

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES DE MASSAS SINTONIZADAS RECORRENDO A ALGORITMOS GENÉTICOS

Matheus Abreu Kerkoff
Graduando em
Engenharia Civil
Centro Tecnológico –
Universidade Federal do
Espírito Santo

João M. C. Estêvão
Professor Doutor
Instituto Superior de
Engenharia –
Universidade do
Algarve

Élcio Cassimiro Alves
Professor Doutor
Centro Tecnológico –
Universidade Federal
do Espírito Santo

SUMÁRIO

O software STRUCTURE3D é uma aplicação de informática desenvolvida na Universidade Federal do Espírito Santo, no Brasil, que foi realizada em ambiente MATLAB. No contexto deste trabalho, é apresentado o desenvolvimento de uma nova funcionalidade que foi implementada no STRUCTURE3D, e que foi desenvolvida no âmbito de um trabalho de investigação realizado no Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve. O objetivo dessa funcionalidade consiste na possibilidade de incluir nos modelos estruturais os sistemas de amortecimento de massa sintonizada, internacionalmente conhecidos por TMD (Tuned Mass Dampers). Atendendo às dificuldades inerentes à seleção das características destes dispositivos, foi concebido um algoritmo que permite a realização da otimização do desempenho da estrutura, através do ajuste automático dos valores da rigidez e/ou da massa de cada TMD. Para este efeito, são usadas rotinas pré-definidas do MATLAB, referentes a algoritmos genéticos, para a obtenção dos valores ótimos das características de cada um dos TMD adicionados ao sistema estrutural. É apresentado um caso de estudo que ilustra as capacidades do programa desenvolvido.

ABSTRACT

STRUCTURE3D is a software developed at the Federal University of Espírito Santo, Brazil, which was created in MATLAB environment. In the context of this work, it is presented the development of a new functionality that was implemented in STRUCTURE3D, which was developed within the framework of a research carried out in the Department of Civil Engineering of the Instituto Superior de Engenharia of the University of Algarve. The purpose of this functionality is to include the tuned mass damping systems internationally known as TMD (Tuned Mass Dampers) in structural models. Considering the difficulties inherent to the selection of the characteristics of these devices, an algorithm was conceived that allows the performance of the structure to be optimized by automatically adjusting the stiffness and/or mass values of each TMD. For this purpose, pre-defined MATLAB routines, referring to genetic algorithms, are used to obtain the optimal values of the characteristics of each TMD added to the structural system. A case study is presented that illustrates the capabilities of the developed software.

PALAVRAS-CHAVE: Amortecedores de massa sintonizada; Algoritmos genéticos; STRUCTURE3D.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido dada considerável atenção à pesquisa e ao desenvolvimento de dispositivos de controle estrutural, com particular ênfase na redução do efeito da ação do vento e na redução da resposta sísmica de edifícios e pontes [1]. Alguns desses dispositivos, como é o exemplo do Amortecedor de Massa Sintonizada (TMD), conseguem reduzir significativamente as respostas de uma estrutura sujeita a ações dinâmicas [2].

Como o desempenho de um TMD depende de suas características físicas, incluindo a massa, a rigidez e o amortecimento, têm sido propostos diversos métodos para a determinação dos valores ideais dos parâmetros do TMD, com base em diferentes critérios de projeto [3].

Os algoritmos genéticos (AGs) têm sido amplamente utilizados para resolver problemas de otimização na maioria dos campos da engenharia [4], designadamente no desenvolvimento de TMDs tendo em vista a melhoria do comportamento dinâmico de estruturas em regime linear e não-linear [3], [5], [6] e [7].

O presente trabalho tem como objetivo comprovar a eficácia dos algoritmos genéticos em problemas de otimização das características físicas de um TMD, e demonstrar o seu efeito em relação à modificação da resposta estrutural de estruturas sujeitas à ação de sismos.

A região do Nordeste do Brasil foi escolhida como caso de estudo do presente trabalho, porque embora seja uma zona de baixa sismicidade, já foi sujeita a sismos no passado. Assim, procurou-se simular o efeito de um sismo semelhante ao que atingiu o município de João Câmara no estado do Rio Grande do Norte, que ocorreu em 30/11/1986, com uma magnitude de $M = 5.1$.

O estudo foi inteiramente realizado com base no software STRUCTURE3D, anteriormente desenvolvido por investigadores da Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil) em ambiente MATLAB. Adicionou-se ao software rotinas de análise dinâmica, análise sísmica, implementação e otimização de TMD através do recurso a algoritmos genéticos.

Nas seguintes seções serão apresentadas, primeiramente, uma breve explicação do funcionamento de um algoritmo genético e em seguida a formulação do problema e as metodologias de cálculo utilizadas. Logo após, serão apresentados os resultados do problema de otimização e as respostas estruturais para o sismo considerado. Por fim, na última seção, será apresentada a conclusão do trabalho.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos, desenvolvidos por Holland em 1975, são poderosos métodos computacionais [3]. Um algoritmo genético consiste num processo computacional iterativo que simula os processos naturais de sobrevivência das espécies, conforme estudos feitos por Darwin. Os algoritmos genéticos buscam o indivíduo ótimo global através de operações probabilísticas sobre uma população de indivíduos. Todo o indivíduo representa uma solução para o problema por meio do seu genoma [8].

