

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES POR ATRITO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A
EXCITAÇÕES SÍSMICAS

por

Eduardo Lamb Lautert

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, dezembro de 2019.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Lautert, Eduardo Lamb
Otimização de amortecedores por atrito em
estruturas submetidas a excitações sísmicas / Eduardo
Lamb Lautert. -- 2019.
22 f.
Orientadora: Leticia Fleck Fadel Miguel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Amortecedores por atrito. 2. Otimização
estrutural. 3. Excitações sísmicas. 4. Algoritmos
meta-heurísticos. 5. Controle estrutural dinâmico. I.
Miguel, Leticia Fleck Fadel, orient. II. Título.

Eduardo Lamb Lautert

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES POR ATRITO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A
EXCITAÇÕES SÍSMICAS

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientadora: Prof^a. Leticia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Leticia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edson Aseka

Prof. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, dezembro de 2019.

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES POR ATRITO EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A EXCITAÇÕES SÍSMICAS

Lautert, Eduardo Lamb

lamb.lautert@gmail.com

Resumo. *Sistemas de controle para a redução da resposta dinâmica de estruturas submetidas a excitações sísmicas já são amplamente utilizados. Uma classe de sistemas de controle que se destaca é a dos amortecedores por atrito. Esses dispositivos passivos de dissipação de energia são mais simples e baratos quando comparados a dispositivos ativos, amortecedores viscosos ou amortecedores de massas sintonizadas. Apesar de seus benefícios, a modelagem de seu comportamento dinâmico não é simples e ainda são restritos os estudos sobre a otimização de amortecedores por atrito em estruturas. O principal objetivo deste trabalho é avaliar o processo de otimização da posição e capacidades de amortecedores aplicados a estruturas submetidas a excitações sísmicas. Para tal, é feita a utilização conjunta do método de Newmark para resolução da equação do movimento e de um algoritmo de otimização meta-heurístico recentemente publicado. A análise é feita por meio da otimização de uma estrutura considerando o caso de uma excitação definida e o caso de um conjunto aleatório de excitações. Os resultados indicam que o método utilizado é capaz de reduzir a resposta dinâmica da estrutura analisada em até 74 % para a excitação definida e até 76 % para o conjunto de excitações aleatórias. A análise estatística dos resultados demonstra que o método utilizado é capaz de determinar de forma consistente a configuração ótima dos dispositivos de controle.*

Palavras-chave: *amortecedores por atrito, otimização estrutural, excitações sísmicas, algoritmos meta-heurísticos, controle estrutural dinâmico.*

Abstract. *Control systems for dynamic response reduction of structures subjected to seismic loads are already widely applied. One category of control systems that stands out is the friction dampers category. These energy dissipation devices are simpler and cheaper when comparing to the active devices, viscous dampers or tuned mass dampers. Despite its benefits, the modelling of its dynamic behavior is not simple and there are still few studies about friction dampers for structural optimization. The main objective of this project is to evaluate the optimization process for both position and capacity of friction dampers applied to structures subjected to seismic loads. For such purpose, it is performed the combined utilization of the Newmark method for the equation of motion solving and a meta-heuristic optimization algorithm recently published. The analysis is carried out by performing a structural optimization process considering a case of defined seismic load and a case of random set of seismic loads. The results indicate that the method used is capable of reduce the dynamic response of the analyzed structure up to 74 % for the defined seismic load and up to 76 % for the set of random seismic loads. The statistical analysis of the results show that the method used is capable of determine consistently the best configuration of the control devices.*

Keywords: *friction dampers, structural optimization, seismic loads, meta-heuristic algorithms, structural dynamic control.*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

As características geológicas do planeta proporcionam a ocorrência de atividades sísmicas diárias em praticamente todas as regiões do planeta. De forma geral os terremotos passam despercebidos por grande parte da população. No entanto, regiões próximas às bordas das placas tectônicas são caracterizadas por uma alta frequência de atividades sísmicas com magnitudes que podem ser extremamente perigosas com relação à segurança da população e à integridade estrutural das edificações.

Os resultados potencialmente negativos de um evento sísmico, principalmente em grandes centros urbanos, evidenciam a necessidade de que sejam propostas alternativas de minimização dos danos materiais e do número de vítimas. Países constantemente afetados por terremotos costumam implementar uma política de minimização de danos e de fatalidades por meio do treinamento da população para atuação em situações de risco. Alternativamente, muitos estudos são desenvolvidos com a intenção de determinar alternativas estruturais para reduzir a resposta dinâmica de estruturas expostas a excitações sísmicas.

Modificações estruturais, como sistemas de controle constituídos de sensores e atuadores, sistemas constituídos de pêndulos ou de amortecedores, são alternativas que possibilitam a redução da resposta dinâmica de estruturas. Entretanto, muitos desses sistemas são compostos por componentes caros e de alta complexidade de fabricação. Uma alternativa para a redução da resposta dinâmica de uma estrutura é a utilização de amortecedores por atrito, que são dispositivos mais simples e baratos que os denominados ativos ou semiativos, e são caracterizados, segundo Miguel et al. (2016a) por não necessitarem de uma fonte externa de energia para a sua operação e por utilizarem o próprio movimento da estrutura para gerar as forças de controle.

Apesar das vantagens apresentadas pelos amortecedores por atrito, é imprescindível que os recursos disponíveis para a aplicação desses mecanismos de controle sejam utilizados da melhor forma possível e, portanto, a seleção da localização na estrutura e dos parâmetros dos amortecedores que tornam seu funcionamento ótimo tem extrema importância. Entretanto, esses dispositivos representam uma dificuldade adicional de modelagem em comparação aos demais dispositivos de controle, pelo fato de possuírem comportamento não linear e pelo fato de que o comportamento da dissipação de energia depende do sistema mecânico em particular.

Este trabalho é desenvolvido, portanto, em um cenário em que mais estudos sobre o comportamento dinâmico de estruturas controladas por amortecedores por atrito são necessários para mapear a viabilidade de uso desses sistemas em problemas reais de engenharia. Paralelamente, devem ser utilizados mecanismos de otimização para que os melhores resultados sejam alcançados com o mínimo de recursos. Nesse sentido, o trabalho busca validar um método recente de otimização quando atrelado a um problema complexo de engenharia.

1.2. Revisão Bibliográfica

Uma quantidade significativa de estudos relacionados a métodos de mitigação de efeitos danosos em estruturas que são submetidas a excitações sísmicas é publicada com frequência. Recentemente, Bagheri e Rahmani-dabbagh (2018) propuseram um sistema de controle da resposta dinâmica de estruturas baseado em amortecedores elastoplásticos de massas sintonizadas (P-TMD), que consistem em uma massa e uma mola elastoplástica, sem a necessidade, existente em amortecedores de massa sintonizada comuns (TMD), da utilização dos caros amortecedores viscosos. O estudo concluiu, por meio de análises dinâmicas de estruturas submetidas a excitações sísmicas, que o uso de P-TMDs resulta em uma quantidade de energia dissipada correspondente à apresentada por TMDs.

No mesmo contexto, Naeem e Kim (2018) analisaram a performance de um sistema de controle conectado a cabos pré-tensionados composto por um amortecedor viscoso acoplado a uma mola externa quando instalados em estruturas submetidas a excitações sísmicas. Por meio de ensaios em

bancadas de teste e simulações computacionais, os autores determinaram que o método de controle foi capaz de reduzir em até 89% a máxima variação do deslocamento entre andares de uma estrutura submetida a excitações sísmicas quando comparada à resposta da estrutura não controlada.

