

MOLAS DE RIGIDEZ VARIÁVEL NO CONTROLE DE AÇÕES SÍSMICAS EM EDIFICAÇÕES

Júlia Good Lima Dantas, julialimadantas@gmail.com¹

Cibele Mota Menezes, cibele_menezes@hotmail.com²

Alexandre de Macêdo Wahrhaftig, alixa@ufba.br^{1,2}

¹Universidade Federal da Bahia (UFBA), Escola Politécnica, Departamento de Construções e Estruturas (DCE), Rua Aristides Novis, 02, 5º andar, Federação, Salvador – BA, Brasil, CEP: 40210-630.

²Universidade Federal da Bahia (UFBA), Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPEC), Rua Aristides Novis, nº 02, 8º andar, Federação, Salvador – BA, Brasil, CEP: 40210-630.

Resumo: Nos Estados Unidos, segundo instituições governamentais daquele país, ocorrem de 12 mil a 14 mil eventos sísmicos anualmente, aproximadamente 35 por dia. A realidade estadunidense não destoa da apresentada em muitas regiões do mundo que registram a presença de tais eventos geológicos. Diante dessa realidade, o controle das vibrações causadas por terremotos sobre as edificações é um dos grandes desafios em diversas regiões sísmicas, pois podem gerar danos estruturais, materiais e às pessoas, devendo ser consideradas com especial atenção no momento da realização de um projeto estrutural. Por essa razão, é preciso minimizar os efeitos deletérios causados por terremotos sobre as edificações. Nesse sentido, no presente estudo, busca-se avaliar, por meio da teoria das vibrações mecânicas, a utilização de molas de rigidez variável no controle das acelerações induzidas por ação sísmica, isto porque as molas introduzem forças restauradoras no sistema. A avaliação é feita por meio de simulação numérico-computacional utilizando o método dos elementos finitos. A estrutura aporticada de um edifício idealizado é utilizada na modelagem, onde pilares e vigas são representados por elementos lineares e os pisos por elementos planos. Na simulação, molas de rigidez variável são inseridas nos nós de pórtico com o objetivo de controlar as vibrações produzidas por abalos sísmicos. Esses dispositivos são adicionados ao sistema estrutural em diferentes alturas e direções, visando manter o comportamento da estrutura inalterado, neutralizando os efeitos do terremoto. Com base nos resultados obtidos, é possível verificar qual a rigidez necessária e a posição em que devem ser inseridas as molas de forma a se obter a resposta estrutural o mais próximo possível das frequências naturais de vibração da estrutura.

Palavras-chave: molas, rigidez variável, ações sísmicas, simulação computacional, vibrações estruturais

1. INTRODUÇÃO

Na elaboração de projetos estruturais de edificações, um parâmetro importante a ser considerado é o efeito das vibrações provenientes de cargas dinâmicas como ventos, abalos sísmicos e ondas sonoras. Os danos causados pela energia transferida por esse tipo de solicitação podem comprometer seriamente a integridade de estruturas e fundações, além de causar prejuízos humanos irreparáveis. Os efeitos dos tremores de terra, ocasionados pela movimentação das placas tectônicas, geram danos em grande escala para a sociedade, como a destruição de cidades, abalando toda a economia do local atingido. Além disso, esse fenômeno também tem provocado um número considerável de mortes ao redor do mundo. Por se tratar de desastres naturais, fazem parte de cenários incontrolláveis, e por isso é de extrema importância que as estruturas das edificações estejam preparadas para resistir a esses acontecimentos, minimizando seus efeitos.

Nesse contexto, o estudo do controle de vibrações tem sido aprofundado por diversos engenheiros em todo o mundo, que buscam preparar a infraestrutura física da sociedade para suportar ou conviver com os eventos extremos da natureza. Nesse sentido, atenuadores de vibração têm sido usados como uma ferramenta de controle bem-sucedida. Entretanto, dispositivos de atenuação de vibrações sísmicas podem ter alto custo, e são pouco empregados em países subdesenvolvidos. Por essa razão, o presente estudo busca avaliar a implementação teórica de um tipo dispositivo de controle de vibrações mais simples, possuindo rigidez variável, que pode vir a ser uma alternativa econômica para localidades menos favorecidas economicamente, mas igualmente sujeitas a ações de natureza sísmica, comumente referidas por terremotos.

Segundo Bosse (2017), as estruturas que apresentam boa resposta dinâmica às vibrações de qualquer natureza devem possuir a flexibilidade necessária para que consigam amortecer os deslocamentos das movimentações impostas e, simultaneamente, a rigidez suficiente para suportar os esforços remanescentes das outras cargas que fazem parte de suas condições de trabalho. Ainda segundo a autora, atualmente, boa parte das construções tem baixa resistência aos efeitos das vibrações induzidas por diversas fontes, principalmente pelo uso difundido de materiais pouco flexíveis e peças pré-

fabricadas que tem vinculações articuladas que favorecem ligações de pórtico com rigidez insuficiente. Sendo assim, o controle de vibrações ganha espaço para reduzir os riscos de colapso das edificações.

De acordo com Hasui (1990, apud. Campos *et al.*, 2016) a neotectônica consiste na atividade de movimentação de placas tectônicas na região capazes de reativar as estruturas geológicas geradas pelo último acontecimento tectônico em grande escala recente. No seu estudo, Saadi (1993, apud. Preve *et al.* 2017) afirma que os tremores que acontecem no Brasil têm ocorrido sobretudo devidos a falhas neotectônicas. Ele realizou um panorama sobre as características neotectônicas regionais da plataforma continental brasileira e evidenciou que o Brasil possui 48 falhas, com predominância nas regiões Sudeste e Nordeste, em seguida, nas regiões Norte e Centro-Oeste e em menor número na região Sul.