Através do MATLAB é possível utilizar um algoritmo genético para determinar o mínimo de uma função objetivo fazendo uso da função preexistente *ga*.

O algoritmo inicializa o problema com uma população inicial aleatória dentro dos limites superiores e inferiores para as variáveis que regem o problema. Os candidatos aos pais dos indivíduos da geração seguinte são selecionados e, em seguida, é

realizada a reprodução do grupo pelo cruzamento dos genes (variáveis que regem o problema), onde o algoritmo tenta gerar melhores soluções para o problema. A mutação é um tipo de operador genético que garante a diversidade genética e assim evita a convergência prematura do algoritmo, pois evita a aparição de ótimos locais. O elitismo é uma forma de melhorar o processo de convergência do algoritmo, transferindo o indivíduo (ou indivíduos) mais apto para a geração seguinte. Por fim, é atingida a convergência quando a mudança de valor da função objetivo para cada iteração é menor do que o valor estipulado para a tolerância [8].

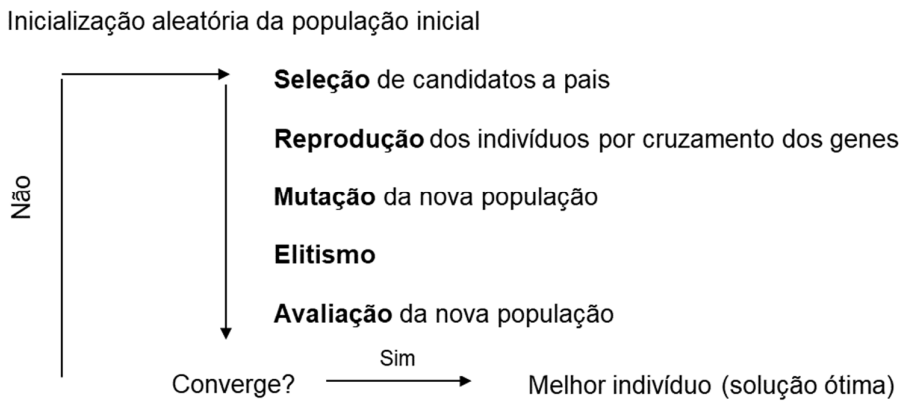


Fig. 1 - Representação do funcionamento do algoritmo genético.

3. FORMULAÇÃO

3.1. Equações de movimento – Sistemas dinâmicos de vários graus de liberdade

É comum os problemas de Engenharia Sísmica apresentarem vários graus de liberdade, e serem sujeitos a múltiplas componentes de vibração devido à passagem das ondas sísmicas [9].

A equação de movimento de um sistema de n graus de liberdade pode ser escrita da seguinte maneira:

$$[M] * \{a_{(t)}\} + [C] * \{v_{(t)}\} + [K] * \{d_{(t)}\} = -[M] \cdot \{a_{g(t)}\} \quad (1)$$

Em que $[M]$, $[C]$ e $[K]$ [9] são respetivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema estrutural, $\{a_{(t)}\}$, $\{v_{(t)}\}$ e $\{d_{(t)}\}$ são respetivamente os vetores aceleração, velocidade e deslocamento, sendo $\{a_{g(t)}\}$ a aceleração na base da estrutura. Como o STRUCTURE3D é um programa que realiza a análise de pórticos espaciais, existem seis graus de liberdade por cada nó da estrutura.

A equação de movimento pode ser resolvida por via analítica ou utilizando um método numérico. No presente trabalho utilizou-se o método numérico de Newmark [10].

A matriz de amortecimento $[C]$ foi obtida através de uma análise modal prévia da estrutura, conforme a equação seguinte.

$$[C] = [M] * (\sum_{i=1}^n 2 * \xi_i * w_i * \{\bar{\Phi}_i\} * \{\bar{\Phi}_i\}^T) * [M] \quad (2)$$

Em que ξ_i é o coeficiente de amortecimento modal do modo i , e os vetores $\{\bar{\Phi}_i\}$ correspondem às configurações modais normalizadas em relação à massa.

3.2. Função objetivo do problema de otimização

Com vista à obtenção das características ótimas do TMD, foi definido um problema de otimização cuja função objetivo consiste em minimizar a resultante máxima da força de inércia do problema dinâmico. Utilizaram-se como variáveis do problema as propriedades físicas do TMD. Portanto, os valores ótimos de massa e rigidez do TMD são definidos resolvendo o problema de otimização seguinte:

$$F.O. = \max(|\sum_{t=0}^{t_f} m_i * a_{i(t)}|) \quad (3)$$

Onde:

t_f = tempo final de aplicação da carga dinâmica;

m_i = massa do i -ésimo nó da estrutura;

$a_{i(t)}$ = aceleração do i -ésimo nó da estrutura no instante t .

Com as seguintes restrições para deslocamento e aceleração de cada nó:

$$a_{max} \leq a_{lim}$$

$$d_{max} \leq d_{lim}$$

Sendo a_{max} e d_{max} a aceleração e deslocamento máximo da estrutura, respetivamente e a_{lim} e d_{lim} a aceleração e deslocamento limite da estrutura para o problema de otimização.