O conceito de engenharia se aproxima do conceito de otimização na medida em que projetos de engenharia podem ser sintetizados em um processo de escolha entre possíveis parâmetros para aperfeiçoar determinada propriedade. Neste sentido, pesquisas são desenvolvidas para não somente desenvolver novos sistemas de controle para estruturas submetidas a excitações sísmicas, mas também determinar o valor dos parâmetros desses sistemas de controle que otimizam os seus resultados. Neste âmbito, o estudo apresentado por Siami et al. (2018) determina os valores para o fator de amortecimento e frequência de sintonização de amortecedores de massa sintonizada com isolador de vibração inercial que resultam em uma maior redução da vibração transmitida à estátua Pietá, de Michelangelo. A pesquisa utilizou o método de otimização por programação sequencial quadrática e pelo algoritmo meta-heurístico Firefly para determinar os valores dos parâmetros, obtendo reduções em torno de 70% no nível de vibração quando comparado ao sistema sem controle.

Ainda com relação à otimização de sistemas de controle da resposta dinâmica de estruturas, trabalhos como Jarrahi et al. (2020) e Ontiveros-Pérez, Miguel e Riera (2019) utilizaram, respectivamente, o algoritmo de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*) para reduzir significativamente a resposta dinâmica de estruturas submetidas a excitações sísmicas e SGA (*Search Group Algorithm*) para reduzir com êxito a probabilidade de falha em estruturas localizadas em regiões com alta atividade sísmica.

No contexto dos processos de otimização, especialmente quando associados a problemas estruturais, muitas pesquisas são publicadas com a utilização de algoritmos de otimização meta-heurísticos devido às suas vantagens quando comparados aos algoritmos baseados nos gradientes das funções. Jafari e Nikolaidis (2019) definem algoritmos meta-heurísticos como procedimentos de alto nível utilizados para encontrar a solução global para problemas de otimização com informações incompletas ou imperfeitas. Os autores afirmam que, apesar de esse método de otimização não garantir a solução global ótima para determinadas classes de problemas, esse método tem capacidade de encontrar boas soluções com menos consumo computacional que outros métodos; sendo assim, representa uma ótima abordagem para problemas práticos de engenharia. Devido às características dos algoritmos meta-heurísticos, Saddique et al. (2020) afirmam que esses algoritmos são apropriados e vêm sendo amplamente utilizados para a resolução de problemas não lineares, não convexos, com restrições complexas e com variáveis de projeto mistas, isto é, contínuas e discretas no mesmo problema.

A grande importância de projetos de pesquisa na área do controle de estruturas submetidas a excitações sísmicas é evidenciada pela alta quantidade de artigos desenvolvidos nesta área, como apresentado anteriormente nesta seção. Mais especificamente, métodos de controle da resposta dinâmica de estruturas baseados na utilização de sistemas passivos, como amortecedores de massa sintonizada e amortecedores por atrito, representam uma alternativa frequentemente abordada. Entretanto, é de extrema importância determinar os parâmetros mais adequados de aplicação desses sistemas de controle para que haja o equilíbrio entre a utilização mais consciente dos recursos disponíveis e a melhor resposta possível do sistema utilizado.

Algoritmos de otimização são uma alternativa comumente utilizada para estabelecer os parâmetros ótimos de um problema. Algoritmos meta-heurísticos possuem, em especial, características que os tornam mais adequados para a otimização de problemas reais de engenharia, e, por este motivo, novos algoritmos, implementando novas funcionalidades, são desenvolvidos com frequência. Sendo assim, são necessários estudos constantes a respeito da capacidade desses novos algoritmos de otimização quando utilizados em problemas complexos de engenharia.

1.3. Objetivo Principal

Este projeto tem como objetivo principal avaliar o desempenho de um método de redução da resposta dinâmica de estruturas submetidas a excitações sísmicas. O projeto busca utilizar

conjuntamente uma rotina computacional desenvolvida para simular a resposta dinâmica de uma estrutura e um algoritmo de otimização meta-heurístico para determinar a configuração de posições e cargas de amortecedores por atrito que minimiza a resposta dinâmica de estruturas submetidas a excitações sísmicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Excitação Sísmica

A excitação sísmica utilizada com força externa à estrutura na modelagem realizada neste trabalho é definida como uma força unidimensional resultante de um terremoto. Essa força externa é simulada por meio da aplicação de um ruído branco ao filtro de Kanai-Tajimi (TAJIMI, 1960 e KANAI, 1961) com densidade espectral de potência $S(\omega)$, em m^2/s^3 , dada pela Eq. (1).

$$S(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_s^4 + 4\omega_s^2 \xi_s^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_s^2)^2 + 4\omega_s^2 \xi_s^2 \omega^2} \right] \quad (1)$$

Onde ω_s é a frequência do solo (rad/s), e ξ_s é o amortecimento do solo. O termo S_0 é a densidade espectral constante, em m^2/s^3 , definida na Eq. (2).

$$S_0 = \frac{0,03\xi_s}{\pi\omega_s(4\xi_s^2 + 1)} \quad (2)$$

A solução da Eq. (1) permite a geração de um sinal para a aceleração do solo no domínio da frequência. Entretanto, neste trabalho resolução do problema é realizada no domínio do tempo. Portanto, é necessário aplicar a transformada de Fourier apresentada por Shinozuka e Jan (1972) para determinar a aceleração do solo $\ddot{y}(t)$, em m/s^2 , dada pela Eq. (3).

$$\ddot{y}(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^{N_\omega} \sqrt{S(\omega_j)\Delta\omega} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (3)$$

Onde N_ω é o número de intervalos da banda de frequências, $\Delta\omega$ é o intervalo de frequências (rad/s), e ϕ_j é o ângulo de fase (rad/s). A Eq. (3) permite utilizar um sinal gerado no domínio da frequência na análise de problemas no domínio do tempo. Contudo, é necessário atentar que a geração do sinal no domínio do tempo possui uma parcela de aleatoriedade. Esse fato acontece devido ao ângulo de fase ϕ_j , cujos valores são escolhidos, de forma aleatória, com distribuição uniforme entre 0 e 2π .

2.2. Amortecimento de Rayleigh

Um modelo frequentemente utilizado para a modelagem do amortecimento interno de uma estrutura é o amortecimento de Rayleigh. Esse modelo é utilizado em algumas das simulações realizadas neste projeto e sua determinação é uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez da estrutura. A matriz de amortecimento de Rayleigh, \mathbf{C} , em N.s/m, é obtido por meio da Eq. (4).

$$\mathbf{C} = \gamma\mathbf{M} + \lambda\mathbf{K} \quad (4)$$

Onde γ é a constante de massa (1/s), λ é a constante de rigidez (s), \mathbf{M} é a matriz de massa (kg), e \mathbf{K} é matriz de rigidez (N/m).

2.3. Amortecedores por Atrito

Amortecimento é o mecanismo pelo qual a energia de vibração é gradativamente convertida em calor ou som. A conversão da energia de vibração é responsável pela diminuição da energia do sistema, o que resulta na diminuição da resposta do sistema, tal como o deslocamento e a aceleração. O amortecimento de Coulomb ou por atrito tem como resultado a dissipação de energia devido à fricção causada pelo movimento relativo entre superfícies em contato que estejam secas ou não tenham lubrificação suficiente (RAO, 2008). Amortecedores por atrito são dispositivos de dissipação de energia passivos pois não necessitam de uma fonte externa de energia para atuarem no controle da resposta dinâmica de uma estrutura. Por possuir essas características, os amortecedores por atrito têm um custo de produção e de instalação inferior aos mecanismos de controle ativos (MIGUEL et al., 2018) e por esse motivo são o mecanismo de controle utilizado neste trabalho. Apesar dessas vantagens, é imprescindível que os recursos disponíveis para a aplicação desses mecanismos de controle sejam utilizados da melhor forma possível e, portanto, a otimização da localização na estrutura e dos parâmetros dos amortecedores tem extrema importância. Entretanto, esses dispositivos representam uma dificuldade adicional de modelagem em comparação aos demais dispositivos de controle pelo fato de possuírem comportamento não linear (MIGUEL et al., 2018) e pelo fato de que o comportamento da dissipação de energia depende do sistema mecânico em particular (MASOTTI, 2008).

