

CONTROLE DA RESPOSTA SÍSMICA DE PÓRTICO PLANO UTILIZANDO AMORTECEDORES VISCOSOS

SEISMIC RESPONSE CONTROL OF A PLANE FRAME USING VISCOUS DAMPERS

*Patrick de Oliveira Batista da Costa*¹

*Lucas Alves de Aguiar*¹

*Arthur de Caneda Preuss*¹

Resumo: O presente estudo consiste em comparar a resposta dinâmica de um edifício em aço modelado como um pórtico plano, quando submetido a uma excitação sísmica real, tanto em cenários sem controle quanto com controle passivo. O controle passivo é implementado através da estratégia de dissipação de energia utilizando amortecedores viscosos, dispositivos adicionados externamente à estrutura. Os resultados revelam que o amortecimento viscoso aplicado à estrutura reduz significativamente a resposta dinâmica em termos de deslocamento, resultando em uma redução de cerca de 70% ao longo do evento sísmico.

Palavras-chaves: Análise Dinâmica, Controle de Vibrações, Sismo, Amortecedores Viscosos, OpenSeesPy.

Abstract: *This present study consists of comparing the dynamic response of a steel building modeled as a flat frame when subjected to a real seismic excitation, both in scenarios without control and with passive control. Passive control is implemented through an energy dissipation strategy using viscous dampers, devices added externally to the structure. The results show that viscous damping applied to the structure significantly reduces the dynamic response in terms of displacement, achieving a reduction of around 70% throughout the seismic event.*

Keywords: Dynamic Analysis, Vibration Control, Earthquake, Viscous Dampers, OpenSeesPy.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS – Brasil, email: patrick.costa@ufrgs.br, lucas.a.aguiar@hotmail.com, arthurcaneda@hotmail.com

1 Introdução

As ações dinâmicas sempre permearam as estruturas civis, resultantes de atividades humanas, forças naturais como o vento e demandas sísmicas. Segundo Newmark e Rosenblueth (1971) a atuação dos terremotos nas estruturas tem o potencial de evidenciar os erros cometidos na concepção e construção, sendo um dos aspectos mais intrigantes e desafiantes da engenharia sísmica. Entre os modelos de projeto para terremotos propostos, o tradicional enfoque na força ou resistência pode se mostrar financeiramente inviável devido aos altos custos em delimitar o comportamento da estrutura no regime elástico. Por outro lado, o projeto sísmico focado no movimento propõe a redução da resposta da estrutura, o que consequentemente possibilita menores deformações, viabilizando o comportamento da estrutura no regime elástico (Connor; Laflamme, 2014). De acordo com Jalili (2010) o projeto baseado no movimento propõe sistemas de controle de vibrações que são adicionados em estruturas com o intuito de eliminar, alterar ou limitar as respostas do sistema estrutural, seja por meio de isolamento, dissipação de energia ou absorção de vibração.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho se trata de comparar a resposta dinâmica de um edifício em aço modelado em pórtico plano submetido a uma excitação sísmica real nos cenários sem controle e com controle passivo. O controle passivo é realizado por meio da estratégia de dissipação de energia através dos amortecedores viscosos, sendo estes os dispositivos externos adicionados na estrutura.

2 Metodologia

2.1 Formulação da Equação Geral do Movimento

De acordo com Clough e Penzien (1975) a formulação para sistemas com múltiplos graus de liberdade em forma matricial é realizada através da aplicação do princípio de D'Alembert, onde o equilíbrio das forças atuantes sobre as massas é considerado, conforme a Equação (01)

$$M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{F}. \quad (1)$$

Onde, M , C e K são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura, respectivamente, e $\ddot{\vec{x}}$, $\dot{\vec{x}}$ e \vec{x} são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento da estrutura. \vec{F} é o vetor de forças externas aplicada no sistema, sendo representada de acordo com a Equação (02) para sismos:

$$\vec{F} = -MB\ddot{\vec{x}}_g. \quad (2)$$

Em que a matriz de endereçamento B representa os cossenos diretores dos ângulos formados entre o movimento da base e a direção dos deslocamentos associados aos graus de liberdade considerados, e $\ddot{\vec{x}}_g$ o vetor de acelerações sísmicas.

A resolução da equação geral de movimento é realizada no domínio do tempo por meio do método de integração direto implícito e incondicionalmente estável conhecido como método de Newmark implementado no OpenSeesPy.

