

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

CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS UTILIZANDO AMORTECEDORES DE
VIBRAÇÃO POR ATRITO

por

Mauricio Tejada Nunes

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, julho de 2013.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS UTILIZANDO AMORTECEDORES DE
VIBRAÇÃO POR ATRITO
por

Mauricio Tejada Nunes

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 08 de julho de 2013.

À minha família e amigos.

NUNES, M. T. Controle de vibrações de estruturas utilizando amortecedores de vibração por atrito. 2013. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Edifícios altos e estruturas são propensos a experimentar efeitos dinâmicos induzidos pelo vento, ação sísmica e outras fontes de vibração. Pontes, estádios, e outras estruturas sujeitas à ação de cargas móveis ou sísmicas também podem apresentar resposta dinâmica que comprometa à confiabilidade das mesmas. Entre as variadas opções de amortecedores passivos, destacam-se como boa opção aqueles que operam por atrito entre dois corpos sólidos, devido à sua simplicidade e grande poder de dissipação de energia, com baixo custo. O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um programa numérico-computacional para a determinação da resposta dinâmica de estruturas com a implementação do sistema de controle de vibrações através de amortecedores por atrito. Além da determinação completa da resposta do sistema em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações, antes e após a instalação dos amortecedores, a rotina elaborada também permite a análise de modos de vibração e frequências naturais do sistema em estudo. Espera-se que, através deste programa desenvolvido, a resposta dinâmica de estruturas submetidas a eventos sísmicos seja reduzida para um nível aceitável, determinando parâmetros específicos para o sistema de amortecimento por atrito.

PALAVRAS-CHAVE: Método de Diferenças Finitas, Amortecedor por atrito, Matlab.

NUNES, M. T. Vibration Control of structures using friction dampers. 2013. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Tall buildings and structures are likely to experience dynamic effects induced by wind, seismic action and other sources of vibration. Bridges, stadiums, and other structures subjected to the action of moving or seismic loads can also present dynamic response that compromises the reliability of the same. Among the many options for passive dampers, stand out as a good option to those that operate by friction between two solid bodies due to its simplicity and great power of energy dissipation at low cost. This work involves the development of a computer-numerical program for determining the dynamic response of structures with implementation of the control system via friction dampers. In addition to the complete determination of the system response in terms of displacements, velocities and accelerations, before and after the installation of dampers, the designed routine also allows analysis of vibration modes and natural frequencies of the system under study. It is expected that through this developed program, the dynamic response of structures subjected to seismic events is reduced to an acceptable level, determining specific parameters for the friction damping system.

KEYWORDS: Finite Difference Method, Friction damper, Matlab.

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 TIPOS DE SISTEMAS DE AMORTECEDORES COMUNS	1
3.1.1 SISTEMAS PASSIVOS	1
3.1.2 SISTEMAS ATIVOS	3
3.1.3 SISTEMAS SEMI-ATIVOS	3
3.1.4 SISTEMAS HÍBRIDOS	3
4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	3
5 ORGANIZAÇÃO DA ROTINA DESENVOLVIDA	5
6 FORÇA DESCONTINUA DE COULOMB	5
7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	6
7.1 ANÁLISE DINÂMICA COM O SISMO DE EL CENTRO	8
7.2 ANÁLISE DINÂMICA COM O SISMO DE CAUCETE	11
8 CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1 INTRODUÇÃO

Com a falta de terrenos nas grandes cidades e o custo do metro quadrado cada vez mais elevado, gera-se uma tendência natural por edificações cada vez mais altas, os conhecidos “arranha-céus”. Podem-se citar no Brasil os Edifícios Mansão Margarida Costa Pinto e Universa Life Square, ambos com 158 metros de altura. Essas construções tornaram-se possíveis devido ao desenvolvimento de elevadores elétricos e de materiais adequados, como por exemplo, o concreto de alto desempenho (CAD), uma tecnologia atualmente dominada e amplamente aplicada em construções de edificações nas quais se tem elevadas tensões de compressão com necessidade de alta durabilidade, onde uma das principais vantagens é a redução de massa em função de sua menor porosidade, permitindo assim a construção de estruturas com pilares de menor seção e com maior vão. Entretanto, prédios altos, com massas reduzidas são bastante suscetíveis a problemas de vibração, que a certos níveis podem causar desconforto e até mesmo comprometer sua estrutura. Portanto, a redução desses níveis de vibração se faz necessária através do emprego de sistemas de amortecimento.

2 OBJETIVOS

O trabalho consiste na determinação da resposta dinâmica em termos de deslocamento, velocidade e aceleração de estruturas com vários graus de liberdade, fazendo o comparativo das respostas perante a situação inicial sem controle de vibrações e após a instalação de amortecedores por atrito em estruturas submetidas a excitações sísmicas. Para tanto, uma rotina computacional foi desenvolvida.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De todos os métodos disponíveis para dissipar energia cinética de um corpo em movimento, o mais amplamente utilizado, é sem dúvida, o freio de atrito. É o meio mais eficaz, seguro e econômico para dissipar a energia. Nos finais dos anos setenta, o princípio do freio de atrito inspirou o desenvolvimento de amortecedores de atrito. Semelhante aos automóveis, o movimento vibratório de estruturas pode ser reduzido dissipando energia por atrito. Atualmente existem vários tipos de amortecedores de fricção e novos continuam sendo desenvolvidos.

O controle de vibração estrutural, como uma tecnologia avançada em engenharia, é a aplicação de dispositivos de dissipação de energia para reduzir a excessiva vibração da estrutura, conseqüentemente aumentando o conforto humano e reduzindo consideravelmente a probabilidade de falha catastrófica da estrutura em função de ações dinâmicas tais como ventos e terremotos. A tecnologia de controle estrutural pode também ser usada para a adequação de estruturas históricas, especialmente contra terremotos. A abordagem de senso comum para controle de vibrações de estruturas é através da instalação de amortecedores de vibração, que podem ser passivos ou ativos.

3.1 TIPOS DE SISTEMAS DE AMORTECEDORES COMUNS

3.1.1 SISTEMAS PASSIVOS

Conforme Chaves (2010), no que diz respeito a sistemas de controle passivo, dentro dos absorvedores de energia, existem os amortecedores de massa sintonizada, usualmente denominados como TMD's (“Tuned Mass Dampers”), e os amortecedores de líquido sintonizados, 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. Este é um bom sistema para a Engenharia do Vento e é muito utilizado em pontes de grande vão, embora seja sintonizado para apenas uma dada frequência, ou seja, têm de serem colocadas tantas unidades quanto o número diferente de modos de vibração a controlar. Um bom exemplo da utilização deste tipo de sistema de controle de vibração é uma das recentes Maravilhas da Engenharia – o Taipei 101 em Taiwan (Figura 3.1). Quanto aos TLD's, têm um

comportamento muito idêntico aos TMD's, já que são dimensionados para um determinado modo de vibração. São especialmente interessantes para funcionarem em estruturas caracterizadas por terem baixas frequências e funcionam como o próprio nome indica, com a utilização de água. Conforme a configuração do tanque onde é colocado o líquido, este introduz uma compensação de fase ao movimento da estrutura. É uma solução economicamente favorável já que são facilmente sintonizados, dependendo apenas da quantidade de água que se coloca em cada tanque.



Figura 3.1: TMD do Taipei 101 e o respectivo edifício.

Muito importante nesta categoria de sistemas passivos de controle de vibração, estão os amortecedores viscosos, viscoelásticos, friccionais e metálicos. Estes amortecedores servem, sobretudo, para problemas de Engenharia Sísmica, reduzindo significativamente as amplitudes de vibração. São ótimas soluções para adequação de estruturas devido ao fato de poderem ser colocados numa estrutura já existente, possuírem uma elevada confiabilidade e um reduzido custo direto e de manutenção. Há o problema de só funcionarem quando a estrutura já está afetada pelas vibrações, não impedindo assim, o movimento da estrutura inicialmente. 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 (Figura 3.2). Quanto aos viscoelásticos, são idênticos aos viscosos, funcionam com a deformação em corte de um material viscoelástico numa montagem tipo “sandwich”.



