



PROPOSTA DE UM ISOLAMENTO PARA EDIFÍCIOS SUBMETIDOS À 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. *A fim de minimizar efeitos danosos causados por terremotos, a engenharia busca desenvolver mecanismos que reduzam o efeito da aceleração de base nas estruturas. Dentre esses mecanismos, estudos vem sendo ampliados na área de isolamento de base, que consiste em posicionar elementos de baixa rigidez horizontal entre a fundação e a estrutura, reduzindo assim a energia do movimento de base percebida pela edificação. Neste artigo é apresentado inicialmente um estudo experimental de um isolamento de base e sua atuação juntamente com um protótipo de edifício. Um programa numérico em elementos finitos calibrado com os resultados experimentais é desenvolvido e através deste é realizado um estudo paramétrico do isolamento de base. Como era esperado, o parâmetro que possui maior influência no sistema desenvolvido é a rigidez horizontal do isolamento de base, tornando-o mais eficiente.*

Palavras-Chave: *Análise Dinâmica, Isolamento de Base, Excitação de Base*

1 INTRODUÇÃO

Tremores da superfície terrestre são causados, em sua maior parte, por atividade tectônica e até o momento não é possível prever esses fenômenos. Estes podem causar tanto perdas de vidas humanas e de bens materiais. Do ponto de vista da engenharia estrutural os terremotos são vistos como uma excitação de base com alto poder destrutivo. Diante desse cenário, a engenharia busca soluções para minimizar os danos causados por terremotos.

Dentre as técnicas utilizadas para mitigar os efeitos dos terremotos, o isolamento de base tem se mostrado uma maneira simples e eficiente. Há relatos de sua primeira utilização no ano de 1921, no Imperial Hotel em Tóquio, um projeto desenvolvido por Frank Lloyd Wright (Patil & Reddy, 2012).

O funcionamento do isolamento de base consiste em colocar entre a estrutura e sua fundação elementos de baixa rigidez lateral, desta forma há uma dissociação do movimento do solo. O principal objetivo do isolamento de base é alterar as frequências fundamentais da estrutura para valores distantes das frequências dominantes do terremoto, evitando assim a ressonância e provável colapso da estrutura. Dentre os dispositivos utilizados para isolamento de base estão os suportes de elastômero ou neoprene, os sistemas deslizantes com atrito e os suportes rolantes (Matsagar & Jandig, 2008). O objeto de estudo da presente pesquisa é o isolamento de base com suportes de elastômero, que segundo Kelly (1986) é o método mais simples e fácil de fabricar e é caracterizado por alta rigidez vertical e alta flexibilidade horizontal.

O objetivo dessa pesquisa é estudar o comportamento do isolamento de base com suportes de elastômero através de um modelo estrutural elaborado em laboratório e um modelo numérico 3D em elementos finitos desenvolvido na plataforma Matlab®. O modelo de laboratório é submetido a ensaios de impactos e excitação de base a fim de que sejam identificados seus parâmetros modais sem e com o uso do isolamento de base. Os resultados obtidos em laboratório alimentam o modelo numérico do qual é apresentado um estudo paramétrico que busca um modelo mais eficiente de isolamento de base.

Na primeira seção deste documento faz-se uma breve introdução acerca do tema abordado. Na segunda seção é apresentado todo o procedimento experimental desenvolvido para a pesquisa. A terceira seção apresenta a metodologia do modelo numérico e sua correlação com os resultados experimentais tal como o estudo paramétrico proposto. Na quarta parte são feitos alguns comentários finais acerca da pesquisa e são apresentadas propostas de prosseguimento.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados no modelo desenvolvido por CANO (2013) que consiste em um pórtico de quatro andares representando um prédio. Os andares são chapas de alumínio com 4.0 mm de espessura enquanto os pilares são constituídos de lâminas de um polímero e possuem seção transversal de 20 x 2.94 mm. O pé direito médio é de 194 mm e a ligação dos pilares aos andares é feita por conexões de alumínio. O apoio do pórtico é feito numa placa de alumínio de dimensões 320 x 250 mm, formando a base. A massa total do pórtico sem qualquer instrumentação para ensaios é de 5.16 kg. Na Figura 1 é apresentado o modelo do edifício, sendo que as dimensões são dadas em mm.

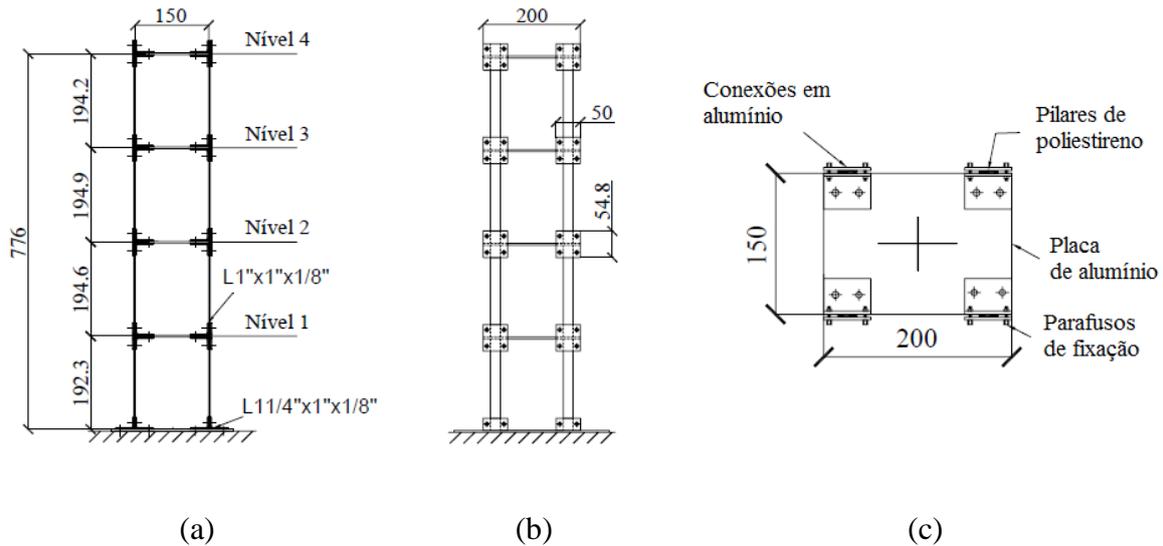


Figura 1 - Modelo físico do edifício: (a) Vista na direção menor inércia; (b) Vista na direção da maior inércia; (c) Vista superior. Adaptada de (CANO, 2013).

Para a realização de ensaios o pórtico foi instrumentado com 16 acelerômetros sendo quarto por andar, dois na direção de menor inércia e os outros dois na direção de maior inércia, dispostos de forma a identificar os modos de flexão e torção. Na base do pórtico foram fixados dois acelerômetros nas direções principais de inércia e um acelerômetro vertical. Por fim foi fixado um acelerômetro na direção da excitação de base, totalizando 20 acelerômetros. A massa total do pórtico com a instrumentação é 5.36 kg. A instrumentação para os ensaios é mostrada na Figura 2.

