



A: XXXIX-0000

## DISPOSITIVOS DE CONTROLE PASSIVO EM EDIFÍCIOS SUBMETIDOS À AÇÃO SÍSMICA

### PASSIVE CONTROL DEVICES IN BUILDINGS SUBMITTED TO SEISMIC ACTION

Osmar P. L. Geraldo (P)(1); Wendell D. Varela (2); Michèle S. Pfeil (3)

- (1) Eng. Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Brasil.
- (2) Dr. Prof. Eng. Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, FAU, Departamento de Estruturas, Rio de Janeiro, Brasil.
- (3) Dra. Profa. Eng. Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Brasil.

Endereço para correspondência: osmar.geraldo@coc.ufrj.br; (P) Apresentador

**Área temática:** Métodos Computacionais.

#### Resumo

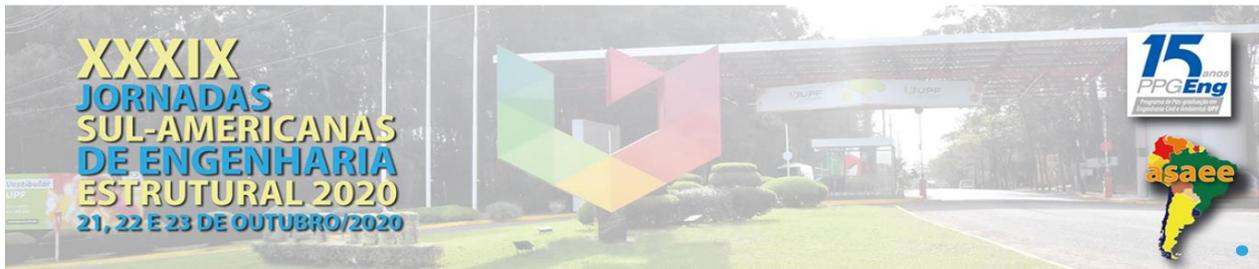
Estruturas de edifícios, assim como outras, são susceptíveis a ação sísmica podendo apresentar resposta dinâmica que alcance situações de estado limite último. Dotar as edificações de dispositivos atenuadores de vibração é uma providência eficiente para evitar estas situações. Os amortecedores dos tipos por atrito e viscoelásticos podem ser alternativas de controle passivo econômicas para dissipação de energia. O objetivo deste trabalho é analisar a eficiência de amortecedores por atrito e viscoelásticos em estruturas de edifícios de diferentes alturas submetidas a ação de sismos. Utilizou-se um programa comercial de elementos finitos, além de validações de respostas realizadas por meio de um programa de análise dinâmica desenvolvido na plataforma Mathcad. Um estudo paramétrico foi realizado para a escolha das características e detalhes de projeto mais apropriados aos amortecedores. Os resultados em termos de deslocamentos, obtidos nas simulações, mostram que as estruturas equipadas com sistemas de controle sofrem deslocamentos menores quando comparadas às sem controle, evidenciando a eficiência destes atenuadores na redução da resposta dinâmica de edificações controladas pelos mesmos.

*Palavras-chave:* Amortecedor por atrito, amortecedor viscoelástico, controle de vibrações, sismos.

#### Abstract

Building structures, as well as others, are susceptible to seismic action and may present a dynamic response that reaches ultimate limit state situations. Providing buildings with vibration dampers devices is an efficient measure to avoid these situations. Friction and viscoelastic type dampers can be cost effective passive control alternatives for energy dissipation. The objective of this work is to analyze the efficiency of friction and viscoelastic dampers in building structures of different heights subjected to earthquake action. A commercial finite element program was used, in addition to validations of responses performed through a dynamic analysis program developed on the Mathcad platform. A parametric study was carried out to choose the most appropriate features and design details for the dampers. The results in terms of displacements, obtained in the simulations, show that structures equipped with control systems suffer smaller displacements when compared to those without control, evidencing the efficiency of these attenuators in reducing the dynamic response of buildings controlled by them.