O algoritmo genético varia a rigidez e a massa do TMD até encontrar o valor ótimo para a função objetivo. Dessa forma, são obtidos os valores ótimos das propriedades físicas do TMD.

4. VALIDAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Validação da análise sísmica e da otimização das propriedades do TMD de estrutura bidimensional

De forma a validar os resultados do programa desenvolvido para a análise sísmica de estruturas com TMD, o pórtico (com solução analítica conhecida) que está apresentado na Figura 2 foi modelado e analisado no STRUCTURE3D (Figura 3).

Os valores de aceleração para o primeiro grau de liberdade d_1 e para o segundo grau de liberdade d_2 (TMD), cuja massa é de 5 toneladas, foram calculados pelo STRUCTURE3D. O resultado no instante $t = 0.31s$ é comparado com a solução analítica [11] apresentada na Tabela 1.

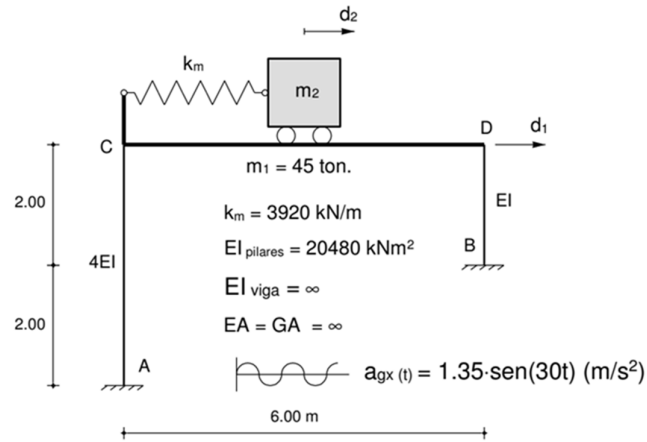


Fig. 2 - Problema proposto para validação do STRUCTURE3D [11].

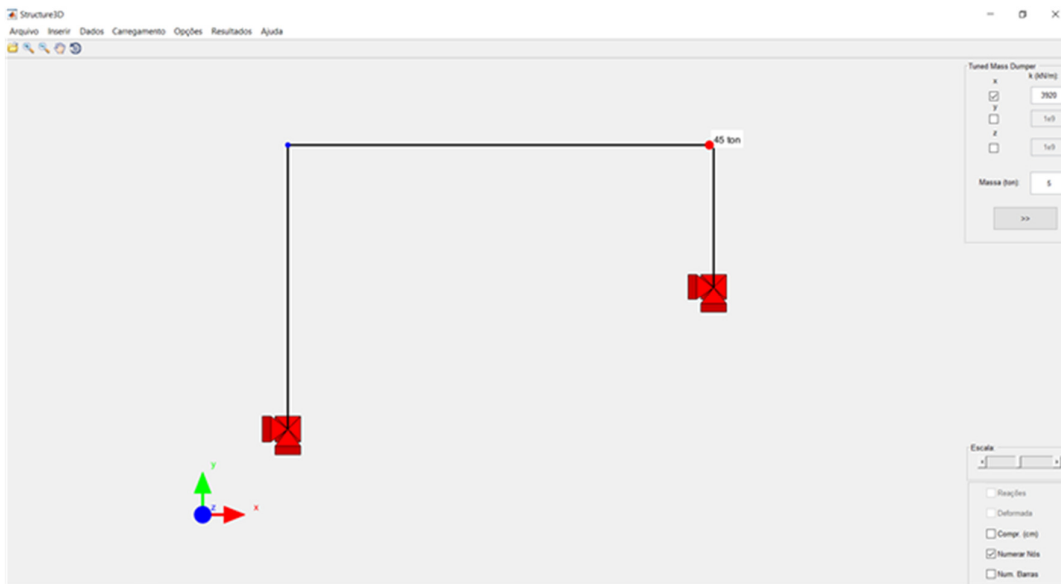


Fig. 3 - Estrutura 1 modelada no STRUCTURE3D.

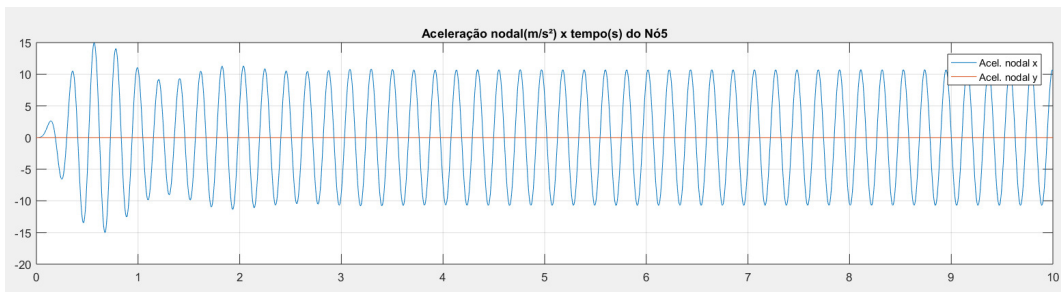


Fig. 4 - Acelerações calculadas pelo STRUCTURE3D para o segundo grau e liberdade.

