

**PLATAFORMA DE ENSAIOS DINÂMICOS: CONTROLE
DE VIBRAÇÕES POR MEIO DE MATERIAIS
VISCOELÁSTICOS**

MARIANA MEDEIROS XIMENES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**PLATAFORMA DE ENSAIOS DINÂMICOS: CONTROLE
DE VIBRAÇÕES POR MEIO DE MATERIAIS
VISCOELÁSTICOS**

MARIANA MEDEIROS XIMENES

ORIENTADORA: GRACIELA NORA DOZ DE CARVALHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM – 019A/18

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2018

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

**PLATAFORMA DE ENSAIOS DINÂMICOS: CONTROLE DE
VIBRAÇÕES POR MEIO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS**

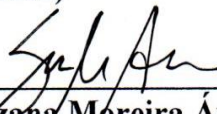
MARIANA MEDEIROS XIMENES

**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:



**Prof^a Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing (ENC-UnB)
(Orientadora)**



**Prof^a. Suzana Moreira Ávila, Dr. (FGA - UnB)
(Examinadora Interna)**



**Prof^a. Maria Alzira A. Nunes, Dr. (FGA-UnB)
(Examinadora Externa)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE AGOSTO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

XIMENES, MARIANA MEDEIROS

Plataforma de ensaios dinâmicos: controle de vibrações por meio de materiais viscoelásticos [Distrito Federal] 2018.

xvi, 107p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Controle estrutural

2. Vibrações

3. Materiais viscoelásticos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

XIMENES, M. M. (2018). Plataforma de ensaios dinâmicos: controle de vibrações por meio de materiais viscoelásticos. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-19A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Mariana Medeiros Ximenes.

TÍTULO: Plataforma de ensaios dinâmicos: controle de vibrações por meio de materiais viscoelásticos.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É 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 dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Mariana Medeiros Ximenes

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força e por nunca me desamparar nos momentos difíceis.

À minha orientadora Graciela Nora Doz, pela paciência, compreensão, apoio e ideias durante o desenvolvimento desta pesquisa. A confiança que teve em mim foi de fundamental importância para concretização deste sonho. Obrigada por todos os ensinamentos e por acreditar em mim.

À Universidade de Brasília (UnB) e ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) por me proporcionarem a oportunidade de ampliar meus conhecimentos técnicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

À minha família e ao meu noivo pelo carinho, preocupação, paciência e incentivo.

Ao José Leopoldino e a sua sobrinha Camila por toda assistência e preocupação que tiveram comigo por todo o tempo que passei em Brasília, vocês com certeza foram muito importante nessa minha jornada.

Aos meus amigos de mestrado, em especial Carlos, Davidson, Stephanie, Vanessa e Bryan, as meninas do apartamento (Pollyane, Michele e Luciane), pelos momentos divididos, pelo amparo e pelo apoio que recebi em todo esse período. Certamente, sem vocês a caminhada teria sido muito mais difícil e árdua.

E a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

Dedicado esta dissertação à
minha família, ao meu noivo e ao
meu filho.

RESUMO

PLATAFORMA DE ENSAIOS DINÂMICOS: CONTROLE DE VIBRAÇÕES POR MEIO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Autor: Mariana Medeiros Ximenes

Orientadora: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, agosto de 2018

O avanço da tecnologia e os diversos estudos sobre os novos materiais utilizados na construção civil possibilitaram a construção de estruturas mais leves, esbeltas, menos rígidas e com menos amortecimento. Com isso, as estruturas têm apresentado frequências naturais cada vez mais baixas, devido à maior flexibilidade da estrutura, ficando mais próximas da faixa de frequência do carregamento induzido por atividades humanas. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo estudar, através de análises numéricas com auxílio do *software* Ansys, um sistema de controle estrutural baseado no uso de materiais viscoelásticos, na configuração de estrutura sanduíche, em lajes de piso submetidas a carregamento oriundo de atividades dinâmicas como pular. A estrutura analisada numericamente foi uma plataforma de ensaios dinâmicos desenvolvida e ensaiada experimentalmente no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília. Esta plataforma apresenta, propositalmente, vibrações verticais excessivas quando é excitada com carregamentos provenientes de atividades humanas devido à sua reduzida rigidez à flexão. Primeiramente, foram realizados por Campuzano (2016), ensaios experimentais com atividades humanas com um Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS) acoplado nela. Esses ensaios foram realizados com a intenção de avaliar o desempenho do AMS. Neste trabalho foi utilizado um tipo de material viscoelástico, com diferentes espessuras, como alternativa para a redução das acelerações induzidas. Primeiramente a estrutura foi analisada sem controle e posteriormente com adição da camada do material viscoelástico de diferentes espessuras. Os resultados mostraram que o material viscoelástico utilizado é uma boa alternativa para redução das vibrações causadas por atividades humanas.

Palavras-chave: *Controle estrutural. Vibrações. Materiais viscoelásticos.*

ABSTRACT

DYNAMIC TEST PLATFORM: VIBRATION CONTROL BY VISCOELASTIC MATERIALS

Author: Mariana Medeiros Ximenes

Supervisor: Graciela Nora Doz de Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, August of 2018

The advancement of technology and the various studies on the new materials used in construction have made it possible to construct lighter, thinner, less rigid structures with less cushioning. Thus, the structures have presented lower and lower natural frequencies, due to the greater flexibility of the structure, being closer to the frequency range of the load induced by human activities. Therefore, the present work aims to study, through numerical analysis with the help of Ansys software, a structural control system based on the use of viscoelastic materials, in the configuration of sandwich structure, in floor slabs submitted to loading from activities dynamics such as skipping. The structure analyzed numerically was a platform of dynamic tests developed and tested experimentally in the laboratory of structures of the University of Brasília. This platform intentionally exhibits excessive vertical vibrations when it is excited with loading from human activities because of its low flexural stiffness. Firstly, experiments with human activities were carried out by Campuzano (2016) with a Tuned Mass Damper (AMS) coupled to it. These tests were performed with the intention of evaluating the performance of AMS. In this work, a type of viscoelastic material with different thicknesses was used as an alternative for the reduction of the induced accelerations. First the structure was analyzed without control and later with addition of the layer of viscoelastic material of different thicknesses. The results showed that the viscoelastic material used is a good alternative for the reduction of vibrations in the structure.

Keywords: *Structural control. Vibrations. Viscoelastic materials.*

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 - JUSTIFICATIVA	19
1.2 - OBJETIVOS	21
1.3 - METODOLOGIA DO TRABALHO	21
1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
2.2 - VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ATIVIDADES HUMANAS EM PISOS ...	24
2.3 - CARREGAMENTO DEVIDO À ATIVIDADE HUMANA	33
2.3.1 - Atividade humana de caminhar e correr	33
2.3.2 - Atividade humana de pular	36
2.4 - CONTROLE ESTRUTURAL	39
2.4.1 - Controle Passivo	39
2.4.1.1- Amortecedor de massa sintonizado	43
2.4.2 - Controle Ativo	43
2.4.3 - Controle Semi-Ativo	44
2.4.4 - Controle Híbrido	44
3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	46
3.1 - CARREGAMENTO DEVIDO À ATIVIDADE HUMANA DE PULAR	46
3.2 - MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	47
3.3 - MODELOS VISCOELÁSTICOS	47
3.3.1 - Modelo de Maxwell.....	48
3.3.2 - Modelo de Voigt	48
3.3.3 - Modelo Linear Padrão	49
3.4 - CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	50
3.5 - APLICAÇÕES DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS COMO AMORTECEDORES ESTRUTURAIS.....	55

4 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL	59
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
4.2 - ELEMENTOS USADOS NA SIMULAÇÃO	60
4.2.1 - Elemento SHELL63	60
4.2.2 - Elemento BEAM4	61
4.2.3 - Elemento SHELL181	61
5 - ANÁLISES NUMÉRICAS	63
5.1 - ESTRUTURA ANALISADA	64
5.2 - MODELAGEM NUMÉRICA	67
5.3 - VALIDAÇÃO DA ANÁLISE COM MATERIAL VISCOELÁSTICO	70
5.4 - ANÁLISE MODAL	71
5.5 - ANÁLISE ESTÁTICA	74
5.6 - APLICAÇÃO DA CARGA NO ANSYS	75
5.7 - CARREGAMENTO HARMÔNICO	77
5.7.1 - Carregamento harmônico produzido por uma pessoa no centro da laje.....	77
5.7.2 - Carregamento harmônico produzido por três pessoas no centro da laje.....	80
5.7.3 - Carregamento harmônico produzido por cinco pessoas no centro da laje.....	82
5.8 - CARREGAMENTO HUMANO	84
5.8.1 – Pulo contínuo produzido por uma pessoa no centro da laje	86
5.8.2 - Pulo contínuo produzido por três pessoas no centro da laje	90
5.8.3 - Pulo contínuo produzido por cinco pessoas no centro da laje.....	93
5.9 - CARGA DE IMPACTO.....	95
5.9.1 - Impacto produzido por uma pessoa no centro da laje	95
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	100
6.1 - CONCLUSÕES	100
6.2 - SUGESTÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Atividades realizada por Campuzano (2016), Abeysingh et al. (2013) e atividades realizadas neste trabalho.....	64
Tabela 5.2 - Propriedades dos materiais usados na modelagem numérica.....	69
Tabela 5.3 - Propriedades dos materiais utilizados na análise da viga de Dhoble e Barjibhe (2016).....	70
Tabela 5.4 - Comparação dos resultados obtidos por Dhoble e Barjibhe (2016) com os obtidos neste trabalho.....	70
Tabela 5.5 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos da análise modal realizada na plataforma.....	73
Tabela 5.6 - Resultados das três primeiras frequências da plataforma com adição da camada de MVE..	74
Tabela 5.7 - Resultado da análise estática da plataforma sem e com a camada de MVE com as diferentes espessuras adotadas..	74
Tabela 5.8 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento harmônico..	79
Tabela 5.9 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com três pessoas realizando movimento harmônico.....	82
Tabela 5.10 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com cinco pessoas realizando movimento harmônico.....	84
Tabela 5.11 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento de pular.	88
Tabela 5.12 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com três pessoas realizando movimento de pular.....	92
Tabela 5.13 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com cinco pessoas realizando movimento de pular.....	95
Tabela 5.14 - Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento de impacto.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ponte Millennium Bridge, Londres.	19
Figura 1.2 - Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte/EUA	20
Figura 2.1 - Estrutura usada nos ensaios experimentais de Faisca	26
Figura 2.2 - Reticulado espacial composto.....	27
Figura 2.3 - Modelos desenvolvidos por Santos.....	29
Figura 2.4 - Piso híbrido composto	30
Figura 2.5 - Torre de Vigia Olímpica de Beijing: (a) perfil; (b) plataformas de turismo no topo da torre.....	32
Figura 2.6 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal	34
Figura 2.7 - Funções típicas de força de corrida e caminhada	38
Figura 2.8 -Função de força vertical típicos para diferentes tipos de atividades humanas .	38
Figura 2.9 - Movimentos do corpo durante um salto.....	37
Figura 2.10 - Gráfico da resposta da aceleração de um corpo durante os movimentos de salto.....	38
Figura 2.11 - Gráfico da resposta da força exercida por um corpo durante os movimentos de salto.....	38
Figura 2.12 - Representação da estrutura do pavimento sanduíche	40
Figura 2.13 - Amortecedor viscoelástico acoplado à viga	41
Figura 2.14 - AMS construído por Campuzano em sua forma final	42
Figura 2.15 - Hotel “Marina Bay Sands, Singapura”	43
Figura 3.1 - Fator de impacto k_p versus t_p/T_p	47
Figura 3.2 - Modelo de Maxwell.....	48
Figura 3.3 - Modelo de Voigt	48
Figura 3.4 - Modelo Linear Padrão	49
Figura 3.5 - Representação de um típico amortecedor estrutural viscoelástico	50
Figura 3.6 - Amortecedor viscoelástico tipo viga sanduíche.....	50
Figura 3.7 - Diferentes configurações para amortecedores viscoelásticos: (a) simples camada de MVE, (b) com camada de restrição, e (c) duplo sanduíche.....	51
Figura 3.8 - Variação de G' e η com a temperatura	53
Figura 3.9 - Variação de G' e η com a frequência.....	54
Figura 3.10 - Foto panorâmica mostrando ao fundo as duas torres do WTC antes de serem destruídas pelo atentado terrorista de 11 de Setembro de 2001.....	55

Figura 3.11 - (a) Amortecedor típico do WTC, com (b) detalhe de sua instalação.....	56
Figura 3.12 - Vista do Columbia SeaFirst, em Seattle, EUA	56
Figura 3.13 - Detalhe do amortecedor viscoelástico usado no Columbia SeaFirst, em Seattle, EUA	57
Figura 3.14 - (a) Vista do Two Union Square, em Washington, EUA; (b) detalhe dos amortecedores instalados	57
Figura 3.15 - Detalhe do tabuleiro metálico do vão central da Ponte Rio-Niterói	58
Figura 4.1 - Elemento SHELL63.....	60
Figura 4.2 - Elemento BEAM4.....	61
Figura 4.3 - Elemento SHELL181	62
Figura 5.1 - Plataforma de ensaios dinâmicos	65
Figura 5.2 - Dimensões da plataforma de ensaios dinâmicos.....	66
Figura 5.3 - Plataforma de ensaios dinâmicos antes da recuperação, com flecha estática de 35 mm	66
Figura 5.4 - Trincas na laje que foram preenchidas com graute epóxi fluido	67
Figura 5.5 - Mapeamento das trincas da laje no modelo numérico.....	68
Figura 5.6 - Plataforma com a camada de material viscoelástico	69
Figura 5.7 - Primeira forma modal numérica da laje de concreto da plataforma. Frequência= 3,365 Hz.....	72
Figura 5.8 - Segunda forma modal numérica da laje de concreto da plataforma. Frequência= 15,34 Hz.....	72
Figura 5.9 - Terceira forma modal numérica da laje de concreto da plataforma. Frequência= 22,90 Hz.....	73
Figura 5.10 - Ponto de aplicação da carga para uma pessoa no centro da laje	75
Figura 5.11 - Pontos de aplicação da carga para três pessoas distribuídas no centro da laje.....	76
Figura 5.12 - Pontos de aplicação da carga para cinco pessoas distribuídas no centro da laje.....	76
Figura 5.13 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	78
Figura 5.14 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.	78

Figura 5.15 - Resposta em função da frequência. Carga harmônica produzida por uma pessoa no centro da plataforma.....	80
Figura 5.16 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	81
Figura 5.17 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	82
Figura 5.18 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	83
Figura 5.19 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	83
Figura 5.20 - Gráfico da função do carregamento usado para simular o pulo.	86
Figura 5.21 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	87
Figura 5.22 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	87
Figura 5.23 - Resposta em função da frequência. Pulo produzido por uma pessoa no centro da plataforma..	88
Figura 5.24 - Resposta no domínio do tempo em função da aceleração para uma pessoa pulando continuamente. Vibração forçada	89
Figura 5.25 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.	91
Figura 5.26 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.....	91
Figura 5.27 - Resposta no domínio do tempo para três pessoas pulando continuamente. Vibração forçada.....	92
Figura 5.28 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.	94
Figura 5.29 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos..	94
Figura 5.30 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central - Impacto seguido de vibração livre. Comparação de todos os resultados obtidos.	96

Figura 5.31 - Histórico de acelerações verticais – Nó central - Impacto seguido de vibração livre. Comparação de todos os resultados obtidos.....	96
Figura 5.32 - Resposta em função da frequência. Impacto de uma pessoa no centro da plataforma.....	97
Figura 5.33 - Análise no domínio do tempo em função do deslocamento. Impacto seguido de vibração livre	98
Figura 5.34 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Impacto seguido de vibração livre	98

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AISC	- Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series
m	- metro
%	- porcentagem
AMS	- amortecedor de massa sintonizado
MVE	Material viscoelástico
μ	- razão de massa
ξ	- taxa de amortecimento
AMSM	- amortecedor de massa sintonizado múltiplo
Hz	- hertz
cm	- centímetro
M	- matriz de massa
C	- matriz de amortecimento
K	- matriz de rigidez
F(t)	- força externa
$\ddot{x}(t)$	- vetor de aceleração
$\dot{x}(t)$	- vetor de velocidade
x(t)	- vetor de deslocamento
sin	- seno
θ	- ângulo de fase
$\bar{\omega}$	- frequência circular
p ₀	- carga genérica
[ϕ]	- matriz das configurações modais
{ ϕ } ^T	- a transposta da matriz modal
M _n	- matriz de massa dos n modos
K _n	- matriz de rigidez dos n modos
C _n	- matriz de amortecimento dos n modos
P _n (t)	- força externa dos n modos
F _p (t)	- carga dinâmica
k _p	- fator de impacto dinâmico
G	- peso do indivíduo
t	- tempo

t_p	- duração do contato
T_p	- período do passo
f_s	- razão de passo ou frequência
M	- massa do sistema principal
C	- amortecimento do sistema principal
K	- rigidez do sistema principal
m	- massa do amortecedor
c	- amortecimento do amortecedor
k	- rigidez do amortecedor
$\ddot{y}(t)$	- aceleração do sistema principal
$\dot{y}(t)$	- velocidade do sistema principal
$y(t)$	- deslocamento do sistema principal
$z(t)$	- deslocamento do amortecedor
$\alpha_{\text{ótimo}}$	- relação ótima de frequência
D_{est}	- deslocamento estático
ξ_a	- amortecimento ótimo
Ω_a	- frequência de excitação do amortecedor
Ω_p	- frequência de excitação do sistema principal
G'	- módulo de armazenamento transversal
G''	- módulo de perda transversal
η	- fator de perda
E'	- módulo de armazenamento longitudinal
E''	- módulo de perda longitudinal
ν	- coeficiente de Poisson
MPa	- megapascal
GPa	- gigapascal
mm	- milímetro
kg	- quilograma
m^3	- metro cúbico
s^2	- segundo ao quadrado

1 – INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e os diversos estudos sobre os novos materiais utilizados na construção civil possibilitaram a construção de estruturas mais leves, esbeltas, menos rígidas e com menos amortecimento. Com isso, essas estruturas têm apresentado frequências naturais cada vez mais baixas, devido à maior flexibilidade da estrutura, ficando mais próximas da faixa de frequências das atividades humanas. Quando a frequência da estrutura coincide com a frequência de excitação ocorre o fenômeno conhecido como ressonância, onde a amplificação das vibrações da estrutura é tão grande que leva ao colapso estrutural.

Os sistemas estruturais de pisos tornaram-se vulneráveis aos efeitos de vibrações excessivas devido à tendência de construção mais leves e com grandes vãos. Isso faz com que tais estruturas se tornem, portanto, mais susceptíveis a sofrer vibrações excessivas pelo simples caminhar de pessoas, ou por atividades desenvolvidas por elas, como corrida, pulo e dança.

Muitas fontes de excitação podem gerar vibrações excessivas em pisos leves e causar desconforto aos usuários. Exemplos típicos dessas fontes de vibração são o tráfego de veículos pesados em estradas vizinhas, a grande maquinaria em locais de construção vizinhos, equipamentos instalados em edifícios e atividades humanas, como andar, correr e pular. Entre essas fontes de vibração, as produzidas pelas atividades humanas são as mais comuns (Varela e Batista, 2011).

Segundo Harris (1988) *apud* Campuzano (2016), os usuários podem sofrer alterações das funções fisiológicas nos casos em que ocorrem vibrações mais fortes, como, por exemplo, aumento da frequência cardíaca, alterações neuromusculares, alterações cardiovasculares, respiratórias, endócrinas e metabólicas, alterações sensoriais e do sistema nervoso central, também se pode ter o risco de problemas na espinha dorsal.

Varela e Batista (2011) estudaram as vibrações excessivas induzidas por atividades humanas, especialmente aquelas produzidas pelo caminhar aleatório de pessoas, em uma plataforma.

Gaspar (2013) estudou dois tipos de sistemas estruturais de piso: um sistema de piso misto e, outro, de concreto armado, ambos sofriam vibrações excessivas, devido a atividades humanas rítmicas, com picos de aceleração que violavam os critérios de projeto.

Com o crescente número de estruturas que sofreram e ainda sofrem com problemas de vibrações excessivas induzidas por atividades humanas, inúmeros estudos têm sido desenvolvidos nesta área (Ebrahimpour e Sack, 2005; Casado *et al.*, 2011; Saidi *et al.*, 2011; Abeysingh *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017), inclusive no Brasil (Santos, 2009; Campista, 2015; Campuzano, 2016; Ruiz, 2016).

Para corrigir o problema das vibrações excessivas, até meados dos anos 60, os engenheiros viam como solução apenas o enrijecimento estrutural, como por exemplo, a inclusão de pilares intermediários ou reforço estrutural das vigas. No entanto, em 1966 o controle estrutural surgiu como uma alternativa tendo como marco os estudos de Lenzen (1966), que analisou diversas lajes de pisos de prédios residenciais e comerciais, constituídas por estruturas mistas de aço e concreto (Faria, 1996).

O controle estrutural visa reduzir o nível de vibração de uma estrutura modificando as suas propriedades tais como rigidez e amortecimento, seja pela adição de dispositivos externos, seja pela adição de forças externas, e pode ser classificado em passivo, ativo, semi-ativo e híbrido.

Dentre os sistemas de controle passivo, alguns materiais surgem como uma forte alternativa para correção de problemas de vibrações excessivas, como é o caso daqueles que possuem grandes propriedades amortecedoras, como os materiais viscoelásticos (MVE). Um dos primeiros casos de utilização desses materiais em edificações foi nas torres do World Trade Center em Nova York nos Estados Unidos, em 1969 (Barbosa, 2000).

Saidi *et al.* (2011) analisaram o uso de um sistema de controle baseado em amortecedores viscoelásticos (AVE) para atenuação de vibrações excessivas em pisos.

Abeyasingh *et al*, (2013) também estudaram um sistema de controle usando um MVE em pisos submetidos a carregamento gerado por atividade humana.

Este trabalho se insere na mesma linha de pesquisa, tendo como foco uma avaliação do desempenho dos MVE usados como amortecedores de vibrações causadas por atividades humanas como pular em estruturas de lajes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Ao realizar movimentos rítmicos como caminhar, correr, pular e dançar as pessoas podem induzir fortes vibrações em pisos leves acarretando vários problemas (Campuzano, 2016).

Dentre as várias estruturas afetadas por vibrações excessivas causadas por movimentos de pessoas, podem se mencionar algumas como as relatadas a seguir.

A passarela Millennium Footbridge (Figura 1.1), localizada em Londres, oficialmente conhecida como a Passarela do Milênio de Londres, foi interditada logo após a sua inauguração, em junho de 2000, devido à apresentação de fortes vibrações laterais, só sendo liberada após a instalação de sistemas passivos de vibrações.



Figura 1.1 - Passarela Millenium, Londres, Inglaterra (Pereira, 2017).

A passarela na Carolina do Norte (Figura 1.2), localizada nos Estados Unidos, que desabou devido ao carregamento produzido por uma multidão que saía de um evento esportivo, em maio de 2000. Além da carga dinâmica gerada pelas pessoas, a estrutura tinha problemas de corrosão. Esse acidente deixou mais de 100 pessoas feridas.



Figura 1.2 - Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte/EUA (BBC News *apud* Faisca, 2003).

No Brasil pode-se citar o caso do Estádio do Maracanã, que apresentou problemas de vibração em estado de serviço devido às ações das grandes torcidas pulando em sincronismo. Segundo Rodrigues (2003) houve uma interdição no Estádio do Castelão em Fortaleza, em 2000, devida as constantes reclamações dos usuários em relação às vibrações nas arquibancadas.

Há também casos em que ocorre alteração da utilização inicial da edificação. Exemplo disso é a utilização de edifícios comerciais para funcionamento de academias de ginástica, como é o caso da estrutura estudada por Lima (2007).

Diante dos problemas que vem ocorrendo nas estruturas devido a carregamentos dinâmicos fica clara a importância do estudo do controle estrutural, uma vez que casos como os relatados acima estão cada vez mais propensos a acontecer devido às estruturas se apresentarem mais leves e flexíveis.

1.2 – OBJETIVOS

Com base no exposto, esta dissertação tem como objetivo geral estudar, através de análises numéricas, o desempenho de um sistema de controle estrutural baseado no uso de materiais viscoelásticos adicionado a uma plataforma de ensaios dinâmicos submetida a carregamentos dinâmicos induzidos por pessoas.

Para alcançar este objetivo geral são estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Determinar, através de análises numéricas, as características dinâmicas (frequências naturais e modos de vibração) da plataforma estudada;
- Analisar numericamente a plataforma, excitada com carregamentos oriundos de atividades de pessoas, sem controle estrutural;
- Analisar numericamente a plataforma, excitada com carregamentos oriundos de atividades de pessoas, com adição de MVE.

1.3 – METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia utilizada neste trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica detalhada dos diferentes problemas de vibrações excessivas apresentados em estruturas, os quais são gerados por pessoas em atividades rítmicas, bem como os sistemas de controle usados como solução. Também é feito um estudo da aplicação de MVE como amortecedores estruturais, suas propriedades e características.

Uma vez feita a revisão bibliográfica, o passo seguinte é estudar a estrutura a ser analisada numericamente, que é uma plataforma de ensaios dinâmicos que se encontra localizada no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília (UnB). Essa plataforma foi construída e ensaiada experimentalmente por Campuzano (2016).

Após o estudo sobre a plataforma analisada são feitas análises numéricas. Essas análises são realizadas no *software* ANSYS e se iniciam com a análise modal para obtenção das frequências naturais e modos de vibração da plataforma. Os resultados obtidos numericamente, neste trabalho, são comparados com os resultados experimentais obtidos por Campuzano (2016), a fim de validar o modelo.

Posteriormente à validação do modelo numérico, são feitas análises transientes para conhecer o comportamento da estrutura no domínio do tempo frente a um carregamento dinâmico. São realizadas três séries de análises no domínio do tempo de acordo com o tipo de carregamento: a primeira é realizada com carregamento harmônico de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma, a segunda é com carregamento que simula o pulso contínuo de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma e a terceira é com carga de impacto, apenas de uma pessoa no centro. O carregamento que simula o impacto é aplicado durante um segundo e o que simula o pulso contínuo é aplicado durante dez segundos e obtidas as respostas até que se completasse 50 segundos de análise.

Para cada uma dessas séries, primeiramente, são realizadas as análises sem controle, somente com a estrutura original e, posteriormente, as mesmas análises são feitas com adição de camadas de material viscoelástico de diferentes espessuras. Os resultados obtidos são comparados entre si e comparados com os resultados obtidos por Campuzano (2016), que utilizou o amortecedor de massa sintonizado.

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de sete capítulos, sendo a introdução o primeiro deles, onde é abordada a visão geral do problema, destacando a importância da pesquisa, bem como os seus objetivos.

O segundo capítulo refere-se à revisão bibliográfica. Nele é apresentado o problema de vibração induzida em estruturas por atividades humanas que, em muitos casos, se torna excessiva, causando problemas como o desconforto aos usuários. Nesse capítulo também são apresentadas os tipos de controle estrutural.

No terceiro capítulo encontra-se a fundamentação teórica onde é apresentado o modelo matemático de carregamento devido à atividade humana utilizado nas análises numéricas e a descrição dos materiais viscoelásticos, tais como os modelos capazes de descrever o comportamento, as características e propriedades dos MVE, bem como as aplicações como amortecedores de vibrações.

No quinto capítulo é apresentada a ferramenta computacional utilizada para a realização das análises deste trabalho, sendo o programa Ansys utilizado para a modelagem da estrutura e análises modal e dinâmica.

O sexto capítulo trata da análise numérica da estrutura. São descritas as características físicas da estrutura, a modelagem numérica, a análise modal e as análises transientes da estrutura não-amortecida e com adição da camada de material viscoelástico submetida a carregamentos oriundos da atividade humana.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões de futuros trabalhos que podem ser elaborados para o aprofundamento deste tema.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As vibrações induzidas por atividades humanas como andar, pular, dançar, dentre outras atividades físicas têm sido cada vez mais frequentes em pisos de edificações. Segundo Lima (2013), vários estudos vêm sendo realizados no Brasil e no mundo com o objetivo de se entender como e por que ocorrem as vibrações excessivas, induzidas por carregamentos humanos em estruturas, para saber como evitá-las e/ou minimizá-las.

Diversos estudos sobre controle estrutural estão sendo desenvolvidos na busca de solução para os problemas em estruturas advindos de ações de natureza dinâmica. Dentre os tipos de controle existente, o controle passivo que faz uso de materiais especiais com grande capacidade amortecedora, como os materiais viscoelásticos, surge como alternativa na correção de problemas de vibrações excessivas.

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos trabalhos realizados por diversos autores sobre vibrações induzidas por atividades humanas bem como os tipos de controle estrutural usados para amenizar essas vibrações.

2.2 – VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ATIVIDADES HUMANAS EM PISOS

Os carregamentos dinâmicos que podem induzir vibrações em estruturas podem ser de várias origens. Dentre elas, o vento, correnteza, sismos, máquinas em funcionamento e atividades humanas. Como o presente trabalho trata do estudo de vibrações induzidas por carregamentos humanos, o enfoque será dado para este tipo de carregamento.

Bachmann (1992) realizou estudos em estruturas submetidas à ação dinâmica devida atividades humanas como passarelas, ginásios, salões de esportes, salas de dança, salas de concerto sem e com assentos fixos verificando a ocorrência de vibrações excessivas. Além disso, realizou estudos de como evitar que essas vibrações excessivas ocorressem nessas estruturas. Ele concluiu que manter as frequências dos modos estruturais dominantes de

vibração longe da faixa de frequências dos harmônicos críticos das atividades humanas era uma contramedida útil, assim como a instalação de amortecedores de massa sintonizada.

Murray, Allen e Ungar (1997) desenvolveram o guia do AISC (Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series), que oferece subsídios aos engenheiros estruturais, pois fornece princípios básicos e ferramentas analíticas simples para avaliar sistemas de piso de aço e passarelas. Esse guia estabelece limites de conforto humano em estruturas submetidas a atividades de caminhar e atividades rítmicas como: aeróbica, dança, participação de público e eventos similares. Cálculos analíticos são apresentados e importantes recomendações são dadas de modo a avaliar e minimizar o nível de vibrações.