Tavares *et al.* (2013), por sua vez, mencionam a carência existente na disseminação do conhecimento a respeito dos abalos sísmicos no Brasil, aspecto que provoca uma falta de conscientização da sociedade, resultando no seu despreparo diante da ocorrência desses eventos. De acordo com Seeber e Armbruster (1988), abalos sísmicos intraplacas, se tiverem magnitude e profundidade igual aos de borda de placa, são os de maior perigo para a engenharia estrutural. Por isso, estudos voltados para o desenvolvimento de tecnologias capazes de tornar estruturas resistentes a abalos sísmicos são de extrema relevância no Brasil, pois é fundamental a preparação em casos de futuros desastres geológicos. Um mapa do Brasil, indicando as zonas sísmicas nacionais, pode ser encontrado na ABNT NBR 15421 (2006), Fig. 1.

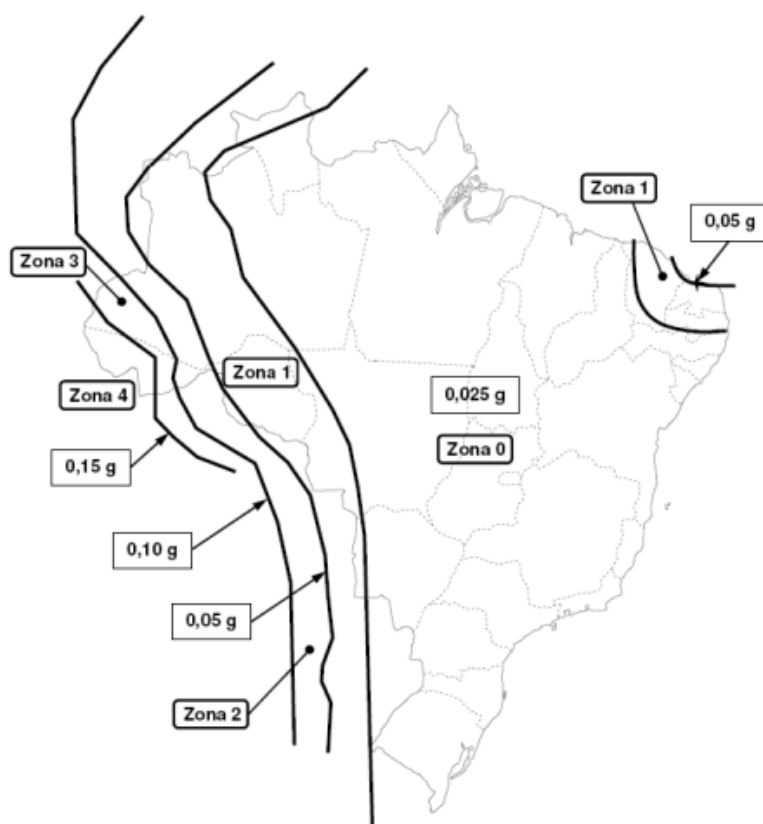


Figura 1. Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil (ABNT NBR 15421, 2006)

Com isso, fica evidenciada, mesmo que de forma sintética, a relevância dos aspectos teóricos presentes neste trabalho. Portanto, buscando atenuar os efeitos deletérios de ações sísmicas sobre as edificações, uma modelagem numérico-computacional elaborada por meio do método dos elementos finitos (MEF) foi empregada no sentido de se avaliar o uso de molas, ou dispositivos análogos, de rigidez variável, de forma a compensar os possíveis deslocamentos provocados por abalos sísmicos em edifícios, mantendo inalterada a condição inicial de projeto da edificação, ou mesmo, se não inalterada, deixando a condição atual o mais próxima possível dessa.

Cabe ressaltar que molas já são dispositivos comercialmente fabricadas em uma grande variedade de rigidezes e que por dispositivos análogos pode ser entendido qualquer tipo de mecanismo que cumpra a função descrita no presente estudo, incluindo os de natureza hidráulica, que, inclusive, já são amplamente utilizados na indústria e na construção civil, a exemplo dos macacos hidráulicos. Macacos hidráulicos, incluindo os de rigidez variável, já foram avaliados por Mirfakhraei *et al.* (2019) como eficientes dispositivos de controle para atenuar deslocamentos de edificações sob ação sísmica.

Visando construir uma sequência lógica de apresentação, o presente trabalho traz no item 2 uma breve descrição dos sistemas de controle de vibrações. Na parte 3, é descrita a simulação computacional realizada sobre uma edificação idealizada, tendo, os resultados obtidos, sua discussão na seção 4. Em seguida é feita a conclusão do presente artigo, com os agradecimentos e a lista de referências posta na sequência.

2. SISTEMAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES

No campo das edificações, Gómez (2007) relata que o avanço das técnicas executivas tem permitido a construção de estruturas cada vez mais altas e esbeltas, tornando-as mais sujeitas às vibrações oriundas do vento, terremotos, tráfego intenso e outros carregamentos dinâmicos presentes no cotidiano da sociedade. A fim de buscar mitigar os efeitos dessas ações, o controle de vibrações pode ser uma alternativa viável.

Os estudos acerca do controle de vibrações têm estado associados ao uso de dispositivos mecânicos capazes de agir sobre as propriedades dinâmicas do sistema a ser controlado. Esses dispositivos têm seus componentes representados por molas e amortecedores que compõem a equação do movimento do sistema e cuja solução pode ser obtida por diferentes vias e métodos. No trabalho de Zhang *et al.* (2009), por exemplo, foram usados métodos numéricos e analíticos para avaliar a redução da força a ser transmitida na faixa de ressonância de um sistema simples massa-mola. A eficácia da atenuação, nesse estudo, foi feita comparando-se um sistema com molas não lineares a outro com amortecedores, também, não lineares. Os resultados encontrados indicaram que as molas não foram capazes de suportar picos de amplitude com o aumento da frequência de vibração, mas foram eficazes na diminuição das frequências de vibração induzidas.

