

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

OTIMIZAÇÃO DO USO DE AMORTECEDORES POR ATRITO PARA CONTROLE DE
VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS

por

Lucas Francisconi Poggia

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 2017



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

OTIMIZAÇÃO DO USO DE AMORTECEDORES POR ATRITO PARA CONTROLE DE
VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS

por

Lucas Francisconi Poggia

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. Edson Hikaro Aseka

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Flávia Cristina Francisconi e Mario Roberto Salis Pogleia, pelo apoio, incentivo e educação que me foram dados durante a minha formação, certamente sem as quais jamais teria atingido os objetivos que almejei. Agradeço a eles também pelo incansável esforço para me propiciar a calma, tranquilidade e disponibilidade para me focar apenas no que estava fazendo, sem me preocupar com assuntos financeiros domésticos.

Agradeço aos meus avós, Alceu Francisconi, Ivone Gema Francisconi e Iara Salis Pogleia, e por meio destes estendo meus agradecimentos a todos os outros familiares, pelos conselhos e apoios que me foram dados até este momento, sem os quais nada haveria acontecido.

Agradeço a todos aqueles que estiveram presentes nesta caminhada, amigos, professores e conhecidos, muitos que influenciaram na pessoa que sou hoje, alguns se perderam com o tempo e não possuo mais o contato de outrora, mas que não serão esquecidos por isto.

Agradeço a minha namorada Ana Paula Pagnoncelli pela companhia nesta jornada, o carinho e o amor que me dedica abre rios e move montanhas, e as discussões que me fazem refletir sobre erros, os quais certamente cometerei mais no futuro, e me permitem percebê-los e corrigi-los.

Agradeço a minha orientadora, Professora Letícia Fleck Fadel Miguel, pela paciência, dedicação e atenção dadas a orientação, que impactaram decisivamente no resultado deste trabalho de conclusão. Por meio da minha orientadora, estendo meus agradecimentos a todos os professores que tive durante o curso.

Ao meu avô Gelim Francisco Pogleia, que embora tenha me deixado precocemente, certamente me acompanhou durante esta jornada.

POGLIA, L. F. Otimização do uso de amortecedores por atrito para controle de vibrações de estruturas. 2017.19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O presente texto busca encontrar a solução ótima da posição de amortecedores e a sua força de atrito, para reduzir danos a estruturas causados por eventos sísmicos. Para tanto, uma rotina numérica foi desenvolvida em MATLAB®. O abalo sísmico foi simulado no domínio da frequência, com o espectro de Kanai-Tajimi que, foi posteriormente transformado para o domínio do tempo pelo método proposto por Shinozuka e Jan, o que gera as acelerações impostas pelo terremoto. As matrizes de massa e rigidez foram geradas pelo método de elementos finitos e o método de Rayleigh foi empregado para determinar a matriz de amortecimento viscoso da estrutura. O método de Newmark foi escolhido para realizar a integração numérica, enquanto o algoritmo meta heurístico SGA foi escolhido para otimizar a posição e a força de atrito dos amortecedores, por ser um método novo e de rápida convergência. A região escolhida para a tomada das propriedades do solo foi El Centro por ter alta densidade populacional e propensão a eventos sísmicos. As otimizações indicam uma pequena flexibilidade nos andares para respeitar o posicionamento ótimo dos amortecedores, elas também indicam que a força aplicada ao sistema de amortecimento é proporcional à intensidade do evento sísmico. A rotina, em associação com o algoritmo SGA, foi capaz de refinar as soluções encontradas na literatura, chegando a reduzir as respostas em termos de deslocamentos relativos entre andares (*inter story drift*) em 70%, em comparação com outros estudos já realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Amortecedor por atrito, Otimização, Método dos elementos finitos, Matlab, Vibrações, Evento sísmico.

POGLIA, L. F. Optimization of the use of friction dampers for structures' vibration control. 2017. 19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The following paper searches the optimal solution for dampers' position and friction force, to reduce structural damage caused by seismic events. To reach this goal, a numerical routine was developed on MATLAB®. The seismic activity was simulated on frequency domain with the Kanai-Tajimi spectrum, which was transformed to the time domain utilizing the method proposed by Shinozuka and Jan, which generates the accelerations imposed by the earthquake. Mass and stiffness matrices were created utilizing the finite element method and the Rayleigh method was employed to calculate the viscous damping matrix. Newmark's method was used to realize the numerical integration, while the meta-heuristic algorithm SGA was chosen to optimize the dampers' position and friction force for being a new and quickly convergent method. The region chosen for analysis was El Centro due to its high populational density as well as tendency for seismic events. The optimizations show some flexibility for the optimal placement of the dampers on the structure's floors, they also indicate that the force applied to the damping system is proportional to the seismic event intensity. The routine, in association with the algorithm SGA, was capable of refining the solutions found on literature, reaching about 70% of inter story drift reduction, in comparison with optimized results from different studies.

KEYWORDS: Friction dampers, Optimization, Finite element method, Matlab, Vibrations, Seismic event.

Lista de Tabelas

Tabela 6.1 – Frequências naturais da rotina desenvolvida vs. ANSYS.....	10
Tabela 6.2 – Comparação das respostas dinâmicas da rotina com as de Miguel et al. (2016) .	10
Tabela 6.3 – Comparação dos resultados da otimização com aqueles de Miguel et al. (2016)	11
Tabela 6.4 – Resultados dinâmicos sem amortecimento para El Centro	12
Tabela 6.5 – Resultados da otimização para El Centro	12
Tabela 6.6 – Resultados dinâmicos para a segunda edificação sem amortecimento	13
Tabela 6.7 – Resultados da otimização para a segunda edificação.....	13
Tabela A.1 – Perfis da estrutura de Murren e Khandewal (2013).	16
Tabela A.2 – Perfis da estrutura de Miguel et al., (2016).	16
Tabela I.1 – Respostas dinâmicas para um sistema com três amortecedores em posições aleatórias, e um com amortecedores em todos os andares.....	19

Lista de Figuras

Figura 5.1 – Prédios de Miguel et al. (2016) (a) e de Murren e Khandelwal (2013) (b).	8
Figura 6.1 – Gráfico da convergência do deslocamento relativo máximo com parâmetros de Miguel et al. (2016).....	11
Figura 6.2 – Gráfico da convergência do deslocamento entre andares com parâmetros de El Centro	12
Figura 6.3 – Gráfico das respostas do deslocamento entre andares com parâmetros de El Centro e estrutura de Murren (2013).	13
Figura C.1 – Mapa do pico de aceleração de solo para a região considerada.	18
Figura I.1 – Gráficos da aceleração para o sismo com parâmetros de Miguel et al., (2016) (a) e de El Centro (b).....	Error! Bookmark not defined.
Figura I.2 - Sistema de amortecimento com a posição otimizada referente a terceira simulação da otimização com estrutura e parâmetros de Miguel et al., (2016).....	20

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1 Equação do Movimento	2
4.2 Método de Elementos Finitos	3
4.3 Amortecimento Viscoso de Rayleigh	4
4.4 Método de Newmark	4
4.5 Sistemas com amortecimento por atrito	5
4.6 Algoritmos de otimização meta-heurísticos	5
4.6.1 Algoritmo SGA (Search Group Algorithm)	5
5. METODOLOGIA	6
5.1 Geração do Sinal	6
5.1.1 Entrada de Dados	6
5.1.2 Pré-Processamento	7
5.2 Construção da estrutura	7
5.2.1 Modelo MATLAB	7
5.2.2 Modelo ANSYS	8
5.3 Análise Dinâmica	9
5.3.1 Aplicação do amortecimento por atrito	9
5.3.2 Integração numérica	9
5.4 Otimização	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
6.1 Validação das edificações	10
6.2 Validação da rotina de cálculo	10
6.3 Otimização	11
6.3.1 Otimização com parâmetros de El Centro	11
6.3.2 Otimização com parâmetros de El Centro e outra edificação	12
7. CONCLUSÕES	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO A	16
ANEXO B	17
ANEXO C	18
APÊNDICE I	19

1. INTRODUÇÃO

É conhecido na engenharia que o controle de estruturas é útil para mitigar perigos naturais e melhorar a segurança dos sistemas estruturais. De acordo com Symans and Constantinou (1999), existem três tipos de sistemas de dissipação de energia: Ativos, Passivos e Semiativos. Sabe-se que estes sistemas possuem uma boa performance no quesito de reduzir as amplitudes de vibração, porém, ainda pode-se avançar na pesquisa de otimização destes dispositivos.

A utilização de sistemas passivos, como o amortecedor de massa sintonizada (AMS), e amortecedores viscosos e de fricção, são mais simples e baratos do que sistemas ativos e semiativos. Nas últimas décadas, vem crescendo o uso de sistemas passivos para controle de respostas dinâmicas. Por exemplo, 143 amortecedores por atrito estão em uso na biblioteca McConnel da Universidade de Concordia em Montreal, Canadá. Outro bom exemplo são os 260 amortecedores visco elásticos utilizados no Columbia SeaFirst Building em Seattle, nos EUA. [Constantinou et al,1997].