2.2 Amortecedores Viscosos

Os amortecedores viscosos, conhecidos por dissipar energia, são dispositivos que fazem parte do sistema de controle de vibração passivo, isto é, que não necessitam de energia externa para alimentar o sistema (Soong; Dargush, 1997). Esses dispositivos dependem apenas da velocidade e, como consequência, quando adicionados em estruturas, a rigidez do sistema não se altera. Basicamente o amortecedor viscoso consiste de um cilindro preenchido por um fluido que é deformado pelo pistão. No caso de uma estrutura submetida a um carregamento sísmico, o movimento do pistão produz conversão de energia cinética em calor (Villarreal; Díaz, 2016). A Equação (03) apresenta o comportamento dos amortecedores viscosos:

$$F = c_d \cdot \dot{x}^\alpha \quad (3)$$

Em que F representa a força exercida pelo amortecedor, c_d o coeficiente de amortecimento, \dot{x} a velocidade relativa do amortecedor, e α o coeficiente de velocidade que varia entre 0,3 e 1,0 para estruturas. Para amortecedores lineares que é o caso do presente estudo o valor $\alpha = 1$.

2.3 Excitação Sísmica

O carregamento sísmico aplicado à estrutura corresponde a um evento sísmico real, cujo registro do acelerograma foi adquirido da base de dados do *Center for Engineering Strong Motion Data* (CESMD). O registro corresponde ao terremoto de Loma Prieta, ocorrido na região da Califórnia, Estados Unidos, no ano de 1989. Entre as características, destacam-se sua magnitude de 7 Mw, o hipocentro situado a 17,5 km de profundidade, o mecanismo de falha reversa oblíquo e o pico de aceleração no solo (PGA) com valor de 0,41g. Além disso, a duração do evento sísmico é considerada igual a 20 segundos e o incremento de tempo (dt) é o mesmo obtido da taxa de amostragem do sismógrafo, isto é, igual a 0,02s. O acelerograma é apresentado na Figura 1.

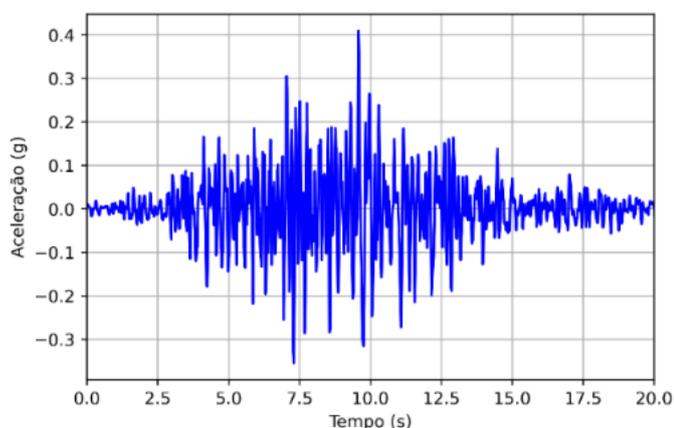


Figura 1. Acelerograma do sismo Loma Prieta de 1989

Fonte: Próprios autores (2024)

2.4 Estrutura Proposta

A estrutura em questão refere-se a um edifício de 7 pavimentos com altura e largura total de 21 m e 15 m, respectivamente, construído em aço, cujas características principais são delineadas na Figura 2. Os perfis de aço adotados exibem propriedades elásticas lineares, caracterizadas pelos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa, densidade (ρ) de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3. Além da massa inercial, o peso próprio da estrutura, acrescido da carga variável, é aplicado como uma carga distribuída uniformemente sobre as vigas, com um valor de 31,39 kN/m. Como procedimento padrão, uma análise estática é conduzida preliminarmente antes da análise dinâmica.

