

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AMORTECEDORES VISCOSOS PARA CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE UMA ESTRUTURA
SUBMETIDA A EVENTOS SÍSMICOS REAIS E ARTIFICIAIS

por

Naelzo Machado

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2015.

AMORTECEDORES VISCOSOS PARA CONTROLE DE VIBRAÇÃO DE UMA ESTRUTURA
SUBMETIDA A EVENTOS SÍSMICOS REAIS E ARTIFICIAIS

por

Naelzo Machado

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof.^a Leticia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 23 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

À minha orientadora, prof.^a Letícia Fleck Fadel Miguel, pela dedicação, paciência e sabedoria.

Aos meus pais Nelzo e Vera, pelo apoio que sempre conseguiram me dar, pelo incentivo, amor e dedicação.

Ao meu irmão Nelzo Jr, por sempre me apoiar e me conduzir aos caminhos certos.

Aos amigos, quem sempre proporcionaram momentos de diversão.

Machado, N. **Amortecedores Viscosos para Controle de Vibração de uma Estrutura Submetida a Eventos Sísmicos Reais e Artificiais**. 2015. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo referente ao uso de amortecedores viscosos para controle de vibrações em estruturas submetidas a eventos sísmicos. Para esta análise, uma rotina computacional em Matlab foi desenvolvida, obtendo inicialmente as frequências naturais da estrutura. Num segundo momento, o método numérico das diferenças finitas foi empregado para integração da equação do movimento, encontrando respostas da estrutura em termos de deslocamento, velocidade e aceleração considerando o seu amortecimento próprio e os amortecedores viscosos instalados. Os resultados encontrados antes e após a instalação dos amortecedores foram comparados e observou-se que a estrutura teve uma redução significativa na sua resposta dinâmica para os dois sismos reais considerados. Também foi gerado um sismo através do espectro de Kanai-Tajimi, a fim de solicitar a estrutura perto da sua primeira frequência natural. Neste caso a estrutura também foi analisada com seu amortecimento próprio e com a presença de amortecedores viscosos, mostrando um ótimo desempenho dos amortecedores provocando uma grande redução nos deslocamentos, velocidades e acelerações da estrutura. Com isso, mostrou-se que a rotina computacional desenvolvida foi capaz de determinar a resposta dinâmica da estrutura e foi possível comprovar que os amortecedores viscosos possuem um grande poder de dissipação de energia, controlando as vibrações.

PALAVRAS-CHAVE: Amortecedor Viscoso, Método das Diferenças Finitas, Vibrações, Espectro de Kanai-Tajimi.

Machado, N. **Viscous Dampers for Vibration Control of a Structure Subjected to Real and Artificial Seismic Events**. 2015. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This paper presents a study concerning the use of viscous dampers for vibration control in structures subjected to seismic events. For this analysis, a computational routine in Matlab was developed initially obtaining the natural frequencies of the structure. Secondly, the numerical finite difference method was used for the movement equation integration, finding responses for the structure in terms of displacement, velocity and acceleration considering its own damping and installed viscous dampers. The results before and after installation of the dampers were compared and it was noted that the structure had a significant reduction in their dynamic response for both real seismic considered. An earthquake was also generated by Kanai-Tajimi spectrum in order to apply the structure near its first natural frequency. In this case the structure was also analyzed with its own damping and the presence of viscous dampers, showing optimal performance of the dampers, causing a great reduction in the displacements, velocities and accelerations of the structure. Thus, it was shown that the computational routine has been able to determine the dynamic response of the structure and it was proved that viscous dampers have a great power of energy dissipation by controlling the vibrations.

KEYWORDS: Viscous Damper, Finite Difference Method, Vibration, Kanai-Tajimi Spectrum.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Sistemas passivos	1
3.2. Sistemas ativos	3
3.3. Sistemas semi-ativos	3
3.4. Sistemas híbridos	3
4. APLICAÇÕES PRÁTICAS	3
4.1. Método numérico utilizado	3
4.2. Estrutura analisada	4
4.3. Verificação do método	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
5.1. Resposta com o sismo de El Centro	7
5.2. Resposta com o sismo de Cauçete	9
5.3. Resposta com o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi	11
5.4. Resposta em termos do deslocamento relativo entre andares (<i>Drift</i>)	13
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	17
APÊNDICE C	18
APÊNDICE D	19
APÊNDICE E	20

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e a necessidade de acomodação dessa população em espaços cada vez menores, a verticalização de construções torna-se uma prática muito utilizada atualmente, principalmente nos grandes centros.

Um dos problemas, de caráter imprevisível, enfrentados na hora do projeto de construções esbeltas, são os abalos sísmicos. Segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, a atividade sísmica no Brasil não pode ser negligenciada. O maior terremoto registrado no Brasil ocorreu em 1955 e teve seu epicentro a 370km ao norte de Cuiabá (MT), atingindo uma magnitude de 6,2 graus na escala Richter. A primeira vítima de abalo sísmico no Brasil ocorreu no dia 9 de setembro de 2007, quando um terremoto de 4,9 pontos na escala Richter atingiu o município de Itacarambi (MG), provocando a destruição de seis construções e causando dano em outras 75. Cabe ainda ressaltar que a cidade de Porto Alegre (RS) foi atingida por ondas sísmicas provocadas por um terremoto de 7,8 graus na escala Richter que ocorreu na Bolívia no dia 8 de junho de 1994. Em Porto Alegre esse abalo foi sentido por algumas pessoas, fazendo sacudir objetos suspensos e provocando a vibração de móveis nos andares mais altos de alguns edifícios.

Pereira et al. (2008) afirmam que o Brasil está numa região essencialmente estável, mas não livre de terremotos. Alegam também que a sismologia ainda não consegue prever com sucesso os terremotos, sendo que podem ocorrer a qualquer hora e lugar.

Seja qual for a magnitude de um evento sísmico, é importante que haja um controle de vibrações em edifícios. Esse controle tem a finalidade de proporcionar conforto em abalos sísmicos de baixa magnitude e preservar a integridade estrutural no caso de abalos de magnitude elevada, ajudando a zelar pela integridade física das pessoas. Dessa forma, percebe-se a importância do estudo de amortecedores para atenuar vibrações e sua aplicação em edificações, no contexto deste trabalho.

2. OBJETIVOS

Este trabalho visa à elaboração de uma rotina computacional utilizando o programa Matlab para a determinação da resposta dinâmica de um edifício de nove andares, discretizado em nove graus de liberdade, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, sujeita a excitações sísmicas e com controle de vibrações através de amortecedores viscosos. O método numérico de integração da equação do movimento utilizado foi o método das diferenças finitas. Após, será feita uma comparação das respostas da estrutura com e sem a utilização de amortecedores viscosos a fim de avaliar a redução dos deslocamentos, velocidades e acelerações provocados pela instalação desse tipo de amortecedor. Também será gerado um sinal sísmico por meio do espectro de Kanai-Tajimi que servirá de excitação para a estrutura. Por meio deste serão comparadas as respostas em termos de deslocamento, velocidade e aceleração com o amortecimento próprio da estrutura e com a instalação de amortecedores viscosos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentam-se alguns tipos de amortecedores de vibração dando ênfase ao amortecedor viscoso. Existem três grandes grupos de dispositivos de controle estrutural: passivo, ativo e semi-ativo.

3.1. Sistemas passivos

Chaves (2010) mostra que dentro deste grupo existem os amortecedores de massa sintonizada, usualmente chamados de TMD's ("Tuned Mass Dampers"), e os amortecedores de líquido sintonizado, também conhecidos como TLD's ("Tuned Liquid Dampers"). Os TMD's são constituídos por uma massa ligada à estrutura através de uma mola

e um amortecedor. Como o nome sugere, esse tipo de amortecedor opera de forma a amortecer o modo de vibração na frequência na qual ele foi sintonizado. Caso haja o interesse de controlar mais de um modo de vibração, surge a necessidade da instalação de tantas unidades quanto necessárias. Um bom exemplo de utilização desse amortecedor é o edifício Taipei 101, em Taiwan, como pode ser visto na Figura 3.1.

