



SISTEMA DE ISOLAMENTO PENDULAR PARA ESTRUTURAS SUBMETIDAS A EXCITAÇÃO DE BASE

Laila Aparecida Saraiva Pereira

Carlos Magluta

Ney Roitman

laila@coc.ufrj.br

magluta@coc.ufrj.br

roitman@coc.ufrj.br

Laboratório de Estruturas e Materiais – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão, CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. Ao longo dos anos tecnologias antissísmicas foram desenvolvidas com o intuito de mitigar os danos causados por terremotos. Dentre os sistemas antissísmicos desenvolvidos, um que vem sendo muito utilizado e obtendo bons resultados é o sistema de isolamento de base, que é fundamentado no desacoplamento entre o movimento do solo devido a uma excitação de base e a estrutura de análise, reduzindo os possíveis danos causados por terremotos. Nesse tipo de isolamento coloca-se entre a estrutura e a sua fundação uma interface flexível, permitindo o desacoplamento de movimentos e dando uma flexibilidade e amortecimento extra ao sistema. Dentre os sistemas de isolamento de base existentes, será analisado aqui o sistema de isolamento pendular, cuja interface flexível consiste no deslocamento de uma massa sobre uma superfície circular. A grande vantagem deste sistema é que o movimento da massa sobre a superfície circular gera forças de restituição que farão com que a estrutura volte à posição de equilíbrio. O estudo foi desenvolvido com dois modelos numéricos, um de estrutura com base fixa ajustado com dados experimentais e o outro de uma estrutura com sistema de isolamento pendular. Os resultados numéricos obtidos mostram que o sistema de isolamento se mostra eficiente na redução das respostas da estrutura quando submetida a uma excitação de base do tipo ruído branco. Por fim, um estudo paramétrico é apresentando mostrando a influência de cada parâmetro do isolador pendular na resposta da estrutura isolada.

Palavras-chave: Sistema de isolamento de base, proteção antissísmica, sistema de isolamento pendular.

1 INTRODUÇÃO

O movimento das placas tectônicas causa tremores percebidos na superfície terrestre, os quais são chamados de terremotos. Tal fenômeno causam grandes perdas humanas e materiais. A fim de minimizar os danos causados pelo terremotos, a ciência busca desenvolver tecnologias antissísmicas que garantam a integridade estrutural e conforto humano.

Nos últimos anos diversas tecnologias foram desenvolvidas, dentre elas os sistemas de isolamento de base. Tais sistemas são baseados na premissa do desacoplamento entre o movimento do solo e a estrutura isolada. O desacoplamento se dá utilizando elementos de baixa rigidez lateral entre a estrutura e sua fundação. Dentre os sistemas de isolamento de base existentes na literatura, na presente pesquisa será analisado o sistema baseado no rolamento entre superfícies que data século XIX (Harvey Jr. & Kelly, 2016).

Na literatura são encontrados diferentes tipos de sistema de rolamento, como o apresentado por Lin & Hone (1993) que consiste no rolamento de cilindros entre duas superfícies planas. Jangid (2000) estudou sistema similar ao apresentado por Lin & Hone (1993) porém considerando um dispositivo com rigidez ligada à base da estrutura reduzindo deslocamentos residuais e fazendo com que a estrutura volte à posição original após o terremoto. Lee & Liang (2003) propõe um sistema de rolamento de cilindros em superfícies inclinadas em duas direções (em forma de V). A disposição dos cilindros em superfícies inclinadas faz com que sejam criadas forças de restituição, trazendo a estrutura para a posição original após o terremoto.

Hosseini & Kangarloo (2007) propõe o rolamento de cilindros em superfícies curvas. Nesse sistema, assim como no apresentado por Lee & Liang (2003), são geradas forças de restituição, porém tem a vantagem de não ter descontinuidade da rigidez como ocorre na transição das superfícies inclinadas. As forças geradas no movimento do cilindro na superfície curva são não-lineares e similares às do pêndulo clássico, por essa razão esse sistema é chamado de pendular.

O sistema de isolamento pendular é o objeto de estudo da presente pesquisa. Para o desenvolvimento do estudo foram realizados ensaios experimentais em um pórtico representando uma estrutura. A descrição dos ensaios e os resultados obtidos são apresentados na primeira seção deste documento. Um modelo numérico da estrutura sem isolador calibrado com resultados experimentais é desenvolvido e comparado com um modelo numérico com isolador, a fim de que possa ser analisada a eficácia do sistema proposto. Um estudo paramétrico do modelo numérico é apresentado. Os resultados numéricos são apresentados na terceira seção do *paper*. Por fim, são feitos comentários finais acerca do que foi observado pelas simulações numéricas e são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para os ensaios experimentais foi utilizado um modelo físico desenvolvido por Cano (2013) que consiste em um pórtico com quatro andares. Os andares são constituídos de chapas de alumínio com espessura de 4.0 mm e os pilares são feitos de lâminas poliméricas com seção transversal de 20 x 2.94 mm. O pórtico encontra-se apoiado em uma chapa de alumínio de dimensões 320 x 250 mm. A fixação dos pilares à chapa de alumínio da base e aos andares

é feita por conexões de alumínio e parafusos. O pé direito médio dos andares é 194 mm. A massa do pórtico sem qualquer instrumentação a ela fixada é de 5.16 kg. Na Fig. 1 é representado o modelo desenvolvido por Cano (2013) com as dimensões em mm.