Brownjohn (2001) realizou estudos levando em consideração a interação homem-estrutura. Para isso ele realizou ensaios em uma plataforma de 7 m de comprimento por 1 m de largura e 75 mm de espessura que foi simplesmente suportada a 0,5 m de cada extremidade. Uma sequência de experimentos foi feita usando como carregamento um sujeito sentado em uma cadeira de plástico, de pé ereto, com joelhos ligeiramente dobrados e joelhos muito dobrados. Com os resultados dos ensaios realizados ele pôde confirmar que o corpo humano atua dinamicamente com a estrutura de maneira a modificar as frequências dela, aumentando a capacidade de amortecimento.

Em sua tese Faisca (2003) realizou ensaios experimentais sobre uma estrutura com dimensões 12,20 m de comprimento por 2,20 m de largura (Figura 2.1) com o objetivo de descrever o carregamento dinâmico gerado por atividades humanas. Foi analisado o carregamento de multidão, situação característica de grandes estruturas, tais como passarelas, ginásios, estádios, entre outras. Também foi desenvolvido um estudo referente às atividades que envolvem ou não sincronismo (pular) e verificou variações no ritmo, por parte dos indivíduos participantes, os quais não conseguiam manter os movimentos, mostrando que a proximidade da frequência da atividade com uma das frequências naturais da estrutura pode contribuir para esta falta de ritmo.



Figura 2.1 – Estrutura usada nos ensaios experimentais de Faisca (2003).

Diante dos resultados dos ensaios em relação aos testes de multidão, Faisca (2003) observou que a soma dos carregamentos 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. Neste caso, pode-se concluir que até mesmo pequenas defasagens entre os indivíduos do grupo podem contribuir com a diminuição do carregamento atuante.

Varela (2004) apresenta uma nova descrição analítica sobre o caminhar humano levando em consideração o efeito do impacto do calcanhar. Ela realizou uma série de ensaios experimentais, em que mediu os efeitos de carregamentos humanos, em um protótipo de um reticulado espacial composto, Figura 2.2.

Nessa estrutura foram realizados vários ensaios experimentais que consistiam em uma ou várias pessoas andando aleatoriamente e com trajetórias determinadas. A partir dos resultados encontrados, Varela (2004) concluiu que passos mais largos, associados a maiores frequências dessa atividade, implicam em maior intensidade das forças de impacto produzidas pelos calcanhares e que isto independe do tipo de calçado usado, embora calçados com solado macio atenuem os impactos sobre o corpo humano quando se caminha sobre superfícies rígidas. Obviamente, passos mais curtos, associados a menores frequências dessa atividade, produzem menores forças de impacto dos calcanhares.



Figura 2.2 - Reticulado espacial composto (Varela, 2004).

Além disso, ele propôs um sistema de atenuação de vibração, que foi utilizado nos ensaios experimentais e desenvolveu um programa computacional que serve como ferramenta numérica para o projeto de novas estruturas e verificação, no estado limite de serviço, de estruturas existentes sob ação de caminhar de pessoas. Os resultados obtidos experimentalmente são comparados com as modelagens computacionais realizadas no programa desenvolvido por ele.

Ebrahimpour e Sack (2005) fizeram um levantamento do desenvolvimento histórico dos modelos representativos das cargas dinâmicas humanas, dos critérios de percepção utilizados nas vibrações estruturais de piso e das técnicas utilizadas para suavizar as vibrações induzidas pelo ser humano. Duas técnicas foram explicadas com mais detalhes, a saber: controle semiativo e controle passivo usando materiais avançados, como os MVE. Através das análises estudadas com os dois tipos de controle, eles concluíram que o controle semiativo é capaz de reduzir em até 70% a deflexão e reduzir, significativamente, a aceleração no sistema. Em relação ao controle passivo usando material compósito e camada de material viscoelástico restrita, concluíram que esses sistemas são apropriados para reduzir as vibrações excessivas em pisos. Ainda afirmaram que com aumento significativo no amortecimento estrutural geral e um ligeiro aumento na rigidez as vibrações excessivas induzidas pelos ocupantes são melhoradas.

Lima (2007) fez uma análise dinâmica da laje de um edifício comercial localizado na cidade de Brasília, construído para ser usado como edifício comercial e que posteriormente acabou sendo utilizado como academia de ginástica.

Ele avaliou a resposta da estrutura quando submetida ao carregamento oriundo das atividades humanas de pular e dançar, atividades típicas de academias de ginástica, e verificou se essas respostas estavam dentro dos limites aceitáveis de normas internacionais que estabelecem deslocamentos e acelerações em estruturas submetidas à vibração. Foi constatado que os níveis de vibração eram superiores aos recomendados pelos diferentes códigos e foi necessário o estudo de um mecanismo de controle capaz de reduzir as vibrações excessivas. Assim, foram elaboradas propostas de controle estrutural para atenuação das vibrações excessivas por meio da instalação de Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS) na estrutura. A partir da décima proposta, então, se conseguiu reduzir gradualmente as acelerações, até o ponto em que se atingisse um nível satisfatório de vibração, segundo a norma ISO 2631/1 e 2 (1980).

Santos (2009) estudou sistemas de controle de vibração em lajes utilizadas em geral em edifícios residenciais e comerciais que estariam sujeitas a carregamento dinâmico induzidos por atividades de pessoas e carregamento harmônico. Desenvolveu quatro modelos de lajes (Figura 2.3), de geometrias e configurações de apoio diferentes, todas caracterizadas pelas baixas frequências, de modo a analisar o comportamento modal e dinâmico dessas estruturas em função da sua flexibilidade. Na estrutura mais flexível foi feito um estudo paramétrico para encontrar um sistema ótimo de controle baseado no uso de AMS. Além de analisar os quatro modelos de lajes, Santos (2009) também fez uma aplicação prática na mesma estrutura estudada por Lima (2007), contudo, com algumas alterações como mudança na posição e número de AMS. Assim como Lima (2007), ele notou que os atenuadores apresentam melhor resultado quando aplicados no ponto de maior amplitude modal vertical para os dois casos de carregamento. Ele observou 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). Ele comenta ainda sobre a influência da variação da razão de massa (μ) do AMS, pois quanto maior o valor desse parâmetro melhor é o desempenho do amortecedor. Já para a taxa de

amortecimento (ξ), ele percebeu que quanto menor for o valor deste parâmetro, melhor o desempenho.

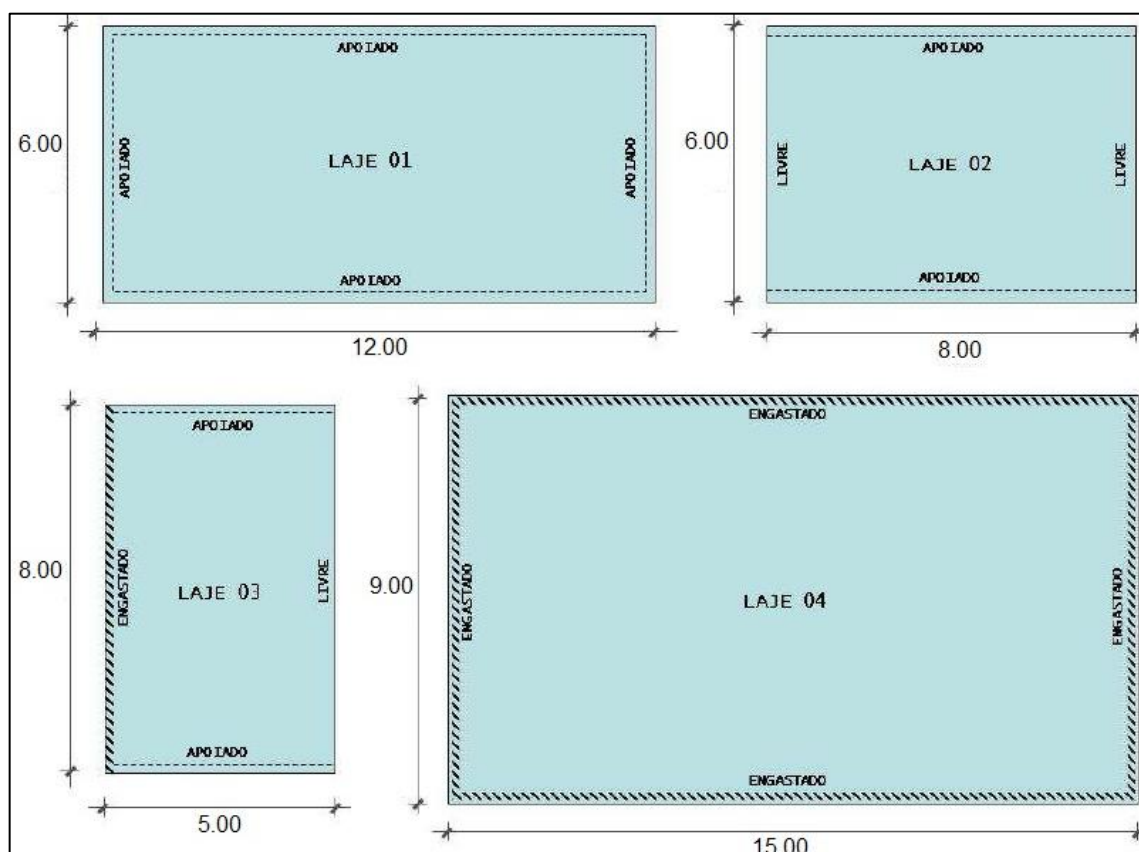


Figura 2.3 – Modelos desenvolvidos por Santos (2009).

Antar (2011) estudou o comportamento dinâmico de pisos com uma camada de material viscoelástico restringido quando submetidos a carregamento induzido por pessoas, para isso ele utilizou estratégias analíticas baseadas em elementos finitos. Foi realizado um estudo paramétrico sobre a camada de amortecimento com restrições para investigar o efeito de diferentes parâmetros como base de concreto, camada de borracha e camada de proteção sobre o desempenho dinâmico global deste sistema. Ele concluiu que a camada de material viscoelástico restrita pode ser efetivamente utilizada para aliviar os problemas de vibração excessiva em sistemas de piso, o qual pode atingir até 80% de redução na resposta de deflexão. Concluiu também que o desempenho desse tipo de sistema de controle analisado depende de muitos fatores, não só da camada de material viscoelástico, mas de fatores relacionados com a própria estrutura de base em termos das propriedades dinâmicas.

Abeyasingh *et al*, (2013) estudaram o desempenho de um piso híbrido composto quando submetido a cargas dinâmicas como caminhada e testes de impactos de calcanhar e verificaram se estava em conformidade com os critérios estabelecidos de conforto e utilidade conforme a percepção humana. Esse piso é constituído por um núcleo de poliuretano (material viscoelástico), camadas externas de cimento reforçado com fibra de vidro e laminados de aço em regiões de tensão, para resistir à tração (Figura 2.4).

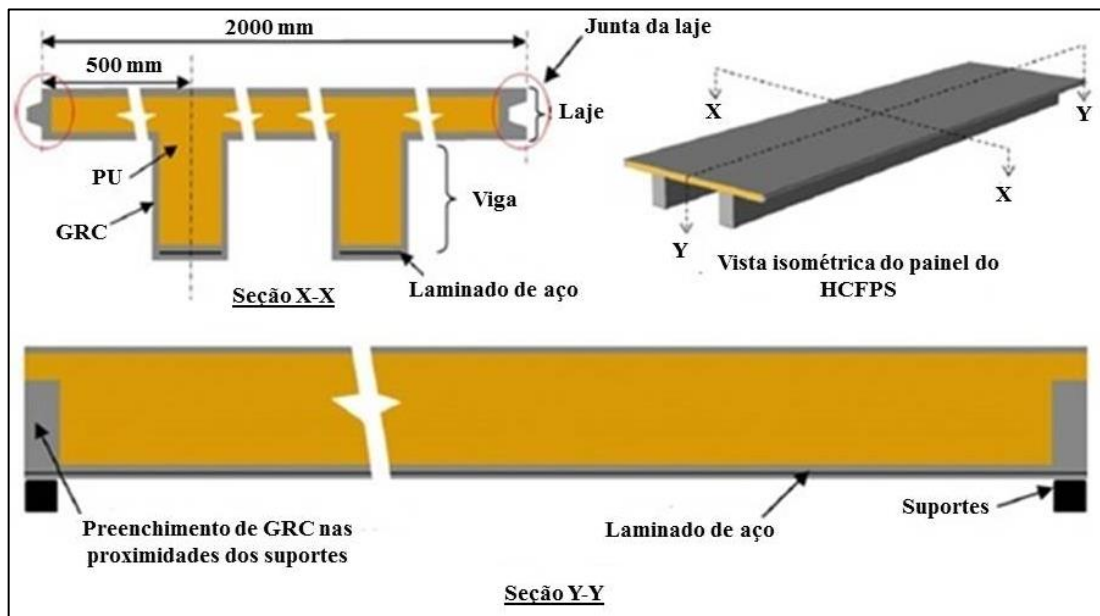


Figura 2.4 - Piso híbrido composto (modificado – Abeyasingh *et al*, 2013).

Foram realizados testes experimentais e feitas análises via elementos finitos. Os testes de impacto do calcanhar foram utilizados para determinar as características dinâmicas do piso e os testes de caminhada, para investigar o padrão de vibração sob cargas induzidas por atividades humanas. Os resultados dos testes mostraram que:

- o piso composto exibe uma frequência natural alta e, portanto a ressonância com cargas humanas será uma raridade;
- tem excelentes propriedades de amortecimento com razão de amortecimento de 5%, valor maior que os valores para estruturas de piso convencionais, isso devido à presença do poliuretano que tem melhores características de amortecimento;
- não excede os limiares perceptíveis da norma Britânica, BS 6472 (2008), quando submetidos a cargas induzidas pelo homem.

Portanto, Abeysingh *et al*, (2013) chegaram à conclusão que o piso composto híbrido estudado é leve e apresenta taxa de amortecimento alta, podendo ser efetivamente projetado para uso em prédios de escritórios e residenciais por proporcionar um desempenho de vibração aceitável.

Campista (2015) fez uma avaliação do comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sob a ação de cargas provenientes das atividades humanas rítmicas, especificamente a prática de ginástica aeróbica, sob o ponto de vista do conforto humano. As cargas aplicadas sobre o piso, oriundas das atividades aeróbicas, foram simuladas através de dois modelos de carregamentos dinâmicos distintos propostos por Faísca (2003) e Ellis e Ji (2004). Foi desenvolvida uma extensa análise paramétrica sobre o modelo estrutural investigado e a resposta dinâmica do sistema foi obtida, em termos dos deslocamentos e das acelerações, e comparada com os limites recomendados por normas e critérios de projeto. Com base nas análises realizadas ela concluiu que a estrutura é suscetível a problemas relacionados a vibrações excessivas e que estes níveis de vibrações são extremamente desconfortáveis aos praticantes da atividade aeróbica sobre o piso analisado.

Rabelo (2016) analisa as vibrações causadas à arquibancada do Estádio Nacional de Brasília e propõe um sistema de controle. Ele realiza análises numéricas em que a estrutura é submetida a diversos carregamentos dinâmicos que simulam as atividades do público nas arquibancadas. Para esta tarefa ele utilizou distintos modelos de carga, variando a frequência dos saltos e a ocupação da torcida na estrutura. No geral a estrutura apresenta respostas aceitáveis em termos de vibrações, mostrando problemas em apenas um ponto. Para esse local, ele realizou um estudo de atenuação das acelerações, tendo como base o carregamento mais desfavorável. Diante disso propôs um sistema de controle passivo com uso de AMS e AMSM. Realizou a verificação da estrutura para as condições de carregamento menos desfavoráveis estudadas, com o intuito de se verificar a eficiência dos dispositivos de atenuação para as mais diversas situações de carga e, de fato, a inserção dos amortecedores reduziram as acelerações a níveis aceitáveis em praticamente todos os casos, mostrando-se uma solução bastante eficiente.

Zhang *et al* (2017) investigaram as vibrações induzidas pelo homem na quinta plataforma de observação da Torre de Vigia Olímpica de Pequim, que é um edifício de referência em Pequim e tem uma forma irregular (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Torre de Vigia Olímpica de Beijing: (a) perfil; (b) plataformas de turismo no topo da torre (Zhang *et al*, 2017).

Como esse edifício apresentava vibrações excessivas Zhang *et al* (2017) projetaram dois pares de AMS para controlar as vibrações verticais indesejáveis da plataforma, foram instalados amortecedores de massa sintonizados. Dois conjuntos de testes de vibração foram realizados, numericamente através do *software* SAP2000, para estudar o comportamento dinâmico estrutural e examinar a eficácia dos AMS: testes modais de vibração livre (antes e depois da construção da camada da superfície do piso) e testes com resposta dinâmica com movimentação controlada de multidões. Com base nos resultados do teste de vibração livre, os seis primeiros modos de vibração vertical foram identificados. O segundo e terceiro modos de vibração com frequências de 3,0 e 3,5 Hz, respectivamente, são propensos à ressonância quando há multidão em movimento.

Após um ano do primeiro teste modal Zhang *et al* (2017) realizaram o segundo teste modal e observaram que a camada de superfície adicional aumentou ligeiramente a rigidez vertical, resultando em um pequeno aumento na primeira frequência modal de 4%. A diferença nos dois testes indica que é necessário levar em conta a camada da superfície do

piso. Com relação aos testes com carregamento de multidão antes da instalação dos AMS's as amplitudes de aceleração excederam o valor limite recomendadas pelo AISC (2003) e após a instalação dos AMS's as acelerações foram reduzidas.

2.3 – CARREGAMENTO DEVIDO À ATIVIDADE HUMANA

As atividades humanas são fonte de excitação com magnitude, direção e posição variável no tempo, isto é, são carregamentos dinâmicos. Além disso, os movimentos executados por estas atividades, como caminhar, corrida, saltos e ginástica aeróbica, mesmo que tenham uma padronização ao realizá-los, sofrem variações conforme as adversidades corporais de cada indivíduo, como o peso, a habilidade física, e a maneira pela qual cada um realiza uma determinada atividade (Campista, 2015).

Este tipo de ação dinâmica pode ser classificado basicamente em duas categorias:

- a primeira consiste na atividade em que há o contato contínuo e permanente do indivíduo com o piso, como por exemplo, andar;
- a outra categoria consiste na atividade em há a perda de contato do indivíduo com a estrutura, ou seja, o indivíduo por alguns instantes se encontra no ar, como exemplo são as atividades como correr e pular.

Os sistemas estruturais de pisos leves apresentam uma suscetibilidade a forças dinâmicas induzidas por pessoas. Desta forma, a compreensão da atividade humana e das forças geradas por ela auxilia no estudo das vibrações em estruturas e por consequência no estudo dos mecanismos de controle estrutural.

A seguir são apresentados conceitos importantes associados às ações dinâmicas decorrentes de atividades humanas de caminhar, correr e pular necessários para o entendimento das forças geradas em estruturas submetidas a esses tipos de carregamentos.

2.3.1 – Atividade humana de caminhar e correr

A caminhada é um tipo de excitação extremamente comum em sistemas de pisos. Ao realizar a atividade de caminhar o indivíduo produz uma força que varia no tempo e no espaço, que tem componentes nas direções vertical e horizontal, sendo a última dividida em

lateral e longitudinal. (Martins, Pinto e Porto, 2017). A Figura 2.6 apresenta separadamente as três componentes de forças em função do tempo.

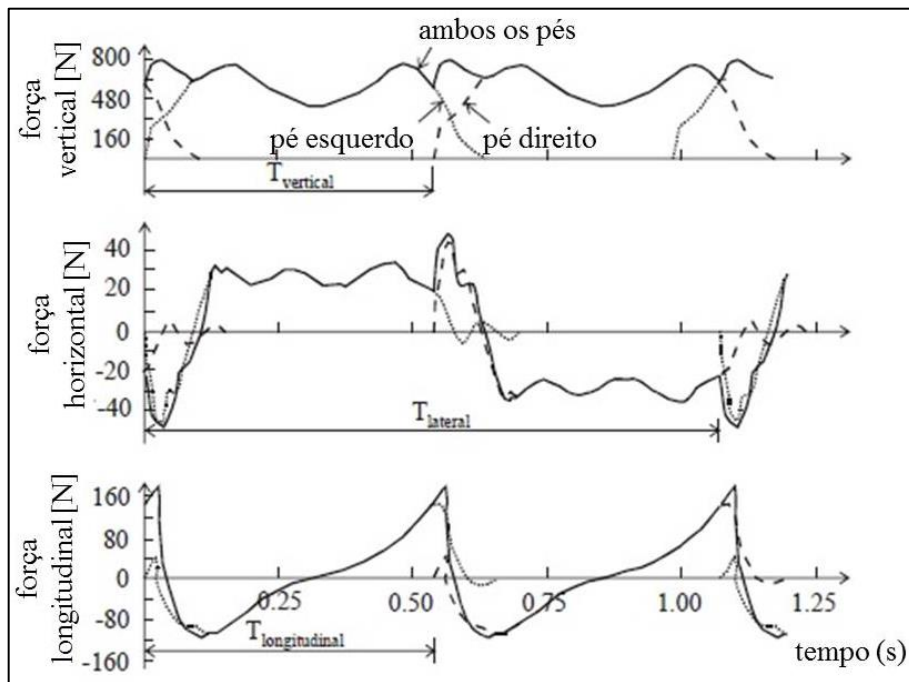


Figura 2.6 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal (Zivanovic *et al*, 2005).

Observa-se no gráfico da força vertical que no movimento de caminhar há um pequeno período de tempo em que os dois pés do pedestre estão em contato com o piso. Esse é o tempo de contato, que tem um valor maior do que o período de passo.

À medida que a pessoa aumenta a velocidade do seu caminhar, isto é, a velocidade de avanço aumenta de valor e o movimento vai gradualmente deixando de ser um caminhar para se tornar uma corrida, ou um movimento de correr. 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 (Santos, 2009).

A diferença entre a força provocada pelo caminhar e correr humano pode ser observada através dos gráficos mostrados na figura 2.7

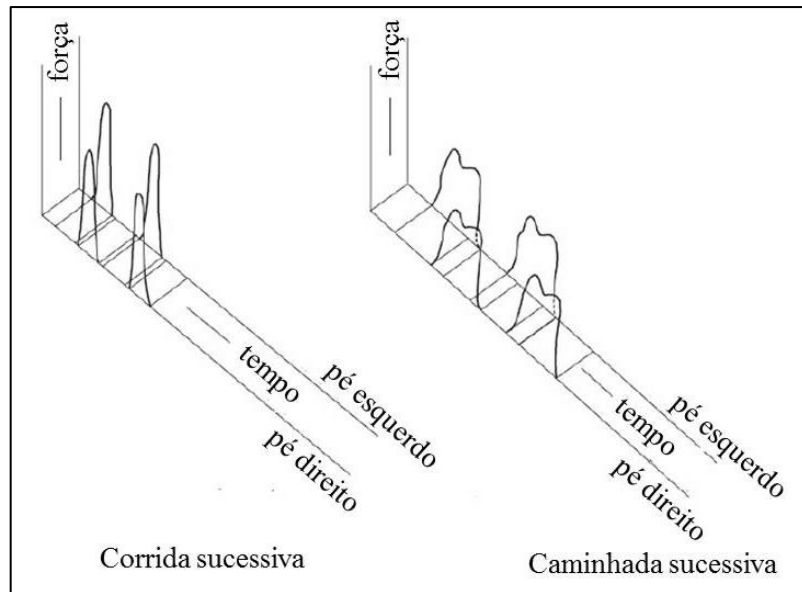


Figura 2.7 - Funções típicas de força de corrida e caminhada (Zivanovic *et al*, 2005).

Wheeler (1982) *apud* Ruiz (2016) mostra como a função de carregamento se modifica em função do tipo de movimento do pedestre, Figura 2.8. Ele ainda relatou a existência da dependência dos parâmetros da caminhada, como comprimento do passo, velocidade do caminhar, pico da força e tempo de contato com a frequência de excitação e que todos esses parâmetros são distintos para diferentes pessoas.

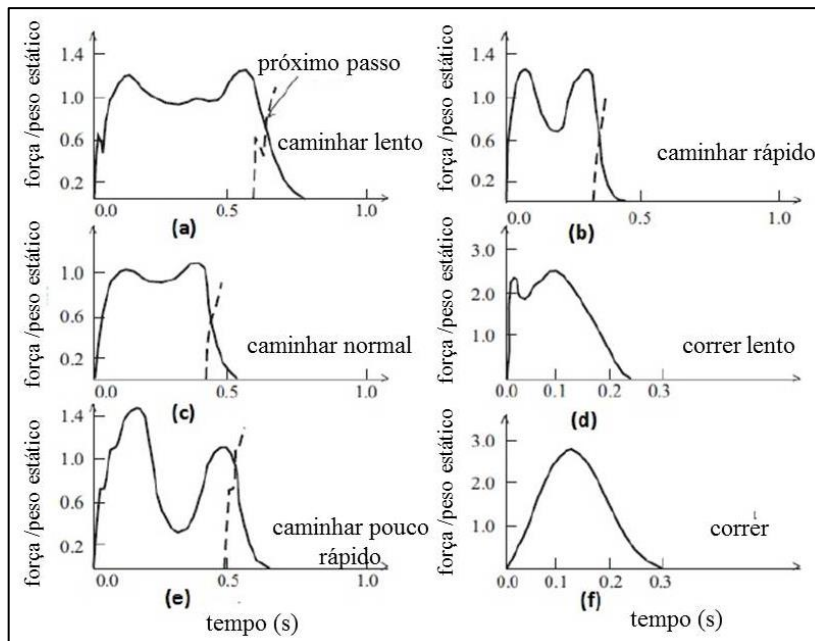


Figura 2.8 - Função de força vertical típicas para diferentes tipos de atividades humanas (Wheeler,1982, *apud* Ruiz, 2016).

Os principais parâmetros que caracterizam o movimento de andar e correr são:

- frequência de passo: é o número de passos dados em certo intervalo de tempo, em engenharia civil normalmente expressa em Hertz (Hz). Na direção vertical deve ser considerado o número de vezes que os pés fazem contato com o piso, enquanto na lateral seria o número de vezes que o mesmo pé faz contato, sendo assim o seu valor na direção lateral é igual à metade da direção vertical (Ruiz, 2016);
- comprimento do passo: medida como a distância entre a posição do calcanhar de um pé até a próxima posição do calcanhar do mesmo pé;
- velocidade de avanço: representa a velocidade média em que uma pessoa realiza um passo completo;
- tempo de contato: é o tempo em que o pé do pedestre permanece em contato com o piso.
- coeficiente de impacto: representa a razão entre a força de pico e o peso estático da pessoa.

Como já mencionado anteriormente, mesmo que haja uma padronização desses parâmetros os mesmos variam de acordo com cada indivíduo que realiza a atividade.

2.3.2 – Atividade humana de pular

O pulo é uma atividade humana que consiste na projeção do centro de massa do corpo, que está localizado na região abdominal, para cima e para frente, fazendo-o percorrer certo período de tempo suspenso no espaço. O movimento se inicia com a preparação ao salto, e seguidamente são flexionados os joelhos de forma simultânea a sua projeção para frente com objetivo de impulsionar o salto. Logo após ocorre o salto propriamente dito, no qual há perda de contato do indivíduo com o solo e por fim, o indivíduo aterrissa na estrutura, retomando novamente o contato com o solo e a preparação para saltar novamente, como pode ser observado na Figura 2.9.

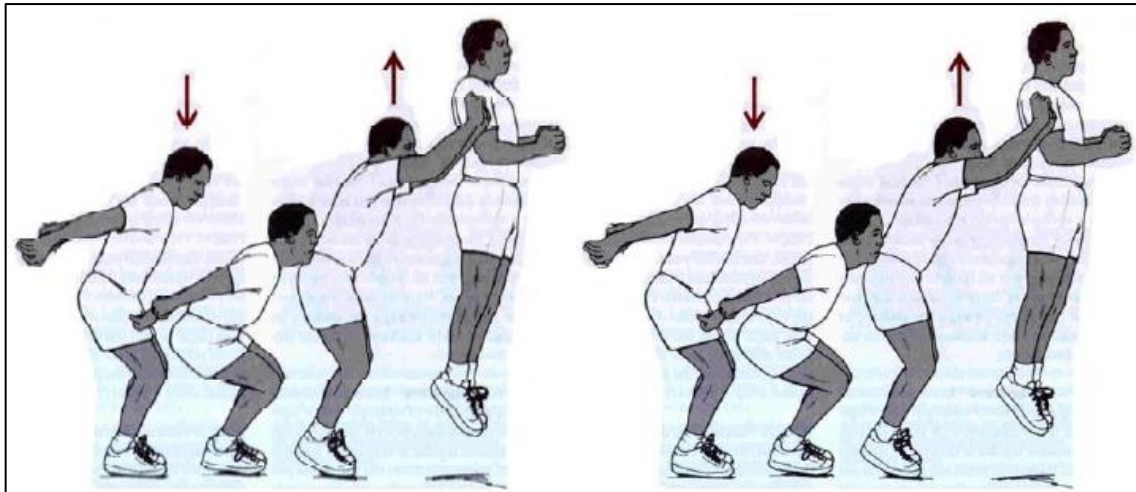


Figura 2.9 - Movimentos do corpo durante um salto (Faisca, 2003).

Os principais parâmetros que afetam o carregamento devido ao ato de pular, em função do tempo, são a frequência, a intensidade e o peso da pessoa (Lima, 2007).