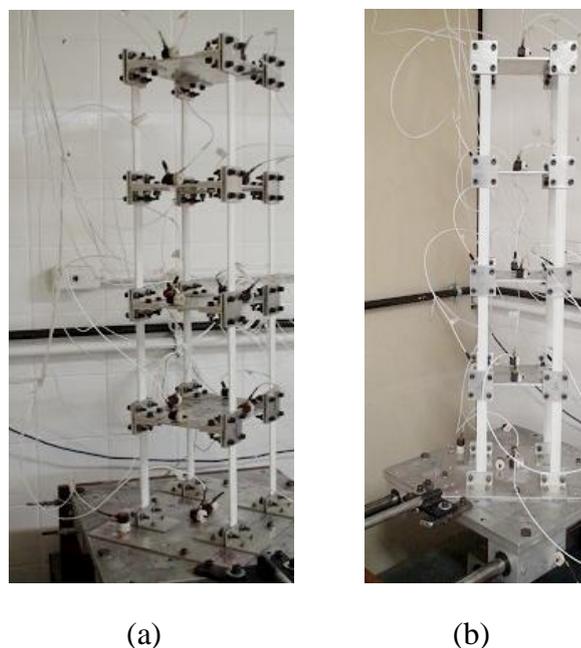


Figura 2 - Instrumentação da estrutura sem sistema de isolamento: (a) Direção de menor inércia; (b) Direção de maior inércia.

O pórtico foi fixado a uma placa ligada a um excitador eletromagnético. O pórtico foi posicionado na placa com um ângulo de 45 graus, de forma que pudessem ser identificados os modos de vibração de interesse. O sinal enviado ao excitador é gerado em um analisador de espectros, podendo ser do tipo ruído branco ou senoidal. Na Figura 3 é apresentado um esquema da realização do ensaio.

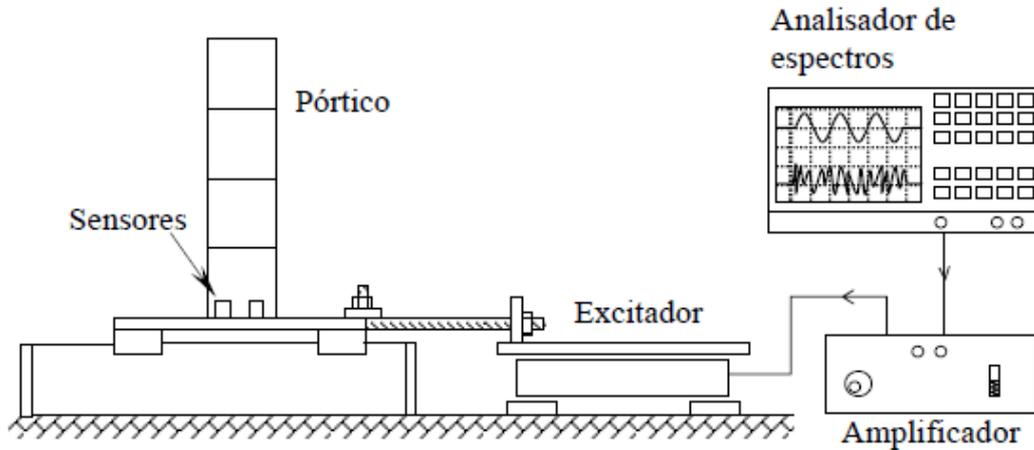


Figura 3 - Sistema de excitação da estrutura. Adaptada de (CANO, 2013)

Para identificar os parâmetros modais do edifício foram realizados dois tipos de ensaios, por impactos através de um martelo piezelétrico, e por excitação de base impondo um sinal do tipo ruído branco. Os impactos foram dados nas direções principais de inércia e também nas extremidades para excitar a torção, no segundo e quarto andares. Os sinais gravados no tempo foram analisados por dois programas desenvolvidos na COPPE/UFRJ em linguagem LabVIEW. O primeiro estima espectros de frequência e foi utilizado para identificar os modos de vibração através da análise de fase entre os acelerômetros. O segundo desenvolvido por Bucher (2001) utiliza a técnica Short Time Frequency Technique (STFT) e foi utilizado para identificar as frequências naturais e as respectivas taxas de amortecimento. Foram identificados seis modos de vibração do pórtico e os resultados são apresentados na Tabela 1 com média e desvio padrão dos resultados obtidos.

Tabela 1 – Parâmetros modais do pórtico sem sistema de isolamento.

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

As frequências e taxas de amortecimento dos modos de vibração serão comparadas com o edifício com sistema de isolamento.

2.1 Sistema de isolamento

O sistema de isolamento foi confeccionado com duas placas de alumínio de 320 x 250 mm, com dimensões iguais à base do pórtico. Entre as duas placas foram fixadas, nas extremidades, quatro borrachas de 10 mm de altura e 1" de diâmetro. A borracha utilizada é comercializada em forma líquida devendo ser misturado ao catalisador antes da moldagem, quando após a cura adquire propriedades mecânicas. O sistema de isolamento é mostrado na Figura 4.

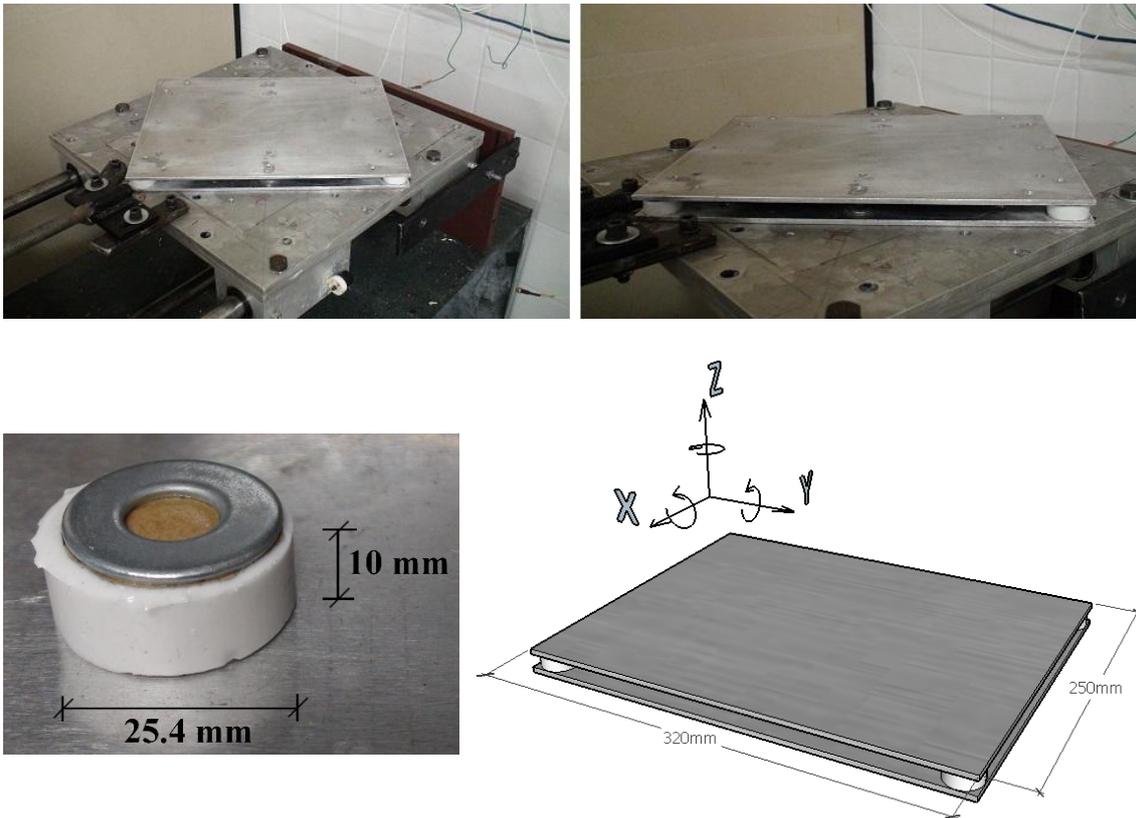


Figura 4 – Sistema de Isolamento.