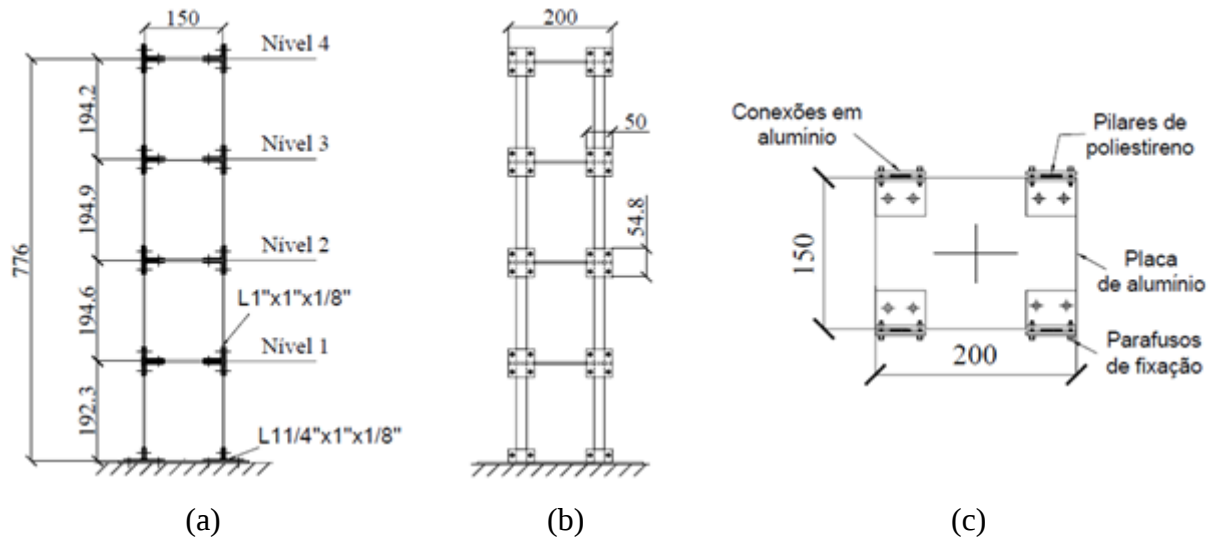


Figura 1- Modelo físico do edifício: (a) Vista na direção menor inércia; (b) Vista na direção da maior inércia; (c) Vista superior. Cano (2013) Adaptada.

Para os ensaios foram utilizados 16 acelerômetros distribuídos nos andares. Em cada andar foram fixados 2 acelerômetros paralelos na direção de menor inércia e outros 2 acelerômetros paralelos na direção de maior inércia. Os acelerômetros foram dispostos nos andares de tal forma que fosse possível identificar modos de flexão nas duas direções principais de inércia tal como os modos de torção. Além dos 16 acelerômetros nos andares foram utilizados mais 3 acelerômetros na base do edifício, um em cada direção principal de inércia e um na direção vertical. Por fim, foi utilizado um acelerômetro na direção da excitação de base imposta ao modelo, totalizando 20 acelerômetros utilizados nos ensaios experimentais.

O pórtico foi fixado a um sistema de excitação, formado por uma placa ligada a um excitador eletromagnético através de uma haste rígida. O sinal enviado ao sistema de excitação é gerado em um analisador de espectros e pode ser do tipo ruído branco ou senoidal. O pórtico foi fixado a 45° em relação à excitação de base para que ao acionar o sistema pudessem ser excitados os modos de flexão nas duas direções de inércia e os modos de torção. A instrumentação do ensaio pode ser vista na Fig. 2 enquanto que o sistema de excitação é apresentado na Fig. 3.

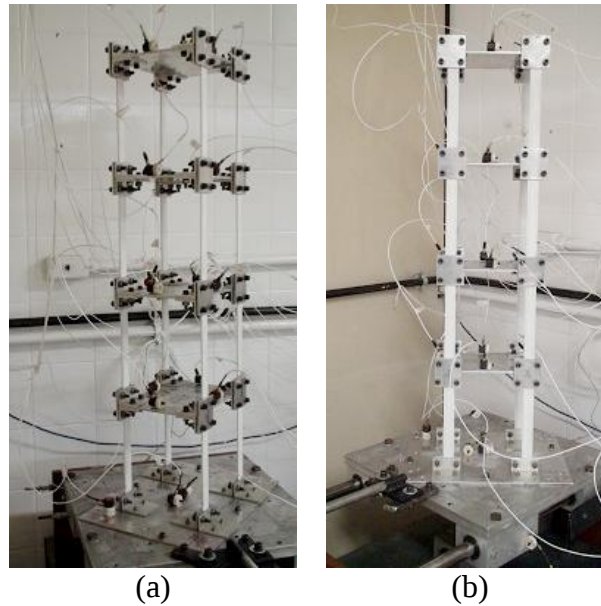


Figura 2- Instrumentação do modelo para ensaios: (a) Direção de menor inércia; (b) Direção de maior inércia.

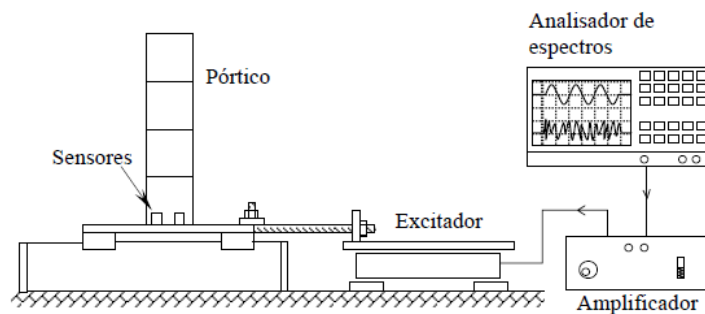


Figura 3- Sistema de excitação do modelo. Cano (2013) Adaptada.

A identificação dos parâmetros modais do pórtico foi feita a partir de dois ensaios: impactos através de um martelo piezoelétrico e excitação de base com sinal do tipo ruído branco. Os impactos foram realizados nas direções principais de inércia e também nas extremidades dos andares para excitar os modos de torção. Os sinais obtidos foram analisados por dois programas desenvolvidos na COPPE/UFRJ em linguagem LabVIEW. O primeiro consiste em um analisador de espectros que permite a obtenção das frequências naturais através da transformada de Fourier do sinal de entrada. Além disso, é possível obter a fase entre dois sinais temporais e FRF's destes. Tal programa permitiu além da identificação das frequências naturais e FRF's, uma estimativa dos modos de vibração da estrutura. Mais sobre o analisador de espectros pode ser visto em Andrade (1997). Já o segundo programa utiliza a técnica Short Time Frequency Technique (STFT), e através dos sinais temporais estima os espectros de cada sensor e a taxa de amortecimento para cada frequência. Mais sobre o STFT pode ser encontrado em Bucher (2001).

Dos ensaios realizados foi possível identificar 6 modos de vibração e os resultados obtidos são apresentados com média e desvio padrão na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros modais do modelo físico.