Segundo Mello (2005) existem dois tipos de saltos: o salto vertical, quando o corpo é animado de uma velocidade dirigida apenas para cima, e o salto oblíquo, resultante da reunião de duas velocidades, uma vertical dirigida para cima, outra horizontal, dirigida para frente. Ambos os tipos podem ser executados estando o indivíduo inicialmente parado ou em movimento. Ele ainda afirma que existem quatro fases de execução de um salto dependentes entre si:

1ª Fase: Preparação – representa o instante no qual o indivíduo ainda se encontra em contato com o solo;

2ª Fase: Impulsão – fase em que ocorre uma brusca extensão dos membros inferiores elevando o centro de gravidade do corpo. É avaliada pela intensidade das contrações musculares que deverão vencer o peso do corpo e comunicar ao centro de gravidade uma aceleração inicial; a elevação dos membros superiores também irá impor aceleração ao centro de gravidade; a maior altura ou distância a ser alcançada são dependentes da velocidade inicial dada ao corpo, da aceleração da gravidade a ser vencida e do ângulo de lançamento do corpo.

3ª Fase: Suspensão – representa a fase na qual o corpo se destaca do solo e segue uma trajetória no espaço.

4ª Fase: Queda – é a última fase, onde a velocidade de descida deve ser anulada e então retomar o contato com o solo com uma posição flexionada dos segmentos. Este tipo de

excitação dinâmica é tão atuante na estrutura quanto maior for a altura atingida pela pessoa.

Faisca (2003) realizou ensaios experimentais com o objetivo principal de descrever o carregamento dinâmico gerado por atividades humanas e obteve os gráficos detalhados das respostas da aceleração do corpo (Figura 2.10) e da força (Figura 2.11) num intervalo de tempo durante a execução de um salto.

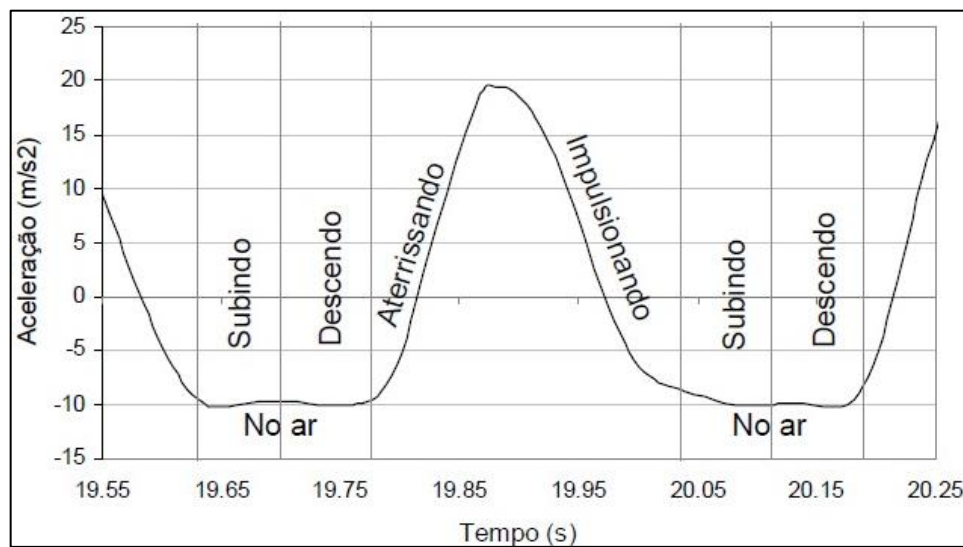


Figura 2.10 – Gráfico da resposta da aceleração de um corpo durante os movimentos de salto (Faisca, 2003).

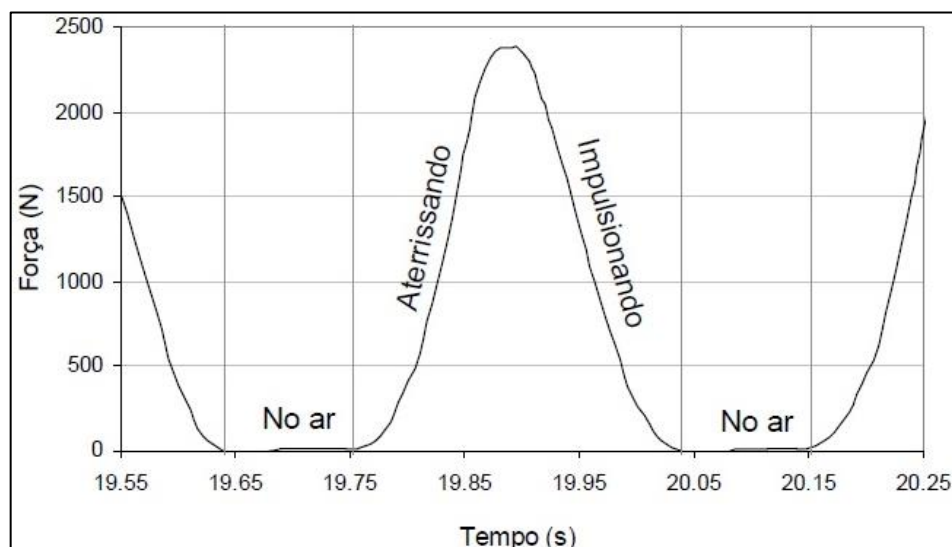


Figura 2.11 – Gráfico da resposta da força exercida por um corpo durante os movimentos de salto (Faisca, 2003).

O gráfico da Figura 2.11 ilustra a força atuante na estrutura pelo salto. Quando o indivíduo encontra-se no ar a força é nula, enquanto na aterrissagem do indivíduo na estrutura a força atinge seu valor máximo.

2.4 – CONTROLE ESTRUTURAL

Quando submetidas ao carregamento oriundo de atividades humanas as estruturas apresentam vibrações que muitas vezes causam desconforto aos usuários. Devido a esses problemas em estruturas envolvendo vibrações excessivas houve um maior interesse em se estudar o controle estrutural, que antes era visto pelos engenheiros somente como o enrijecimento da estrutura, com a adição de vigas e pilares, mas com o passar dos anos foram sendo descobertos dispositivos capazes de atenuar as vibrações em estruturas sem necessidade de enrijecimento estrutural.

Segundo Varela e Battista (2011), os dispositivos dinâmicos utilizados para reduzir as amplitudes do movimento em sistemas mecânicos foram trabalhados pela primeira vez pelo engenheiro alemão Frahm em 1911, e posteriormente foram utilizados por arquitetos navais alemães para controlar o movimento de rolamento dos navios. Aplicações destes dispositivos em estruturas de engenharia civil foram conduzidas por Lenzen em 1966 e esses dispositivos foram chamados então, de amortecedores de massa sintonizados, AMS.

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. O uso de sistemas de controle está crescendo cada vez mais devido aos problemas de vibração que estão ocorrendo nas estruturas surgindo como uma boa opção para solucionar esses problemas. Como já mencionado anteriormente há quatro tipos de sistema de controle: passivo, semi-ativo, ativo e híbrido, que serão descritos a seguir.

2.4.1 – Controle Passivo

O sistema de controle passivo é um mecanismo que não necessita de energia externa, o mesmo transfere parte da energia a ser dissipada pela estrutura para dispositivos de controle ou dissipa essa energia convertendo-a em calor, dependendo do tipo de

amortecedor usado, e assim reduz as vibrações e, conseqüentemente, o desconforto causado por elas.

O controle passivo apresenta algumas vantagens que são:

- não requer o uso de alta tecnologia, como por exemplo, sistema de rápida aquisição de dados;
- não necessita de um sistema de manutenção permanente e
- não necessita de fontes externas de energia, porém atuam somente numa faixa de frequência pré-determinada.

Há vários tipos de dispositivos de controle passivo como o amortecedor de massa sintonizado, amortecedor líquido sintonizado, isolamento de base, amortecedores metálicos, amortecedores de fricção, amortecedores viscofluidos e amortecedores viscoelásticos, que serão objeto de estudo desta dissertação.

Vasconcelos (2003) faz um estudo da aplicação de um sistema de controle passivo com uso de amortecedores viscoelásticos em sanduíche para controle de vibrações induzidas por atividade humana em uma laje de piso, onde a área central é destinada a danças e apresentações, ficando a área ao redor destinada à plateia e/ou às mesas, onde pessoas sentadas podem ou não contribuir para a excitação dinâmica da estrutura. A configuração do sistema de controle usado por ele é a mesma utilizada nas análises realizadas nesta dissertação e está mostrada na Figura 2.12.

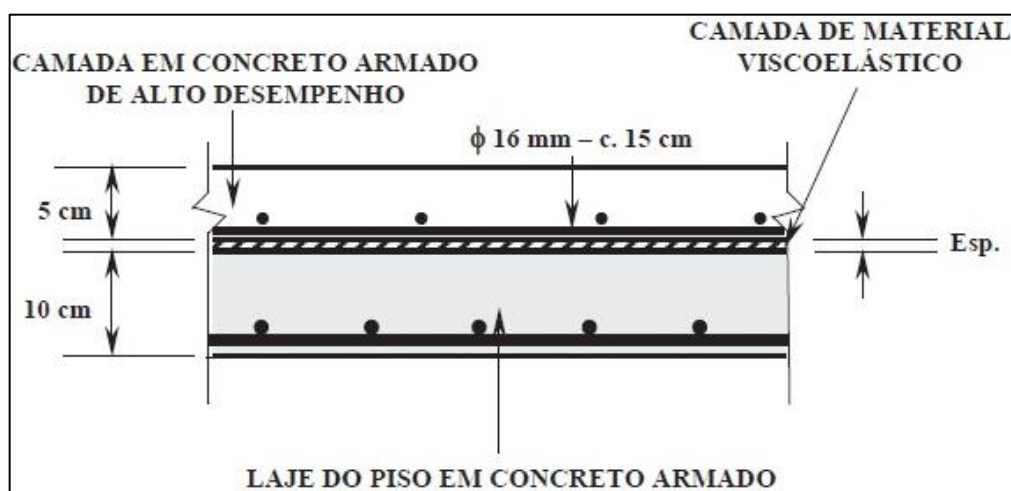


Figura 2.12 - Representação da estrutura do pavimento sanduíche (Vasconcelos, 2003).

Devido às vibrações excessivas que esta laje apresentava foi proposta uma solução usando amortecedor viscoelástico, na configuração apresentada na Figura 2.13 e comparada com outra solução somente aumentando a espessura da laje, que de 10 cm passaria para 15 cm. Das análises realizadas ele concluiu que as acelerações, no caso da estrutura sanduíche, ficaram abaixo do valor para o limite de tolerância com tempo de exposição, portanto a estrutura com mecanismo viscoelástico era a melhor solução para o problema de vibrações em questão.

Saidi *et al* (2011) também desenvolveram um estudo de um sistema de controle passivo com uso de materiais viscoelásticos para atenuação de vibrações excessivas em lajes piso devido às atividades humanas. O amortecedor utilizado consiste de uma viga em balanço tipo sanduíche de dois materiais diferentes, limitados no topo e na base com aço e em seu interior com uma borracha viscoelástica. Realizaram testes experimentais em duas estruturas: uma viga de aço com um vão de 3 m (Figura 2.13) e um segmento de viga de concreto armado de seção T com um vão de 9,5 m.

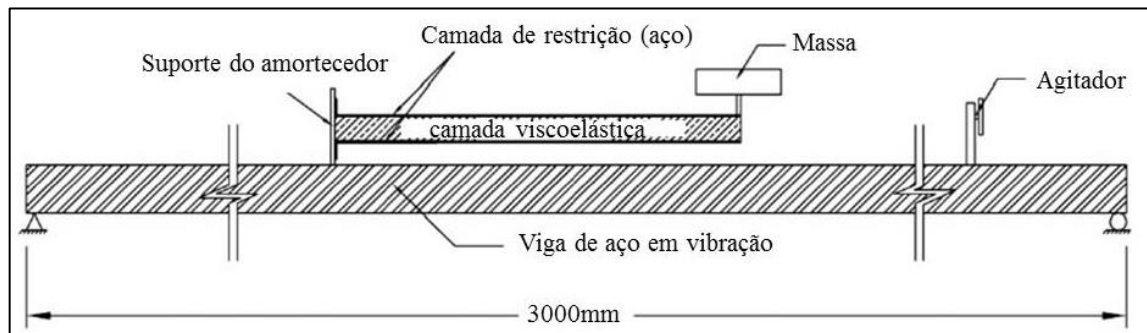


Figura 2.13 - Amortecedor viscoelástico acoplado à viga (modificado - Saidi *et al*, 2011).

Primeiramente, ensaiaram as vigas sem o amortecedor e depois com amortecedor, e também foram feitas análises numéricas. Com a adição do amortecedor viscoelástico à viga de aço, a razão de amortecimento aumentou de 0,3% para cerca de 3%. A viga de seção T foi testada sob excitação de calcanhar e excitação de caminhar com e sem o amortecedor viscoelástico. Sem o amortecedor, a viga T tinha uma razão de amortecimento medida de 2,9%, que aumentou para 6,1% com adição do amortecedor viscoelástico. As análises numéricas reproduziram os ensaios experimentais de modo a validar os resultados obtidos. Dos ensaios e análises realizados eles puderam concluir que o uso de

amortecedores viscoelásticos para amenizar vibração de piso devido a atividade de pessoas é muito eficiente, além de apresentarem claras vantagens em relação aos amortecedores viscosos convencionais.

Campuzano (2016) propôs uma metodologia de projeto de um sistema para controle de vibrações em pisos de concreto. Para isso foi projetado, a partir de um estudo paramétrico, um amortecedor de massa sintonizada (AMS), mostrado na Figura 2.14, e encontrada a melhor localização dele na estrutura, no caso foi no centro da laje.

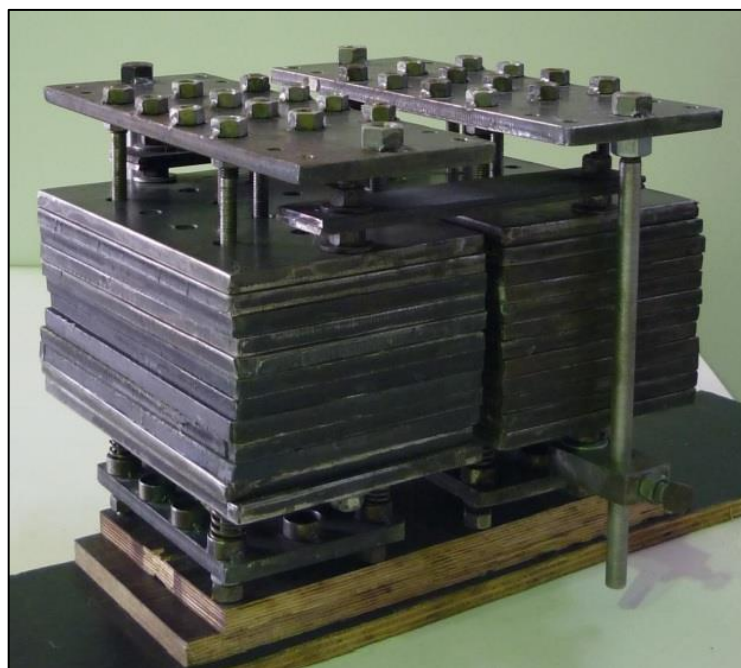


Figura 2.14 - AMS em sua forma final (Campuzano, 2016).

Ele desenvolveu seus estudos através de ensaios em vibração livre e forçada em uma plataforma de ensaios dinâmicos que foi construída e está localizada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Como excitação, foram consideradas cargas harmônicas, cargas geradas pelo pulso contínuo de uma pessoa e de grupos de três e cinco pessoas no centro da laje, cargas induzidas ao caminhar aleatoriamente na superfície da laje e ao pular desde uma carteira escolar no centro da plataforma. Com os resultados obtidos dos ensaios ele verificou o desempenho do AMS na redução da resposta das acelerações da estrutura e constatou que o AMS cumpre com sua função de reduzir as vibrações em pisos geradas pelas pessoas em atividades rítmicas. Segundo ele, o AMS mostra-se como uma solução alternativa para estruturas esbeltas no qual problemas de

vibrações excessivas representam uma preocupação do projetista. O sistema de controle construído de forma geral é simples na construção e na manutenção, além disso, tem um baixo custo de fabricação.

2.4.1.1 – Amortecedor de massa sintonizado

O Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS) é um tipo de controle passivo e consiste de um dispositivo composto por massa-mola-amortecedor ligado a um sistema principal vibrante a fim de atenuar vibrações indesejáveis. Seu princípio de funcionamento consiste em sintonizar o dispositivo numa frequência próxima à frequência natural do sistema para que o AMS entre em ressonância com a excitação vindo a transferir para si a energia que atuaria sobre a edificação.

Os AMS são sistemas altamente eficazes utilizados para o controle passivo de vibrações em estruturas (Almeida e Mazzilli, 2018). Diversas estruturas fizeram uso de AMS para solucionar problemas de vibração como, por exemplo, o hotel de luxo Marina Bay Sands, localizado na cidade de Singapura, citado por Campuzano (2016), mostrado na Figura 2.15.

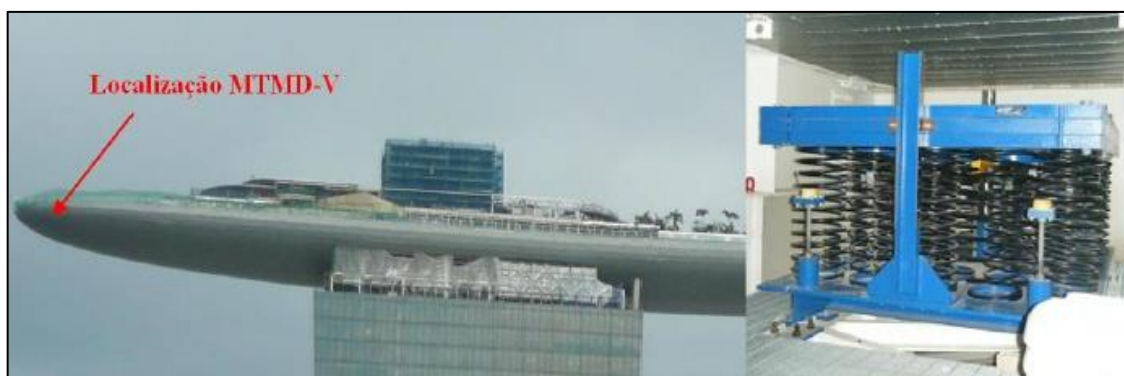


Figura 2.15 – Hotel “Marina Bay Sands, Singapura” (Maurer Söhne, 2011, *apud* Campuzano, 2016).

2.4.2 – Controle Ativo

O controle ativo reduz as vibrações por meio da aplicação de forças à estrutura através de atuadores alimentados por fontes de energia externa. Comparado ao controle passivo, o controle ativo necessita de energia externa, por outro lado não apresenta limitações no que

se refere à frequência da excitação, já que é capaz de se adaptar às mudanças de parâmetros tanto do carregamento, como também da estrutura.

Casado *et al* (2011) estudaram a implementação de um sistema de controle ativo e passivo em uma passarela em serviço, Passarela do Museu de Ciência de Valladolid localizada na Espanha. Segundo eles, nesta estrutura teria sido feita a primeira implementação bem sucedida de um controle de vibração ativo em uma passarela em serviço. Assim, concluíram que o controle ativo poderia ser uma solução realista e razoável para estruturas de engenharia civil flexíveis e leves, como passarelas ou estruturas de piso leve.

2.4.3 – Controle Semi-ativo

O controle semi-ativo possui propriedades que, controladas de forma ótima, reduzem as amplitudes de vibração. O controle de forma ótima de propriedades se dá pelas modificações instantâneas nas propriedades de amortecimento e ou rigidez. Ele faz uso de uma reduzida fonte de energia para uso em seu funcionamento e aproveita o movimento da estrutura na vibração para produzir a força de controle, onde por meio de uma fonte de alimentação externa a magnitude da força de controle é ajustada (Mendes, 2014).

Segundo Rabelo (2016), quando comparado ao sistema passivo, o sistema semi-ativo possui a vantagem de cobrir uma maior faixa de frequência, porém, apresenta-se mais oneroso, tanto na aquisição quanto na manutenção e operação.

Spencer e Sain (1997) *apud* Ebrahimpour e Sack (2005) afirmam que as estratégias de controle baseadas em dispositivos semi-ativos parecem combinar as melhores características dos sistemas de controle passivo e ativo e oferecer um maior desempenho de controle.

2.4.4 – Controle Híbrido

O controle híbrido é um sistema de controle que reúne simultaneamente as características do controle ativo e passivo. Apresenta a vantagem de exigir forças de magnitude bem menores nos atuadores, o que gera uma considerável redução no custo, além de atuar numa maior faixa de frequência de forma eficiente. E na situação de falta de energia

elétrica, a parcela de controle passivo ainda disponibiliza proteção, o que não ocorreria em uma situação de um sistema unicamente ativo de controle.

Fernandes e Chavarette (2017) estudaram a aplicação de um sistema de controle híbrido em um modelo mecânico com o objetivo de minimizar vibrações excessivas em um edifício sob carregamento dinâmico. Com o emprego desse sistema eles conseguiram reduzir as vibrações do edifício até um ponto estável, comprovando, assim, a eficácia da estratégia de controle adotada.

Foi verificado que problemas de vibração excessiva em edifícios têm surgido como resultado da atividade humana sobre a estrutura. Por esse motivo, pesquisas têm sido desenvolvidas em todo o mundo com o objetivo de se alcançar um melhor entendimento sobre como os diversos tipos de atividades humanas podem resultar em carregamentos dinâmicos e como as estruturas sujeitas a esses carregamentos se comportam. Também foram apresentadas algumas das atividades humanas que causam vibrações nas estruturas, tais como corrida, caminhada e o pulo.

Paralelamente, outros estudos têm sido realizados visando-se solucionar esses problemas de vibração por meio de controle estrutural, e resultados satisfatórios têm sido alcançados com o uso de vários tipos de controle. No presente trabalho utiliza-se um tipo particular, através da adição da camada de material viscoelástico com uma camada restritora.

A partir da revisão bibliográfica realizada pode-se destacar os trabalhos de maior relevância para este trabalho. Bachmann e Ammann (1987), que desenvolveram a função que descreve a atividade humana de pular utilizada nas análises. Campuzano (2016), do qual se obteve a estrutura que foi analisada, a plataforma de ensaios dinâmicos. Por fim, Abeysingh *et al*, (2013), do qual foi aproveitado material viscoelástico, pois eles também analisaram este material para redução de vibrações induzidas por atividades humanas e obtiveram bons resultados.

3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 – CARREGAMENTO DEVIDO À ATIVIDADE HUMANA DE PULAR

Neste trabalho foram feitas análises numéricas considerando a atividade humana de pular. Foi utilizada a função, que descreve esse carregamento, desenvolvida por Bachmann e Ammann (1987), por se tratar de uma função muito utilizada em outros trabalhos que analisam o carregamento que simula o pulo.

Bachmann e Ammann (1987) descrevem a força que surge na estrutura quando nela há pessoas pulando através de uma função que também é utilizada para descrever a força induzida por pessoas correndo. Trata-se de uma função com sequência de pulsos semi-senoidais:

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

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).

O fator de impacto k_p é representado na Figura 3.1 variando em função da razão t_p/T_p .

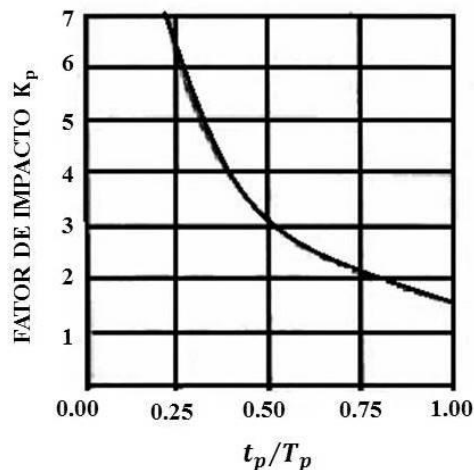


Figura 3.1 – Fator de impacto k_p versus t_p/T_p (Bachmann e Ammann,1987).

3.2 – MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Os materiais viscoelásticos apresentam uma combinação de um comportamento elástico e um comportamento viscoso, eles dissipam uma parte da energia de vibração que seria absorvida pela estrutura transformando-a em calor. Segundo Antar (2011), materiais viscoelásticos tem a capacidade de sofrer grandes deformações elásticas e retornar a sua forma original de forma reversível.

Neste trabalho é utilizado MVE para o controle de vibrações em lajes de piso devidas às cargas dinâmicas originadas por atividades humanas. Os materiais viscoelásticos podem ser utilizados em conjunto com outros tipos de sistemas ou diretamente sobre a estrutura associados ou não a camadas de restrição. Quando estes são associados a camadas de restrição, são conhecidos na literatura como "estruturas sanduíche" e permitem que sejam obtidas reduções substanciais nos níveis de vibração.

3.3 – MODELOS VISCOELÁSTICOS

Existem diversos modelos capazes de descrever o comportamento dos MVE, eles são obtidos através de associações entre molas lineares e amortecedores viscosos. A seguir são apresentados três modelos básicos.

3.3.1 – Modelo de Maxwell

Segundo Souza (2015), um dos primeiros modelos desenvolvidos para explicar o comportamento viscoelástico dos materiais foi elaborado por James Clerk Maxwell (1831-1879), um físico escocês e também professor de física experimental na cidade de Cambridge, na Grã-Bretanha. Este modelo é definido por uma mola de constante k e um amortecedor de constante c , associados em série, como mostra a Figura 3.2.

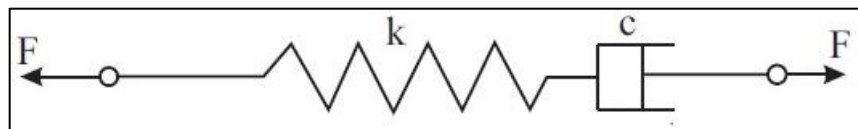


Figura 3.2 – Modelo de Maxwell.

Neste modelo, ao se aplicar qualquer forma inicial de sollicitação num dado intervalo finito de tempo (uma tensão normal, por exemplo), a resposta do modelo seria a sobreposição dos efeitos do comportamento individual de cada elemento. No caso de se aplicar uma tensão normal a mola responderia instantaneamente e o amortecedor responderia linearmente com o tempo. Este foi o modelo considerado nas análises realizadas nesse trabalho.

3.3.2 – Modelo de Voigt

Segundo Souza (2015), o modelo de Voigt, também conhecido como modelo de Kelvin, foi desenvolvido por Lord Kelvin (1824-1907). O modelo proposto por Voigt utiliza uma mola de constante K e um amortecedor de constante C , associados em paralelo, como mostrado na figura 3.3.

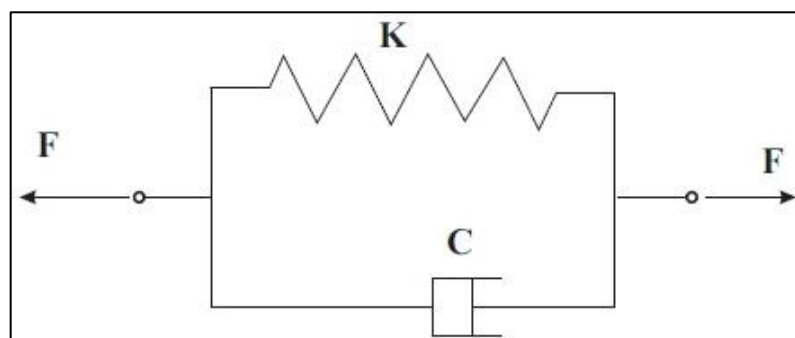


Figura 3.3 – Modelo de Voigt.

No caso do modelo de Voigt, a mola e o amortecedor estão em paralelo e, portanto, a aplicação repentina de uma carga não causará deflexão imediata na mola devido ao comportamento viscoso do amortecedor. A deformação se acumula gradualmente, com a mola tomando uma maior parte da carga (Antar, 2011).

De acordo com Santade (2013), quando se retira a solicitação, o modelo também não apresenta recuperação instantânea, mas retorna ao seu estado inicial de deformação após certo intervalo de tempo.

3.3.3 - Modelo Linear Padrão

O modelo linear padrão é uma combinação do modelo de Maxwell com uma mola linear conectados em paralelo, como mostrado na figura 3.4.

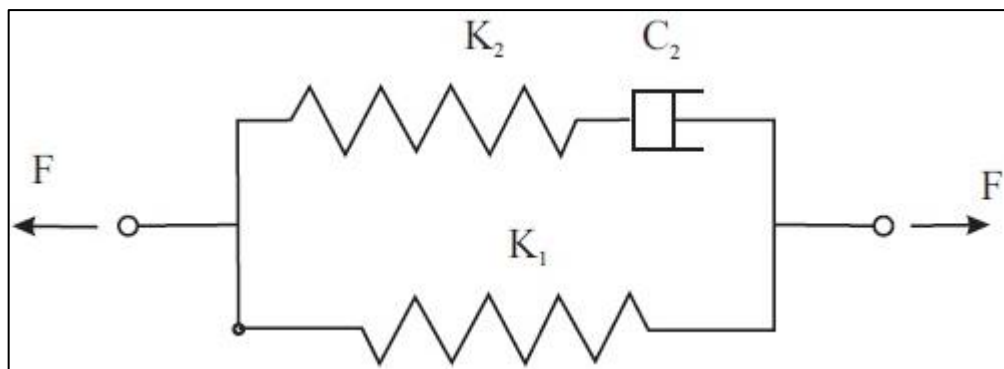


Figura 3.4 – Modelo Linear Padrão.

Segundo Souza (2015), este modelo proporciona uma melhor representação dos materiais viscoelásticos lineares, uma vez que para uma carga inicial o mesmo responde com uma deformação elástica devido à distensão da mola K_1 e, mantendo-se a carga aplicada, ocorrem ao longo do tempo deformações devido ao modelo de Maxwell.

Os modelos de Maxwell, Voigt e Linear Padrão são modelos básicos para descrever o comportamento de muitos materiais viscoelásticos. Em adição a estes modelos básicos, existem muitos outros modelos. (Faisca, 1998).

3.4 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

Segundo Saidi *et al* (2011) materiais viscoelásticos quando adicionados à estrutura numa configuração tipo viga sanduíche oferecem a vantagem de reduzir as vibrações em uma faixa de frequência maior em comparação com os amortecedores de massa sintonizados.