Figura 3.2: Amortecedor viscoso instalado na Portland State University.

Os amortecedores por atrito, por possuírem um baixo custo de construção, instalação e manutenção além de apresentarem um ótimo desempenho no controle de vibrações, têm sido muito utilizados atualmente. Como exemplo, cita-se a Biblioteca McConnell da Universidade Concordia em Montreal, Canadá, que consiste de dois prédios de seis e dez pavimentos interconectados por uma galeria, onde foram empregados um total de 143 amortecedores por atrito. Propositalmente, os arquitetos resolveram expor 60 destes amortecedores devido a sua estética atraente, conforme se observa na Figura 3.3. A força de atrito nesses amortecedores variou entre 600-700kN, dependendo da localização dentro da estrutura.



Figura 3.3: Amortecedor por atrito exposto na Biblioteca McConnel.

3.1.2 SISTEMAS ATIVOS

Estes sistemas têm a particularidade de funcionarem para várias frequências e por isso têm uma elevada eficiência, porém possuem um elevado custo e um menor grau de confiabilidade. Existe um grande número de diferentes dispositivos que podem ser utilizados, tais como cabos ativos, diagonais ativas e atuadores piezoelétricos, mas é nos amortecedores de massa ativa, ou AMD's ("Active Mass Dampers"), que se centra a maior atenção devido ao fato de serem os mais utilizados.

3.1.3 SISTEMAS SEMI-ATIVOS

Este é um tipo de sistema que constitui uma solução intermediária aos sistemas passivos e ativos. São também chamados de "passivos inteligentes" porque dissipam a energia tal como os sistemas passivos, mas têm maior adaptabilidade, já que têm a capacidade de se ajustarem em face da resposta efetiva da estrutura. Existem, neste grupo, quatro conhecidos tipos: dispositivos de rigidez variável, amortecedores de atrito variável, amortecedores viscosos de orifício variável e amortecedores de viscosidade variável. Irá ser feito um pequeno resumo do funcionamento e características dos dispositivos de rigidez variável, ou AVS's ("Active Variable Stiffness") e dos Amortecedores de Orifício Variável. Os primeiros são cilindros hidráulicos, regulados por válvulas que permitem mobilizar ou desmobilizar rigidez axial, localizados nas diagonais da estrutura. Estes dispositivos requerem uma pequena quantidade de energia e a escolha da rigidez mais eficaz é feita por um controlador que recolhe e transmite a informação recebida da base do edifício. Quanto aos AOS's, são amortecedores que têm um cilindro com uma válvula que permite controlar o fluxo de líquido com o objetivo de maximizar os ciclos de dissipação de energia e são normalmente utilizados para sismos de elevada amplitude.

3.1.4 SISTEMAS HÍBRIDOS

Este tipo de sistema combina sistemas passivos com sistemas ativos. Neste grupo os mais conhecidos são os HMD's ("Hybrid Mass Dampers") que fazem uma 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 ao problema de sintonização.

4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Equações diferenciais ordinárias (EDO's) e parciais (EDP's) aparecem em inúmeros problemas da física-matemática. Em especial, na área de engenharia, todo cálculo mais elaborado normalmente recai em uma equação diferencial. Como poucas equações diferenciais (ED's) têm solução analítica possível ou viável, os métodos numéricos aparecem como uma ferramenta extremamente eficiente para sua solução.

Entre os vários métodos numéricos desenvolvidos e utilizados atualmente um dos mais simples e que fornece bons resultados é o método das diferenças finitas. Este

método pode ser utilizado para solucionar as equações diferenciais de movimento tanto de sistemas discretos quanto contínuos.

A seguir apresenta-se um resumo esquemático do método das diferenças finitas. Consideram-se os vetores de deslocamento $\vec{x}(t_{i-1})$, $\vec{x}(t_i)$ e $\vec{x}(t_{i+1})$ referentes aos tempos t_{i-1} , t_i , e t_{i+1} , respectivamente, separados entre si por um intervalo de tempo Δt . Para o tempo intermediário entre t_{i-1} e t_i , pode-se estabelecer uma relação linear para obtenção da velocidade, conforme Equação 01:

$$\vec{\dot{x}}(t_{i-1/2}) = \frac{\vec{x}(t_i) - \vec{x}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad \text{Equação 01}$$

Da mesma forma pode-se obter a velocidade em um tempo intermediário entre t_i e t_{i+1} , dada pela Equação 02:

$$\vec{\dot{x}}(t_{i+1/2}) = \frac{\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)}{\Delta t} \quad \text{Equação 02}$$

Ainda é possível, através das relações das Equações 01 e 02, obter a avaliação linear do vetor aceleração, no tempo t_i :

$$\vec{\ddot{x}}(t_i) = \frac{1}{\Delta t^2} [\vec{x}(t_{i+1}) - 2\vec{x}(t_i) + \vec{x}(t_{i-1})] \quad \text{Equação 03}$$

Fazendo a média das expressões da velocidade, obtém-se uma avaliação da velocidade no tempo t_i :

$$\vec{\dot{x}}(t_i) = \frac{\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_{i-1})}{2\Delta t} \quad \text{Equação 04}$$

Por fim, substituem-se os vetores de velocidade e aceleração no tempo t_i na equação do movimento:

$$M\vec{\ddot{x}} + C\vec{\dot{x}} + K\vec{x} = \vec{F}$$

$$M \left(\frac{1}{\Delta t^2} [\vec{x}(t_{i+1}) - 2\vec{x}(t_i) + \vec{x}(t_{i-1})] \right) + C \left(\frac{\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_{i-1})}{2\Delta t} \right) + K\vec{x}(t_i) = \vec{F}(t_i) \quad \text{Equação 05}$$

Isolando-se o deslocamento no tempo t_{i+1} , obtém-se:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) \vec{x}(t_{i+1}) = \vec{F}(t_i) - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) \vec{x}(t_i) - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) \vec{x}(t_{i-1}) \quad \text{Equação 06}$$

Para o primeiro passo, em que $i=0$, deve-se obter o vetor deslocamento $\vec{x}(t_{-1})$, obtido através da Equação 03:

$$\vec{\dot{x}}(t_{-1}) = \Delta t \vec{\ddot{x}}(t_0) + 2\vec{\dot{x}}(t_0) - \vec{\dot{x}}(t_1) \quad \text{Equação 07}$$

E $\vec{x}(t_1)$ pode ser obtido da Equação 04:

$$\vec{x}(t_1) = 2\Delta t \vec{\dot{x}}(t_0) + \vec{x}(t_{-1}) \quad \text{Equação 08}$$

Portanto, substituindo a Equação 08 na Equação 07, resulta:

$$\vec{x}(t_{-1}) = \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\vec{x}}(t_0) - \Delta t \dot{\vec{x}}(t_0) - \vec{x}(t_0) \quad \text{Equação 09}$$

O vetor de aceleração no tempo 0, $\ddot{\vec{x}}(t_0)$, pode ser calculado a partir da equação de movimento, resultando:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = M^{-1}[\vec{F}(t_0) - C\dot{\vec{x}}(t_0) - K\vec{x}(t_0)] \quad \text{Equação 10}$$

Deve-se ainda ressaltar que este método é condicionalmente estável, isto é, para que a estabilidade seja assegurada é necessário que o intervalo de integração dt seja menor que um valor crítico definido por:

$$dt \leq dt_{crit} = 2/\omega_{nn} = T_n/\pi \quad \text{Equação 11}$$

No caso de estruturas com amortecedores por atrito instalados, a força de atrito deve ser levada em consideração na equação de movimento, resultando:

$$M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} + \vec{F}_a = \vec{F} \quad \text{Equação 12}$$

5 ORGANIZAÇÃO DA ROTINA DESENVOLVIDA

A rotina computacional desenvolvida está baseada em linguagem de alto nível e estruturas nos moldes da arquitetura clássica constituída de pré-processamento, solução e pós-processamento, conforme Figura 5.1. O programa foi desenvolvido utilizando o ambiente de programação do *software* Matlab.