Para estimativa da rigidez horizontal e vertical do sistema de isolamento foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos. Com o ensaio estático foi determinada apenas a rigidez vertical, e foi feito utilizando-se uma célula de carga posicionada no meio da placa e quatro flexímetros elétricos instalados nas extremidades da placa. Para o ensaio dinâmico foram utilizados oito acelerômetros dispostos na placa e um acelerômetro na direção da excitação de base. A instrumentação dos ensaios estático e dinâmico é mostrada na Figura 5.

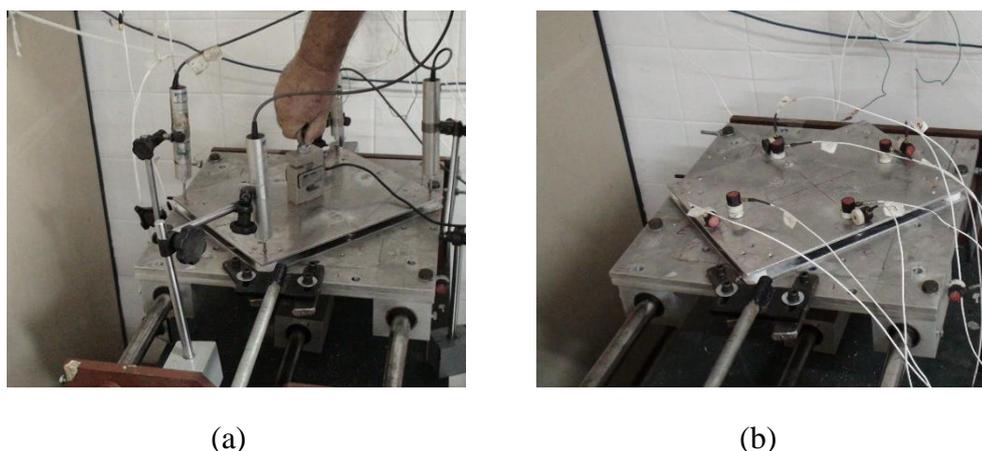


Figura 5 – Instrumentação do sistema de isolamento: (a) Ensaio Estático; (b) Ensaio Dinâmico.

Foram utilizadas duas massas diferentes sobre o sistema de isolamento para o ensaio dinâmico: 9.00 kg e 14.36 kg. Os principais objetivos da realização dos testes com duas massas seria verificar a influência que estas teriam sobre as frequências naturais do sistema e aferir se as rigidezes dos apoios se manteriam lineares. De um modo geral, para alcançar uma boa eficiência com o sistema de isolamento é necessário utilizar uma massa elevada, sendo escolhido para este modelo a massa de 9.00 kg. Como a massa do pórtico é de 5.36 kg, o sistema de isolamento mais o prédio alcançariam uma massa de 14.36 kg. Foram feitos impactos com martelo piezelétrico a fim de identificar os seis graus de liberdade do sistema de isolamento pelo ensaio dinâmico. Através dos resultados dos dois tipos de ensaio as rigidezes do sistema de isolamento em relação às direções de translações. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Rigidez estimada pelos ensaios estático e dinâmico.

Direção	Rigidez (N/m)		
	Estático	Dinâmico	
		9.00 kg	14.36 kg
X	-	55581	46810
Y	-	58407	52844
Z	165830 ± 2299	157508	152467

Pela análise das rigidezes horizontais observa-se uma não-linearidade da borracha utilizada para o sistema de isolamento, sendo este um fator que pode dificultar a estimativa numérica do pórtico com o sistema de isolamento.

2.2 Edifício com sistema de isolamento de base

Para analisar a eficiência do sistema de isolamento desenvolvido foram realizados ensaios com o edifício. Nesses ensaios o pórtico foi fixado ao sistema de isolamento e foi adicionada uma massa de 9.00 kg na base. Esta massa diminui os movimentos de rotação no plano vertical do edifício que devido à altura deste em relação às dimensões da base poderiam se tornar predominantes.

A instrumentação desse ensaio foi feita de forma similar ao edifício sem sistema de isolamento, ou seja, com quatro acelerômetros por andar e dois acelerômetros nas direções principais na base e um acelerômetro na direção da excitação de base. A mudança está nos acelerômetros verticais, visto que foram necessários três acelerômetros na base, dispostos de forma a identificar algum modo de vibração com componente vertical. Na Figura 6 é mostrada a montagem do ensaio.