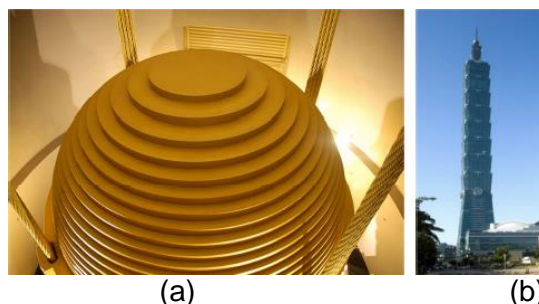


Figura 3.1 – Imagem ilustrativa do TMD do Taipei 101. Em (a) o TMD do Taipei 101. Em (b) o próprio edifício.

Os TLD's têm um comportamento muito semelhante aos TMD's, visto que são dimensionados para um determinado modo de vibração. São especialmente interessantes para funcionarem em estruturas caracterizadas por terem baixas frequências e funcionarem, como o nome sugere, com a utilização de líquido.

Também muito importantes nesse grupo de sistemas de controle de vibração são os Dissipadores de Energia Passivos, onde se enquadram os amortecedores viscosos, viscoelásticos, friccionais e metálicos. Estes amortecedores servem para problemas de Engenharia Sísmica, pois são ótimas soluções de reabilitação devido ao fato de poderem ser colocados numa estrutura já existente, terem elevada confiabilidade e um reduzido custo direto e em manutenção. A desvantagem é de só funcionarem quando a estrutura já está afetada pelas vibrações, não impedindo o movimento inicial da estrutura. Em contrapartida, há grandes vantagens da utilização de amortecedores viscosos quando comparado com outro tipo de amortecedor, como a facilidade de colocação, que é um processo altamente mecanizado, fazendo com que seu uso em estruturas venha a aumentar continuamente.

Os amortecedores viscosos são dissipadores em que é gerada uma força de amortecimento em função da velocidade relativa ou absoluta, dependendo da sua montagem (interpostos entre dois pontos da estrutura ou fixados ao exterior). São dispositivos que conduzem a cálculos simples e a um funcionamento bastante aceitável na maioria das aplicações. Um bom exemplo de aplicação de amortecedores viscosos é o edifício da Portland State University, onde se fez a reabilitação utilizando 118 amortecedores. Quanto aos viscoelásticos, funcionam com a deformação cisalhante de um material viscoelástico numa montagem tipo "sanduiche". Na Figura 3.2 pode ser visto um par de amortecedores viscosos instalados numa estrutura.



Figura 3.2 – Amortecedores viscosos instalados numa estrutura.

3.2. Sistemas ativos

Moutinho (2007) comenta que apesar da elevada eficiência apresentada por dispositivos deste gênero no controle de vibrações, apresentam custos elevados e um menor grau de confiabilidade do que sistemas passivos. Embora se conheçam alguns sistemas de controle de funcionamento ativo que podem ser adaptados em pórticos de edifícios ou estruturas em geral, tais como diagonais ou cabos ativos, a grande parte das aplicações centra-se na utilização de AMD's ("Active Mass Dampers"), porque estes têm a vantagem de poderem ser adaptados nas seções onde os principais modos de vibração têm componentes modais significativas, como por exemplo, no topo do edifício.

3.3. Sistemas semi-ativos

Moutinho (2007) descreve que os sistemas de controle semi-ativos encontram-se em grande desenvolvimento pelo fato de constituírem uma solução intermediária entre os sistemas passivos e ativos, superando algumas fragilidades dos sistemas passivos. Os sistemas semi-ativos podem ser encarados também como sistemas "passivos inteligentes" na medida em que baseiam a ação de controle no efeito da dissipação de energia através de mecanismos semelhantes aos sistemas passivos, como por exemplo, através de amortecedores viscosos.

Chaves (2010) comenta que existem quatro tipos de amortecedores dentro desse grupo: dispositivos de rigidez variável, amortecedores de atrito variável, amortecedores viscosos de orifício variável e amortecedores de viscosidade variável. Seus princípios de funcionamento não serão descritos por não serem o foco deste trabalho.

3.4. Sistemas híbridos

Chaves (2010) menciona que este tipo de sistema combina sistemas passivos com sistemas ativos. Nesse grupo os mais conhecidos são os HMD's ("Hybrid Mass Dampers") que fazem a combinação de TMD's com sistemas ativos, através da exploração do efeito passivo dos TMD's e a implementação de um sistema ativo paralelo que aumenta o desempenho do aparelho, aumentando o movimento da massa passiva e aumentando a robustez do dispositivo face a problemas de sintonização.

4. APLICAÇÕES PRÁTICAS

No presente capítulo ilustra-se a utilização de amortecedores viscosos num edifício metálico de nove pavimentos submetido a duas excitações sísmicas reais. Primeiramente, considera-se a estrutura sem dissipadores de energia externo, apenas com seu amortecimento próprio. Num segundo momento obtém-se a resposta do edifício após a instalação de amortecedores viscosos. Para esta finalidade, foi desenvolvido um programa computacional em Matlab.

Miguel (2002) apresentou um estudo teórico e experimental sobre o uso de amortecedores de vibração por atrito, projetando e ensaiando diferentes modelos de amortecedores aplicados a um edifício submetido a eventos sísmicos. Com a elaboração de programas computacionais verificou-se que a resposta máxima da estrutura é consideravelmente reduzida após a instalação dos amortecedores de vibração por atrito.

4.1. Método numérico utilizado

Miguel (2006) comenta que o método das diferenças finitas é o método de integração explícito mais utilizado para resolver problemas dinâmicos. Portanto, será implementado neste trabalho.

A equação de movimento do sistema é dada por:

$$[\mathbf{M}]\ddot{\vec{x}} + [\mathbf{C}]\dot{\vec{x}} + [\mathbf{K}]\vec{x} = \vec{F}_{exc} \quad (4.1)$$

onde $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ e $[\mathbf{K}]$ são as matrizes de massa, amortecimento (de Rayleigh) e rigidez, respectivamente, \vec{x} o vetor deslocamento e \vec{F}_{exc} a força de excitação.

Pelo método das diferenças finitas sabe-se que:

$$\ddot{\vec{x}}(t_i) = \frac{1}{\Delta t^2} [\vec{x}(t_{i+1}) - 2\vec{x}(t_i) + \vec{x}(t_{i-1})] \quad (4.2)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_i) = \frac{\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_{i-1})}{2\Delta t} \quad (4.3)$$

onde Δt é o intervalo de tempo num passo de tempo i .

Substituindo as equações (4.3) e (4.2) em (4.1), no passo de tempo i , se obtém os deslocamentos no passo de tempo seguinte (em $i + 1$).

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C}\right) \vec{x}(t_{i+1}) = \vec{F}_{exc}(t_i) - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M}\right) \vec{x}(t_i) - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C}\right) \vec{x}(t_{i-1}) \quad (4.4)$$

Então, resolvendo-se a expressão (4.4), encontram-se os valores de $\vec{x}(t_{i+1})$, os quais são utilizados para calcular os valores dos vetores velocidade $\dot{\vec{x}}(t_i)$ e aceleração $\ddot{\vec{x}}(t_i)$.

Observa-se que para o primeiro passo, caso em que $i = 0$, deve-se obter o valor do vetor deslocamento $\vec{x}(t_{-1})$ para poder calcular $\vec{x}(t_1)$, dado pela seguinte expressão:

$$\vec{x}(t_{-1}) = \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\vec{x}}(t_0) - \Delta t \dot{\vec{x}}(t_0) + \vec{x}(t_0) \quad (4.5)$$

O vetor aceleração $\ddot{\vec{x}}(t_0)$ pode ser calculado a partir da equação do movimento:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = \mathbf{M}^{-1} [\vec{F}_{exc}(t_0) - \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t_0) + \mathbf{K}\vec{x}(t_0)] \quad (4.6)$$

Para que a estabilidade seja assegurada, o intervalo de integração Δt deve ser menor que um valor crítico, definido por:

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{nn}} \quad (4.7)$$

onde ω_{nn} é a correspondente maior frequência natural.