2.4. Equação do movimento

A equação diferencial que modela o movimento de um sistema com n graus de liberdade com controle por amortecedores por atrito e submetido a uma força externa é apresentada na Eq. (4).

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{z}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{z}}(t) + \mathbf{K}\vec{z}(t) = \vec{F}(t) - \vec{F}_a(t) \quad (5)$$

Onde $\ddot{\vec{z}}(t)$, $\dot{\vec{z}}(t)$ e $\vec{z}(t)$ são, respectivamente, o vetor de aceleração (m/s^2), o vetor de velocidade (m/s), e o vetor de posição (m). O termo $\vec{F}(t)$ é o vetor de força externa (N), e $\vec{F}_a(t)$ é a força de atrito de Coulomb (N), dada pela Eq. (5).

$$\vec{F}_a(t) = \mu N \text{sgn}(\vec{v}(t)) \quad (6)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito, N é a força normal (N), $\vec{v}(t)$ é o vetor de velocidades relativas entre os terminais dos amortecedores (m/s) e $\text{sgn}(v(t))$ é a função sinal, dada pela Eq. (6).

$$\text{sgn}(v(t)) = \begin{cases} +1 & \text{se } v(t) > 0 \\ 0 & \text{se } v(t) = 0 \\ -1 & \text{se } v(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.5. Método de Newmark

O método de integração de Newmark é uma ferramenta para a resolução da equação do movimento baseada na premissa que a aceleração varia linearmente entre dois instantes de tempo. As Eq. (8), (9) e (10) apresentadas a seguir descrevem, respectivamente, o deslocamento, a velocidade e a aceleração para o instante de tempo t_{j+1} .

$$\begin{aligned} \vec{z}(t_{j+1}) = & (a_0\mathbf{M} + a_3\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \{ \vec{F}(t_{j+1}) - \vec{F}_a(t_{j+1}) + \mathbf{M}[a_0\vec{z}(t_j) + a_1\dot{\vec{z}}(t_j) + a_2\ddot{\vec{z}}(t_j)] \\ & + \mathbf{C}[a_3\vec{z}(t_j) + a_4\dot{\vec{z}}(t_j) + a_5\ddot{\vec{z}}(t_j)] \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\vec{z}(t_{j+1}) = a_3[\vec{z}(t_{j+1}) - \vec{z}(t_j)] - a_4\dot{\vec{z}}(t_j) - a_5\ddot{\vec{z}}(t_j) \quad (9)$$

$$\dot{\vec{z}}(t_{j+1}) = a_0[\vec{z}(t_{j+1}) - \vec{z}(t_j)] - a_1\dot{\vec{z}}(t_j) - a_2\ddot{\vec{z}}(t_j) \quad (10)$$

Onde,

$$a_0 = 1/(\alpha\Delta t^2) \quad (11)$$

$$a_1 = 1/(\alpha\Delta t) \quad (12)$$

$$a_2 = 1/(2\alpha) \quad (13)$$

$$a_3 = \beta/(\alpha\Delta t) \quad (14)$$

$$a_4 = \frac{\beta}{\alpha} - 1 \quad (15)$$

$$a_5 = \left(\frac{\Delta t}{2}\right)\left(\frac{\beta}{\alpha} - 2\right) \quad (16)$$

Onde α e β indicam quanto a aceleração ao final de cada intervalo entra nas equações de velocidade e deslocamento ao final do intervalo Δt .

O método de Newmark assume que os valores para a velocidade e deslocamentos iniciais, isto é, $\dot{\vec{z}}(t_0)$ e $\vec{z}(t_0)$, são conhecidos. Deste modo, é possível calcular a aceleração inicial por meio da Eq. (17).

$$\ddot{\vec{z}}(t_0) = \mathbf{M}^{-1}[\vec{F}(t_0) - \vec{F}_a(t_0) - \mathbf{C}\dot{\vec{z}}(t_0) - \mathbf{K}\vec{z}(t_0)] \quad (17)$$

Por meio da utilização das equações descritas anteriormente é possível então, após sucessivas iterações, determinar a resposta de um sistema com n graus de liberdade submetido a uma força externa. Entretanto a utilização de amortecedores por atrito inclui uma dificuldade ao método. A dificuldade é relacionada com o cálculo da força de atrito para cada instante. Isso acontece devido ao fato de que para se calcular a força de atrito gerada em determinado instante é necessário já conhecer a velocidade para este momento. Porém, a velocidade também depende da resolução da equação que é função da força de atrito. Esse problema é solucionado no momento da implementação do código em Matlab® por meio da realização de dois passos a mais do que o normalmente definido no método para cada iteração.

O primeiro passo da iteração acontece com a resolução da equação desconsiderando a atuação da força de atrito, assim é possível determinar um primeiro valor para a velocidade no instante em análise. Posteriormente, para a mesma iteração, a equação é resolvida novamente, agora com o sinal da velocidade encontrado anteriormente aplicado à força de atrito, e um novo valor para a velocidade é encontrado. Em um terceiro e último passo para a iteração, o novo valor da velocidade é utilizado para o cálculo da força de atrito e a resolução definitiva da equação do movimento para o instante em análise.

2.6. Algoritmo de Otimização

Algoritmos de otimização são desenvolvidos com o objetivo de determinar os parâmetros que geram o valor mínimo ou máximo de uma determinada função, ou seja, determinar o valor das variáveis de otimização que geram o valor mínimo ou máximo para a função objetivo do problema. De forma geral, os algoritmos de otimização podem ser classificados em duas principais categorias: (a) algoritmos de otimização baseados no gradiente da função e (b) algoritmos de otimização heurísticos.

Algoritmos de otimização baseados no gradiente de funções são algoritmos que utilizam as informações relacionadas às derivadas da função analisada para determinar o comportamento da função. Essas características tornam o método de otimização com base nos gradientes complicado de aplicar em funções complexas, muitas vezes não lineares, com muitos mínimos locais, descontínuas ou definidas por variáveis mistas (discretas e contínuas). Como a modelagem da aplicação de amortecedores por atrito em sistemas dinâmicos tem como resultado funções geralmente não convexas e com variáveis de entrada discretas e contínuas, tal método não representa uma boa abordagem para o problema proposto neste trabalho.

Algoritmos de otimização heurísticos são algoritmos baseados essencialmente no método de tentativa e erro e na intenção de percorrer todo o domínio de possibilidades para um determinado problema. Entretanto, algoritmos mais modernos, como os meta-heurísticos, são usualmente considerados de um nível superior quando comparados com os algoritmos heurísticos por não serem simplesmente baseados em tentativa e erro, mas também por serem construídos de forma a aprender com as soluções anteriores, por selecionarem as melhores soluções e por possuírem mecanismos de procura sofisticados.

Dentro da categoria de algoritmos de otimização meta-heurísticos existem algoritmos já popularmente conhecidos e amplamente utilizados. Porém novos algoritmos de otimização são desenvolvidos regularmente, introduzindo novas funcionalidades e conceitos que buscam métodos com maior performance. Neste contexto, pesquisaram-se algoritmos meta-heurísticos que tenham sido desenvolvidos recentemente com o objetivo de utilizar um algoritmo com os métodos mais atualizados. Desse modo, o algoritmo escolhido foi o WOA (*Whale Optimization Algorithm*) desenvolvido em 2016 (MIRJALILI; LEWIS, 2016). O WOA, segundo Mirjalili e Lewis, (2016) é um algoritmo de otimização que replica o comportamento social das baleias jubarte, em especial o método de caça utilizado por esta espécie baseado na geração de uma cortina de bolhas que concentra o grupo de presas próximo à superfície, facilitando o ataque final. A espécie de baleias é conhecida pelo seu hábito de caça coletivo a cardumes de pequenos peixes, sendo que o processo de caça pode ser dividido em três momentos: (1) a fase de exploração ou busca por presas, (2) a fase de aproximação das baleias para a região onde se encontra um cardume e (3) a fase de restrição às presas e ataque.

