



## CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM LAJE DE PISO COM USO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

**Mariana Medeiros Ximenes**

**Suzana Moreira Avila**

**Graciela Nora Doz**

xm.mariana@gmail.com

avilas@unb.br

graciela@unb.br

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Prédio SG-12, 1º andar,  
Campus Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, CEP 70910-900, Brasília – DF, Brasil.

**Resumo.** 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 lajes de piso se tornaram mais susceptíveis à ocorrência de vibrações excessivas provocadas por carregamentos dinâmicos procedentes de atividades como caminhar, correr ou pular. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente, através do software Ansys, um sistema de controle estrutural passivo com a utilização de materiais viscoelásticos para reduzir as amplitudes de vibração causadas por atividades humanas em lajes de piso. A estrutura analisada numericamente foi uma plataforma de ensaios dinâmicos desenvolvida e ensaiada experimentalmente no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília. Nessa estrutura foram realizados ensaios com atividades humanas e posteriormente foram realizados os mesmos ensaios considerando a estrutura com um Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS) acoplado nela. Esses ensaios foram realizados com a intenção de avaliar o desempenho do AMS. Neste, um material viscoelástico foi utilizado como alternativa para reduzir as vibrações excessivas. Foi feita uma comparação do desempenho do AMS, e do uso de materiais viscoelásticos, para redução das vibrações.

**Palavras-chave:** Vibrações, Lajes de piso, Materiais viscoelásticos,

## 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, as lajes de piso têm apresentado frequências naturais cada vez mais próximas da faixa de frequência das atividades humanas desenvolvidas nela, como caminhar ou pular. Quando a frequência da estrutura se aproxima da frequência de excitação as vibrações da estrutura se amplificam causando desconforto nos usuários e, em casos mais graves, pode ocorrer até mesmo um comprometimento da estrutura.

Segundo Torres (2010), até meados dos anos 60, os engenheiros viam como solução para as vibrações em estruturas apenas o enrijecimento estrutural, como por exemplo, inclusão de pilares intermediários ou reforço estrutural das vigas. No entanto, o controle estrutural surgiu como uma alternativa tendo como marco o estudo de Lenzen (1966) *apud* Torres (2010).

O controle estrutural é um sistema capaz de 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. O uso desse sistema está crescendo cada vez e se tornou uma boa alternativa na solução de vibrações excessivas. Há quatro tipos de sistemas de controle: passivo, ativo, híbrido e semi-ativo.

Entre os vários mecanismos existentes para o controle de vibrações excessivas já empregados em estruturas, a literatura apresenta vários estudos a respeito do uso do controle passivo, tais como o uso de amortecedores de massa sintonizado para redução de vibrações em lajes de piso, porém os estudos sobre amortecedores viscoelásticos usados para essa mesma finalidade ainda são escassos, sendo estes mais utilizados para controle de vibração devido à ação de sismos ou vento.

Com base no exposto, este trabalho tem o objetivo de estudar, através de análises numéricas, um sistema de controle estrutural baseado no uso de materiais viscoelásticos, na configuração de estrutura sanduíche, em lajes de piso. Foram feitas análises numéricas, usando o *software* ANSYS, em uma plataforma de ensaios dinâmicos com carregamento oriundo de atividades humanas como pular.

## 2 VIBRAÇÕES CAUSADAS POR ATIVIDADES HUMANAS

Vibrações em lajes de piso são muitas vezes ocasionadas por atividades humanas, tais como caminhar, correr, pular ou dançar, pois essas atividades apresentam frequências baixas que podem se aproximar da frequência natural da estrutura.

Segundo Antar (2011) os problemas de vibração em lajes em diferentes tipos estruturais aumentaram consideravelmente nos últimos 20 anos. Problemas de vibrações excessivas ocorridos em estruturas devido ao carregamento humano são bastante conhecidos mundialmente, como o caso da Millennium Footbridge, uma passarela metálica suspensa extremamente flexível. No Brasil houve alguns casos de estruturas que também sofreram problemas de vibrações excessivas como o caso do Estádio do Maracanã e a Ponte Rio-Niterói (Torres, 2010).

## 2.1 Atividade humana de pular

O interesse maior deste trabalho é em carregamentos dinâmicos gerados pela atividade humana de pular. 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).

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, como mostra a Figura 2.1.

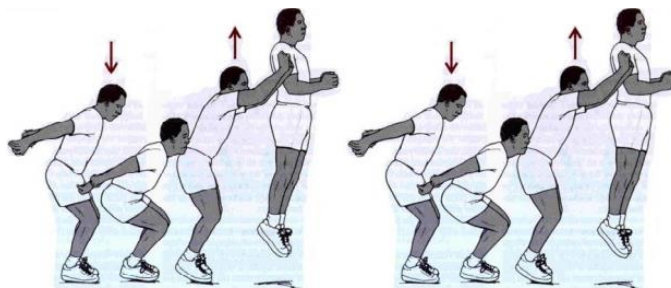


Figura 2.1 - Movimentos do corpo durante um salto (Faisca, 2003).

Segundo Mello (2005) e como se pode observar na Figura 2.1 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.

A Figura 2.2 mostra um gráfico detalhado da aceleração do corpo num intervalo de tempo durante a execução de um salto.

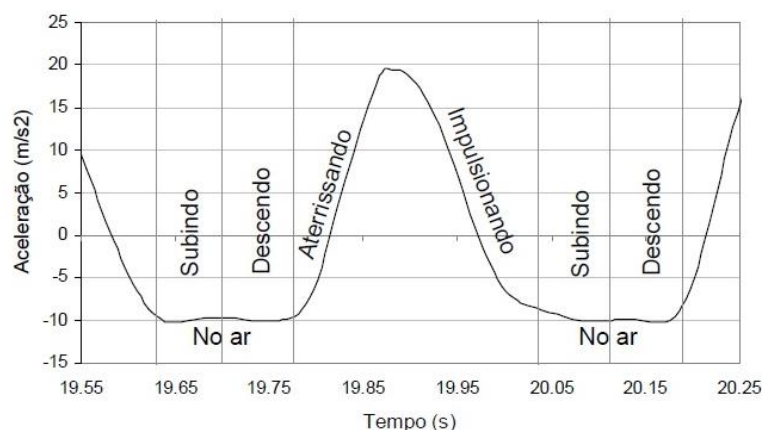


Figura 2.2 - Gráfico aceleração x tempo do corpo durante os movimentos do salto (Faisca, 2003).

### 3 CONTROLE ESTRUTURAL

Quando submetidas a um carregamento oriundo de atividades humanas as estruturas apresentam vibrações que muitas vezes causam desconforto aos usuários. E devido a várias situações envolvendo vibrações excessivas, como as já citadas, 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 do tempo 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 esses dispositivos 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 (1966) e esses dispositivos foram chamados então de amortecedores de massa sintonizados (AMS).

Dentre os tipos de sistemas de controle existentes o sistema passivo apresenta algumas vantagens tais como: não requerem o uso de alta tecnologia, como por exemplo, sistema de rápida aquisição de dados; não necessitam de um sistema de manutenção permanente e não necessita de fontes externas de energia, porém atuam somente numa faixa de frequência pré-determinada (Lima, 2007).

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 estudados neste trabalho.

#### 3.1 Materiais viscoelásticos como forma de amortecedor

Os materiais viscoelásticos têm como principal característica uma grande dissipação de energia por ciclo de oscilação, fazendo com que aumente a taxa de amortecimento na

estrutura na qual ele esteja acoplado e proporcione reduções significativas das vibrações (Vasconcelos, 2003).