Modo	Tipo	Frequência (Hz)		ξ - Taxa de Amortecimento (%)
		Impactos	Ruído	
1	Flexão menor inércia	7.70 ± 0.01	7.58 ± 0.01	0.47 ± 0.01
2	Flexão maior inércia	20.21 ± 0.01	19.77 ± 0.07	0.44 ± 0.02
3	Torção	22.11 ± 0.03	22.91 ± 0.06	0.43 ± 0.00
4	Flexão menor inércia	22.79 ± 0.01	22.75 ± 0.03	0.34 ± 0.00
5	Flexão menor inércia	35.55 ± 0.01	35.61 ± 0.02	0.52 ± 0.03
6	Flexão menor inércia	44.29 ± 0.01	44.17 ± 0.07	0.31 ± 0.00

Pela análise das fases entre os acelerômetros dos andares, observou-se que o modo 4 não é um modo puro de flexão, porém para fins de apresentação de resultados, foi considerado o modo predominante de flexão.

3 MODELO NUMÉRICO

Para representar o pórtico foi adotada a hipótese de *shear building*, ou seja, foi adotado que nos níveis dos andares as únicas forças atuantes são de cisalhamento, sem rotação relativa entre os andares e pilares. Nessa hipótese os únicos graus de liberdade considerados são os deslocamentos horizontais dos andares. Foram consideradas apenas massas concentradas nos níveis de cada andar, e a cada pilar foi associado um valor de rigidez e um valor de amortecimento. Na Fig. 4 é mostrado o modelo adotado para o desenvolvimento numérico da estrutura.

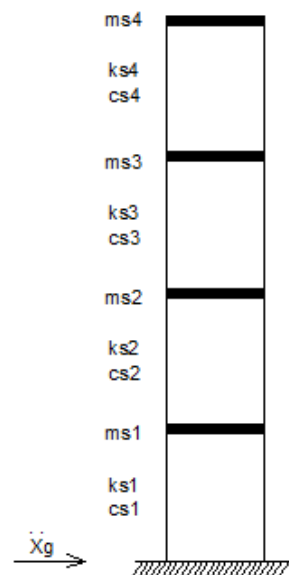


Figura 4- Modelo adotado para desenvolvimento numérico.

Na Fig. 4 é possível identificar os parâmetros da estrutura (m_s , k_s , c_s) e a excitação de base aqui representada por $\ddot{x}_g$.

Visto que o modelo adotado é 2D, foi considerada apenas a direção de menor inércia da estrutura, da qual foram identificados 4 modos de flexão experimentais. Para a estrutura do tipo *shear building* as matrizes de massa e rigidez possuem a seguinte forma:

$$M = \begin{bmatrix} m_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{s3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{s4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{s1} + k_{s2} & -k_{s2} & 0 & 0 \\ -k_{s2} & k_{s2} + k_{s3} & -k_{s3} & 0 \\ 0 & -k_{s3} & k_{s3} + k_{s4} & -k_{s4} \\ 0 & 0 & -k_{s4} & k_{s4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Como na presente pesquisa foram feitos ensaios experimentais prévios e já se tinha conhecimento das taxas de amortecimento da estrutura, em vez de usar a matriz de amortecimento proporcional à matriz de massa de rigidez da estrutura (amortecimento de Rayleigh), optou-se por utilizar uma matriz de amortecimento não-proporcional que leva em consideração as taxas de amortecimento experimentais. O procedimento detalhado da montagem dessa matriz de amortecimento pode ser encontrado em Pereira et. al (2015).

O movimento dinâmico de uma estrutura com n graus de liberdade submetida a uma excitação de base é dada pela seguinte equação matricial:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -MI\ddot{X}_g \quad (3)$$

onde,

M: matriz de massa da estrutura de ordem $n \times n$

C: matriz de amortecimento da estrutura de ordem $n \times n$

K: matriz de rigidez da estrutura de ordem $n \times n$

I: operador de influência

$\ddot{X}$: vetor de acelerações da estrutura

$\dot{X}$: vetor de velocidades da estrutura

X: vetor de deslocamentos da estrutura

$\ddot{X}_g$: aceleração sísmica

O operador de influência é uma matriz que faz a ligação da excitação de base com os graus de liberdade da estrutura. Cada componente da matriz assume valor unitário quando a excitação de base está na mesma direção do grau de liberdade, assume valor 0 se estiver perpendicular em relação ao grau de liberdade, ou valor intermediário se estiver entre 0° e 90° em relação ao grau de liberdade correspondente. A dimensão da matriz está atrelada ao número de graus de liberdade (linhas) e ao número de excitações de aceleração (colunas). Como na presente pesquisa foi considerada uma excitação unidirecional (horizontal), a matriz I se torna um vetor coluna.

O modelo numérico foi submetido à análise pelo programa *Matlab*, onde através da resolução de problema de autovalor e autovetor, foi possível identificar as frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento do modelo simplificado. As massas de cada andar foram calculadas de forma que o modelo simplificado tivesse a mesma massa da estrutura instrumentada com acelerômetros, desprezando a massa da placa de base (4.50 kg). As rigidezes foram ajustadas de modo que as frequências naturais do modelo numérico ficassem próximas às obtidas experimentalmente. Os valores ajustados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores ajustados do modelo numérico.

	Andar 1	Andar 2	Andar 3	Andar 4
Massa (kg)	1.125	1.125	1.125	1.125
Rigidez (N/m)	2.01×10^4	2.10×10^4	2.50×10^4	2.90×10^4

A correlação numérica-experimental obtida com os ensaios experimentais e o modelo simplificado é mostrada na Tabela 3. Os valores apresentados para frequências naturais são a média dos ensaios com impactos e por ruído branco. Os modos foram renumerados visto que o modelo simplificado não é capaz de simular os modos de flexão na maior inércia tal como o modo de torção.

Tabela 3- Correlação numérica-experimental estrutura com base fixa

Modo	Tipo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	ξ_{exp} (%)	ξ_{num} (%)
1	Flexão menor inércia	7.64 ± 0.09	7.64	0.47 ± 0.01	0.47
2	Flexão menor inércia	22.77 ± 0.03	23.34	0.34 ± 0.00	0.34
3	Flexão menor inércia	35.58 ± 0.04	35.38	0.52 ± 0.03	0.52
4	Flexão menor inércia	44.23 ± 0.09	44.44	0.31 ± 0.00	0.31

Os resultados mostram que o modelo do tipo *shear building* alcançou uma boa correlação com o modelo físico. Os modos de vibração foram comparados e são apresentados na Fig. 5.