O intervalo de integração Δt utilizado neste trabalho foi de 0,005s, pois além de ser menor que o intervalo de tempo crítico, é menor que o intervalo de tempo dos sismos, que é de 0,02s.

4.2. Estrutura analisada

A estrutura escolhida para analisar é um edifício metálico de nove pavimentos que foi discretizado em nove graus de liberdade para facilitar a análise. Essa é uma modelagem muito utilizada para estruturas esbeltas, onde a cada pavimento é associada uma massa e uma rigidez. O pórtico representativo do edifício, juntamente com seu modelo discretizado, pode ser visto na Figura 4.1.

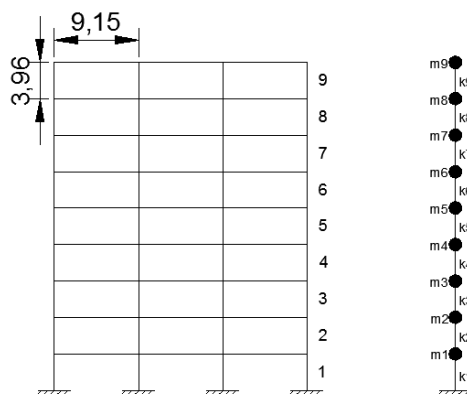


Figura 4.1 – Pórtico discretizado em nove graus de liberdade (dimensões em metros).

Na Tabela 4.1 apresentam-se as propriedades da estrutura analisada. A razão de amortecimento considerado na estrutura foi de 0,5%, ou seja, $\zeta=0,005$.

Tabela 4.1 – Propriedades da estrutura.

Andar	Seção (viga tipo I)	Massa (kg)	Área da seção (m ²)	Altura (m)	Rigidez total do andar (N/m)
1	W36 x 160	103017,33	0,03030	3,96	9,89E+08
2	W36 x 160	103017,33	0,03030	3,96	9,89E+08
3	W36 x 135	103017,33	0,02560	3,96	7,90E+08
4	W36 x 135	103017,33	0,02560	3,96	7,90E+08
5	W36 x 135	103017,33	0,02560	3,96	7,90E+08
6	W36 x 135	103017,33	0,02560	3,96	7,90E+08
7	W30 x 99	103017,33	0,18800	3,96	4,04E+08
8	W27 x 84	103017,33	0,01600	3,96	2,89E+08
9	W24 x 68	103017,33	0,01300	3,96	1,85E+08

Em seguida é analisada a resposta dinâmica da estrutura submetida às mesmas excitações sísmicas com a utilização de amortecedores viscosos, dispostos conforme mostra na Figura 4.2.

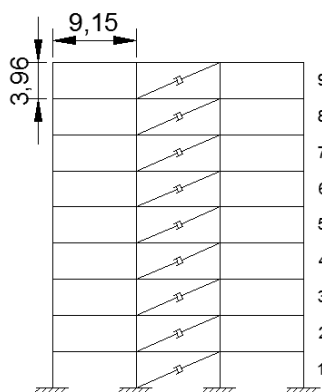


Figura 4.2 – Posição dos nove amortecedores viscosos ao longo da estrutura (dimensões em metros).

No caso de estruturas com amortecedores viscosos instalados, este deve ser levado em consideração na equação do movimento, resultando:

$$[M]\ddot{\vec{x}} + [C]\dot{\vec{x}} + [K]\vec{x} + \vec{F}_{av} = \vec{F}_{exc} \quad (4.8)$$

onde \vec{F}_{av} é a força exercida pelo amortecedor viscoso, dado por:

$$\vec{F}_{av} = c v_{ij} \quad (4.9)$$

onde c é o coeficiente de amortecimento viscoso de cada amortecedor, em Ns/m e v_{ij} é a velocidade relativa entre as duas extremidades do amortecedor, em m/s, onde i e j representam graus de liberdade consecutivos.

4.3. Verificação do método

De forma a verificar a rotina computacional desenvolvida em Matlab, um sistema, cuja solução analítica é conhecida, foi testado no programa. O sistema utilizado para comparação da solução numérica com a analítica foi o sistema massa-mola-amortecedor de 4 graus de liberdade excitado por forças harmônicas, apresentado por Miguel (2006), exercício 7 (página 133), nas mesmas condições apresentadas pela autora, ilustrado na Figura 4.3.

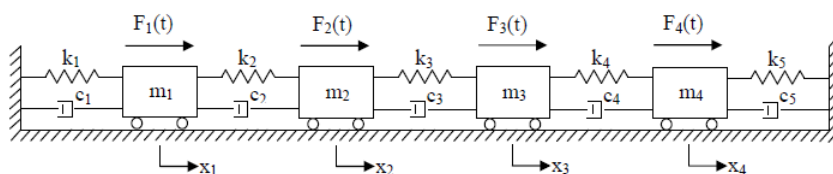


Figura 4.3 – Modelo de 4 graus de liberdade testado para validação do programa.

Miguel (2006) apresenta a solução analítica em forma matricial para vibrações em sistemas de vários graus de liberdade excitados por forças harmônicas.

$$\begin{bmatrix} (-M\omega^2 + K) & -C\omega \\ C\omega & (-M\omega^2 + K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{A} \\ \vec{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{F}_A \\ \vec{F}_B \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Resolvendo o sistema obtêm-se os valores de \vec{A} e \vec{B} com os quais fica determinada a resposta.

$$\vec{x}(t) = \vec{A} \sin(\omega t) + \vec{B} \cos(\omega t) \quad (4.11)$$

Na Tabela 4.2 é apresentado um comparativo dos resultados obtidos pelo modelo analítico e pelo programa computacional elaborado em Matlab, para o tempo de 5s.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos pelo modelo analítico e pelo programa computacional.

	ANALÍTICO			PROGRAMA			Diferenças		
	x (m)	v (m/s)	a (m/s ²)	x (m)	v (m/s)	a (m/s ²)	x	v	a
GDL 1	-0,5160	0,4124	12,9005	-0,5162	0,4266	12,9068	0,04%	3,44%	0,05%
GDL 2	-0,0438	-0,4434	1,0945	-0,0437	-0,4668	1,0964	0,23%	5,28%	0,17%
GDL 3	-0,7969	-0,9470	19,9219	-0,7992	-0,9157	19,9825	0,29%	3,31%	0,30%
GDL 4	0,4335	0,7741	-10,8373	0,4364	0,7662	-10,9082	0,67%	1,02%	0,65%

Conforme observado, a rotina computacional em Matlab apresentou valores muito próximos dos encontrados pela resposta analítica do sistema de 4 graus de liberdade, obtendo erros de magnitude desprezível. Na Figura 4.4 é apresentado o gráfico comparativo de resposta em termos do deslocamento para a resposta analítica e pela rotina computacional.

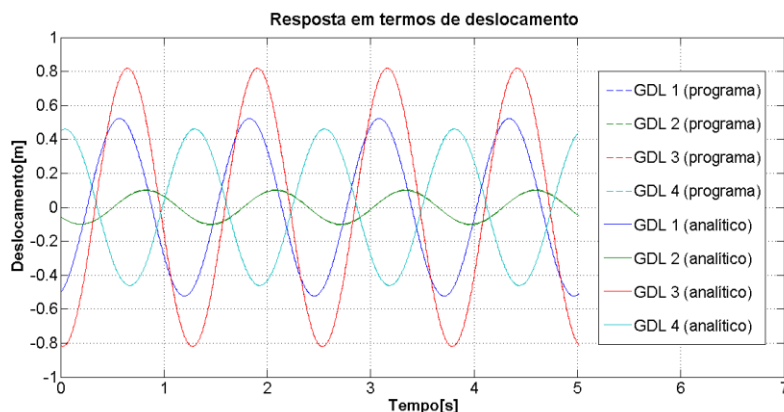


Figura 4.4 – Gráfico da resposta em termos de deslocamento do modelo de validação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como primeiro resultado, após executar o programa desenvolvido em Matlab, podem ser obtidas as frequências naturais da estrutura obtidas através do cálculo dos autovalores da matriz dinâmica. Como a estrutura possui 9 graus de liberdade, terá 9 frequências naturais, dadas por: $f_1 = 2,2595$, $f_2 = 5,3478$, $f_3 = 8,8937$, $f_4 = 11,6456$, $f_5 = 14,7212$, $f_6 = 17,6922$, $f_7 = 22,0784$, $f_8 = 25,8164$ e $f_9 = 27,9858$, todas em Hz.