Materiais viscoelásticos restringidos oferecem a vantagem de reduzir as vibrações em uma faixa de frequência maior em comparação com os amortecedores de massa sintonizados (Saidi, Gad e Haritos, 2011).

Os amortecedores 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. Eles podem ser utilizados de duas formas:

- construído com duas camadas de material viscoelástico coladas entre três chapas rígidas paralelas, conforme ilustrado na Figura 3.1. Nessa configuração as camadas de material viscoelástico sofrem deformação ao cisalhamento puro;
- na forma de viga sanduíche, que são compostos por um núcleo de material viscoelástico 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, Figura 3.2.

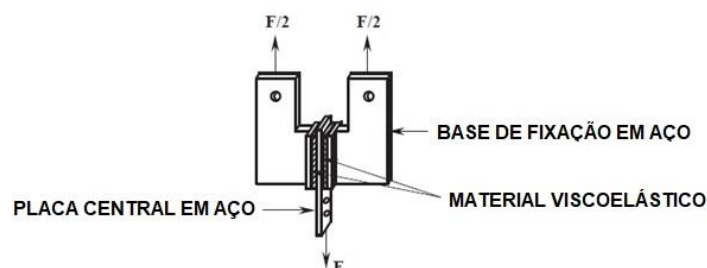


Figura 3.1 – Amortecedor viscoelástico (Vasconcelos, 2003).

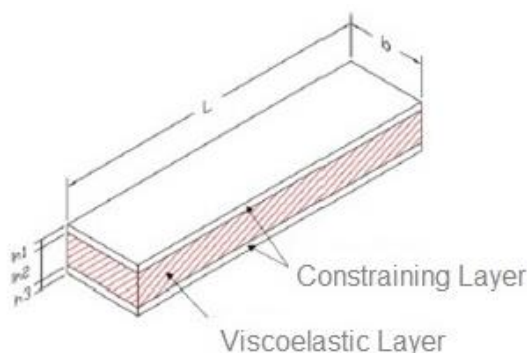


Figura 3.2 – Viga sanduíche (Saidi, Gad e Haritos, 2011).

Vasconcelos (2003) cita três formas nas quais os amortecedores viscoelásticos na configuração de estrutura sanduíche podem se apresentar:

- A primeira forma é a aplicação direta de uma camada de material viscoelástico à parte da estrutura que está sob vibração, tal como placas e vigas, Figura 3.3 (a), onde o amortecimento é produzido pela deformação extensional da camada de material viscoelástico;
- A segunda forma, mostrada na Figura 3.3 (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 material viscoelástico coladas a três chapas rígidas e é mostrado na Figura 3.3 (c).

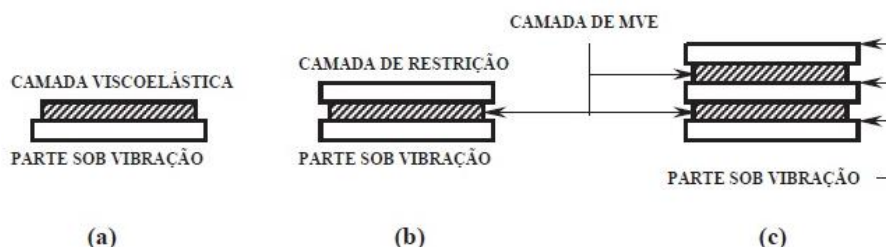


Figura 3.3 - Diferentes configurações para amortecedores viscoelásticos: (a) simples, (b) com camada de restrição, e (c) duplo sanduíche (Vasconcelos, 2003).

Neste trabalho utilizou-se o amortecedor viscoelástico na configuração como mostrada na Figura 3.3 (b), em que há uma camada base, um núcleo de material viscoelástico e uma camada restritora. A camada base é a própria laje de piso, o núcleo é de material viscoelástico e a camada restritora é uma camada de concreto, com as mesmas propriedades da camada da laje.

## 4 ANÁLISE NUMÉRICA

Como já mencionado, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do uso de material viscoelástico para redução de vibrações causadas por atividades humanas em lajes. Inicialmente foram realizadas análises numéricas tomando como base uma plataforma de ensaios dinâmicos que foi construída no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (Campuzano, 2011). Campuzano (2016) estudou as vibrações induzidas nessa laje quando grupo de pessoas se movimentavam nela e propôs como forma de controle um amortecedor de massa sintonizado (AMS). Neste trabalho se utiliza como alternativa de controle camadas de material viscoelástico.

### 4.1 Plataforma de ensaios dinâmicos

A plataforma de ensaios dinâmicos 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 4.1), 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 à flexão.

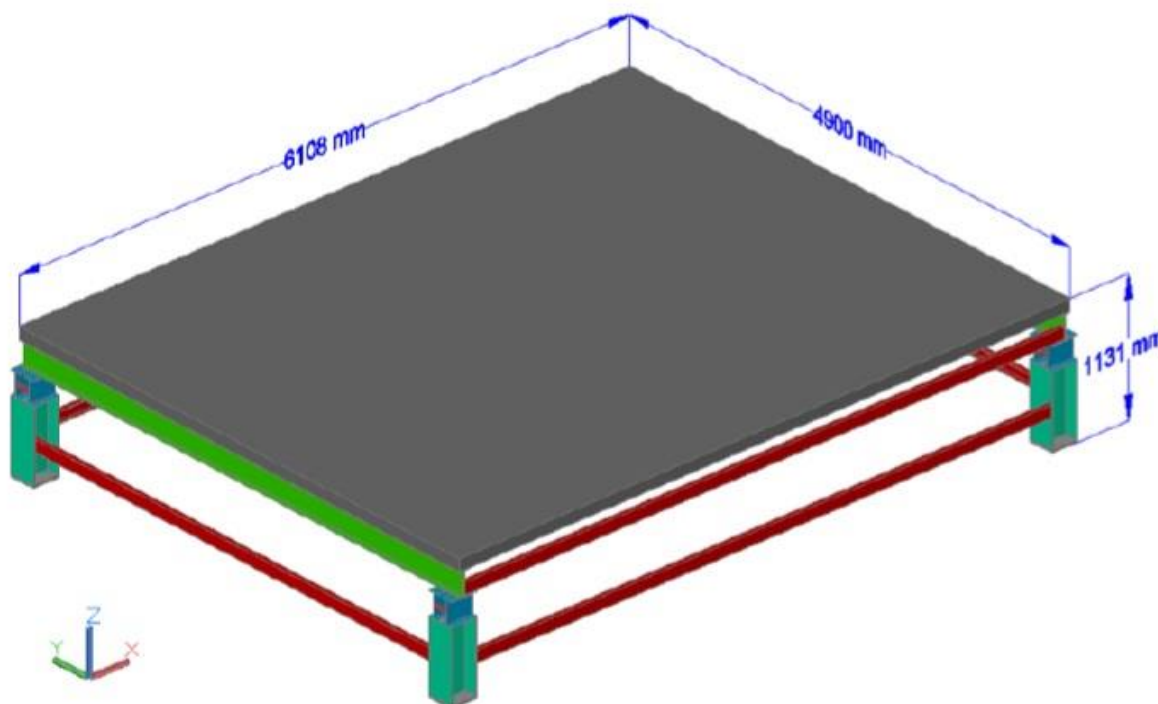


Figura 4.1 - Dimensões da plataforma de ensaios dinâmicos (Campuzano, 2011).

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. 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 (Campuzano, 2016).