Os amortecedores viscoelásticos podem ser utilizados de duas formas:

- construídos com duas camadas de MVE coladas entre três chapas rígidas paralelas, conforme ilustrado na Figura 3.5. Nessa configuração as camadas de material viscoelástico sofrem deformação ao cisalhamento puro;
- na forma de viga sanduíche, que são compostos por um núcleo de MVE instalado entre duas camadas externas, sendo uma a base, que fica na parte inferior e a outra a camada restritora, que fica na parte superior, como mostrado na Figura 3.6.

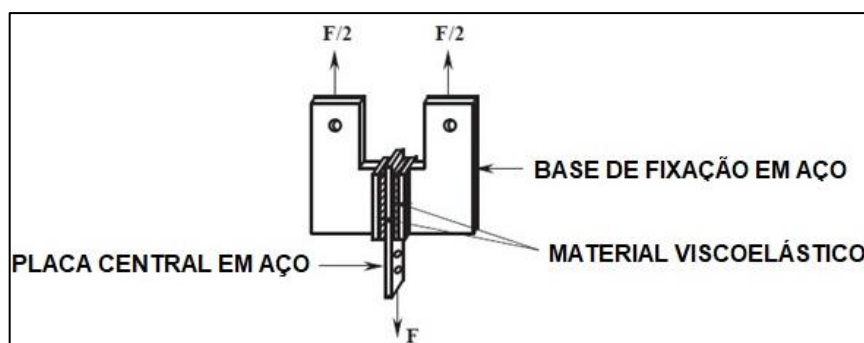


Figura 3.5 - Representação de um típico amortecedor estrutural viscoelástico (Vasconcelos, 2003).

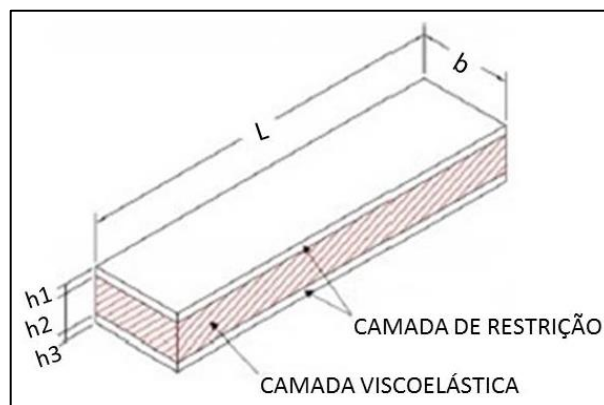


Figura 3.6 – Amortecedor viscoelástico tipo viga sanduíche (modificado - Saidi *et al*, 2011).

Há três formas nas quais os amortecedores viscoelásticos na configuração de estrutura sanduíche podem se apresentar:

- o primeiro modo é a aplicação direta de uma camada de MVE à parte da estrutura que está sob vibração, tal como placas e vigas, Figura 3.7 (a), onde o amortecimento é produzido pela deformação extensional da camada de material viscoelástico;
- segundo modo, mostrado na Figura 3.7 (b), é uma ampliação do primeiro, com a colocação de outra camada de material rígido sobre a parte viscoelástica, chamada de camada de restrição. Então, o material viscoelástico irá experimentar tanto as deformações extensionais quanto as deformações cisalhantes em planos paralelos as interfaces. O amortecimento total alcançado pelo amortecedor nessa configuração é em maior parte devido ao cisalhamento e em menor parte devido às deformações extensionais;
- o terceiro modo é aquele onde aproximadamente toda a deformação acontece devido ao cisalhamento, possui pelo menos duas camadas de MVE coladas a três chapas rígidas e é mostrado na Figura 3.7 (c).

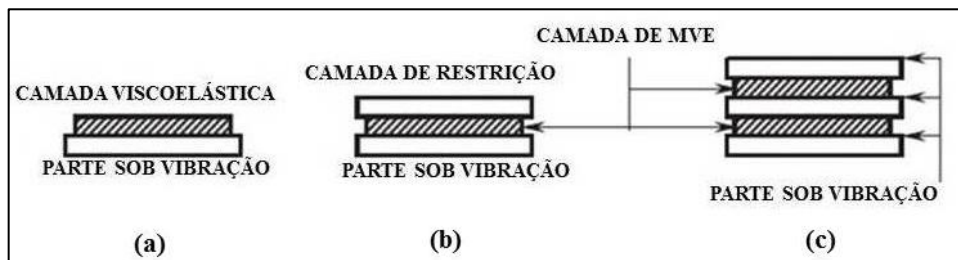


Figura 3.7 - Diferentes configurações para amortecedores viscoelásticos: (a) simples camada de MVE, (b) com camada de restrição, e (c) duplo sanduíche (Vasconcelos, 2003).

Neste trabalho o material viscoelástico foi adicionado a estrutura na configuração de estrutura sanduíche como se apresenta na Figura 3.7 (b).

Existem três parâmetros através dos quais é possível determinar algumas características dos materiais viscoelásticos, que são os módulos transversais. O primeiro é o módulo de armazenamento transversal (G'), que é uma medida da energia armazenada e recuperada por ciclo de deformação. O segundo é o módulo de perda transversal (G''), que é uma medida da energia dissipada por ciclo de deformação. O terceiro é o fator de perda (η), que é uma relação entre a energia dissipada e a energia armazenada.

Segundo Vasconcelos (2003), pode-se definir, a partir dos módulos transversais, os módulos longitudinais através da relação clássica da Teoria da Elasticidade:

$$\text{- Módulo de armazenamento longitudinal: } E' = G'[2(1 + \nu)] \quad (3.2)$$

$$\text{- Módulo de perda longitudinal: } E'' = G''[2(1 + \nu)] \quad (3.3)$$

Onde:

G' é o módulo de armazenamento transversal;

G'' é o módulo de perda transversal;

ν é o coeficiente de Poisson.

O fator de perda (η) pode ser expresso como uma relação entre os módulos de armazenamento e perda, como na Equação (3.4):

$$\eta = \frac{E'}{E''} = \frac{G'}{G''} \quad (3.4)$$

Segundo Santos (2003), para se determinar a taxa de amortecimento de materiais viscoelásticos o fator de perda é um parâmetro importante, quanto maior o fator de perda, conseqüentemente, maior será o amortecimento. Por menor que seja o fator de perda, associado à rigidez do dispositivo há sempre um deslocamento relativo para despertar deformações axiais e, portanto, amortecimento.

As propriedades dos materiais viscoelásticos dependem da temperatura e da frequência de excitação. Com a mudança de temperatura, existem quatro regiões distintas que podem mudar o comportamento em que os materiais viscoelásticos se encontram: região vítrea (I), região de transição (II), região emborrachada (III) e região de escoamento (IV), como mostrado na Figura 3.8 (Souza, 2015).

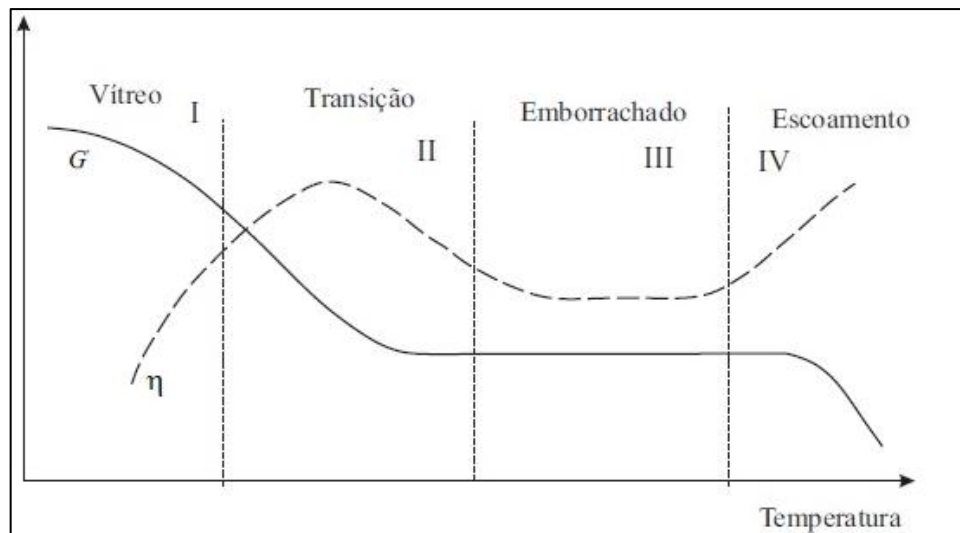


Figura 3.8 - Variação de G' e η com a temperatura (Sun e Lu, 1995, *apud* Souza, 2015).

Na região vítrea a temperatura é baixa, o módulo de armazenamento apresenta valores mais altos enquanto que o fator de perda apresenta valores baixos. Na região de transição o valor do módulo de armazenamento decresce enquanto que o fator de perda apresenta valores mais altos. Na região emborrachada tanto o módulo de armazenamento quanto o fator de perda permanecem quase constantes. Na região de escoamento o fator de perda tende a aumentar enquanto o valor do módulo de armazenamento tende a diminuir, nessa região o material não resiste mais as deformações.

Na região de transição o fator de perda apresenta valores altos, mas por essa região apresentar altas temperaturas é pouco usada no desenvolvimento de sistemas de amortecimento de estruturas. Sendo mais utilizada a terceira região, emborrachada, pelo fato do módulo de armazenamento e o fator de perda variarem muito pouco com a temperatura, apresentando também resultados satisfatórios com relação à capacidade de amortecimento (Souza, 2015).

Com relação à frequência, o comportamento do módulo de armazenamento e do fator de perda de um material viscoelástico pode ser visto na Figura 3.9.

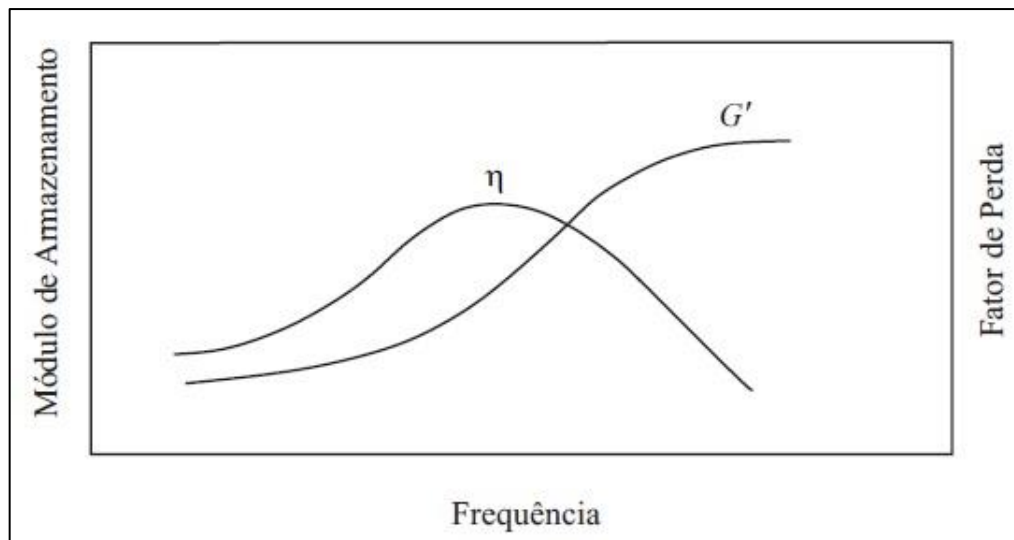


Figura 3.9 - Variação de G' e η com a frequência (Nashif *et al*, 1995, *apud* Souza, 2015).

Tanto o módulo de armazenamento como o fator de perda apresentam valores baixos em frequências baixas. No entanto o comportamento do módulo de armazenamento se mantém crescente com o aumento da frequência enquanto que o fator de perda, em determinada faixa de frequência apresenta valor mais alto e depois decresce à medida que a frequência aumenta.

O comportamento dos materiais viscoelásticos com relação à temperatura é o inverso do comportamento com relação à frequência. Em temperatura baixa eles apresentam comportamento semelhante ao comportamento quando a frequência está alta. Conseqüentemente, quando a temperatura é alta o comportamento dos materiais viscoelásticos é semelhante à baixa frequência.

Os materiais viscoelásticos podem ser divididos em materiais com baixo amortecimento e materiais com alto amortecimento. Os materiais com baixo amortecimento apresentam altas taxas de amortecimento em frequências mais elevadas enquanto que os materiais com alto amortecimento apresentam altas taxas de amortecimento em frequências mais baixas, que geralmente são os de interesse em problemas de vibração para temperaturas ambientes (Vasconcelos, 2003).

3.5 - APLICAÇÕES DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS COMO AMORTECEDORES ESTRUTURAIS

O uso de materiais viscoelásticos para controle de vibração começou na década de 1950, primeiramente sua aplicação se deu em aeronaves, passando a ser aplicados em estruturas de engenharia civil alguns anos depois.

Um dos primeiros casos de aplicação prática dos amortecedores viscoelásticos em edificações data de 1969, quando foram instalados nas torres do World Trade Center em Nova York nos Estados Unidos (Figura 3.10), para reduzir as oscilações devidas ação do vento. As torres gêmeas foram destruídas por um atentado terrorista em 2001 e até a data do atentado os amortecedores não mostravam qualquer deterioração de suas características básicas (Vasconcelos, 2003).



Figura 3.10 – Foto panorâmica mostrando ao fundo as duas torres do WTC antes de serem destruídas pelo atentado terrorista de 11 de Setembro de 2001 (Vasconcelos, 2003).

Foram utilizados cerca de 10.000 amortecedores distribuídos ao longo da altura de cada uma das torres, entre o sétimo e o centésimo sétimo andares e tinham a configuração como a mostrada na Figura 3.11 (a). Eles foram instalados em todo o perímetro do prédio entre o

banzo inferior da treliça de sustentação do piso e a coluna da fachada, como mostrado na Figura 3.11 (b) (Santos, 2003).

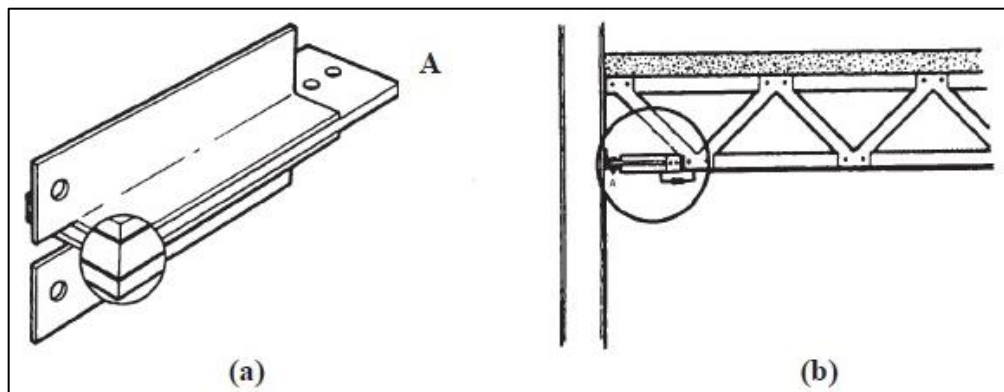


Figura 3.11 - (a) Amortecedor típico do WTC, com (b) detalhe de sua instalação (Vasconcelos, 2003).

Após a aplicação de amortecedores viscoelásticos nas torres gêmeas, diversos outros edifícios passaram a utilizar esse sistema como forma de atenuar as vibrações causadas pela ação do vento como, por exemplo, o edifício Columbia SeaFirst em Seattle, Figura 3.12.

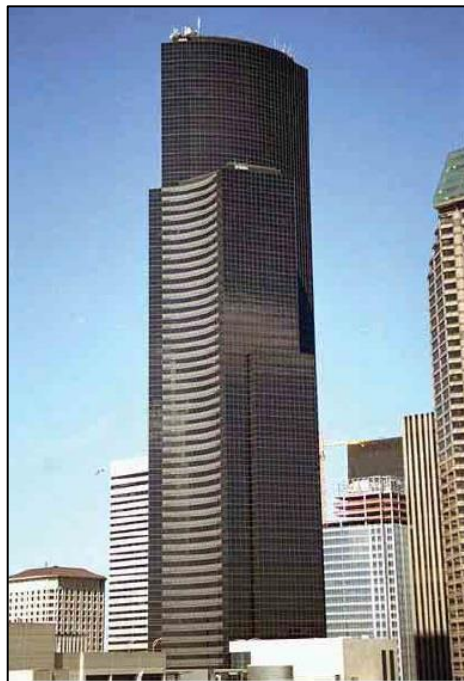


Figura 3.12 - Vista do Columbia SeaFirst, em Seattle, EUA (Vasconcelos, 2003).

Neste edifício foram instalados 260 amortecedores viscoelásticos para reduzir as vibrações devido ao vento. Neste caso os amortecedores foram instalados em paralelo às barras

diagonais principais do núcleo de sustentação do prédio, conforme pode ser observado pela Figura 3.13.

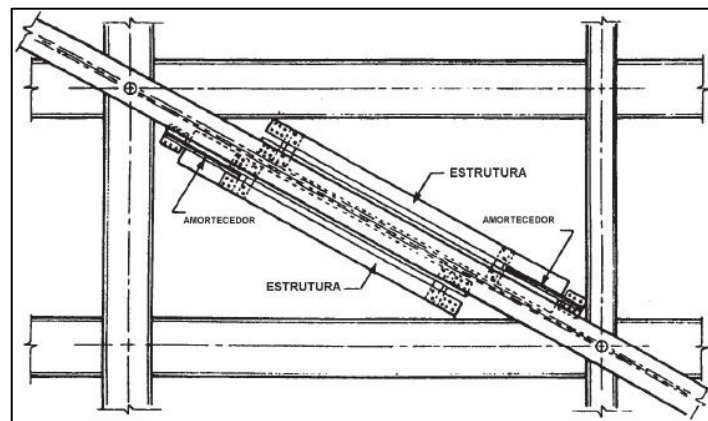


Figura 3.13 – Detalhe do amortecedor viscoelástico usado no Columbia SeaFirst, em Seattle, EUA (Samali e Kwork, 1995 *apud* Vasconcelos, 2003).

Outro edifício no qual também foi instalado amortecedor viscoelástico foi o Two Union Square Building, localizado em Washington. O amortecedor foi usado com o objetivo de reduzir tanto as oscilações devido à ação de vento como os efeitos de sismos sobre a estrutura funcionando como um isolador de base (Santos, 2003). A Figura 3.14 (a) mostra o edifício Two Union Square Building e a Figura 3.14 (b) mostra o amortecedor viscoelástico utilizado.

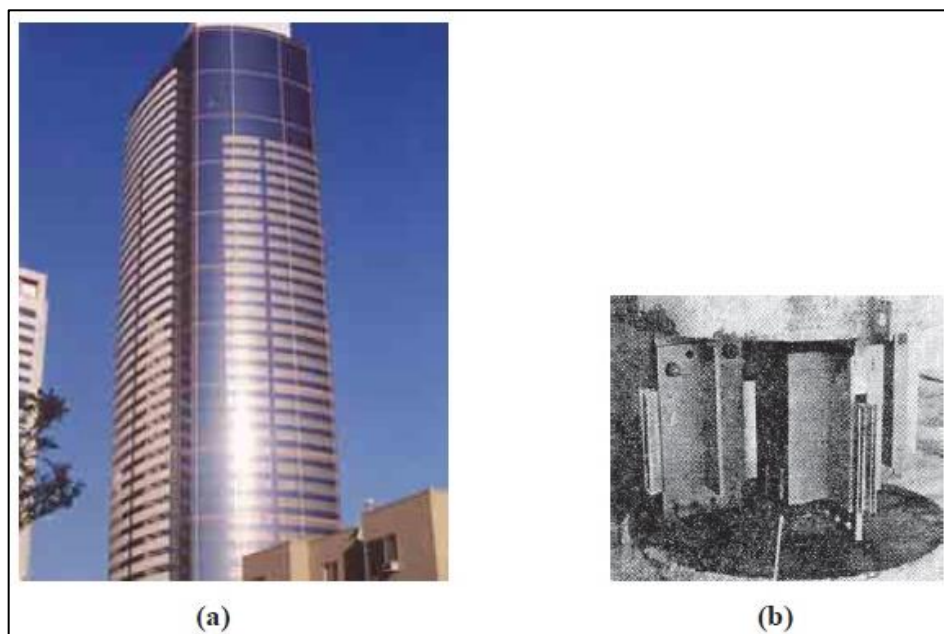


Figura 3.14 – (a) Vista do Two Union Square, em Washington, EUA; (b) detalhe dos amortecedores instalados (3M Company, 1995 *apud* Vasconcelos, 2003).

No Brasil foi proposta a utilização de amortecedores viscoelásticos para solucionar os problemas apresentados na estrutura do tabuleiro central da Ponte Rio-Niterói, proveniente da ação do tráfego de veículos (Barbosa, 2000). Essa proposta foi apresentada por Battista, em 1998, e consistia na retirada de todo o pavimento asfáltico posto sobre a estrutura metálica do tabuleiro, para em seguida, executar novo pavimento em concreto armado sobre uma fina camada de material viscoelástico aplicada sobre a chapa da mesa do tabuleiro metálico, como mostrado na Figura 3.15. Assim, a energia de vibração danosa à estrutura seria dissipada através das deformações cisalhantes da camada de material viscoelástico.

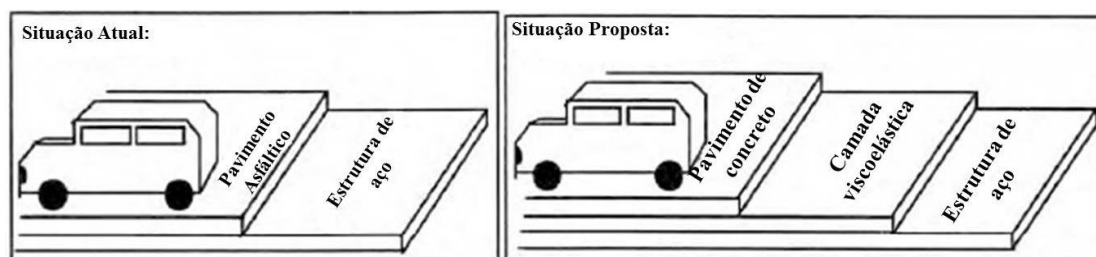


Figura 3.15 – Detalhe do tabuleiro metálico do vão central da Ponte Rio-Niterói (Barbosa, 2000).

Mesmo os resultados experimentais mostrando que essa solução era a melhor alternativa para os problemas apresentados, a Ponte S.A., concessionária que administra a Ponte Rio-Niterói, optou por uma alternativa mais conservadora. A justificativa para a não adoção da solução empregando material viscoelástico era de que se tratava de uma tecnologia muito recente e inovadora tanto no Brasil quanto no exterior e, portanto, sem qualquer certificação estrangeira (Vasconcelos, 2003). No entanto este fato gera uma necessidade de mais estudos sobre o uso de materiais viscoelásticos. Por ser tratar uma tecnologia inovadora, estudos desenvolvidos sobre essa técnica são de fundamental importância.

Foram apresentados neste capítulo os principais fundamentos sobre os materiais viscoelásticos e algumas aplicações práticas. Como exposto, esses materiais apresentam um bom desempenho como amortecedores de vibrações e por esse motivo são objetos de estudo deste trabalho.

4 – FERRAMENTA COMPUTACIONAL

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa computacional utilizado para as análises numéricas foi o programa de elementos finitos Ansys (2012), que é um pacote para modelagem em elementos finitos e pode ser aplicado tanto para análises dinâmicas como também em outras situações como problemas de transferência de calor, de fluídos, acústicos, eletromagnéticas e em análises estáticas, tanto lineares como não-lineares. Ele apresenta uma ampla bibliografia e tutoriais que auxiliam no entendimento das análises realizadas, além de permitir a realização de uma grande sequência de simulações em pouco tempo.

As análises realizadas pelo Ansys (2012) são subdivididas em três estágios:

- pré-processamento: é a etapa em que o problema é definido 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 feita a especificação do tipo de carregamento e 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, onde 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.

No programa Ansys (2012) é possível especificar, antes de realizar análise modal, o número máximo e mínimo de modos de vibração a serem encontrados. O programa não calculará mais do que a quantidade máxima de modos especificada, e não vai calcular menos do que o mínimo, a menos que não haja graus de liberdade suficientes para tal. Também é possível especificar um domínio de variação de frequências restrito no qual devem ser procurados os modos de vibração.

É possível também escolher entre os vários métodos de extração de modo existentes no Ansys (2012), como: Block Lanczos, Supernode, Subspace, PCG Lanczos, Unsymmetric,

Damped e QR damped. Os métodos Damped e QR damped permitem que se inclua amortecimento na estrutura. O método QR damped também permite matrizes de amortecimento e rigidez assimétricas.

4.2 – ELEMENTOS USADOS NA SIMULAÇÃO

Para simular a plataforma analisada foram usados elementos finitos disponíveis na biblioteca do programa Ansys (2012). O modelo estudado neste trabalho utiliza elementos do tipo SHELL e BEAM. Os elementos utilizados nas análises realizadas neste trabalho serão descritos a seguir.

4.2.1 – Elemento SHELL63

O elemento estrutural SHELL63 mostrado na Figura 4.1, foi utilizado para modelar os perfis metálicos, a laje de concreto e as fissuras. Este elemento possui quatro nós (I, J, K e L), com translação nos eixos X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos, totalizando seis graus de liberdade em cada nó, e também possui quatro espessuras. Esse elemento considera efeitos de membrana e/ou flexão. As características críticas de sistemas que apresentam grande rigidez ou grandes deflexões podem ser simuladas através deste tipo de elemento.

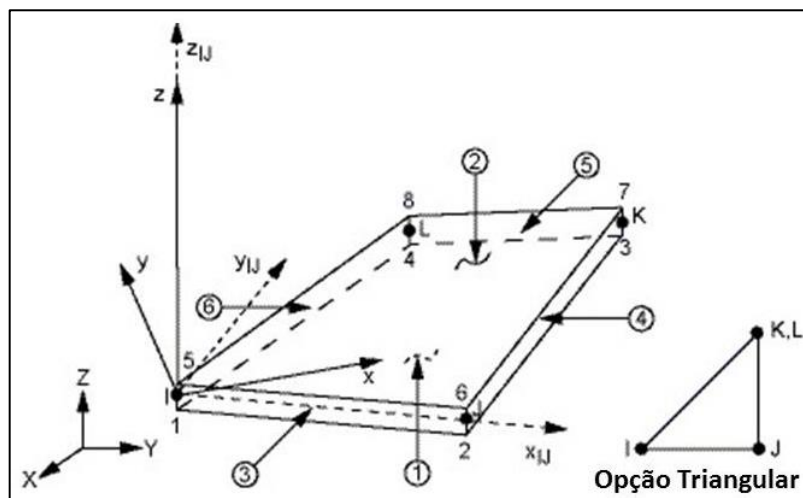


Figura 4.1 – Elemento SHELL63 (Ansys).

4.2.2 – Elemento BEAM4

O elemento BEAM4 foi utilizado para modelar os enrijecedores dos perfis metálicos (Figura 4.2). Tal elemento possui dois nós (I e J), translação nos eixos X, Y e Z e rotação em torno dos mesmos, totalizando seis graus de liberdade em cada um dos seus dois nós. É um elemento uniaxial com capacidade para modelar tração, compressão, torção e dobramento.

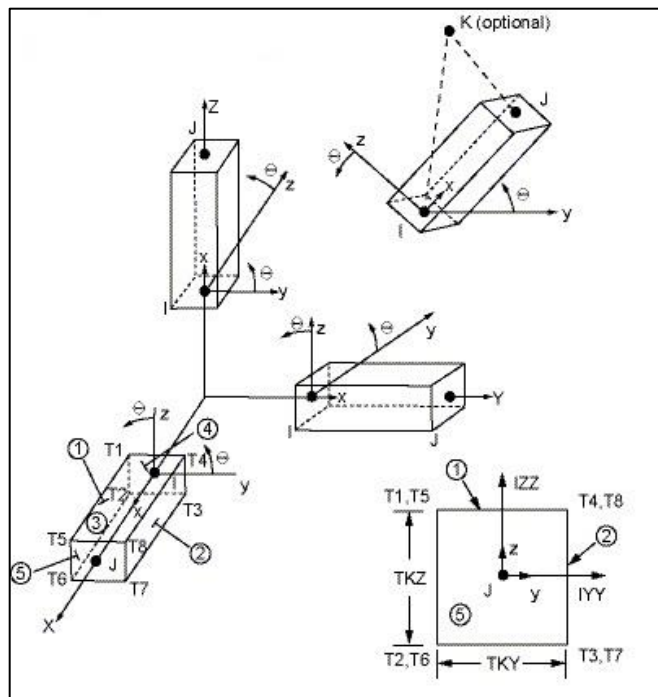


Figura 4.2 – Elemento BEAM4 (Ansys, 2012).

4.2.3 – Elemento SHELL181

O elemento estrutural SHELL181, mostrado na Figura 4.3, foi utilizado para modelar a camada de material viscoelástico. Este elemento foi escolhido por ser adequado para analisar estruturas de camada fina a moderadamente espessa e por ser um elemento que simula estrutura em camadas como estruturas sanduíches. Devido a isso ele já considera a adição de um novo material, com propriedades diferentes, através de pontos de integração entre as camadas.

O elemento SHELL181 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.