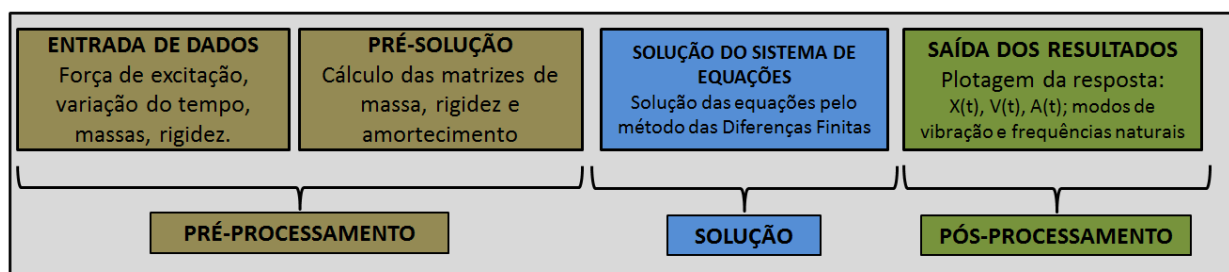


Figura 5.1: Esquema das etapas utilizadas na rotina.

Conforme Puglia (2012), a etapa de pré-processamento consiste, basicamente, em entradas dos dados, por exemplo, propriedades do sistema (massa, rigidez e amortecimento), força de excitação e força de atrito dos amortecedores instalados.

A solução das equações de movimento se dá na etapa seguinte, onde as informações da etapa anterior são processadas junto às equações do método de integração tipo Diferenças Finitas, descrito anteriormente.

A resposta é obtida na etapa de pós-processamento, onde se tem como saída as funções deslocamento, velocidade e aceleração de cada grau de liberdade da estrutura em cada instante de tempo. Outros dados obtidos na resposta são as frequências naturais da estrutura e os respectivos modos de vibração.

6 FORÇA DESCONTINUA DE COULOMB

Uma das dificuldades em sistemas que envolvem atrito é o fato da função que representa a variação da força de atrito ser descontínua. Assim, muitos pesquisadores propuseram soluções para contornar este problema.

Mostaghel e Davis (1997) sugerem substituir a função sinal descontínua da velocidade de deslizamento por uma função contínua. Os autores mostraram que a descontinuidade da força de atrito de Coulomb pode ser representada por pelo menos quatro funções contínuas diferentes, conforme equações seguintes e a Figura 6.1:

$$f_1(\alpha_1, \dot{x}) = \text{Erf}(\alpha_1 \dot{x}) \quad \text{Equação 13}$$

$$f_2(\alpha_2, \dot{x}) = \text{Tanh}(\alpha_2 \dot{x}) \quad \text{Equação 14}$$

$$f_3(\alpha_3, \dot{x}) = \frac{2}{\pi} \text{ArcTan}(\alpha_3 \dot{x}) \quad \text{Equação 15}$$

$$f_4(\alpha_4, \dot{x}) = \frac{\alpha_4 \dot{x}}{1 + \alpha_4 |\dot{x}|} \quad \text{Equação 16}$$

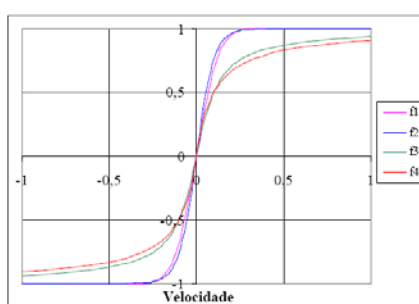


Figura 6.1: Funções que podem aproximar a função sinal descontínua da força de atrito.

Conforme Miguel (2002) pode-se considerar que a função $f_2(\alpha_2, \dot{x}) = \text{Tanh}(\alpha_2 \dot{x})$ fornece uma boa aproximação com $\alpha_2 = 1000$, e, portanto será adotada no presente trabalho.

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Complementando o desenvolvimento teórico discutido anteriormente, neste tópico ilustra-se a utilização de amortecedores de vibração por atrito aplicado a um edifício de nove andares submetido a excitações sísmicas diferentes. Primeiramente, considera-se a estrutura sem dissipadores de energia externo, apenas com seu amortecimento próprio, como elemento de referência e, em uma segunda análise, obtém-se a resposta do edifício após a instalação de amortecedores por atrito. A estrutura escolhida para o estudo é uma estrutura metálica, formada por perfis do tipo I, a qual pode ser representada pelo pórtico da Figura 7.1. A fim de facilitar a análise, o pórtico foi discretizado como um sistema de nove graus de liberdade. As propriedades da estrutura analisada são apresentadas na Tabela 7.1. A razão de amortecimento da estrutura é de 0,5%, ou seja, $\zeta = 0,005$.

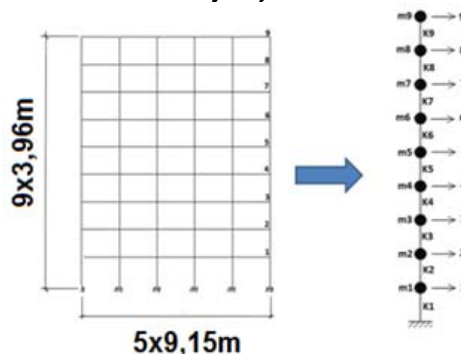


Figura 7.1: Pórtico discretizado com nove graus de liberdade.

Tabela 7.1: Propriedades da estrutura.

Andar	Seção (viga tipo I)	Massa (kg)	Área seção (m ²)	Momento Inércia em X (m ⁴)	Altura (m)	Módulo elasticidade (Pa)	Rigidez pilar (N/m)	Rigidez total andar (N/m)
1	W36x160	103017,33	0,0303	0,0041	3,96	2,10E+11	1,65E+08	9,89E+08
2	W36x160	103017,33	0,0303	0,0041	3,96	2,10E+11	1,65E+08	9,89E+08
3	W36X135	103017,33	0,0256	0,0032	3,96	2,10E+11	1,32E+08	7,90E+08
4	W36X135	103017,33	0,0256	0,0032	3,96	2,10E+11	1,32E+08	7,90E+08
5	W36X135	103017,33	0,0256	0,0032	3,96	2,10E+11	1,32E+08	7,90E+08
6	W36X135	103017,33	0,0256	0,0032	3,96	2,10E+11	1,32E+08	7,90E+08
7	W30X99	103017,33	0,0188	0,0017	3,96	2,10E+11	6,74E+07	4,04E+08
8	W27X84	103017,33	0,0160	0,0012	3,96	2,10E+11	4,81E+07	2,89E+08
9	W24X68	103017,33	0,0130	0,0008	3,96	2,10E+11	3,09E+07	1,85E+08

A primeira etapa foi o cálculo das nove frequências naturais da estrutura, obtendo-se: $f_1 = 2,2595$, $f_2 = 5,3478$, $f_3 = 8,8936$, $f_4 = 11,6456$, $f_5 = 14,7212$, $f_6 = 17,6922$, $f_7 = 22,0784$, $f_8 = 25,8164$ e $f_9 = 27,9858$, todas em Hz.

Em seguida é analisada a resposta dinâmica da estrutura, submetida a dois movimentos sísmicos reais, antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito, posicionados conforme mostra a Figura 7.2.

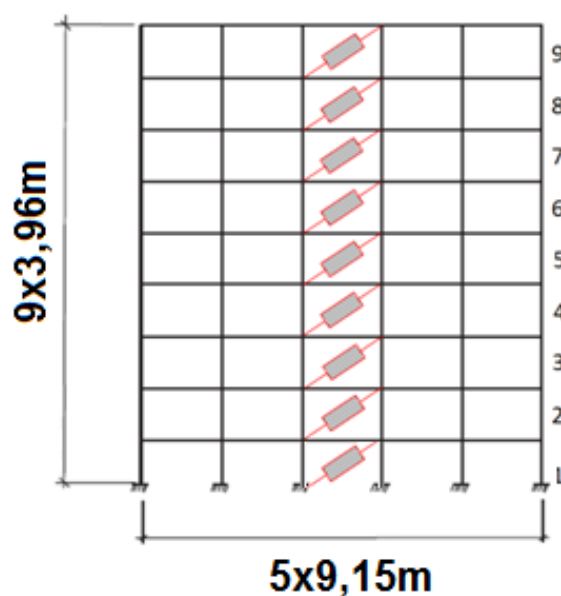


Figura 7.2: Posição dos nove amortecedores por atrito ao longo da estrutura.

