

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PROJETO DE UMA ESTRUTURA PARA ANÁLISE DE ABALOS SÍSMICOS

Ricardo Hideo Sakomura, rhsakomura@gmail.com¹
Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹
Fabian Andres Lara Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹
Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹
Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Cornélio Procópio, Avenida Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio, PR - CEP 86300-000,

Resumo: O projeto constitui-se de uma estrutura totalmente metálica e tem como objetivo a análise e simulação de um modelo de edifício sujeito a pequenas excitações que representam abalos sísmicos. O sistema é composto de base e "andares" feitos em liga de alumínio, fixados (por parafusos convencionais) a chapas de aço inoxidável (sustentação) através de cantoneiras de ferro-carbono. O arranjo experimental possui 4 graus de liberdade. Para a realização do estudo e obtenção de dados, a estrutura foi submetida a pequenas excitações com auxílio de um martelo de ensaio e em cada andar foi acoplado acelerômetros que permitiram medir e determinar os deslocamentos de cada um dos graus de liberdade do sistema. Os dados capturados foram transmitidos a um software em que foi possível obter gráficos correspondente ao deslocamento da estrutura tanto no domínio da tempo como da frequência. A partir das respostas obtidas foi possível analisar o comportamento do sistema, assim como determinar os parâmetros estruturais, permitindo a validação do modelo.

Palavras-chave: estrutura metálica, modelo científico, análise de abalos sísmicos

1. INTRODUÇÃO

O abalo sísmico, popularmente conhecido como terremoto, é um dos desastres naturais mais devastadores que ocorrem durante todo ano e estão distribuídos sobre toda a superfície terrestre, porém com uma maior concentração em duas zonas: região ocidental do oceano Pacífico (lado oeste das Américas) e a região da Orogenia Alpina (Coburn et al, 2002).

Tremores de magnitude 5.5 ou superiores na escala Richter, geram movimentação do solo e causam danos significativos às estruturas. As respostas providas dos tremores são similares a problemas de dinâmica, e estão diretamente ligadas as leis do movimento de Newton. No entanto, se o sistema físico em estudo envolve uma estrutura, como por exemplo, um edifício ou uma fuselagem de aeronave, então trata-se de um problema de dinâmica estrutural. (Craig, 2006)

Assim, a análise de abalos sísmicos associados a engenharia estrutural é de fundamental importância. Com estudos relacionados a análises das respostas dos tremores terrestres, engenheiros sísmicos descobriram uma abordagem determinística que baseada em espectros de resposta, fornecem informações valiosas sobre as respostas da estrutura devido as excitações, as quais provocam movimento oscilatório em função do tempo e é denominado vibração. (Zingone, 2015).

Associando-se dinâmica com a análise de vibrações, têm-se que cada componente de um sistema de dinâmica estrutural possui massa, que é relacionada à energia cinética e à inércia; rigidez sendo associada a energia potencial elástica (devido à deformação); amortecimento que é responsável pela dissipação de energia do sistema; e forças externas vinculadas à energia injetada ao sistema com o intuito de gerar movimento (vibração forçada).

Diante desse contexto, o presente trabalho visa o projeto, construção e validação de uma estrutura edificada para a análise de problemas envolvendo abalos sísmicos. Com este objetivo, um protótipo do edifício foi projetado e construído. Na sequência, o modelo deste sistema foi obtido realizando-se uma aproximação matemática considerando um sistema de massa-mola-amortecedor, com 4 graus de liberdade (gdl).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O modelo da estrutura projetada neste trabalho é apresentado na Fig. 1, na qual considerou-se um sistema com 4 gdl Craig (2006), apresenta uma modelagem desta estrutura, a qual é apresentada a seguir. Com o intuito de simplificar a modelagem do sistema para análise vibratória, considerou-se um sistema massa-mola-amortecedor, na qual, o amortecedor possui constante de amortecimento “ c_n ” e a mola de constante elástica “ k_n ” que descrevem movimento linear.