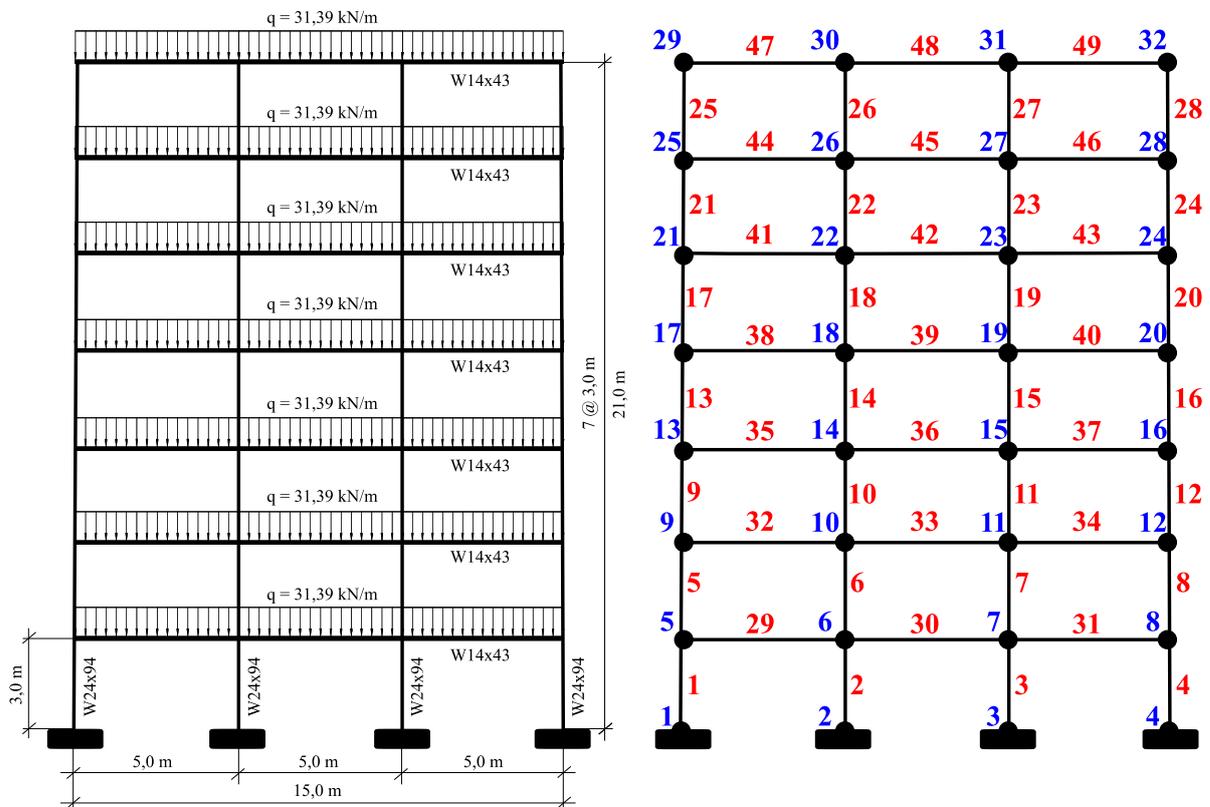


Figura 2. Características da estrutura e numeração dos nós e elementos

Fonte: Próprios autores (2024)

Dois cenários distintos são avaliados, o primeiro cenário se trata da avaliação da resposta dinâmica da estrutura sem o sistema de controle, conforme a figura anterior. O segundo cenário se trata da avaliação da resposta dinâmica da mesma estrutura porém com sistema de controle passivo, isto é, amortecedores viscosos adicionados na estrutura na forma diagonal no vão central em todos os pavimentos, conforme a Figura 3.

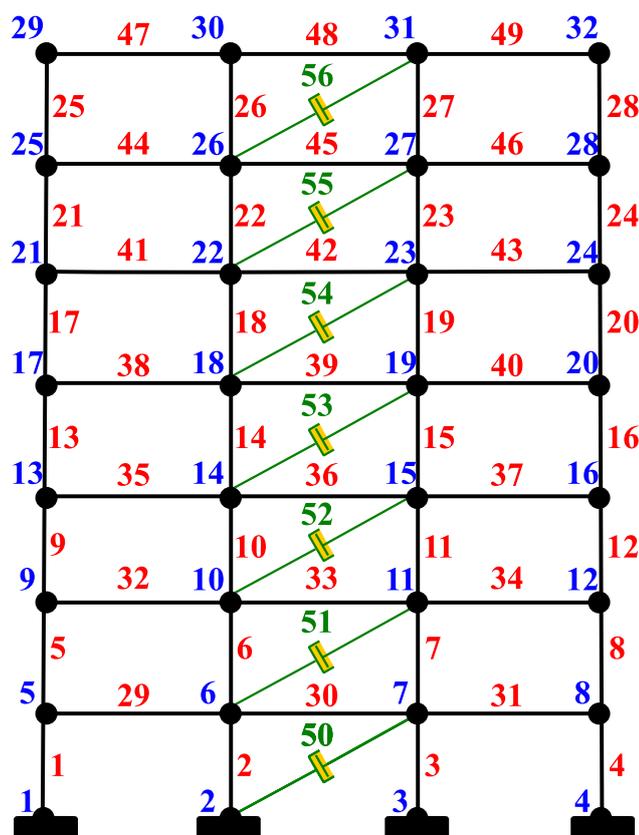


Figura 3. Tipo e posicionamento dos amortecedores viscosos na estrutura

Fonte: Próprios autores (2024)