Para a implementação do algoritmo, as fases foram alteradas de forma a percorrer melhor o domínio de soluções. O algoritmo inicia compondo um grupo de agentes, representando os valores inicialmente aleatórios para as variáveis de otimização, e a variável que gerar o menor valor para a função objetivo é considerada a presa. Assim, os demais agentes têm seus valores alterados para se aproximar do agente que produziu o menor resultado da função objetivo, essa é a fase de aproximação das baleias. A segunda fase também representa uma aproximação dos demais agentes em direção ao agente que gerou o menor valor para a função objetivo, porém a aproximação é realizada de forma a percorrer o domínio em um movimento espiral, essa é a fase de restrição às presas e ataque. A última fase é a fase de busca randômica, onde um agente é forçado a se mover para longe com o objetivo de adicionar variabilidade à busca pela configuração ótima, essa é a fase de exploração ou busca por presas. Conforme o algoritmo é executado sucessivas vezes, é esperado que os agentes de procura se concentrem cada vez mais próximos do valor mínimo da função objetivo.

3. METODOLOGIA

Este projeto foi desenvolvido de forma que as rotinas computacionais que juntas realizam a otimização das posições e parâmetros dos amortecedores por atrito em uma determinada estrutura fossem validadas/verificadas separadamente antes que todo o processo pudesse ser realizado. Portanto, o projeto seguiu um método de divisão do problema em etapas predecessoras e a suas validações por meio de análises analíticas ou comparações com estudos já publicados.

As etapas desenvolvidas no projeto foram divididas na geração e validação da excitação sísmica, na implementação e validação da rotina de resolução da equação do movimento com controle, na utilização conjunta e validação das rotinas de resolução da equação do movimento para uma estrutura

quando excitada por um sinal sísmico definido e, por fim, na utilização conjunta das rotinas de resolução da equação do movimento de uma estrutura quando excitada por um conjunto aleatório de sinais sísmicos. As etapas desenvolvidas são detalhadas nas subseções que seguem.

3.1. Geração da Excitação Sísmica

A primeira etapa desenvolvida no projeto foi a construção da rotina computacional em linguagem Matlab que implementa as Eq. (1), (2) e (3). A rotina computacional foi validada por meio da simulação com dados de entrada idênticos aos utilizados por Chiesa e Miguel (2017). Os dados de entrada utilizados, referentes às características do solo na região (ω_s e ξ_s), às frequências mínima e máxima (ω_{min} e ω_{max}), aos tempos inicial e final (t_i e t_f), aos incrementos de tempo e frequência (Δt e $\Delta\omega$) e ao pico de aceleração do solo (PGA), são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Dados de entrada para a geração da excitação sísmica.

Parâmetro	Valor
ω_s	37,3 rad/s
ξ_s	0,3
ω_{min}	0 rad/s
ω_{max}	50π rad/s
$\Delta\omega$	$0,02\pi$ rad/s
t_i	0 s
t_f	50 s
Δt	0,01 s
PGA	0,475g

3.2. Rotina de Resolução da Equação do Movimento com Controle

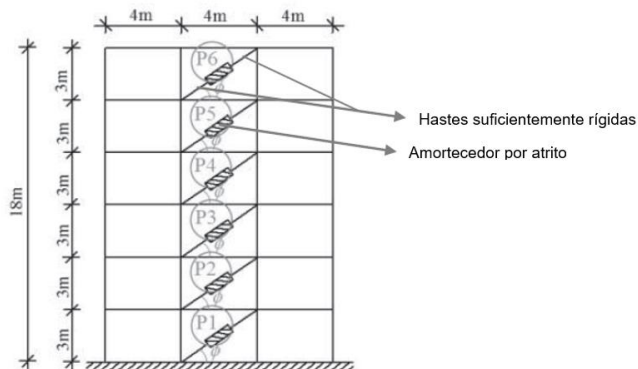
A segunda etapa desenvolvida no projeto foi a construção da rotina computacional que implementa o método de Newmark para a resolução da equação do movimento de uma estrutura com controle por meio de amortecedores por atrito. Para a validação desta rotina uma estrutura, proposta por Miguel et al. (2016b), modelada por um sistema constituído de massas, molas e amortecedores e submetida à excitação sísmica gerada com as variáveis de entrada apresentadas na Tab. 2 foi simulada. Para a simulação, cada um dos n andares é modelado como uma massa m_i e está conectado ao andar adjacente por uma mola de rigidez k_i e um amortecedor c_i dado pelo modelo de Rayleigh, esses valores são apresentados na Tab. 2. A estrutura analisada possui frequências naturais iguais a 2,28 Hz, 6,71 Hz, 10,75 Hz, 14,17 Hz, 16,76 Hz, e 18,38 Hz.

Tabela 2 - Dados de entrada para a geração do sinal sísmico e propriedades da estrutura analisada.

Parâmetro	Valor
ω_s	20 rad/s
ξ_s	0,5
ω_{min}	0 rad/s
ω_{max}	50π rad/s
$\Delta\omega$	$0,02\pi$ rad/s
t_i	0 s
t_f	20 s
Δt	0,01 s
PGA	0,2g
m_i	82.000 kg
k_i	290 M N/m
γ	$1,0699 \times 10^{-1}$
λ	$1,7695 \times 10^{-4}$

O desenho esquemático da estrutura analisada é apresentado na Fig. 1. Considera-se que os amortecedores são instalados entre os andares com hastes suficientemente rígidas. É importante ressaltar que a aplicação dos amortecedores é feita entre os andares e por esse motivo a força gerada pelos amortecedores deve ser decomposta com relação ao ângulo ϕ , mostrado na Fig. 1. Além disso, também é necessário levar em consideração a diferença entre a força de atrito em andares conectados a dois amortecedores.

Figura 1 - Estrutura analisada no processo de otimização.



Fonte: Miguel et al. (2016b).

Foram realizadas duas simulações com uma mesma excitação sísmica. Uma das simulações não considerou o controle pelos amortecedores por atrito e foi utilizada para validação do método de resolução da equação para o caso de vibração sem controle. Uma segunda simulação foi realizada levando em consideração as posições e cargas dos amortecedores por atrito otimizadas encontradas por Miguel et al. (2016b) e foi utilizada como uma das validações do método de resolução da equação do movimento para o caso de vibração com controle. As posições e cargas dos amortecedores obtidas por Miguel et al. (2016b) são apresentadas na Tab. 3. Verifica-se que as posições otimizadas para os amortecedores são os três primeiros andares da estrutura.

Tabela 3 - Posições e capacidades otimizadas dos amortecedores obtidas por Miguel et al. (2016b).

Posição	Força de Atrito [kN]
P1	415,63
P2	316,77
P3	203,04

3.3. Rotina de Otimização Estrutural com Excitação Sísmica Definida

Para realizar o primeiro processo de otimização estrutural utilizando o algoritmo de otimização escolhido e a rotina de resolução da equação do movimento de uma estrutura controlada por amortecedores por atrito, foi escolhida uma excitação sísmica que gerasse uma resposta similar à apresentada por Miguel et al. (2016b). Esse sinal sísmico foi utilizado como sinal padrão para as otimizações realizadas. Considerando a estrutura apresentada na Fig. 1 e os parâmetros apresentados na Tab. 2, foram realizadas dez otimizações independentes, buscando otimizar a posição e carga de três amortecedores, e seus resultados foram analisados e comparados aos resultados encontrados por Miguel et al. (2016b).