No trabalho de Valencia *et al.* (2022) a atenuação de efeitos sísmicos foi estudada a partir da modelagem numérico-computacional de três edifícios de estrutura plana. Os edifícios foram excitados por quatro diferentes funções temporais representativas de diferentes ações sísmicas. O dispositivo de atenuação empregado esteve baseado em amortecedores de fluidos e foram posicionados em diferentes andares dos edifícios do estudo. Os resultados foram avaliados em termos de deslocamentos, acelerações e forças, e comprovaram que a utilização dos amortecedores foi positiva na atenuação das respostas dos edifícios.

Em um contexto particular, Ikeda (2009) fez um levantamento de edifícios no Japão, país conhecido pela alta atividade sísmica, e seus diferentes métodos de controle de vibrações, focando em aplicações de cunho prático. Os processos analisados por Ikeda (2009) foram os mecanismos de amortecimento de massa sintonizados, quer sejam ativos, passivos e semiativos. Cabe mencionar que os sistemas passivos são os mais usuais e o mais simples devido à facilidade de execução e projeto. É muito indicado quando se conhece ou se pode prever as vibrações em que a estrutura estará submetida, já que trabalha em uma determinada zona de vibração. Os mecanismos de controle passivos são executados, normalmente, com o auxílio de dispositivos externos capazes de alterar a rigidez e o amortecimento da estrutura. Um dos mais conhecidos é o amortecedor de massa sintonizado (AMS). O AMS consiste em um sistema massa-mola-amortecedor vinculado externamente à estrutura. Segundo Beneveli (2002), o objetivo de um AMS é diminuir a energia da estrutura quando essa se encontra sob carregamentos dinâmicos. Ao se transferir parte da energia da estrutura para o AMS os efeitos das vibrações sobre o sistema estrutural são atenuados. Em seu trabalho, Spencer e Soong (1999, apud. Gómez, 2007), afirma que um AMS é capaz de reduzir os impactos das vibrações nas estruturas em determinadas frequências. Como é um sistema que dispensa fonte de energia externa torna-se econômico, exigindo pouca manutenção e não requerendo alta tecnologia. De acordo com Hadi e Arfiadi (1998), os sistemas de controle passivos são muito utilizados por conta da praticidade nas instalações e manuseio.

Já um sistema de controle semiativo requer que uma quantidade de energia externa, embora pequena, seja introduzida no sistema para que o controle possa ser realizado. A energia externa introduzida ajuda a produzir uma força de controle de grande intensidade, que age alterando dinamicamente o coeficiente de amortecimento estrutural. Por sua vez, em um sistema de controle de vibração ativo a força é aplicada sobre a massa do amortecedor. Os sensores e processadores que existem na operação do sistema trabalham juntos no sentido de avaliar a força necessária a ser empregada em tempo real, melhorando o desempenho do amortecedor. Entretanto, esses sistemas demandam o uso de muita energia, além de exigir, para sua implementação, algoritmos mais complexos, o que os torna menos atraentes economicamente, afirma Gómez (2007).

Os estudos de atenuação de vibrações em edifícios têm considerado tanto os sistemas passivos quanto os semiativos e ativos. No campo dos sistemas passivos, os estudos realizados por Banerji e Samanta (2011) demonstraram a eficácia de diferentes configurações de um amortecedor líquido sintonizado híbrido, onde um tanque com água é fixado à uma massa secundária, que por sua vez é atrelada – por meio de molas – à estrutura que sofre ação sísmica em sua base. O estudo utilizou um modelo numérico para obter a resposta dinâmica de uma massa conectada ao amortecedor híbrido, alterando os valores de rigidez das molas e a razão da massa de água com a massa secundária. Mais tarde, Banerji e Samanta (2011) estenderam os estudos de Ikeda (2009) a edifícios, adicionando os equipamentos citados em cada um dos andares, usando diferentes configurações de montagem.

No âmbito dos sistemas de controle semiativos, Gómez (2007) afirma que esses não demandam muita energia e podem ter suas propriedades alteradas ao longo do controle, trabalhando em regiões de diferentes frequências. Eles são, na verdade, a combinação dos sistemas passivos e ativos. Apesar da relativa vantagem econômica que possuem, o fato de esses sistemas operarem, muitas vezes, com baterias apresenta um grande risco no caso de eventos sísmicos, já que a fonte de energia pode vir a ser cortada. Loh e Chao (1996) comparam sistemas de amortecedores de massa sintonizados, passivos e ativos, sistema de isolamento de base passiva e sistemas de isolamento ativo. No estudo, a aceleração e o deslocamento da base do edifício são comparados entre si de acordo com cada estratégia de isolamento.

Atualmente, as pesquisas têm focado em sistema de controle de vibração de rigidez variável, como visto em Gupta e Pradyumna (2022), Li *et al.* (2022) e Sharma *et al.* (2022). Nesse campo de estudo, Moutinho (2007) desenvolveu um sistema de controle de vibrações baseado na alteração da rigidez em um edifício pelo uso de dispositivos de rigidez

variável. Particularmente, nesse caso, foram instalados dispositivos em direções diagonais e em andares determinados do edifício. Esses dispositivos eram constituídos por cilindros hidráulicos regulados por válvulas, que permitiam comandar instantaneamente o bloqueio ou desbloqueio das barras, mobilizando ou desmobilizando a sua rigidez axial.

De acordo com Liu *et al.* (2020) um mecanismo de rigidez variável é aquele capaz de alcançar a rigidez necessária de acordo com a carga externa. De acordo com os autores, os mecanismos de rigidez variável podem ser passivos ou ativos. No caso dos passivos, a rigidez da mola varia de acordo com a posição de equilíbrio e é atingida conforme a configuração das forças externas. Já nos ativos, a rigidez pode variar sem dependência de uma carga externa, entretanto, esses sistemas necessitam de entradas independentes de energia para realizar o ajuste ativo da rigidez.