Mesmo os dissipadores por atrito já existindo há aproximadamente 35 anos e possuindo algumas vantagens com relação aos sistemas AMS e viscosos, poucos estudos foram realizados na área de otimização simultânea dos seus parâmetros de força e localizações. Algumas vantagens destes amortecedores são o baixo preço de construção e instalação e a alta capacidade de dissipação de energia, porém, a sua característica não-linear dificulta os cálculos estruturais [Miguel et al.,2016].

Acontecimentos recentes mostram a necessidade de se mitigar danos causados por terremotos, dentre estes, tem-se os que abalaram o centro da Itália em 2016, no Nepal em 2015 e ainda o que causou o acidente nuclear em 2011, no Japão.

A otimização de recursos, tendência mundial nascida há alguns anos, fez surgir a necessidade de se fazer mais com cada vez menos recursos empregados, notadamente para problemas com alto grau de complexidade é humanamente impossível de se realizar sem o auxílio de processamento computacional. Isto leva ao melhoramento contínuo de algoritmos meta-heurísticos que são baseados em teorias evolutivas para encontrar uma solução otimizada.

Este trabalho se originou destes fatos e busca aumentar o conhecimento em uma área que mistura engenharia e otimização pouco desbravada.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo encontrar a posição e força de atrito otimizadas para amortecedores de vibração por atrito, que apresentem a melhor resposta dinâmica de estruturas comparando com os resultados encontrados na literatura para resultados sem atrito e com outras disposições de amortecedores, em termos do deslocamento máximo dos andares e do deslocamento relativo entre eles (*drift*). Para tanto, uma rotina computacional foi desenvolvida de forma a realizar os cálculos estruturais, e um algoritmo meta heurístico foi utilizado para realizar a otimização.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para gerar o sismo aleatório, o espectro de Kanai, 1961, e Tajimi,1960, foi utilizado. Este modelo utiliza um ruído branco gaussiano filtrado, usando características próprias do solo, como a razão de amortecimento e a frequência natural e o pico de aceleração do solo (*peak ground acceleration*, PGA), que é definido pelas normas técnicas de cada localização. Este método apresenta a aceleração como um processo aleatório, que vem sendo corriqueiramente utilizado em análises de engenharia para estruturas sob excitação sísmica.

Como o método de Kanai-Tajimi gera um espectro no domínio da frequência, utiliza-se o método proposto por Shinozuka e Jan, 1972, para passá-lo ao domínio do tempo, o que permite aplicá-lo a estruturas para calcular os esforços gerados. Este método utiliza um somatório de

cossenos com frequências espaçadas equilibradamente e ângulos de fase gerados aleatoriamente.

No quesito determinação de parâmetros ótimos, múltiplos estudos foram realizados para a aplicação dos amortecedores de massa sintonizada [por exemplo, Desu et al., 2006; Wang et al., 2009; Mohebbi et al., 2013; Miguel et al., 2013] destes, pode-se destacar o artigo de Mohebbi et al., 2013, que utilizaram o espectro de Kanai-Tajimi e o método de Shinozuka para gerar um sismo aleatório o qual foi posteriormente aplicado a um edifício. Os resultados foram comparados com a edificação sem os amortecedores, e indicaram uma melhora considerável dado a simplicidade do método.

De acordo com Constantinou et al., 1997, a determinação da resposta de um amortecedor por atrito é complexa devido ao seu comportamento não-linear. Keightley (1977) foi, aparentemente, o primeiro a considerar estes aparatos para aplicações em estruturas fazendo uma analogia com freios automotivos. O objetivo deste tipo de amortecedor é, segundo Pall and Marsh (1982), “frear ao invés de quebrar”. Mostaghel e Davis (1997) sugeriram a aproximação deste comportamento por uma gama de funções contínuas, dentre as quais se destaca a função tangente hiperbólica $f(a, \dot{x}) = \text{Tanh}(a\dot{x})$, Miguel (2002) sugeriu que uma boa aproximação para o problema do atrito se atinge ao utilizar $a = 1000$.

Uma nova análise, desta vez considerando otimização robusta, foi realizada por Miguel et al. (2016), que realizaram um estudo de amortecedores por atrito para controle das respostas de uma estrutura submetida a um sismo. Neste estudo, também foi utilizado o método de Shinozuka e Jan, aplicado ao espectro de Kanai-Tajimi com parâmetros utilizados por Mohebbi et al. para a geração do evento sísmico aleatório. Os autores obtiveram resultados excelentes, conseguindo uma redução de 70% para o deslocamento máximo médio dos andares.

Centenaro (2015) utilizou um modelo em elementos finitos, este autor empregou os parâmetros propostos pela NBR 15421/2006 para as diferentes regiões do Brasil, para estudar o impacto destes na geração do sismo e assim comparar as respostas dinâmicas de uma edificação.

Segundo Gonçalves et al. (2015) uma gama de algoritmos meta-heurísticos existe, e novos são constantemente desenvolvidos. Em sua busca para melhorar os resultados de estruturas treliçadas, os autores desenvolveram o algoritmo meta-heurístico SGA (*Search Group Algorithm*) que encontrou resultados superiores aqueles utilizados por outros autores em 5 dos seus 6 casos de estudo.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Equação do Movimento

O movimento de um sistema mecânico com n-graus de liberdade (n-GDL) com amortecedor por atrito pode ser definido de acordo com a seguinte equação matricial. [Constantinou et al, 1997].

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t) + \mathbf{K}\vec{x}(t) + \vec{\mathbf{F}}_{\text{at}}\text{sgn}(\dot{\vec{v}}(t)) = \mathbf{M}\mathbf{B}\ddot{y}(t) \quad (4.1)$$

Onde t é o tempo [s], $\vec{x}(t)$ é o vetor de deslocamentos do sistema [m], $\dot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de velocidades do sistema [m/s], $\ddot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de acelerações do sistema [m/s²], $\ddot{y}(t)$ é o vetor de acelerações impostas pelo sismo [m/s²], \mathbf{M} é a matriz de massa do sistema, \mathbf{K} é a matriz de rigidez do sistema, \mathbf{C} é a matriz de amortecimento do sistema, $\vec{\mathbf{F}}_{\text{at}}$ é o vetor de forças do amortecedor por atrito, \mathbf{B} é a matriz de acoplamento do sistema e $\text{sgn}(\dot{\vec{v}}(t))$ é a função sinal da velocidade relativa dos nós da estrutura que é utilizada para determinar a direção da força de atrito em cada instante de tempo t .

4.2 Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos é uma técnica de análise numérica para obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas de engenharia, onde não existem soluções analíticas [Awruch e Di Rado, 1997].

Existem diferentes tipos de elementos para se utilizar neste tipo de análise, neste trabalho foi utilizado o elemento de viga tipo pórtico plano, que segundo os autores possuem as seguintes matrizes locais:

$$M_t = \rho A L \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 13/35 & 11L/210 & 0 & 9/70 & -13L/420 \\ 0 & 11L/210 & L^2/105 & 0 & 13L/420 & -L^2/140 \\ 1/6 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 9/70 & 13L/420 & 0 & 13/35 & -11L/210 \\ 0 & -13/420 & -L^2/140 & 0 & -11L/210 & L^2/105 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$K_t = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Onde, ρ é a massa específica do material [kg/m^3], A é a área da seção transversal do elemento [m^2], L é o comprimento do elemento [m], E é o módulo de elasticidade do material [Pa], I é o momento de inércia [m^4], M_t a matriz local de massa e K_t a matriz local de rigidez.

As matrizes acima definem o comprimento do elemento no seu plano local, em certas ocasiões é necessário rotacioná-los para adaptá-los ao plano global do sistema em análise, para tal utiliza-se a seguinte matriz de rotação:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Onde R é a matriz de rotação e θ é o ângulo entre o sistema de coordenadas local e o sistema global. A rotação é feita da seguinte forma:

$$M_{rot} = R^t * M_t * R; K_{rot} = R^t * K_t * R \quad (4.5)$$

Onde R^t é a matriz R transposta, M_{rot} e K_{rot} são as matrizes de massa e rigidez rotacionadas, respectivamente.

Para obterem-se as matrizes globais de massa e rigidez, deve-se realizar uma sobreposição linear das matrizes locais, somando-se a contribuição de cada elemento em um determinado nó e uma determinada direção.

4.3 Amortecimento Viscoso de Rayleigh

Segundo Ripper (2007), a matriz de amortecimento viscoso de um sistema pode ser definida pela seguinte equação:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4.6)$$

Onde M e K são as matrizes globais de massa e rigidez, respectivamente. As constantes α e β são inerentes ao sistema, enquanto a primeira é ligada as perdas por atritos das componentes inerciais e a segunda é relacionada ao amortecimento interno e histerese do material, respectivamente. Figueiredo (2005) sugere que estas constantes sejam determinadas em função da razão de amortecimento do sistema para os dois primeiros modos de vibração.