Após a recuperação da plataforma surgiram trincas que foram preenchidas com uma camada do produto Sikadur 42 CI com espessura 4,5 cm e largura de 2,5 cm (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Trincas na laje que foram preenchidas com graute epóxi fluido (Campuzano, 2016).

## 4.2 Modelagem numérica

A modelagem numérica da plataforma é a mesma adotada por Campuzano (2016), leva em consideração todas as fissuras existentes na plataforma que foram preenchidas com o produto Sikadur 42 Cl. Na Figura 4.3 as linhas em cor violeta mostram o mapeamento das trincas modelado no programa Ansys. O modelo numérico da plataforma apresentou um total de 97516 elementos, o elemento SHELL63 foi utilizado para modelar a laje de concreto e as fissuras e o elemento BEAM4 para os perfis e pilares em aço.

Na tabela 4.1 estão listadas as propriedades consideradas na modelagem para os perfis de aço, para a laje de concreto e para as fissuras.

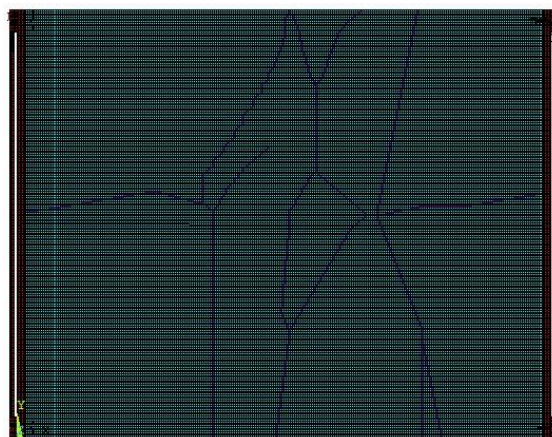


Figura 4.3 - Mapeamento das trincas da laje no modelo numérico.

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais utilizados na modelagem da plataforma.

|                  | Módulo de elasticidade (GPa) | Coefficiente de Poisson | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Perfis de aço    | 200                          | 0,3                     | 7850                           |
| Laje de concreto | 30                           | 0,2                     | 2500                           |
| Fissuras         | 16                           | 0,2                     | 2000                           |

## 4.3 Análise modal

Foi feita uma análise modal da plataforma sem nenhum tipo de controle, a fim de validar o modelo numérico com o modelo experimental. Foram consideradas as três primeiras frequências naturais e as respectivas formas modais da laje de concreto encontradas numericamente e comparadas com os resultados experimentais obtidos por Campuzano (2016) através das técnicas de identificação a partir dos dados experimentais com a ajuda do *software* ARTEMIS.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram as formas modais encontradas numericamente neste trabalho e a Tabela 4.2 mostra a comparação dos resultados obtidos numericamente e experimentalmente por Campuzano (2016).

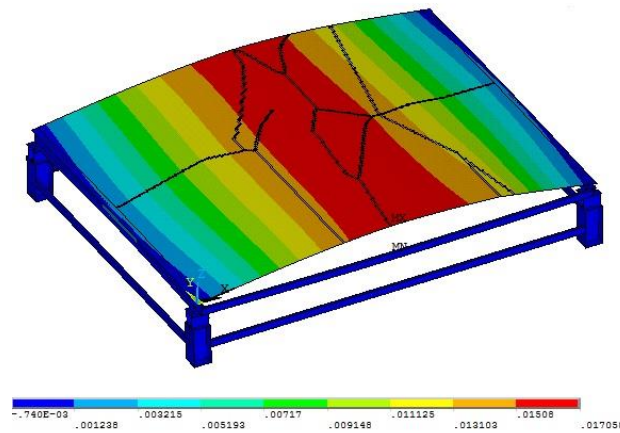


Figura 4.4 – 1ª Forma modal da plataforma, frequência: 3,363 Hz.

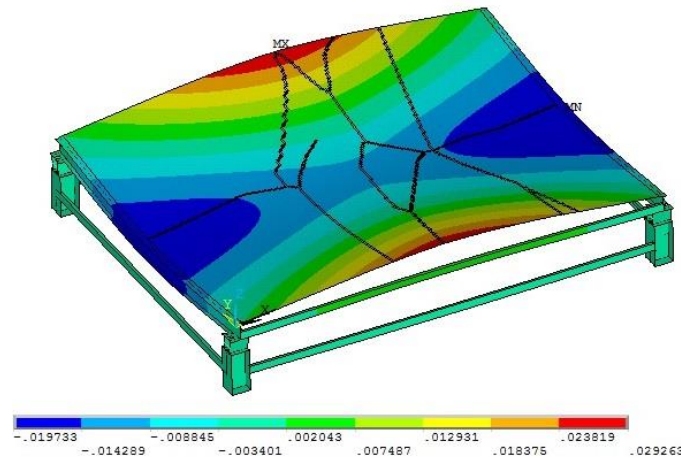


Figura 4.5 – 2ª Forma modal da plataforma, frequência: 15,67 Hz.

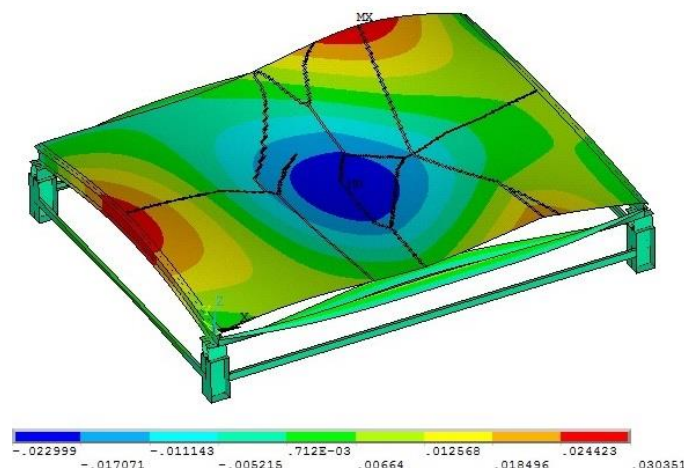


Figura 4.6 – 3ª Forma modal da plataforma, frequência: 23,63 Hz.

Tabela 4.2 - Comparação dos resultados obtidos numericamente e experimentalmente.

|                                      | 1ª FREQUÊNCIA | 2ª FREQUÊNCIA | 3ª FREQUÊNCIA |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Numérico                             | 3,363 Hz      | 15,67 Hz      | 23,63 Hz      |
| Experimental<br>(Campuzano,<br>2016) | 3,365 Hz      | 15,34 Hz      | 22,90 Hz      |
| Diferença                            | 0,06%         | 2,11%         | 3,09%         |

Dos valores da Tabela 4.2 pode-se observar uma boa correlação entre os dados numéricos e experimentais para as três primeiras formas modais.

#### 4.4 Análises no domínio do tempo sem controle estrutural

Após a validação do modelo, com a análise modal, foram realizadas análises transientes para se conhecer o comportamento da estrutura no domínio do tempo. Primeiramente foram feitas análises sem a camada de material viscoelástico, posteriormente, as mesmas análises foram feitas com a adição do material viscoelástico, com diferentes espessuras, e os resultados são comparados entre si, juntamente com os resultados de Campuzano (2016), que utilizou AMS. Para todas as análises realizadas neste trabalho, os resultados foram analisados no nó central da plataforma, nó 30501, pois é o local onde há o maior deslocamento. Nas análises transientes foi considerada uma taxa de amortecimento para a estrutura de 0,02.