*Keywords:* Friction damper, viscoelastic damper, vibration control, earthquakes.



## 1. INTRODUÇÃO

A ação sísmica é uma realidade em várias regiões de nosso planeta e quando ocorre em centros urbanos muitas vezes leva ao colapso os edifícios, com perdas materiais e sobretudo de vidas humanas.

Com isso, o estudo do comportamento dinâmico das estruturas durante os eventos sísmicos e de mecanismos que possam mitigar a energia que é transmitida às edificações é objeto de extrema importância e pode contribuir para evitar problemas de desempenho, danos, colapso, além de salvar vidas. Além de edificações residenciais e comerciais, estruturas de hospitais, centrais de energia, usinas nucleares, dentre outras, tem especial importância quanto à preservação de sua integridade.

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência que dispositivos atenuadores de vibração por controle passivo, dos tipos por atrito e viscoelásticos, possuem em uma estrutura quando a mesma se encontra sob a ação de sismos (na direção horizontal). São analisadas as respostas de edifícios controlados por dispositivos de atrito e viscoelástico, considerando estruturas de diferentes alturas submetidas à ação de três sismos.

Atenuadores por atrito são caracterizados por dissipar a energia vibratória de uma estrutura por meio da fricção de um sistema composto por dois sólidos acoplados ao sistema estrutural. Esse tipo de sistema funciona atenuando as vibrações por meio da transferência de energia da estrutura para o sistema de atenuação. No presente caso, considerando o dispositivo como um elemento elastoplástico ideal, o modelo de Wen (1976), na Figura 1, é utilizado na formulação. Por sua vez, de forma análoga, o atenuador viscoelástico, representado pelo modelo de Voigt (Figura 2) é um tipo de sistema mola-amortecedor, que reduz as vibrações pela dissipação de energia por meio da mola, que tende a apresentar resposta instantânea a uma ação externa, e do amortecedor, com uma resposta retardada à mesma ação.

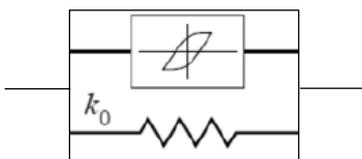


Figura 1. Modelo de Wen

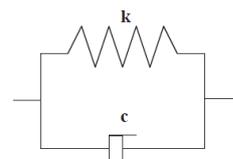


Figura 2. Modelo de Voigt

Inicialmente foram definidas duas estruturas aporticadas com alturas distintas e realizada uma modelagem matemática que pudesse representar o comportamento dinâmico das mesmas com e sem controle, quando submetidas a sismos. Nesta etapa também foi escolhido um modelo matemático que pudesse representar o comportamento dos atenuadores de vibração. Posteriormente as estruturas foram modeladas no programa comercial de elementos finitos SAP2000, e realizadas as simulações por meio do método numérico de integração de Newmark, com o objetivo de se obter as respostas numéricas do comportamento das estruturas em análise.



## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA E EQUAÇÕES DA DINÂMICA DE ESTRUTURAS COM E SEM DISPOSITIVO ATENUADOR

Segundo Clough e Penzien (2003), para estruturas representadas por sistemas com vários graus de liberdade, a formulação matemática pode ser caracterizada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}_e(t) + \mathbf{F}_a(t) \quad 1$$

Com o  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$  representando as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, da estrutura, respectivamente;  $\mathbf{F}_e$  o vetor de forças externas, que no caso de ação sísmica é constituído pelos vetores de influência  $\mathbf{L}_x$ ,  $\mathbf{L}_y$  e  $\mathbf{L}_z$  nas respectivas direções x, y e z, possuindo valores unitários nestas e nulos nas demais;  $\ddot{u}_{gx}$ ,  $\ddot{u}_{gy}$  e  $\ddot{u}_{gz}$ , como as acelerações do solo nas mesmas três direções:

$$\mathbf{F}_e(t) = -\mathbf{M}\mathbf{L}_x\ddot{u}_{g_x} - \mathbf{M}\mathbf{L}_y\ddot{u}_{g_y} - \mathbf{M}\mathbf{L}_z\ddot{u}_{g_z} \quad 2$$

sendo neste trabalho considerada, para fins de análises, somente uma componente dos sismos na direção horizontal e desprezada as demais. Por sua vez,  $\mathbf{F}_a$  é o vetor força de controle.