Miguel (2006) demonstra que as frequências naturais de vibração podem ser determinadas a partir de uma análise modal do sistema, que é feita através do cálculo dos autovalores da sua matriz dinâmica [D]:

$$D = M^{-1} * K \quad (4.7)$$

Os autovalores desta matriz serão as frequências naturais ao quadrado (ω_{ni}^2) e os auto vetores os modos de vibração da estrutura.

As constantes α e β estão ligadas aos dois primeiros modos de vibração, ou seja, aqueles com menores frequências naturais e à razão de amortecimento (ξ) do sistema. As constantes são dadas pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{n1}^2 \\ 1 & \omega_{n2}^2 \end{bmatrix}^{-1} * 2 * \xi * \begin{bmatrix} \omega_{n1} \\ \omega_{n2} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

4.4 Método de Newmark

Os métodos para resolução de equações diferenciais complexas, como a de movimento do caso deste trabalho, devem passar por uma integração numérica devido à dificuldade ou inexistência de uma solução analítica. Existem atualmente dois tipos de solução, implícitas e explícitas, dentre os diversos métodos existentes que integram estas duas categorias, dois se destacam: o Método de Newmark para os implícitos e o Método das Diferenças Finitas para os explícitos.

Integrações implícitas aplicam a equação do movimento $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{F}_{at} = \mathbf{F}$ para o tempo $t + \Delta t$, para calcular as respostas neste instante, dependendo a sua convergência e precisão da qualidade das equações adotadas para representar a aceleração, velocidade e deslocamento.

Segundo Groehs (2005), o método de Newmark é o mais eficaz entre os métodos implícitos, se utilizado com os parâmetros corretos, quando comparado ao Método das Diferenças Finitas apresenta uma pequena vantagem: ser incondicionalmente estável, quando aplicado corretamente.

O algoritmo de cálculo, para o método de Newmark, é o seguinte:

$$\begin{aligned} \vec{x}(t_{i+1}) = & (a_0\mathbf{M} + a_5\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} * \{\vec{\mathbf{F}}(t_{i+1}) - \vec{\mathbf{F}}_{at} + \mathbf{M} * [a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] \\ & + \mathbf{C}[a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)]\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5 * [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.10)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0 * [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.11)$$

Onde $\vec{x}(t_i)$, $\dot{\vec{x}}(t_i)$ e $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ são, respectivamente, o deslocamento, a velocidade e a aceleração de um dado elemento no instante t_i , $\vec{x}(t_{i+1})$, $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$, $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$, $\vec{\mathbf{F}}(t_{i+1})$ e $\vec{\mathbf{F}}_{at}$ são,

respectivamente, o deslocamento, a velocidade, a aceleração, a força externa e a força de atrito de um dado elemento no instante $t_i + \Delta t$. As constantes a_k são os coeficientes do método de Newmark, que são definidos pelas equações:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} \quad (4.12)$$

$$a_1 = \frac{1}{\alpha \Delta t} \quad (4.13)$$

$$a_2 = \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \quad (4.14)$$

$$a_5 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} \quad (4.15)$$

$$a_6 = \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \quad (4.16)$$

$$a_7 = \frac{\Delta t}{2} * \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \quad (4.17)$$

Newmark, encontrou parâmetros que estabilizam este método incondicionalmente, os quais são $\delta=0,5$ e $\alpha=0,25$, [Groehs, 2005]. Como é mostrado na equação 4.9 é necessário conhecer os valores de deslocamento, da velocidade, da força externa, da força de atrito para o tempo inicial, a aceleração que também é necessária, pode ser calculada com a seguinte equação:

$$\vec{x}(t_0) = \mathbf{M}^{-1} * [\mathbf{F}(t_0) - \mathbf{F}_{at} - \mathbf{C}\vec{x}(t_0) - \mathbf{K}\vec{x}(t_0)] \quad (4.18)$$

4.5 Sistemas com amortecimento por atrito

Os amortecedores de fricção são sistemas histeréticos, isto é, que dissipam energia por um mecanismo que independe da carga aplicada. (Constantinou et al., 1998).

Ainda de acordo com Constantinou, existem diversas formas de atrito que poderiam ser utilizadas para mitigar danos causados a estruturas durante perturbações ambientais. Para este trabalho, serão utilizados amortecedores que baseiam a sua dissipação de energia na fricção gerada entre dois corpos sólidos que deslizam entre si.

Segundo Constantinou, a dissipação de energia de um amortecedor por atrito se baseia no trabalho irreversível que é realizado pela força tangencial requerida para deslizar um corpo sobre outro. Para garantir a integridade do projeto, é importante que a força aplicada aos amortecedores não diminua com o passar do tempo.

4.6 Algoritmos de otimização meta-heurísticos

De acordo com Gonçalves et al. (2015), algoritmos meta-heurísticos devem possuir duas capacidades, exploração e refinamento, para serem capazes de encontrar soluções razoáveis. A exploração pode ser descrita como a capacidade do algoritmo em encontrar regiões promissoras de respostas, enquanto o refinamento pode ser considerado a habilidade em encontrar a melhor solução dentro de cada uma destas regiões.

4.6.1 Algoritmo SGA (*Search Group Algorithm*)

Para o estudo de treliças de Gonçalves et al. (2015), os autores decidiram desenvolver um novo algoritmo, na tentativa de melhorar as respostas encontradas em outros artigos. Neste

âmbito, os autores desenvolveram o algoritmo SGA que será utilizado neste trabalho. Gonçalves et al. (2015) propõem um pseudocódigo do algoritmo para facilitar a sua compreensão, como mostrado a seguir:

Passo (1) inicializar os parâmetros do algoritmo:

$$k = 0, it_{max}, it_{max}^{global}, \alpha^k, \alpha_{min}, b, n_g, n_{mut}, n_{pop}$$

Passo (2) gerar a população inicial P;

Passo (3) criar o grupo inicial de pesquisa R selecionando os n_g melhores indivíduos da população inicial através de uma seleção por torneio;

Passo (4) substituir n_{mut} indivíduos por novas entradas geradas a partir daquelas substituídas;

Passo (5) construir as famílias de soluções com cada entrada do grupo de pesquisa R;

Passo (6) selecionar o novo grupo de pesquisa com a seguinte regra:

- Se $k < it_{max}^{global}$ forma-se um novo grupo de pesquisa R com os melhores membros de cada família.
- Caso contrário: o novo grupo de pesquisa R é formado pelos melhores n_g indivíduos da população.

Passo (7) atualizar α^{k+1} ;

Passo (8) incrementar $k = k+1$, caso $k \geq it_{max}$, ir ao passo 9, senão retornar ao passo 4;

Passo (9) solução do problema será a primeira entrada do grupo de pesquisa R.

5. METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido foi realizado em 5 fases. A primeira foi a geração do evento sísmico aleatório, no domínio da frequência, através do espectro de potência de Kanai-Tajimi, que foi transformado na matriz de acelerações, no domínio do tempo, através do método proposto por Shinozuka e Jan (1972). A segunda, consistiu na geração de duas estruturas em elementos finitos utilizando as propriedades do material e geométricas dos perfis, para gerar matrizes de massa, rigidez e amortecimento.

A validação das estruturas constitui a terceira etapa, que foi realizada comparando os valores de frequências naturais calculados com a rotina desenvolvida em MATLAB com aqueles encontrados pelo *software* comercial ANSYS. Na quarta etapa, foi feita a validação do método de integração numérica, da aplicação dos amortecedores e da geração da matriz de amortecimento proporcional de Rayleigh, comparando os resultados de deslocamento máximo e de deslocamento relativo entre andares (*inter story drift*) com aqueles encontrados por Miguel et al. (2016).

Finalmente na quinta e última etapa, o código SGA (*Search Group Algorithm*) foi adaptado e implementado na rotina de cálculo, o que permitiu encontrar os parâmetros ótimos buscados pelo trabalho.

Após cada rodada de otimização, a combinação encontrada foi submetida a mil sismos gerados aleatoriamente para verificar que em nenhuma das iterações o deslocamento relativo superava o valor de $0,01 \cdot h$, onde h é a altura, em metros, de cada andar. Esta resposta dinâmica é definida pela norma americana ASCE 7 como critério de falha crítico para estruturas submetidas a eventos sísmicos.

5.1 Geração do Sinal

Gerar o evento sísmico foi a primeira atividade realizada dentro da rotina desenvolvida, esta etapa pode ser separada em 2 partes: entrada de dados e processamento.

5.1.1 Entrada de Dados

Na entrada do tempo e do vetor de frequências da rotina, utilizou-se os mesmos dados utilizados por Miguel et al. (2016). A duração adotada para o sismo foi de $t = 20s$, com um incremento de $\Delta t = 0,005s$ o que resulta em 4000 entradas de aceleração e iterações de cálculo. Para o vetor de frequências utilizou-se um valor mínimo de $f = 0,005 Hz$ e máximo de $f = 25 Hz$,

com um incremento de $\Delta f = 0,005 \text{ Hz}$. Para a validação, utilizaram-se os seguintes valores para o solo: frequência natural do solo $\omega_g = 15 \text{ rad/s}$, pico de aceleração do solo (*peak ground acceleration*) $pga = 0,35g$, g é a aceleração da gravidade e tem valor de $9,81 \text{ m/s}^2$, e razão de amortecimento do solo $\xi_g = 0,3$.