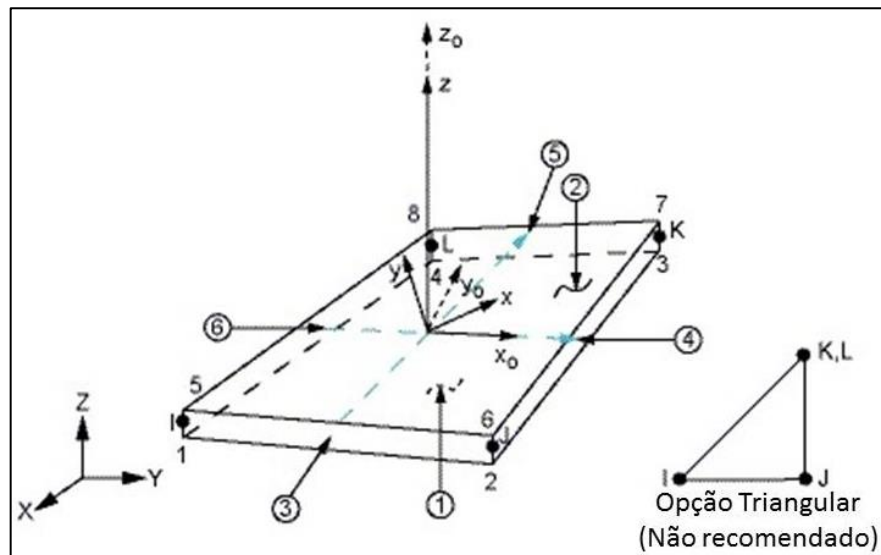


Figura 4.3 – Elemento SHELL181 (Ansys, 2012).

Foi exposto nesse capítulo como o programa computacional Ansys (2012) é uma ferramenta computacional extremamente potente e que oferece recursos sofisticados para análise estática e dinâmica pelo método dos elementos finitos, o que possibilita simulações de estruturas, como a estudada nesse trabalho, de maneira bastante satisfatória.

5 – ANÁLISES NUMÉRICAS

Como já mencionado, o objetivo desta dissertação é analisar o desempenho do uso de materiais viscoelásticos para redução de vibrações causadas por atividades humanas. Para isso foram realizadas análises numéricas em um modelo de elementos finitos da plataforma de ensaios dinâmicos que foi construída no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Esta estrutura foi ensaiada experimentalmente por Campuzano (2016) com o uso de um amortecedor de massa sintonizado (AMS) acoplado. Esses ensaios experimentais foram realizados para se conhecer o desempenho do AMS para redução das vibrações. Neste trabalho a estrutura passou a ser analisada numericamente com adição de uma camada de material viscoelástico (espuma de poliuretano), de diferentes espessuras, na configuração de estrutura sanduíche.

Foram realizadas três séries de análises numéricas no domínio do tempo de acordo com o tipo de carregamento: a primeira é realizada com carregamento harmônico de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma, a segunda é com carregamento que simula o pulo contínuo de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma e a terceira é com carga de impacto, apenas de uma pessoa no centro. Como já mencionado anteriormente, o carregamento que simula o impacto é aplicado durante um intervalo de segundo e tanto carga harmônica e o carregamento que simula o pulo contínuo é aplicado durante dez segundos e obtidas as respostas até que se completasse 50 segundos de análise.

Para cada série de análises numéricas foram realizadas, primeiramente, análises na estrutura sem a camada de MVE, somente a estrutura original, em seguida as análises foram feitas com adição da camada de dois, três e quatro centímetros. Nas análises numéricas foi considerada uma taxa de amortecimento da estrutura de 2%.

É importante ressaltar que este trabalho utiliza a mesma estrutura estudada por Campuzano (2016) com outro tipo de sistema de controle, visto que ele utiliza AMS. É feita a comparação de alguns resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos por ele. Já a caracterização do MVE utilizado foi realizada por Abeysingh *et al.* (2013). Portanto, para o desenvolvimento deste estudo foi realizada a atualização e aprimoramento do modelo numérico e instalado um novo sistema de controle, no caso a adição da camada

de MVE e da camada de restrição. Foi realizada a análise modal da estrutura numericamente e as demais análises numéricas foram realizadas considerando carregamentos dinâmicos de atividades humanas sem e com a camada de material adicionada juntamente com a camada de restrição. A seguir, na Tabela 5.1, é apresentado um quadro onde fica claro quais atividades foram desenvolvidas por Campuzano (2016), Abeysingh *et al.* (2013) e qual a contribuição desse trabalho.

Tabela 5.1 – Atividades realizada por Campuzano (2016), Abeysingh *et al.* (2013) e atividades realizadas neste trabalho.

	Campuzano (2016)	Abeysingh <i>et al.</i> (2013)	Contribuição deste trabalho
Construção da plataforma	X		
Ensaio experimentais na plataforma sem controle	X		
Construção do MAS	X		
Ensaio experimentais na plataforma com MAS	X		
Construção do modelo numérico	X		
Análises numéricas na plataforma sem e com AMS	X		
Atualização do modelo numérico			X
Análise modal numérica da plataforma			X
Caracterização do MVE		X	
Análise numérica da plataforma sem e com a camada de MVE			X
Comparação do resultados obtidos com os resultados de Campuzano (2016)			X

Este capítulo apresenta a descrição da estrutura analisada, o modelo numérico utilizado, bem como as análises numéricas realizadas com seus respectivos resultados.

5.1 – ESTRUTURA ANALISADA

A estrutura considerada para as análises realizada nesta dissertação é uma plataforma de ensaios dinâmicos, que consiste em uma laje de concreto com duas bordas semi-engastadas e as outras duas bordas livres. A laje de dimensões de 6,1 m de comprimento, 4,9 m de

largura e 0,1 m de espessura (Figura 5.1 e Figura 5.2), tem resistência a compressão de 25 MPa e módulo de elasticidade do concreto aproximado de 30 GPa.

Esta plataforma apresenta, propositalmente, vibrações verticais excessivas quando é excitada com carregamentos provenientes de atividades humanas como pular, dançar e atividades aeróbicas, devido à sua reduzida rigidez a flexão.

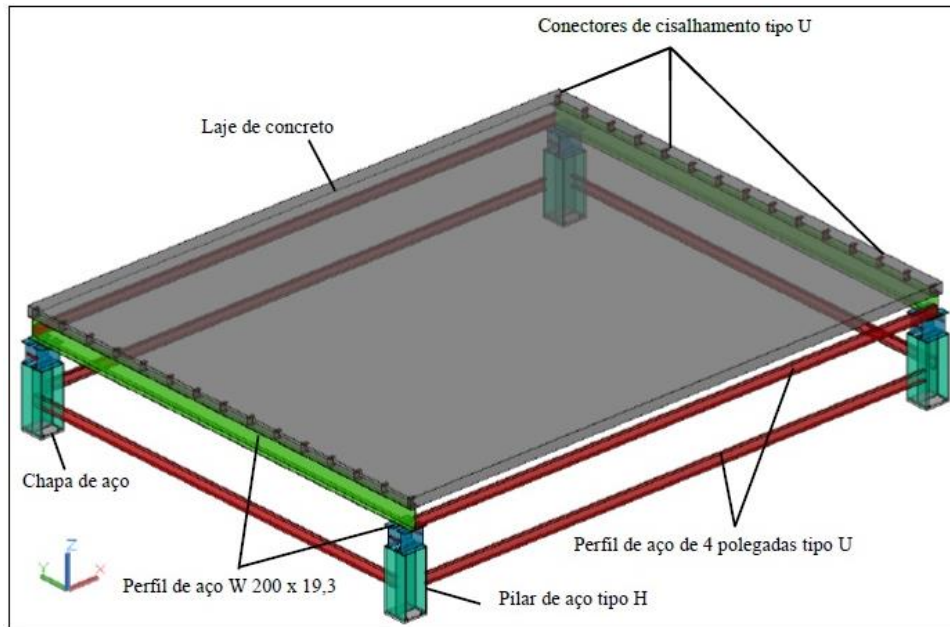


Figura 5.1 – Plataforma de ensaios dinâmicos (Campuzano, 2011).

Após a construção da plataforma, esta apresentou uma grande deflexão estática depois da retirada do escoramento temporário, de aproximadamente 35 mm, e que com o passar dos dias chegou até aos 70 mm. Segundo Campuzano (2016), a explicação possível para o ocorrido se baseia nas fissuras que surgiram na direção paralela aos perfis de aço por retração de secagem do concreto. A plataforma com a flecha inicial de 35 mm é apresentada na Figura 5.3.

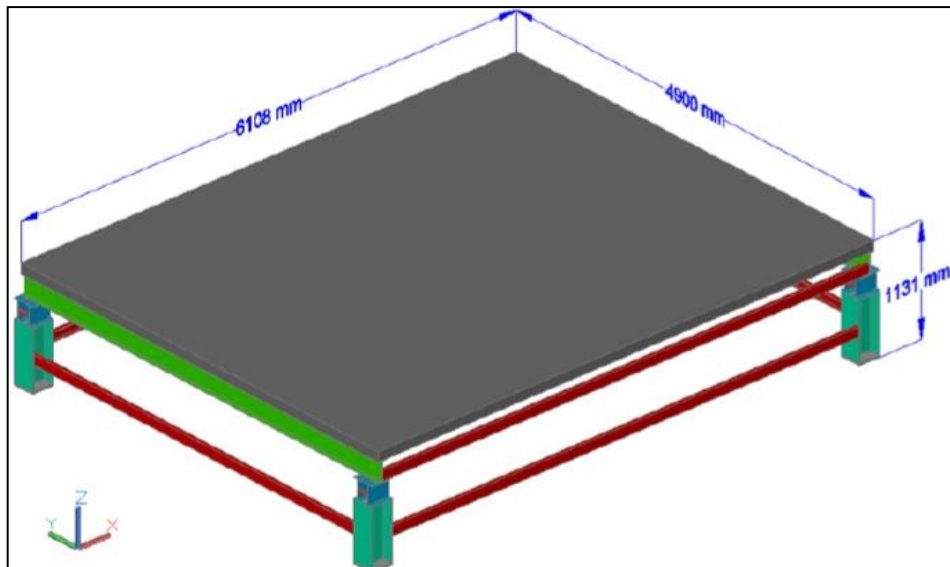


Figura 5.2 - Dimensões da plataforma de ensaios dinâmicos (Campuzano, 2011).

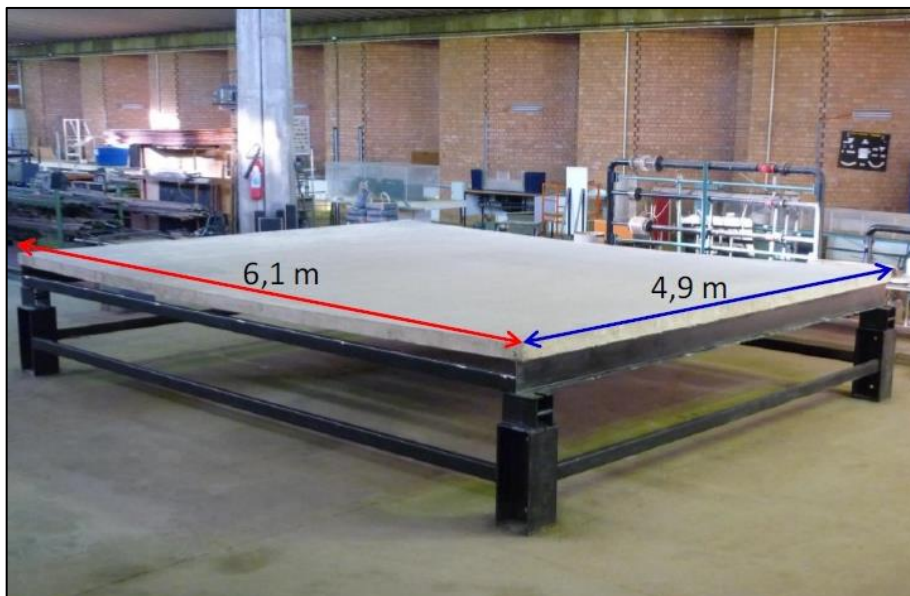


Figura 5.3 - Plataforma de ensaios dinâmicos antes da recuperação, com flecha estática de 35 mm (Campuzano, 2011).

Para a recuperação da plataforma as trincas que tinham aparecido foram preenchidas com uma camada de graute epóxi, Sikadur 42 Cl, com espessura 4,5 cm e largura de 2,5 cm. A Figura 5.4 mostra as trincas da laje que foram preenchidas com o Sikadur 42 Cl.



Figura 5.4 – Trincas na laje que foram preenchidas com graute epóxi fluido (Campuzano, 2016).

5.2 – MODELAGEM NUMÉRICA

O modelo numérico da plataforma de ensaios dinâmicos foi desenvolvido com uma malha refinada de modo que pudesse representar as fissuras o mais próximo da realidade, com elementos de aproximadamente 2,42 cm.

A modelagem numérica da plataforma de ensaios dinâmicos leva em consideração todas as fissuras existentes na plataforma que foram preenchidas com o produto Sikadur 42 CI. As fissuras foram modeladas com o mesmo elemento da laje (elemento SHELL63), porém com propriedades diferentes, mostradas na Tabela 5.2. A Figura 5.5 mostra o modelo da plataforma analisado discretizado no programa Ansys, onde as linhas em cor rosa mostram o mapeamento das trincas modeladas.

Para a camada de MVE adicionada à plataforma foi considerado o elemento SHELL181, pois trata-se de um elemento específico para modelar materiais com grandes propriedades amortecedoras e que já leva em consideração a superfície de contato, ideal para simular estruturas sanduíches.

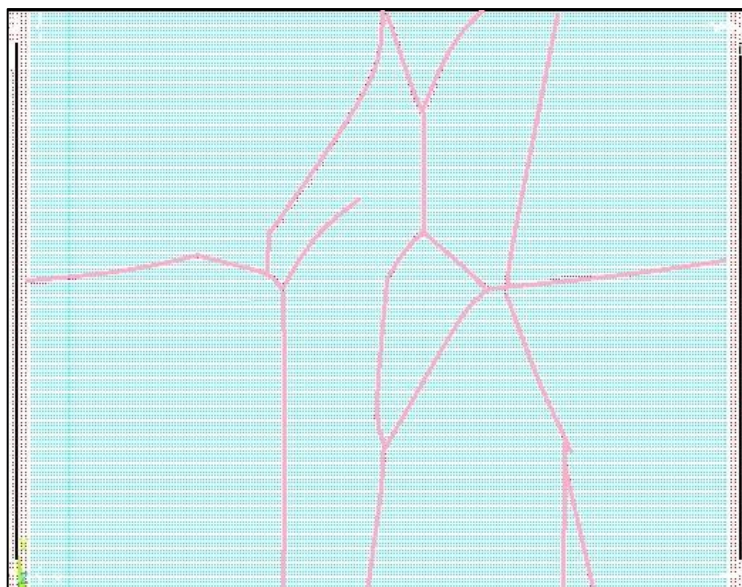


Figura 5.5 – Mapeamento das trincas da laje no modelo numérico.

O modelo numérico da plataforma contém um total de 97516 elementos dos quais 59536 correspondem aos elementos que simulam a laje de concreto e 37980 são elementos que modelam os perfis e pilares em aço. Por se tratar de um modelo com muitos elementos as análises chegaram a atingir 48 horas ou mais. Vale ressaltar que as análises foram realizadas através de um processador Intel® Core™ i5-4200U CPU@1.60 GHz 2.30 GHz, com memória RAM de 4GB e um sistema operacional de 64 bits.

Foram adicionadas à laje de concreto uma camada de MVE e uma camada restritora. Para cada análise realizada foi considerada uma espessura diferente para camada de MVE, foram consideradas camadas de dois, três e quatro centímetros, já a camada restritora possui a mesma espessura em todas as análises, dois centímetros.

Esse procedimento é realizado a fim de estudar o desempenho de materiais viscoelásticos como amortecedor de vibrações, juntamente com uma camada de restrição. A Figura 5.6 mostra como a plataforma se apresenta após a adição da camada de material viscoelástico (azul escuro), e da camada restritora.

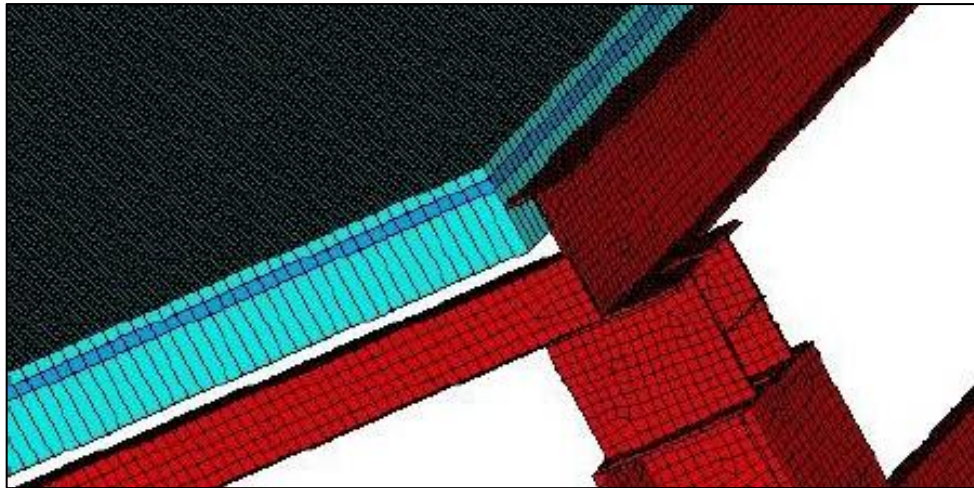


Figura 5.6 - Plataforma com a camada de material viscoelástico.

O material viscoelástico adicionado nas análises da plataforma é uma espuma de poliuretano, o mesmo material utilizado por Abeyasingh *et al.* (2013), quando estudaram o desempenho dinâmico de um inovador piso composto híbrido. Escolheu-se esse material devido ao bom desempenho obtido nas análises realizadas pelos autores, com relação às vibrações em piso causadas por movimentos de pessoas.

Por se tratar da mesma plataforma de ensaios dinâmicos utilizada nas análises de Campuzano (2016) as propriedades dos materiais usados na modelagem numérica da plataforma são as mesmas. Em relação ao material viscoelástico, também são empregadas as mesmas características estipuladas por Abeyasingh *et al.*, (2013), essas características estão mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades dos materiais usados na modelagem numérica.

	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg/m ³)
Laje de concreto	30	0,2	2500
Perfis de aço	200	0,3	7850
Fissuras	16	0,2	2000
Espuma de Poliuretano	0,0224	0,3	99,80

5.3 – VALIDAÇÃO DA ANÁLISE COM MATERIAL VISCOELÁSTICO

A fim de validar as análises feitas com adição do material viscoelástico utilizando o elemento SHELL181, é reproduzida a análise de uma viga sanduíche utilizada por Dhoble e Barjibhe (2016) que estudaram diferentes espécimes variando as camadas da face e do núcleo, analisadas em balanço.

O modelo estudado por Dhoble e Barjibhe (2016) foi uma viga de aço de 500 mm de comprimento, 50 mm de altura e 4,5 mm de espessura, sendo 1,5 mm para cada camada (base, núcleo e camada de restrição). A viga sanduíche é composta por uma camada base de aço, núcleo de borracha e camada de restrição também de aço, cada uma com 1,5 mm de espessura. Na Tabela 5.3 são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados na análise numérica

Tabela 5.3 – Propriedades dos materiais utilizados na análise da viga de Dhoble e Barjibhe (2016)

MATERIAL	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Aço	200	7850	0,3
Borracha	0,00154	950	0,45

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos por Dhoble e Barjibhe (2016) e os obtidos nesse trabalho, bem como a porcentagem da diferença entre eles. A comparação dos resultados de Dhoble e Barjibhe (2016) com os resultados obtidos da análise realizada neste trabalho deixa claro que o modelo adotado para simular o material viscoelástico em viga sanduíche é eficiente visto a proximidade dos resultados. Vale ressaltar que é feita a análise somente das três primeiras frequências.

Tabela 5.4 – Comparação dos resultados obtidos por Dhoble e Barjibhe (2016) com os obtidos neste trabalho.

Resultados	1ª Frequência (Hz)	2ª Frequência (Hz)	3ª Frequência (Hz)
Dhoble e Barjibhe (2016)	13,002	44,771	87,289
Obtidos neste trabalho	12,869	42,751	80,078
Diferença	1,02%	4,51%	8,26%

5.4 - ANÁLISE MODAL

A análise modal é usada para determinar as características dinâmicas como frequências naturais e formas de modo de uma estrutura. Também pode servir como ponto de partida para outras análises mais detalhadas, como uma análise dinâmica transiente ou uma análise harmônica.

As frequências naturais e modos de vibração da plataforma de ensaios dinâmicos foram obtidos pelo algoritmo de extração de autovalor e autovetor de *Block Lanczos* do software Ansys (2012). Foram extraídas as três primeiras frequências e modos de vibração da plataforma e comparadas com as frequências e modos de vibração obtidos experimentalmente por Campuzano (2016), essa comparação foi feita a fim de validar o modelo numérico.

Campuzano (2016) realizou ensaios experimentais de vibração livre com impactos em sua superfície por meio da utilização de uma marreta de aço e uma borracha e também com impactos com o calcanhar. Após a obtenção dos resultados experimentais, ele obteve as diferentes formas modais experimentais da estrutura utilizando o pacote computacional ARTEMIS.

As Figuras 5.7 até a 5.9 mostram as três primeiras frequências naturais e as respectivas formas modais da plataforma encontradas através das técnicas de identificação a partir dos dados experimentais obtidos por Campuzano (2016).

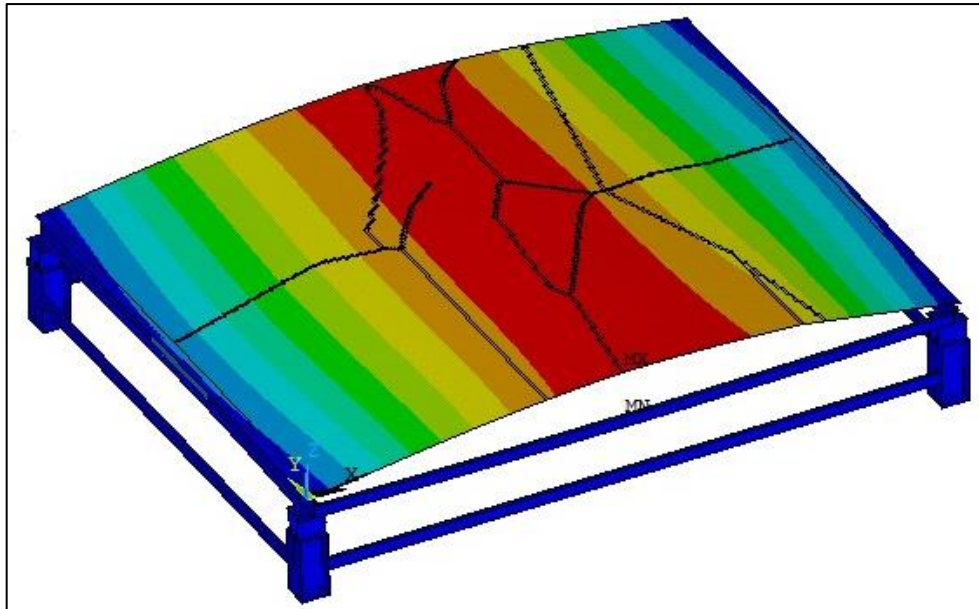


Figura 5.7 – Primeira forma modal numérica da laje de concreto da plataforma.
Frequência= 3,365 Hz (Campuzano, 2016).

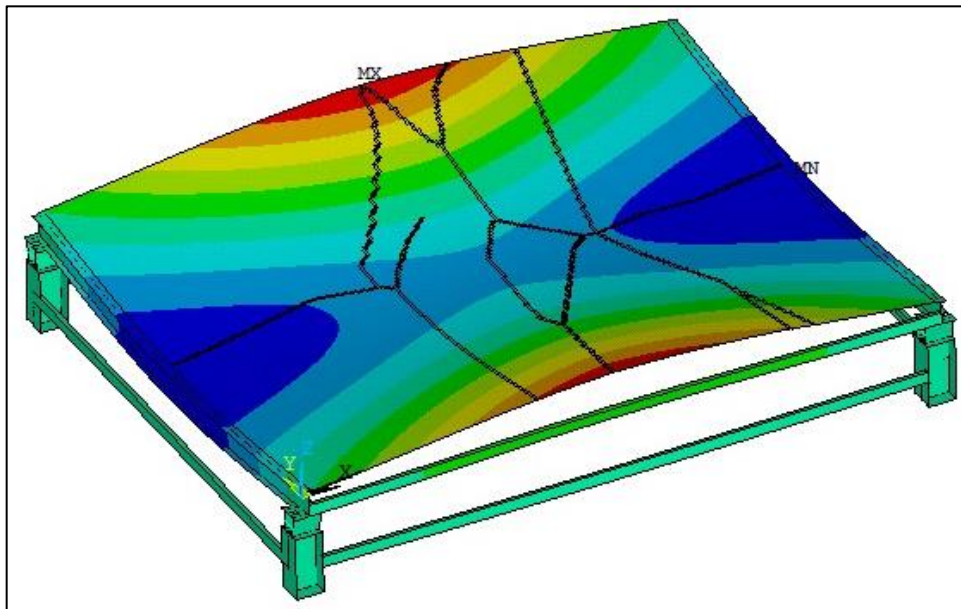


Figura 5.8 – Segunda forma modal numérica da laje de concreto da plataforma.
Frequência= 15,34 Hz (Campuzano, 2016).

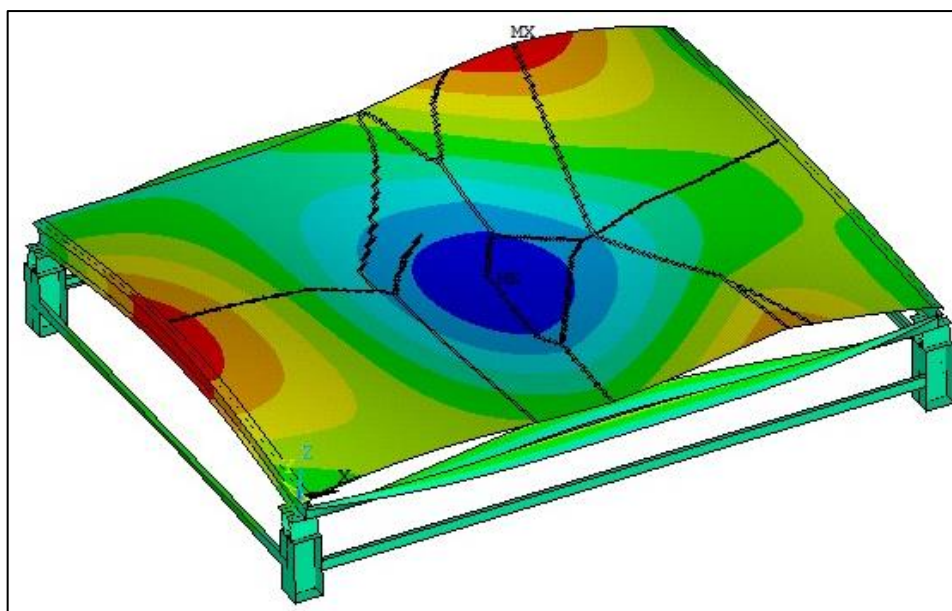


Figura 5.9 – Terceira forma modal numérica da laje de concreto da plataforma.
 Frequência= 22,90 Hz (Campuzano, 2016).

Na Tabela 5.5 é apresentada uma comparação entre as frequências obtidas numericamente, neste trabalho, e experimentalmente por Campuzano (2016), bem como a porcentagem da diferença entre os dois valores.

Tabela 5.5 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais obtidos da análise modal realizada na plataforma.

Resultados	1ª Frequência (Hz)	2ª Frequência (Hz)	3ª Frequência (Hz)
Numérico	3,363	15,67	23,63
Experimental (Campuzano, 2016)	3,365	15,34	22,90
Diferença	0,06%	2,11%	3,09%

Dos valores da Tabela 5.5 pode-se observar uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais para as três primeiras formas modais analisadas. Desta forma, pode-se considerar que o modelo numérico adotado representa bem a plataforma de ensaios dinâmicos, visto que os resultados obtidos numericamente foram bem próximos dos resultados obtidos experimentalmente.

Também é realizada análise modal da estrutura com adição da camada de MVE de dois, três e quatro centímetros de espessura e obtidas as três primeiras frequências. As frequências obtidas estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados das três primeiras frequências da plataforma com adição da camada de MVE.

Espessura da camada de MVE	1ª Frequência (Hz)	2ª Frequência (Hz)	3ª Frequência (Hz)
2 cm	4,709	17,167	23,776
3 cm	4,805	17,247	23,780
4 cm	4,896	17,363	24,555

Da Tabela 5.6 é possível notar que houve um aumento na frequência da plataforma, isto se deve ao fato de a camada de MVE proporcionar um aumento na rigidez da estrutura.

5.5 – ANÁLISE ESTÁTICA

A análise estática calcula os efeitos das condições de carga permanente numa estrutura, não sendo considerados os efeitos de inércia e de amortecimento, assim como aqueles causados por cargas dinâmicas. No entanto, uma análise estática pode incluir efeitos inerciais permanentes, como gravidade e velocidade rotacional, e cargas dinâmicas podem ser aproximadas por cargas estáticas equivalentes (Lima, 2007).

Foi realizada a análise estática na estrutura sem e com a camada de dois, três e quatro centímetros, para analisar o comportamento da estrutura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.7. Vale ressaltar que foi analisado o nó central (nó 30501), pois é o nó que apresenta o maior deslocamento.

Tabela 5.7 – Resultado da análise estática da plataforma sem e com a camada de MVE com as diferentes espessuras adotadas.

	Deslocamento máximo nas análises estáticas (mm)
Plataforma sem controle	28,29 mm
Plataforma com camada de MVE de 2 cm	14,04 mm
Plataforma com camada de MVE de 3 cm	13,45 mm
Plataforma com camada de MVE de 4 cm	12,93 mm

Pela Tabela 5.7 pode-se observar que a camada de MVE também atua na estrutura estática diminuindo o deslocamento estático. O MVE atua distribuindo melhor as tensões e deformações na laje, assim como os deslocamentos e, dessa forma, o deslocamento do ponto central seja menor que sem essa camada.

5.6 – APLICAÇÃO DA CARGA NO ANSYS

A carga é aplicada na laje da plataforma de forma que represente uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro, pois o intuito era analisar várias pessoas realizando movimentos na laje, levando em consideração um determinado espaço livre.