Em seguida é analisada a resposta dinâmica da estrutura submetida a dois eventos sísmicos reais, o sismo de El Centro, ocorrido na Califórnia, Estados Unidos, em 1940 e o sismo de Cauçete, ocorrido em San Juan, Argentina, em 1977.

5.1. Resposta com o sismo de El Centro

A primeira excitação considerada foi o sismo de El Centro, cujo acelerograma pode ser visto na Figura 5.1.

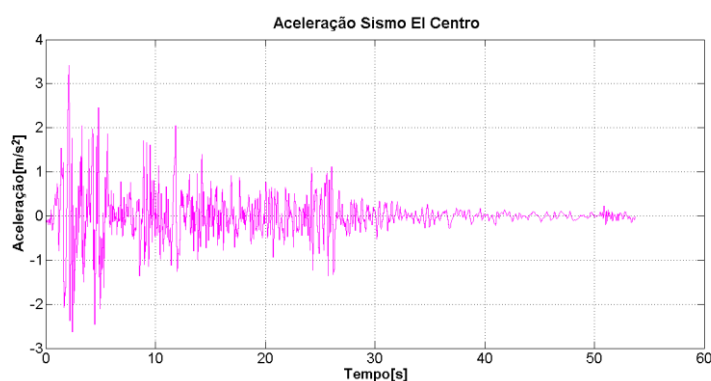


Figura 5.1 – Acelerograma do sismo de El Centro.

Como mencionado anteriormente, a estrutura foi analisada primeiramente apenas com seu amortecimento próprio e em seguida foi analisada sua resposta após a instalação de amortecedores viscosos. A Figura 5.2 mostra a variação do deslocamento máximo no topo do edifício em função do coeficiente de amortecimento viscoso dos nove

amortecedores. Foi-se variando o coeficiente de amortecimento e obtendo resultados para o deslocamento máximo no topo do edifício.

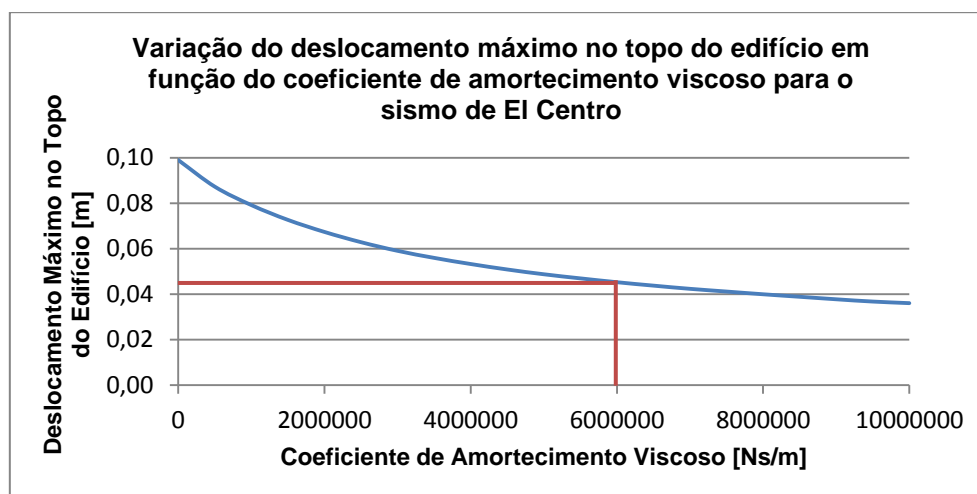


Figura 5.2 – Deslocamento máximo no topo do edifício em função do coeficiente de amortecimento viscoso dos nove amortecedores para o sismo de El Centro.

Considerou-se que a partir do valor de coeficiente de amortecimento viscoso de 6×10^6 Ns/m não houve mudança significativa nas diferenças do deslocamento máximo no topo do edifício, sendo esse o valor adotado para dimensionamento do amortecedor viscoso.

Na Figura 5.3 é apresentada a resposta em termos de deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos de coeficiente de amortecimento viscoso igual a 6×10^6 Ns/m, para o sismo de El Centro.

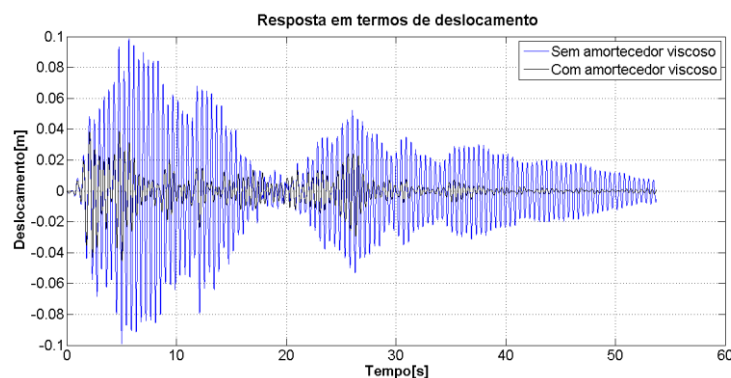


Figura 5.3 – Resposta em termos de deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de El Centro.

Os gráficos das respostas em termos da velocidade e aceleração para o sismo de El Centro podem ser vistos no Apêndice A.

Pode-se observar, para o sismo de El Centro, uma significativa redução da resposta dinâmica em termos de deslocamento, velocidade e aceleração depois da colocação dos nove dissipadores de energia comparada com a resposta obtida apenas com o amortecimento próprio da estrutura.

Na Tabela 5.1 é feita uma comparação das respostas máximas de deslocamento, velocidade e aceleração obtidas para o nono andar do edifício para amortecedores viscosos, com os resultados obtidos por outros autores, analisando a mesma estrutura, com as mesmas propriedades e submetidas ao mesmo sismo, referentes ao uso de amortecedores de vibração por atrito e amortecedor de massa sintonizada (TMD).

Tabela 5.1 – Comparação dos resultados máximos obtidos considerando amortecedor viscoso com amortecedor de vibração por atrito e amortecedor de massa sintonizada, para o sismo de El Centro.

	Amortecedor de Vibração por Atrito (Nunes, 2013)		Amortecedor de Massa Sintonizada (Kronbauer, 2013)		Amortecedor Viscoso	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Deslocamento [m]	0,0988	0,0495	0,1090	0,0650	0,0990	0,0453
Velocidade [m/s]	1,2500	0,5500	1,6740	0,8360	1,4188	0,5963
Aceleração [m/s²]	19,7400	12,7200	26,6950	16,9300	23,2847	10,5565
Redução deslocamento	49,90%		40,37%		54,24%	
Redução velocidade	56,00%		50,06%		57,97%	
Redução aceleração	35,56%		36,58%		54,66%	

Conforme visto, as respostas dinâmicas em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, referentes ao sismo de El Centro, ficaram bem próximas das encontradas pelos outros autores, quando analisadas sem a presença de amortecedores na estrutura. Cabe ressaltar que a resposta do sistema depende do método numérico utilizado para resolução, bem como do intervalo de integração adotado.