Para aproximar a otimização de uma situação real, os parâmetros da cidade de El Centro foram utilizados, onde a frequência natural do solo e a razão de amortecimento são: $\omega_g = 19 \text{ rad/s}$ e $\xi_g = 0,65$ segundo Falsone e Alibrandi (2015), o pga desta região é definido pela norma americana ASCE/Sei 7-10, e tem valor $pga = 0,7g$, o gráfico para os valores de pga do oeste americano pode ser visto no anexo C.1.

5.1.2 Processamento

Esta etapa consiste na geração efetiva do sinal, através do método de Kanai-Tajimi, que é descrito segundo equacionamento abaixo:

$$S_w(\omega) = S_0 * \left[\frac{\omega_g^4 + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2} \right]; \quad (5.1)$$

$$S_0 = \left[\frac{0.03 * \xi_g}{\pi * \omega_g (4\xi_g^2 + 1)} \right]; \quad (5.2)$$

Onde S_0 é a densidade espectral constante e $S_w(\omega)$ é a densidade espectral de potência no domínio da frequência, os parâmetros ω_g e ξ_g foram definidos anteriormente e ω é a frequência em rad/s. Terminada esta parte, o sinal deve ser transformado do domínio da frequência para o domínio do tempo, isto foi realizado através do método de Shinozuka e Jan (1972), pela equação:

$$\vec{y}_g(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_w f_k \Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \vartheta_k) \quad (5.3)$$

Onde $\vec{y}_g(t)$ é o sinal de acelerações resultante impostas pelo sismo, N é o número de intervalos da banda de frequências, ϑ_k é o ângulo de fase gerado aleatoriamente entre 0 e 2π com distribuição de probabilidade uniforme e Δf_k o intervalo de frequência definido na Seção 5.1.1. Finalmente, deve-se normalizar o vetor obtido, e multiplica-lo pelo pico de aceleração do solo, o que resultará na excitação do sistema em estudo.

5.2 Construção da estrutura

5.2.1 Modelo MATLAB

Dois estruturas foram utilizadas, um edifício adaptado de Murren e Khandelwald (2013) e a estrutura utilizada por Miguel et al., (2016). A segunda edificação serviu para validar a rotina de integração numérica, enquanto a primeira foi utilizada para estudar o impacto das estruturas na resposta otimizada. As duas edificações foram modeladas com o método de elementos finitos utilizando-se elementos tipo pórtico plano.

O material escolhido para o estudo foi o aço MR-250 por ser amplamente utilizado em construções deste tipo. De tabelas para aços obtêm-se as seguintes propriedades: módulo de elasticidade $E = 200 \text{ GPa}$, tensão de escoamento $\sigma = 250 \text{ MPa}$, massa específica $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ e razão de amortecimento crítico $\xi = 0,007$. Cada um dos prédios possui a sua própria estrutura metálica, na Figura 5.1 são apresentados os perfis utilizados nos prédios, os quais podem ser vistos de forma detalhada, nos apêndices, nas Tabela A.1 e A.2 com as suas propriedades geométricas.

Aplicando-se estas condições ao método de elementos finitos descrito na Seção 4.2, resulta um total de 70 elementos distintos, para as duas estruturas. Para cada um destes uma matriz local de massa e uma de rigidez são geradas. Nestes 70 elementos, apenas 44 nós são gerados, devido as suas conexões, que são consideradas na realização da superposição dos efeitos na geração as matrizes globais. Finalmente, aplicam-se as restrições impostas à edificação, que neste caso é apenas o engastamento da base.

Para gerar a matriz de amortecimento pelo método de Rayleigh descrito na Seção 4.3, deve-se realizar a análise modal das estruturas de forma a calcular as suas frequências naturais, que serão posteriormente comparadas com aquelas encontradas pelo *software* comercial ANSYS.

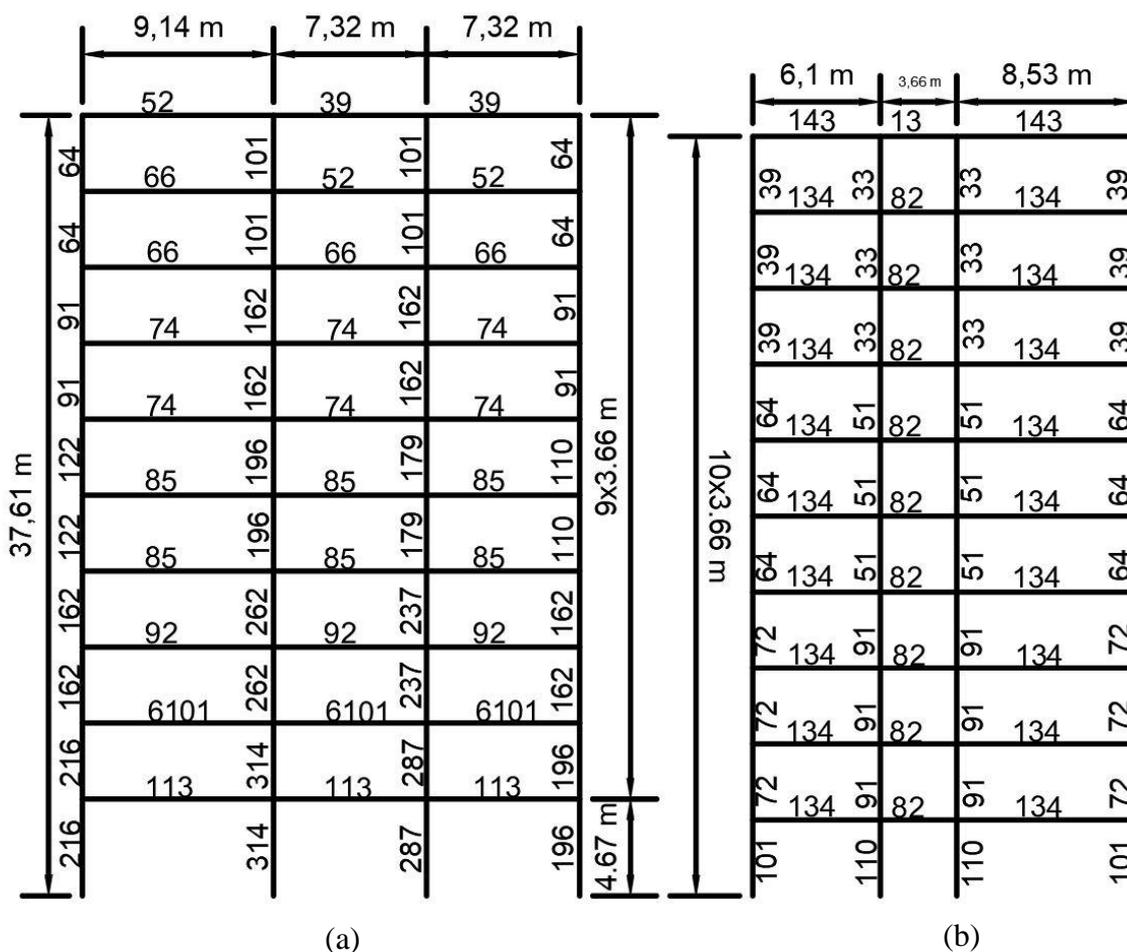


Figura 5.1 – Prédios de Miguel et al. (2016) (a) e de Murren e Khandelwal (2013) (b).

5.2.2 Modelo ANSYS

Conforme descrito no início deste capítulo, a validação das edificações foi realizada comparando as frequências naturais obtidas pelo modelo MATLAB com aquelas obtidas pelo modelo ANSYS. Para tal, um código APDL foi realizado utilizando-se o elemento 2D BEAM3®, que foi escolhido por sua natureza bidimensional, o mesmo utilizado pela rotina numérica.

5.3 Análise Dinâmica

5.3.1 Aplicação do amortecimento por atrito

Com as estruturas devidamente validadas, foi implementado o sistema de amortecimento por atrito descrito em 4.5. A sua correta modelagem é um dos pilares para um bom resultado da otimização. A solução utilizada é aquela proposta por Miguel et al., (2016) de se utilizar a função sinal, que pode ser representada segundo a função abaixo:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Esta função foi aplicada à velocidade relativa entre cada nó e o centro do amortecedor, o que retorna o sentido da tendência de deslizamento entre os andares.

Para se obter o sentido da força, foi necessário apenas modelar a força para se opor a esta tendência.

5.3.2 Integração numérica

Com o sistema de amortecimento por atrito, as matrizes globais de amortecimento, massa e rigidez modelados, comparou-se os resultados de deslocamento máximo e deslocamento relativo médios obtidos pela rotina com aqueles encontrados por Miguel et al, (2016) para validar o código de integração numérica.