Quando a análise simula o carregamento de uma pessoa é aplicada somente em um nó localizado no centro da laje da plataforma (nó 30501), como mostrado na Figura 5.10.

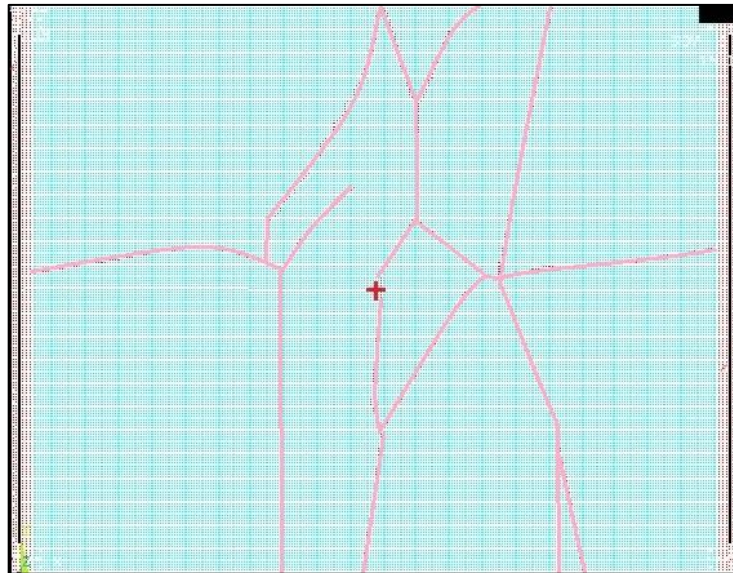


Figura 5.10 - Ponto de aplicação da carga para uma pessoa no centro da laje.

Para análises que simulam três pessoas em movimento a carga é aplicada em três nós distribuídos no centro da laje (nós 15192, 30501, 45810), como mostrado na Figura 5.11.

E por fim, quando a análise simula o movimento de cinco pessoas a carga é aplicada em cinco nós distribuídos no centro da laje da plataforma (nós 15192, 30429, 30501, 30560, 45810), a Figura 5.12 ilustra o local dos cinco pontos de aplicação da carga.

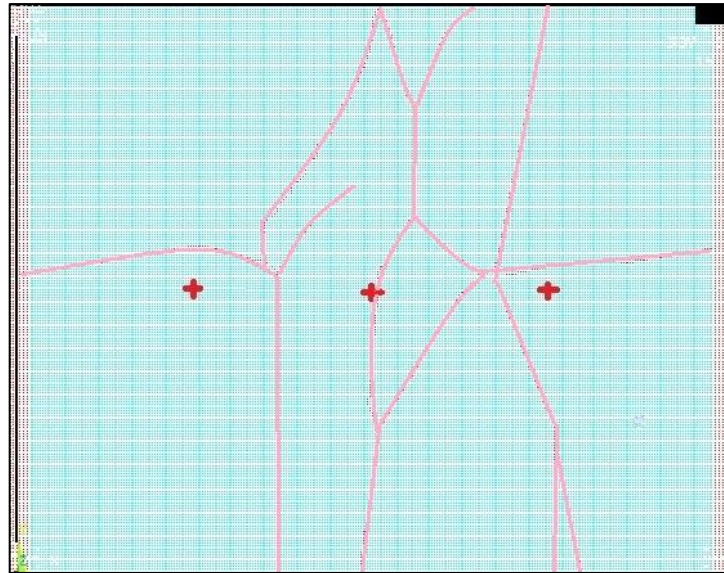


Figura 5.11 - Pontos de aplicação da carga para três pessoas distribuídas no centro da laje.

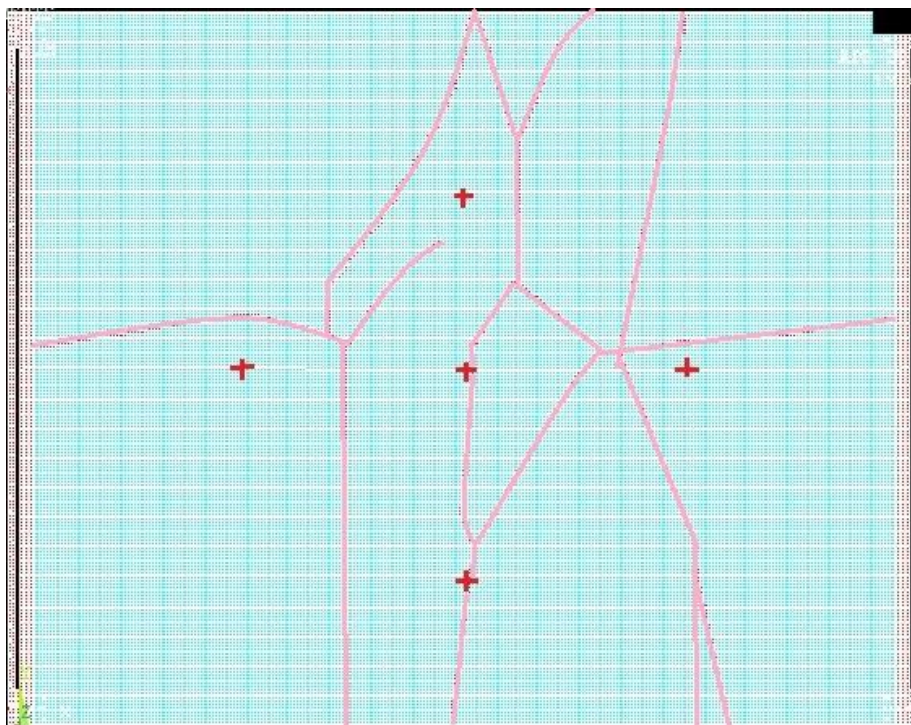


Figura 5.12 - Pontos de aplicação da carga para cinco pessoas distribuídas no centro da laje.

Para todas as análises realizadas, os resultados são analisados considerando o nó central da plataforma, nó 30501, pois é o nó que apresenta o maior deslocamento, representando a pior situação.

A seguir são mostrados com detalhes os resultados obtidos das análises no domínio do tempo sem e com controle para cada carregamento utilizado.

5.7 – CARREGAMENTO HARMÔNICO

São realizadas análises no domínio do tempo da plataforma com carregamento harmônico representado pela Equação (5.1), apresentada a seguir:

$$f(t) = P_0 \sin \omega t \quad (5.1)$$

Onde:

P_0 é a amplitude da força.

ω é a frequência da excitação.

Nas análises numéricas a amplitude da força P_0 adotada é de 800 N, já a frequência de excitação ω adotada é a mesma da primeira frequência natural da plataforma ($f = 3,363$ Hz). São realizadas análises com carregamento na estrutura sem e com a camada de material viscoelástico.

É aplicada a carga na laje durante um intervalo de 10 segundos, retirada a carga deixa-se a laje vibrar livremente até completar os 50 segundos. Esse intervalo de tempo é subdividido em intervalos de tempo ou passos de tempo de 0,25s. Esse carregamento é aplicado simulando uma, três e cinco pessoas realizando o movimento sobre a plataforma.

5.7.1 – Carregamento harmônico produzido por uma pessoa no centro da laje

Considerando os parâmetros descritos para o carregamento harmônico, nesta sessão o carregamento é aplicado apenas no nó central (nó 30501), simulando uma pessoa no centro da laje da plataforma.

É realizada, primeiramente, a análise no domínio do tempo na plataforma sem controle, a fim de avaliar o comportamento da estrutura frente a um carregamento dinâmico e, posteriormente, são feitas análises com adição da camada de MVE de dois, três e quatro centímetros de espessura.

É feita uma comparação dos resultados obtidos das análises da estrutura sem e com a camada da espuma de poliuretano com as diferentes espessuras adotadas. Os resultados obtidos dessa comparação são mostrados nos gráficos dos deslocamentos e das acelerações das Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente.

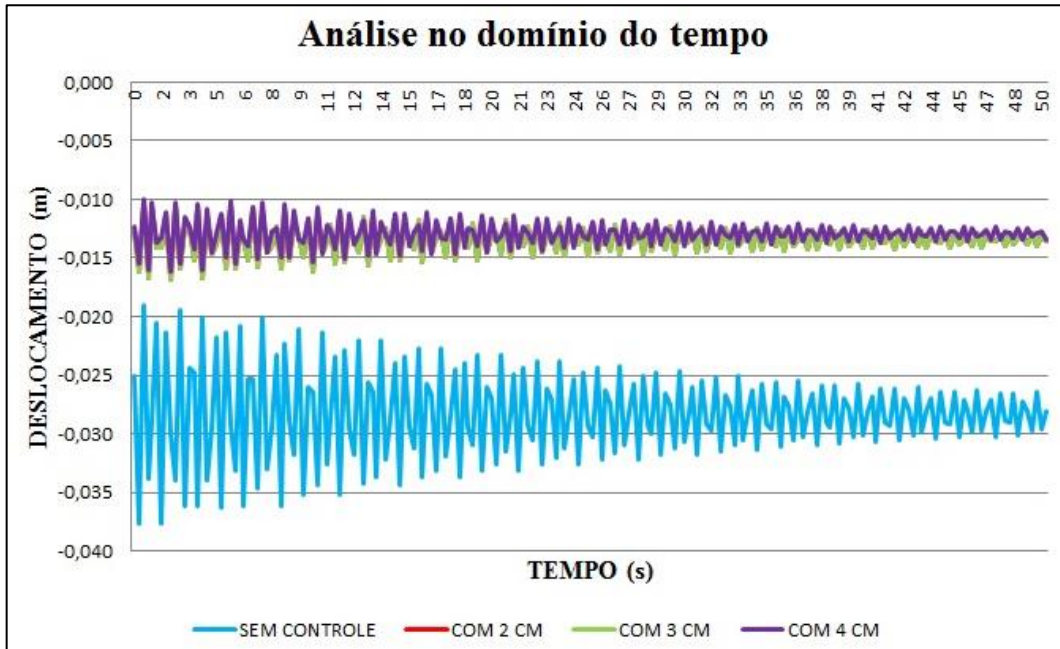


Figura 5.13 – Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

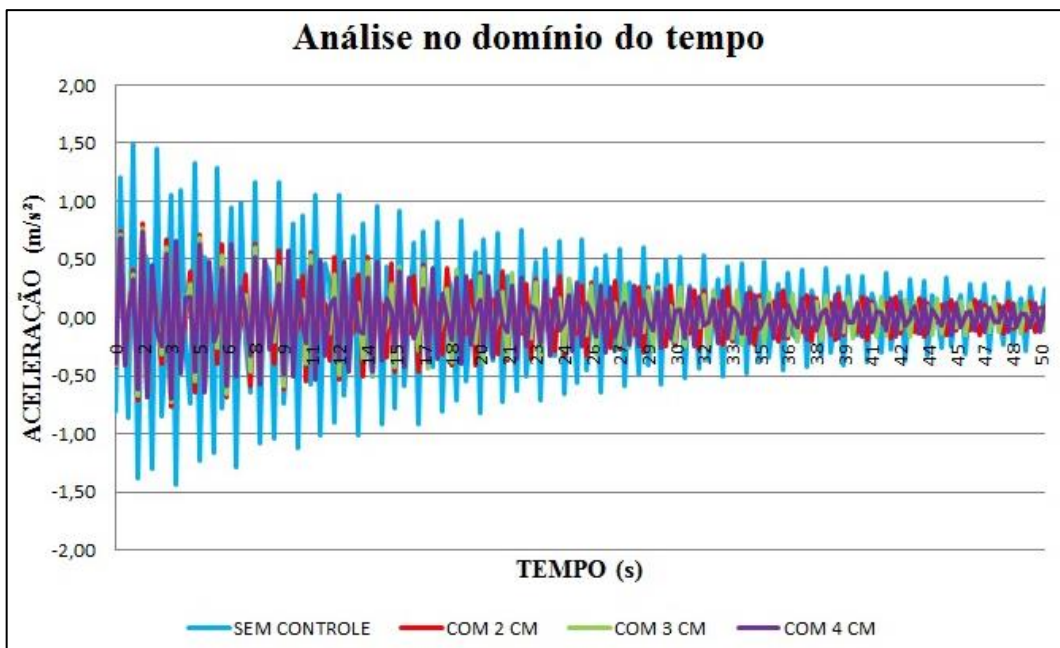


Figura 5.14 – Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Das Figuras 5.13 e 5.14 pode-se observar que a adição da camada da espuma de poliuretano reduz as amplitudes tanto dos deslocamentos como das acelerações. A partir do momento de aplicação da carga a espuma de poliuretano começa a atuar na estrutura reduzindo as amplitudes.

Na tabela 5.8 são apresentados os valores das acelerações RMS para cada camada adotada, para melhor visualização do quanto os valores das amplitudes das acelerações foram reduzidos. Desta tabela é possível notar que a adição da camada de MVE reduz as acelerações em 48,3% já com a espessura de dois centímetros e que à medida que se aumenta a espessura da camada essa redução chega a 52,3%.

Tabela 5.8 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento harmônico.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,596	0,308	0,295	0,284

Como se pode observar à medida que aumenta a espessura da camada do material viscoelástico maior é a redução nas amplitudes. Com isso, optou-se em não aumentar a espessura das camadas, portanto não são feitas mais análises numéricas com espessuras maiores, sendo realizadas análises apenas com dois, três e quatro centímetros de espessura.

Analisando os resultados obtidos para as análises no domínio do tempo percebe-se que a espessura da camada que proporcionou uma maior redução nas amplitudes tanto de deslocamentos quanto das acelerações foi a de quatro centímetros. Portanto, foi realizada análise, no domínio do tempo, da plataforma, com adição da camada de quatro centímetros.

Primeiramente é feita análise na plataforma sem controle, somente a estrutura original e posteriormente, é feita análise na plataforma com adição da camada de MVE com quatro centímetros de espessura. Utilizou-se apenas a espessura de quatro centímetros, pois foi a que apresentou maior redução nas amplitudes tanto de deslocamento quanto de aceleração para as análises no domínio do tempo.

Na Figura 5.15 é apresentada a comparação dos resultados obtidos das análises no domínio da frequência para estrutura sem e com a camada de quatro centímetros de espessura.

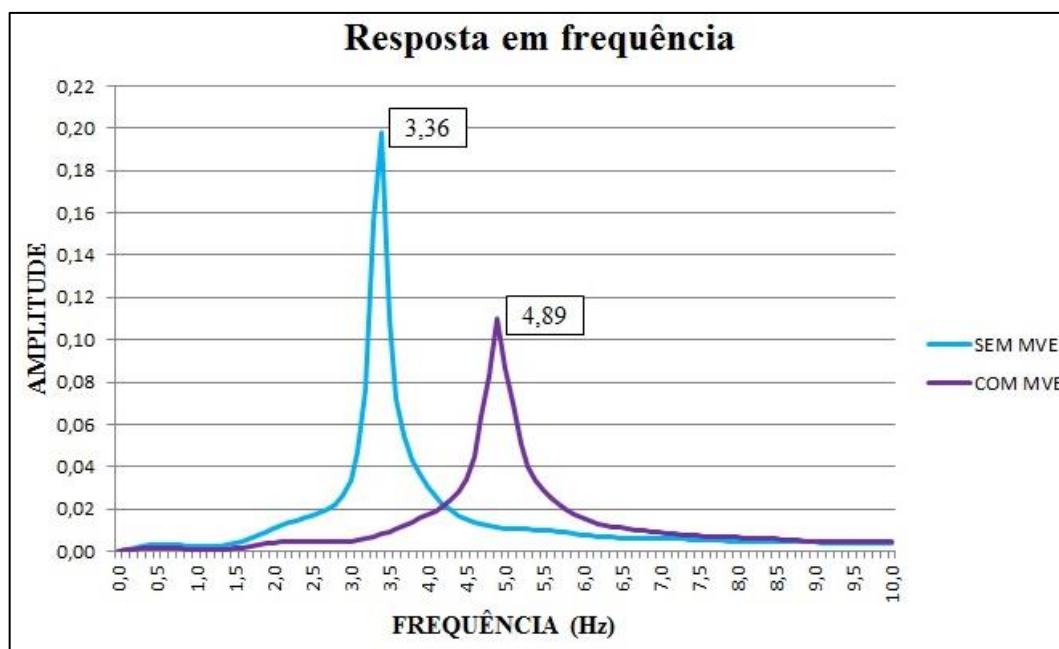


Figura 5.15 - Resposta em função da frequência. Carga harmônica produzida por uma pessoa no centro da plataforma.

Da Figura 5.15 observa-se que a adição da camada de quatro centímetros de MVE proporcionou uma redução da resposta em frequência passando da amplitude de 0,1981, com uma frequência de 3,36 Hz, para uma amplitude de 0,1098, com uma frequência de 4,89, ou seja, uma redução de aproximadamente 44,57%. A adição da camada de MVE além de reduzir a resposta em frequência ainda torna a estrutura mais rígida, pois proporciona um aumento na frequência.

5.7.2 – Carregamento harmônico produzido por três pessoas no centro da laje

Nesta série de análises é utilizada a mesma carga que simula o carregamento harmônico de uma pessoa no centro da laje da plataforma, só que agora com três pessoas distribuídas no centro da laje, conforme distribuição apresentada na Figura 5.11.

É realizada, primeiramente, a análise no domínio do tempo na plataforma sem controle, a fim de avaliar o comportamento da estrutura frente a um carregamento dinâmico e,

posteriormente, foram feitas análises com adição da camada de MVE de dois, três e quatro centímetros de espessura. Mesmo procedimento usado para carregamento harmônico de uma pessoa.

Após a realização das análises é feita uma comparação dos resultados obtidos sem e com a camada do MVE. Os resultados obtidos dessa comparação são mostrados nos gráficos dos deslocamentos e das acelerações das Figuras 5.16 e 5.17, respectivamente.

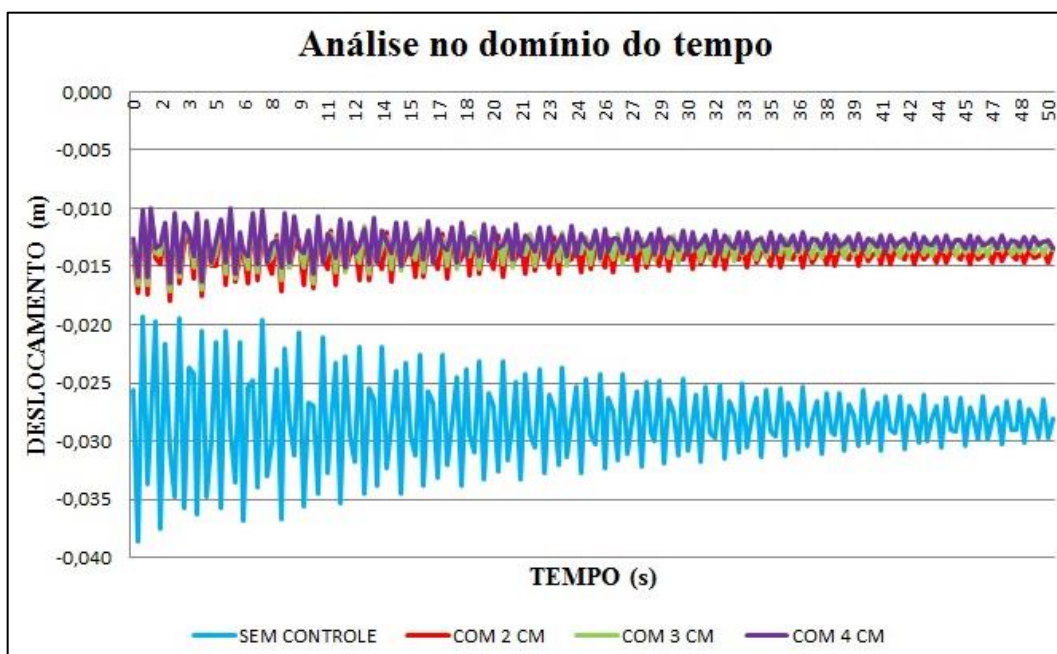


Figura 5.16 – Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Da Figura 5.16 pode-se observar que a adição da camada da espuma de poliuretano reduz as amplitudes de deslocamentos, o que antes era em torno de 28 centímetros agora está em torno de 14 centímetros, isso se deve ao fato de o MVE atuar na estrutura estática diminuindo o deslocamento estático, como já foi explicado anteriormente. À medida que se aumenta a espessura da camada maior é a redução das amplitudes. A espessura que proporciona maior redução nas amplitudes dos deslocamentos é a de quatro centímetros.

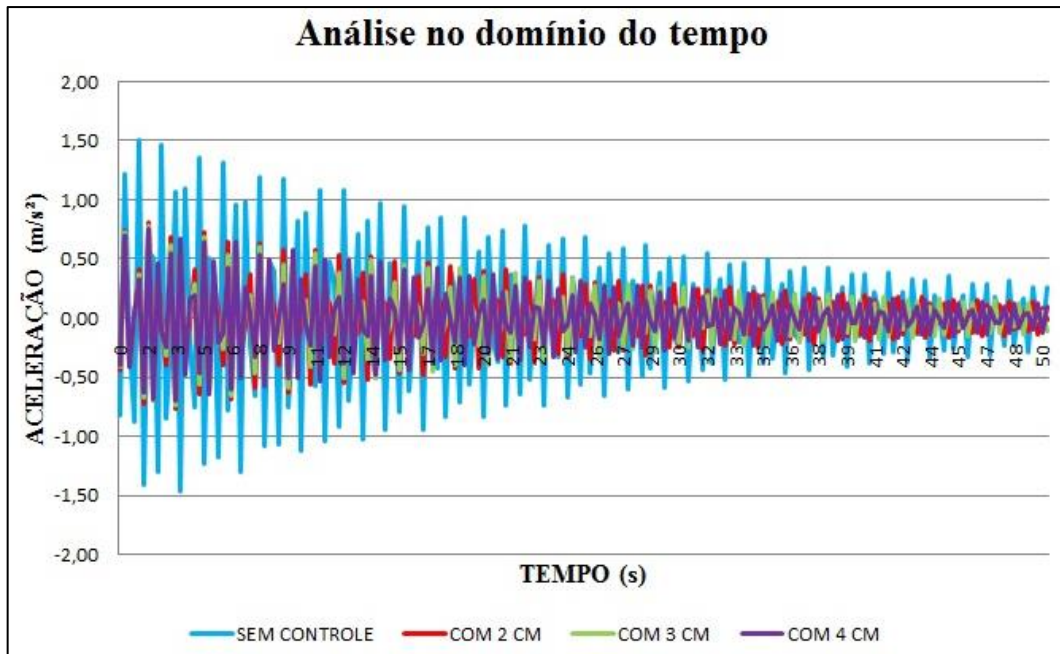


Figura 5.17 – Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Com relação às acelerações, na Figura 5.17 pode-se observar que com a adição da camada da espuma de poliuretano as amplitudes também são reduzidas, na Tabela 5.9 são apresentados os valores de aceleração RMS para cada espessura adotada, para uma melhor visualização do quanto foi reduzido. E pode-se observar que houve uma redução de 48,5% já com adição da camada de dois centímetros, chegando a 52,6% com a camada de quatro centímetros de espessura.

Tabela 5.9 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com três pessoas realizando movimento harmônico.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,606	0,312	0,299	0,287

5.7.3 – Carregamento harmônico produzido por cinco pessoas no centro da laje

Nesta série de análises é utilizada a mesma carga que simula o carregamento harmônico, só que agora com cinco pessoas distribuídas no centro da laje.

É realizada a mesma sequência de análises para cinco pessoas, ou seja, primeiramente aplicou-se o carregamento na estrutura sem controle e, posteriormente aplicou-se na plataforma com adição da camada de dois, três, e quatro centímetros. As análises foram realizadas e comparadas entre si, nas Figuras 5.18 e 5.19 são apresentadas a comparação feita tanto para o deslocamento como para a aceleração, respectivamente.

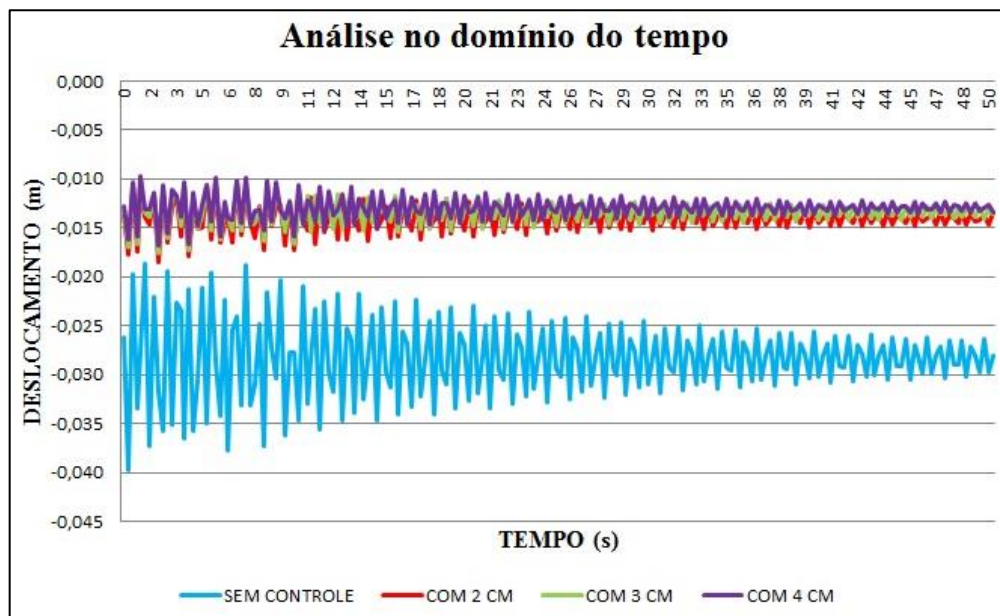


Figura 5.18 – Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Carregamento harmônico de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

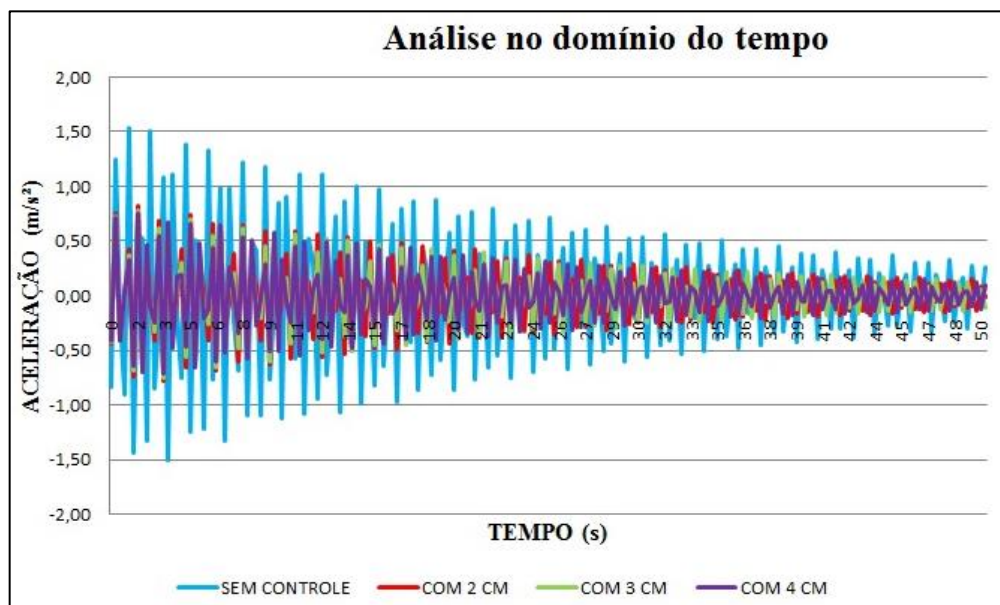


Figura 5.19 – Histórico de acelerações verticais – Nó central. Carregamento harmônico de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Da Figura 5.18 pode-se observar que a adição da camada da espuma de poliuretano reduz as amplitudes de deslocamento da estrutura quando solicitada com carregamento harmônico de cinco pessoas. Como mencionado anteriormente, este fato acontece devido ao amortecedor atuar na estrutura reduzindo o deslocamento estático. Observa-se também que à medida que se aumenta a espessura da camada maior é a redução das amplitudes, sendo a maior para a camada de quatro centímetros.

Com relação à aceleração, na Figura 5.19 pode-se observar que com a adição da camada da espuma de poliuretano as amplitudes também são reduzidas. Pode-se observar com mais clareza na Tabela 5.10, onde são apresentadas as acelerações RMS de cada espessura adotada.

Tabela 5.10 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com cinco pessoas realizando movimento harmônico.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,620	0,319	0,304	0,291

Da Tabela 5.10 é possível notar que com a adição da camada de MVE as amplitudes foram reduzidas em 48,5% já com a espessura de dois centímetros, chegando a 53% com a camada de quatro centímetros.

5.8 – CARREGAMENTO HUMANO

Neste trabalho, é dedicada maior atenção à atividade humana de pular, por ser uma atividade que produz carregamentos críticos (Bachmann *et al*, 1987), possibilitando assim uma análise da plataforma de ensaios dinâmicos em situações bastante desfavoráveis com relação à vibração induzida por atividades humanas.

É aplicado um carregamento dinâmico simulando a atividade de pular representada pela Equação 3.27, sugerida por Bachmann *et al*. (1987).

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \text{sen}\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) & \text{para } t \leq t_p \\ 0 & \text{para } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (3.27)$$

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).

Para as análises numéricas realizadas é adotada uma massa corporal média para as pessoas no valor de 80 kg. Assim, o peso G considerado para todas as situações é de 800 N. Na simulação adota-se para a frequência de excitação dinâmica o mesmo valor da frequência do primeiro modo fundamental da estrutura, que foi encontrado na análise modal, ou seja, $f_s = 3,363 \text{ Hz}$. Arbitra-se uma relação $t_p/T_p = 0,5$, isto é, considera-se que o tempo de contato é metade do período do carregamento, chegando-se a $K_p = 3,0$.