A primeira análise realizada foi com o carregamento que simulava o impacto, num intervalo de um segundo, de uma pessoa de aproximadamente 100 kg e obtidas as respostas de aceleração e deslocamento nos 50 segundos posteriores. Para isso foi aplicada uma carga de impacto de 3000 N. A Figura 4.7 mostra o gráfico de força x tempo do carregamento aplicado e as Figuras 4.8 e 4.9 mostram a resposta da estrutura sem controle estrutural para este carregamento em função da aceleração e em função do deslocamento, respectivamente.

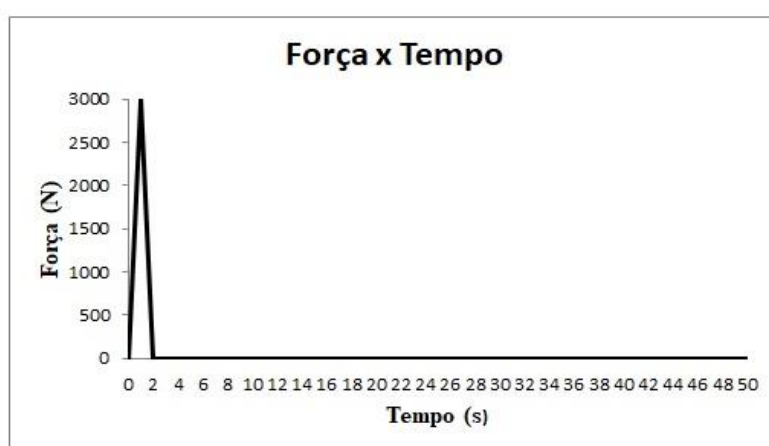


Figura 4.7 – Gráfico força x tempo para o carregamento que simula o impacto.

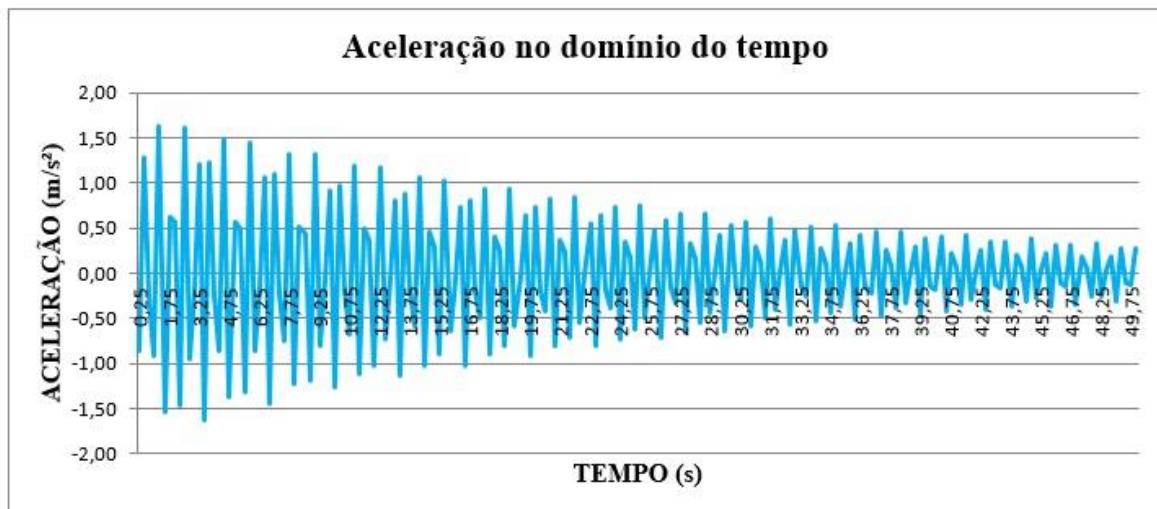


Figura 4.8 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Impacto seguido de vibração livre, estrutura sem controle.

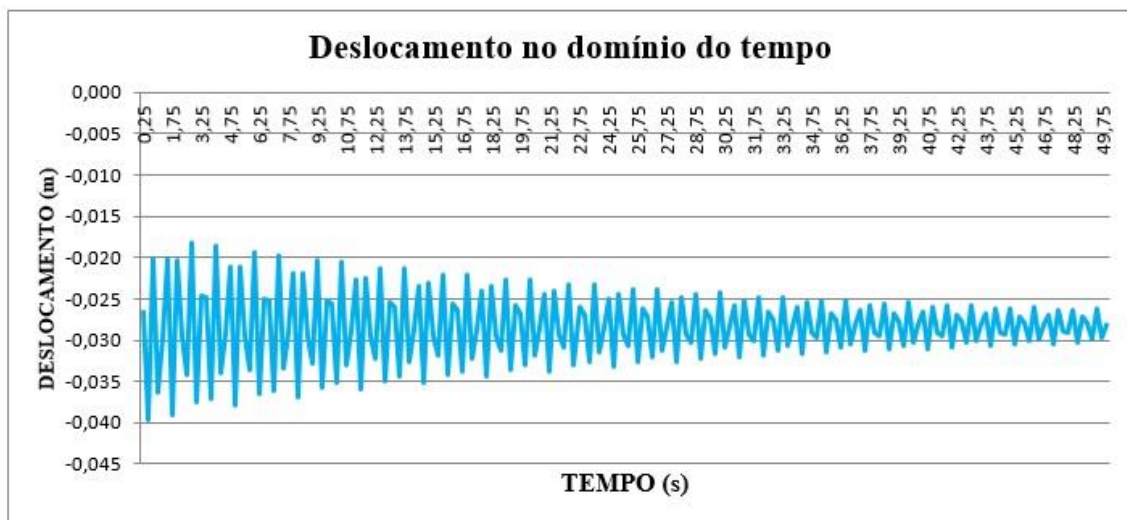


Figura 4.9 - Análise no domínio do tempo em função do deslocamento. Impacto seguido de vibração livre, estrutura sem controle.

A segunda análise realizada foi com o carga contínua que simulava o pulso contínuo de uma pessoa, de aproximadamente 100 kg, no centro da plataforma. Para isso foi aplicada uma carga de 3000 N, durante dez segundos e obtidas as respostas de aceleração nos 50 segundos posteriores. A Figura 4.10 mostra o gráfico de força x tempo do carregamento aplicado e a Figura 4.11 mostra a resposta da estrutura sem controle estrutural para este carregamento em função da aceleração.

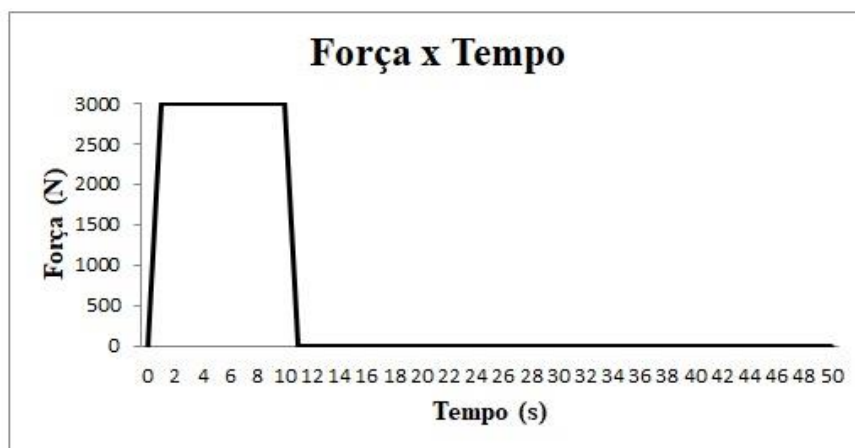


Figura 4.10 – Gráfico força x tempo para o carga contínua.