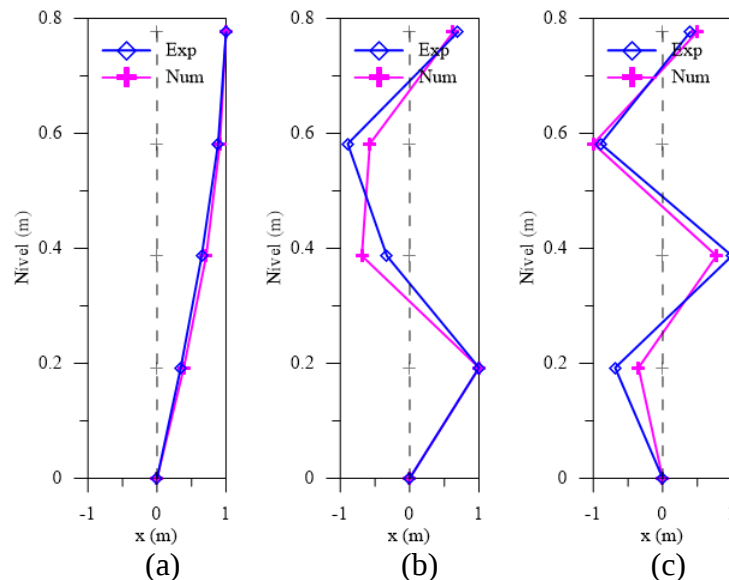


Figura 5- Modos de vibração experimentais e numéricos: (a) Modo 1; (b) Modo 3; (c) Modo 4.

Como dito anteriormente, o modo 2 não é um modo puro de flexão e por essa razão não foi apresentada sua comparação com o modo numérico. Na Fig. 6 são apresentadas as FRF's do segundo andar dos modelos físicos e numéricos submetidos à excitação de base do tipo ruído branco.

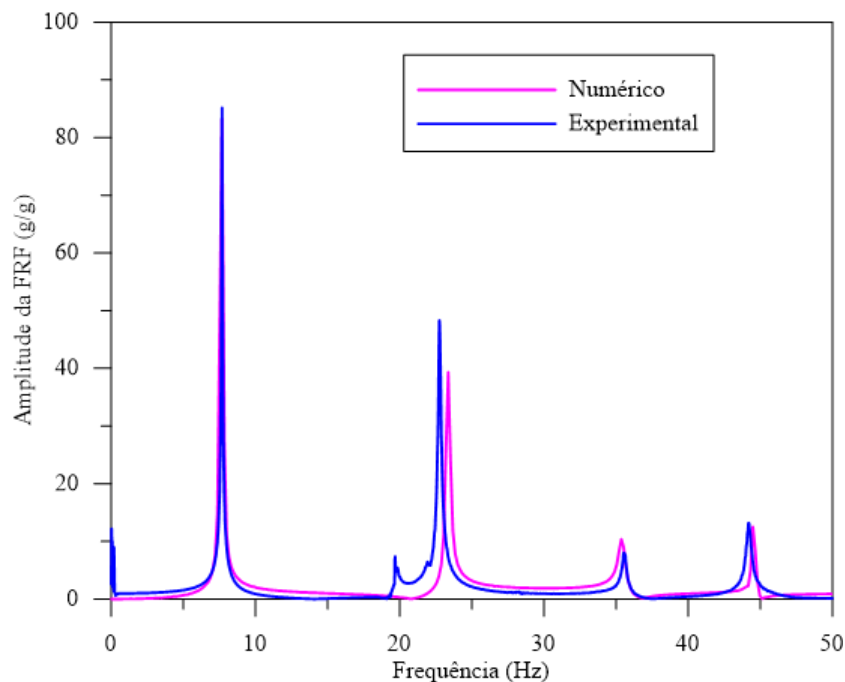


Figura 6- FRF's do segundo andar dos modelos experimental e numérico submetido à excitação de base.

As correlações apresentadas dos parâmetros modais e das FRF's mostram que o modelo numérico comporta-se de modo satisfatório quando comparado ao modelo físico, podendo então tomá-lo como base para o desenvolvimento numérico do sistema de isolamento proposto pela presente pesquisa.

3.1 Sistema de isolamento pendular

O sistema de isolamento aqui proposto consiste em posicionar a estrutura sobre uma superfície curva com raio constante. A grande vantagem deste sistema de isolamento é que a própria natureza do deslocamento da estrutura sobre a superfície curva, faz com que sejam geradas forças de restituição que atuam trazendo a estrutura para o ponto inicial de equilíbrio. As forças geradas nesse processo são lineares e similares às do pêndulo clássico, por essa razão esse sistema é chamado de isolador pendular de base. Na figura 7 é mostrado como se dá o movimento do isolador.

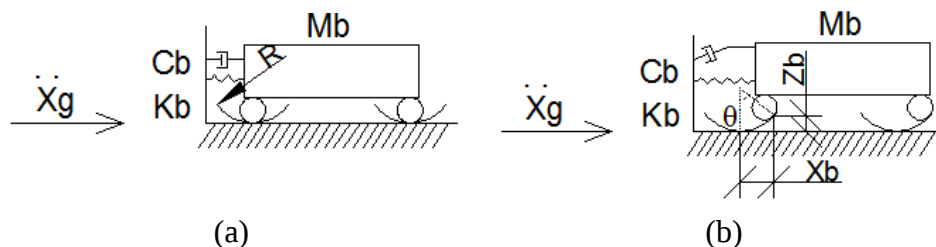


Figura 7- Movimento do isolador pendular de base: (a) posição inicial de equilíbrio; (b) em movimento.