5.4 Otimização

A última etapa do trabalho consistiu na otimização do sistema estudado, para o qual as variáveis de projeto são a força de atrito para cada amortecedor, que são variáveis contínuas, as posições dos amortecedores e o número de amortecedores, que são variáveis discretas. Como a força de atrito e a posição dos amortecedores foram otimizadas simultaneamente, o algoritmo teve que trabalhar com variáveis discretas e contínuas. Sendo assim, a posição dos amortecedores foi modelada como um vetor onde cada entrada representa um andar do prédio e que possui entradas zero ou um, correspondendo aonde os amortecedores foram posicionados.

Algumas restrições foram impostas ao sistema como: limites inferior e superior para a força aplicada e posições permitidas para os amortecedores, que são nos andares do vão central da estrutura. O número máximo de amortecedores, por sua vez, foi escolhido seguindo os resultados de Miguel et al., (2016).

Segundo Miguel et al, (2016) e Gonçalves et al, (2015) um problema de otimização pode ser definido da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} \text{Encontrar} & \vec{x} = [F_{at1}, \dots, F_{atn}, P_1, \dots, P_n] \\ \text{Minimiza} & Y(\vec{x}) = Fo(\vec{x}) \\ \text{Sujeito a} & F_{at}^{min} \leq F_{at}^i \leq F_{at}^{max}, i = 1, \dots, n_a \end{array}$$

Onde $Fo(\vec{x})$ é a função objetivo, que representa a minimização da resposta dinâmica, F_{at}^{min} , F_{at}^i , F_{at}^{max} são, respectivamente, as forças de atrito mínima e máxima admissíveis do amortecedor i , P_n são as posições dos amortecedores e n_a é o número de amortecedores.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em três situações distintas, a primeira com a mesma estrutura, os mesmos parâmetros e um algoritmo diferente daquele utilizado por Miguel et al., (2016) para comparar os resultados da otimização, a segunda utilizando os parâmetros do solo da região escolhida, porém utilizando a mesma estrutura e a última com uma edificação diferente. As respostas dinâmicas são apresentadas na forma dos valores máximos das médias dos deslocamentos absolutos e relativos considerando-se a contribuição de cada um dos quatro nós existentes por andar.

6.1 Validação das edificações

As edificações foram validadas conforme descrito pelo procedimento em 5.2, sendo comparadas as frequências naturais calculadas pela rotina numérica, e pelo *software* comercial ANSYS®. Foram calculadas suas 10 primeiras frequências naturais para validá-los as quais são apresentadas na Tabela 6.1. O prédio 1 se refere ao de Miguel et al. (2016) e o Prédio 2 ao de Murren e Khandelwal (2013).

Tabela 6.1 – Frequências naturais da rotina desenvolvida vs. ANSYS

Modos de Vibração	Frequências Naturais (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prédio 1	2,36	6,04	9,96	14,58	20,12	26,16	29,61	31,57	32,96	35,71
ANSYS Prédio 1	2,36	6,04	9,95	14,56	20,09	26,12	29,60	31,56	32,90	35,68
Prédio 2	2,29	6,04	10,11	14,38	17,85	18,00	21,75	22,04	24,57	26,26
ANSYS Prédio 2	2,29	6,04	10,11	14,38	17,85	18,00	21,74	22,03	24,55	26,23

Percebe-se que os valores da rotina e os do *software* ANSYS são coerentes, podendo-se, com isso, validar a rotina de geração das estruturas.

6.2 Validação da rotina de cálculo

Conforme a Seção 5.3.2, para validar a rotina de integração, compararam-se os resultados encontrados de deslocamento relativo máximo médio e de deslocamento absoluto máximo médio com aqueles encontrados por Miguel et al, (2016), conforme é mostrado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Comparação das respostas dinâmicas da rotina com as de Miguel et al. (2016)

	Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3		Miguel et al, (2016)	
	D* Médio [m]	D médio [m]	D* Médio [m]	D médio [m]	D* Médio [m]	D médio [m]	D* Médio [m]	D médio [m]
Sem amortecedores	0,0211	0,1514	0,0161	0,1101	0,0256	0,1762	0,0195	0,1458
Com três amortecedores	0,0058	0,0394	0,0051	0,0372	0,0068	0,0429	0,0055	0,0410

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

Os resultados apresentados na Tabela 6.2 foram escolhidos de forma a representarem o intervalo de respostas homogeneamente. Diversas simulações foram realizadas para eleger valores pertencentes às parcelas superiores, intermediárias e inferiores deste espectro. Com os resultados acima, valida-se a aplicação dos amortecedores por atrito, e o método de integração numérica.

6.3 Otimização

Conforme descrito no início do capítulo, primeiramente será apresentada a comparação dos resultados encontrados desta rotina, com aqueles de Miguel et al, (2016), conforme se mostra na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Comparação dos resultados da otimização com aqueles de Miguel et al. (2016)

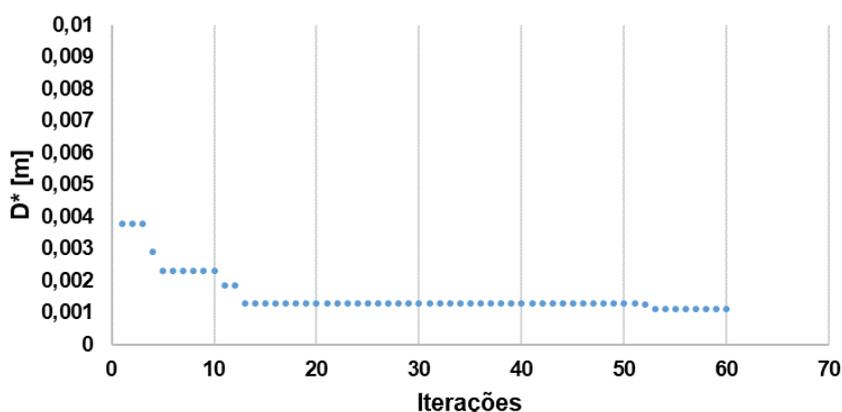
Simulação	Vetor Posição dos Amortecedores	Força de atrito (kN)	D médio [m]	D* Médio [m]	ΣF [kN]	Nº de falhas
1	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1]	37,97;11,35;12,32	0,0049	0,0015	61,6400	0
2	[0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1]	29,85;17,64;13,86	0,0042	0,0015	61,3500	0
3	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1]	23,25; 18,40; 12,52	0,0053	0,0016	54,1700	0
Miguel et al (2016)	[1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]	152,507; 128,28; 126,41	0,0410	0,0055	407,1970	4

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

Os resultados encontrados apresentam uma melhora de 75%, no desempenho dinâmico da estrutura, alterando a posição dos amortecedores e a força de atrito aplicada neles. A redução nas forças pode permitir a utilização de amortecedores menos robustos. Além disto, os resultados indicam que não existe uma posição “perfeita” para os amortecedores, todavia, pode-se perceber uma tendência em certas zonas da edificação, para as três simulações o último andar possui um amortecedor, sendo os outros dois posicionados um nos andares centrais, e o outro em andares altos. Percebe-se ainda uma convergência do somatório das forças aplicadas aos amortecedores, tendo esta ficado próxima à 60 kN nas três simulações.

Duas principais explicações podem ser fornecidas para esta melhora, a primeira é a diferença entre as funções objetivos, neste trabalho foi utilizada a redução do deslocamento relativo entre andares, enquanto que no estudo de Miguel et al. (2016) foi criada uma função de probabilidade de falha. A segunda é a utilização de um modelo determinístico para a geração dos prédios analisados e da excitação, enquanto Miguel utilizou uma otimização robusta para considerar possíveis variações tanto na estrutura quanto na excitação.

Convergência do D* Máximo Médio



Sendo D* o deslocamento relativo entre andares

Figura 6.1 – Gráfico da convergência do deslocamento relativo máximo com parâmetros de Miguel et al. (2016)

Na análise da figura 6.1 pode-se perceber a rápida convergência do algoritmo para este caso, alcançando valor próximo ao da convergência na décima segunda iteração.

6.3.1 Otimização com parâmetros de El Centro

O pico de aceleração do solo de El Centro é 2 vezes maior do que aquele estudado na situação anterior, sendo considerado pela norma americana ASCE/Sei 7-10 como perigoso e com potencial de dano violento. Para ilustração, apresentam-se na Tabela 6.4 os valores obtidos em 100 simulações para a resposta dinâmica sem amortecimento.

Tabela 6.4 – Resultados dinâmicos sem amortecimento para El Centro

D* Médio [m]	Desvio Padrão [m]	D Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0,0273	0,0072	0,2060	0,0550

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

Percebe-se um grande aumento nas mesmas, quando comparado com os valores anteriores, atingindo valores que não respeitam a norma e que, portanto, podem causar danos à estrutura. Posto isto, parte-se para a aplicação e otimização dos amortecedores. Na Tabela 6.5, apresentam-se os resultados encontrados.