Ainda no que se refere aos sistemas de rigidez variável, recentemente, Dantas *et al.* (2021) elaboraram um estudo numérico usando o conceito de rigidez de mola estabelecido em função da força imposta ao sistema. O objetivo do estudo era o de avaliar a viabilidade do uso de molas de rigidez variável no controle de sistemas mecânicos solicitados dinamicamente. Como recurso de validação foi realizada uma modelagem computacional por meio do MEF, na qual uma mola translacional foi conectada à extremidade de uma viga bi-apoiada, segundo sua direção longitudinal. A viga era solicitada axialmente por uma força normal de compressão de diferentes intensidades. A força axial era julgada, matematicamente, capaz de modificar a rigidez da viga. Os resultados, entretanto, evidenciaram a boa resposta das molas de rigidez variável na solução do problema, de forma que a frequência natural da viga não foi modificada, o que permitiu manter as condições iniciais de operação do sistema.

3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelagem computacional realizada neste trabalho, esquematicamente apresentada na Fig. 2, foi elaborada no programa SAP2000 (2018). Trata-se de uma estrutura aporticada de um edifício idealizado de seis pavimentos, incluindo térreo e cobertura. Nesse, pilares e vigas foram representados por elementos lineares e os pisos por elementos planos. Os aspectos construtivos foram estabelecidos em consonância com a ABNT NBR 15421 (2006), da Associação Brasileira de Normas Técnicas, que orienta o projeto de estruturas sujeitas a sismos, incluindo critérios de modelagem. No modelo numérico descrito na Fig. 2, a estrutura se encontra engastada na base e sobre a qual foram atribuídos travamentos em forma de diagonal conectando os diferentes pavimentos. Essas diagonais têm o objetivo de contraventar o sistema frente a ações horizontais e melhorar a rigidez estrutural, reduzindo os deslocamentos laterais que porventura possam ocorrer.

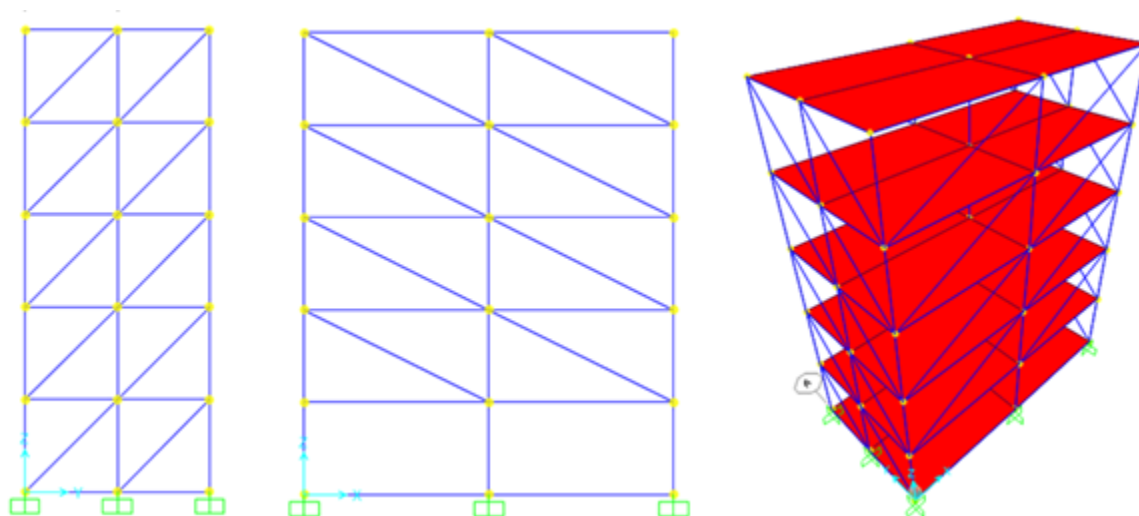


Figura 2. **Modelo computacional via método dos elementos finitos (SAP2000).**

Os materiais utilizados nos diversos elementos estão listados na Tab. 1, bem como suas propriedades mecânicas. As dimensões das seções transversais de vigas e colunas estão ilustradas na Fig. 3. Os elementos planos foram admitidos como tendo espessura de 0,1 metro e feitas de concreto armado.

Tabela 1. **Propriedades dos materiais.**

Propriedades do material	Aço ASME A36	Concreto C25	Aço AC25
Componente	Vigas	Colunas	Vergalhão
Densidade (kg/m^3)	7,8490E+03	2,5493E+03	2,5493E+03
Módulo de Elasticidade (N/m^2)	1,999E+11	2,000E+10	2,000E+11
Coefficiente de Poisson	0,26	0,20	0,30

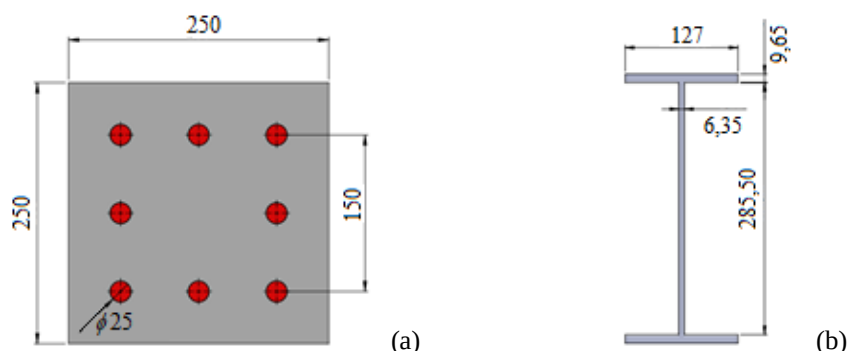


Figura 3. Seções: (a) colunas de concreto armado, (b) vigas e diagonais metálicas (dimensões em milímetro).