Pode-se observar também que o uso de amortecedores viscosos apresentou desempenho melhor comparados aos demais no que diz respeito ao deslocamento, apresentando uma redução de 54,24%, enquanto que o amortecedor de vibração por atrito apresentou uma redução de 49,90% e o amortecedor de massa sintonizada 40,37%. Com relação à velocidade, o amortecedor viscoso apresentou desempenho similar ao amortecedor de vibração por atrito, mostrando uma redução por volta dos 57%, contra 50,06% de redução do amortecedor de massa sintonizada. Com relação à aceleração, o amortecedor viscoso apresentou desempenho superior, com uma redução de 54,66%, frente a uma redução de aproximadamente 36% para os demais amortecedores.

5.2. Resposta com o sismo de Cauçete

A segunda excitação considerada foi o sismo de Cauçete, com seu respectivo acelerograma apresentado na Figura 5.4.

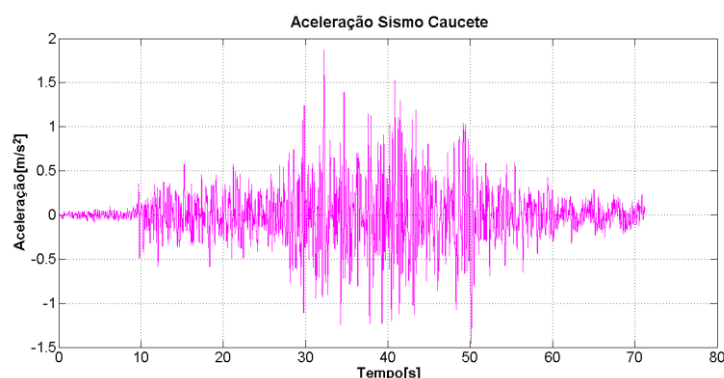


Figura 5.4 – Acelerograma do sismo de Cauçete.

Conforme feito anteriormente, foi-se variando o coeficiente de amortecimento viscoso e obtendo resultados para o deslocamento máximo no topo do edifício, como mostra na Figura 5.5.

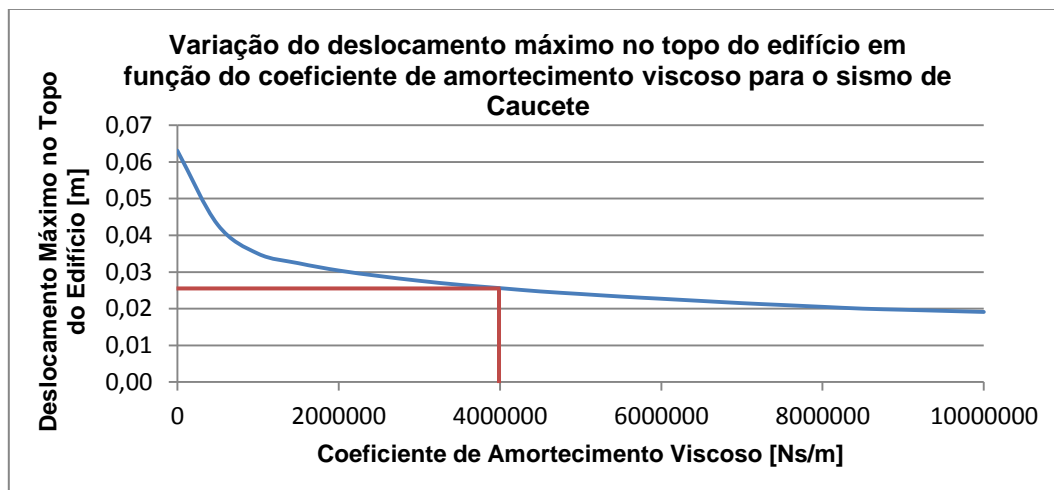


Figura 5.5 – Deslocamento máximo no topo do edifício em função do coeficiente de amortecimento viscoso dos nove amortecedores para o sismo de Cauçete.

Com o mesmo critério adotado no sismo de El Centro, o valor do coeficiente de amortecimento viscoso para o sismo de Cauçete é de 4×10^6 Ns/m.

Na Figura 5.6 é apresentada a resposta em termos de deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos de coeficiente de amortecimento viscoso igual a 4×10^6 Ns/m, para o sismo de Cauçete.

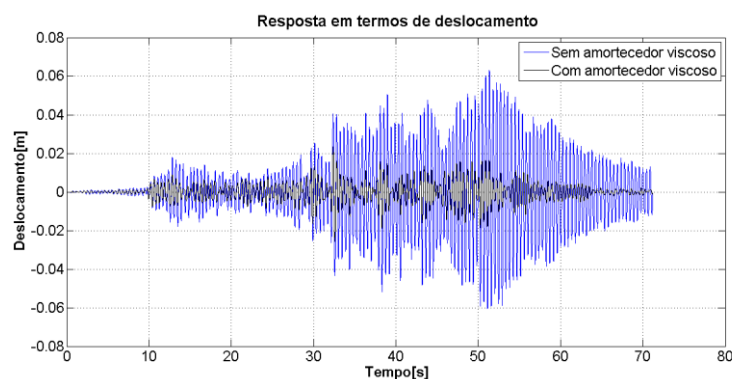


Figura 5.6 – Resposta em termos de deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de Cauçete.

Os gráficos das respostas em termos da velocidade e aceleração para o sismo de Cauçete podem ser vistos no Apêndice B.

Pode-se observar, também para o sismo de Cauçete, uma significativa redução da resposta dinâmica em termos de deslocamento, velocidade e aceleração depois da colocação dos nove dissipadores de energia comparada com a resposta obtida apenas com o amortecimento próprio da estrutura.

Na Tabela 5.2 novamente é feita uma comparação das respostas máximas de deslocamento, velocidade e aceleração obtidas para o nono andar do edifício considerando amortecedores viscosos, com os resultados obtidos por outros autores, analisando a mesma estrutura, com as mesmas propriedades e submetidas ao mesmo sismo, referentes ao uso de amortecedores de vibração por atrito e amortecedor de massa sintonizada.

Tabela 5.2 – Comparação dos resultados máximos obtidos do amortecedor viscoso com amortecedor de vibração por atrito e amortecedor de massa sintonizada, para o sismo de Cauçete.

	Amortecedor de Vibração por Atrito (Nunes, 2013)		Amortecedor de Massa Sintonizada (Kronbauer, 2013)		Amortecedor Viscoso	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Deslocamento [m]	0,0623	0,0289	0,0460	0,0223	0,0631	0,0256
Velocidade [m/s]	0,8100	0,3500	0,7866	0,3174	0,9403	0,3656
Aceleração [m/s²]	12,7900	5,3300	14,2362	5,0142	14,4570	5,3860
Redução deslocamento	53,61%		51,52%		59,43%	
Redução velocidade	56,79%		59,65%		61,12%	
Redução aceleração	58,33%		64,78%		62,74%	

Conforme visto, as respostas dinâmicas em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, referentes ao sismo de Cauçete, também ficaram bem próximas das encontradas pelos outros autores, quando analisadas sem a presença de amortecedores na estrutura. Cabe ressaltar que a resposta do sistema depende do método numérico utilizado para resolução, bem como do intervalo de integração adotado.

É possível observar também que o uso de amortecedores viscosos apresentou uma redução no deslocamento de 59,43%, um pouco superior comparado com o amortecedor de vibração por atrito, 53,61%, e amortecedor de massa sintonizado, 51,52%. Com relação à velocidade o amortecedor viscoso apresentou uma redução de 61,12%, não fugindo muito da redução encontrada pelos outros dois tipos de amortecedores. Com relação à aceleração, o amortecedor de massa sintonizada mostrou melhor desempenho, apresentando uma redução de 64,78%, seguido de 62,74% de redução do amortecedor viscoso e 58,33% do amortecedor de vibração por atrito.

5.3. Resposta com o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi

Um sismo artificial gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi será usado também com excitação para a estrutura. Será analisada a estrutura novamente apenas com o seu amortecimento próprio e após a instalação de amortecedores viscosos.