Tabela 6.5 – Resultados da otimização para El Centro

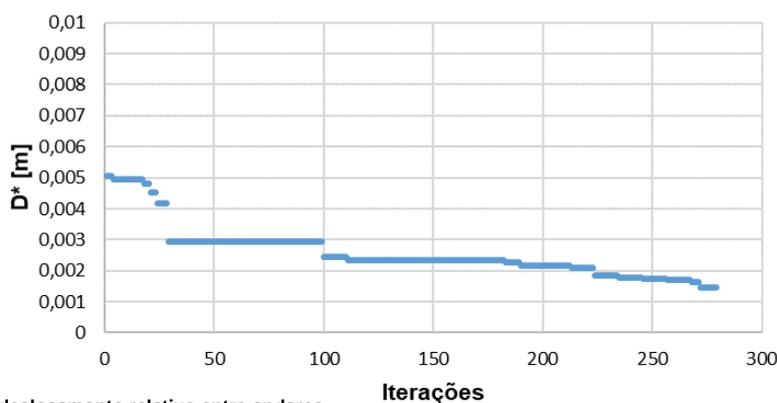
Simulação	Vetor Posição dos Amortecedores	Força de atrito [kN]	D médio [m]	D* Médio [m]	ΣF [kN]	Nº de falhas
1	[0, 0 , 0 , 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]	42,96;31,52;26,93	0,0051	0,0016	101,4100	0
2	[0, 0 , 0 , 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]	55,43;33,94;25,17	0,0055	0,0022	114,5400	0
3	[0, 0 , 0 , 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]	44,60;31,29;22,97	0,0056	0,0021	98,8600	0

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

Nesta otimização, pode-se perceber com mais clareza uma tendência da posição dos amortecedores, possivelmente devido aos parâmetros da cidade de El Centro, que geraram sismos mais potentes que anteriormente, o que possivelmente foi a causa do aumento, de aproximadamente 50%, das forças de atrito que devem ser aplicadas aos amortecedores.

Mesmo com estas diferenças, os resultados dinâmicos para este sismo de alta intensidade foram satisfatórios, avizinhandos-se dos valores de um sismo de média intensidade. Todavia, para obterem-se tais resultados o custo computacional foi mais elevado. Na Figura 6.2, pode-se ver o gráfico da convergência deste caso.

Convergência do D* Máximo Médio



Sendo D* o deslocamento relativo entre andares

Figura 6.2 – Gráfico da convergência do deslocamento entre andares com parâmetros de El Centro

A convergência foi atingida novamente, mas a custo de um aumento considerável do tempo computacional, tendo sido necessárias 14 vezes mais iterações do que no caso anterior, o que resultou em mais de dois dias de processamento.

6.3.2 Otimização com parâmetros de El Centro e outra edificação

Para efeitos comparativos, serão apresentadas na Tabela 6.6 as respostas dinâmicas, em 100 simulações, da nova edificação sem a utilização de amortecedores.

Tabela 6.6 – Resultados dinâmicos para a segunda edificação sem amortecimento

D* Médio [m]	Desvio Padrão [m]	D Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0,0278	0,0070	0,2092	0,0552

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

Os resultados acima indicam que não existe notável diferença entre as respostas sem amortecimento da nova estrutura, com aquela utilizada por Miguel. Novamente foi realizada a aplicação dos amortecedores e seguinte otimização de forma a reduzir as respostas dinâmicas da estrutura. Apresentam-se na Tabela 6.7 os resultados encontrados.

Tabela 6.7 – Resultados da otimização para a segunda edificação

Simulação	Vetor Posição dos Amortecedores	Força de atrito [kN]	D médio [m]	D* Médio [m]	ΣF [kN]	Nº de falhas
1	[0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1]	30,64;20,21;25,71	0,0073	0,0021	76,5600	0
2	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1]	29,15;23,35;26,95	0,0075	0,0022	79,4500	0
3	[0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1]	31,10;20,85;25,80	0,0073	0,0021	77,7500	0

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

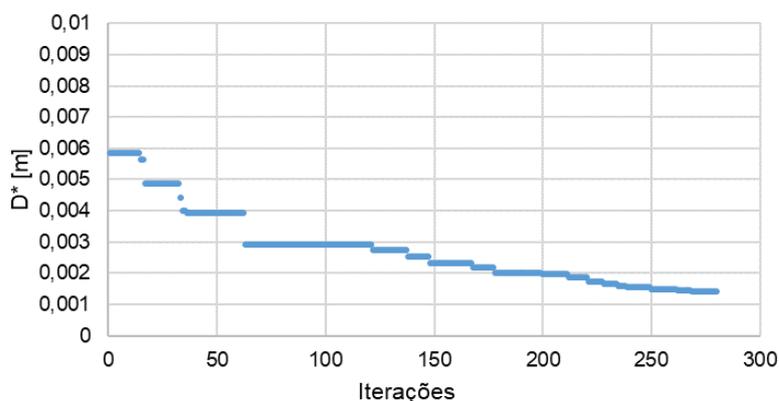
Estes resultados reforçam a característica de zonas ótimas para o posicionamento dos amortecedores, podendo-se distingui-las três vezes: um amortecedor no quarto ou quinto andar, um no sexto ou sétimo andar, e um no nono ou décimo andar. Na última zona, nono e décimo andar, há uma distinção entre os resultados, para a primeira e terceira otimização todas as posições otimizadas colocaram o amortecedor no décimo andar, enquanto na segunda o mesmo aparece no nono andar, além disto, pode-se perceber uma redução no somatório das forças de atrito, estes resultados indicam que as propriedades geométricas da estrutura modificam a eficiência do sistema de amortecimento.

Pode-se, também, perceber o aumento do deslocamento máximo dos andares em comparação com o caso anterior, enquanto o deslocamento relativo máximo permaneceu em valores próximos.

Estas diferenças acima citadas indicam que a estrutura impacta de forma relevante o cálculo de amortecimento sísmico de um projeto o que impossibilita a utilização de sistema generalizados para uma dada região.

O tempo de convergência para este caso pode ser visto no gráfico da Figura 6.3.

Convergência do D* Máximo Médio



Sendo D* o deslocamento relativo entre andares

Figura 6.3 – Gráfico das respostas do deslocamento entre andares com parâmetros de El Centro e estrutura de Murren (2013).

Novamente o tempo necessário foi elevado, mas próximo daquele do caso anterior, o que indica uma independência entre a estrutura utilizada e o tempo de convergência, para o caso onde não há mudança no número de andares e vãos da edificação.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma continuação de análises que já existem na literatura, e obteve sucesso nos seus objetivos. A rotina desenvolvida, juntamente com o algoritmo SGA, foi capaz de encontrar resultados superiores àqueles encontrados na literatura. Para o caso da edificação da análise de Miguel et al., (2016) as respostas dinâmicas foram reduzidas em aproximadamente 70% enquanto as forças aplicadas nos amortecedores puderam ser reduzidas em 85%.

O êxito foi repetido quando uma nova região, El Centro, com propensão a sismos de força elevada visto o seu pga de 0,7g foi estudada e a rotina encontrou diferentes combinações para reduzir respostas que chegaram a um deslocamento relativo máximo de 0,06m, que é aproximadamente duas vezes maior do que aquele permitido pela norma, para 0,0015m quase vinte vezes inferior ao valor permitido. Estudando-se esta mesma região, mas com uma nova estrutura, percebeu-se que a estrutura impacta de forma relevante o projeto de amortecimento, e, portanto, não é possível obter uma solução que possa ser utilizada em qualquer projeto. O que já era esperado, pois a relação entre as frequências naturais da estrutura e as frequências de excitação é determinante no projeto.

As respostas otimizadas indicam uma certa inexistência de posições ótimas para os amortecedores, mas que existem zonas que são propensas a receberem o sistema, observando-se esta tendência, percebe-se que os amortecedores devem ser posicionados na zona intermediária e mais alta da edificação. Elas também indicam que as forças a serem aplicadas aos amortecedores dependem da força imposta à estrutura pelo solo durante um evento sísmico, e que as mesmas possuem um somatório otimizado, que permite realizar análises rápidas com relação à eficácia de um sistema de amortecimento com relação ao seu local de aplicação.

Mesmo com a capacidade de processamento dos computadores atuais e um algoritmo comprovadamente eficaz, a rotina precisou de mais de 250 iterações para atingir a convergência, o que resulta em mais de dois dias de cálculos. Este elevado custo computacional impõe dificuldades para o refinamento destes modelos de análise, como, por exemplo, usar estruturas tridimensionais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 7-05 – Seismic design requirements for building structures**. Reston, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE/SEI 7-10 – Minimum load designs for buildings and other structures**. Reston, 2013.

Awruch, A. M., and Di Rado H. A Di Rado; **“Introducción Al Método De Los Elementos Finitos – análisis elástico lineal.”** Corrientes, República Argentina, 1997.