Pela relação $T_p = \frac{1}{f_s}$ tem-se $T_p = 0,297\text{s}$, com isso $t_p = 0,149\text{s}$. Com isso, têm-se todos os dados para adotar a função do carregamento que simula o pulo contínuo mostrado na Figura 5.20.

O carregamento é aplicado na laje durante 10s, intervalo de tempo suficiente para realização de uma rápida sequência de pulos consecutivos e rápidos. Após os 10 segundos deixa-se a laje vibrar livremente até completar os 50 segundos. Esse intervalo de tempo é subdividido em intervalos de tempo ou passos de tempo de 0,25s. Esse carregamento é aproveitado para uma, três e cinco pessoas pulando sobre a plataforma.

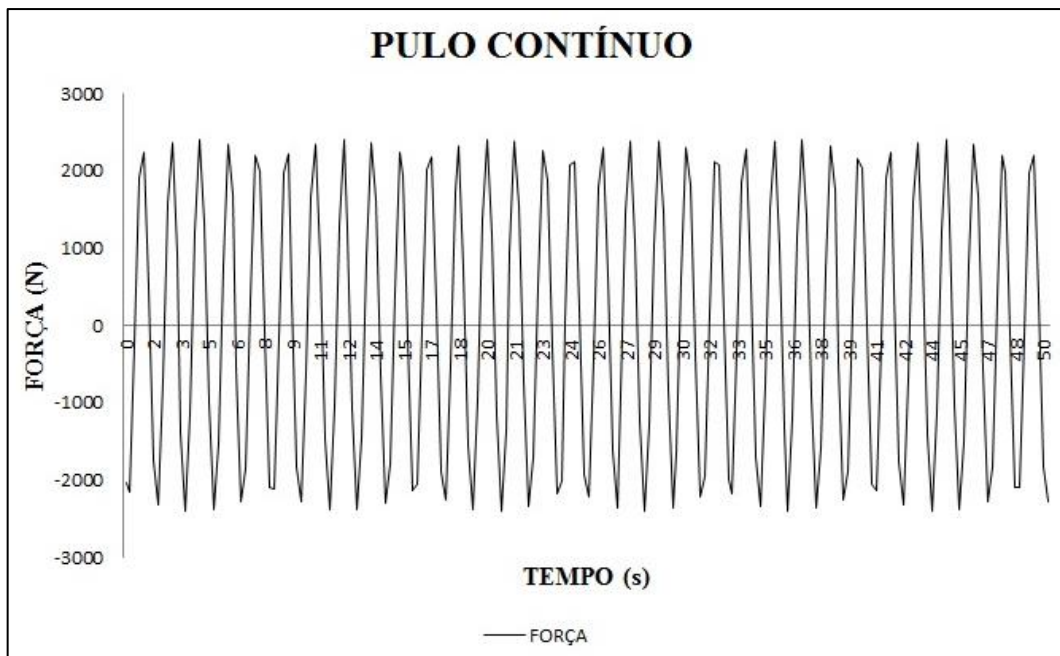


Figura 5.20 – Gráfico da função do carregamento usado para simular o pulso.

5.8.1 – Pulo contínuo produzido por uma pessoa no centro da laje

Para a carga que simula o pulso contínuo de uma pessoa no centro da laje são realizadas análises seguindo a mesma sequência usada para o carregamento harmônico. Primeiramente, é realizada análise na plataforma sem controle para se analisar o comportamento da estrutura frente a esse carregamento dinâmico e, posteriormente, as análises foram realizadas na plataforma com adição da camada de MVE de diferentes espessuras.

É feita uma comparação dos resultados obtidos das análises da plataforma sem e com a camada de MVE com as diferentes espessuras adotadas e mostradas nas Figuras 5.21 e 5.22 para os deslocamentos e as acelerações, respectivamente.

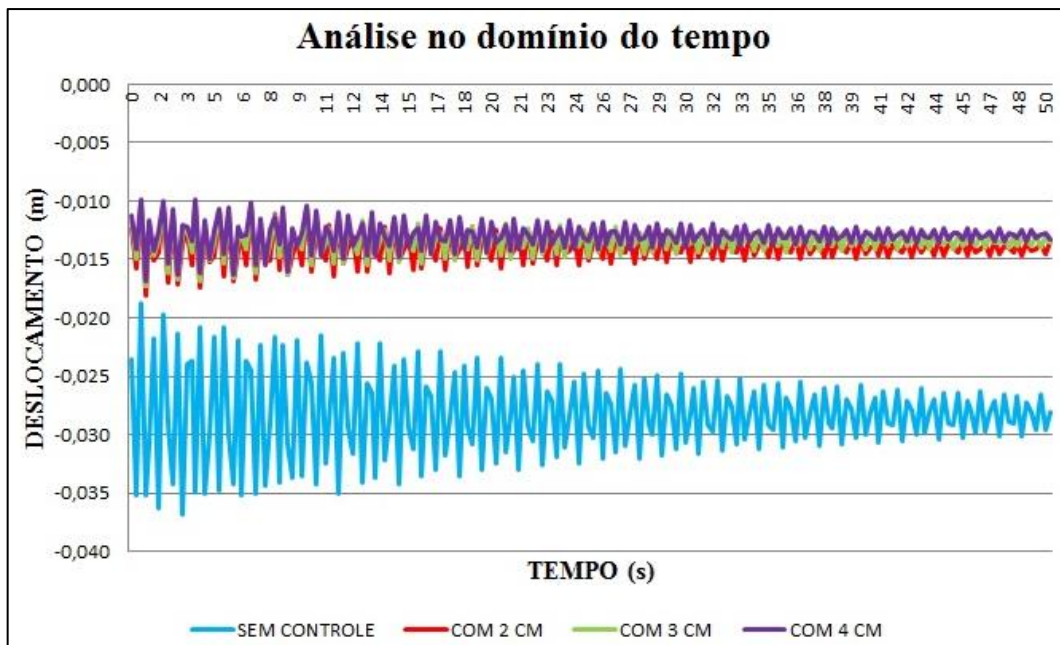


Figura 5.21 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

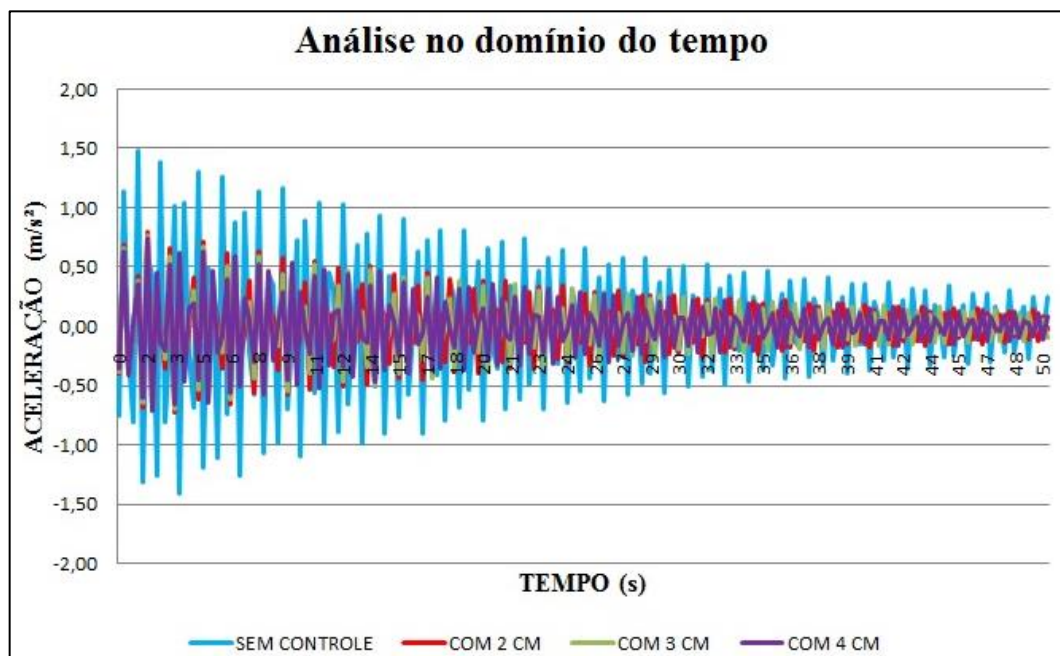


Figura 5.22 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Da Figura 5.21 pode-se observar que as amplitudes dos deslocamentos da estrutura são reduzidas após a adição da camada de espuma de poliuretano. Nota-se essa redução a partir do momento de aplicação da carga, pois o MVE age na estrutura estática reduzindo o deslocamento, e à medida que se aumenta a espessura da camada da espuma de poliuretano as amplitudes diminuem ainda mais.

Com relação às amplitudes das acelerações, estas também são reduzidas e na Tabela 5.11 é possível notar com mais clareza, pois são mostrados os valores das acelerações RMS para todas as camadas analisadas. Portanto as amplitudes das acelerações são reduzidas 48,4% com a adição da camada de dois centímetros de espessura, chegando a reduzir 52,4% com a camada de quatro centímetros.

Tabela 5.11 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento de pular.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,578	0,298	0,285	0,275

Assim como foi feito para a carga harmônica, com a carga que simula o pulo produzido por uma pessoa no centro da plataforma também é realizada, primeiramente, análise na plataforma sem controle, somente a estrutura original e posteriormente, é feita análise na plataforma com adição da camada de MVE com quatro centímetros de espessura.

Na Figura 5.23 é apresentada a comparação dos resultados obtidos das análises no domínio da frequência para estrutura sem e com a camada de quatro centímetros de espessura.

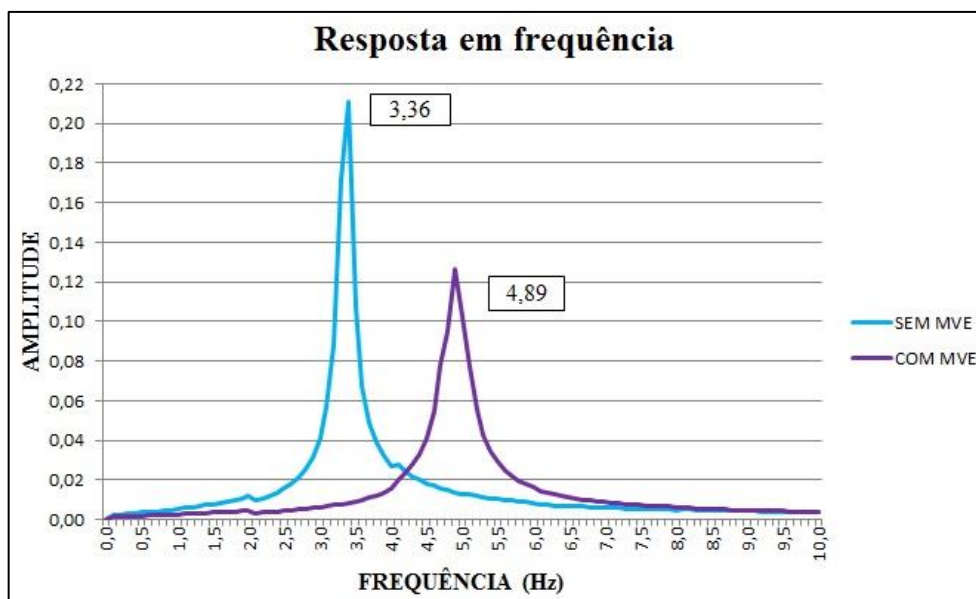


Figura 5.23 – Resposta em função da frequência. Pulo produzido por uma pessoa no centro da plataforma.

Da Figura 5.23 observa-se que a adição da camada de quatro centímetros de MVE proporcionou uma redução da resposta em frequência passando da amplitude de 0,2112, com uma frequência de 3,36 Hz, para uma amplitude de 0,1265, com uma frequência de 4,89, ou seja, uma redução de aproximadamente 40,10%.

Campuzano (2016) também realiza análises no domínio do tempo com carregamento que simula o pulso contínuo de uma pessoa no centro da laje com um amortecedor de massa sintonizada (AMS) acoplados à estrutura, para avaliar o desempenho do amortecedor frente à redução das vibrações. A Figura 5.24 mostra a resposta da estrutura para este carregamento em função da aceleração, para estrutura com um AMS acoplado. Ele não apresenta a resposta da estrutura em função dos deslocamentos para este carregamento.

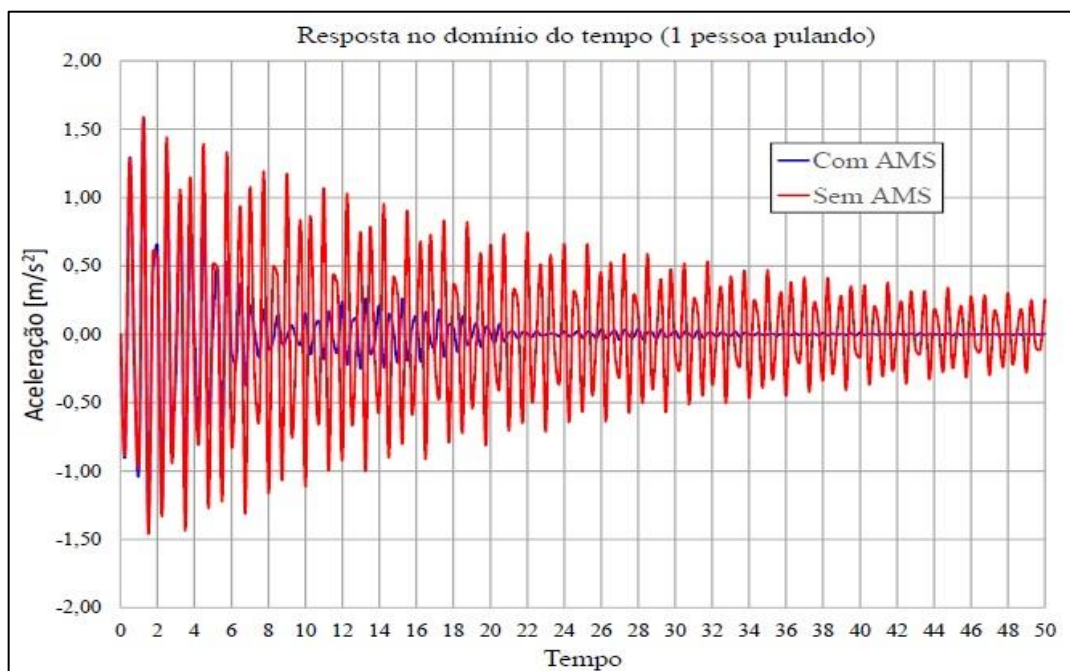


Figura 5.24 - Resposta no domínio do tempo em função da aceleração para uma pessoa pulando continuamente. Vibração forçada (Campuzano, 2016).

Na Figura 5.24 observa-se que o AMS controla bem as vibrações durante o tempo de atuação da força induzida. Uma vez terminada atuação da força externa o sistema de controle continua reduzindo as acelerações até chegar a zero aos 20 segundos. Pode-se observar que sem sistema de controle (linha vermelha) a plataforma apresenta vibrações consideráveis até os 50 segundos analisados.

Fazendo uma comparação das análises feitas com adição da camada de material viscoelástico com as análises realizadas por Campuzano (2016) que utilizou AMS percebe-se que, para o carregamento que simula o pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje, ambas as técnicas são eficazes pra reduzir as amplitudes dos deslocamentos e das acelerações, no entanto, nota-se que enquanto o AMS reduz as amplitudes de aceleração à zero, a adição da camada de espuma de poliuretano não reduz as amplitudes de aceleração à zero, mas a um valor muito próximo de zero. No entanto, o AMS é atua somente para uma frequência enquanto que o MVE atua numa faixa de frequência maior.

5.8.2 – Pulo contínuo produzido por três pessoas no centro da laje

Nesta série de análises é utilizada a mesma carga que simula o pulo contínuo de uma pessoa no centro da laje da plataforma, só que agora com três pessoas distribuídas no centro da laje, conforme distribuição apresentada na Figura 5.11.

Primeiramente, é realizada análise na plataforma sem controle para se analisar o comportamento da estrutura frente a esse carregamento dinâmico e, posteriormente, as análises foram realizadas na plataforma com adição da camada de MVE de diferentes espessuras.

É feita também uma comparação dos resultados obtidos das análises da estrutura sem e com adição do material viscoelástico, com as diferentes espessuras adotadas. As Figuras 5.25 e 5.26 mostram essa comparação dos deslocamentos e das acelerações respectivamente.

Na Figura 5.25 observa-se que com a adição da camada de material viscoelástico as amplitudes dos deslocamentos são reduzidas até 54%, redução proporcionada pela camada de quatro centímetros de espessura. É possível notar que à medida que se aumenta a camada de material viscoelástico maior a redução das amplitudes. Esse comportamento do MVE deve-se ao fato dele agir na estrutura distribuindo melhor as tensões e deformações na laje, assim como os deslocamentos.

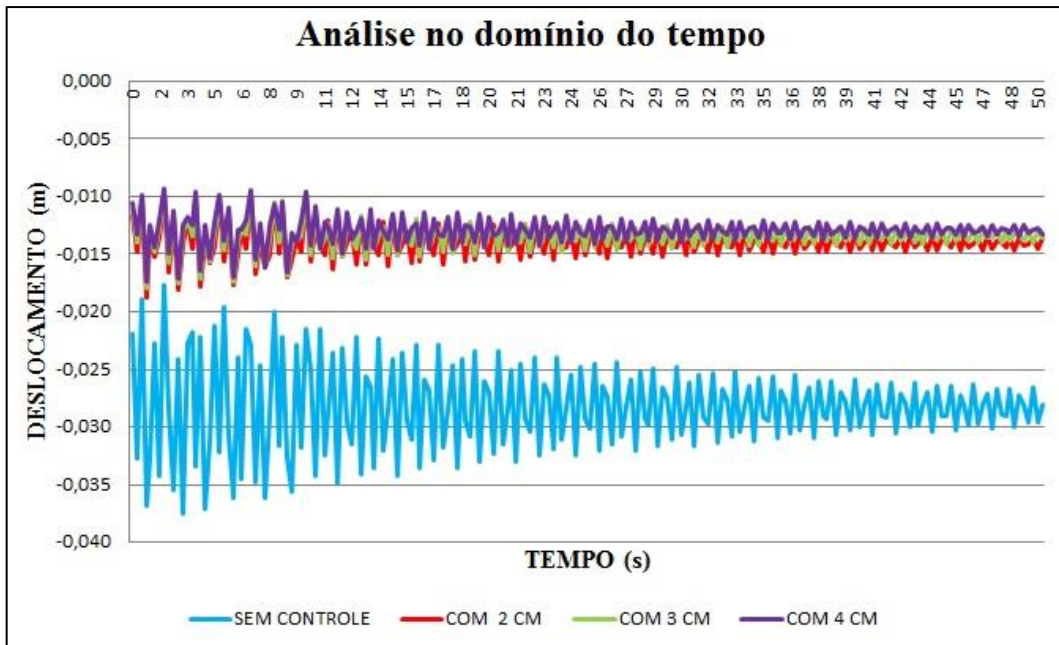


Figura 5.25 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

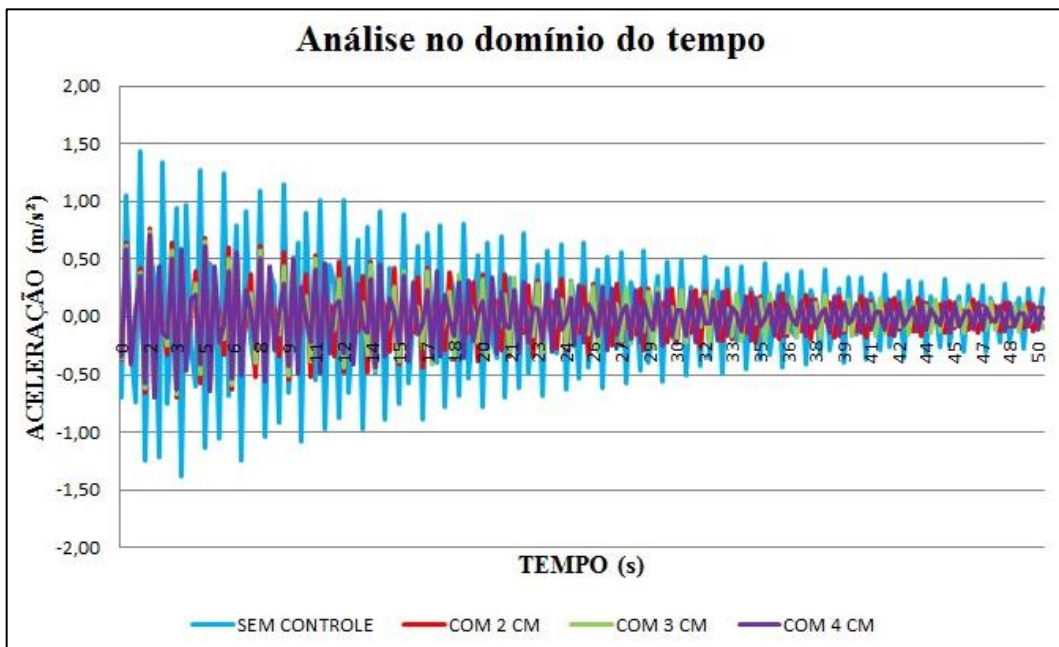


Figura 5.26 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de três pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

A Figura 5.26 mostra a comparação das análises em função das acelerações e é possível notar que com a adição da camada de material viscoelástico há uma redução nas amplitudes das acelerações. Na Tabela 5.12 são apresentadas as acelerações RMS para cada camada analisada, dessa tabela é possível observar com mais clareza que as

amplitudes das acelerações são reduzidas em 48,9% com adição da camada de dois centímetros, essa redução chega a 53,2% com a camada de quatro centímetros.

Tabela 5.12 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com três pessoas realizando movimento de pular.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,562	0,287	0,274	0,263

Campuzano (2016) também analisa a plataforma, com um AMS acoplado, com carregamento que simula três pessoas distribuídas no centro pulando continuamente e mostra os resultados somente em função das acelerações, Figura 5.27.

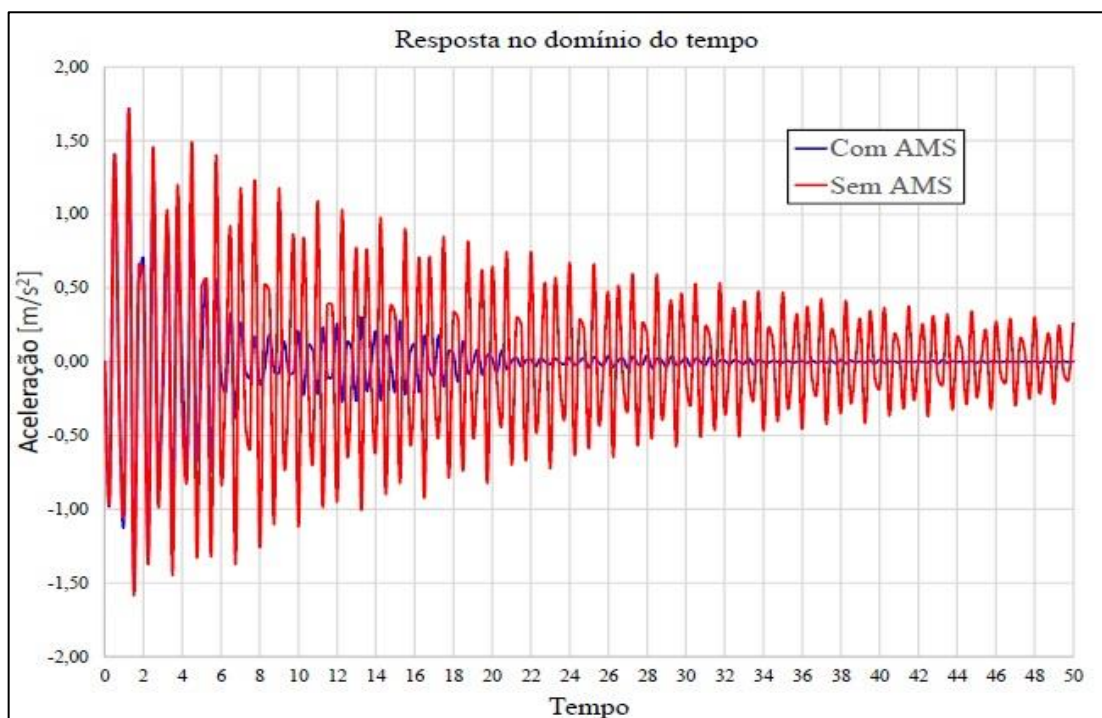


Figura 5.27 – Resposta no domínio do tempo para três pessoas pulando continuamente. Vibração forçada (Campuzano, 2016).

Na Figura 5.27 observa-se que o sistema de controle, representado pela linha azul, reduz bem as vibrações. Em linha vermelha (sem AMS) as magnitudes das acelerações ainda são consideráveis até os 50 segundos analisados.

Comparando os resultados obtidos das análises com adição da espuma de poliuretano com as análises com um AMS acoplado percebe-se que ambos são eficazes para reduzir amplitudes de aceleração, porém a adição da camada do material viscoelástico não reduz as amplitudes de aceleração à zero, enquanto que o AMS sim, já aos 20 segundos de análises. Porém o MVE tem a capacidade de atuar numa faixa de frequência maior.

5.8.3 – Pulo contínuo produzido por cinco pessoas no centro da laje

Para completar a série de análises feitas com carregamento dinâmico que simula o pulo contínuo são realizadas análises numéricas no domínio do tempo com cinco pessoas pulando distribuídas no centro da plataforma, conforme a distribuição mostrada na Figura 5.12.

Seguindo a mesma sequência de análises é realizada, primeiramente, uma análise na estrutura sem controle, apenas com a estrutura para analisar o comportamento da estrutura frente a esse carregamento dinâmico. Posteriormente são realizadas análises na plataforma com adição da camada de poliuretano com espessuras variadas e é feita uma comparação dos resultados obtidos.

As comparações dos resultados obtidos das análises da estrutura sem e com adição do material viscoelástico são mostradas nas Figuras 5.28 e 5.29 para os deslocamentos e acelerações, respectivamente.

Da Figura 5.28 percebe-se facilmente que há uma redução nas amplitudes dos deslocamentos com a adição da camada da espuma de poliuretano devido a capacidade do MVE atuar na estrutura distribuindo melhor as tensões e deformações, conseqüentemente reduzindo os deslocamentos. Observa-se também que a camada de quatro centímetros de espessura é a que proporciona a maior redução nas amplitudes.

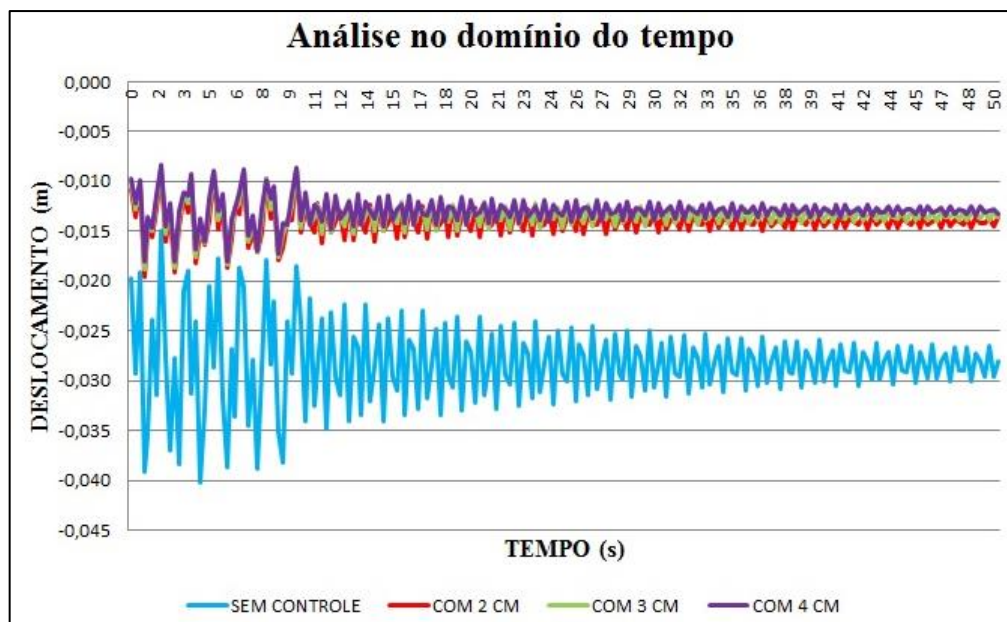


Figura 5.28 – Histórico de deslocamentos verticais – Nó central. Pulo contínuo de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

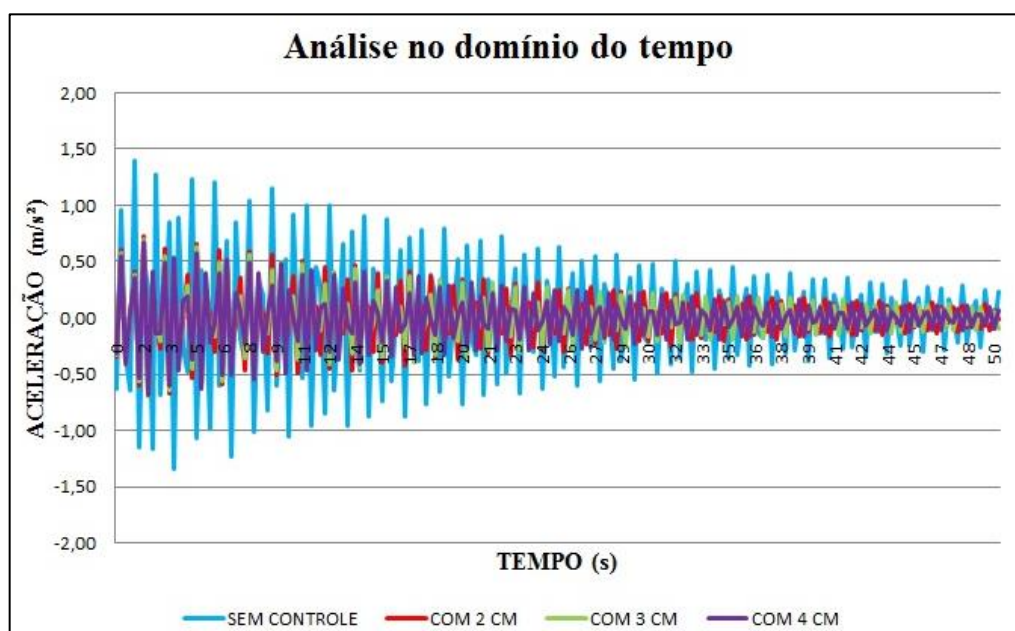


Figura 5.29 - Histórico de acelerações verticais – Nó central. Pulo contínuo de cinco pessoas no centro da laje. Comparação de todos os resultados obtidos.