3.4. Rotina de Otimização Estrutural com Excitação Sísmica Aleatória

Após as simulações envolvendo uma excitação sísmica padrão, foram realizadas uma série de simulações envolvendo excitações sísmicas aleatórias aplicadas à estrutura apresentada na Fig. 1, possuindo as propriedades apresentadas na Tab. 2. Esse caso foi abordado pelo fato de que o método

escolhido para a modelagem da excitação sísmica não consegue produzir sinais com a variabilidade existente em um ambiente real. Sendo assim, um conjunto de 250 sinais sísmicos diferentes foi gerado, a Tab. 4 apresenta os valores médios utilizados para gerar os sinais e também os coeficientes de variação (CV) relacionados a cada um dos parâmetros de entrada da função geradora do sinal sísmico.

Tabela 4 - Valores médios e coeficientes de variação dos dados de entrada para geração dos sinais sísmicos aleatórios.

Parâmetro	Valor
$\overline{\omega_S}$	20 rad/s
$\overline{\xi_S}$	0,5
\overline{PGA}	0,2g
CV_{ω_S}	20%
CV_{ξ_S}	20%
CV_{PGA}	20%

Desta forma, os 250 sinais sísmicos são gerados com base nos valores médios corrigidos com um coeficiente de variação aplicado à uma distribuição normal em torno dos valores médios apresentados na Tab. 4. Esses 250 sísmos são utilizados para realizar os processos de otimização da posição e carga de três amortecedores por atrito e os resultados obtidos são analisados de forma a identificar as tendências apresentadas pelo processo.

4. RESULTADOS

4.1. Geração da Excitação Sísmica

Com o objetivo de validar/verificar o código implementado em Matlab® que cria a excitação sísmica, os parâmetros utilizados por Chiesa e Miguel (2017), apresentados na Tab. 1, foram adotados na rotina implementada. Em um primeiro momento, a rotina foi validada quanto à geração do espectro de potência por meio do filtro de Kanai-Tajimi. A Fig. 2 apresenta o resultado obtido por Chiesa e Miguel (2017) e pela rotina desenvolvida neste trabalho.

Analisando os dois espectros de potência é possível identificar a semelhança entre as curvas e desta forma é considerado que a rotina computacional de que gera o espectro de potência está validada. Em um segundo momento, foi gerado o histórico de aceleração obtido pela aplicação da Eq. (3) com os dados apresentados na Tab. 1. Na Fig. 3 e Fig. 4 são apresentados, respectivamente, o histórico de aceleração e o espectro de potência relativo ao histórico de aceleração gerado obtidos por Chiesa e Miguel (2017) e pela rotina desenvolvida neste trabalho.

Figura 2 - Espectro de potência obtido por (a) Chiesa e Miguel (2017) e pelo (b) autor.

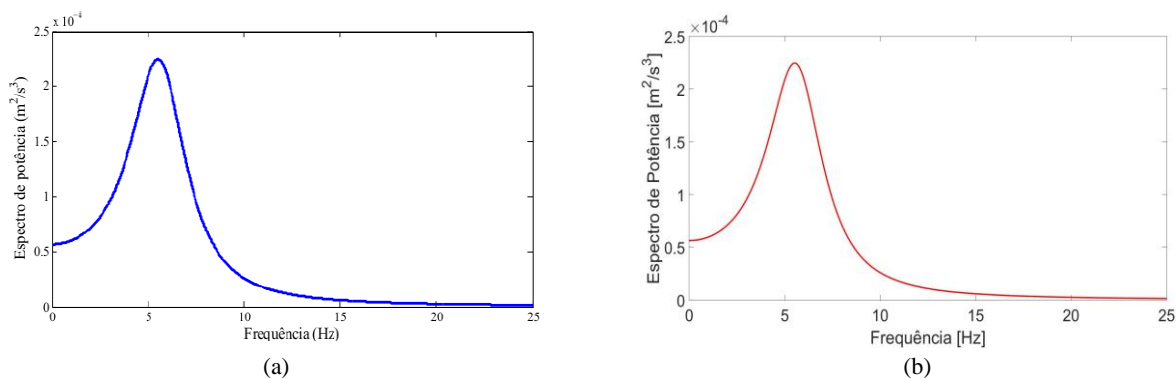


Figura 3 - Histórico de aceleração obtido por (a) Chiesa e Miguel (2017) e pelo (b) autor.

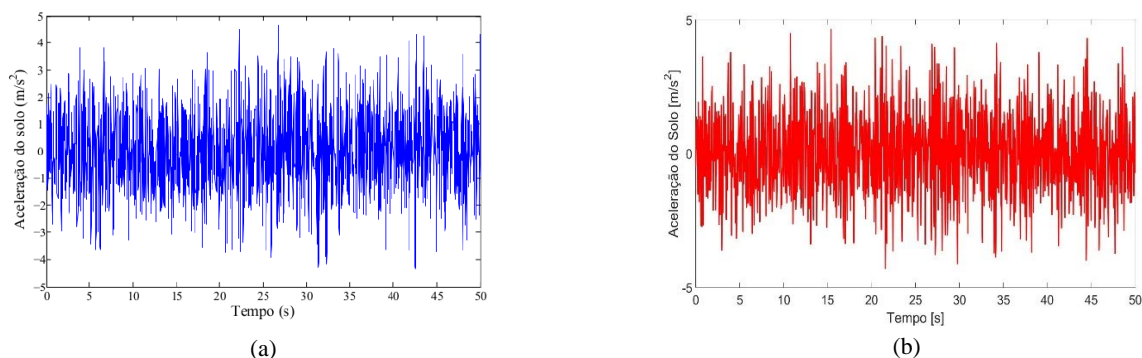
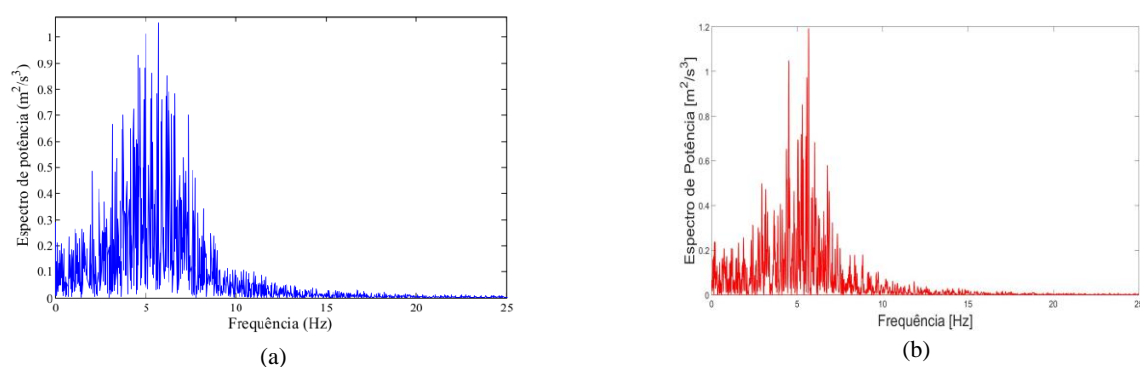


Figura 4 - Espectro de potência relativo ao histórico de aceleração obtido por (a) Chiesa e Miguel (2017) e pelo (b) autor.



A partir da análise visual dos gráficos gerados, é possível identificar a semelhança entre os resultados obtidos por Chiesa e Miguel (2017) e pela rotina implementada neste trabalho, entretanto, existe uma diferença visível entre os gráficos que é consequência da aleatoriedade do ângulo de fase ϕ_j . Desta forma, considera-se que a rotina computacional responsável pela geração da excitação sísmica está validada e, assim, poderá ser utilizada posteriormente como a força externa aplicada à estrutura onde os amortecedores por atrito serão otimizados e instalados.