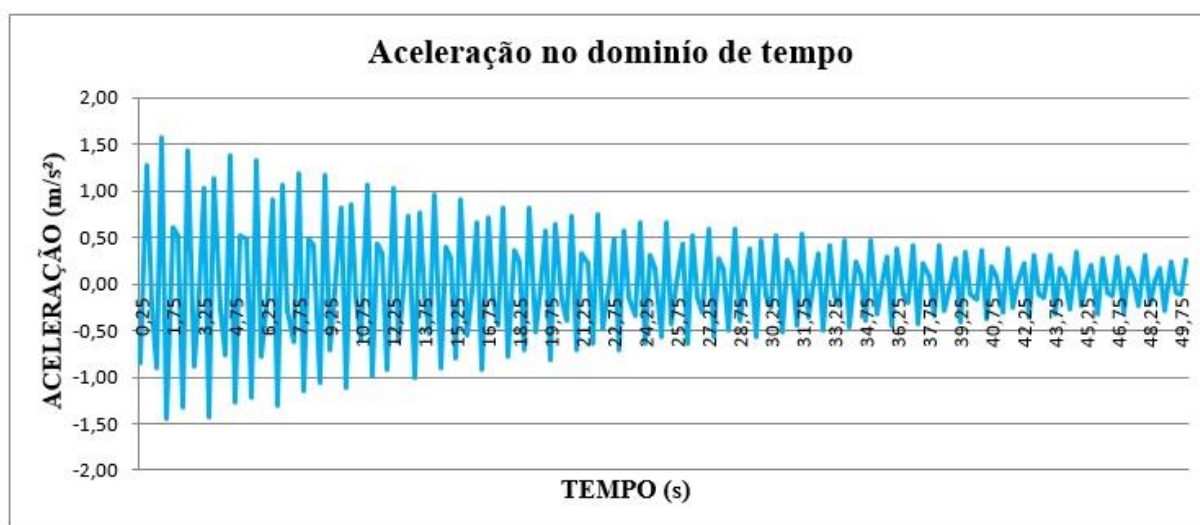


Figura 4.11 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Carga contínua de uma pessoa pulando seguido de vibração livre, estrutura sem controle.

A terceira análise realizada sem a camada de material viscoelástico foi com a carga contínua que simulava o pulo contínuo de três pessoas, distribuídas no centro da plataforma. Para isso, foi aplicada uma carga de 3000 N em três nós da estrutura (nó 15192, nó 30501 e nó 45810) durante dez segundos e obtidas as respostas de aceleração nos 50 segundos posteriores. Esse carregamento é o mesmo apresentado na Figura 4.10. A Figura 4.12 mostra a resposta da estrutura sem controle estrutural para este carregamento em função da aceleração.

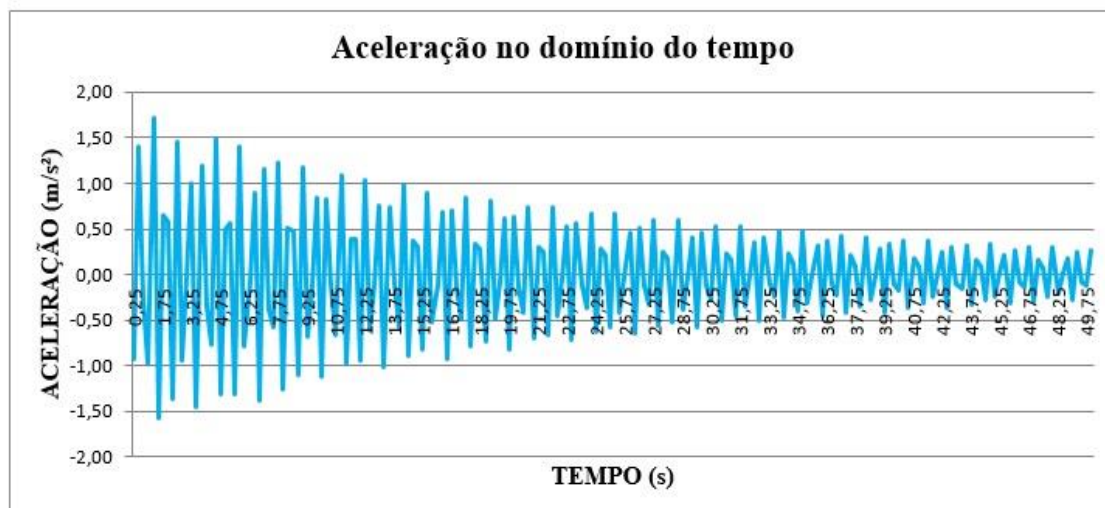


Figura 4.12 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Carga contínua de três pessoas pulando seguido de vibração livre, estrutura sem controle.

Das figuras acima podem-se observar que a estrutura principal atuando sem nenhum tipo de controle possui um amortecimento estrutural muito baixo, apresentando ainda oscilações após 50 segundos de análise.

#### 4.5 Análises no domínio do tempo com controle estrutural

Como o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do uso do material viscoelástico como amortecedor estrutural, as análises realizadas na estrutura sem nenhum tipo de controle, mostradas no item anterior, foram, posteriormente, realizadas com adição de uma camada de material viscoelástico de diferentes espessuras. Os resultados obtidos das análises da estrutura com adição do material viscoelástico foram comparados com os resultados obtidos por Campuzano (2016), que utilizou amortecedor de massa sintonizado em suas análises. Essa comparação serviu para verificar o desempenho do uso do material viscoelástico com relação ao amortecedor de massa sintonizado.

Serão mostrados os resultados obtidos, por Campuzano (2016), das análises realizadas na estrutura com um amortecedor de massa sintonizado acoplado nela. Em seguida, serão mostrados os resultados obtidos das análises da estrutura com adição do material viscoelástico.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os resultados de aceleração e deslocamento obtidos, respectivamente, por Campuzano (2016) para a estrutura sem e com um AMS acoplado, submetida ao carregamento que simula o impacto.

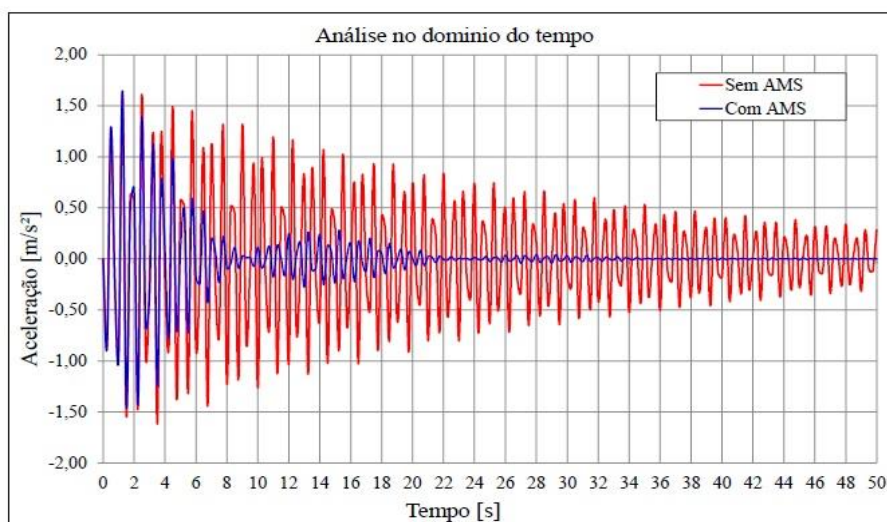


Figura 4.13 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração (1 AMS). Impacto seguido de vibração livre (Campuzano, 2016).