A formulação matemática para a força de controle dependerá do tipo de atenuador utilizado, não necessariamente sendo única para um mesmo tipo de atenuador. Neste estudo a força de controle associada ao dispositivo por atrito foi considerada como o modelo de Wen (1976) e a força associada ao dispositivo viscoelástico foi concebida segundo o modelo de Voigt, ou seja, este último um amortecedor associado em paralelo com uma mola. As equações 3 e 4 descrevem o modelo de Wen (CSI, 2017) e a equação 5 descreve o modelo viscoelástico.

$$F_{atrito} = \alpha \cdot k_W \cdot x_d + (1 - \alpha) \cdot f_r \cdot \zeta \quad 3$$

$$\dot{\zeta} = \frac{k_W}{f_r} \begin{cases} \dot{x}_d \cdot (1 - |\zeta|^n) & \text{se } \dot{x}_d \cdot \zeta > 0 \\ \dot{x}_d & \text{caso contrário} \end{cases} \quad 4$$

$$F_{ve} = c_a \cdot \dot{x}_d + k_a \cdot x_d \quad 5$$

Onde  $x_d$  é grau de liberdade onde está envolvido o efeito dos atenuadores,  $k_W$  é a rigidez elástica do atenuador,  $f_r$  a sua força de resposta,  $\alpha$  está associado à inclinação da parte horizontal da curva de histerese e a variável  $\zeta$ , que é adimensional, basicamente está relacionada ao comportamento histerético, possuindo intervalo  $|\zeta| \leq 1$ . O valor de  $n$  está relacionado com a suavidade da transição entre a região linear e não linear. Finalmente  $c_a$  e  $k_a$  são respectivamente o coeficiente de amortecimento e a rigidez do atenuador viscoelástico.

## 3. ESTRUTURAS ANALISADAS E SISMOS CONSIDERADOS

### 3.1. estruturas aporticadas

As estruturas aporticadas foram modeladas de forma que os pilares foram engastados no solo, sendo analisadas dois tipos de estruturas diferenciadas pelo número de pavimentos, e por seus componentes estruturais, sendo uma com cinco e outra com vinte andares. A taxa de amortecimento adotada foi de 5%. O modelo considerou elementos de pórtico plano do tipo straight frame para as vigas e pilares. Os sistemas estruturais são compostos por pórticos metálicos com uma altura de 4 metros e um vão de 10 metros. Na modelagem, os elementos de viga, além de sua massa própria, sofreram acréscimo de uma massa linear de 2500 kg/m. A Figura 3 ilustra a estrutura menor, à esquerda, sem atenuadores e, à direita, com atenuadores instalados na diagonal dos pavimentos. As características geométricas dos elementos estruturais são resumidas nas



Tabelas 1 e 2. As frequências naturais das estruturas são apresentadas na Tabela 3 e as formas modais da estrutura menor na Figura 4, sendo similares às da estrutura maior.

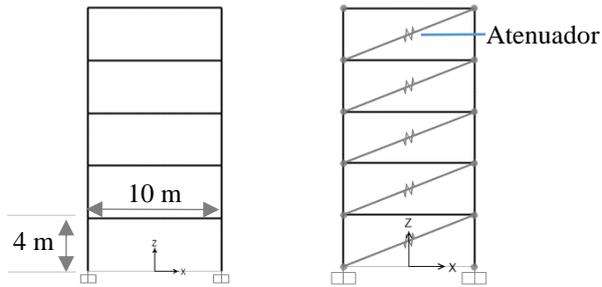


Figura 3. Estrutura de 5 pavimentos

Tabela 1. Elementos estruturais da edificação de 5 pavimentos

Pavimentos	Vigas		Pilares	
	Momento de Inércia ( $m^4 \times 10^{-4}$ )	Área ( $m^2 \times 10^{-2}$ )	Momento de Inércia ( $m^4 \times 10^{-4}$ )	Área ( $m^2 \times 10^{-2}$ )
1-2	2,93	0,949	4,02	1,65
3-5	2,93	0,949	3,32	1,40