Ao modelo de isolador pendular foram adicionados um amortecedor c_b e uma mola k_b . Para valores de k_b elevados o sistema se aproxima do comportamento de base fixa. A massa da base é representada por m_b . O raio da superfície circular é R . Os deslocamentos da base X_b e Z_b são determinados de acordo com o ângulo θ e raio R :

$$X_b = R \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

$$Z_b = R \cdot (1 - \cos(\theta)) \quad (5)$$

As derivadas dos deslocamentos em relação ao tempo resultam nas velocidades horizontais e verticais, $\dot{X}_b$ e $\dot{Z}_b$ respectivamente.

$$\dot{X}_b = R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\dot{Z}_b = R \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

Na Fig.8 é mostrado o esquema de acoplamento do isolador pendular à estrutura do tipo *shear building* sendo a estrutura aqui representada, para efeitos de simplicidade, por uma coluna representativa.

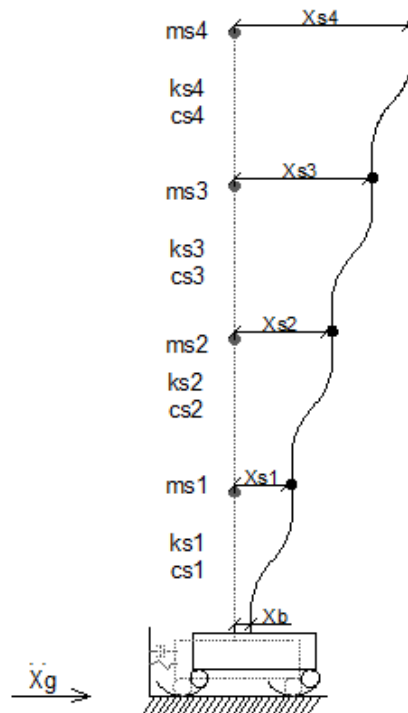


Figura 8- Estrutura com isolador pendular.

Considerando as coordenadas generalizadas θ , x_{s1} , x_{s2} , x_{s3} , x_{s4} é possível escrever as equações de Lagrange para cada coordenada de um sistema não-conservativo da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

onde,

q_i : coordenadas generalizadas do sistema

T : energia cinética do sistema

U : energia potencial do sistema

Q_i : forças generalizadas do sistema

O termo Q_i é definido como o trabalho generalizado das forças generalizadas F_j nas coordenadas generalizadas q_i . Assumindo que o sistema está em equilíbrio, então o trabalho virtual total δW pode ser obtido pelo somatório de trabalhos internos δW_j . O trabalho interno é definido como o produto de uma pequena força F_j pela perturbação virtual causada δr_j na posição r_j das partículas. Logo:

$$\delta W = \sum_{j=1}^n \delta W_j = \sum_{j=1}^n F_j \cdot \delta r_j \quad (9)$$

A perturbação δr_j causada pela força F_j pode ser escrita nos termos das coordenadas generalizadas:

$$\delta r_j = \sum_{i=1}^n \frac{\delta r_j}{\delta q_i} \delta q_i \quad (10)$$

Reescrevendo a Eq. (9):

$$\delta W = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n F_j \cdot \frac{\delta r_j}{\delta q_i} \delta q_i \quad (11)$$

As forças generalizadas serão obtidas por:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n F_j \cdot \frac{\delta r_j}{\delta q_i} \quad (12)$$

O trabalho virtual do sistema será dado por:

$$\delta W = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \delta q_i \quad (13)$$

As energias cinética e potencial do sistema são dadas pelas expressões a seguir:

$$T = \frac{1}{2} m_b (R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^4 m_{si} \cdot \dot{x}_{si}^2 \right] + \frac{1}{2} (m_b + m_{TS}) (R \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \quad (14)$$

onde,

$$m_{TS} = m_{s1} + m_{s2} + m_{s3} + m_{s4}$$

$$U = \frac{1}{2} k_b (R \cdot \sin(\theta))^2 + \frac{1}{2} k_{s1} (x_{s1} - R \cdot \sin(\theta))^2 + \frac{1}{2} \left[\sum_{i=2}^4 k_{si} (x_{si} - x_{s(i-1)})^2 \right] \quad (15)$$

$$+ m_b \cdot g \cdot R (1 - \cos(\theta)) + m_{TS} \cdot g \cdot R (1 - \cos(\theta))$$

Calculando o trabalho virtual das forças não conservativas (excitação de base e forças de amortecimento) e aplicando a Eq. (13) obtêm-se as forças generalizadas Q_i :

$$\delta W = [-m_b \ddot{x}_g - c_b \cdot R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} + c_{s1} (\dot{x}_{s1} - R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})] (R \cdot \cos(\theta) \cdot \delta\theta) - \quad (16)$$

$$c_b \cdot R \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta} (R \cdot \sin(\theta) \delta\theta) + [-m_{s1} \ddot{x}_g - c_{s1} (\dot{x}_{s1} - R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta}) + c_{s2} (\dot{x}_{s2} - \dot{x}_{s1})] \delta x_{s1} +$$

$$\left[\sum_{i=2}^4 [-m_{si} \ddot{x}_g + c_{s(i+1)} (\dot{x}_{s(i+1)} - \dot{x}_{si}) - c_{si} (\dot{x}_{si} - \dot{x}_{s(i-1)})] \delta x_{si} \right]$$

$$Q_\theta = [-m_b \ddot{x}_g - c_b \cdot R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} + c_{s1} (\dot{x}_{s1} - R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})] (R \cdot \cos(\theta)) - c_b \cdot R^2 \cdot \sin^2(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (17)$$

$$Q_{x_{s1}} = -m_{s1} \ddot{x}_g - c_{s1} (\dot{x}_{s1} - R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta}) + c_{s2} (\dot{x}_{s2} - \dot{x}_{s1}) \quad (18)$$

$$Q_{x_{si}} = -m_{si} \ddot{x}_g + c_{s(i+1)} (\dot{x}_{s(i+1)} - \dot{x}_{si}) - c_{si} (\dot{x}_{si} - \dot{x}_{s(i-1)}) \quad (19)$$

Substituindo as Eqs. (14), (15), (17), (18) e (19) na Eq. (8), obtêm-se as cinco equações de movimento do sistema. A Eq. (20) descreve o movimento da base e a Eq. (21) descreve os movimentos dos andares da estrutura em forma matricial.

$$m_b R^2 \ddot{\theta} + m_{TS} R^2 \sin^2(\theta) \cdot \ddot{\theta} + m_{TS} R^2 \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2 + k_b R^2 \sin(\theta) \cos(\theta) \quad (20)$$

$$+ k_{s1} (x_{s1} - R \sin(\theta)) (-R \cos(\theta)) + (m_b + m_{TS}) g R \sin(\theta)$$

$$+ c_b R^2 \cdot \dot{\theta} - c_{s1} (\dot{x}_{s1} - R \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta}) (R \cos(\theta)) = -m_b \ddot{x}_g (R \cos(\theta))$$

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + K X + \begin{bmatrix} -k_{s1} R \sin(\theta) - c_{s1} R \cos(\theta) \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -M I \ddot{x}_g \quad (21)$$

As equações obtidas do modelo em base fixa e do modelo com isolador foram integradas pela função *ode45* do Matlab que é baseada no método do Runge-Kutta. As respostas dos dois modelos no Tempo e em Função de Transferência permitiram então a comparação entre eles.