Schaan (2014) mostrou que a geração de um sismo pelo espectro de Kanai-Tajimi começa a partir da definição dos vetores de frequência e tempo. Neste trabalho foram adotados os mesmos vetores do autor, sendo o vetor frequência de 0 a 25Hz com um incremento de 0,01Hz e o vetor tempo de 0 a 50s com um incremento de 0,02s. Na próxima etapa é calculada a densidade espectral de potência (PSD) pelo espectro de Kanai-Tajimi, dado pela seguinte equação:

$$S(w) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\omega_g^2 \zeta_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2 \zeta_g^2 \omega^2} \right] \quad (4.11)$$

onde

$$S_0 = \frac{0,03 \zeta_g}{\pi \omega_g (4 \zeta_g^2 + 1)} \quad (4.12)$$

sendo S_0 a densidade espectral constante, ζ_g o amortecimento do solo e ω_g a frequência do solo. O amortecimento do solo implementado neste trabalho foi de 0,3 e a frequência escolhida foi de 12,56rad/s (2Hz), valor próximo da primeira frequência natural do edifício.

A seguir, é resolvido o método para simulação do processo aleatório, proposto por Shinozuka e Jan (1972), dado pela equação:

$$\ddot{y}(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_w(f_k)\Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (4.13)$$

onde f é a frequência, Δf é o incremento de frequência e ϕ é o ângulo de fase, que é uma variável aleatória que varia entre 0 e 2π .

Por fim, é obtida a aceleração do solo gerada pelo espectro de Kanai-Tajimi em função do tempo, normalizando e multiplicando o vetor com todos os valores do sinal gerado pelo valor de pico de aceleração do solo (PGA, *Peak Ground Acceleration*), que foi assumindo como sendo 0,35g.

Deve-se ressaltar que os valores relativos a parâmetros do solo (ζ_g , ω_g e PGA) dependem das condições do terreno onde a estrutura será construída e são fornecidos em normas para projetos sísmo-resistentes.

No Apêndice C é apresentado o gráfico do espectro de Kanai-Tajimi. Na Figura 5.7 é mostrado o acelerograma gerado a partir do espectro.

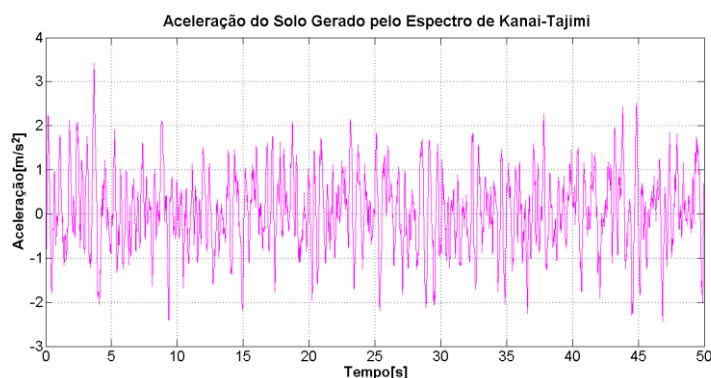


Figura 5.7 – Acelerograma do sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

A Figura 5.8 mostra a variação do deslocamento máximo no topo do edifício em função do coeficiente de amortecimento viscoso dos nove amortecedores. Como feito para os sísmos de El Centro e Caucete, foi-se variando o coeficiente de amortecimento e obtendo resultados para o deslocamento máximo no topo do edifício.

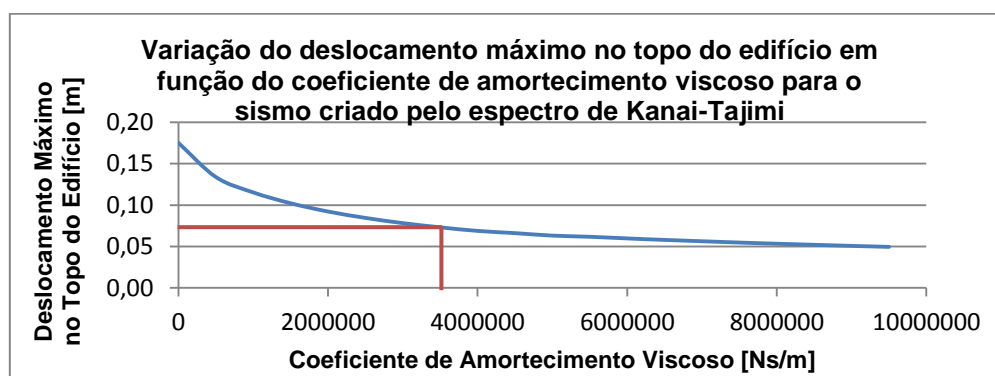


Figura 5.8 – Deslocamento máximo no topo do edifício em função do coeficiente de amortecimento viscoso dos nove amortecedores para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

Com o mesmo critério adotado no sismo de El Centro, o valor do coeficiente de amortecimento viscoso para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi é de $3,5 \times 10^6$ Ns/m.

Na Figura 5.9 é apresentada a resposta em termos de deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos de coeficiente de amortecimento viscoso igual a $3,5 \times 10^6 \text{Ns/m}$, para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

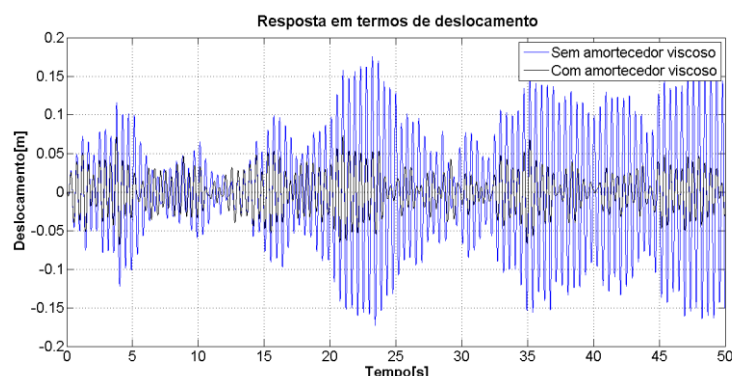


Figura 5.9 – Resposta em termos do deslocamento no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

Os gráficos das respostas em termos da velocidade e aceleração para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi podem ser vistos no Apêndice C.

É possível notar, para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi, uma significativa redução da resposta dinâmica em termos de deslocamento, velocidade e aceleração depois da colocação dos nove dissipadores de energia comparada com a resposta obtida apenas com o amortecimento próprio da estrutura. Como o sismo gerado tem características para excitar a estrutura perto de sua primeira frequência natural, a presença de amortecedores viscosos na estrutura é bastante requerida, visto que serão fundamentais para atenuar a vibração do edifício provocada por esse sismo.

Na Tabela 5.3 é apresentada a comparação dos resultados com o amortecimento próprio da estrutura (sem amortecedores) e com a presença de amortecedores viscosos.

Tabela 5.3 – Comparação dos resultados máximos obtidos com e sem a utilização de amortecedor viscoso no edifício para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

	Amortecedor Viscoso	
	Sem	Com
Deslocamento [m]	0,1753	0,0732
Velocidade [m/s]	2,4359	0,9595
Aceleração [m/s²]	35,2492	13,1736
Redução deslocamento	58,24%	
Redução velocidade	60,61%	
Redução aceleração	62,63%	

Pode-se perceber um ótimo desempenho dos amortecedores frente ao evento sísmico gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi, provocando uma redução de deslocamento, velocidade e aceleração por volta dos 60%.

5.4. Resposta em termos do deslocamento relativo entre andares (*Drift*)

Um parâmetro muito utilizado no projeto de estruturas sísmo-resistentes são os valores de “*drift*”, que dizem respeito aos deslocamentos relativos entre andares do edifício. Normalmente as normas de projeto fixam valores máximos aceitáveis para o *drift*. Assim, a título de ilustração, na Tabela 5.4 são apresentados os valores de deslocamentos relativos

entre pavimentos (*drift*) máximos para cada andar da estrutura, quando esta é submetida ao sismo de El Centro antes e após a instalação de amortecedores viscosos.

Tabela 5.4 – Respostas máximas em termos de deslocamento nos andares e do *drift* para o sismo de El Centro.