Os resultados obtidos por via numérica pelo programa, designadamente para as acelerações dos dois graus de liberdade, são muito próximos dos obtidos por via analítica. Para o primeiro grau de liberdade a diferença é de -0.97156%, e de 0.16813% para o segundo.

Tabela 1 – Comparação da resposta obtida pelo STRUCTURE3D com a solução analítica [11].

	STRUCTURE3D	SOLUÇÃO ANALÍTICA
a1 $t = 0.31$ (m/s ²)	3.54807	3.51393
a2 $t = 0.31$ (m/s ²)	2.94518	2.95014

Para a resolução do problema de otimização, utilizou-se o algoritmo genético implementado no MATLAB com os seguintes parâmetros [12]:

- Tamanho da população: 20 indivíduos;
- Tolerância da função objetivo: 1×10^{-8} ;
- Número máximo de gerações: 2000 gerações;
- Crossover rate: 0.75;
- $a_{lim} = 15$ m/s²;
- $d_{lim} = 2 \times 10^{-2}$ m.

O algoritmo genético permite apresentar o gráfico de evolução dos melhores indivíduos para cada geração, tal como é ilustrado na Figura 5.

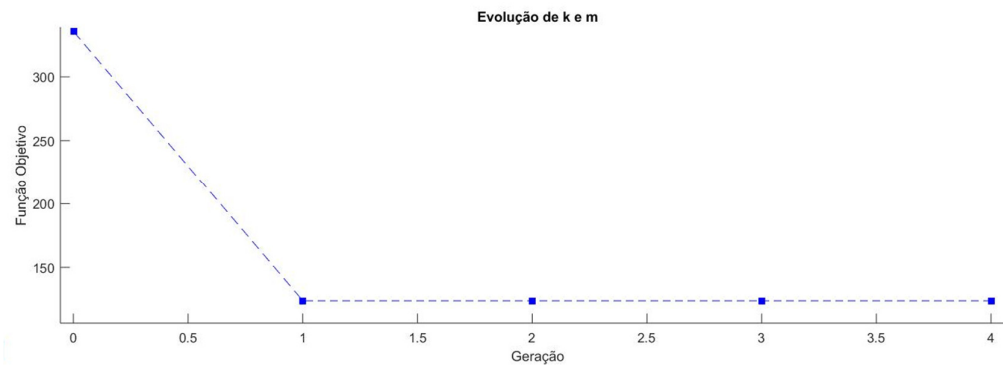


Fig. 5 - Evolução iterativa típica dos valores mínimos da função objetivo.

De forma a validar o algoritmo de otimização implementado no STRUCTURE3D, comparou-se o resultado da otimização obtido pelo algoritmo genético com os resultados obtidos pelo Método dos Pontos Interiores [13] e pela Programação Quadrática Sequencial [14], cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

A otimização através do algoritmo genético resultou numa diminuição de 29.0518% do valor da função objetivo, enquanto o Método dos Pontos Interiores e a Programação Quadrática Sequencial diminuíram o valor máximo da resultante das forças de inércia em 26.7024% e 26.9056%, respetivamente.

Através dos resultados dispostos na tabela pode-se perceber que os algoritmos de otimização convergem para um mínimo global semelhante e, portanto, comprova-se a eficácia do algoritmo de otimização.

Tabela 2: Comparação entre função objetivo e propriedades do TMD original e TMD otimizado.

	ORIGINAL	ALGORITMO GENÉTICO	PONTOS INTERIORES	PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA SEQUENCIAL
F_{\max} (kN)	174.5126	123.8135	127.9135	127.5590
k (kN/m)	3920.0000	7425.7295	7486.2442	7500.0000
m (ton)	5.0000	14.6962	14.6005	13.9781

4.2. Otimização das propriedades do TMD sob ação sísmica

Para comprovar a eficácia do programa desenvolvido para o dimensionamento otimizado de um TMD, assim como a sua eficácia na redução das respostas de uma estrutura sujeita à ação de um sismo, foi modelado no STRUCTURE3D o pórtico apresentado na Figura 6.