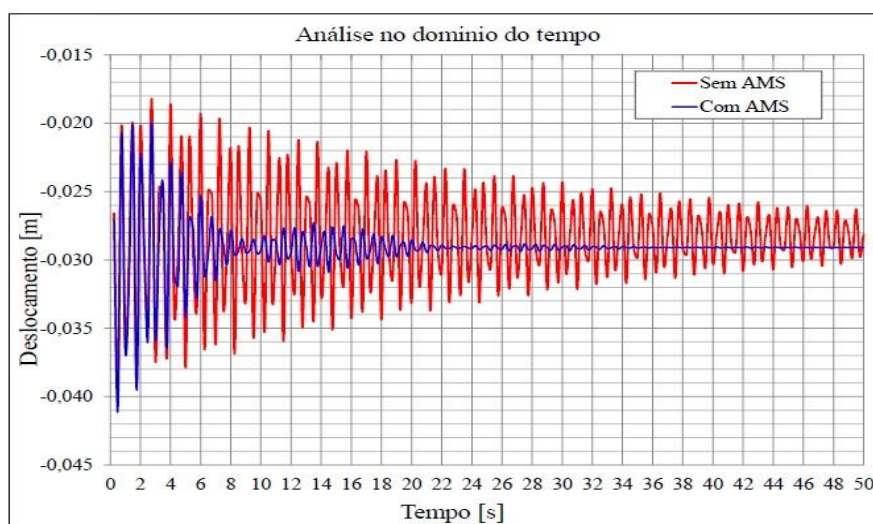


Figura 4.14 - Análise no domínio do tempo em função do deslocamento (1 AMS). Impacto seguido de vibração livre (Campuzano, 2016).

Da Figura 4.13 percebe-se que após 2 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 4.14 que corresponde ao valor da flecha estática da plataforma com adição da massa concentrada do AMS.

A Figura 4.15 mostra o resultado da aceleração no domínio do tempo obtida por Campuzano (2016) para a estrutura sem e com um AMS acoplado, submetida ao carregamento que simula o pulso contínuo de uma pessoa no centro da plataforma.

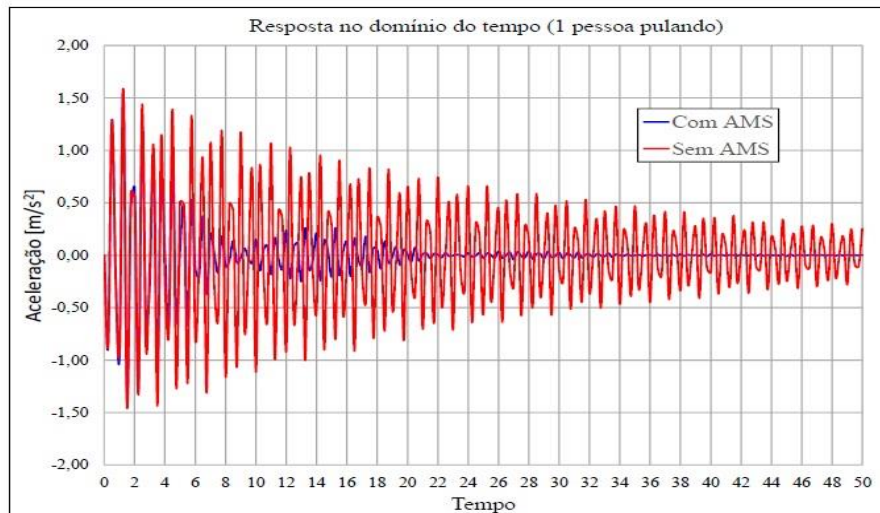


Figura 4.15 - Resposta no domínio do tempo em função da aceleração para uma pessoa pulando continuamente. Vibração forçada (Campuzano, 2016).

Na Figura 4.15 se observa 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 se observar que sem sistema de controle (linha vermelha) a plataforma apresenta vibrações consideráveis até os 50 segundos analisados.

Para o carregamento que simula o pulo contínuo de três pessoas distribuídas no centro da plataforma a Figura 4.16 mostra o resultado da aceleração no domínio do tempo obtida por Campuzano (2016) para a estrutura sem e com um AMS acoplado.

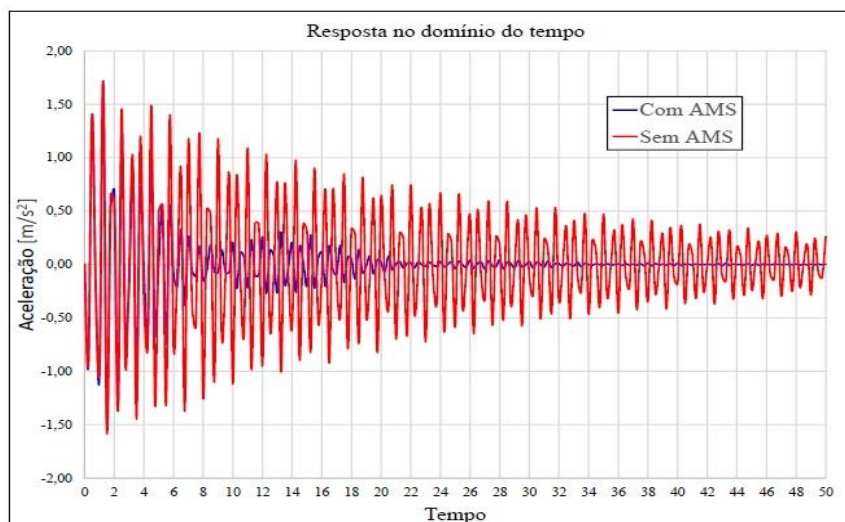


Figura 4.16 - Resposta no domínio do tempo para três pessoas pulando continuamente. Vibração forçada (Campuzano, 2016).

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

Nas análises transientes da plataforma considerando a adição de uma camada de material viscoelástico foram estudadas três situações conforme a espessura dessa camada. A primeira considerada foi dois centímetros, em seguida três e, por fim, quatro centímetros. Para a camada restritora foi utilizado dois centímetros.

O material viscoelástico utilizado nas análises da plataforma foi uma espuma de poliuretano, o mesmo material utilizado por Abeysinghe, Thambiratnam e Perera (2013), quando estudaram o desempenho dinâmico de um inovador piso composto híbrido. As propriedades desse material estão mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Propriedades do material viscoelástico utilizado na simulação.

|                      | Módulo de elasticidade (MPa) | Coefficiente de Poisson | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Núcleo viscoelástico | 22,4                         | 0,3                     | 99,80                          |

A Figura 4.17 mostra como a plataforma se apresenta após a adição da camada de material viscoelástico, camada azul escuro, e da camada restritora, que possui as mesmas propriedades da estrutura principal.

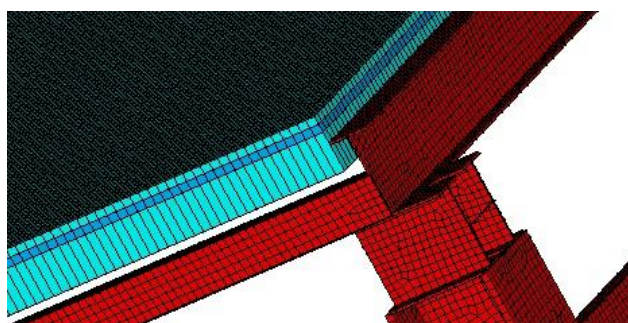


Figura 4.17 – Plataforma com a camada de material viscoelástico.