Na primeira etapa da análise, foram obtidas as frequências dos dois primeiros modos naturais de vibração do sistema estrutural (Análise Modal). Na análise modal, é de interesse registrar, que a solução é obtida algebricamente por autovalores com base na equação característica composta pelas matrizes de rigidez e massa do sistema. Os valores para as respectivas frequências naturais de vibração são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2. Frequências naturais de vibração

Modo	Frequência (Hz)
1	1,81
2	3,59

Na segunda etapa da análise, foram observados os deslocamentos máximos dos nós da estrutura sob ação das acelerações sísmicas antes da aplicação das molas de rigidez variável, visando definir o ponto mais desfavorável do sistema. Essas acelerações dizem respeito à ação sísmica particular do evento designado como “El Centro” e foram impostas na base da estrutura. É importante mencionar, que esse evento sísmico ocorreu em 1940 na cidade de El Centro, Califórnia, Estados Unidos da América, e foi registrado como tendo magnitude 6,9 na escala Richter (máximo de 9). A aceleração máxima que foi captada pelos sismógrafos foi de $2,92 \text{ m/s}^2$, aproximadamente 0,3 g. A função temporal das acelerações para o mencionado sismo pode ser vista na Fig. 4.

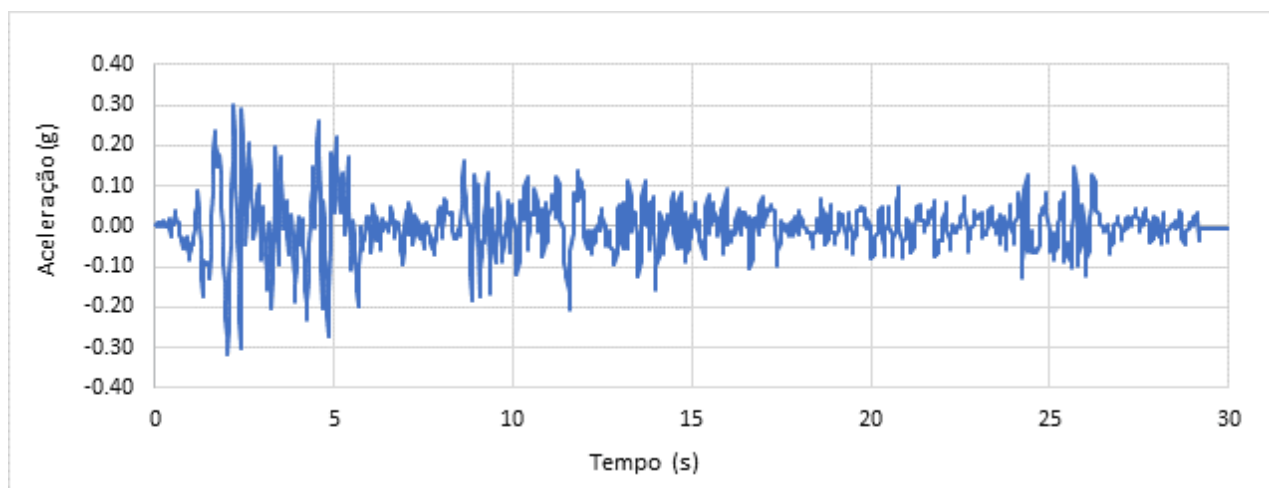


Figura 4. Função temporal do terremoto de El Centro de 1940.

No modelo matemático-numérico-computacional as acelerações descritas na Fig. 4 foram inseridas como funções temporais dada a natureza de sua variação. A solução do problema, nesse caso, ocorre resolvendo-se a equação de equilíbrio dinâmico, Eq. (1), pelo método de integração direta,

$$K u(t) + C \frac{d}{dt} u(t) + M \frac{d^2}{dt^2} u(t) = r(t), \quad (1)$$

onde K, C e M são as matrizes de rigidez, amortecimento e massa, respectivamente, u e r são o deslocamento e o vetor força resultante, ambas grandezas temporais. A representação da derivada, primeira e segunda, obedece à notação de Leibniz.

A terceira etapa da análise se inicia após a aplicação da função temporal associada às acelerações sísmicas do evento mencionado ao sistema estrutural. Com isso, foi possível selecionar a posição da estrutura mais desfavorável em termos

de deslocamento. Esse foi o ponto escolhido como de referência na avaliação do sistema de controle a ser inserido. A avaliação, portanto, da resposta estrutural, após aplicação do sistema de controle, foi baseada na Transformada Rápida de Fourier (FFT) realizada sobre os deslocamentos temporais apresentados pelo ponto de referência.

É importante ter claro que o sistema de controle aplicado é composto por molas translacionais associadas aos elementos de ligação entre pisos, ou diagonais, conforme se indica na Fig. 5. A essas molas foram atribuídos diferentes valores de rigidez, ou coeficiente de mola, buscando manter as condições de trabalho da estrutura o mais próximo possível dos parâmetros iniciais de projeto.

A possibilidade de ser alcançada a condição anterior foi comprovada por Wahrhaftig *et al.* (2022) por meio de ensaios em laboratório físico usando uma peça em escala natural, uma viga feita de aço, sobre a qual um macaco hidráulico foi aplicado segundo a direção longitudinal do eixo do elemento estrutural para agir como dispositivo de controle. Mecanismos similares foram, também, avaliados, por via numérica, por Mahato *et al.* (2019) como sendo eficientes ferramentas de controle para atenuar os deslocamentos de edifícios sob ação sísmica.