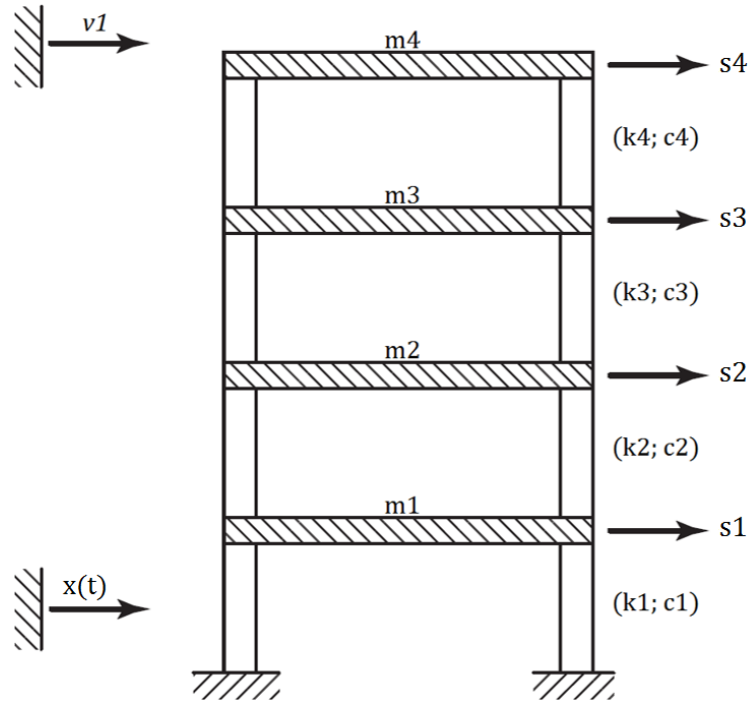


Figura 1. Modelo de estrutura considerando 4 graus de liberdade (Craig, 2006).

Considerando-se que não há rotação da base, e a mesma se movimenta como um corpo rígido com um deslocamento dado por $x(t)$ (Craig, 2006), têm-se que:

$$M\ddot{v} + C\dot{s} + Ks = 0 \quad (1)$$

A forma vetorial é dada por:

$$v(t) = s(t) + x(t) \quad (2)$$

Assim a Eq. (1) é dada por:

$$M\ddot{s} + C\dot{s} + Ks = F(t) \quad (3)$$

em que

$$F(t) = -M\ddot{x}(t) \quad (4)$$

Pela solução do modo da superposição, têm-se:

$$s(t) = \phi\eta(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r\eta_r(t) \quad (5)$$

que relaciona a seguinte equação do movimento

$$M_r\ddot{\eta}_r + 2M_r\omega_r\zeta_r\dot{\eta}_r + \omega_r^2 M_r\eta_r = F_r(t), \quad r = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

em que

$$F_r(t) = \phi_r^T M \ddot{x}(t) \quad (7)$$

Ignorando-se o sinal negativo provindo da Eq.(4), e relacionando-se com o sistema de um grau de liberdade, é possível definir o fator de participação modal do abalo sísmico “ μ ”, representado pela Eq.(8).

$$\mu_r(t) = \phi_r^T M = M \phi_r \quad (8)$$

$$F_r(t) = \mu_r \ddot{x}(t) \quad (9)$$

Por analogia com as equações de movimento relativo, têm-se:

$$\eta_r(t) = \frac{\mu_r}{M_r \omega_r} S_r(t) \quad (10)$$

sendo $S_r(t)$ dado por:

$$S_r(t) = \int_0^t \ddot{x}(\tau) e^{-\zeta_r \omega_r(t-\tau)} \sin \omega_{dr}(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

Assim, associando-se a Eq.(5) e a Eq. (10), obtém-se:

$$s(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r \frac{\mu_r S_r(t)}{M_r \omega_r} \quad (12)$$

A Equação (12) fornece meios diretos para determinar o histórico do tempo de um movimento relativo de múltiplos graus de liberdade sujeito a excitações de abalos sísmicos. Entretanto, o envolvimento da integração de equações de resposta modal faz-se necessário.

O deslocamento máximo relativo ao número “r” de graus é obtido através da Eq. (13)

$$\max_t |s_r(t)| = |\phi_r| \frac{|\mu_r|}{M_r \omega_r} S_v(T_r, \zeta_r) \quad (13)$$

em que os valores absolutos de $|s_r(t)|$ e $|\phi_r|$ implica na magnitude de cada grau de liberdade. Há a dificuldade de análise devido ao fato de que cada “r” atingirá sua respectiva amplitude máxima em diferentes intervalos de tempo, ou seja,

$$\max_t |s_r(t)| \neq \sum_{r=1}^N \max_t |s_r(t)| \quad (14)$$

Uma forma satisfatória de se estimar o máximo de cada resposta quantitativa $[Q(t)]$ é dada pelo método da raiz quadrática do valor médio (ou valor eficaz). Assim,

$$\max_t |Q(t)| \approx \left[\sum_{r=1}^N (\max_t |Q_r(t)|^2) \right]^{1/2} \quad (15)$$