7.1 ANÁLISE DINÂMICA COM O SISMO DE EL CENTRO

A primeira excitação considerada foi o sismo de El Centro, apresentado na Figura 7.3. Inicialmente determinou-se a resposta dinâmica da estrutura sem amortecedores por atrito instalados, isto é, apenas com seu amortecimento próprio de 0,5%. A resposta obtida em termos de deslocamento no topo do edifício (GDL = 9) é apresentada na Figura 7.4, enquanto a Figura 7.5 mostra a resposta em termos de aceleração também para o topo do edifício. O topo do edifício foi tomado como referência, pois é o local onde a resposta dinâmica é mais alta.

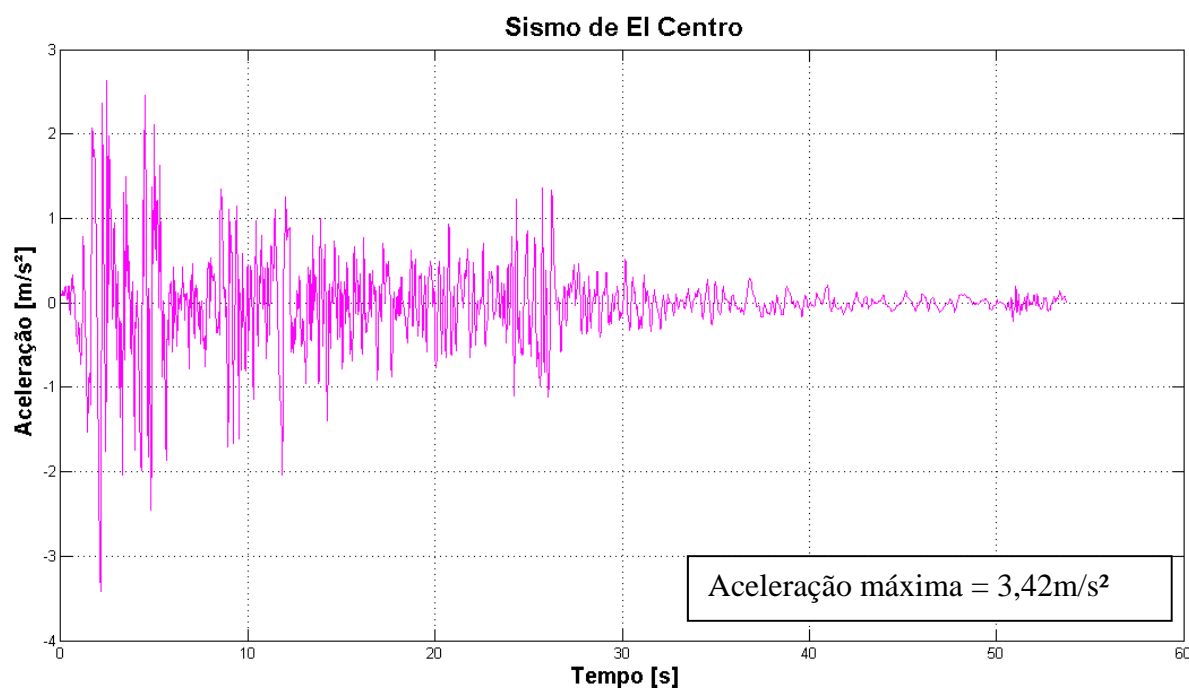


Figura 7.3: Sismo de El Centro, maio de 1940.

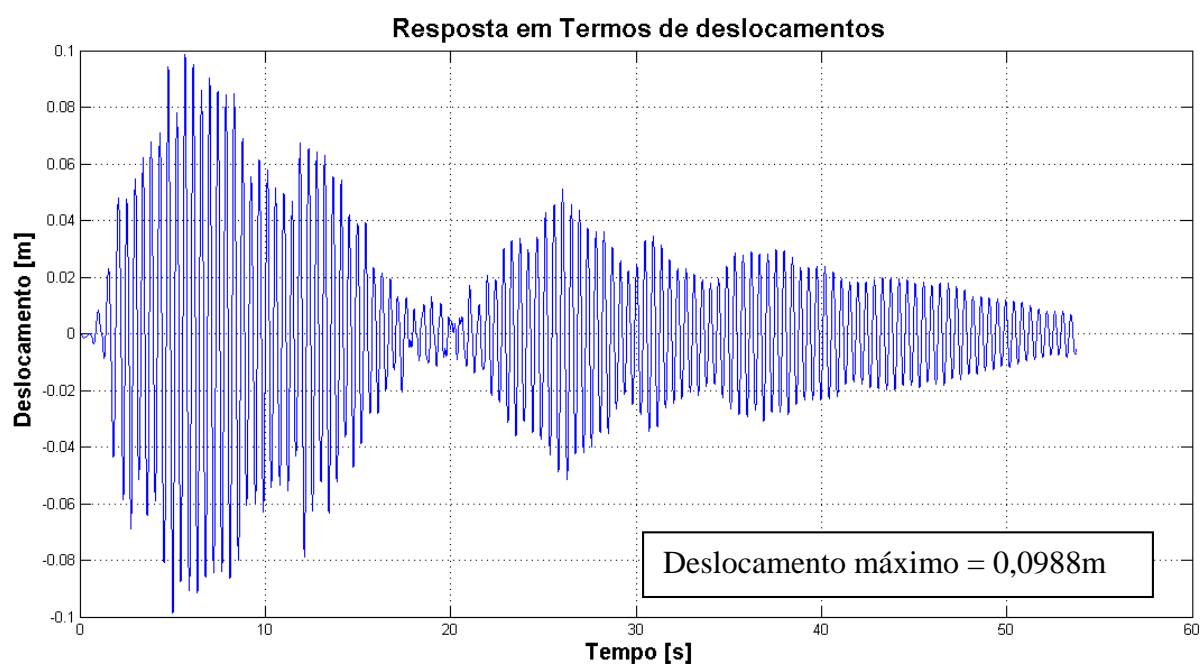


Figura 7.4: Resposta da estrutura em termos de deslocamento para o sismo de El Centro, sem amortecedores por atrito.

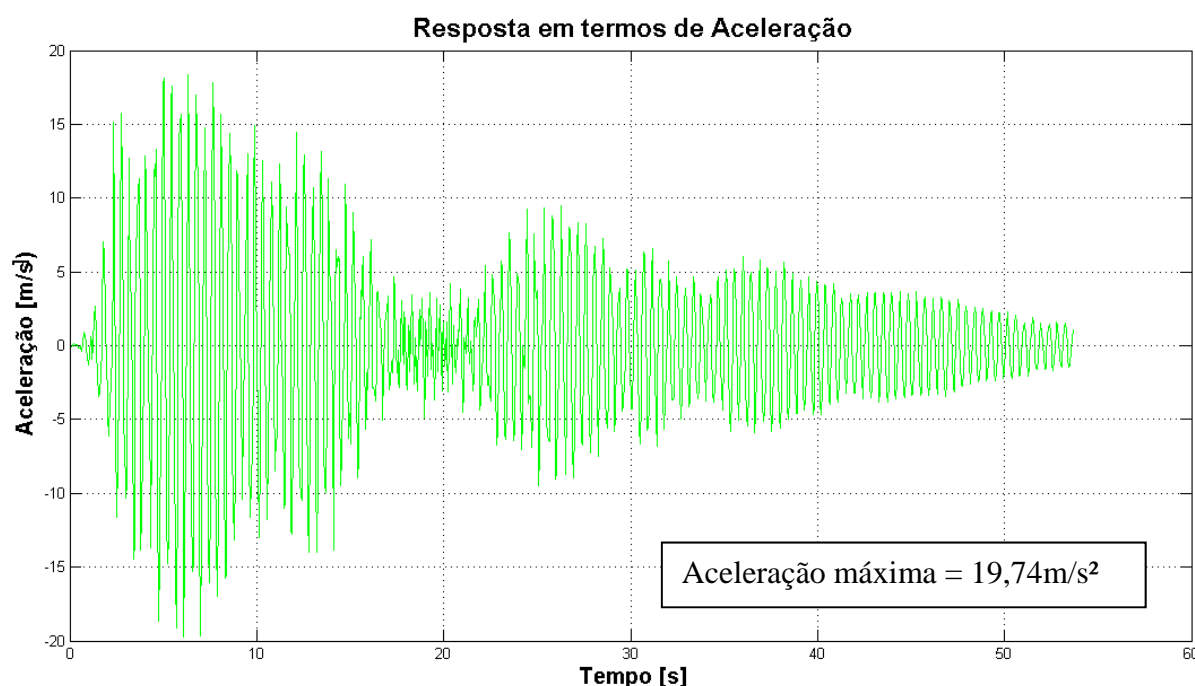


Figura 7.5: Resposta da estrutura em termos de aceleração para o sismo de El Centro, sem amortecedores por atrito.