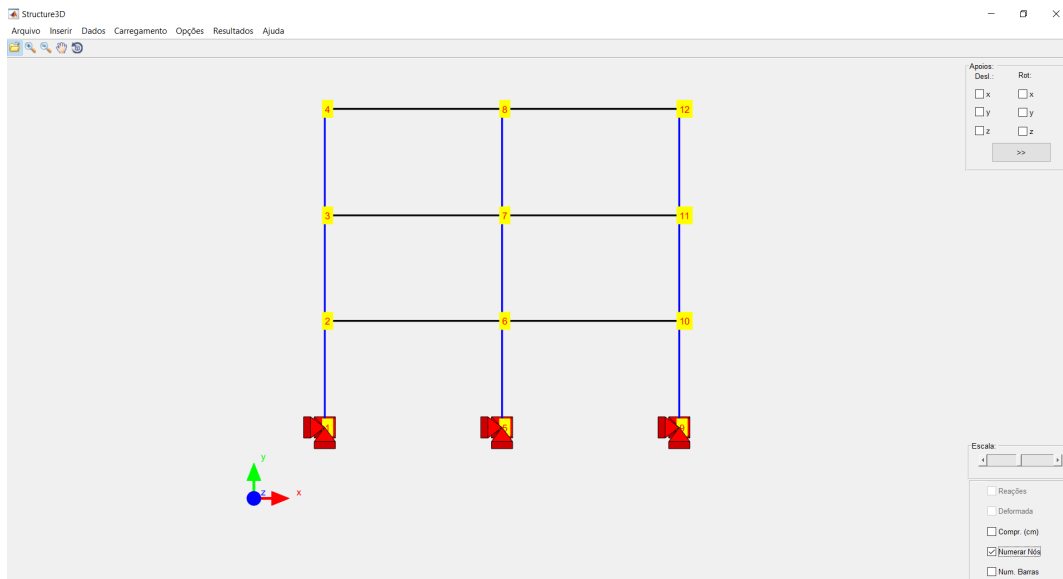


Fig. 6 - Estrutura 2 modelada no STRUCTURE3D.

Utilizou-se um pé direito de 3 metros para cada andar do edifício, e vigas com vãos de 5 metros. O material das vigas e pilares é o um betão armado com módulo de elasticidade $E = 30$ GPa. A seção das vigas é quadrada com 15×40 cm, e a dos pilares 20×30 cm. O coeficiente de amortecimento modal ξ da estrutura foi fixado em 5%.

Para realizar a análise sísmica da estrutura, foi escolhido um sismo semelhante ao sismo de João Câmara. Esse sismo ocorreu em 30/11/1986, no estado do Rio Grande do Norte, sendo a magnitude igual a $M = 5.1$, e provocou inúmeros danos em construções existentes no município. O sismo terá tido origem na Falha de Samambaia [15].

De modo a simular o efeito do sismo de João Câmara, usou-se um registro do sismo de La Habra de 28 de março de 2014, obtido na rede SCSN dos Estados Unidos a 6.7 km do epicentro (distância semelhante da cidade de João Câmara à Falha de Samambaia), cuja magnitude também foi $M = 5.1$.

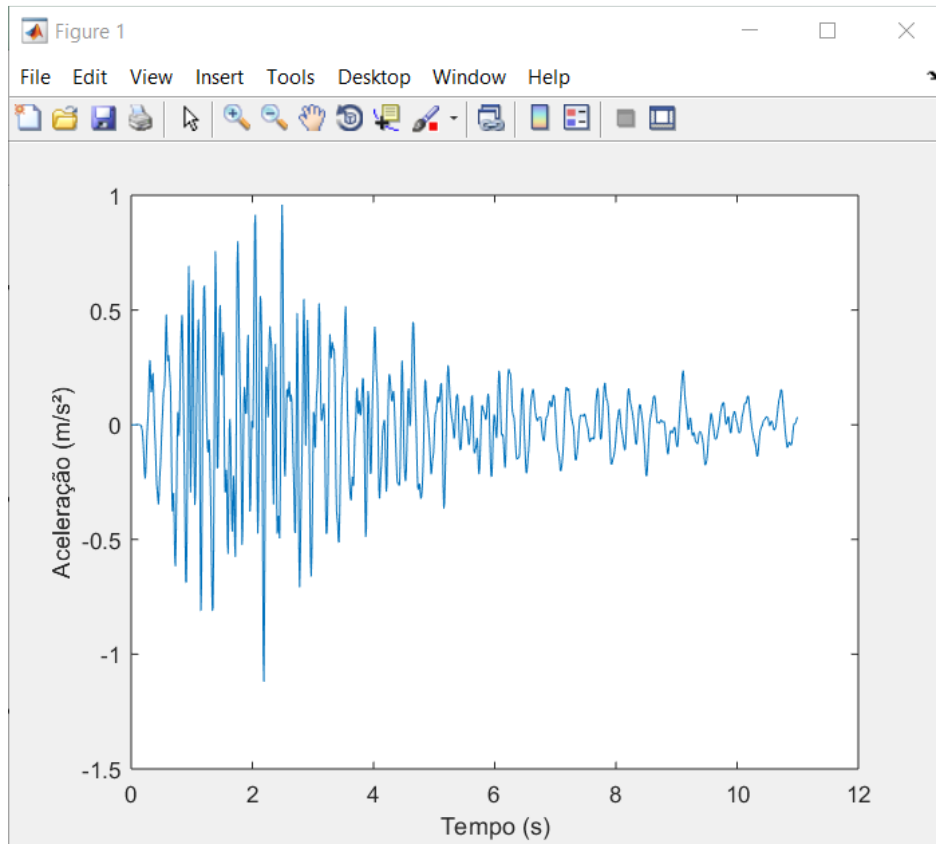


Fig. 7 - Registro do sismo de La Habra apresentado no STRUCTURE3D.

Para a resolução do problema de otimização, utilizou-se o algoritmo genético implementado no MATLAB com os seguintes parâmetros [12]:

- Tamanho da população: 20 indivíduos;
- Tolerância da função objetivo: 1×10^{-5} ;
- Número máximo de gerações: 2000 gerações;
- Crossover rate: 0.75;
- $a_{lim} = 4 \text{ m/s}^2$;
- $d_{lim} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Os limites inferiores e superiores de massa e rigidez do TMD foram fixados conforme valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites inferiores e superiores fixados para o TMD.