De forma análoga, a resposta relativa máxima do deslocamento é dado por:

$$\max_t |s(t)| \approx \left[\sum_{r=1}^N \left[\frac{|\phi_r| |\mu_r|}{M_r \omega_r} S_v(T_r, \zeta_r) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

As respostas decorrentes da Eq. (15) e Eq. (16) podem ser superestimadas ou subestimadas em comparação com o verdadeiro valor da resposta máxima. Estas respostas são geralmente corretas para sistemas em que as frequências estão bem definidas separadamente, mas para casos em que os valores das frequências são próximos, a resposta apresenta baixa precisão.

De maneira análoga com a equação de aceleração efetiva definida para um sistema discreto, obtém-se a equação para as forças modais resultante de excitações caudas por abalos sísmicos de um sistema de múltiplos graus de liberdade (por exemplo um edifício)

$$(\ddot{s}_r)_e = \omega_r^2 s_r \quad (17)$$

Através da Eq. (17) é possível obter a força de inércia através da aceleração efetiva, sendo $(m\ddot{s}_r)_e$. Para estruturas que possuem a base fixa ao solo e considerando-se um sistema com “r” gdl, com as excitações provenientes dos abalos sísmicos, irão ocorrer a formação de forças laterais, as quais provocam o efeito de cisalhamento da base com relação ao solo e possui a seguinte equação característica:

$$B_r(t) = \frac{\mu_r^2 \omega_r}{M_r} S_r(t) \quad (18)$$

A força lateral máxima para “r” graus de liberdade é expressa por:

$$\max_t |B(t)| = \frac{\mu_r^2}{M_r} B_a(T_r, \zeta_r) \quad (19)$$

Aplicando-se de modo análogo ao utilizado para a determinação do deslocamento máximo relativo, têm-se que o valor eficaz para a força lateral é dado pela seguinte equação:

$$\max_t |B(t)| \approx \left\{ \sum_{r=1}^N \left[\frac{\mu_r^2}{M_r} B_a(T_r, \zeta_r) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (20)$$

2.1. Identificação e Otimização de Parâmetros

Em projetos mecânicos, devem ser considerados parâmetros como dureza, deflexão, peso, folga, entre outros. Entretanto, para a construção e montagem de um sistema completo, o número de variáveis é elevado, sendo necessário a utilização de técnicas de identificação e otimização de parâmetros. Essas técnicas são ferramentas de análise amplamente utilizadas na engenharia da computação e apresentam resultados satisfatórios na análise das respostas dinâmicas. Vários métodos são utilizados na identificação de parâmetros modais de estruturas mecânicas com base no conhecimento de funções de resposta em frequência. As técnicas de otimização são classificadas basicamente em 2 tipos: tradicionais e avançadas (Rao, 2011). Dentre as técnicas avançadas de otimização, encontra-se o modo de Evolução Diferencial o qual é utilizado no presente trabalho.

Para os métodos de otimização, é necessário que seja definido três variáveis (Vanderplaats, 1999):

- Função objetivo: é a função que define as respostas do sistema em que é desejada a otimização;
- Variáveis de projeto: são variáveis que podem sofrer variações na ordem de provocar otimização na função objetivo;
- Restrições: similar a função objetivo, são funções de resposta do sistema que representam as restrições do sistema (podem ser variáveis).

2.1.1. Método da Evolução Diferencial

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED) foi proposto por Price e Storn em 1995. A Figura 2 apresenta o fluxograma utilizado pela ED.