As análises realizadas na plataforma com a camada de material viscoelástico são as mesmas realizadas na plataforma original. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram os resultados de aceleração e deslocamento, respectivamente, no domínio do tempo, obtidos neste trabalho, para as análises da plataforma sem e com a camada de material viscoelástico de dois, três e quatro centímetros para o carregamento que simula o impacto.

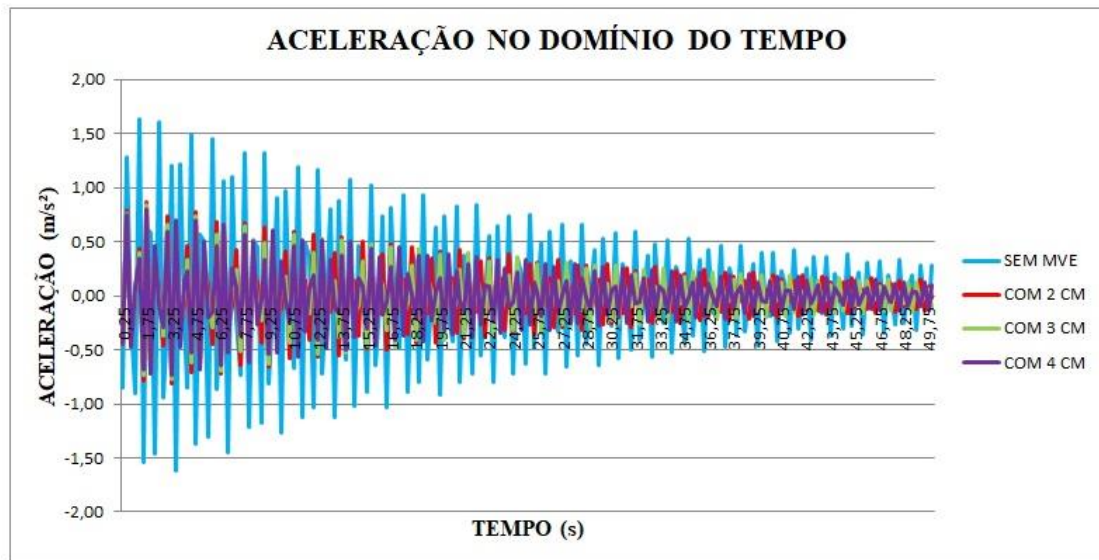


Figura 4.18 – Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Impacto seguido de vibração livre.

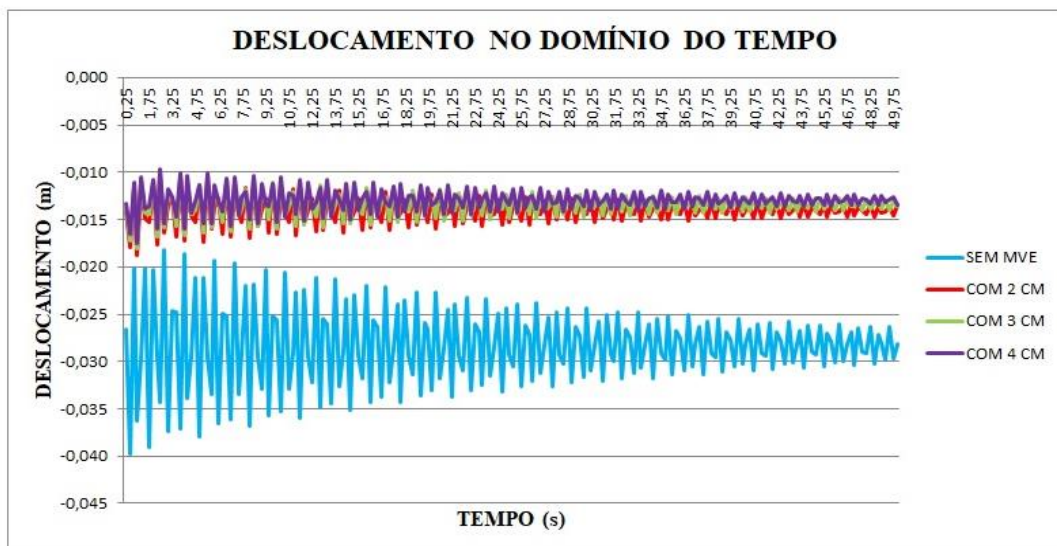


Figura 4.19 – Análise no domínio do tempo em função do deslocamento. Impacto seguido de vibração livre.

Pode-se observar na Figura 4.18 que as amplitudes de aceleração da estrutura são reduzidas após a adição da camada de material viscoelástico e que a medida que se aumenta a espessura da camada de material viscoelástico as amplitudes diminuem ainda mais, sendo a maior redução obtida com a camada de quatro centímetros de material viscoelástico. Com relação ao deslocamento (Figura 4.19), este é reduzido, aproximadamente, pela metade.

A Figura 4.20 mostra o resultado da aceleração no domínio do tempo obtido, neste trabalho, para as análises da plataforma sem e com a camada de material viscoelástico, de diferentes espessuras, para a carga contínua que simula o pulo de uma pessoa no centro da plataforma.

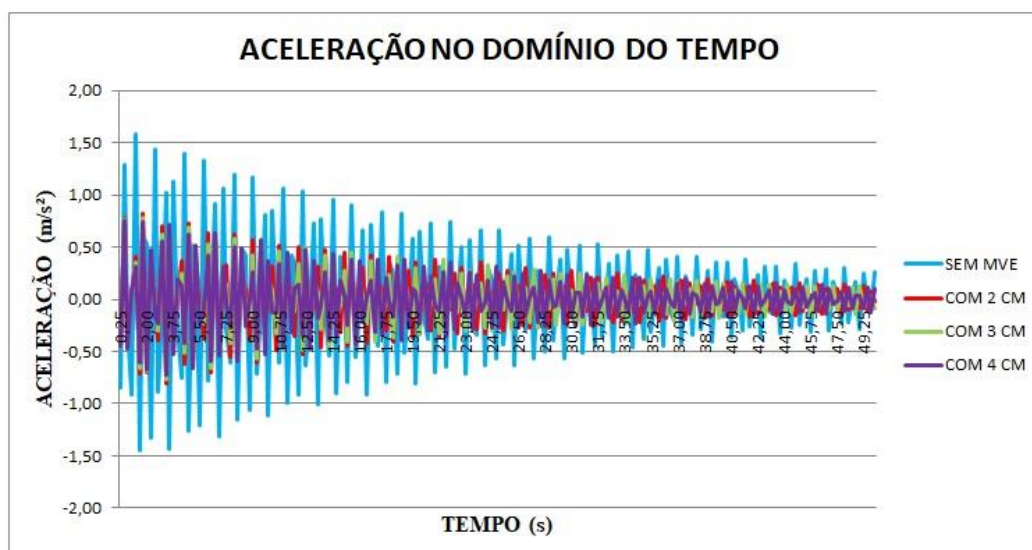


Figura 4.20 - Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Carga contínua de uma pessoa pulando.

A Figura 4.21 mostra o resultado da aceleração no domínio do tempo obtido, neste trabalho, das análises da plataforma sem e com a camada de material viscoelástico, de diferentes espessuras, para a carga contínua de três pessoas pulando no centro da plataforma.