Nesta etapa a estrutura é novamente analisada, mas agora se considerando, além do seu amortecimento próprio de 0,5%, a instalação de nove amortecedores por atrito de mesma magnitude. A Figura 7.6 mostra a variação do deslocamento máximo no topo do edifício em função da força de atrito nos nove dissipadores. Para obtenção deste gráfico a rotina computacional é rodada várias vezes, alterando o valor de entrada da força de atrito dos 9 amortecedores e com isso obtendo o respectivo valor de deslocamento máximo.

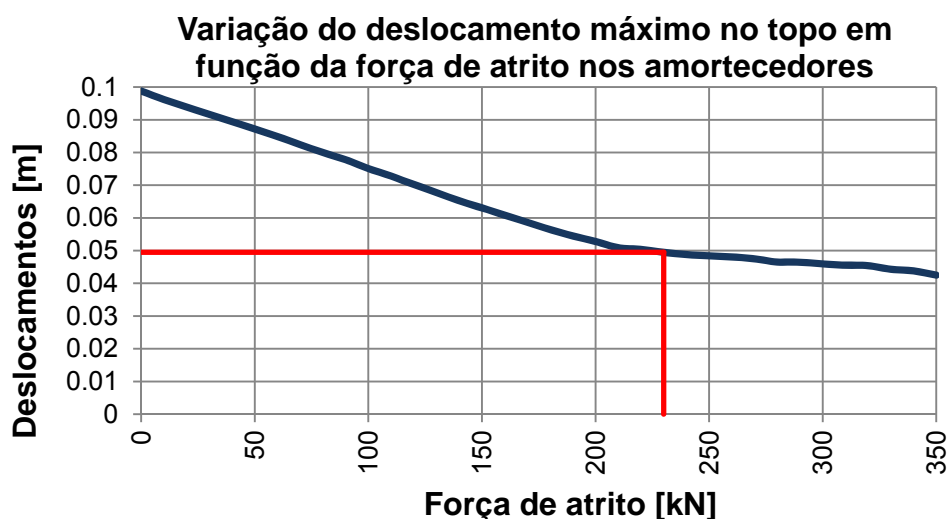


Figura 7.6: Deslocamento máximo no topo do edifício em função da força de atrito nos nove amortecedores.

Analisando o gráfico da Figura 7.6 observa-se que para a força de atrito de 230kN obtém-se aproximadamente 50% de redução do deslocamento máximo no topo da estrutura, isto é, o deslocamento máximo cai de aproximadamente 0,1m sem amortecedores para 0,05m com nove amortecedores por atrito de 230kN. Após este valor de 230kN a queda

no deslocamento máximo devido ao aumento da força de atrito nos amortecedores torna-se menos expressiva, fazendo com que se possa considerar este valor como referência para o projeto de amortecedores por atrito para esta estrutura.

A Figura 7.7 apresenta a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito de 230kN. Pode-se observar nesta figura a significativa redução da resposta dinâmica depois da colocação dos nove dissipadores frente à resposta da estrutura sem dissipadores de energia e apenas com seu amortecimento próprio.

As Figuras 7.8 e 7.9 mostram a resposta em termos de velocidade e aceleração, respectivamente, no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito de 230kN. Novamente pode-se observar a redução significativa da resposta dinâmica depois da colocação dos dissipadores de energia.

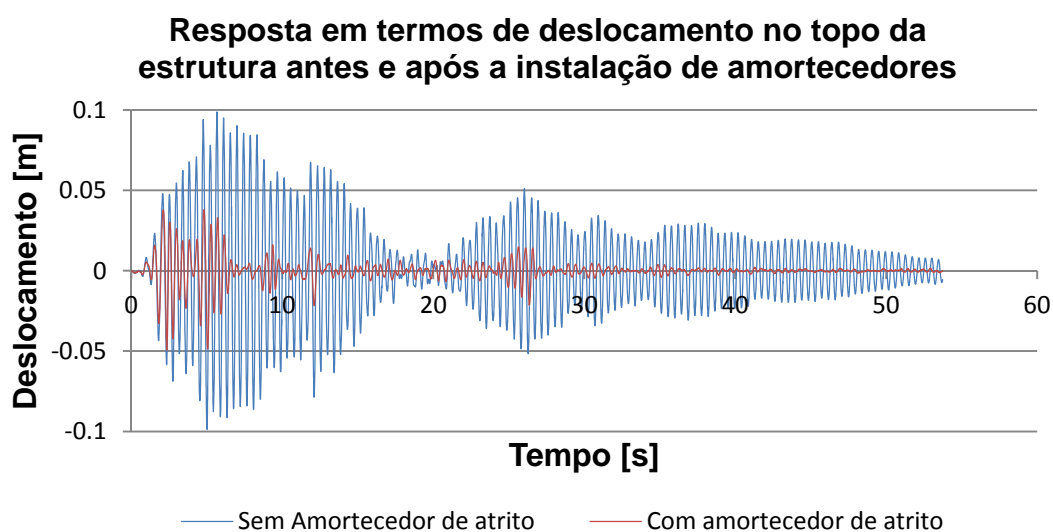


Figura 7.7: Resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

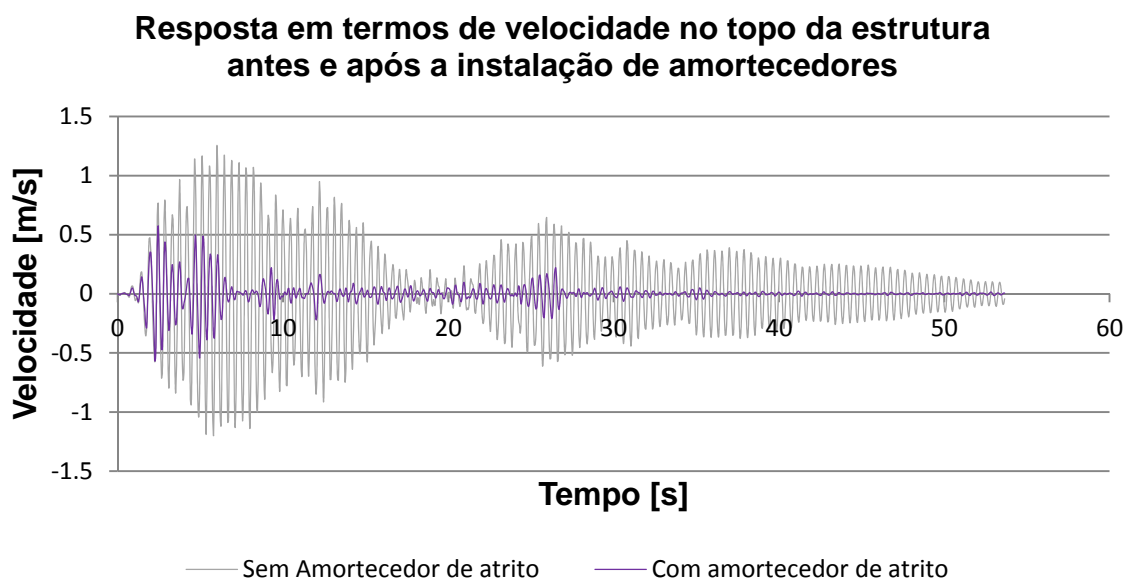


Figura 7.8: Resposta em termos de velocidade no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