LIMITES	MASSA (ton.)	RIGIDEZ (kN/m)
Inferiores	0	0
Superiores	15	10000

O algoritmo genético permite apresentar o gráfico de evolução dos melhores indivíduos para cada geração, tal como é ilustrado na Figura 8.

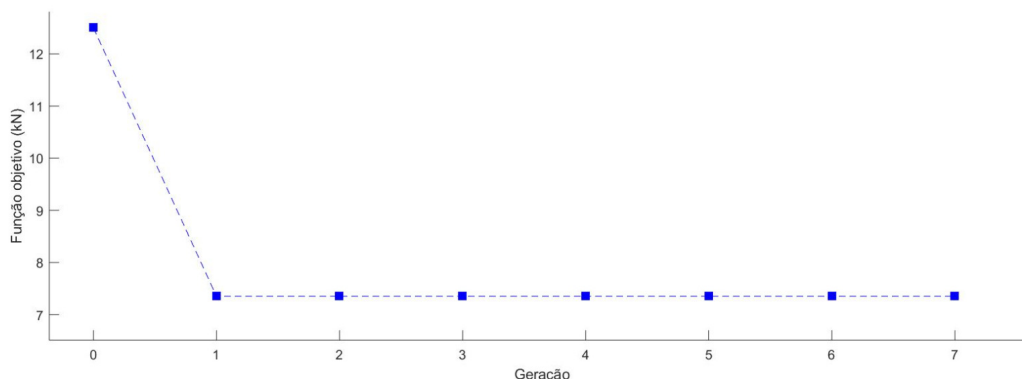


Fig. 8 - Evolução iterativa típica dos valores mínimos da função objetivo.

Nota-se, através da observação do gráfico, que o algoritmo converge para uma solução ótima devido à estabilização do valor da função objetivo.

O valor obtido para a massa foi de 0.5397 toneladas, e o valor da rigidez foi igual a 1269.8680 kN/m para o TMD adicionado no oitavo nó da estrutura. Na Tabela 4 estão apresentados os valores da função objetivo da estrutura sem o TMD, por comparação com os valores resultantes do processo de otimização com recurso aos algoritmos genéticos. Ainda, comparam-se os resultados obtidos com o Método dos Pontos Interiores e Programação Quadrática Sequencial.

Tabela 4 – Comparação da função objetivo de estrutura sem TMD e com TMD otimizado.

	SEM TMD	ALGORITMO GENÉTICO	PONTOS INTERIORES	PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA SEQUENCIAL
F.O. (kN)	10.4378	7.3520	7.4462	7.5014
K (kN/m)	-	1269.8680	1200.0005	1200.0468
m (ton.)	-	0.5397	0.5578	0.5001

Percebe-se que o valor da função objetivo se aproxima para os três casos de otimização, indicando uma convergência para o mínimo global do problema. A máxima resultante das forças de inércia reduziu em 29.5639% através da otimização pelo algoritmo genético.

O STRUCTURE3D calculou o deslocamento, a velocidade e a aceleração de cada nó da estrutura sob a ação sísmica em questão, e realizou o cálculo das respostas estruturais do edifício sem o TMD e com o TMD otimizado. Em seguida os resultados foram exportados para o Microsoft Excel onde foram criados os gráficos apresentados nas Figuras 9 a 11, para comparação dos resultados obtidos.