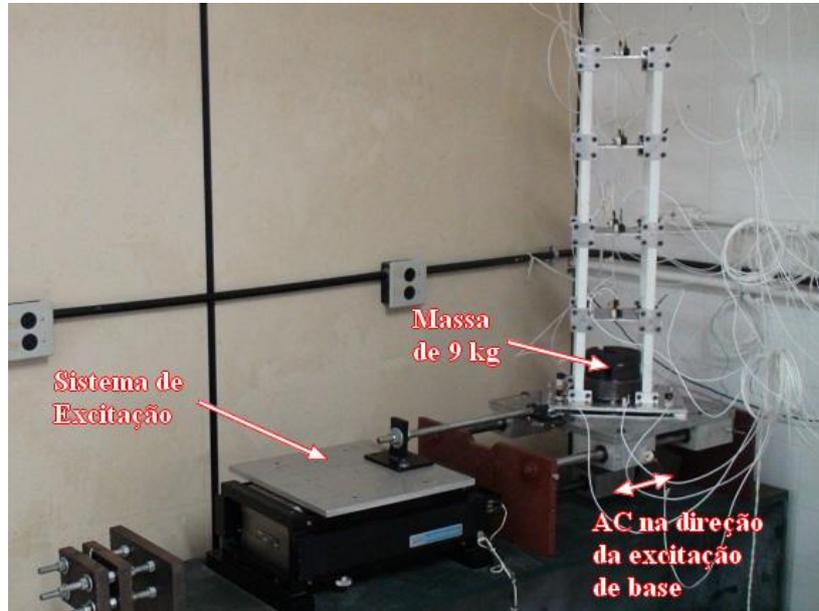


Figura 6 – Ensaio do edifício com sistema de isolamento

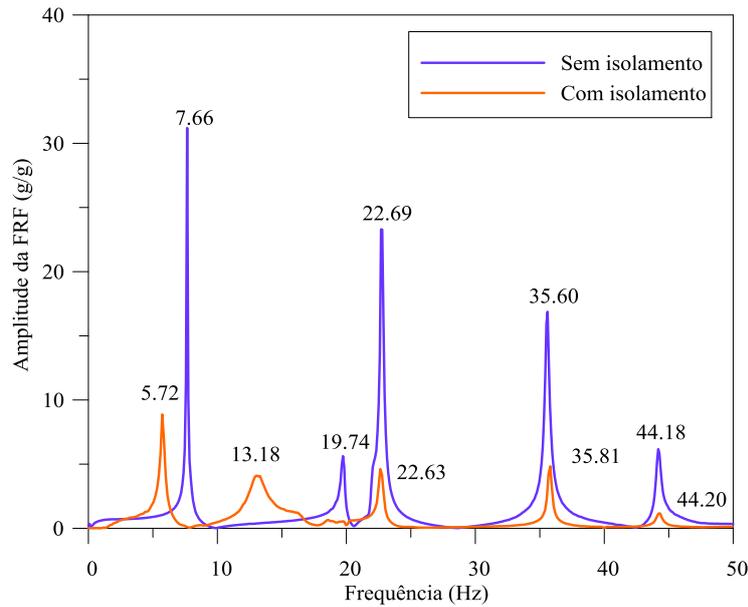
Os ensaios foram realizados através da excitação de base do tipo ruído branco e por impactos. Os impactos foram aplicados tanto na base como nos andares, para que fossem excitados todos os modos de interesse. Através dos sinais temporais dos acelerômetros e os programas descritos anteriormente foram estimadas as frequências naturais e as respectivas taxas de amortecimento do edifício com sistema de isolamento. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros modais experimentais do edifício com sistema de isolamento

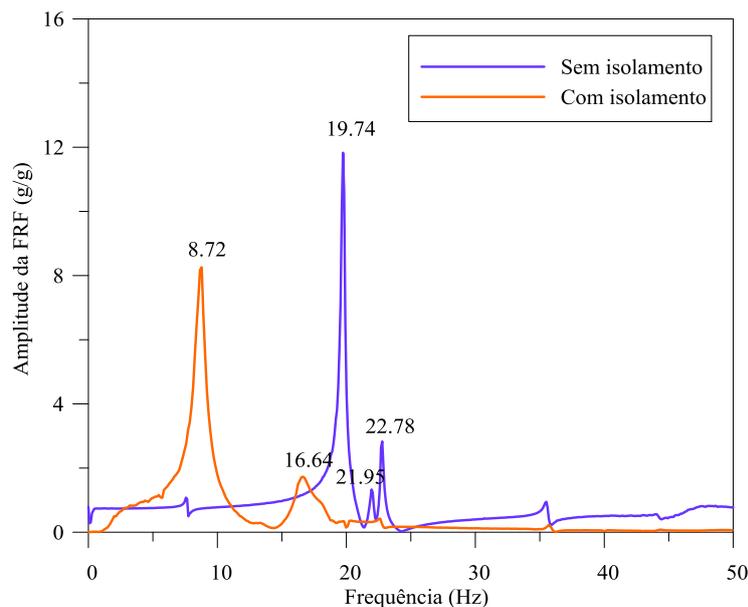
Modo	Tipo	Frequência (Hz)		ξ - Taxa de Amortecimento (%)
		Impactos	Ruído	
1	Flexão menor inércia	5.83 ± 0.02	5.78 ± 0.06	1.87 ± 0.02
2	Flexão maior inércia	8.73 ± 0.06	8.64 ± 0.06	3.93 ± 0.09
3	Flexão menor inércia	12.81 ± 0.07	13.09 ± 0.11	4.59 ± 0.11
4	Flexão maior inércia	16.32 ± 0.10	16.42 ± 0.10	3.52 ± 0.25
5	Torção	18.35 ± 0.06	-	2.01 ± 0.03
6	Flexão menor inércia	22.70 ± 0.03	22.69 ± 0.06	0.55 ± 0.02
7	Torção	34.57 ± 0.07	-	4.08 ± 1.41
8	Flexão menor inércia	35.74 ± 0.04	35.80 ± 0.03	0.32 ± 0.01
9	Flexão menor inércia	44.28 ± 0.03	44.27 ± 0.05	0.40 ± 0.00

Os modos 3 e 4 obtidos são de flexão com deslocamento de base, e por essa razão não podem ser comparados com nenhum modo do edifício com base fixa. Para analisar a

eficiência do modelo proposto são apresentadas as FRF's do edifício sem e com sistema de isolamento na Figura 7.



(a)



(b)

Figura 7 - FRF de excitação de base para o edifício com e sem isolamento: (a) FRF do 1º andar na direção de menor inércia; (b) FRF do 1º andar na direção de maior inércia

Pela amplitude da FRF observa-se que houve uma redução substancial com o sistema de isolamento, comprovando a eficiência do modelo proposto. A seguir é apresentada a correlação com os resultados numéricos e um estudo paramétrico do edifício com sistema de isolamento.

3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico em elementos finitos (MEF) em linguagem Matlab®, tendo como base um modelo 2D desenvolvido por Cano (2013), foi modificado para resolução de problemas dinâmicos 3D. A alteração foi feita com a incorporação das matrizes de rigidez, massa e amortecimento para elementos de pórtico espacial e as adaptações necessárias. A matriz de amortecimento utilizada nesse modelo é não proporcional às matrizes de massa e rigidez e é montada a partir das taxas de amortecimento reais da estrutura obtidas nos ensaios experimentais. O procedimento detalhado utilizado pode ser encontrado em Pereira et al. (2015).

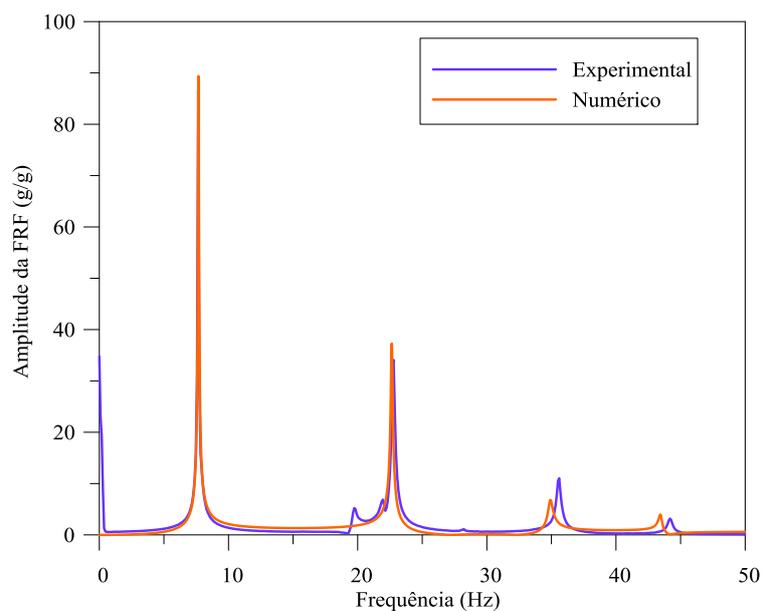
3.1 Edifício sem sistema de isolamento de base

O edifício sem sistema de isolamento foi modelado com 56 nós e os materiais foram caracterizados em 7 grupos (chapas do apoio, pilar1, pilar2, pilar3, pilar4, chapas de ligação e lajes), com um total de 68 elementos de pórtico espacial. Os pilares foram numerados de 1 a 4 de acordo com o andar onde estão localizados, tal artifício foi utilizado para um melhor ajuste do modelo numérico em relação ao modelo experimental. Foi considerado engaste nos 4 apoios do edifício. O modelo numérico foi ajustado com os resultados experimentais apresentados anteriormente e a correlação é apresentada na Tabela 4.