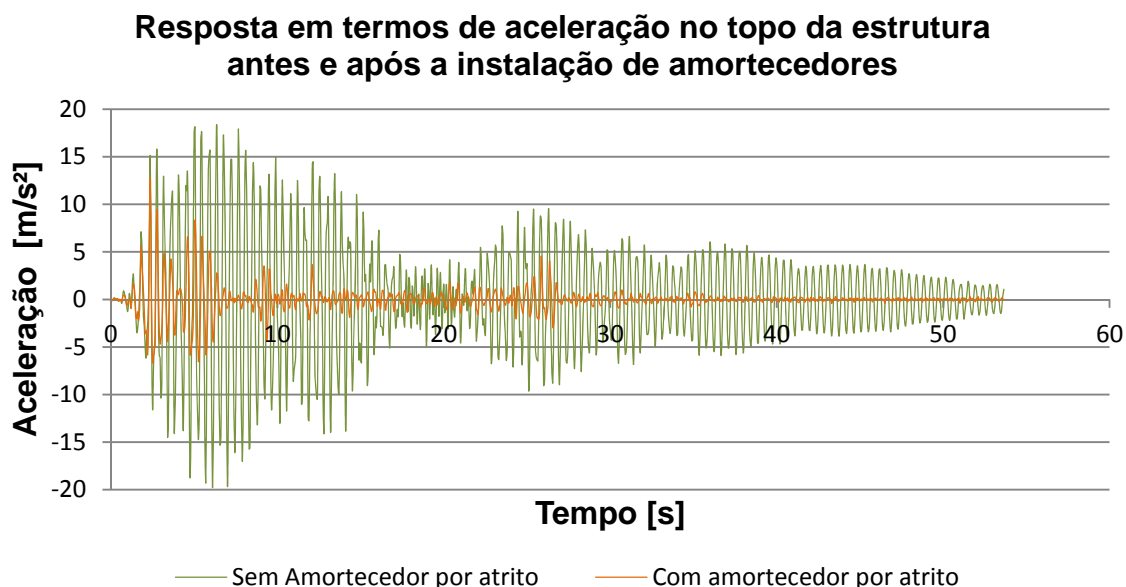


Figura 7.9: Resposta em termos de aceleração no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

7.2 ANÁLISE DINÂMICA COM O SISMO DE CAUCETE

A segunda excitação considerada foi o sismo de Caucete, apresentado na Figura 7.10. Assim como no caso anterior, novamente iniciou-se determinando a resposta dinâmica da estrutura sem amortecedores por atrito instalados, isto é, apenas com seu amortecimento próprio de 0,5%. A resposta obtida no topo do edifício em termos de deslocamento e aceleração é apresentada nas Figuras 7.11 e 7.12, respectivamente.

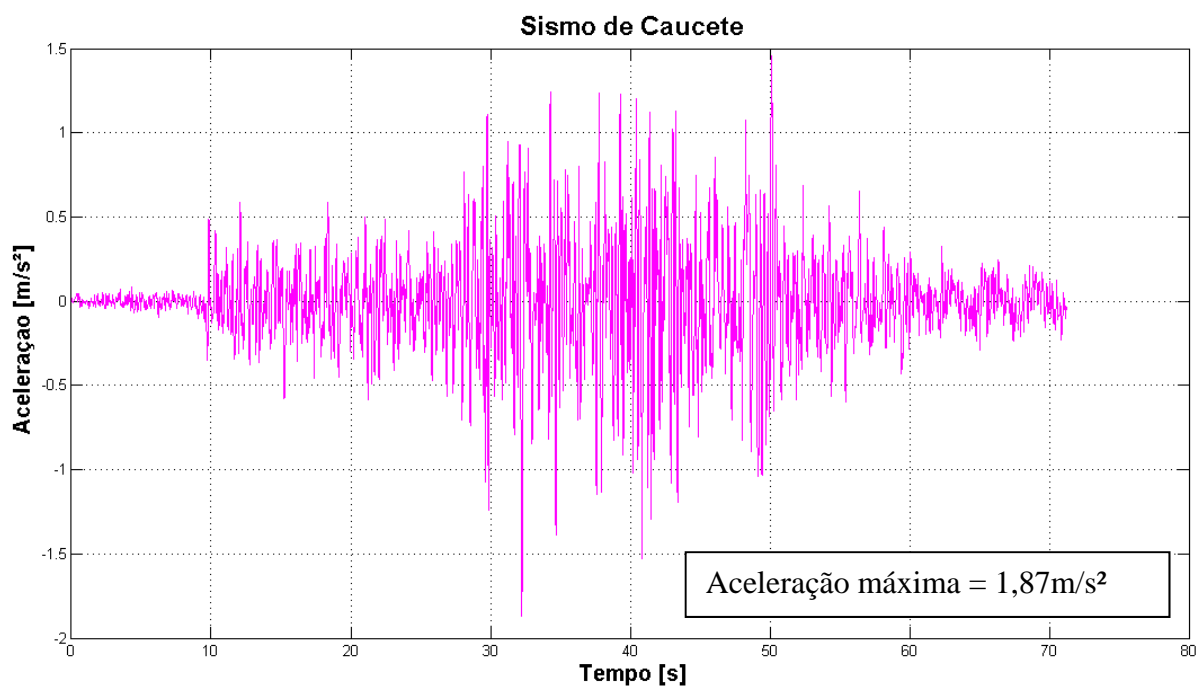


Figura 7.10: Sismo de Caucete, San Juan, Argentina, 1977.

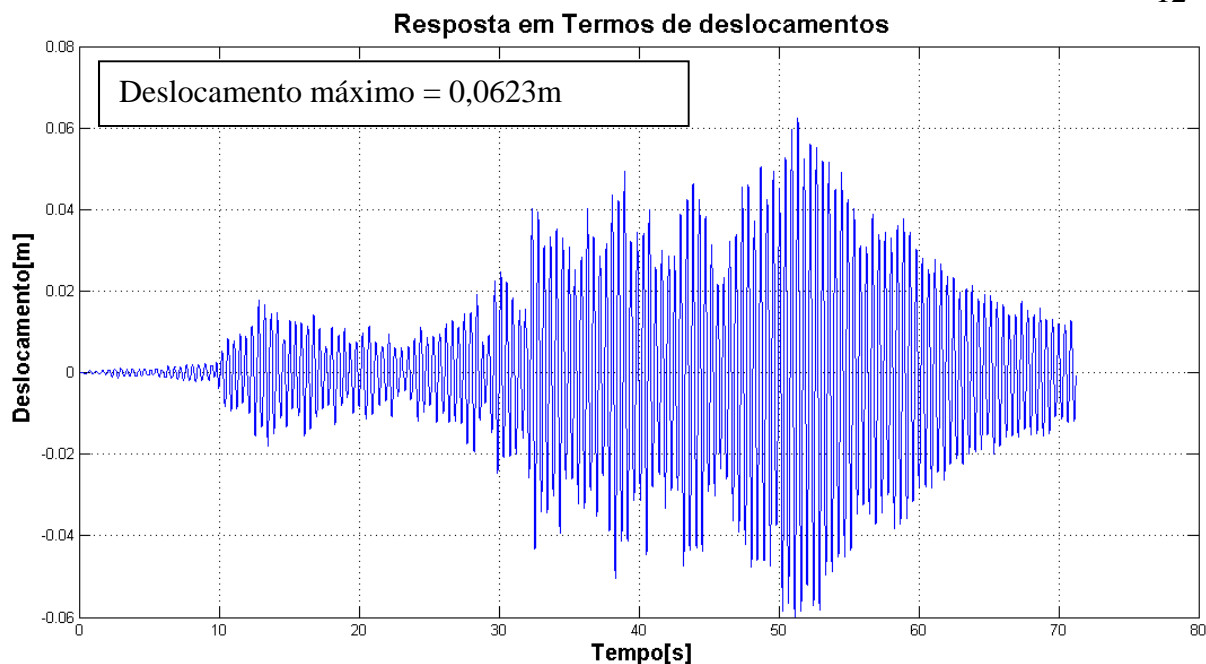


Figura 7.11: Resposta da estrutura em termos de deslocamento para o sismo de Cauçete, sem amortecedores por atrito.