3.2 Comparação base fixa – isolador pendular

Visto que o isolador possui três parâmetros a serem determinados (k_b , R e c_b), para fins de comparação com o modelo em base fixa, definiu-se um isolador padrão com as seguintes características:

$$k_b = 0.001 \text{ N/m}; R = 0.3\text{m}; c_b = 2c_{s1}$$

Para a massa m_b foi considerado valor igual à base do modelo experimental $m_b = 1.72 \text{ kg}$.

Os dois modelos sem e com isolador foram submetidos a uma excitação de base do tipo ruído branco até 80 Hz. Na Fig. 9 é mostrada a FRF entre a aceleração do primeiro andar da estrutura com base fixa e a excitação de base $\ddot{x}_g$, e a Função de Transferência entre a aceleração do primeiro andar da estrutura isolada e a aceleração da base do isolador $\ddot{x}_b$.

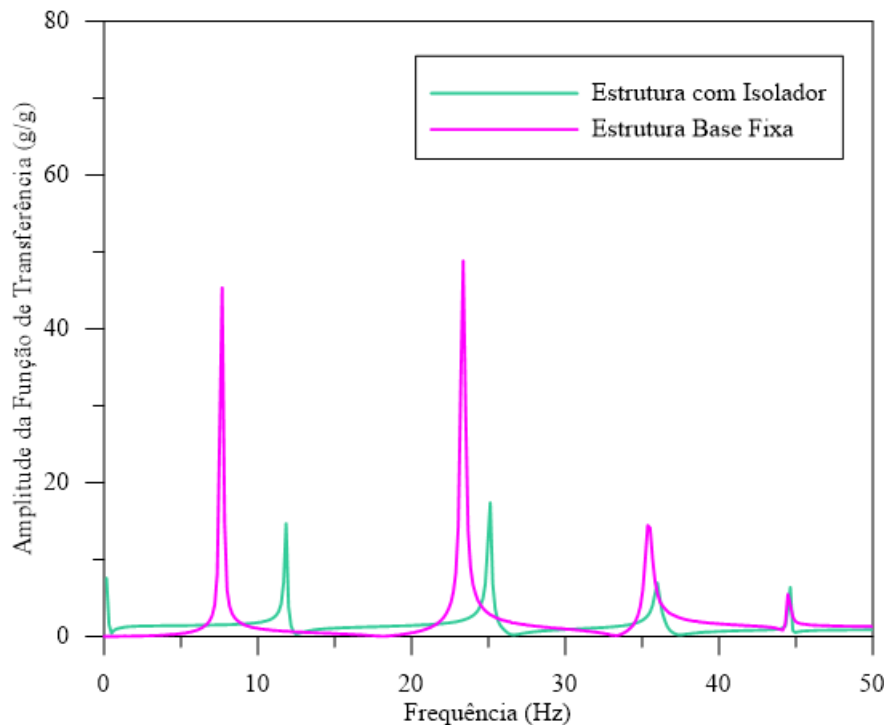


Figura 9 – Funções de Transferência do 1º andar - Estrutura sem e com isolador.

Observa-se pela Fig. 9 que as amplitudes da função de transferência com o isolador tiveram uma redução significativa quando comparada à estrutura com base fixa. Porém observou-se que o isolador não foi eficaz na redução da amplitude para o quarto modo de vibração, o que deve ser investigado nos próximos passos da pesquisa. Comportamento similar foi obtido para os outros andares da estrutura, redução da amplitude da função de transferência para os três primeiros modos e falta de eficácia para o quarto modo.

A segunda comparação foi dos esforços cortantes nos andares, para tal foram considerados os deslocamentos relativos dos andares. Na Tabela 4 são apresentados os valores máximos absolutos de esforços cortantes em cada andar nos dois modelos.

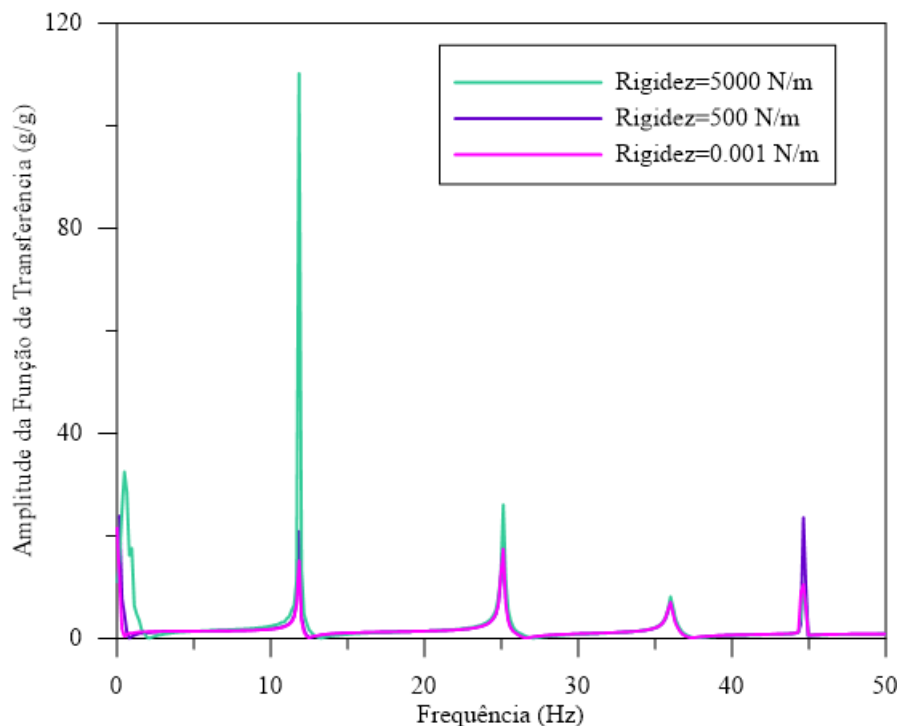
Tabela 4 - Esforços cortantes estrutura sem e com isolador.