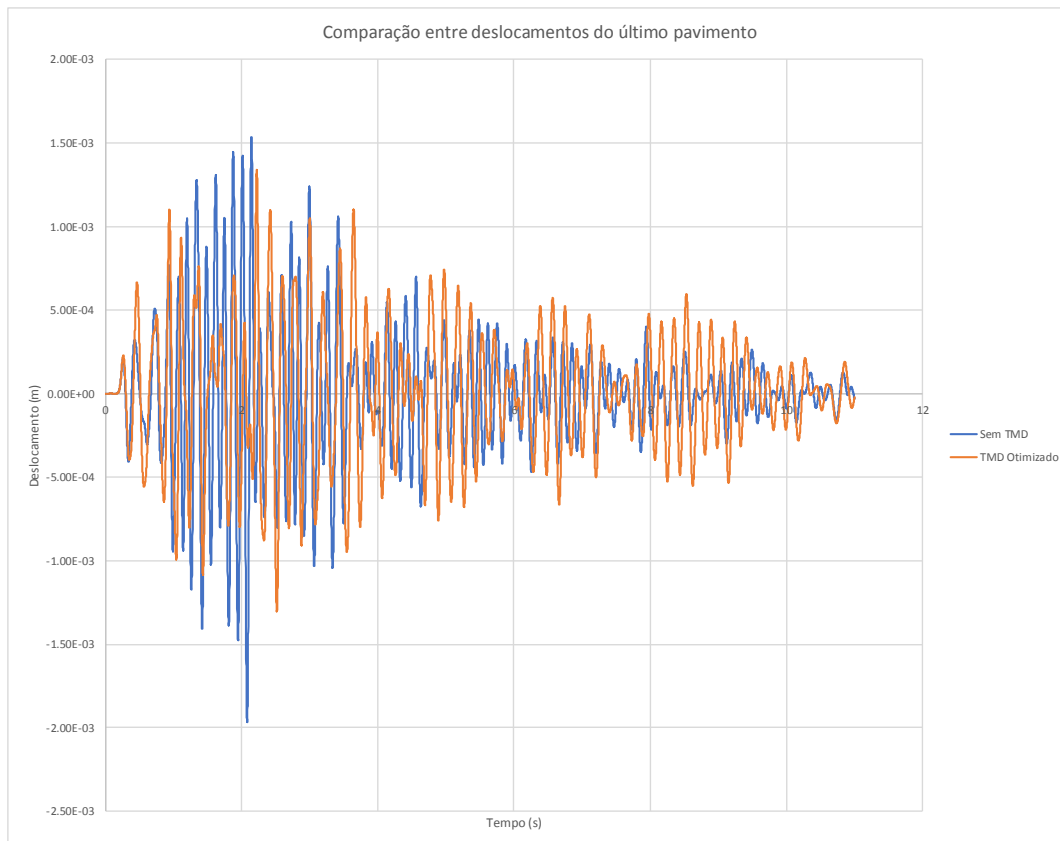


Fig. 2 - Comparação entre os deslocamentos do topo do edifício, obtidos sem TMD e com o TMD otimizado.

Fica evidente a diminuição da resposta estrutural quanto ao deslocamento após realizada a otimização. Houve uma diminuição do deslocamento de pico de 1.53×10^{-3} m para 1.34×10^{-3} m implicando numa redução de 12.69% no deslocamento máximo da estrutura.

A velocidade máxima do último pavimento, no intervalo de tempo do sismo, foi reduzida em 42.55% passando de 8.77×10^{-2} m/s para 5.04×10^{-2} m/s. Também se nota através da observação do gráfico que a velocidade não só diminuiu o valor de pico, como também existe uma redução geral dos valores no decorrer de toda a atuação da ação sísmica.

A grandeza física aceleração é a mais importante a ser analisada no problema em questão, visto que a mesma impacta diretamente no valor da função objetivo do problema de otimização. A redução na aceleração de pico foi de 44.47%, sendo a maior redução observada, quando comparada à redução do deslocamento ou à redução da velocidade. O valor diminuiu de 4.25 m/s^2 para 2.36 m/s^2 .

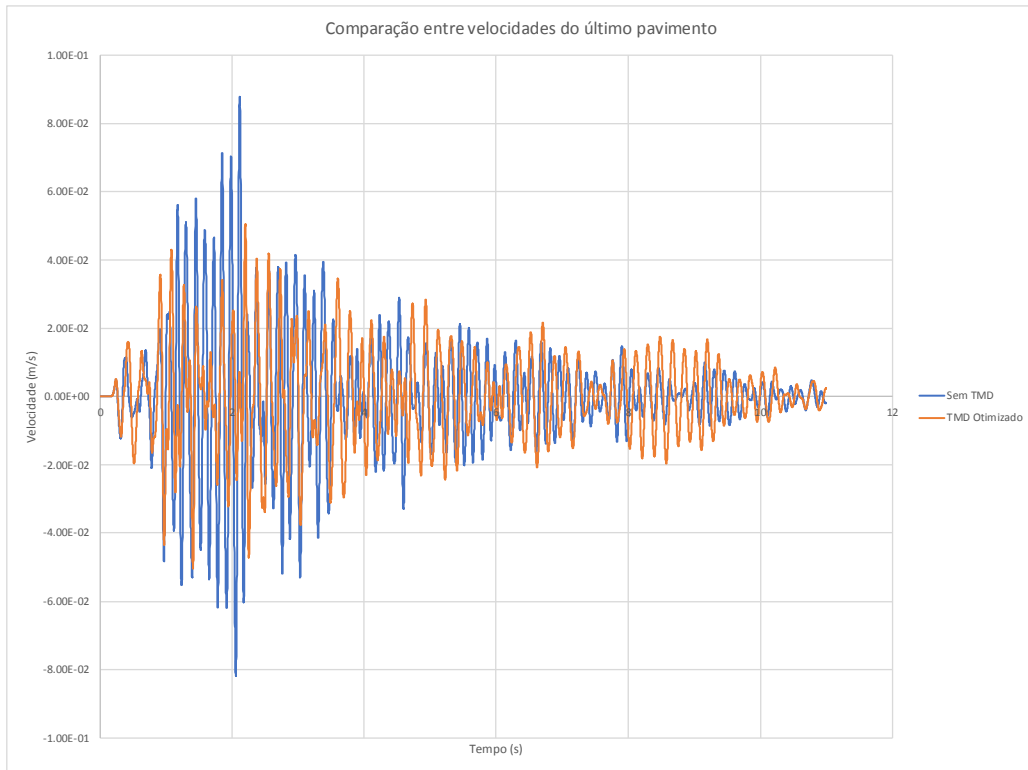


Fig. 10 - Comparação entre as velocidades do topo do edifício, obtidas sem TMD e com o TMD otimizado.