4.2. Análise Dinâmica em uma Estrutura Controlada

Como forma de validação/verificação da rotina computacional que implementa o método de Newmark para a resolução da equação do movimento de uma estrutura com controle por meio de amortecedores por atrito, a estrutura apresentada na Fig. 1, que é modelada por um sistema constituído de massas, molas e amortecedores, foi simulada. Para a simulação, a estrutura possui as propriedades apresentadas na Tab. 2 e a excitação sísmica utilizada foi a que gerou, após algumas tentativas, os valores mais semelhantes para os deslocamentos máximos da estrutura não controlada encontrados por Miguel et al. (2016b). Portanto, é importante ressaltar que a excitação sísmica utilizada nesta etapa do projeto não é idêntica à utilizada por Miguel et al. (2016b), mas semelhante.

Duas simulações são realizadas, sendo determinada a resposta dinâmica da estrutura para o caso sem controle e com controle por meio do uso de amortecedores por atrito. Os parâmetros e posições utilizados na simulação foram determinados pelo processo de otimização realizado por Miguel et al. (2016b), sendo que os resultados para a posição e parâmetros médios são apresentados na Tab. 3.

Os resultados obtidos por Miguel et al. (2016b) e pela rotina implementada neste trabalho para o caso da estrutura sem e com controle são apresentados, respectivamente, na Tab. 5.

Tabela 5 - Deslocamentos máximos entre andares para a estrutura sem e com controle obtidos por Miguel et al. (2016b) e pelo autor.

Deslocamentos máximos entre andares sem amortecedores [m]				
Andar	Miguel et al. (2016b)		Simulação	
	Sem Controle	Com Controle	Sem Controle	Com Controle
1	0,0127	0,0042	0,0127	0,0040
2	0,0121	0,0043	0,0120	0,0043
3	0,0109	0,0042	0,0109	0,0035
4	0,0090	0,0032	0,0094	0,0034
5	0,0065	0,0027	0,0069	0,0030
6	0,0035	0,0020	0,0036	0,0017

Analisando os resultados apresentados na Tab. 5, é possível observar novamente a diferença entre os valores encontrados, essa diferença está relacionada à natureza aleatória do ângulo de fase ϕ_j utilizado na geração da excitação sísmica. Apesar disso, é razoável identificar que os valores para ambos casos, com e sem controle, são próximos quando comparados os resultados obtidos por Miguel et al. (2016b) e a rotina implementada neste trabalho. Considera-se assim, que a rotina computacional implementada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura controlada por amortecedores por atrito e submetida a uma excitação sísmica está validada.

Analisando os resultados apresentados na Tab. 5, também é possível identificar a redução na amplitude da resposta dinâmica da estrutura. Para a simulação realizada neste projeto a maior redução de deslocamento máximo entre andares ocorreu no primeiro andar, obtendo-se um valor 68,50 % menor para a configuração estrutural controlada. A redução na resposta dinâmica da estrutura para cada um dos seis andares é apresentada na Tab. 6.

Tabela 6 - Redução no deslocamento máximo entre andares obtido pela rotina implementada.

Redução no Deslocamento Máximo entre Andares	
Andar	Redução [%]
1	68,50
2	64,16
3	67,88
4	63,82
5	56,52
6	52,77

4.3. Otimização Estrutural com Excitação Sísmica Definida

Nesta etapa do projeto foi definida uma excitação sísmica padrão para ser utilizada no processo de otimização estrutural. A estrutura utilizada é apresentada na Fig. 1 e possui as características definidas na Tab. 2. O processo de otimização tem como função objetivo a minimização do máximo deslocamento relativo entre andares da estrutura e como variáveis de projeto as posições e forças dos amortecedores. As restrições são o número de amortecedores, limitados a três, e a máxima força para cada um dos amortecedores, limitadas em 500 kN. Dez processos de otimização independentes foram realizados e os resultados são apresentados na Tab. 7.

A análise da Tab. 7 permite identificar que os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização são similares, sendo que para todas as simulações o algoritmo de otimização encontrou os melhores resultados com os amortecedores instalados nos três primeiros andares. O máximo deslocamento relativo entre andares médio é 0,003292 m e o desvio padrão é 2,96E-05 m. O valor pequeno para o desvio padrão com relação à média dos valores indica que o algoritmo utilizado tem boa capacidade de otimização dos parâmetros utilizados, sendo que, para qualquer uma das simulações realizadas, a redução no máximo deslocamento relativo entre andares é superior a 73%.

Tabela 7 - Resultados obtidos nos processos de otimização com excitação sísmica definida.

Simulação	Posições	Forças [kN]	Máximo Deslocamento entre Andares [m]
Sem Controle	-	-	0,012787
1	[1 1 1 0 0 0]	[488,48; 458,55; 499,99]	0,003307
2	[1 1 1 0 0 0]	[484,59; 479,99; 477,87]	0,003247
3	[1 1 1 0 0 0]	[487,37; 402,68; 496,64]	0,003298
4	[1 1 1 0 0 0]	[394,43; 493,58; 496,32]	0,003302
5	[1 1 1 0 0 0]	[495,46; 493,58; 349,13]	0,003301
6	[1 1 1 0 0 0]	[415,46; 495,46; 349,13]	0,003272
7	[1 1 1 0 0 0]	[489,32; 438,39; 489,32]	0,003263
8	[1 1 1 0 0 0]	[454,00; 383,38; 482,40]	0,003351
9	[1 1 1 0 0 0]	[495,55; 458,26; 424,47]	0,003271
10	[1 1 1 0 0 0]	[500,00; 448,89; 500,00]	0,003308

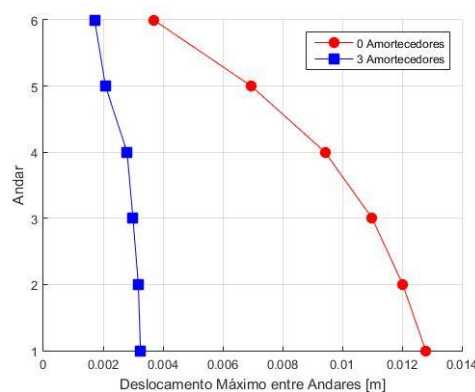
A Tab. 8 apresenta os deslocamentos relativos máximos entre andares para cada andar da estrutura no caso sem e com controle para a simulação em que o algoritmo de otimização encontrou o menor valor para o deslocamento relativo máximo entre andares. Também são apresentados os valores para redução no deslocamento relativo máximo entre andares obtida com a aplicação dos amortecedores.

A Fig. 5 apresenta de forma gráfica a comparação entre o deslocamento relativo máximo entre andares para a estrutura sem e com controle apresentada na Tab. 8, sendo visível a redução na resposta dinâmica da estrutura em decorrência da instalação dos amortecedores.

Tabela 8 - Redução nos deslocamentos máximos entre andares para a estrutura sem e com controle.

Deslocamento Máximo entre Andares [m]			
Andar	Sem Controle	Com Controle	Redução [%]
1	0,012787	0,003247	74,60
2	0,012022	0,003175	73,59
3	0,010998	0,002995	72,76
4	0,009422	0,002799	70,29
5	0,006953	0,002076	70,14
6	0,003685	0,001715	53,45

Figura 5 - Representação gráfica dos deslocamentos máximos da estrutura sem e com controle.



4.4. Otimização Estrutural com Excitação Sísmica Aleatória

Para avaliar de forma mais real o comportamento de uma estrutura, uma série de otimizações foram realizadas utilizando um total de 250 históricos de excitações sísmicas aleatórias, gerados de acordo com os parâmetros apresentados na Tab. 4. Estes históricos foram utilizados para realizar três processos de otimização independentes para a estrutura de seis andares apresentada na Fig. 1. A média dos máximos deslocamentos relativos por andar para as 250 excitações diferentes para cada uma das

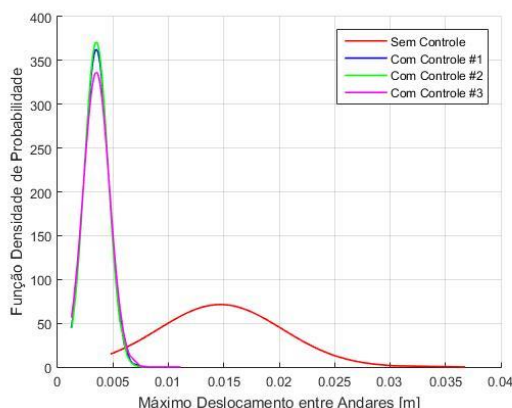
simulações e para a estrutura sem controle, assim como o desvio padrão e a variância são apresentados na Tab. 9.