Para as acelerações (Figura 5.29), nota-se que a adição da camada de material viscoelástico reduz as amplitudes e que a camada de quatro centímetros é a que apresenta uma maior redução. Na Tabela 5.13 estão apresentadas as acelerações RMS de todas as camadas adotadas nas análises e observando a tabela é fácil notar que com a adição da camada de MVE há uma redução de 49,4% com a camada de dois centímetros chegando a 54% cm a camada de quatro centímetros.

Tabela 5.13 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com cinco pessoas realizando movimento de pular.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,540	0,273	0,260	0,248

5.9 – CARGA DE IMPACTO

Por fim, é realizada análise no domínio do tempo na estrutura com a carga que simula o impacto de uma pessoa no centro da plataforma. A carga de impacto é aplicada durante um intervalo de um segundo seguido de vibração livre até completar 50 segundos. É aplicada uma carga de 3000N, no sentido negativo do eixo Z, de modo que simule o impacto de uma pessoa de aproximadamente 100 kg, no centro da laje, no nó 30501. Para este carregamento as análises são feitas apenas para uma pessoa no centro da plataforma.

5.9.1 – Impacto produzido por uma pessoa no centro da laje

Primeiramente é feita análise na plataforma sem controle, a fim de avaliar o comportamento da estrutura diante desse carregamento. Posteriormente, são feitas análises na plataforma com adição da camada de MVE de espessuras diferentes.

Seguindo a mesma sequência das análises dos outros tipos de carregamento, é feita uma comparação com os resultados das análises da estrutura sem e com a camada do material viscoelástico com dois, três e quatro centímetros de espessura. Os resultados obtidos dessa comparação são mostrados nos gráficos dos deslocamentos e das acelerações, nas Figuras 5.30 e 5.31, respectivamente.

Na Figura 5.30 observa-se que com a adição da camada de material viscoelástico as amplitudes dos deslocamentos são reduzidas mais da metade e que à medida que aumenta a espessura da camada aumenta também a redução das amplitudes dos deslocamentos.

A Figura 5.31 mostra a comparação das acelerações e é possível notar que com a adição da camada de material viscoelástico também reduz essas amplitudes. Na Tabela 5.14 são

apresentadas os valores das acelerações RMS e é possível observar o quanto a adição da camada de MVE reduz as amplitudes das acelerações, 50,5 % com adição da camada de dois centímetros e 54,3% com a camada de quatro centímetros, comprovando que a medida que se aumenta a espessura da camada de material viscoelástico maior é a redução das amplitudes.

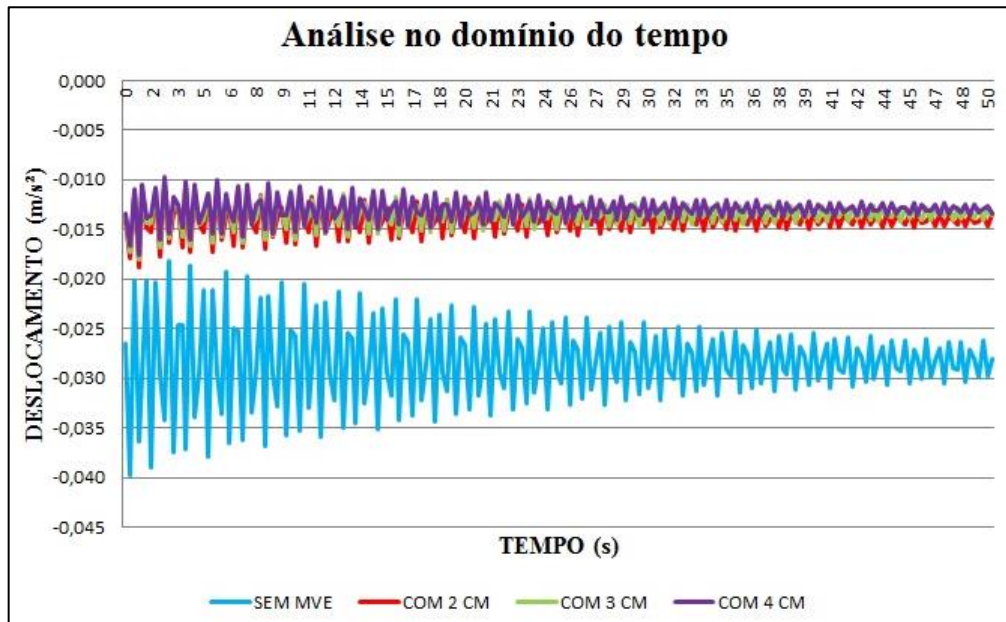


Figura 5.30 - Histórico de deslocamentos verticais – Nó central - Impacto seguido de vibração livre. Comparação de todos os resultados obtidos.

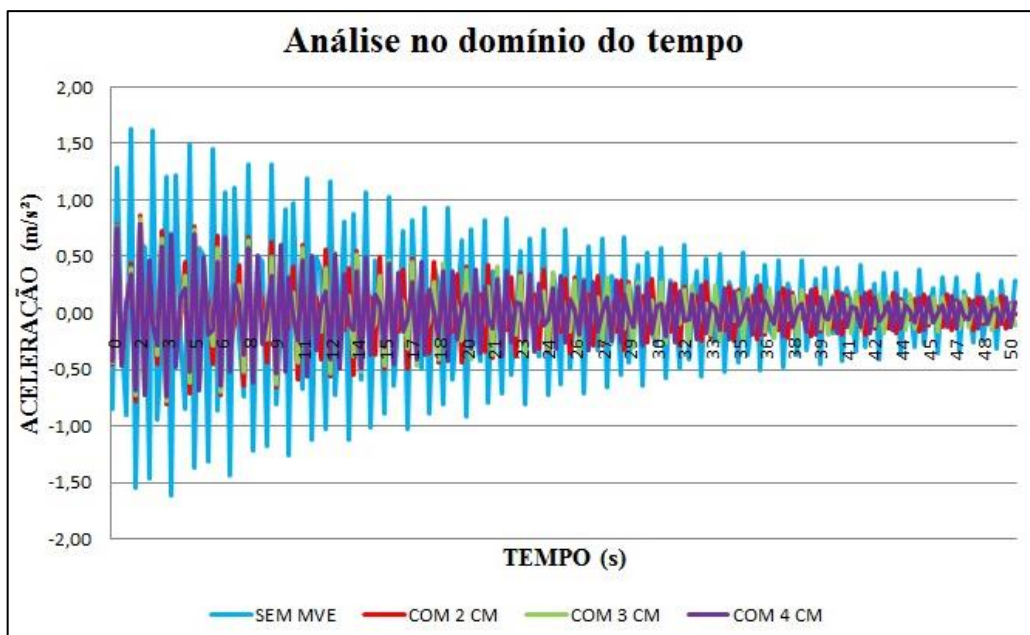


Figura 5.31 – Histórico de acelerações verticais – Nó central - Impacto seguido de vibração livre. Comparação de todos os resultados obtidos.

Tabela 5.14 – Aceleração RMS de todas as espessuras adotadas para camada de MVE adicionada à plataforma com uma pessoa realizando movimento de impacto.

	Plataforma sem controle	Plataforma com camada de MVE de 2 cm	Plataforma com camada de MVE de 3 cm	Plataforma com camada de MVE de 4 cm
Aceleração RMS	0,665	0,329	0,315	0,304

Para a carga de impacto ocorreu da mesma forma, primeiramente é feita análise na plataforma sem controle, somente a estrutura original e posteriormente, é feita análise na plataforma com adição da camada de MVE com quatro centímetros de espessura.

Na Figura 5.32 é apresentada a comparação dos resultados obtidos das análises no domínio da frequência para estrutura sem e com a camada de quatro centímetros de espessura.

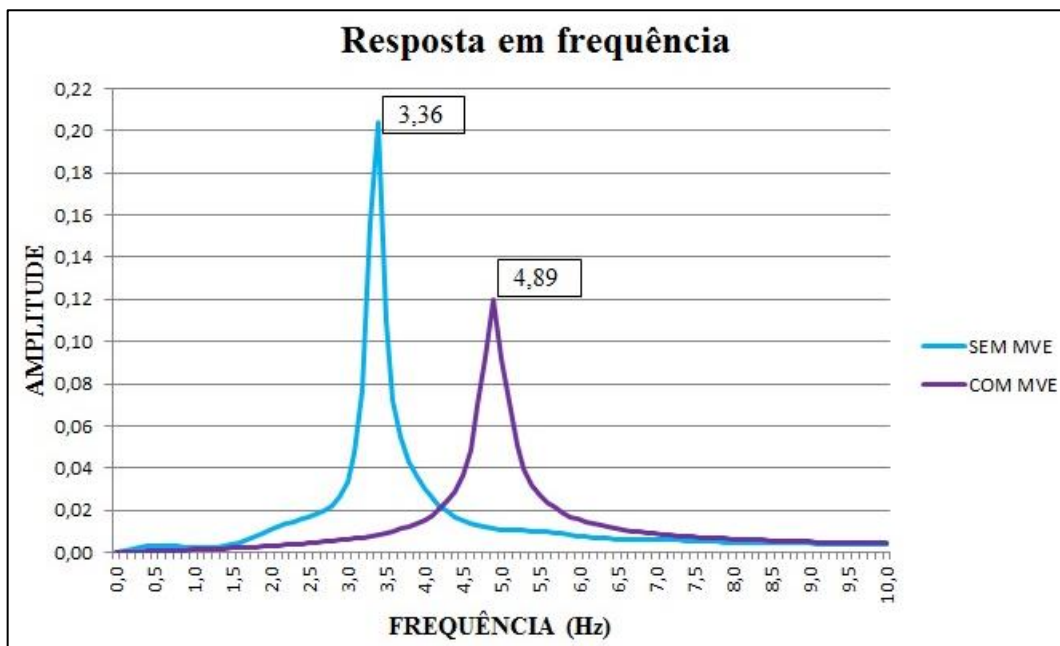


Figura 5.32 - Resposta em função da frequência. Impacto de uma pessoa no centro da plataforma.

Da Figura 5.32 percebe-se que há uma redução da resposta em frequência com a adição da camada de quatro centímetros de MVE. A amplitude que era 0,2039, com uma frequência de 3,36 Hz, passa a ser de 0,1202, com uma frequência de 4,89, ou seja, uma redução de aproximadamente 41,05%.

Campuzano (2016) realizou análises com o mesmo tipo de carregamento, que simula impacto de uma pessoa no centro da plataforma, com um amortecedor de massa

sintonizado (AMS) acoplados à estrutura, para avaliar desempenho do AMS frente à redução das vibrações. As Figuras 5.33 e 5.34 mostram as respostas da estrutura para este carregamento em função dos deslocamentos e das acelerações, respectivamente, para estrutura com um AMS acoplado.

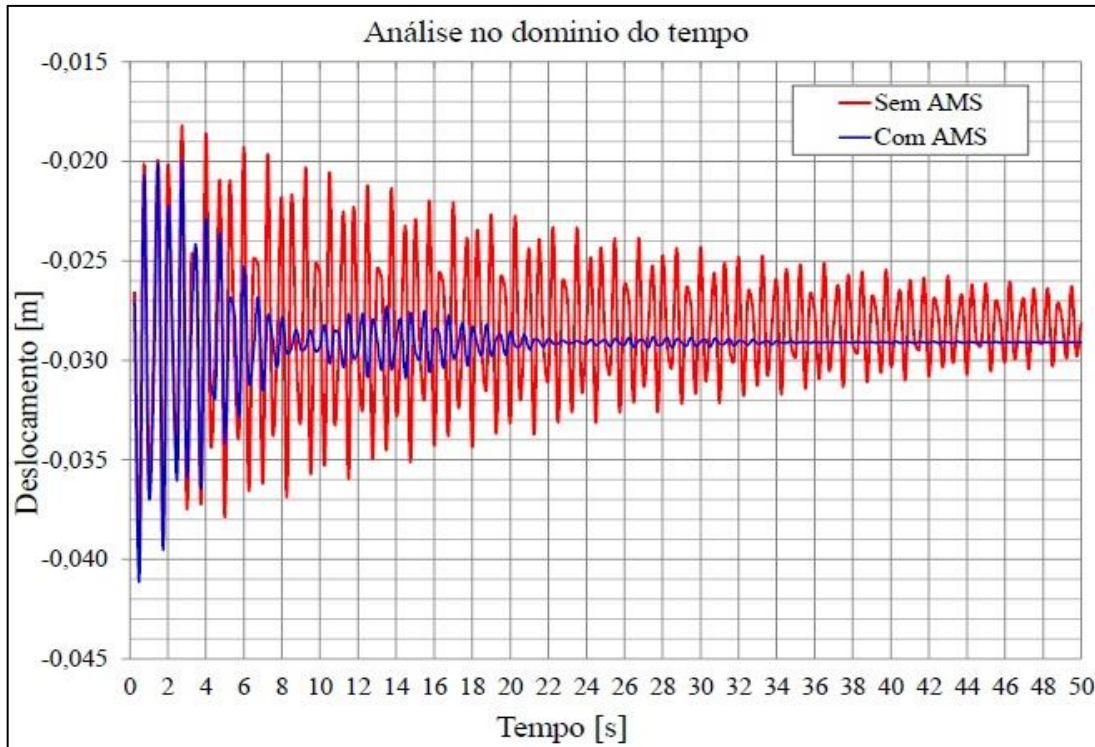


Figura 5.33 – Análise no domínio do tempo em função do deslocamento. Impacto seguido de vibração livre (Campuzano, 2016).

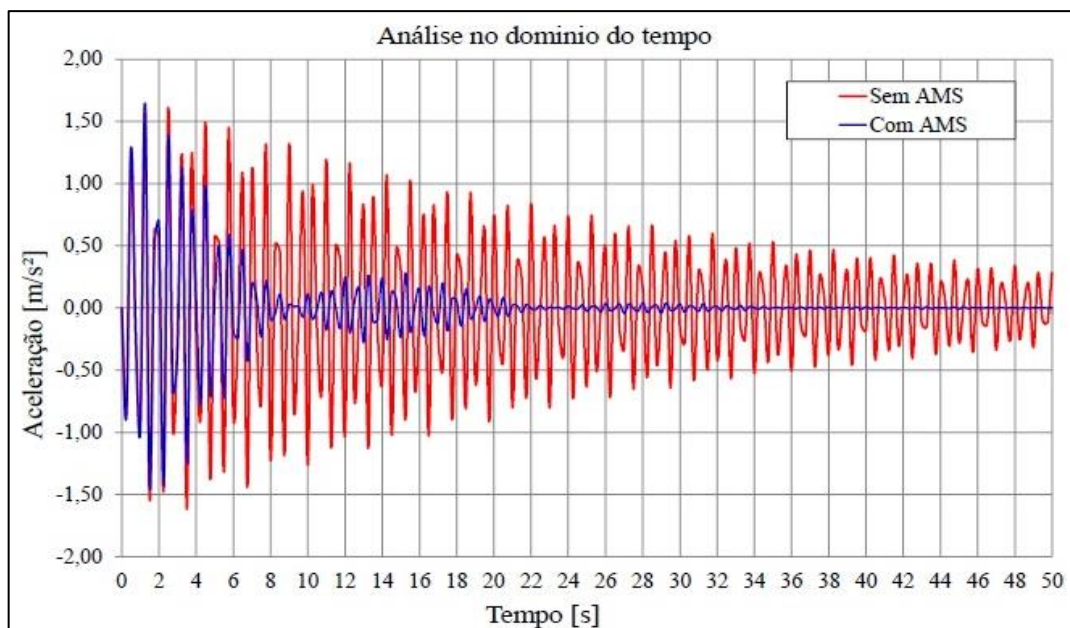


Figura 5.34 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Impacto seguido de vibração livre (Campuzano, 2016).

Da Figura 5.34 percebe-se que após dois segundos da aplicação da força de impacto, o AMS começa a atuar diminuindo as acelerações na laje da plataforma, as acelerações cessam aos 20 segundos de análise e, praticamente, não ocorrem mais oscilações. As oscilações de laje são amortecidas em torno dos 29 mm como se apresenta na Figura 5.33. Esse valor corresponde ao valor da flecha estática da plataforma com adição da massa concentrada do AMS.

Fazendo uma comparação das análises feitas com adição da camada de material viscoelástico com as análises realizadas por Campuzano (2016) que utilizou AMS percebe-se que ambas as técnicas são capazes de reduzir as amplitudes de deslocamentos e acelerações. O MVE além de diminuir as amplitudes de deslocamento, pois atua na estrutura distribuindo melhor as tensão e deformações, atua numa maior faixa de frequência.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar numericamente o desempenho do material viscoelástico como amortecedor de vibrações, no presente trabalho foram realizadas análises numéricas com adição de uma camada de espuma de poliuretano, mesmo material utilizado por Abeyasinghe *et al* (2013), para controlar vibrações de piso causadas por atividades humanas. Esse material foi utilizado na configuração de estrutura sanduíche, com camadas de diferentes espessuras. Foi feita uma comparação dos resultados obtidos das análises com adição material viscoelástico com diferentes espessuras para analisar a relação da espessura com a redução das vibrações. Foi feita também uma comparação com os resultados obtidos por Campuzano (2016), que utilizou amortecedor de massa sintonizado.

A seguir apresentam-se os passos da metodologia adotada em conjunto com as principais conclusões obtidas a partir dos resultados.

Inicialmente foi realizada uma análise modal, numericamente, na plataforma sem nenhum controle estrutural e os resultados foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente por Campuzano (2016). Para esta análise foram consideradas as três primeiras frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. Esta análise modal foi realizada com a finalidade de validar o modelo numérico. Os resultados obtidos numericamente resultaram bem próximos dos resultados experimentais, sendo a maior porcentagem de diferença entre os resultados, para terceira frequência, de 3,09%. As três formas modais obtidas numericamente foram semelhantes às formas modais experimentais. Assim sendo, pode-se concluir que o modelo numérico utilizado nas análises representa bem a plataforma de ensaios dinâmicos.

Após concluir que o modelo numérico representava bem a plataforma de ensaios dinâmicos foi realizada a validação do material viscoelástico, para isso utilizou-se um modelo usado por Dhoble e Barjibhe (2016). Ele realizaram análise modal em modelos de viga sanduíche e a utilizada para validação foi uma viga composta por uma camada de aço, um núcleo de borracha e uma camada de restrição de aço. O resultado obtido neste trabalho

foi bem próximo ao obtido por Dhoble e Barjibhe (2016), apresentando uma diferença de cerca de 8%. Portanto, conclui-se que o modelo utilizado para o material viscoelástico é eficiente.

Prosseguindo as análises, foram realizadas três séries de análises numéricas no domínio do tempo com três tipos de carregamento diferentes: carregamento harmônico de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma, carga que simula o pulo contínuo de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da laje e carregamento que simula o impacto de uma pessoa no centro da laje. Para cada um desses carregamentos, primeiramente foi realizada a análise na estrutura sem controle estrutural, somente para conhecer o comportamento da estrutura frente a uma solicitação dinâmica. Em seguida, foram realizadas análises com adição da camada da espuma de poliuretano com espessuras variadas.

Das análises numéricas realizadas na plataforma sem controle estrutural com todos os tipos de carregamento pode-se concluir que a plataforma de ensaios dinâmicos apresenta vibrações verticais elevadas, quando é excitada com carregamentos provenientes de atividades humanas e que possui um amortecimento estrutural muito baixo, apresentando ainda oscilações após cessada a aplicação da carga.

A partir dos resultados obtidos das análises da estrutura com adição da camada da espuma de poliuretano com o carregamento harmônico de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma pode-se concluir que o desempenho do material viscoelástico frente a esse tipo de carregamento é eficiente para redução de vibrações.

A segunda série de análises foi com carga que simula o pulo contínuo de uma, três e cinco pessoas distribuídas no centro da plataforma.

Dos resultados obtidos das análises da estrutura quando solicitada com carga que simula uma pessoa pulando no centro da plataforma conclui-se que a espuma de poliuretano foi eficiente na redução das vibrações, pois reduziu mais 50% as amplitudes tanto dos deslocamentos como das acelerações.

Para três pessoas pulando no centro da plataforma a adição da camada de material viscoelástico se mostrou eficiente na redução das amplitudes dos deslocamentos e das acelerações e a camada de quatro centímetros foi a que proporcionou a maior redução nas amplitudes. Tanto a adição da camada da espuma de poliuretano como o AMS apresentou uma redução significativa nas amplitudes de aceleração. No entanto, o MVE atua na estrutura numa maior faixa de frequência enquanto que o AMS atua somente em uma.

Para cinco pessoas pulando no centro da plataforma a adição da camada de material viscoelástico também se mostrou eficiente na redução das amplitudes dos deslocamentos e das acelerações. A camada de quatro centímetros também foi a que apresentou uma maior redução nessas amplitudes. Tanto a adição da camada da espuma de poliuretano como o AMS apresentou uma redução significativa nas amplitudes de aceleração. Para as amplitudes de deslocamento Campuzano (2016) também não mostrou resultados.

Portanto conclui-se que para o carregamento gerado por uma, três e cinco pessoas pulando a espuma de poliuretano apresenta um bom desempenho, reduzindo as amplitudes dos deslocamentos e das acelerações em mais de 50%.

A terceira série de análises foi com carga que simula o impacto de uma pessoa no centro da plataforma. Conclui-se dos resultados que o material viscoelástico apresentou um bom desempenho como amortecedor de vibrações, pois reduziu as amplitudes dos deslocamentos e das acelerações da estrutura. Essa redução foi observada já com adição da camada de dois centímetros de espessura, no entanto, a camada de quatro centímetros foi a que proporcionou uma redução maior nas amplitudes, pois a medida que aumentou-se a espessura da camada maior era a redução das amplitudes.

Comparando os resultados obtidos das amplitudes dos deslocamentos da estrutura com adição da camada de material viscoelástico com os resultados obtidos com adição de um MAS para a carga de impacto, o material viscoelástico proporcionou uma redução maior, pois o MVE atuar na estrutura distribuindo melhor as tensões e deformações. Com relação à aceleração, a adição do AMS reduziu as amplitudes à zero enquanto que com a espuma de poliuretano essa redução não chega a zero, mas a um valor bem próximo. Porém ele apresenta a vantagem que cobrir uma maior faixa de frequência enquanto que o AMS só atua em uma.

Portanto, conclui-se, que para o carregamento que simula o impacto, a espuma de poliuretano apresentou um bom desempenho reduzindo as amplitudes de deslocamento e aceleração.

Com base nos resultados mostrados e nas comparações feitas conclui-se que a adição da camada da espuma de poliuretano é eficiente para reduzir a vibrações excessivas causadas por atividade humana em estruturas como as lajes de pisos, desde a camada de menor espessura (dois centímetros) até a camada mais espessa (quatro centímetros), visto que a sua adição na estrutura analisada reduz consideravelmente as amplitudes dos deslocamentos e das acelerações para os tipos de carregamento analisados, além de ser um material leve. Deste modo, a espuma de poliuretano é um material viscoelástico que pode ser usada em lajes de piso como controle estrutural reduzindo as vibrações causadas por carregamento humano.

6.2 – SUGESTÕES

São apresentadas algumas sugestões para continuação deste estudo:

- Realização de análises com adição da camada da espuma de poliuretano considerando outros tipos de carregamento humano.
- Realização de um estudo comparativo entre a utilização de um AMS e a adição de camadas de material viscoelástico, levando em consideração a instalação e manutenção destes dois dispositivos de controle em função do desempenho, custo, facilidade de construção e manutenção.
- Realização de testes experimentais com adição da espuma de poliuretano na plataforma de ensaios dinâmicos analisada para verificação do comportamento do material viscoelástico.
- Realização de um estudo paramétrico do material viscoelástico para avaliar a influência na redução das vibrações.
- Realização de análise considerando o material viscoelástico apenas nos pontos de maior solicitação da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abeyasingh, C.M., Thambiratnam, D.P. e Perera, N.J. (2013). “Flexural performance of an innovative Hybrid Composite Floor Plate System comprising Glass–fibre Reinforced Cement, Polyurethane and steel laminate.” In: *Journal Composite Structures*, 95, 179-190.
- Almeida, G. M. e Mazzilli, C.E.N. (2018). “Application of tuned-mass dampers to the control of floor vibrations”, In: *IBRACON Structure and materials jornal*, 11, 389 - 409.
- Ansys Product Launcher Release (2012). User’s Manual.
- Antar, J. (2011). *Modelling floors with a constrained damping layer*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Manchester, 153p.
- Bachamnn, H. (1992). “Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations”, In: *Journal of the Structural Engineering*, Vol. 118, pp. 631-647.
- Bachamnn, H. e Ammann, W. (1987). “Vibration in Structures: Induced by Man and Machines”, 3ª Edição, IABSE, AIPC e IVBH, Zurich, Switzerland.
- Barbosa, F. de S. (2000). Modelagem computacional de estruturas com camadas viscoelásticas amortecedoras, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 219p.
- Brownjohn, J.M.W. (2001). “Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction.” In: *Shock and Vibration*, 8, 315–323.
- Campista, F.F. (2015). *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 117p.
- Campuzano, J.E. (2011). *Plataforma de ensaios dinâmicos: estudos preliminares, projeto e construção*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 164p.
- Campuzano, J.E. (2016) *Proposta de um amortecedor para atenuação de vibrações em pisos de concreto: análise numérica e experimental*, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 310p.
- Casado, C.M., Díaz, I.M., Sebastián, J., Poncela, A.V., Lorenzana. A. (2011). “Implementation of passive and active vibration control on na in-service footbridge.” In: *Structural Control and Health Monitoring*, 1-18.

- Dhoble, R.E. e R.B. Barjibhe (2016). “Study on vibration analysis of sandwich cantilever beam using finite element ansys software.” In: *International Research Journal of Engineering and Technology*, 03, 2633 – 2637.
- Ebrahimipour, A. e Sack, R.L. (2005). “A review of vibration serviceability criteria for floor structures.” In: *Journal Computers and Structures*, 83, 2488- 2494.
- Faisca, R.G. (1998). *Caracterização de materiais viscoelásticos como amortecedores de vibrações*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 172p.
- Faisca, R.G. (2003). *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 240p.
- Faria, M.T. (1996). *Redução de vibrações induzidas por pessoas em lajes de grandes vãos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 108p.
- Fernandes, D. B. e Chavarette, F.R. (2017). “Projeto de controle híbrido aplicado a vibrações excessivas em uma estrutura.” In: *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 21, 13-22.
- Gaspar, C.M.R. (2013). *Análise dinâmica e controle de vibrações de pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 151p.
- Lima, D.V.F. (2007) *Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de uma Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizado*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 148p.
- Lima, G.V.F. (2013). *Análise Dinâmica via Método dos Elementos Finitos do Estádio Nacional de Brasília*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília 178p.
- Martins, L.C., Pinto, J.F.A. e Porto, T.B. (2017) “Análise numérica de vibrações em uma passarela mista de aço e concreto” In: *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 13, 131-144.
- Mello, A.V. de A. (2005). *Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 189p.
- Mendes, J.P. (2014). *Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 212p.
- Murray, M.T., Allen, D.E. e Ungar, E.E. (1997). *Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity*. Chicago,USA: American Institute of Steel Construction.

- Pererira, S.P. (2017). *Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 130p.
- Rabelo, L. J. G. (2016). *Proposta de um Sistema de Controle de Vibrações para o Estádio Nacional*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 233p.
- Rodrigues, J.F.S. (2003). *Ações Induzidas por Multidões em Estruturas de Arquibancadas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Paulo.
- Ruiz, D.V. (2016). *Redução de vibrações utilizando múltiplos sistemas passivos de absorção*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 88p.
- Saidi, I., Gad, E.F., Wilson, J.L. e Haritos, N. (2011). “Development of passive viscoelastic damper to attenuate excessive floor vibrations.” In: *Journal Engineering Structures*. 33, 3317–3328.
- Santade, F. (2013). *Análise dinâmica do amortecimento em estruturas compostas com material viscoelástico*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 99p.
- Santos, E.F. (2003). *Atenuadores visco-elásticos para redução de oscilações aeroelásticas de edifícios altos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 117p.
- Santos, M.D.S. (2009). *Análise Numérica do Controle de Vibrações em Lajes de Edifícios Utilizando Amortecedores de Massa Sintonizados*, Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 171p.
- Souza, J.C.S. (2015). *Caracterização experimental e modelagem de estruturas usando materiais viscoelásticos para o controle passivo de vibrações*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 153p.
- Varela, W.D. (2004). *Modelo teórico-experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 318p.
- Varela, W.D. e Batista, R.C. (2011). “Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks.” In: *Journal of Engineering Structures*, 33, 2485-2494.
- Vasconcelos, R.P. (2003). *Controle dinâmico via mecanismos viscoelásticos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 273p.
- Ximenes, M.M., Ávila, S.M. e Doz, G.N. (2017). “Controle de vibrações em lajes de piso com uso de materiais viscoelásticos.” In: *XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Florianópolis, Brasil.

- Zhang, Z., Guo, T., Yang, K., Ma, F. e Li, A. (2017). "Simulation and Measurement of Human-Induced Vibrations of the Beijing Olympic Watchtower with Tuned Mass Dampers." In: *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31, 1-10.
- Zivanovic, S., Pavic, A., e Reynolds, P. (2005). "Vibration serviceability of footbridge under human-induced excitation: A literature review." In: *Journal of Sound and Vibration*, 279, 1-74.