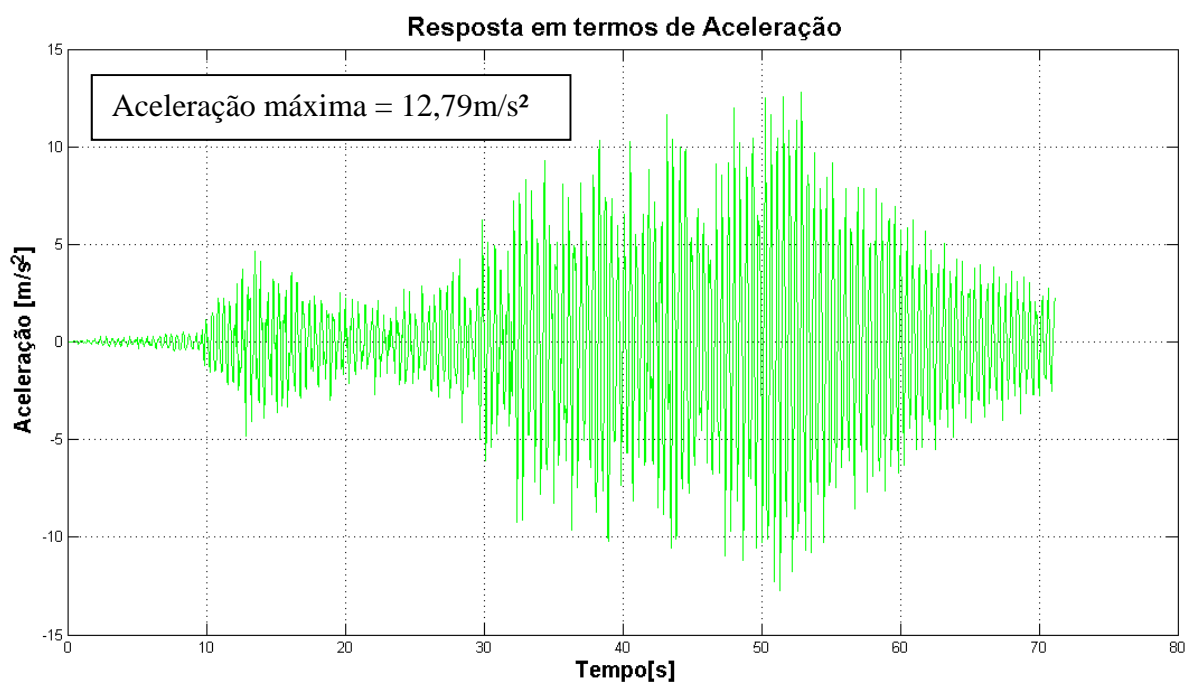


Figura 7.12: Resposta da estrutura em termos de aceleração para o sismo de Cauçete, sem amortecedores por atrito.

Em uma segunda análise, considera-se que além do seu amortecimento próprio de 0,5%, a estrutura está provida de nove amortecedores por atrito de mesma magnitude. A Figura 7.13 mostra a variação do deslocamento máximo no topo do edifício em função da força de atrito nos nove dissipadores.

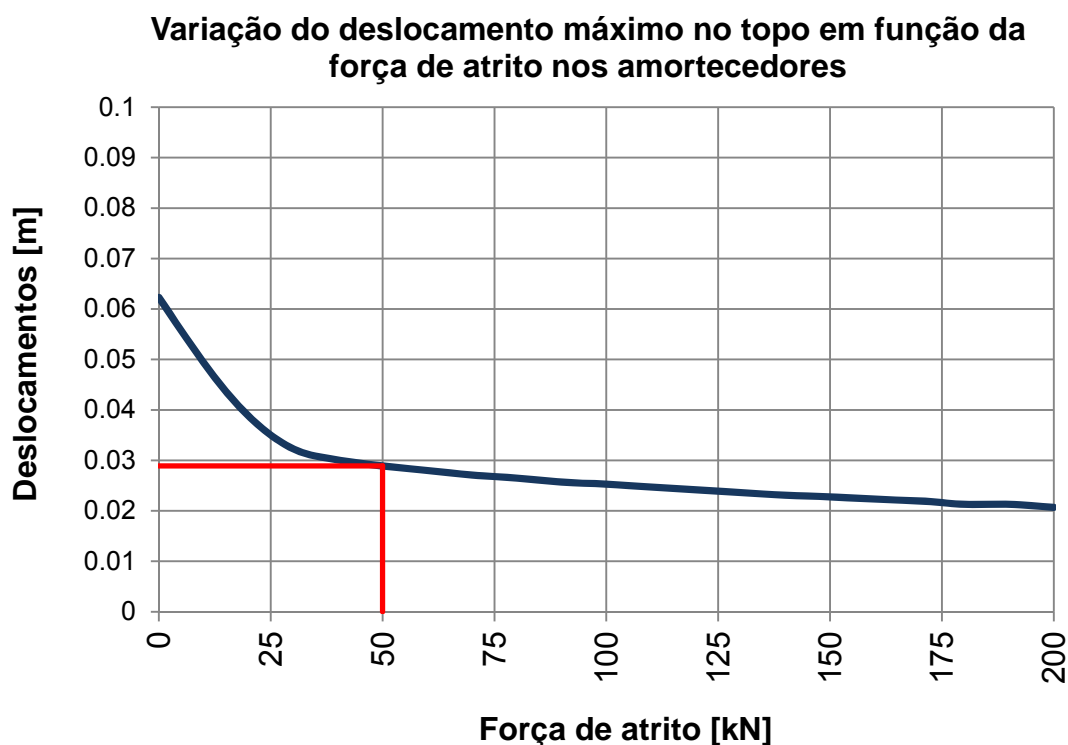


Figura 7.13: Deslocamento máximo no topo do edifício em função da força de atrito nos nove amortecedores.

Analisando o gráfico da Figura 7.13 observa-se que para a força de atrito de 50kN obtém-se uma redução do deslocamento máximo no topo da estrutura de pouco mais de 50%, isto é, o deslocamento máximo cai de 0,0623m sem amortecedores para 0,0289m com nove amortecedores por atrito de 50kN. Após este valor de 50kN a queda no deslocamento máximo devido ao aumento da força de atrito nos amortecedores torna-se menos expressiva, fazendo com que se possa considerar este valor como referência para o projeto de amortecedores por atrito para esta estrutura.

A Figura 7.14 apresenta a resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito de 50kN. Pode-se observar nesta figura a significativa redução da resposta dinâmica depois da colocação dos nove dissipadores frente à resposta da estrutura sem dissipadores de energia e apenas com seu amortecimento próprio.

As Figuras 7.15 e 7.16 mostram a resposta em termos de velocidade e aceleração, respectivamente, no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito de 50kN. Novamente pode-se observar a redução significativa da resposta dinâmica depois da colocação dos dissipadores de energia.