Os amortecedores viscosos são adicionados na estrutura na forma de elementos que não alteram a rigidez do sistema. No total são adicionados 7 amortecedores viscosos, e o valor de cada coeficiente de amortecimento é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis de aço estudados

Elementos	c_d (N·s/m)
50, 51, 52	$3,0 \times 10^6$
53, 54	$2,0 \times 10^6$
55 e 56	$1,0 \times 10^6$

Fonte: Autoria própria (2024)

2.5 OpenSeesPy

A análise estrutural para a metodologia apresentada neste trabalho foi realizada em Python 3 juntamente com o *framework* de código aberto denominado OpenSeesPy, uma implementação do interpretador Python para uso com o OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*)(Zhu et al., 2018).

Nesse trabalho, considerou-se a matriz de rigidez linear elástica através do elemento *'elasticBeamColumn'*. A matriz de massa foi considerada como consistente e a matriz de amortecimento estrutural baseou-se na proposta de Rayleigh, com o valor adotado de 1,5% para a razão de amortecimento crítico (ζ) para os dois primeiros modos de vibração. Para a modelagem do amortecedor viscoso foi utilizado o material *'Viscous'*.

3 Resultados e discussões

Uma vez que a análise estática foi realizada levando em conta as forças de corpo, as propriedades dinâmicas da estrutura são obtidas por meio da análise modal, que examina a estrutura em vibração livre e não amortecida, com valores de frequências naturais iguais a 4,346 Hz e 14,214 Hz, para o primeiro e o segundo modo, respectivamente.

De forma a avaliar a resposta dinâmica da estrutura quando submetida a uma excitação sísmica para os cenários sem controle e com controle, foram analisadas as respostas em termos de deslocamento no tempo no último pavimento (nó 32), e o máximo deslocamento absoluto por pavimento. Os resultados obtidos para os dois cenários em termos de deslocamento no tempo é exibido na Figura 4.

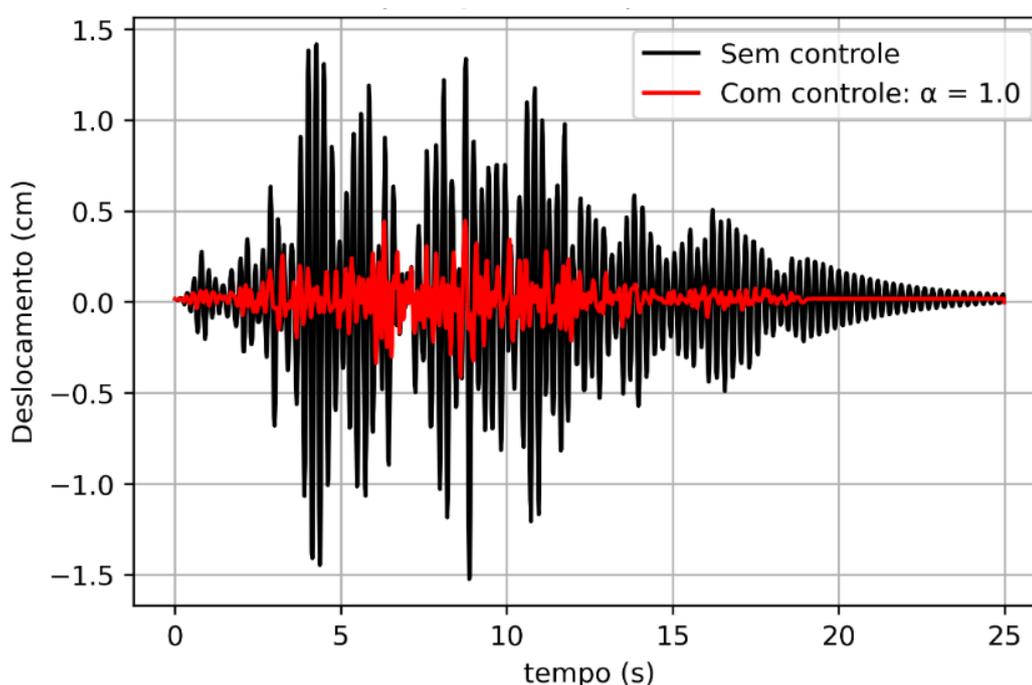


Figura 4. Comparação da resposta em termos de deslocamento no topo do edifício (nó 32)

Fonte: Próprios autores (2024)

Observa-se que a resposta dinâmica é avaliada com uma duração superior a 20 segundos com o intuito de avaliar o comportamento da estrutura em vibração livre e o efeito do amortecimento estrutural e do amortecimento viscoso para o cenário da estrutura com controle.