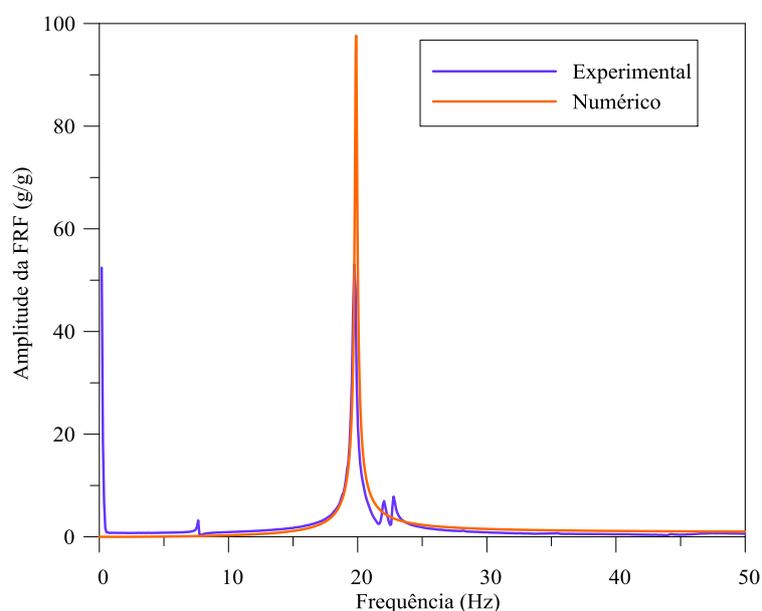
Tabela 4 - Correlação numérica-experimental do edifício sem sistema de isolamento.

Modo	Tipo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	ξ_{exp} (%)	ξ_{num} (%)
1	Flexão menor inércia	7.64 ± 0.09	7.68	0.47 ± 0.01	0.47
2	Flexão maior inércia	19.99 ± 0.31	19.87	0.44 ± 0.02	0.44
3	Torção	22.01 ± 0.14	22.04	0.43 ± 0.00	0.43
4	Flexão menor inércia	22.77 ± 0.03	22.64	0.34 ± 0.00	0.34
5	Flexão menor inércia	35.58 ± 0.04	34.91	0.52 ± 0.03	0.52
6	Flexão menor inércia	44.23 ± 0.09	43.45	0.31 ± 0.00	0.31

Observa-se uma boa correlação numérica experimental entre as frequências naturais. As taxas de amortecimento obtidas pelo modelo numérico são os mesmos valores experimentais, comprovando assim a eficácia do método para a matriz de amortecimento não proporcional e que o modelo numérico desenvolvido é capaz de representar o pórtico experimental. Na Figura 8 são mostradas comparações entre FRF's do modelo experimental e do modelo numérico para o edifício com base fixa.



(a)



(b)

Figura 8 - FRF's para excitação de base do edifício sem sistema de isolamento: (a) FRF do 4º andar na direção de menor inércia; (b) FRF do 4º andar na direção de maior inércia.

Pelas FRF's observa-se uma boa correlação numérica experimental na direção de menor inércia. Porém o mesmo não foi notado para a direção de maior inércia apesar dos valores próximos de frequência natural e amortecimento. Tal diferença pode ter sido causada pelo fato de que o programa foi capaz de estimar apenas os modos de vibração puros, não apresentando o acoplamento observado nos resultados experimentais.

3.2 Sistema de isolamento de base

O sistema de isolamento foi modelado com 13 nós e de um único material, o alumínio. Para representar a borracha foi utilizado um conjunto de mola-amortecedor em cada extremidade da placa de alumínio. Para representar a massa adicional de 9 kg e 14.36 kg foi considerada uma massa concentrada para as três direções de translação e massas torcionais nas direções RX, RY e RZ no nó central da placa. As rigidezes atribuídas às molas foram as obtidas pelo ensaio dinâmico com pequenos ajustes e o coeficiente de amortecimento foi calculado a partir da seguinte equação:

$$C = 2\xi m\omega \quad (1)$$

onde os valores da frequência, massa e taxa de amortecimento foram aqueles obtidos experimentalmente. No modelo numérico o coeficiente de amortecimento obtido é utilizado diretamente na matriz de amortecimento, considerando a parcela de amortecimento da placa como nula. As rigidezes e massas torcionais foram ajustadas de maneira que as frequências naturais numéricas se aproximassem das obtidas experimentalmente. As correlações numérica-experimentais são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 5 - Correlação numérica-experimental do sistema de isolamento com 14.36 kg.

Modo	Tipo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	ξ_{exp} (%)	ξ_{num} (%)
1	X	8.44 ± 0.54	8.44	7.76 ± 0.28	7.76
2	Y	9.00 ± 0.53	9.00	8.61 ± 0.20	8.61
3	Z	15.93	15.93	3.20 ± 0.03	3.08
4	RX	32.63	32.65	10.63 ± 1.87	6.39
5	RY	23.91 ± 0.77	23.91	8.63 ± 0.72	4.69
6	RZ	31.06	31.08	11.72 ± 0.50	28.95

Tabela 6 - Correlação numérica-experimental do sistema de isolamento com 9.00 kg.

Modo	Tipo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	ξ_{exp} (%)	ξ_{num} (%)
1	X	11.99 ± 0.05	11.99	7.05 ± 0.17	7.04
2	Y	12.23 ± 0.03	12.23	6.49 ± 0.07	6.48
3	Z	20.12	20.12	2.27 ± 0.03	2.19
4	RX	57.34 ± 1.83	57.32	5.41 ± 0.38	6.33
5	RY	45.09 ± 0.88	45.09	4.01 ± 0.05	4.98
6	RZ	34.93	34.95	9.40 ± 0.30	19.67

Os resultados indicam que o ajuste realizado para as frequências naturais foi adequado. Porém as taxas de amortecimento para os modos rotacionais não foram ajustadas, e o valor apresentado é o calculado pelo programa tendo como base a disposição estrutural e amortecimentos translacionais.

3.3 Prédio com sistema de isolamento de base

A modelagem do prédio com sistema de isolamento foi feita com o acoplamento dos dois modelos anteriormente ajustados, isto é, prédio com base fixa e sistema de isolamento. Adotou-se a hipótese que a matriz de amortecimento seria formada pela soma da sub-matriz de amortecimento da estrutura original e a sub-matriz com os coeficientes de amortecimento das molas nos devidos graus de liberdade, as quais foram ajustadas aos resultados experimentais. Na Figura 9 é mostrado o modelo de acoplamento.