Andar	El Centro				
	Sem amortecedores		Com amortecedores		Redução <i>drift</i>
	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	
1	0,0099	0,0099	0,0051	0,0051	48,48%
2	0,0195	0,0097	0,0099	0,0048	50,52%
3	0,0311	0,0116	0,0156	0,0057	50,86%
4	0,0417	0,0107	0,0208	0,0052	51,40%
5	0,0511	0,0096	0,0253	0,0046	52,08%
6	0,0591	0,0086	0,0292	0,0039	54,65%
7	0,0716	0,0144	0,0351	0,0062	56,94%
8	0,0859	0,0152	0,0409	0,0061	59,87%
9	0,0990	0,0137	0,0453	0,0048	64,96%

No Apêndice D podem ser vistas as tabelas de *drift* para os sismos de Cauçete e para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi, seguindo o mesmo princípio. Enquanto o Apêndice E mostra gráficos do *drift* para o nono andar da estrutura.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho cumpriu o objetivo de desenvolver uma rotina computacional para a determinação da resposta dinâmica de edifícios submetidos a excitações sísmicas e com controle de vibrações através de amortecedores viscosos.

Através da rotina computacional proposta neste trabalho foi possível determinar, além das frequências naturais da estrutura, as respostas em termos de deslocamento, velocidade, aceleração e *drift* nos diferentes andares do edifício, tanto para a estrutura sem controle de vibrações, quanto para o caso após a instalação de amortecedores viscosos. Através da variação do coeficiente de amortecimento viscoso em função do deslocamento máximo no topo do edifício foi possível estimar o parâmetro ideal do amortecedor viscoso a ser instalado.

Os resultados das análises realizadas com a rotina elaborada mostraram valores significativos de redução do deslocamento para os dois sismos reais analisados, obtendo uma redução de 54,24% para o sismo de El Centro e 59,43% para o sismo de Cauçete. Quanto à velocidade, o percentual de redução para o sismo de El Centro encontrado foi de 57,97%, enquanto que para o sismo de Cauçete foi de 61,12%. Para a aceleração, o percentual de redução para o sismo de El Centro foi de 54,66%, já para o sismo de Cauçete foi de 62,74%. Para as respostas devido ao sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi percebeu-se um ótimo desempenho dos amortecedores, provocando um percentual de redução de 58,24% para o deslocamento, 60,61% para a velocidade e 62,63% para a aceleração, uma vez que a estrutura foi excitada com um valor de frequência perto de sua primeira frequência natural, situação na qual um sistema de controle de vibrações é muito necessário. As reduções percentuais para o deslocamento relativo máximo entre andares (*drift*), após a instalação dos amortecedores viscosos, são da ordem de 58%.

Por fim, o programa computacional desenvolvido em Matlab mostrou ser uma boa ferramenta para análise dinâmica de estruturas, tanto sem quanto com sistema de controle de vibrações. Sugere-se para trabalhos futuros a elaboração de um algoritmo de otimização para a determinação do coeficiente de amortecimento viscoso ideal para os amortecedores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chaves, S. N. P. H. **“Atenuação da Resposta Sísmica de Estruturas de Edifícios Utilizando Amortecedores Viscosos”**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Julho 2010.

Kronbauer, F. **“Uso de Amortecedores de Massa Sintonizados para Redução de Vibrações em Estruturas Submetidas a Eventos Sísmicos”**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Miguel, L. F. F. **“Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibração por Atrito”**, Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Março, 2002.

Miguel, L. F. F. **“Introdução ao Estudo de Vibrações”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1ª edição, 2006.

Moutinho, C. M. R. **“Controlo de Vibrações em Estruturas de Engenharia Civil”**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Agosto 2007.

Nunes, M. T. **“Controle de Vibrações de Estruturas Utilizando Amortecedores de Vibração por Atrito”**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Pereira, R. A.; Ferreira, W. G.; Bezerra, A. D. S. **“Abalos Sísmicos no Brasil e no Mundo”**. Espírito Santo, Vitória, 2008.

Schaan, P. S. **“Geração de Excitação Sísmica Através do Espectro de Kanai-Tajimi”**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Shinozuka, M; Jan C. M. **“Digital Simulation of Random Process and its Applications”**. Journal of Sound and Vibration, 1972.

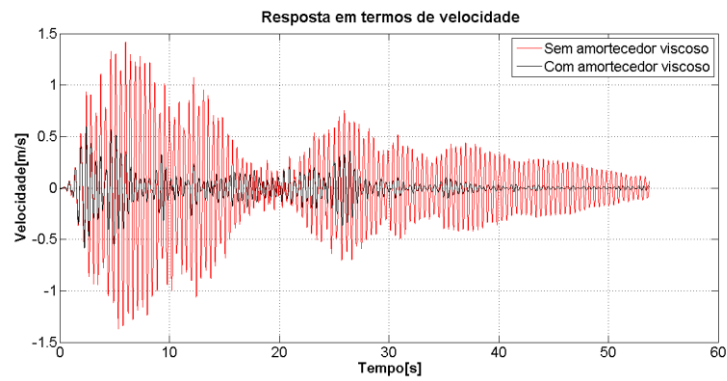


Figura A. 1 – Resposta em termos de velocidade no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de El Centro.

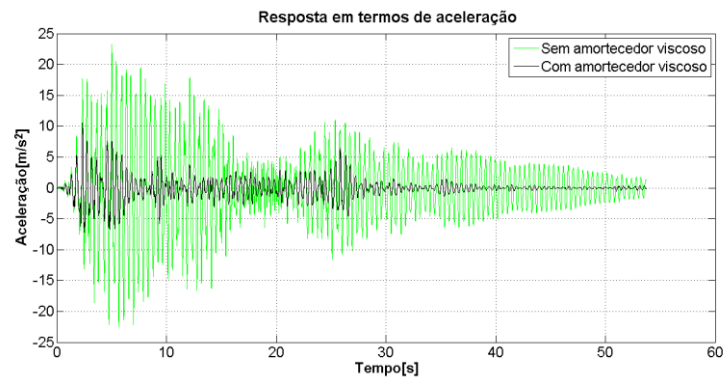


Figura A. 2 – Resposta em termos de aceleração no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de El Centro.

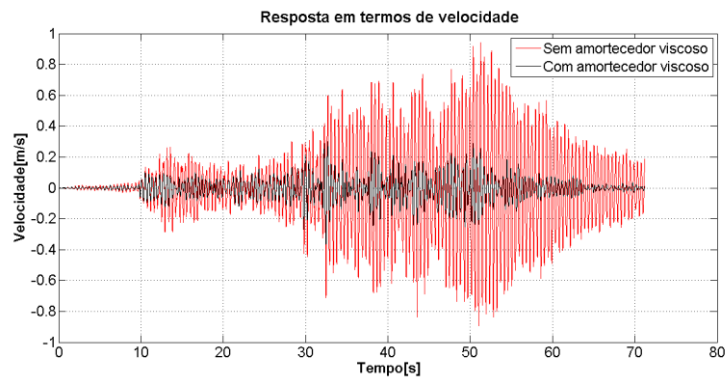


Figura B. 1 – Resposta em termos de velocidade no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de Caucete.

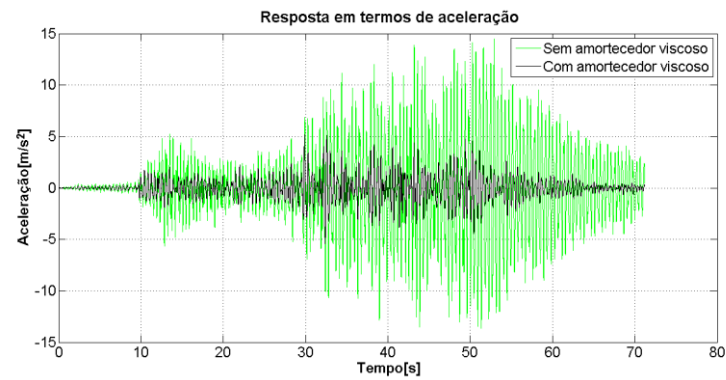


Figura B. 2 – Resposta em termos de aceleração no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo de Caucete.