Tabela 9 - Média, desvio padrão e variância para a estrutura sem e com controle.

Simulação	Média [m]	Desvio Padrão [m]	Variância [m ²]
Sem Controle	0,0146877644	0,0055924392	3,1275376645E-05
1	0,0034969844	0,0010998733	1,2097213077E-06
2	0,0034960940	0,0010753710	1,1564229587E-06
3	0,0035007404	0,0011855368	1,4054976517E-06

A análise dos dados da Tab. 9 evidencia que o algoritmo de otimização foi capaz de reduzir o deslocamento relativo máximo entre andares médio da estrutura quando submetida aos 250 sinais sísmicos. A redução foi de 76,1911 %, 76,1972 % e 76,1656 %, respectivamente, para as simulações 1, 2 e 3. Além da redução do valor médio, nota-se que o desvio padrão dos valores é menor para os casos da estrutura controlada, evidenciando que, além de reduzir o deslocamento relativo máximo da estrutura, o algoritmo foi capaz de realizar a otimização de forma consistente para o conjunto de sismos utilizado. Este fato pode ser observado graficamente na Fig. 6, na qual é apresentada a função densidade de probabilidade para as simulações e para o caso da estrutura sem controle.

Figura 6 - Função distribuição de probabilidade para as simulações realizadas e para a estrutura sem controle.



Analisando a Fig. 6 é possível identificar graficamente o posicionamento da curva relativa à estrutura não controlada em um deslocamento relativo máximo entre andares superior ao observado na curva para as três simulações realizadas. Ainda com relação à Fig. 6 é importante notar que o processo de otimização reduz o desvio padrão da média dos deslocamentos relativos máximos entre andares quando comparada à estrutura sem controle. Esse fato é evidenciado pelo estreitamento das curvas da estrutura controlada em relação à curva da estrutura sem controle.

Foi identificado, por meio de simulações anteriores e por trabalhos de outros autores, que as posições ótimas para os amortecedores por atrito na estrutura em análise são nos três primeiros andares. Desta forma, a Tab. 10 apresenta a relação do número de otimizações, dentre os 250 sinais sísmicos utilizados, que geraram amortecedores posicionados nos três primeiros andares da estrutura analisada.

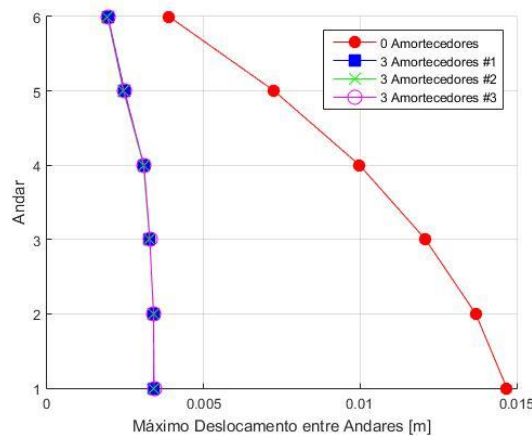
Tabela 10 - Número de vezes que cada andar foi selecionado para receber um amortecedor.

Simulação	1° Andar	2° Andar	3° Andar
1	242	249	160
2	240	249	175
3	244	250	169

Analisando os dados da Tab. 10 é possível identificar que, de fato, as otimizações realizadas atribuíram, em sua grande maioria, os amortecedores aos três primeiros andares da estrutura. Para a primeira simulação 96,8 %, 99,6 % e 64,0 % das otimizações definiram, respectivamente, os amortecedores no primeiro, segundo e terceiro andar. Para a segunda simulação 96,0 %, 99,6 % e 70,0 % das otimizações definiram, respectivamente, os amortecedores no primeiro, segundo e terceiro andar. Para a terceira simulação 97,6 %, 100,0 % e 67,6 % das otimizações definiram, respectivamente, os amortecedores no primeiro, segundo e terceiro andar.

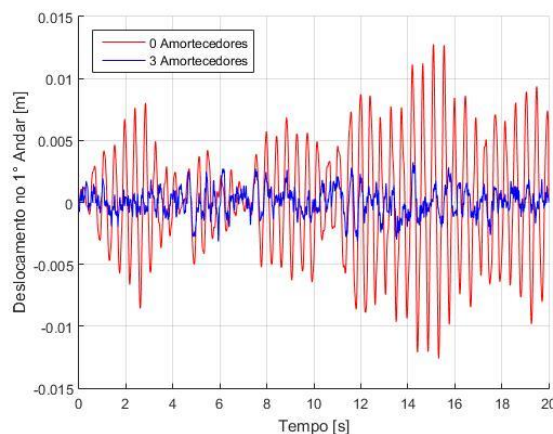
A Fig. 7 apresenta graficamente o comportamento do máximo deslocamento relativo entre andares para as simulações realizadas e para a estrutura controlada, sendo visível a redução na resposta dinâmica das estruturas controladas. A análise da Fig. 7 também permite ratificar o comportamento consistente do algoritmo de otimização, isso porque as três estruturas otimizadas apresentaram valores muito próximos para os deslocamentos máximos entre andares.

Figura 7 - Representação gráfica dos máximos deslocamentos por andar das simulações realizadas e da estrutura sem controle.



A Fig. 8 ilustra a redução da resposta dinâmica da estrutura submetida a uma excitação sísmica quando controlada por amortecedores por atrito. O histórico de deslocamento do primeiro andar da estrutura analisada, quando submetida a um dos 250 sinais sísmicos gerados, sem controle é apresentado em vermelho. O histórico de deslocamento do primeiro andar da mesma estrutura, quando submetida ao mesmo sinal sísmico, com a aplicação dos amortecedores nas posições e com as forças otimizadas na segunda simulação é apresentado em azul.

Figura 8 - Resposta dinâmica do primeiro andar da estrutura sem e com controle.



A análise qualitativa da Fig. 8 é suficiente para identificar a redução significativa na amplitude da resposta dinâmica da estrutura quando controlada por amortecedores por atrito. Desta forma, evidencia o desempenho positivo desses dispositivos de controle quando aplicados a estruturas submetidas a excitações sísmicas.

5. CONCLUSÃO

As consequências negativas proporcionadas por eventos sísmicos às estruturas civis foi a motivação para a procura por alternativas que proporcionassem a redução da resposta dinâmica de estruturas submetidas a excitações sísmicas e, desta forma, reduzir a probabilidade de falha e aumentar a segurança das estruturas. Amortecedores por atrito foram os dispositivos de controle selecionados para reduzir a resposta dinâmica das estruturas por se tratarem de dispositivos simples e com custo reduzido, quando comparados aos demais tipos de amortecedores ou sistemas ativos de controle. Entretanto, a simples utilização desses componentes não é suficiente para atingir a redução máxima da resposta dinâmica das estruturas. Assim, um algoritmo de otimização baseado no comportamento de caça de baleias jubarte foi utilizado para determinar as posições e capacidades dos amortecedores que geram a maior redução possível da resposta dinâmica das estruturas. Como forma de análise das soluções propostas, este trabalho avaliou o impacto do uso de amortecedores por atrito com posições e capacidades otimizadas uma estrutura submetida a excitações sísmicas. A análise foi realizada de duas formas distintas. A primeira levou em consideração um sinal sísmico previamente definido e que foi utilizado como força externa no processo de otimização dos amortecedores, gerando reduções de até 74 % no deslocamento máximo entre andares da estrutura. A segunda análise foi realizada por meio da otimização da mesma estrutura, porém utilizando um conjunto de excitações sísmicas geradas aleatoriamente. O algoritmo de otimização foi utilizado para determinar a posição e força dos amortecedores que reduzissem a resposta dinâmica da estrutura para cada um dos sinais sísmicos gerados. Desta maneira, foi possível identificar a tendência de posicionamento dos amortecedores na estrutura, onde, na grande maioria das simulações, a posição ótima para os dispositivos foram os três primeiros andares da estrutura. Este processo de otimização foi capaz de reduzir a resposta da estrutura em termos da média do deslocamento relativo máximo entre andares em até 76 %, quando comparado à estrutura sem controle. A análise estatística dos resultados obtidos para as simulações com o sismo definido e para as simulações com os sismos aleatórios permitiu identificar que os valores encontrados para os desvios padrão com relação à média dos resultados foi consideravelmente pequeno, evidenciando ao algoritmo de otimização capacidade significativa para a resolução deste tipo de problema com consistência.