É evidente como o amortecimento viscoso adicionado à estrutura reduz a resposta dinâmica em cerca de 70%, em termos de deslocamento. Essa redução ocorre durante todo o evento sísmico. Além disso, uma vez que não há mais força externa em ação, no cenário com controle, a vibração cessa.

Outra forma de avaliar o desempenho do amortecimento viscoso adicionado na estrutura é através dos deslocamento máximo absoluto por pavimento, conforme apresentado na Figura 5.

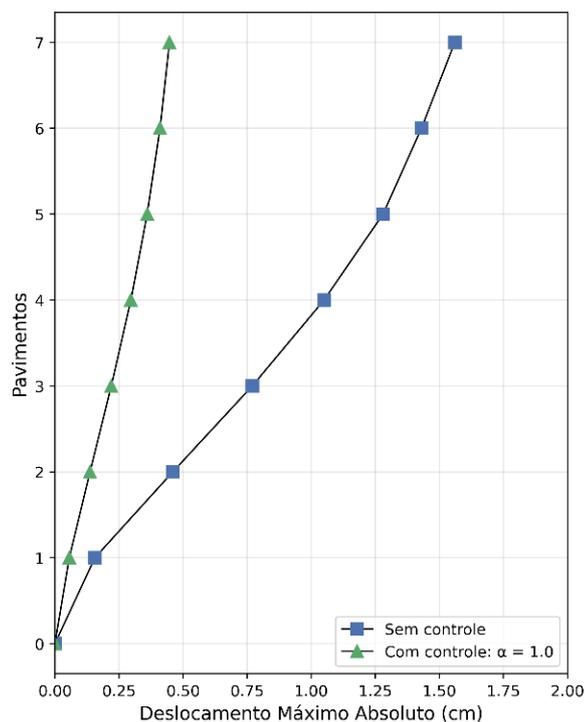


Figura 5. Comparação da resposta em termos de deslocamento máximo por pavimento

Fonte: Próprios autores (2024)

Fica evidente que o deslocamento absoluto máximo da estrutura sem controle ocorre no topo, com um valor de 1,56 cm, enquanto o deslocamento máximo da estrutura com controle é de 0,447 cm, também no último pavimento. Além disso, nota-se uma redução nos deslocamentos em todos os pavimentos, conforme esperado, variando entre 64% e 72%.

5 Conclusões

O trabalho desenvolvido focou-se na realização da análise dinâmica de um pórtico plano submetido à excitação sísmica, modelado por elementos finitos de barra através da linguagem de programação Python 3 juntamente com o framework OpenSeesPy. Os cenários sem controle e com controle foram avaliados. Ao analisar os resultados, tornou-se evidente que a consideração da estrutura com controle por amortecedores viscosos reduziu a resposta dinâmica em cerca de 70%, tanto no tempo como nos deslocamentos máximos absolutos em cada pavimento, conforme demonstrado nas Figuras 4 e 5. Dessa forma, conclui-se que os amortecedores viscosos são dispositivos eficazes na dissipação de energia durante carregamentos dinâmicos, como os causados por sismos.

Como continuação do trabalho, é recomendada a realização de análises adicionais para aprimorar a compreensão do comportamento da estrutura. Isso pode incluir considerações sobre a não-linearidade física e geométrica da estrutura, otimização dos amortecedores tanto em termos de sua localização na estrutura quanto de seus coeficientes de amortecimento, além da investigação de coeficientes de velocidade (α) inferiores a 1,0 que apontam para a não-linearidade dos amortecedores viscosos. Também é recomendada a exploração de diferentes fontes de carregamento, como excitações sísmicas alternativas, e a avaliação do desempenho dos amortecedores viscosos em resposta às forças dinâmicas do vento.

Referências

- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. [s.l.] McGraw-Hill, 1975.
- CONNOR, J.; LAFLAMME, S. **Structural motion engineering**. [s.l.] Springer, 2014.
- JALILI, N. **Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro/nanoscale systems**. Springer Science & Business Media, 2009.
- NEWMARK, N. M.; ROSENBLUETH, E. **Fundamentals of Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- SOONG, T. T.; DARGUSH G. F. **Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering**. New York: Wiley, 1997.
- VILLARREAL, G.; DÍAZ, M. Edificaciones con disipadores viscosos. **Editora & Imprenta Gráfica Norte SRL Trujillo-Perú**, 2016.
- ZHU, M; MCKENNA, F; SCOTT, M. H. OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. **SoftwareX**, v. 7, p. 6-11, 2018.