	Esforço Cortante (N)			
	Andar 1	Andar 2	Andar 3	Andar 4
Estrutura Base Fixa	0.94	0.86	0.66	0.43
Estrutura com Isolador	0.16	0.16	0.15	0.10
Redução com Isolador	82.31%	80.96%	77.46%	76.78%

Os resultados da Tabela 4 mostram que o isolador é eficaz na redução dos esforços cortantes gerados quando a estrutura está submetida a uma excitação de base. Nota-se também que a eficácia é decrescente do primeiro andar até o quarto.

3.3 Estudo paramétrico

A fim de determinar um isolador pendular mais eficaz, é proposto aqui um estudo paramétrico do modelo idealizado. O isolador padrão adotado foi o mesmo do item anterior e fizeram-se variações na rigidez, amortecimento e raio do modelo com a finalidade de identificar qual parâmetro tem maior influência na eficácia do conjunto. Nas Figs. 10, 11 e 12 são mostrados os estudos paramétricos de rigidez, amortecimento e raio, respectivamente. Os resultados são apresentados em formas de funções de transferência entre a aceleração do primeiro andar da estrutura e a aceleração da base do isolador $\ddot{x}_b$.

**Figura 10 - Estudo paramétrico: Rigidez.**

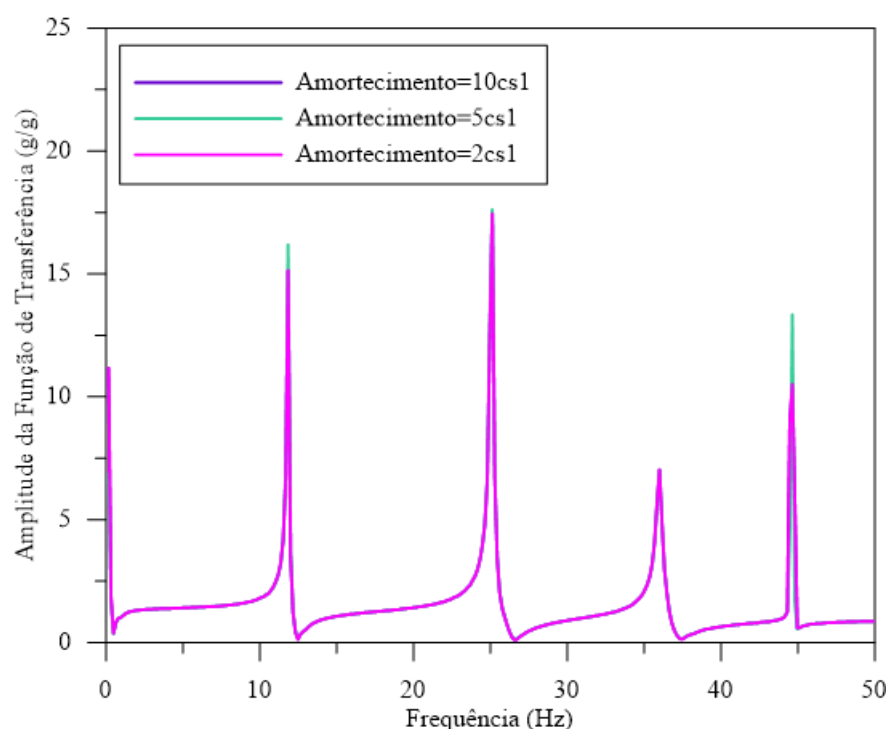


Figura 11- Estudo paramétrico: amortecimento.

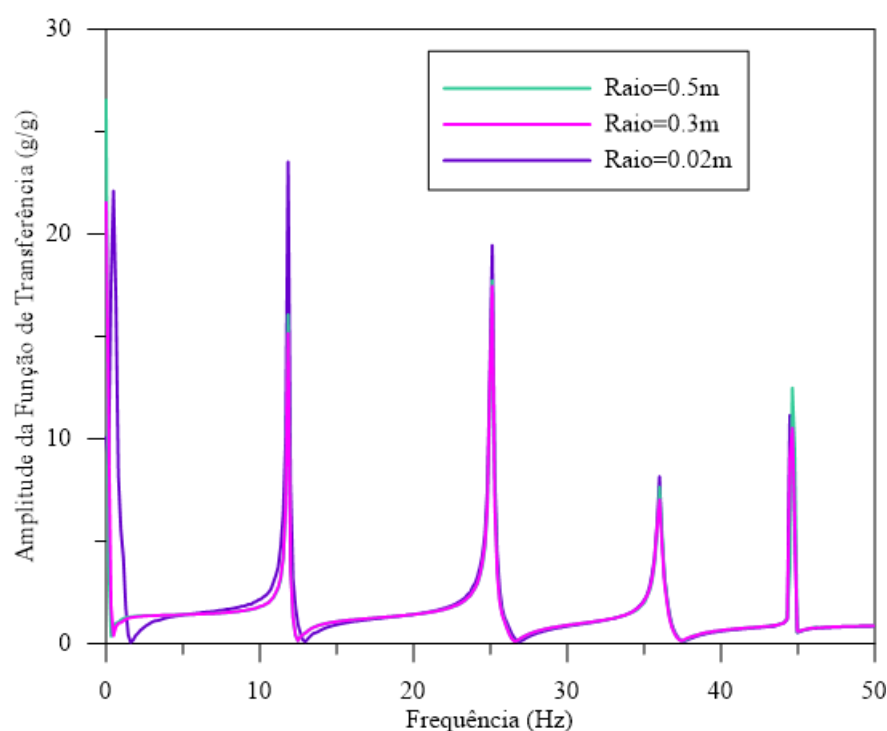


Figura 12- Estudo paramétrico: Raio.