Tabela 2. Elementos estruturais da edificação de 20 pavimentos

Pavimentos	Vigas		Pilares	
	Momento de Inércia ( $m^4 \times 10^{-4}$ )	Área ( $m^2 \times 10^{-2}$ )	Momento de Inércia ( $m^4 \times 10^{-4}$ )	Área ( $m^2 \times 10^{-2}$ )
1-8	3,33	0,854	4,85	1,95
9-12	3,33	0,854	4,02	1,65
13-16	2,93	0,949	3,32	1,40
17-20	2,93	0,949	2,67	1,15

Tabela 3. Frequências naturais das duas estruturas

Frequências naturais (Hz)			
Estrutura		5 pav	20 pav
Modos de Vibração	1	0,640	0,152
	2	2,130	0,454
	3	4,185	0,803
	4	6,778	1,164

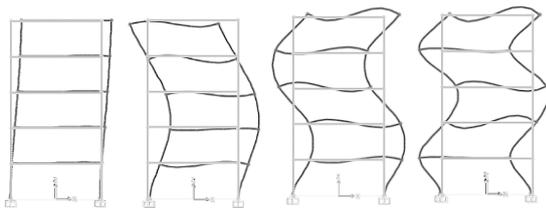


Figura 4. Formas modais da estrutura de 5 pavimentos

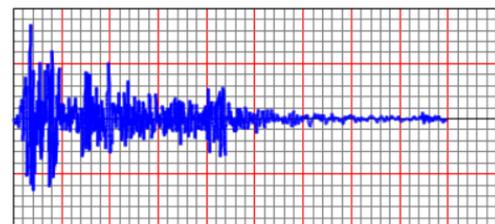


Figura 5. Sismo El Centro

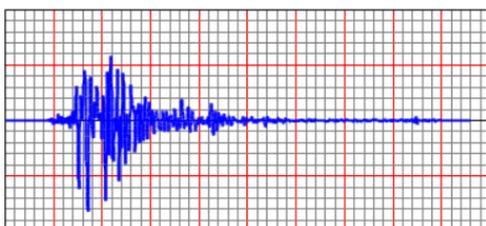


Figura 6. Sismo Kobe

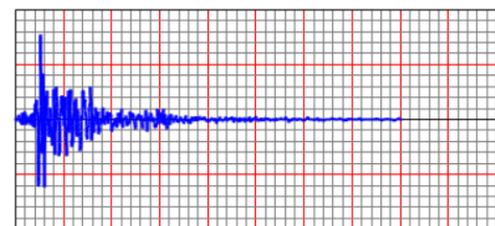


Figura 7. Sismo Loma Prieta



### 3.2. sismos considerados nas análises

O estudo comparativo sobre a eficiência dos dois tipos distintos de dispositivos de controle foi realizado excitando as estruturas com três sismos diferentes: o sismo El Centro (1940) na Figura 5, com pico de cerca de 0,35g, o sismo Kobe (1995) na Figura 6, com pico de cerca de 0,58g e o sismo Loma Prieta (1989) na Figura 7, com pico de cerca de 0,63g.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. estudo paramétrico

Um estudo paramétrico foi realizado visando a obtenção das melhores propriedades dos atenuadores. Para a edificação de 5 pavimentos foi fixada a rigidez dos dois tipos de atenuadores, como igual à rigidez axial da haste de apoio dos mesmos, no valor de 189705,1 kN/m, ou seja, a rigidez axial similar às das vigas da estrutura, e variada a força de resposta no atenuador por atrito e o coeficiente de amortecimento no viscoelástico. Na edificação de 20 pavimentos, a rigidez do atenuador por atrito foi mantida em 189705,1 kN/m, porém a do viscoelástico reduzida para 18970,51 kN/m (10% da primeira) e executadas as mesmas variações (força de resposta e coeficiente de amortecimento). Nas Figuras 8 a 11 são apresentados os gráficos dos deslocamentos de topo das estruturas em função da força de resposta (dispositivo por atrito) e do coeficiente de amortecimento (dispositivo viscoelástico) visando a obtenção das capacidades ótimas (em linha tracejada vertical), a quais são descritas para as duas estruturas nas Tabelas 4 e 5.