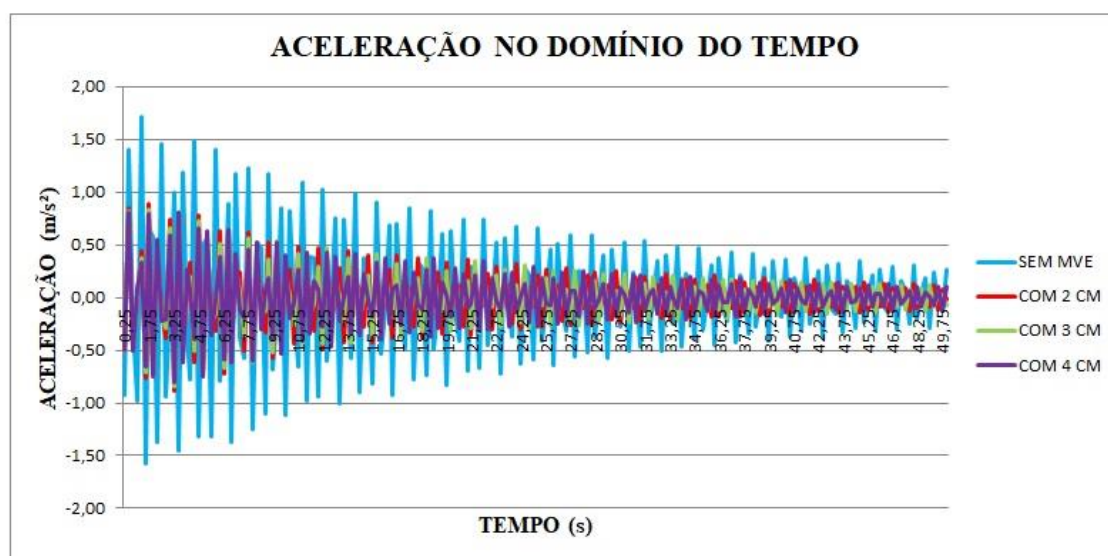


Figura 4.21 – Análise no domínio do tempo em função da aceleração. Carga contínua de três pessoas pulando.

Das Figuras 4.20 e 4.21 pode-se observar que a adição da camada de material viscoelástico reduziu as amplitudes de vibração para os dois casos de carregamento desde o momento de aplicação da carga e que essa redução se manteve gradual até chegar bem próximo de zero. É possível observar também que a redução das amplitudes acontece desde a camada de material viscoelástico de dois centímetros, sendo maior para a camada de quatro centímetros.

Como pode ser observado nas figuras acima tanto os resultados obtidos com o uso do amortecedor de massa sintonizado como os resultados obtidos com adição da camada de material viscoelástico apresentaram redução nas amplitudes de aceleração e deslocamento, para o caso da carga de impacto. Comparando o resultado obtido por Campuzano (2016) para o deslocamento devido à carga de impacto com o resultado obtido com adição da camada de material viscoelástico pode-se perceber que este último apresentou uma redução de aproximadamente 50% enquanto o AMS reduziu as amplitudes de vibração em aproximadamente 20%. E para os demais carregamentos analisados observa-se que as amplitudes de aceleração apresentaram redução desde o momento de aplicação da carga, sendo essa redução obtida pela adição do amortecedor de massa sintonizado somente após vinte segundos.

## 5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar numericamente o desempenho do material viscoelástico como amortecedor, no presente trabalho foram realizadas análises numéricas no domínio do tempo para se conhecer o comportamento da estrutura sem e com a camada de material viscoelástico, de diferentes espessuras e os resultados comparados com os obtidos por Campuzano (2016), que utilizou amortecedor de massa sintonizado.

Comparando os resultados obtidos para o carregamento que simula o impacto, tanto os resultados de aceleração obtidos com adição de material viscoelástico como os resultados obtidos com adição de um AMS apresentaram uma redução significativa. O deslocamento obtido após a adição da camada de material viscoelástico foi reduzido, aproximadamente 50%, ficando em torno de 0,015 m, desde o momento de aplicação da carga, para a camada de material viscoelástico de dois centímetros. As amplitudes de deslocamento diminuíram ainda mais com o aumento da espessura da camada de material viscoelástico. Com o uso do AMS também houve uma redução, porém as amplitudes de deslocamento ainda chegaram a 0,030 m sendo reduzida somente após os vinte segundos.

Para a aplicação da carga contínua que simula uma pessoa pulando no centro da plataforma tanto as análises da estrutura com adição da camada de material viscoelástico como as análises da estrutura com adição de um AMS apresentaram redução nas amplitudes de aceleração. Porém, nas análises da estrutura com adição da camada de material viscoelástico a redução das amplitudes de aceleração ocorre desde o momento de aplicação da carga mantendo-se gradual até chegar bem próximo de zero. Já nas análises da estrutura com adição de um AMS a redução das amplitudes ocorre após vinte segundos, chegando a zero.

Para a aplicação da carga contínua que simula três pessoas pulando distribuídas no centro da plataforma ocorre o mesmo que no carregamento que simula o pulo contínuo de uma pessoa no centro da plataforma. Nas análises da estrutura com adição da camada de material viscoelástico a redução das amplitudes de aceleração ocorre desde o momento de aplicação da carga mantendo-se gradual até chegar bem próximo de zero. Já nas análises da estrutura com adição de um AMS a redução das amplitudes ocorre após vinte segundos, chegando a zero.

Com base nos resultados mostrados e nas comparações feitas conclui-se que a adição da camada de material viscoelástico é eficiente para reduzir vibrações causadas por atividades humanas em estruturas como as lajes de pisos, visto que a sua adição na estrutura analisada reduziu consideravelmente as amplitudes de deslocamento e aceleração para os tipos de

carregamento analisados e o mais interessante foi que essas reduções ocorreram desde o momento de aplicação da carga.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) pela oportunidade e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ABEYSINGH, C. M, THAMBIRATNAM, D. P., PERERA, N. J. Dynamic performance characteristics of an innovative hybrid composite floor plate system under human-induced loads. *Composite Structures*. p. 179 – 190, julho, 2013.

ANSYS, *Swanson Analysis Systems*, Version 14.5, 2012.

ANTAR, J. *Modelling floors with a constrained damping layer*. Faculty of Engineering and Physical Sciences. University of Manchester, 2011.

CAMPUZANO, J. E., *Plataforma de ensaios dinâmicos: Estudos Preliminares, Projeto e Construção*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2011.

CAMPUZANO, J. E. *Proposta de um amortecedor para atenuação de vibrações em pisos de concreto: análise numérica e experimental*. Tese de doutorado. Universidade de Brasília, Brasil, 2016.

FAÍSCA, R. G. *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

LENZEN, K.M. Vibration of Steel Joist-Concrete slabs floors. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*. Vol.3, 1966.

LIMA, D. V. F. *Controle de vibrações induzidas em uma laje de academia de ginástica com a utilização de amortecedores de massa sintonizados*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB, 2007.

MELLO, A. V. de A. *Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

SAIDI, I., GAD E.F., HARITOS. N. Development of passive viscoelastic damper to attenuate excessive Floor vibrations. *Elsevier Journal Engineering Structures*. p. 3317-3328, julho, 2011.

TORRES, D. R. *Redução de vibrações utilizando múltiplos sistemas passivos de absorção*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

VARELA, W. D., BATTISTA, R. C. Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks. *Elsevier Journal Engineering Structures*. p. 2485-2494, julho, 2011.

VASCONCELOS, R. P. de. *Controle dinâmico estrutural via mecanismos viscoelásticos*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.