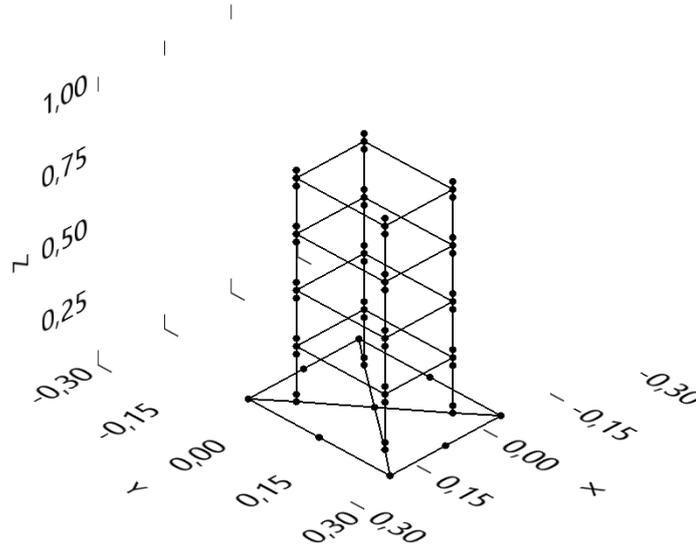


Figura 9 - Modelo do prédio com sistema de isolamento em elementos finitos.

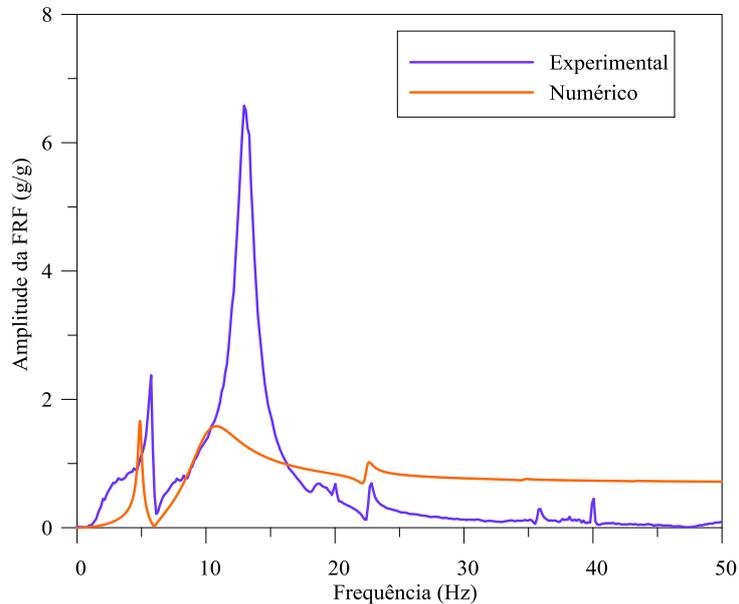
A base foi modelada de acordo com o sistema de isolamento ajustado, isto é, com molas e amortecedores nas quatro extremidades. As rigidezes à translação e amortecimentos foram os obtidos para sistema de isolamento com 14.36 kg e as massas rotacionais concentradas foram as obtidas pelo sistema com 9.00kg. Tal artifício foi utilizado para que o programa obtenha de forma indireta a massa rotacional do conjunto modelado. Na Tabela 7 é mostrada a correlação numérica-experimental do edifício com sistema de isolamento de base.

Tabela 7 - Correlação numérica-experimental do edifício com sistema de isolamento.

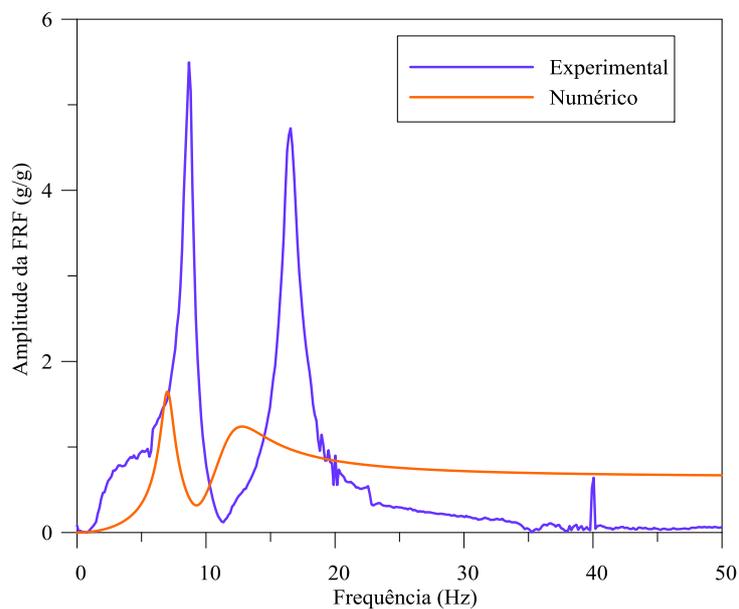
Modo	Tipo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	ξ_{exp} (%)	ξ_{num} (%)
1	Flexão menor inércia	5.81 ± 0.04	4.89	1.87 ± 0.02	2.91
2	Flexão maior inércia	8.69 ± 0.06	7.03	3.93 ± 0.09	7.93
3	Flexão menor inércia	12.95 ± 0.20	10.23	4.59 ± 0.11	18.97
4	Flexão maior inércia	16.37 ± 0.07	11.77	3.52 ± 0.25	17.64
5	Torção	18.35	16.72	2.01 ± 0.03	15.08
6	Flexão menor inércia	22.70 ± 0.01	22.45	0.55 ± 0.02	1.21
7	Torção	34.57 ± 0.07	32.99	4.08 ± 1.41	21.07
8	Flexão menor inércia	35.77 ± 0.04	34.63	0.32 ± 0.01	0.76
9	Flexão menor inércia	44.28 ± 0.01	43.31	0.40 ± 0.00	0.48

Os resultados obtidos mostram que as frequências numéricas apresentaram valores razoáveis, porém o amortecimento estimado está muito distante do que era esperado. Uma das

possíveis razões para esta discrepância pode estar relacionada à correta simulação dos modos, uma vez que foi constatado nos resultados experimentais que os modos apresentavam um acoplamento com movimentos rotacionais verticais e estes não foram ajustados. Na Figura 10 são apresentas as FRF's do modelo experimental e do modelo numérico.



(a)



(b)

Figura 10 - FRF's para excitação de base do edifício com sistema de isolamento: (a) FRF da base na direção de menor inércia; (b) FRF da base na direção de maior inércia.

As FRF's obtidas mostram que o amortecimento numérico está superior ao amortecimento real, apontando que há necessidade de um maior aprofundamento na forma de

modelar este acoplamento a fim de garantir uma melhor correlação entre os resultados experimentais e numéricos.