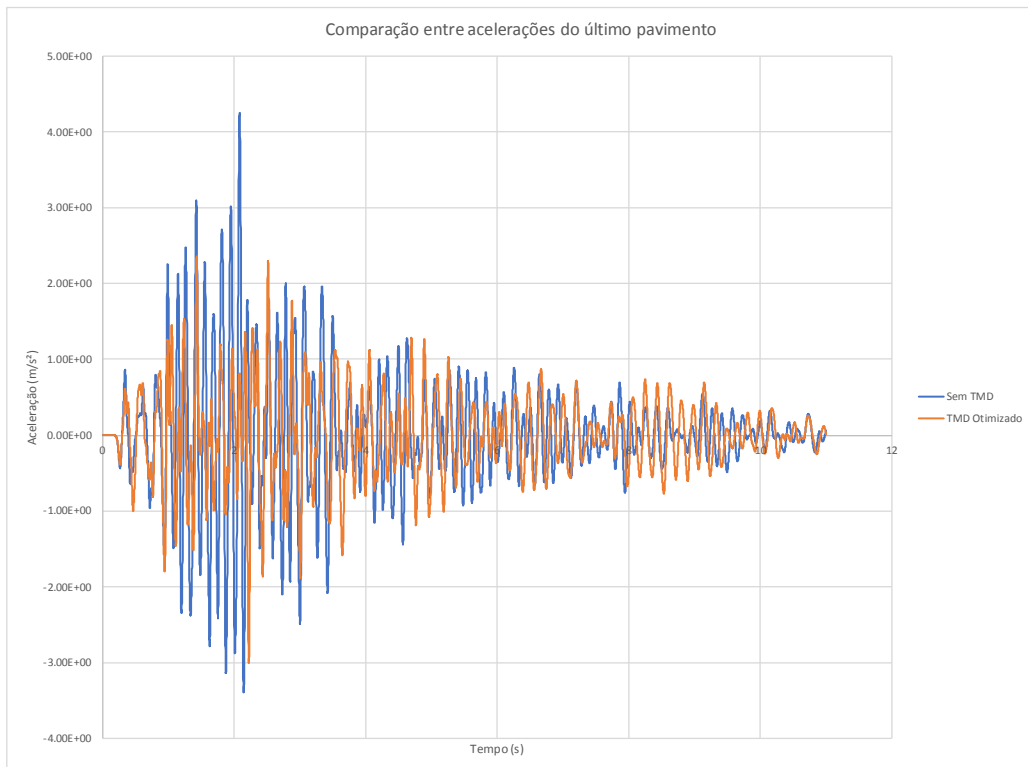


Fig. 11 - Comparação entre as acelerações do topo do edifício, obtidas sem TMD e com o TMD otimizado.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi proposto um método para o dimensionamento ótimo de amortecedores de massa sintonizada, destinado a uma estrutura sujeita à ação de um sismo. O método consistiu na definição de um problema de otimização, em que a função objetivo corresponde à minimização da máxima força de inércia na estrutura, que foi resolvido com recurso a algoritmos genéticos. O algoritmo adotado convergiu para uma solução a que correspondeu a uma melhoria da resposta sísmica da estrutura.

A eficácia da otimização das propriedades físicas do TMD, com recurso aos algoritmos genéticos, foi comprovada através da comparação da resposta sísmica da estrutura sem e com o TMD otimizado.

6. REFERÊNCIAS

- [1] B. Spencer, M. Nathan, and S. Nagarajaiah, *State of the Art of Structural Control*, vol. 129. 2003.
- [2] C. Ngamkhanong and T. Pinkaew, *Effectiveness of tuned mass damper in damage reduction of building under far-field ground motions*. 2015.
- [3] M. Mohebbi, K. Shakeri, Y. Ghanbarpour, and H. Majzoub, "Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures," *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 19, no. 4, pp. 605–625, 2013.
- [4] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [5] H. M. N. S. and A. Yoyong, "Optimum Design of Absorber for MDOF Structures," *J. Struct. Eng.*, vol. 124, no. 11, pp. 1272–1280, Nov. 1998.
- [6] M. Mohebbi and A. Joghataie, "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 21, no. 1, pp. 57–76, Apr. 2011.
- [7] Y. Arfiadi and M. N. S. Hadi, "Optimum Placement and Properties of Tuned Mass Dampers Using Hybrid Genetic Algorithms," *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, vol. 1, no. January 2015, pp. 167–187, 2011.
- [8] J. Estêvão and M. Jesus, *Aplicação de algoritmos genéticos na otimização de secções de vigas de betão armado*. 2004.
- [9] K.-J. Bathe, *Finit Elements Procedures*. 2014.
- [10] J. M. C. Estêvão, "Efeitos da ação sísmica no comportamento de edifícios de betão armado com alvenarias de enchimento", Tese de Doutoramento, IST, pp. 1–452, 2012.
- [11] J. M. C. Estêvão, *Dinâmica de Estruturas e Engenharia Sísmica*, Texto didático. 2018.
- [12] R. Frans and Y. Arfiadi, "Designing optimum locations and properties of MTMD systems," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 892–898, 2015.
- [13] J. Herskovits, *Advances in structural optimization*. Rio de Janeiro: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [14] B. Horowitz. *Implementation considerations in SQP algorithms for large-scale structural optimization*. Computational Methods in Engineering, p.1-10, 1999.
- [15] F. H. R. Bezerra, M. K. Takeya, M. O. L. Sousa, and A. F. do Nascimento, "Coseismic reactivation of the Samambaia fault, Brazil," *Tectonophysics*, vol. 430, no. 1–4, pp. 27–39, 2007.