Observa-se pela Fig. 10 que o aumento da rigidez do isolador faz com que o sistema fique menos eficiente, principalmente observando os dois primeiros modos. Pela Fig. 11 nota-se que o parâmetro amortecimento não tem grande influência na função de transferência da estrutura. Da Fig. 12 pode-se concluir que com a redução do raio do isolador, há um perda de eficácia do sistema proposto, principalmente para o primeiro modo.

Ainda no estudo da influência dos parâmetros, fez-se uma análise da resposta no domínio do tempo da estrutura. Para fins de comparação, foram tomados os maiores valores absolutos de deslocamento e aceleração da base para as diferentes configurações obtidas com a variação dos parâmetros. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo dos valores máximos de deslocamento e aceleração da base com variação dos parâmetros.

	Rigidez (N/m)			Amortecimento			Raio (m)		
	0.001	500	5000	2cs1	5cs1	10cs1	0.02	0.3	0.5
Deslocamento(m. 10^{-4})	6.29	2.97	1.26	6.29	4.56	3.82	1.52	6.29	7.08
Aceleração (m/s ² . 10^{-1})	1.22	1.34	1.86	1.22	1.01	0.09	1.65	1.22	1.18

Da Tabela 5 tem-se que com o aumento da rigidez do isolador, há uma redução dos deslocamentos, em contrapartida, há um aumento da aceleração. Com o aumento do amortecimento há uma redução tanto do deslocamento quanto da aceleração da base. Com o aumento do raio, há um aumento do deslocamento da base acompanhado de uma redução da aceleração

4 CONCLUSÕES

Na presente trabalho fez-se um estudo preliminar de um isolador pendular de base. Inicialmente, o modelo numérico com base fixa utilizando a hipótese de *shear building* obteve bons resultados quando comparado ao pórtico físico ensaiado em laboratório. Com o modelo numérico ajustado, desenvolveu-se o sistema de acoplamento da estrutura com o isolador pendular, obtendo equações de movimento que integradas pelo programa *Matlab*, permitiram a comparação dos modelos sem e com isolamento.

O sistema de isolamento pendular mostrou-se eficaz nas reduções das amplitudes das funções de transferência e nos esforços cortantes em cada andar, com reduções superiores a 70%. Observou-se também que o sistema não atua na redução da amplitude do quarto andar na função de transferência, sendo este um fato que deve ser investigado nos próximos passos da pesquisa.

O estudo paramétrico mostrou que a redução da rigidez do isolador, o aumento do amortecimento e do raio do isolador, tornam o sistema mais eficiente, porém é importante ressaltar que alterações na rigidez e raio do isolador a fim de deixá-lo mais eficaz acarretam o aumento dos deslocamentos da base, sendo este um importante fator a ser analisado.

Como futuros trabalhos propõe-se além da confecção de um modelo físico com o isolamento pendular, um refinamento do modelo numérico utilizado, adotando um modelo com mais graus de liberdade, podendo representar de forma mais próxima a estrutura ensaiada em laboratório. Pretende-se também estudar o comportamento da estrutura no plano vertical, visto que o próprio movimento do isolador impõe na estrutura acelerações verticais que devem ser consideradas na análise. Com o modelo refinado da estrutura acoplada ao sistema de isolamento, pretende-se realizar simulações com sinais reais de terremoto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Andrade, R. F. M., 1997. *Desenvolvimento de um sistema para determinação experimental de funções de resposta em frequência para excitações simples e múltiplas*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Bucher, H. F., 2001. *Metodologias para a aplicação de técnicas tempo-frequência em dinâmica estrutural e ao método dos elementos de contorno*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Cano, N. A. O., 2013. *Avaliação de sistemas de isolamento para controle de vibrações de edifícios submetidos a excitação de base*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Clough, R. W., Penzien, J., 2003. *Dynamics of Structures*, 3 ed., New York.
- Harvey Jr., P. S., Kelly, K. C., 2016. A review of rolling-type seismic isolation: Historical development and future directions. *Engineering Structures*, vol. 125, 521-531.
- Hosseini, M., Kangarloo, K., 2007. Introducing orthogonal rollers pairs as an effective isolating system for low rise buildings. *Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, 11-13 June, Bologna, Italy, 151-161.
- Hosseini, M., Soroor, A., 2011. Using orthogonal pairs of rollers on concave beds (OPRCB) as a base isolation system-part I: analytical, experimental and numerical studies of OPRCB isolators. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 20, 928-950.
- Hosseini, M., Soroor, A., 2013. Using orthogonal pairs of rollers on concave beds (OPRCB) as a base isolation system-part II: application to multi-story and tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 22, 192-216.
- Jangid, R. S., 2000. Stochastic seismic response of structures isolated by rolling rods. *Engineering Structures*, vol. 22, 937-946.
- Lee, G. C., Liang, Z., 2003. A Sloping Surface Roller Bearing and its lateral Stiffness Measurement. *Proceedings of the 19th US-Japan Bridge Engineering Workshop*, Tsukuba, Japan.
- Lee, G. C., Ou, Y. C., Liang, Z., Niu, T., Song, J., 2007. Principles and Performance of Roller Seismic Isolation Bearings for Highway Bridges. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (U.S.)* United States. Federal Highway Administration.
- Lin, P. Y., Lin, T. K., 2012. Control of seismically isolated bridges by magnetorheological dampers and a rolling pendulum system. *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 19, 278-294.
- Lin, T. W., Hone, C., 1993. Base Isolation by free rolling rods under basement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 22, 261-273.
- Magluta, C., 1993. *Sistemas dinâmicos passivos para absorção de vibrações estruturais*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Matta, E., Stefano, A., 2009. Robust design of mass-uncertain rolling-pendulum TMDs for the seismic protection of buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, 127-147.

Matta, E., Stefano, A., Spence Jr., B. F., 2009. A new passive rolling-pendulum vibration absorber using a non-axial-symmetrical guide to achieve bidirectional tuning. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 38, 1729-1750.

Rajasekaran, S., 2009. *Structural dynamics of earthquake engineering*. Woodhead Publishing.

Tsai, M. H., Chang, K. C., Wu, S. Y., 2006. Seismic isolation of a scaled bridge model using rolling-type bearings. *4th International Conference of Earthquake Engineering*, n. 181.

Zegarra, E. P., 2016. *Sistema pendular para controle passivo de vibrações de estruturas sob excitação de base*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.