para o modelo de Laje 01, os valores mais indicados de α ficaram entre 0,90 e 1,00, tanto para o carregamento harmônico como para o carregamento humano. Para a Laje 02 o α mais indicado oscilava entre 1,00 e 1,10 para os dois tipos de carregamento. Na Laje 03 esse intervalo

foi entre 1,15 e 1,25 e na Laje 04, o comportamento da razão de frequência foi semelhante ao da Laje 01 por terem configurações de apoio semelhantes.

Feito esse estudo paramétrico, a outra parte do trabalho foi verificar a alteração do desempenho do AMS quando vigas e pilares fossem incorporados na estrutura. As reduções nos deslocamentos neste modelo de laje foram menores que as obtidas nos quatro modelos anteriores. Os valores mais indicados para a razão de frequência do amortecedor foram diferentes dos obtidos para a laje sem vigas e pilares, mesmo que para o mesmo carregamento, demonstrando que a incorporação das vigas e pilares alterou o desempenho dos amortecedores. Para a Laje 01, com 12x6m e sem vigas e pilares, a redução nos deslocamentos obtida para o carregamento humano foi da ordem de 45 %, enquanto que na Laje 05, com 12x6m, com vigas e pilares, a redução nos deslocamentos obtida para o carregamento humano foi da ordem de 12%.

Ainda sobre o estudo do modelo de laje com vigas e pilares, foi realizado breve estudo paramétrico para verificar o comportamento da razão de frequência α , razão de massa μ e taxa de amortecimento ξ , e novamente, o parâmetro que apresentou maior diferença com relação aos estudos dos quatro modelos iniciais foi a razão de frequência. Se para a Laje 01, sem vigas e pilares, o α mais indicado foi 0,98, para a Laje 05, com vigas e pilares, o valor de α com melhor desempenho foi 0,82.

A partir do estudo paramétrico tentou-se obter melhoria no controle estrutural do modelo numérico da laje de uma academia de ginástica estudado por Lima (2007). Neste referido estudo que buscou como proposta de controle o uso do AMS, os amortecedores foram sintonizados a partir dos critérios de otimização de Den Hartog e Jangid. Foi obtido como melhor resultado uma proposta com 6 amortecedores instalados e uma redução nas acelerações de 23,887%, porém, os deslocamentos medidos neste mesmo nó tiveram aumento de 8,421%.

Utilizando o mesmo modelo numérico de laje e o mesmo carregamento aplicado por Lima (2007), utilizaram-se os parâmetros obtidos neste estudo para sintonizar os AMS. Propostas com um, dois e três AMS foram realizadas na tentativa de se obter melhores resultados na resposta dinâmica. A melhor alternativa obtida foi para o Modelo A1 com 10,449% de redução do deslocamento e 12,995% de redução na aceleração.

Percebe-se melhoria no desempenho do AMS comparando-se com os resultados de Lima (2007). O uso dos parâmetros obtidos neste estudo permitiu redução nos deslocamentos da laje enquanto que no outro, houve aumento dos deslocamentos. A redução nas acelerações não foram maiores que as obtidas por Lima (2007), porém, entende-se que o aumento dos deslocamentos representa risco estrutural. É importante destacar também que no presente estudo, a melhor proposta foi para somente um único amortecedor atuando na direção vertical enquanto que no outro, foram utilizados 6 amortecedores atuando na direção vertical e horizontal.

Entende-se que o presente estudo mostrou que os parâmetros que influenciam no desempenho dos amortecedores, para o caso específico de lajes de edifícios, são bastante sensíveis ao tipo de carregamento aplicado. A razão de frequência α foi o parâmetro que mais sofreu variação com relação ao tipo de carregamento e modelo de laje. A posição do AMS também foi um fator determinante para o bom desempenho dos amortecedores. Os parâmetros obtidos neste estudo permitiram direcionar uma proposta de controle para um caso prático estudado anteriormente e com melhoria na redução das vibrações.

O estudo paramétrico realizado mostrou também a necessidade de um maior refinamento com relação ao caso de lajes em que existe interação com vigas e pilares. Percebeu-se também a necessidade de maior estudo dos parâmetros com relação à redução das acelerações, pois como estudo inicial, houve maior ênfase na redução dos deslocamentos. O estudo mais detalhado das acelerações e a aplicação em outros casos práticos possibilitaria a melhoria do desempenho e dos parâmetros obtidos para AMS instalados em laje de edifícios.