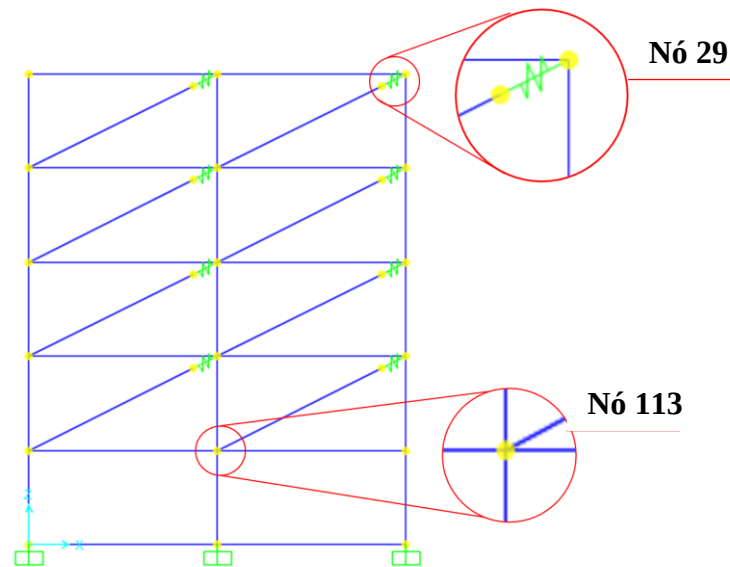


Figura 5. Modelo do edifício com a aplicação das molas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizada a simulação numérica, como descrito na terceira etapa da análise, e considerando a estrutura nas condições anteriores à aplicação do sistema de controle, foram selecionados dois nós de interesse em virtude da proximidade de resultados existente entre eles, conforme pode ser observado na Fig. 6. Um desses pontos está associado ao nó 113, localizado próximo à base do edifício, e o outro ao nó 29, localizado no topo da edificação. Na comparação, o maior deslocamento apresentado diz respeito ao nó 29. O deslocamento máximo desse ponto, de 0,016 metros, ocorre 5,5 segundos após o evento sísmico chegar à edificação.

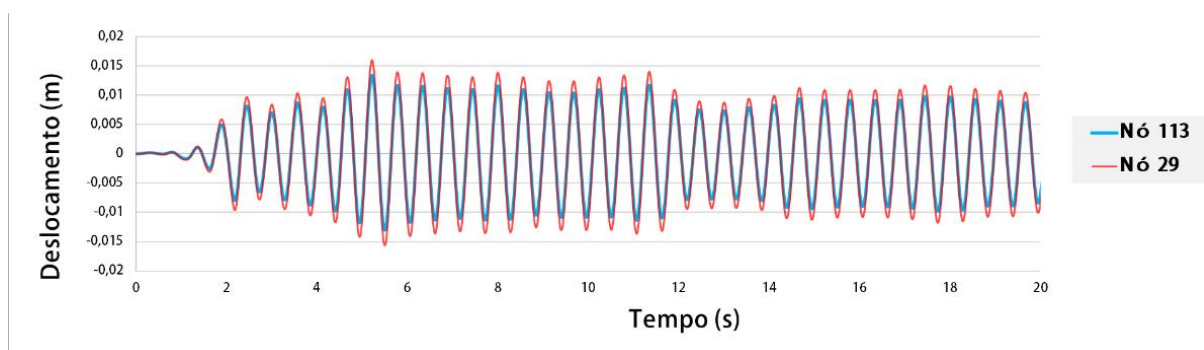


Figura 6. Deslocamentos em dois nós da estrutura, em diferentes alturas.

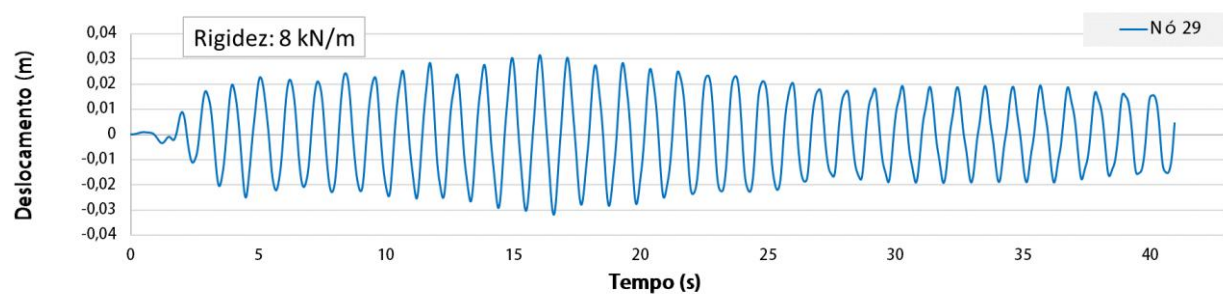
Diferentes valores de rigidez foram aplicados às molas do sistema de controle. A resposta do nó de referência, medida no domínio da frequência, para cada valor de rigidez estudado é mostrada na Tab. 3. Sendo adotada a rigidez de valor igual a 1000000 kN/m a resposta da estrutura dista apenas 0,5% da frequência do segundo modo natural de vibração. Por outro lado, pode ser percebido que ao ser diminuída a rigidez da mola, a resposta do nó 29, em termos de frequência, ocorre para o valor de 1,9 Hz. Esse resultado, é o mais próximo possível da frequência natural do primeiro modo de vibração que foi possível obter, encontrando-se uma diferença da ordem de 5% em relação à frequência original. Para

valores inferiores à rigidez de 8 kN/m não foi possível notar mudança significativa na resposta da estrutura. Assim sendo, as atenuações percebidas indicam que, em caso de um abalo sísmico, a característica dinâmica das molas poderia regular os efeitos nocivos que são transmitidos à estrutura, e manter as frequências de vibração sob determinado controle.

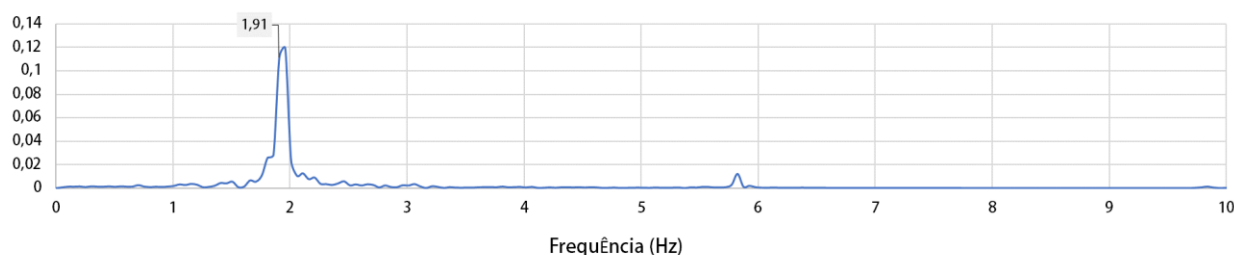
Tabela 3. **Respostas da estrutura com controle**

Rigidez da mola (kN/m)	Frequência estrutural após controle (Hz)	Frequência natural original da estrutura (Hz)	Diferença (%)
8	1,90	1,81 (1º modo)	5,0
1000000	3,61	3,59 (2º modo)	0,5

A função dos deslocamentos, no tempo e a transformada rápida de Fourier (FFT) do nó de referência para os modos de vibração analisados podem ser vistos nas Figs. 7 e 8, respectivamente.