Centenaro, L.; **“Estudo numérico de um edifício de pórtico plano submetido à excitação sísmica aleatória.”** Monografia trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica UFRGS – 2015.

Constantinou M.C, Soong T. T, Dargush G. F.; **“Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit.”** Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. 1998.

Desu N. B, Deb S. K, Dutta A.; **“Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings.”** Structural Control and Health Monitoring 13: 897–916. DOI:10.1002/stc.64. 2006.

Fadel Miguel LF, Lopez RH, Miguel LFF. **Discussion of paper: “estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search”.** Engineering Structures, Vol 33, p. 2716–2723. 2013.

- Falsone G, Ulibrandi A.; **“Optimal design of dampers in seismic excited structures Expected value of the stochastic Dissipated Power”**. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol 41, p. 129 – 138, 2015.
- Gonçalves M. S, Lopez R. H, Miguel, L. F. F.; **“Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures.”** Computers and Structures 153, p. 165-184. 2015.
- Groehs A, G; **“Mecânica Vibratória”**, Editora Unisinos, 2ª edição, 2005.
- Kanai K.; **“An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions.”** Bulletin Earthquake Research Institute University of Tokyo 39: 85–95. 1961.
- Keightley, W. O.; **“Building Damping by Coulomb Friction.”** Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, India, pp. 3043-3048. 1977
- Miguel, L. F. F., Fadel Miguel, L. F., and Lopez, R. H.; **“Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers”**. The structural design of tall and special buildings, 25, 869-885, 2016. doi: 10.1002/tal.1287
- Miguel, L. F. F.; **“Estudo teórico e experimental de amortecedores de vibração por atrito.”** Dissertação de Mestrado, PPGE/UFGRS, Março, 2002.
- Miguel, L. F. F.; **“Introdução ao Estudo de Vibrações.”** Notas de Aula, UFRGS, 1ª edição. 2006.
- Mohebbi M, Shakeri K, Ghanbarpour Y, Majzoub H.; **“Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures.”** Journal of Vibration and Control 19(4): 605–625. 2013. DOI:10.1177/1077546311434520.
- Mostaghel N, Davis T.; **“Representations of Coulomb Friction for Dynamic Analysis”**. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, V.26, N.5 p. 541 – 548, 1997.
- Centenaro, L.; **“Estudo numérico de um edifício de pórtico plano submetido à excitação sísmica aleatória.”** Monografia trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica UFRGS – 2012.
- Murren P, Khandelwal K.; **“Design-driven harmony search (DDHS) in steel frame optimization.”** Engineering Structures, Vol 59, p. 798 – 808, 2013.
- Pall A.S, Marsh C.; **“Response of friction damped braced frames.”** Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers ASCE 108(ST6): 1313–1323. 1982.
- Ripper A. P. Neto.; **“Vibrações Mecânicas”** E-papers Serviços Editoriais LTDA., 2007.
- Shinozuka M, Jan C.M.; **“Digital simulation of random process and its applications.”** J Sound Vib 1972; 25:111 8.
- Soong T. T, Dargush G. F. **“Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering.”** John Wiley & Sons: Chichester, NY. 1997.
- Symans M. D, Constantinou M. C.; **“Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review.”** Engineering Structures 21: 469–487. 1999.
- Tajimi H.; **“A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake.”** Proceedings of 2nd World Conference in Earthquake Engineering. World Conference in Earthquake Engineering (WCEE): Tokyo, Japan; 781–797. 1960.
- Wang J.F, Lin C. C, Lian C. H. **“Two-stage optimum design of tuned mass dampers with consideration of stroke.”** Structural Control and Health Monitoring 16: 55 – 72. DOI:10.1002/stc.312. 2009.

ANEXO A

Tabela A.1 – Perfis da estrutura de Murren e Khandewal (2013).

Número do elemento	Perfil W	Referência	Área [m ²]	Momento de Inércia [m ⁴]
1,31	W 360 X 101	101	1,29E-02	3,01E-04
2,32,3,33,4,34	W 360 X 72	72	9,10E-03	2,01E-04
5,35,6,36,7,37	W 360 X 64	64	8,14E-02	1,78E-04
8,38,9,39,10,40	W 360 X 39	39	4,98E-03	1,02E-04
11,21	W 360 X 110	110	1,40E-02	3,31E-04
12,22,13,23,14,24	W 360 X 91	91	1,16E-02	2,67E-04
15,25,16,26,17,27	W 360 X 51	51	6,45E-03	1,41E-04
18,28,19,29,20,30	W 360 X 32.9	33	4,17E-03	8,27E-05
41,43,44,46,47,49,50,52, 53,55,56,58,59,61,62,64, 65,67	W 760 X 134	134	1,70E-02	1,50E-03
42,45,48,51,54,57,60,63, 66	W 610 X 82	82	1,05E-02	5,65E-04
68, 70	W 310 X 143	143	1,82E-02	3,48E-04
69	W 150 X 13	13	1,61E-03	6,13E-06

Tabela A.2 – Perfis da estrutura de Miguel et al., (2016).

Número do elemento	Perfil W	Referência	Área [m ²]	Momento de Inércia [m ⁴]
1,2	W360 x 216	216	2,76E-02	7,12E-04
3,4,17,18,27,28,33,34	W360 x 162	162	2,06E-02	5,16E-04
5,6	W360 x 122	122	1,55E-02	3,65E-04
7,8,37,38	W360 x 91	91	1,16E-02	2,67E-04
9,10,39,40	W360 x 64	64	8,14E-03	1,78E-04
11,12	W360 x 314	314	3,99E-02	1,10E-03
13,14	W360 x 262	262	3,35E-02	8,94E-04
15,16,31,32	W360 x 196	196	2,50E-02	6,36E-04
19,20,29,30	W360 x 101	101	1,29E-02	3,01E-04
21,22	W360 x 287	287	3,66E-02	9,97E-04
23,24	W360 x 237	237	3,01E-02	7,88E-04
25,26	W360 x 179	179	2,28E-02	5,75E-04
35,36	W360 x 110	110	1,40E-02	3,31E-04
41,42,43	W610 x 113	113	1,45E-02	8,75E-04
44,45,46	W610 x 101	6101	1,30E-02	7,64E-04
47,48,49	W610 x 92	92	1,18E-02	6,51E-04
50,51,52,53,54,55	W530 x 85	85	1,08E-02	4,85E-04
56,57,58,59,60,61	W530 x 74	74	9,53E-03	4,11E-04
62,63,64,65	W530 x 66	66	8,38E-03	3,51E-04
66,67,68	W460 x 52	52	6,63E-03	2,12E-04
69, 70	W360 x 39	39	4,98E-03	1,02E-04

ANEXO B

Definição dos parâmetros do algoritmo SGA, segundo Gonçalves et al., (2015).

- it_{max} : Número máximo de iterações da otimização.
- n_{pop} : Número de indivíduos na população, é mantido constante em todo o processo de otimização. Junto com it_{max} define o tempo computacional para o processo.
- it_{max}^{global} : Razão que define o número de iterações da fase de exploração. Quanto mais perto de 1 este parâmetro for, maior será a fase de exploração e menor a fase de refinamento.
- α^k : Parâmetro que controla a distância que novos valores são variados dentro dos vetores durante o processo de otimização, impactando tanto na fase de exploração como na fase de refinamento. É importante que este parâmetro seja escolhido de forma a percorrer todo o espaço de respostas durante a fase de exploração para encontrar o maior número de regiões promissoras do problema. Com as iterações, este valor é reduzido com a ajuda do parâmetro b , para que seja possível encontrar os mínimos locais, durante a fase de refinamento, das regiões escolhidas na fase de exploração.
- α_{min} : Menor valor assumido pelo parâmetro α^k .
- b : Parâmetro que define a redução do parâmetro α^k na fase de refinamento, para tal, uma combinação de funções lineares é empregada.
- n_{mut} : Número de mutações em cada iteração. É o parâmetro que impede o algoritmo de ficar preso em um mínimo local.
- n_g : Número de membros do grupo de pesquisa. Expresso como uma porcentagem do número de indivíduos da população (n_{pop}).

Valores utilizados neste trabalho:

- it_{max} : 60 no primeiro caso, 280 nos dois últimos.
- n_{pop} : 100.
- it_{max}^{global} : 0,2.
- α^k : 10 kN.
- α_{min} : 1 kN.
- n_{mut} : 5.
- n_g : 0,1.