Os resultados obtidos no projeto até o momento demonstram que o sistema de controle por meio de amortecedores por atrito é um método válido para o controle de estruturas submetidas a excitações sísmicas, representando uma estratégia economicamente viável e que possui ótimo desempenho. Porém, trabalhos futuros devem ser desenvolvidos para realizar a análise de estruturas mais complexas, introduzindo o método de elementos finitos, para que a influência desses dispositivos de controle seja avaliada com mais precisão. Apesar de terem sido feitas análises estruturais considerando a aleatoriedade das excitações sísmicas neste trabalho, é de grande importância que sejam desenvolvidos estudos futuros nos quais a variabilidade das características da estrutura - como o módulo de elasticidade e a densidade do material - seja considerada nas análises para que a modelagem do problema seja o mais consistente possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGHERI, Saman; RAHMANI-DABBAGH, Vahid. Seismic response control with inelastic tuned mass dampers. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 172, p.712-722, out. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.063>>

CHIESA, Daniela dalla; MIGUEL, Letícia Fleck Fadel. Geração de uma excitação sísmica através do espectro de Kanai-Tajimi. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.31-42, 28 maio 2017. UPF Editora. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5335/rbca.v9i1.6660>>

JAFARI, S.; NIKOLAIDIS, T. Meta-heuristic global optimization algorithms for aircraft engines modelling and controller design; A review, research challenges, and exploring the future. **Progress in Aerospace Sciences**, [s. l.], v. 104, p. 40–53, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.003>>

JARRAHI, H. et al. Optimal design of rotational friction dampers for improving seismic performance of inelastic structures. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 27, p. 100960, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2019.100960>>

KANAI, K. **An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions**. Bulletin Earthquake Research Institute University of Tokyo, n. 39, p. 85–95, 1961.

MASOTTI, Diego. **Comparação de métodos de determinação do amortecimento estrutural, através de técnicas de ajuste de curvas de funções resposta em frequência**. 2008. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MIGUEL, Letícia Fleck Fadel; FADEL MIGUEL, Leandro Fleck; LOPEZ, Rafael Holdorf. Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain. **Engineering Optimization**, [s. l.], p. 1–15, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/0305215X.2018.1428318>>

MIGUEL, Letícia Fleck Fadel; MIGUEL, Leandro Fleck Fadel; LOPEZ, Rafael Holdorf. Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading. **Engineering Optimization**, [s.l.], v. 48, n. 4, p.582-602, 30 mar. 2016b. Informa UK Limited. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/0305215x.2015.1025774>>

MIGUEL, Letícia Fleck Fadel; MIGUEL, Leandro Fleck Fadel; LOPEZ, Rafael Holdorf. Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, [s. l.], v. 25, n. 17, p. 869–885, 2016a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/tal.1287>>

MIRJALILI, Seyedali; LEWIS, Andrew. The Whale Optimization Algorithm. **Advances in Engineering Software**, [s. l.], v. 95, p. 51–67, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>>

NAEEM, Asad; KIM, Jinkoo. Seismic performance evaluation of a spring viscous damper cable system. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 176, p.455-467, dez. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.055>>

ONTIVEROS-PÉREZ, Sergio Pastor; MIGUEL, Letícia Fleck Fadel; RIERA, Jorge Daniel. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 190, p.276-284, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.021>>

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 449 p.

SADDIQUE, Muhammad Shahzar et al. Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques—Status and technological review. **Electric Power Systems**

Research, [s. 1.], v. 178, p. 106031, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eprs.2019.106031>>

SHINOZUKA, M.; JAN, C. M. **Digital simulation of random processes and its applications. Journal of Sound and Vibration**, [s. 1.], v. 25, n. 1, p. 111–128, 1972. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0022-460x\(72\)90600-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-460x(72)90600-1)>

SIAMI, A. et al. Parameter optimization of an inerter-based isolator for passive vibration control of Michelangelo's Rondanini Pietà. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [s.l.], v. 98, p.667-683, jan. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.030>>

TAJIMI, H. A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. In: **Proceedings of 2nd World Conference in Earthquake Engineering (WCEE)**. Tóquio, Japão: [s.n.], 1960. v. 1, p. 781–797.

NOMENCLATURA

S	Densidade Espectral	$[m^2/s^3]$
S_0	Densidade Espectral Constante	$[m^2/s^3]$
ω_S	Frequência do Solo	$[rad/s]$
ξ_S	Amortecimento do Solo	
\ddot{y}	Aceleração do Solo	$[m/s^2]$
N_ω	Número de Intervalos da Banda de Frequências	
$\Delta\omega$	Intervalo de Frequência	$[rad/s]$
ϕ_j	Ângulo de Fase	$[rad]$
γ	Constante de Massa de Rayleigh	$[1/s]$
λ	Constante de Rigidez de Rayleigh	$[s]$
M	Matriz de Massa	$[kg]$
C	Matriz de Amortecimento	$[N\ s/m]$
K	Matriz de Rigidez	$[N/m]$
\vec{F}	Vetor de Força Externa	$[N]$
\vec{F}_a	Vetor de Força do Amortecedor por Atrito	$[N]$
$\vec{\ddot{z}}$	Vetor de Aceleração	$[m/s^2]$
$\vec{\dot{z}}$	Vetor de Velocidade	$[m/s]$
\vec{z}	Vetor de Posição	$[m]$
μ	Coefficiente de Atrito	
N	Força Normal	$[N]$
\dot{v}	Velocidade Relativa nos Terminais do Amortecedor	$[m/s]$
t_0	Instante Inicial	$[s]$

t_j	Instante na Iteração j	[s]
t_{j+1}	Instante na Iteração j + 1	[s]
α	Coefficiente para o Método de Newmark	
β	Coefficiente para o Método de Newmark	
ω_{min}	Frequência Mínima	[rad/s]
ω_{max}	Frequência Máxima	[rad/s]
t_i	Instante de Tempo Inicial	[s]
t_f	Instante de Tempo Final	[s]
Δt	Incremento de Tempo	[s]
g	Aceleração da Gravidade, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$	[m/s ²]
PGA	Aceleração de Pico do Solo	[m/s ²]
m_i	Massa do andar i	[kg]
k_i	Rigidez Equivalente do Andar i	[N/m]
c_i	Amortecimento do Andar i	[N s/m]
ϕ	Ângulo de Inclinação do Amortecedor	[°]
$\overline{\omega}_S$	Frequência Média do Solo	[rad/s]
$\overline{\xi}_S$	Amortecimento Médio do Solo	
\overline{PGA}	Aceleração de Pico Média do Solo	[m/s ²]
CV_{ω_S}	Coefficiente de Variação da Frequência do Solo	
CV_{ξ_S}	Coefficiente de Variação do Amortecimento do Solo	
CV_{PGA}	Coefficiente de Variação da Aceleração de Pico do Solo	