3.4 Estudo paramétrico

A fim de investigar o comportamento do modelo desenvolvido foi feito um estudo paramétrico do sistema de isolamento com variação da massa, rigidez das borrachas e amortecimento. A massa utilizada inicialmente no sistema foi de 9.00 kg e para avaliar a sua influência sobre o sistema este valor foi alterado em 50% para menos e para mais. Foi realizada também uma variação da mesma ordem das massas rotacionais do sistema de isolamento. Para a rigidez foi feita uma variação de 50% para mais e para menos das rigidezes horizontais do sistema de isolamento, mantendo a rigidez vertical. O estudo paramétrico do amortecimento seguiu o mesmo procedimento dos anteriores, com variação de 50% para mais e para menos do coeficiente de amortecimento do sistema de isolamento. Os resultados do estudo paramétrico são apresentados em forma de FRF's a seguir.

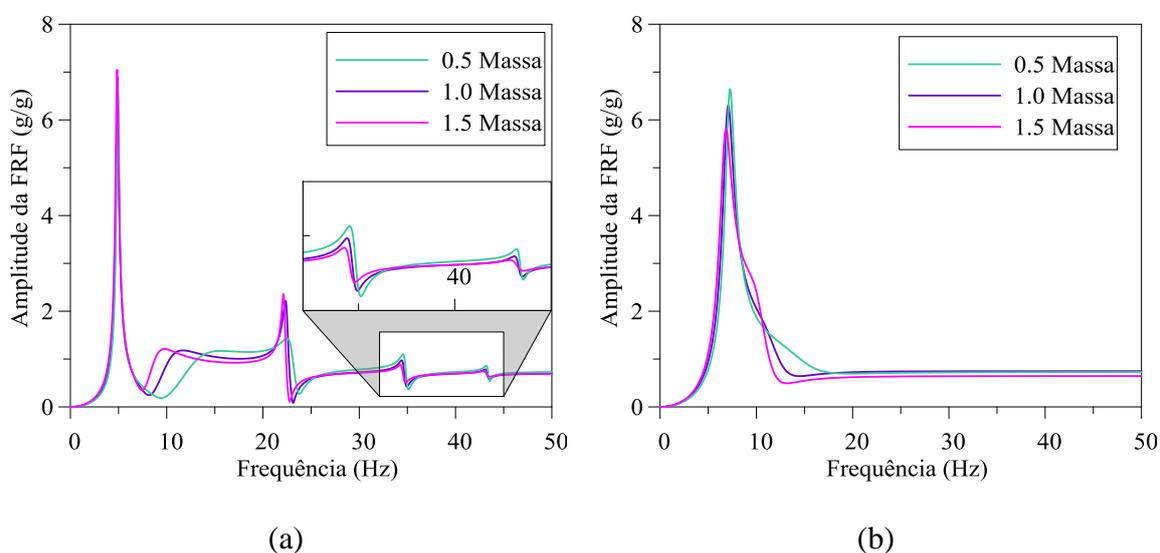


Figura 11 - FRF para excitação de base com variação da massa: (a) Resposta no 1º andar na direção de menor inércia; (b) Resposta no 3º andar na direção de maior inércia.

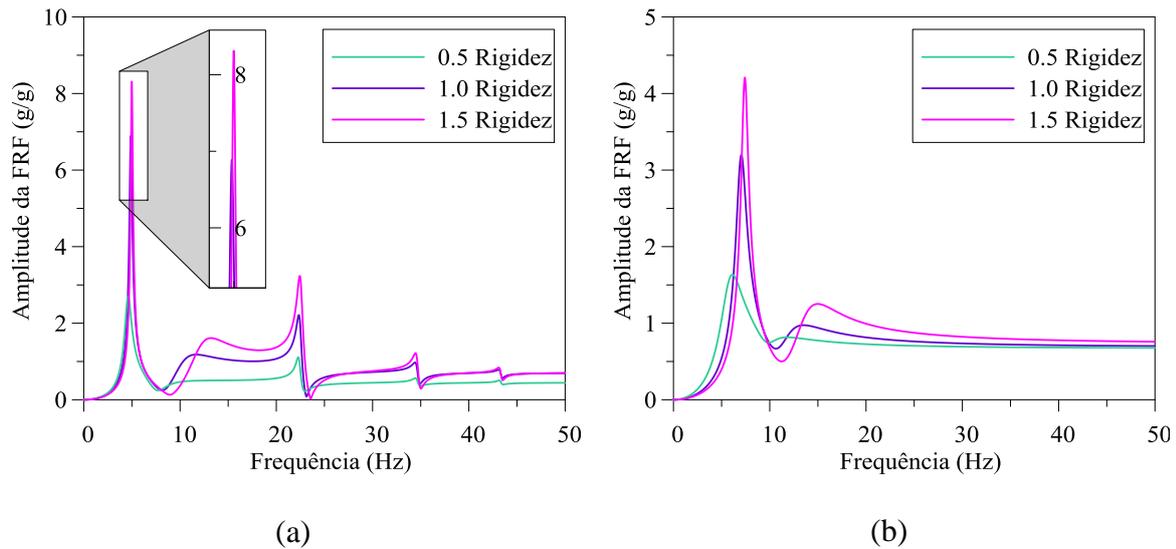


Figura 12 - - FRF para excitação de base com variação da rigidez: (a) Resposta no 1º andar na direção de menor inércia; (b) Resposta no 1º andar na direção de maior inércia.

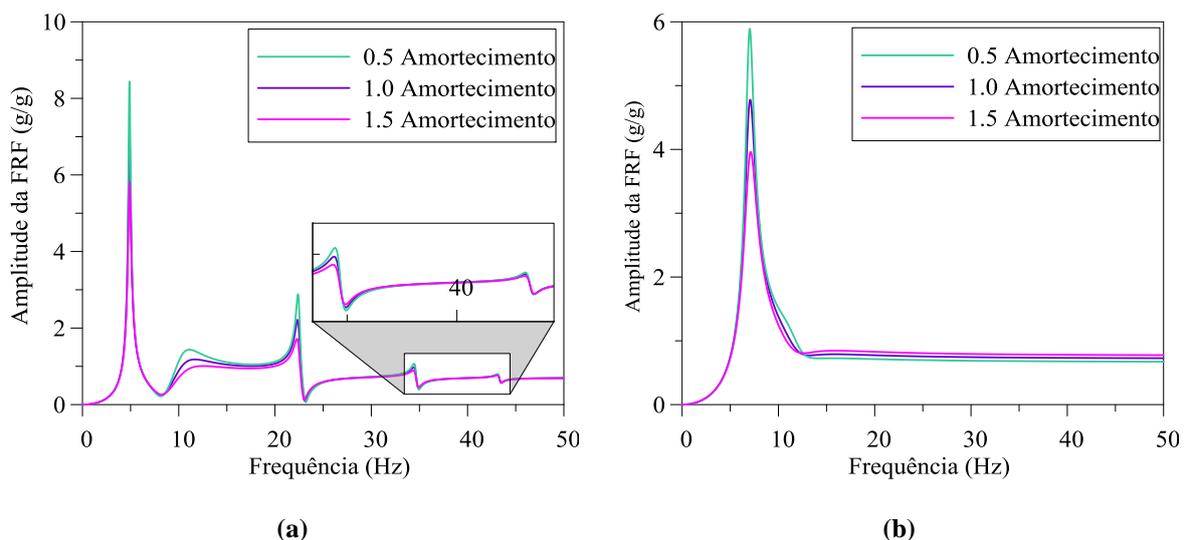


Figura 13 - FRF para excitação de base com variação do amortecimento: (a) Resposta no 1º andar na direção de menor inércia; (b) Resposta no 2º andar na direção de maior inércia;

O estudo paramétrico mostra que a redução da rigidez das molas se mostra o mais eficiente e talvez o mais fácil de se alcançar na prática. De certa forma este resultado já era esperado uma vez que quanto mais flexível for a rigidez do sistema de isolamento menos energia ele transfere do solo para a estrutura.