APÊNDICE C

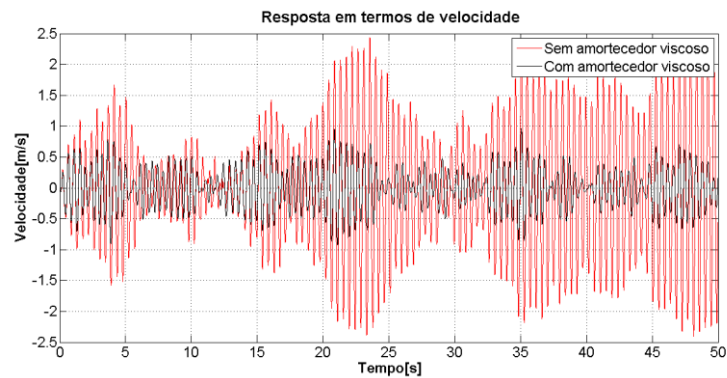


Figura C. 1 – Resposta em termos da velocidade no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

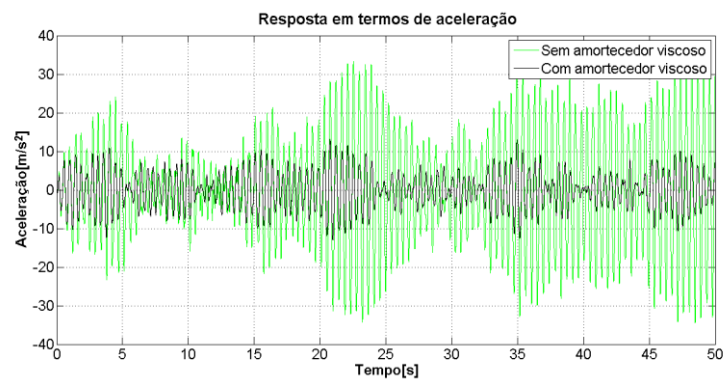


Figura C. 2 – Resposta em termos da aceleração no topo do edifício antes e após a instalação dos amortecedores viscosos para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

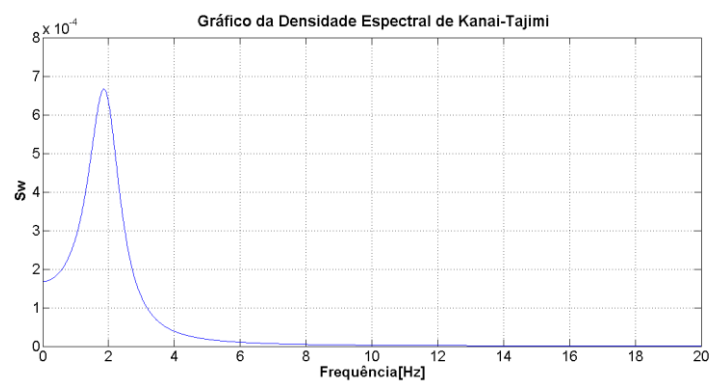


Figura C. 3 – Gráfico da densidade espectral $S(w)$.

APÊNDICE D

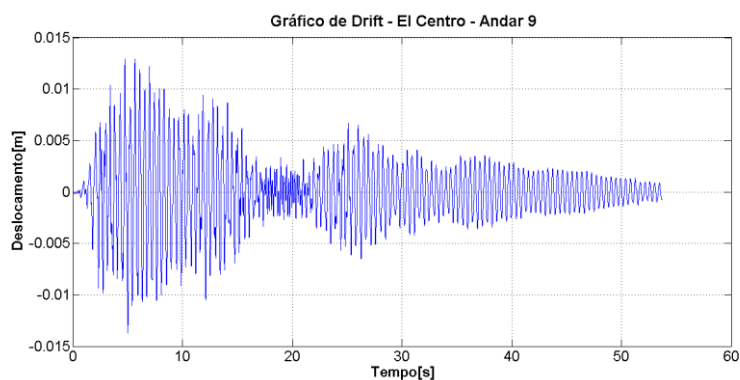
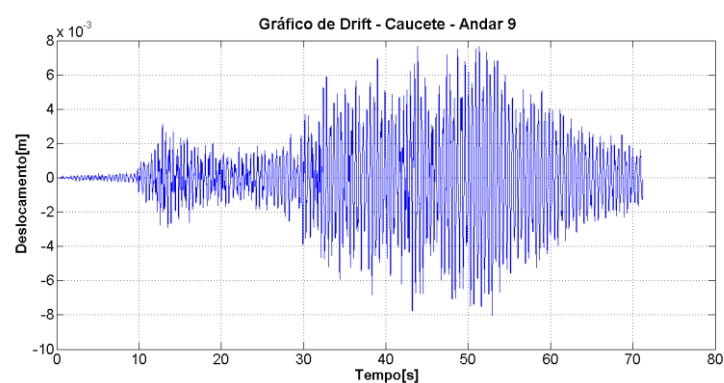
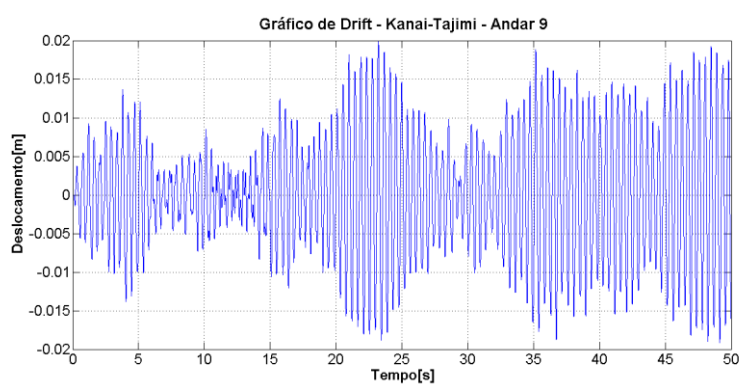
Tabela D. 1 – Respostas máximas em termos de deslocamento nos andares e do *drift* para o sismo de Cauçete.

Andar	Cauçete				
	Sem amortecedores		Com amortecedores		Redução <i>drift</i>
	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	
1	0,0067	0,0067	0,0027	0,0027	59,70%
2	0,0133	0,0065	0,0052	0,0026	60,00%
3	0,0210	0,0077	0,0083	0,0031	59,74%
4	0,0280	0,0070	0,0111	0,0028	60,00%
5	0,0341	0,0061	0,0137	0,0026	57,38%
6	0,0392	0,0054	0,0159	0,0022	59,26%
7	0,0471	0,0089	0,0194	0,0035	60,67%
8	0,0555	0,0092	0,0228	0,0035	61,96%
9	0,0631	0,0080	0,0256	0,0028	65,00%

Tabela D. 2 – Respostas máximas em termos de deslocamento nos andares e do *drift* para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.

Andar	Kanai-Tajimi				
	Sem amortecedores		Com amortecedores		Redução <i>drift</i>
	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	Deslocamento [m]	<i>Drift</i> [m]	
1	0,0183	0,0183	0,0079	0,0079	56,83%
2	0,0361	0,0178	0,0155	0,0076	57,30%
3	0,0573	0,0211	0,0244	0,0090	57,35%
4	0,0767	0,0195	0,0327	0,0083	57,44%
5	0,0940	0,0173	0,0400	0,0074	57,23%
6	0,1087	0,0149	0,0463	0,0063	57,72%
7	0,1318	0,0237	0,0560	0,0098	58,65%
8	0,1554	0,0238	0,0655	0,0096	59,66%
9	0,1753	0,0200	0,0732	0,0077	61,50%

APÊNDICE E

Figura E. 1 – Gráfico de *drift* para o nono andar para o sismo de El Centro.Figura E. 2 – Gráfico de *drift* para o nono andar para o sismo de Cauçete.Figura E. 3 – Gráfico de *drift* para o nono andar para o sismo gerado pelo espectro de Kanai-Tajimi.