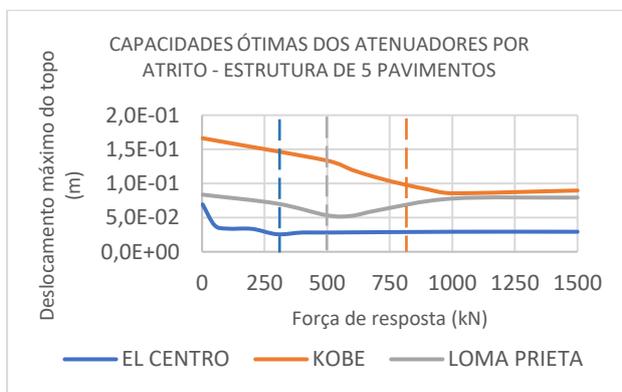


Figura 8. Dispositivo por atrito - Deslocamentos de topo da estrutura de 5 pavimentos em função da força de resposta

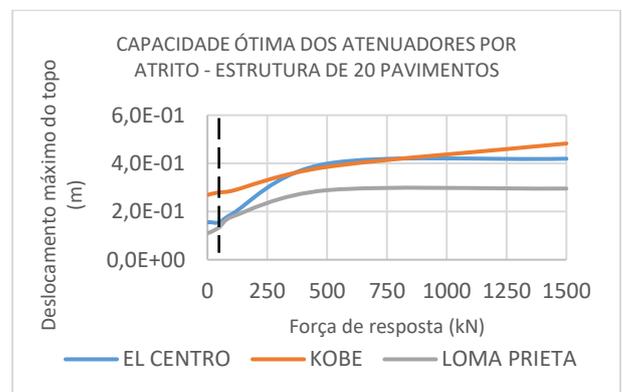


Figura 9. Dispositivo por atrito - Deslocamentos de topo da estrutura de 20 pavimentos em função da força de resposta

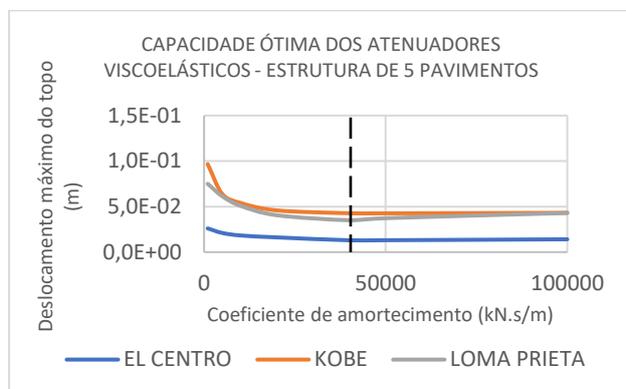


Figura 10. Dispositivo viscoelástico - Deslocamentos de topo da estrutura de 5 pavimentos em função do coeficiente de amortecimento

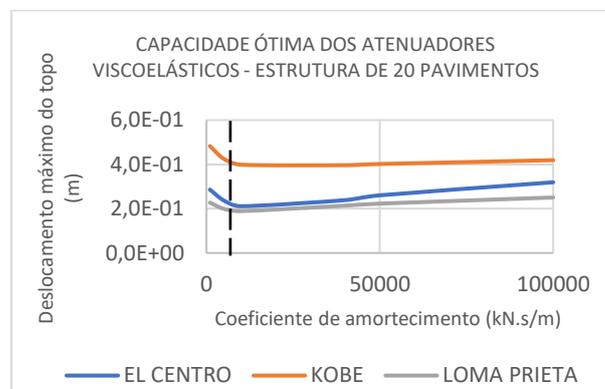


Figura 11. Dispositivo viscoelástico - Deslocamentos de topo da estrutura de 20 pavimentos em função do coeficiente de amortecimento