8.2 SUGESTÕES

São apresentadas algumas sugestões para continuação deste estudo:

- Realização de estudo mais refinado de modelos de lajes com interação de vigas e pilares e a influência no desempenho do AMS.
- Realização de novas simulações em outros modelos de laje para verificar a variação das acelerações com o uso do AMS.

- Realização de programas experimentais para verificação do comportamento dos amortecedores, em lajes isoladas construídas em laboratório.
- Realização de programas experimentais, medindo a resposta dinâmica em estruturas reais, realizando ainda a instalação de AMS nestas estruturas, afim de realizar um estudo real.
- Utilização de métodos de otimização numéricos para encontrar o conjunto de parâmetros ótimos para o desempenho de AMS em lajes de edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. *Revision 5.4, ANSYS User's Manual, EUA, 1995.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.*

AVILA, S. M. *Controle Híbrido para Atenuação de Vibrações em Edifícios. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2002.*

BACHMANN, H., AMMANN, W. *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines. Zurich. IBASE, 176p, 1987.*

BALTAR, A. C. *Vibrações Induzidas por Atividades Humanas em Passarelas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2000.*

BATTISTA, R. C., VARELA, W. D. *Medidas Corretivas para Vibrações de Painéis Contínuos de Lajes de Edifícios. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasil, 2002.*

BROWNJOHN, J.M.W. , MIDDLETON, C.J. *Procedures for Vibration Serviceability Assessment of High-Frequency Floors. Engineering Structures, 2007, doi:10.1016/j.engstruct.2007.10.006.*

BROWNJOHN, J.M.W. , PAVIC A. *Experimental methods for estimating modal mass in footbridges using human-induced dynamic excitation . Engineering Structures, 2007, doi:10.1016/j.engstruct.2007.01.025.*

DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. I.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A.; MITH, R. M. R.; WILLFORD, M. *The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer, Vol. 79/Nº22. 20 November 2001.*

CARNEIRO, R. B. *Controle de Vibrações em Edifícios Altos Utilizando Amortecedor de Massa Sintonizado Múltiplo (AMSM). Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2004.*

CEB. *Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines. Bulletin D'Information N°209. Comité European du Béton, Zurich, 1991.*

EBRAHIMPUR, A., SACK, R. L. *A Review of Vibration Serviceability Criteria for Floor Structures. Computers & Structures 83, pp. 2488-2494, August, 2005.*

FAISCA, R. G. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2003*

GOMES, D. H. M. *Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2006.*

LIMA D.V.F. *Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasil, 2007.*

SETAREH, M., HANSON, R.D. *Tuned Mass Dampers to Control Floor Vibration from Humans. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 118, pp. 741-762, March,1992.*

SETAREH, M., RITCHEY, J.K., BAXTER A.J., MURRAY, T.M. *Pendulum Tuned Mass Dampers for Floor Vibration Control. Journal of Performance Of Constructed Facilities. ASCE, Vol 20, No.1 .February 2006.*

SETAREH, M., RITCHEY, J.K., MURRAY, T.M., KOO, J.H., AHMADIAN, M. *Semiactive Tuned Mass Dampers for Floor Vibration Control. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 133, pp. 242-250, February,2007.*

SOONG, T. T., DARGUSH, G. F. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.*

VARELA, W. D. *Modelo Teórico Experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando Sobre Lajes de Edifícios. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Brasil, 2004.*

WEBSTER, A. C. E VAICAJTIS, R. Application of Tuned Mass Dampers to Control Vibrations of Composite Floor System. AISC, *Engineering Journal*, 29(3), pp. 116-124.

WHEELER, J. E. *Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges. ASCE, Journal of the Structural Division. Vol. 108, n.º ST9, pp. 2045-2065,1982.*

ZIVANOVIC, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P. *Vibration Serviceability of Footbridges Under Human-Induced Excitation: A Literature Review. Journal of Sound and Vibration. Vol.279, pp. 1-74, 2005.*