ANEXO C

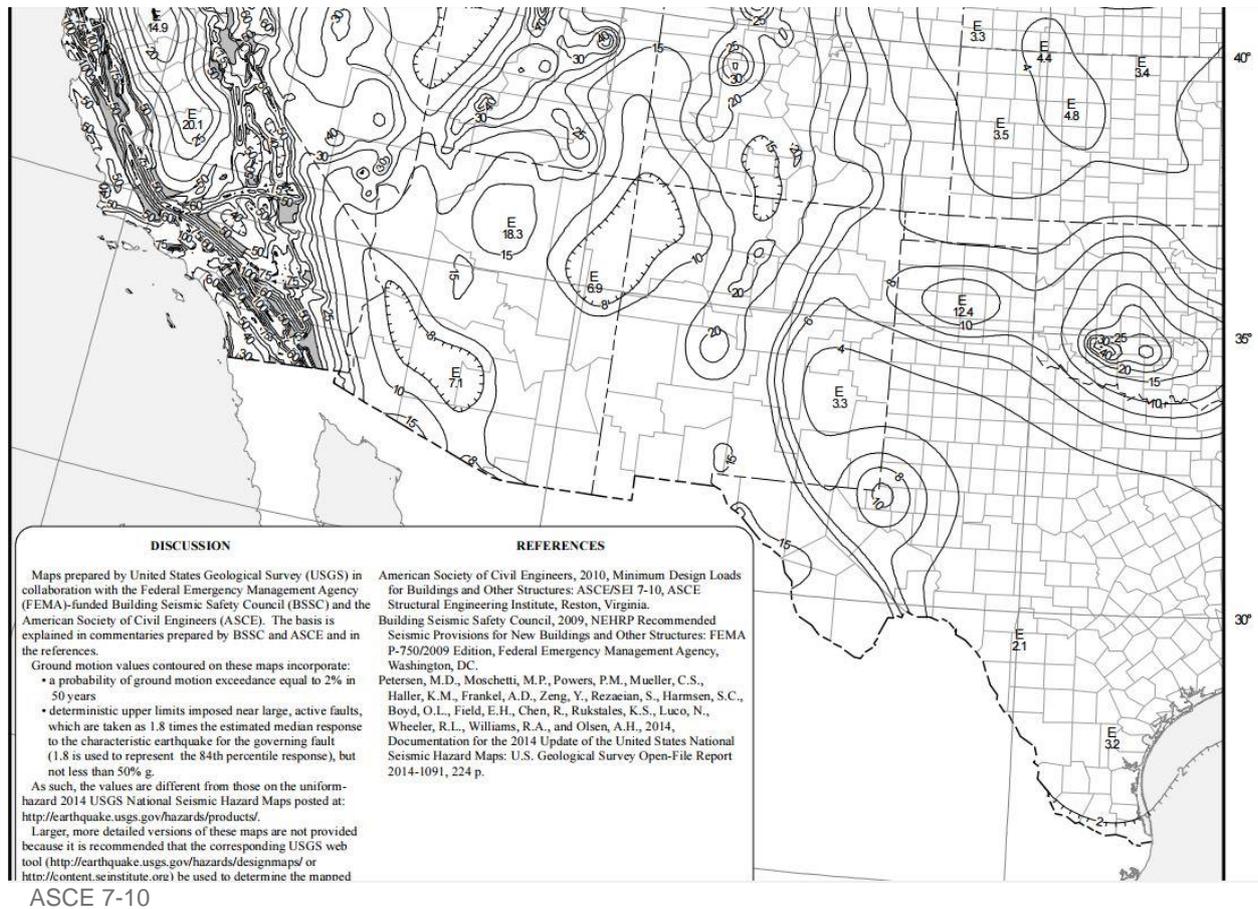


Figura C.1 – Mapa do pico de aceleração de solo para a região considerada.

APÊNDICE I

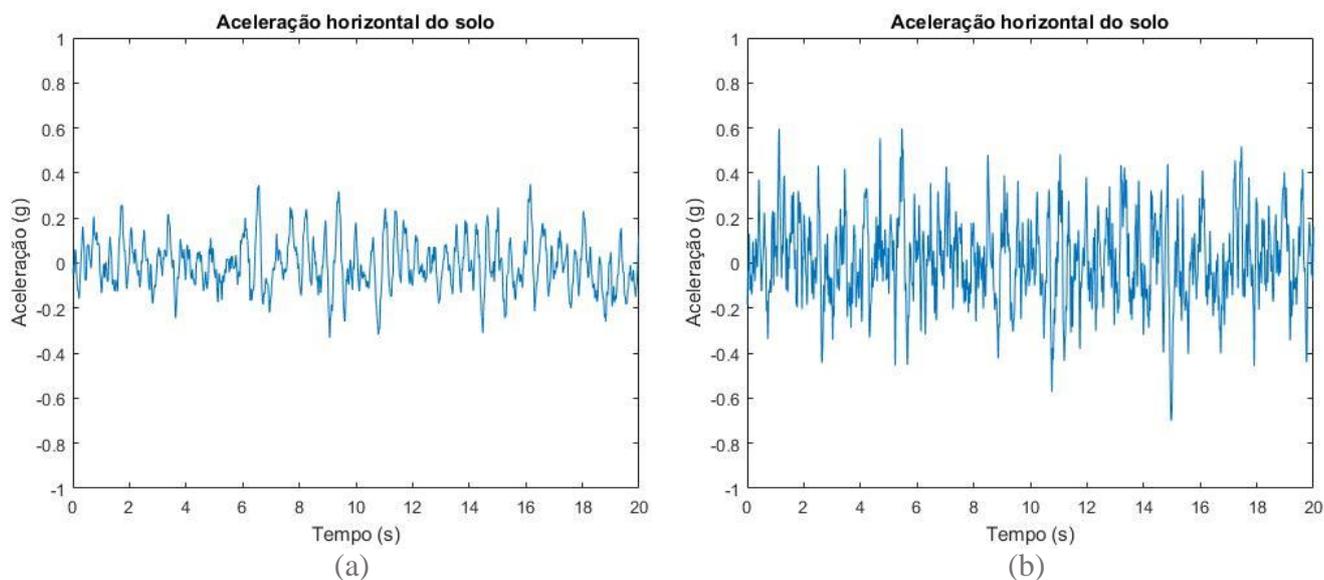


Figura I.1 – Gráficos da aceleração para o sismo com parâmetros de Miguel et al., (2016) (a) e de El Centro (b).

Tabela I.1 – Respostas dinâmicas para um sistema com três amortecedores em posições aleatórias, e um com amortecedores em todos os andares.

Parâmetros	Simulação	Vetor Posição dos Amortecedores	Força de atrito (kN)	D médio [m]	D* Médio [m]	ΣF [kN]
p _{ga} = 0,35; w _g = 15 rad/s; e = 0,3 Prédio Miguel et al., (2016)	1	[1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]	17,64;13,86;29,85	0,0263	0,0036	61,3500
	2	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	6,50	0,0030	0,0008	65,0000
p _{ga} = 0,7; w _g = 19 rad/s; e = 0,65 Prédio Miguel et al., (2016)	1	[1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]	31,52;26,93;42,96	0,0403	0,0058	101,4100
	2	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	10,50	0,0058	0,0016	105,0000
p _{ga} = 0,7; w _g = 19 rad/s; e = 0,65 Prédio Murren e Khandelwal (2013)	1	[1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]	20,85;25,80;31,10	0,0582	0,0083	77,7500
	2	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	7,70	0,0058	0,0023	77,0000

Sendo D* o deslocamento máximo médio entre andares e D o deslocamento absoluto

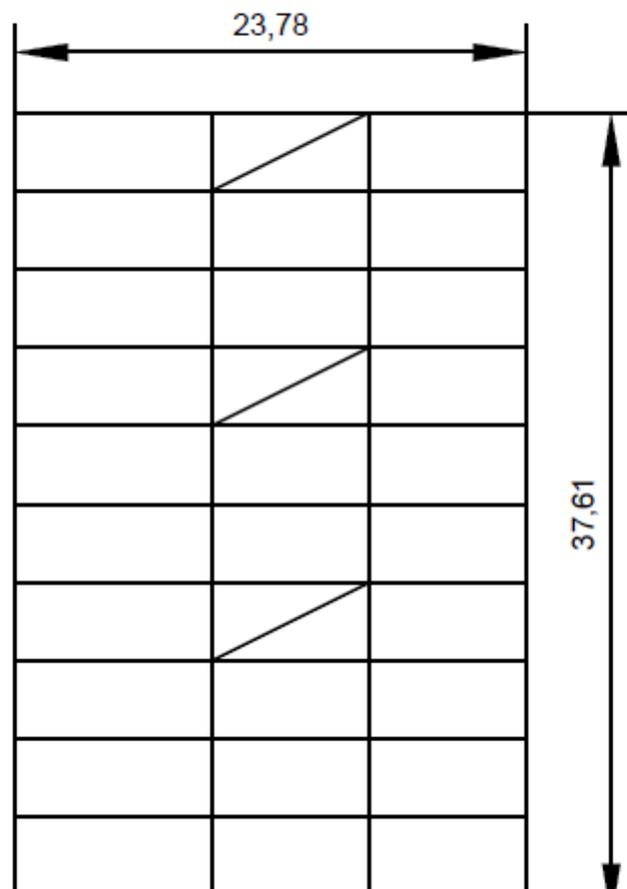


Figura I.1 - Sistema de amortecimento com a posição otimizada referente a terceira simulação da otimização com estrutura e parâmetros de Miguel et al., (2016).