#### 4.2. Deslocamentos máximos de topo da estrutura com controle

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos na modelagem numérica no SAP200 para os deslocamentos de topo das estruturas aperticadas, sob ação dos três sismos, considerando a capacidade ótima dos atenuadores para cada sismo. As respostas obtidas mostram a eficiência dos atenuadores em praticamente em todos os casos, apresentando reduções de deslocamento entre 10% e 93%, exceto pelo atenuador viscoelástico acoplado na estrutura mais alta quando excitada pelo sismo de Kobe, o qual não apresentou redução, ao contrário, houve um suave aumento do deslocamento no topo. Comparando os dois tipos de atenuadores para a mesma estrutura, os dispositivos por atrito se mostraram mais eficientes na estrutura de mais pavimentos, enquanto o viscoelástico na de menos pavimentos. As Figuras 12 e 13 ilustram esta situação em dois casos de melhor eficiência: 20 pavimentos, El Centro, por atrito e 5 pavimentos, Kobe, viscoelástico.

Tabela 4. Capacidades ótimas dos atenuadores por atrito em função do sismo e da estrutura

CAPACIDADE ÓTIMA DOS ATENUADORES POR ATRITO E DESLOCAMENTOS DE TOPO DAS ESTRUTURAS									
	EL CENTRO			KOBE			LOMA PRIETA		
	força de resposta (kN)	deslocamento máximo do topo (m)	redução	força de resposta (kN)	deslocamento máximo do topo (m)	redução	força de resposta (kN)	deslocamento máximo do topo (m)	redução
ESTRUTURA DE 5 PAVIMENTOS (A1)	sem controle	0,158		sem controle	0,599		sem controle	0,145	
	300	0,026	84%	800	0,099	83%	500	0,053	63%
ESTRUTURA DE 20 PAVIMENTOS (B1)	sem controle	0,337		sem controle	0,299		sem controle	0,243	
	2	0,155	54%	2	0,269	10%	2	0,111	54%

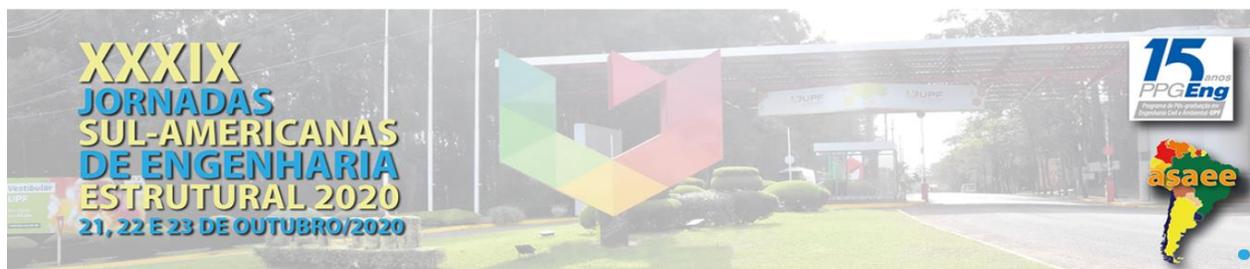


Tabela 5. Capacidades ótimas dos atenuadores viscoelásticos em função do sismo e da estrutura