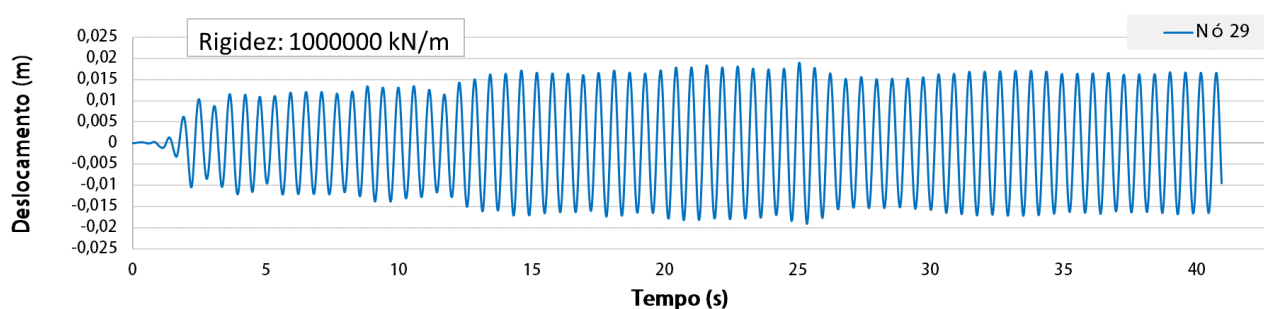


(a)

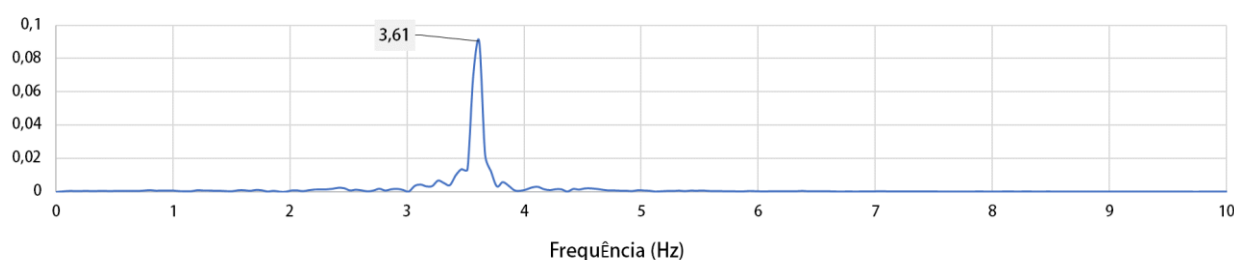


(b)

Figura 7. Calibração para o 1º modo: (a) Função temporal dos deslocamentos, (b) FFT.



(a)



(b)

Figura 8. Calibração para o 2º modo: (a) Função temporal dos deslocamentos, (b) FFT.

5. CONCLUSÃO

As simulações computacionais realizadas com base no método dos elementos finitos demonstram a viabilidade do uso de dispositivos mecânicos de controle sobre a resposta de um edifício em ação sísmica. Nesse sentido, pôde ser constatado que a posição da estrutura que apresentava os maiores deslocamentos durante um evento sísmico simulado teve sua frequência de vibração ajustada após a inserção de um sistema de controle baseado no conceito de molas de rigidez variável. Essas molas, puderam ter seus coeficientes calibrados de forma a aproximar as frequências de vibração do edifício durante uma ação sísmica à de seus dois primeiros modos naturais de vibração. Em relação ao primeiro modo, a mola adotada levou o sistema a ter uma frequência que difere apenas 5% da do valor original. Em relação ao segundo, essa diferença foi de 0,5%.

Diante da natureza dinâmica do carregamento provocado por terremotos, o uso de molas se mostrou eficiente em modular a amplitude dos deslocamentos e ajustar as frequências de vibração induzidas pelo evento sísmico. Dessa maneira, é possível concluir que o emprego de molas de rigidez variável como elementos de controle de vibração e mitigação dos efeitos de abalos sísmicos se converte em uma estratégia viável.

Estudos com outros modos de vibração são esperados em trabalhos futuros.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Iniciação Científica (PIBIC) da Universidade Federal da Bahia (UFBA) pelo apoio recebido em forma de bolsas de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15421 (2006) Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento, Rio de Janeiro.
- Banerji, P. and Samanta, A., 2011. "Earthquake vibration control of structures using hybrid mass liquid damper." *Engineering structures*, 33(4), pp. 1291-1301. doi:10.1016/j.engstruct.2011.01.006.
- Beneveli, S.M.A., 2002. "Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). doi:10.17771/PUCRio.acad.3124.
- Bosse, R.M., 2017. "Desempenho de TMDS em edifícios submetidos a terremotos". Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/D.18.2017.tde-05042017-092151.
- Campos, J.E.G., Xavier, T.O. e Freitas-Silva, F.H., 2016. "Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal". *Geociências*. São Paulo, UNESP, Vol. 35, Nº. 2, pp. 203-219.
- Dantas, G.L.J., Menezes, C.M., Pacheco, C.V. and Wahrhaftig, A.M., 2021. "Springs with Proportional Stiffness to the Applied Force". In *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil: ABCM. doi://10.26678/ABCM.COBEM2021.COB2021-0024
- Gómez, A.L.Z., 2007. *Controle de vibrações em edifícios submetidos à ação de cargas dinâmicas utilizando amortecedor de massa sintonizando na forma de pêndulo*. Universidade de Brasília, Brasília, 86 f., Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil).
- Gupta, A. and Pradyumna, S., 2022. "Geometrically nonlinear dynamic analysis of variable stiffness composite laminated and sandwich shell panels", *Thin-Walled Structures*, Vol. 173, 109021. doi:10.1016/j.tws.2022.109021.
- Hadi, M.N.S. and Arfiadi, Y., 1998. "Optimum Design of Absorber for MDOF Structures". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124(11), pp. 1272-1280. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:11(1272).
- Ikeda, Y., 2009. "Active and semi-active vibration control of buildings in Japan—Practical applications and verification." *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 16(7-8), pp. 703-723.
- Li, Z., Chen, W., Zhang, J., Li, Q., Wang, J., Fang, Z. and Yang, G., 2022. "A novel cable-driven antagonistic joint designed with variable stiffness mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 171, 104716. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2021.104716.
- Liu, H., Zhu, D. and Xiao, J., 2020. "Conceptual design and parameter optimization of a variable stiffness mechanism for producing constant output forces". *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 154, 104033. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104033.
- Loh, C.H. and Chao, C.H., 1996. "Effectiveness of active tuned mass damper and seismic isolation on vibration control of multi-storey building." *Journal of Sound and Vibration* 193(4), pp. 773-792. doi:10.1006/jsvi.1996.0315.
- Mahato, A. C., Ghoshal, S.K. and Samantaray, A.K. 2019. "Influence of variable inertia flywheel and soft switching on a power hydraulic system". *SN Applied Sciences*, 1, 605. doi:10.1007/s42452-019-0623-0.
- Mirfakhraei, S.F., Andalib, G. and Chan, R., (2019) "Active scissor-jack for seismic risk mitigation of building structures". *SN Applied Sciences*, Vol. 1, 191. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0210-4.