4 COMENTÁRIOS FINAIS

Ensaio experimentais com massas diferentes sobre o sistema de isolamento mostraram que a borracha utilizada possui comportamento não-linear, causando uma dificuldade na modelagem numérica. Com o uso do sistema de isolamento acoplado ao pórtico observou-se o

surgimento de novos modos de vibração com deslocamento de base e reduções dos níveis de vibração. O modelo numérico do edifício com base fixa apresentou boa correlação com os resultados experimentais, o mesmo não foi observado para o edifício com o sistema de isolamento, mostrando que o modelo proposto de acoplamento não é o adequado para representar a realidade. O estudo paramétrico mostrou que a rigidez do sistema de isolamento é o parâmetro de maior influência na eficácia do modelo proposto, o que de certa forma já era esperado visto que sistemas de isolamento devem ter baixa rigidez horizontal, pois desta forma menor energia é transferida do solo para a estrutura.

Na continuidade da presente pesquisa propõe-se realizar ensaios experimentais com variação da massa sobre o sistema de isolamento, além da mudança da borracha utilizada para uma com maior rigidez vertical e baixa rigidez horizontal, tornando o sistema mais eficiente. No modelo numérico propõe que este seja submetido a sinais reais de terremotos para avaliar sua eficácia além de um aprofundamento na forma de modelar o amortecimento estrutural e das molas que representam o sistema de isolamento.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Alhan, C., Gavin, H., 2004. Parametric Analysis of passive damping in base isolation. *Proceedings of the 2004 Structures Congress - Building on the Past: Securing the Future*, pp. 1375-1382.
- 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.
- Arfiadi, Y., Hadi, M. N. S., 2000. Hybrid base isolation-passive mass damper systems. *Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 279-286.
- Arispe, R. A., 2005. *Monitoramento e análise numérica para obtenção de frequências naturais de uma torre de telecomunicação*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Baratta, A., Corbi, I., 2004. Optimal design of base-isolators in multi-storey buildings. *Computers and Structures*, vol. 82, n. 23-26, pp. 2199-2209.
- 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.
- Buckle, I., Nagarajiah, S., Ferrell, K., 2002. Stability of Elastomeric Isolation Bearings: Experimental Study. *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, n. 1, pp. 3-11.
- Cano, N. A. O., 2013. *Avaliação de sistemas de isolamento para o 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.
- Ewins, D. J., 1984. *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd.
- Gere, J. M., Weaver, W., 1981. *Análise de estruturas reticuladas*. Editora Guanabara Dois.

- Gutenberg, B., Richter, C. F., 1956. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2).
- Han, X., Warn, G. P., Kasalanati, A., 2013. Dynamic stability testing of isolation systems composed of elastomeric bearings and implications for design. *Structures Congress 2013 © ASCE 2013*, pp. 2140-2150.
- Housner, G. W., 1970. Strong Ground Motion. In Wiegel, R. L. (coord.). *Earthquake Engineering*, PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, N. J..
- Islam, A. B. M., Ahmad, S. I., Jameel, M., 2012. Seismic Base Isolation for buildings in regions of low to moderate seismicity: practical alternative design. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 17, n. 1, pp. 13-20.
- Jangid, R. S., Datta T. K., 1995. Seismic behavior of base-isolated buildings: a state-of-the-art review. *Proceedings of the ICE – Structures and Buildings*, vol. 110, n. 2, pp. 186-203.
- Kelly, J. M., 1986. Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 5, n. 3, pp. 202-216.
- Kelly, J. M., Hodder, S. B., 1982. Experimental study of lead and elastomeric dampers for base isolation systems. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, vol. 15, n. 2, pp. 53-67.
- Kim, M. C., Jung, H. J., Lee, I. W., 1999. Solution of eigenvalue problems for non-classically damped systems with multiple frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 219, n. 2, pp. 207-222.
- Kunde, M. C., Jangid, R. S., 2003. Seismic behavior of isolated bridges: a-state-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 3, pp. 140-170.
- Magluta, C., 1993. *Sistemas dinâmicos passivos para absorção de vibrações estruturais*. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Matsagar, V. A., Jangid, R. S., 2008. Base isolation for seismic retrofitting of structures. *Pratice periodical on structural design and construction*, vol. 3, n. 14, pp. 175-185.
- Nagarajaiah, S., Ferrell, K., 1999. Stability of Elastomeric Isolation Bearings. *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, n.9, pp. 946-954.
- Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M., Constantinou, M. C., 1991. Nonlinear dynamic analysis of 3-D-Base-Isolated Structures. *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, n. 7, pp. 2035-2054.
- Newmark, N. M., Rosenblueth, E., 1971. *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, N. J., United States of America.
- Okamoto, S., 1973. *Introduction to Earthquake Engineering*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Palazzo, B., Petti, L., 1999. Combined control strategy: base isolation and tuned mass damping. *ISET Journal of Earthquake Technology*, vol, 36, n, 2-4, pp. 121-137.
- Patil, S. J., Reddy, G. R., 2012. State of the art review-base isolation systems for structures. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, n. 7, pp. 438-453.

- Pereira, L. A. S., Magluta, C., Roitman, N., 2015. Análise dinâmica de edifícios submetidos à excitação de base. *XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*.
- Pereira, L. A. S., 2016. *Análise dinâmica de edifícios submetidos à excitação de base*. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Brasil.
- Ramallo, J., Johnson, E., Spencer Jr., B., 2002. “Smart” Base Isolation Systems. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128, n. 10, pp. 1088-1099.
- Rao, P. B., Jangid, R. S., 2001. Experimental study of base-isolation structures. *ISET Journal of Earthquake Technology*, vol. 38, n. 1, pp. 1-15.
- Richter, C. F., 1958. *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Sen, T. K., 2009. *Fundamentals of seismic loading on structures*, 1 ed., Singapore, John Wiley & Sons, Ltd.
- Spence, W., Sipkin, S. A., Choy, G. L., 1989. Measuring the size of an earthquake. *Earthquakes & Volcanoes*, vol. 21, n. 1, p.p. 58-63.
- Spencer Jr., B. F., Nagarajaiah, S., 2003. State of the art structural control. *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, n. 7, pp. 845-856.
- Su, L., Ahmadi, G., Tadjbakhsh, I. G., 1989. Comparative study of base isolation systems. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 115, n. 9, pp. 1976-1992.
- Wongprasert, N., Sysmans, M. D., 2005. Numerical evaluation of adaptive base-isolated structures subjected to earthquake ground motions. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 131, n. 2, pp. 109-119.
- Xiao, H., Butterworth, J. M., Larkin, T., 2004. Low-technology techniques for seismic isolation. *2004 NZSEE Conference*.