CAPACIDADE ÓTIMA DOS ATENUADORES VISCOELÁSTICOS E DESLOCAMENTOS DE TOPO DAS ESTRUTURAS									
	EL CENTRO			KOBE			LOMA PRIETA		
	coeficiente de amortecimento (kN.s/m)	deslocamento máximo do topo (m)	redução	coeficiente de amortecimento (kN.s/m)	deslocamento máximo do topo (m)	redução	coeficiente de amortecimento (kN.s/m)	deslocamento máximo do topo (m)	redução
ESTRUTURA DE 5 PAVIMENTOS (A2)	sem controle	0,158		sem controle	0,599		sem controle	0,145	
	40000	0,013	92%	40000	0,043	93%	40000	0,035	76%
ESTRUTURA DE 20 PAVIMENTOS (B2)	sem controle	0,337		sem controle	0,299		sem controle	0,243	
	10000	0,211	37%	10000	0,399	não	10000	0,189	22%

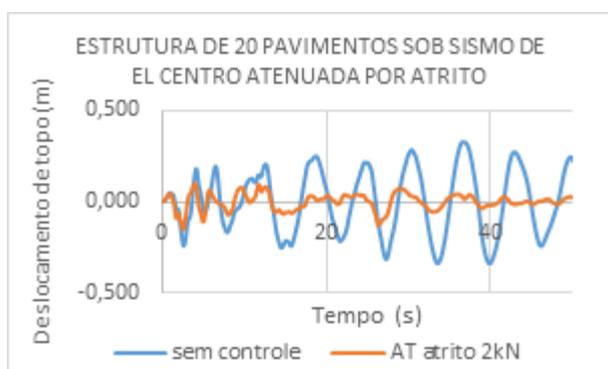


Figura 12. Deslocamentos de topo da estrutura de 20 pavimentos sob o sismo de El Centro atenuada por atrito.

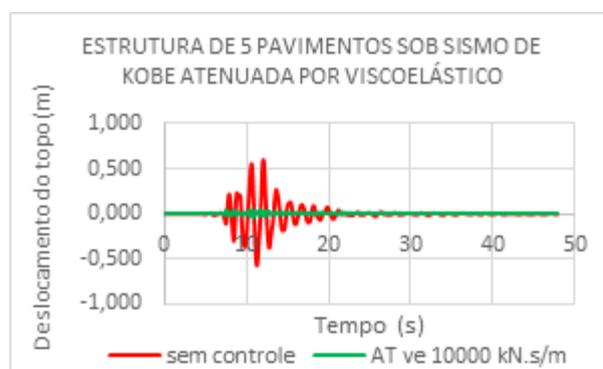


Figura 13. Deslocamentos de topo da estrutura de 5 pavimentos sob o sismo de Kobe atenuada por viscoelástico.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho demonstrou a eficiência de atenuadores (amortecedores) de vibração por atrito e viscoelásticos utilizados como sistema de controle de deslocamentos em duas estruturas, uma de 5 andares e outra com 20 andares, ambas com pavimentos com dimensões de 10 metros de vão e altura de 4 metros, submetidas à ação de três sismos, El Centro, Kobe e Loma Prieta, tendo sido alcançada uma redução entre 10% e 93% na resposta dinâmica de deslocamento de topo destes. A exceção ocorreu somente na estrutura de maior quantidade de pavimentos atenuada pelo dispositivo viscoelástico, o qual ampliou suavemente os deslocamentos de topo. Ao se comparar os dois tipos de atenuadores para uma mesma estrutura, os dispositivos por atrito se mostraram mais eficientes na estrutura de mais pavimentos, enquanto o viscoelástico na de menos pavimentos.

## REFERÊNCIAS

- Andrade, E. J. P. (2016). Modelagem matemático-numérica da interação solo-estaca-isolador-estrutura de edificação submetida à ação sísmica. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil.
- Chopra A. K., (1995). Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, USA.



Clough, R. W. e Penzien J., (2003). Dynamics of Structures. Computer e Structures, INC, Berkeley, USA.

CSI (2017). CSI Analysis Reference Manual. Computer e Structures, INC, USA.

Miguel, L.F.F. e Riera, J.D. (2008). Controle de vibrações de estruturas utilizando amortecedores por atrito. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 8(1), p. 57-70.

Wen, Y.K. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. Proc. ASCE J. Eng. Mech., 12, p.249–263.