- Moutinho, C.M.R., 2007. *Controlo de vibrações em estruturas de Engenharia Civil*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/11186>
- Preve, W.S., D'Espindula, G.P.C. e Valdati, J., 2017. "Abalos sísmicos moderados no Brasil: um levantamento dos eventos registrados nos séculos XX e XXI e a difusão de medidas preventivas". In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Campinas/SP. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. V. 1, pp. 3928-3940. doi:10.20396/sbgfa.v1i2017.2542
- SAP2000, 2018. "Analysis reference manual. Integrated software for structural analysis and design". *Computers and Structures*, Inc. Berkeley, California.
- Seeber, L. and Armbruster, J.G., 1988. "Seismicity along the Atlantic seaboard of the U.S.: intraplate neotectonics and earthquake hazard". In: *The Atlantic Continental Margin: U.S., The Geology of North America*. R.E. Sheridan & J.A. Grow (eds.), Geological Society of America, Boulder, pp. 565-582.
- Sharma, N., Swain, Prasant, K., Maiti, D.K. and Singh, B.N., 2022. "Static and free vibration analyses and dynamic control of smart variable stiffness laminated composite plate with delamination", *Composite Structures*, Vol. 280, 114793. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114793.
- Tavares, A.C., Montenegro, C.G.L., Bezerra, F.H.R., Ferreira, J.M. e Sousa, M.O.L., 2013. "Mapa de falhas neotectônicas da Província Borborema com base em dados sismológicos, geofísicos e geológicos". In *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1993-1997. doi:10.1190/sbgf2013-409.
- Valencia, L.A.L., González, Y.V. and Zambrano, D.M.B., 2022. "Study of a semi-active control system to reduce lateral displacement in framed structures under seismic load" *Ingeniería e Investigación*, 42(3), (e85937), pp 85937-85937. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.85937>.
- Wahrhaftig, A.M., Dantas, J.G.L., Brasil, R.M.L.R.F. and Kloda, L., 2022. Control of the vibration of simply supported beams by using springs with proportional stiffness to the axially applied force. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00502-2>.
- Zhang, B., Billings, S.A., Lang, Z.Q. and Tomlinson, G.R., 2009. "Suppressing resonant vibrations using nonlinear springs and dampers." *Journal of Vibration and Control*, 15.11: 1731-1744.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

VARIABLE STIFFNESS SPRINGS IN THE CONTROL OF SEISMIC ACTIONS IN BUILDINGS

Júlia Good Lima Dantas julialimadantas@gmail.com¹
Cibele Mota Menezes, cibele_menezes@hotmail.com²
Alexandre de Macêdo Wahrhaftig, alixa@ufba.br^{1,2}

¹Federal University of Bahia (UFBA), Polytechnic School, Department of Construction and Structures (DCS), Aristides Novís Street, 02, 5th floor, Federação, Salvador – BA, Brazil, ZIP Code: 40210-630.

²Federal University of Bahia (UFBA), Polytechnic School, Graduate Program in Civil Engineering (GPCE), Aristides Novís Street, 02, 8th floor, Federação, Salvador – BA, Brazil, ZIP Code: 40210-630.

Abstract. In the United States, according to government institutions, there are 12,000 to 14,000 seismic events annually, approximately 35 per day. The American reality does not differ from that of many regions of the world that experience the presence of such geological events. Given this reality, the control of vibrations caused by earthquakes on buildings is one of the great challenges in several seismic regions, as they can cause structural, material and personal damage, and must be considered with special attention when carrying out a structural project. For this reason, it is necessary to minimize the deleterious effects caused by earthquakes on buildings. In this sense, the present study seeks to evaluate, through the theory of mechanical vibrations, the use of springs of variable stiffness in the control of accelerations induced by seismic action, because the springs introduce restoring forces in the system. The evaluation is done through numerical-computational simulation using the finite element method. The porticoed structure of an idealized building is used in the modeling, where pillars and beams are represented by linear elements and the floors by plate elements. In the simulation, springs of variable stiffness are inserted into the nodes in order to control the vibrations produced by earthquakes. These devices are added to the structural system at different heights and directions, aiming to keep the structure's behavior unchanged, neutralizing the effects of the earthquake. Based on the results obtained, it is possible to verify the required stiffness and the position in which the springs must be inserted in order to obtain the constancy of the structural frequency of vibration.

Keywords: spring supports, variable stiffness, seismic action, computational simulation, structural vibrations.