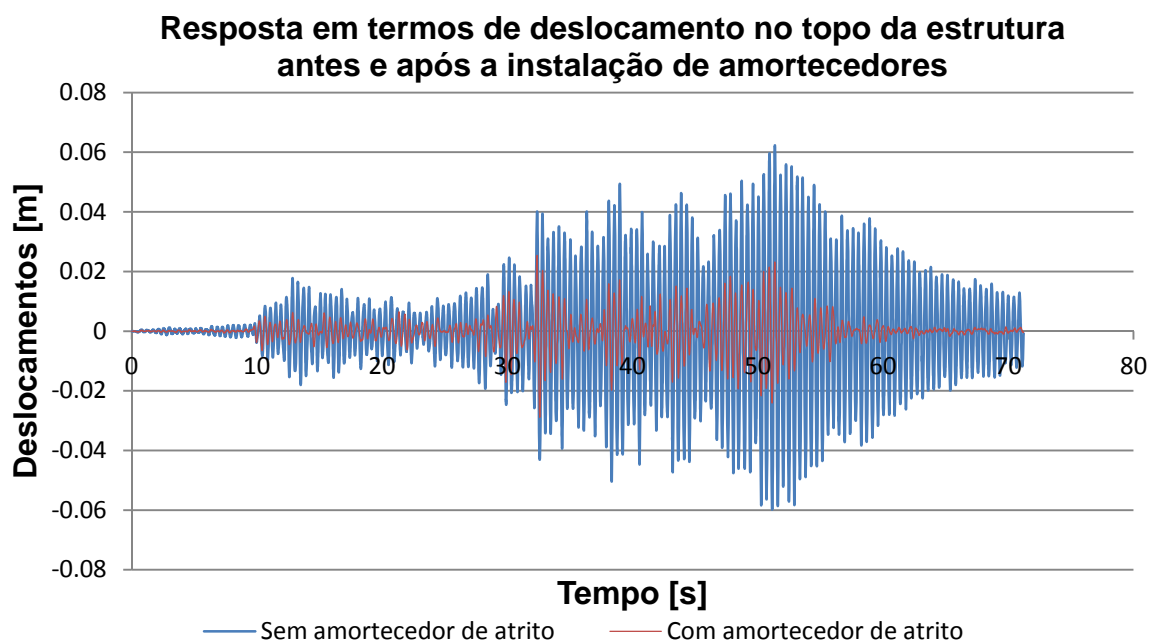


Figura 7.14: Resposta em termos de deslocamento no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

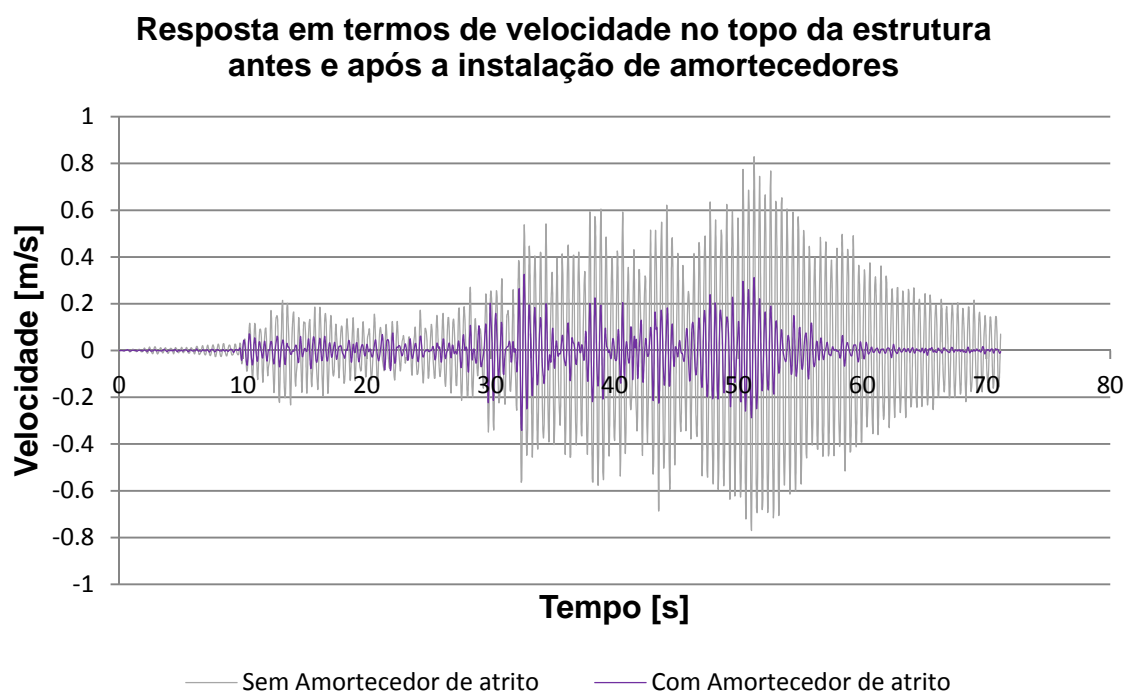


Figura 7.15: Resposta em termos de velocidade no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

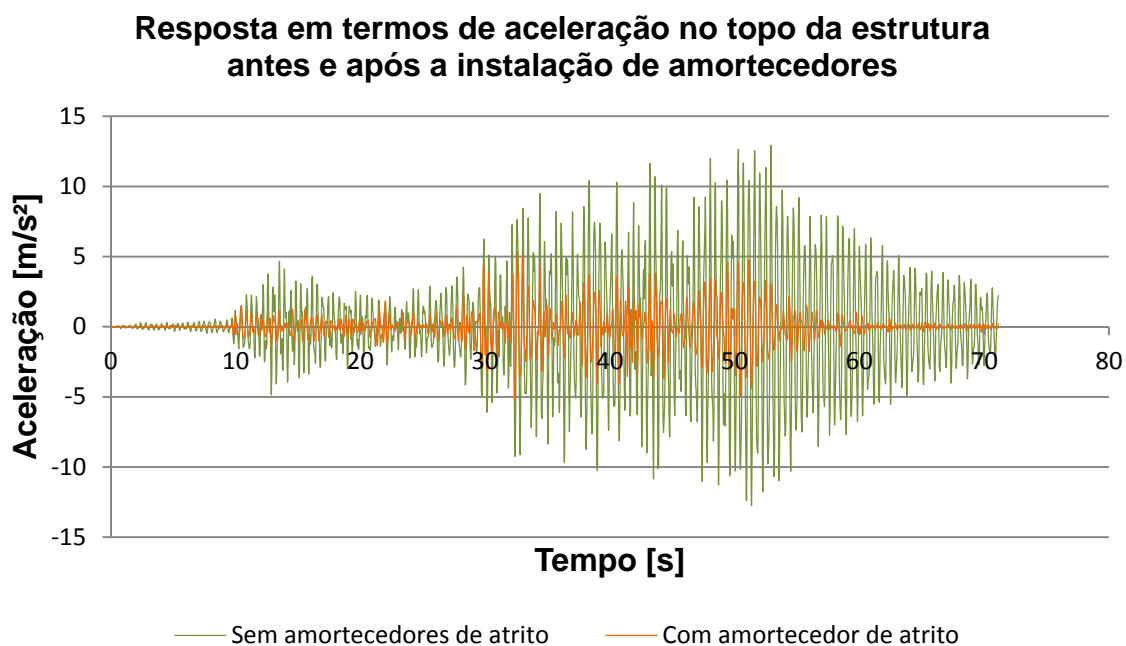


Figura 7.16: Resposta em termos de aceleração no topo da estrutura antes e após a instalação de nove amortecedores por atrito.

8 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que foi possível determinar a resposta dinâmica de estruturas antes e após a instalação de amortecedores por atrito, através de uma rotina numérica computacional desenvolvida em ambiente Matlab, a qual pode servir como uma ótima ferramenta para análise dinâmica de estruturas.

Observa-se que para ambos os sismos foi possível atingir uma redução de aproximadamente 50% no deslocamento máximo no topo da estrutura. No caso do sismo de El Centro, o deslocamento máximo passou de 0,0988m para 0,0495m e a correspondente aceleração caiu de 19,74m/s² para 12,72m/s², ou seja, uma redução de 35,56% na aceleração máxima no topo. No caso do sismo de Cauçete, o deslocamento máximo passou de 0,0623m para 0,0289m e a correspondente aceleração caiu de 12,79m/s² para 5,33m/s², ou seja, uma redução de 58,33% na aceleração máxima no topo.

Sugere-se para futuros trabalhos, a utilização de um algoritmo de otimização para a determinação da força de atrito ótima dos amortecedores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chaves, S. N. P. H, “**Atenuação da resposta sísmica de estruturas de edifícios utilizando amortecedores viscosos**”, Julho 2010.

Miguel, L. F. F., “**Estudo teórico e experimental de amortecedores de vibração por atrito**”, Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Março, 2002.

Mostaghel, N.; Davis T., “**Representations of Coulomb Friction for Dynamic Analysis**”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, V.26, N. 5, p. 541 – 548, 1997.

Puglia, F. P., “**Desenvolvimento de uma rotina computacional para determinação da resposta dinâmica de estruturas**”. Monografia trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica UFRGS – 2012.