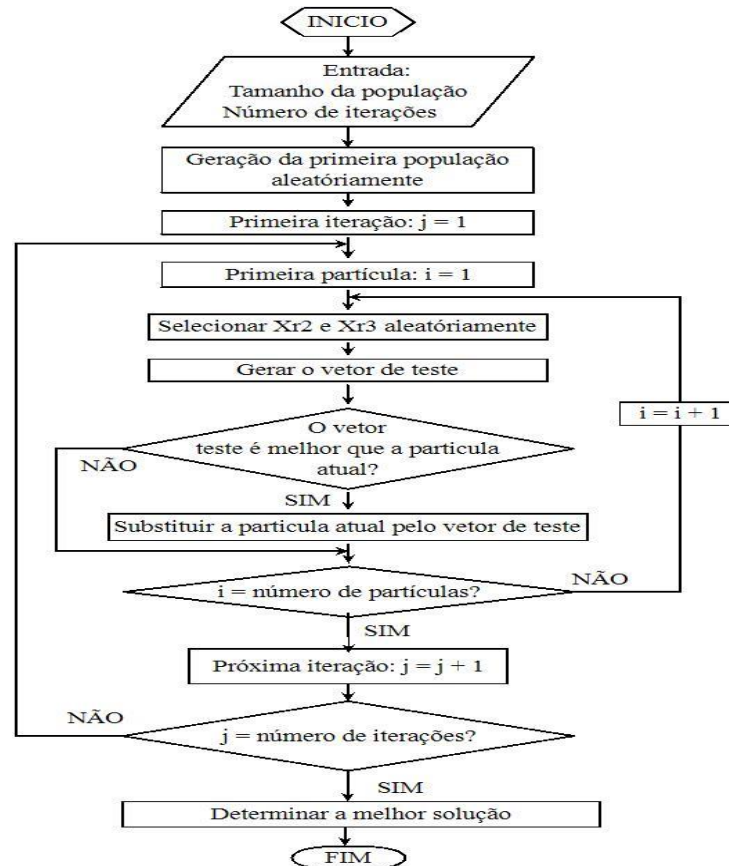


Figura 2. Fluxograma do Método da Evolução Diferencial (Keshtkar et al, 2011).

A ED utiliza conceitos evolutivos para buscar o ponto ótimo (Zou et al, 2013). O fato do método da ED utilizar vetores para a obtenção de novos potenciais candidatos a resolver o problema de otimização, proporciona ao método algumas vantagens como: facilidade de uso, estrutura simples, velocidade, robustez e capacidade de escapar de ótimos locais (Silva et al, 2012). Para gerar uma nova população são utilizados operadores específicos de cruzamento, mutação e seleção para obter os melhores candidatos. Esse método pode ser descrito pela Eq. (21).

$$v_{i,m} = x_{1,3} + F(x_{i,1} - x_{i,2}) \quad (21)$$

Em outras palavras, o método ED cria um novo vetor, $v_{i,m}$, que indica uma nova posição no espaço e que representa um novo indivíduo (mutante).

3. METODOLOGIA

A primeira etapa deste trabalho consistiu no projeto e desenvolvimento de um protótipo utilizado para o estudo do comportamento de uma estrutura edificada por análise de vibrações, afim de simular abalos sísmicos. A Figura 3a apresenta o desenho do protótipo para construção da estrutura, já a Fig.3b apresenta a estrutura construída. Ressalta-se que o protótipo construído é composto apenas de peças metálicas as quais são descritas na Tab. 1.

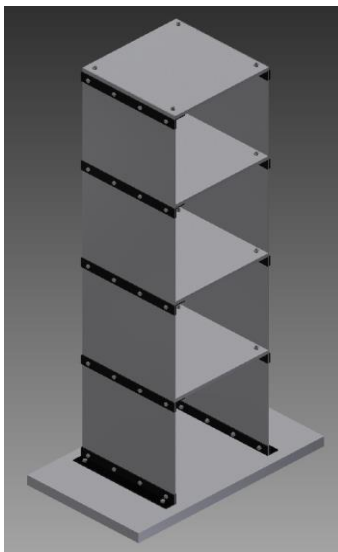


Figure 3a. Protótipo da Estrutura.



Figure 3b. Estrutura edificada construída.

Tabela 1. Descrição das dimensões e materiais de cada componente.

Componente	Quantidade	Dimensões [mm]	Material
Base	1	500 x 300 x 25,4	Liga de Alumínio
Andar	4	250 x 250 x 9	Liga de Alumínio
Cantoneira	10	250 x 25 x 25	Aço Ferro-Carbono
Chapa para fixação	10	250 x 25	Aço Ferro-Carbono
Sustentação	2	250 x 1000	Aço Inoxidável

A segunda etapa deste projeto consistiu na obtenção de um modelo matemático que simulasse o comportamento dinâmico da estrutura construída. Nesta etapa, o sistema foi aproximado por um modelo massa-mola-amortecedor composto por 4 gdl (a Fig. 4 apresenta o modelo discretizado). Os parâmetros de rigidez e amortecimento foram determinados utilizando um problema de otimização na qual visou-se minimizar a diferença entre as frequências naturais reais e as frequências naturais do modelo.

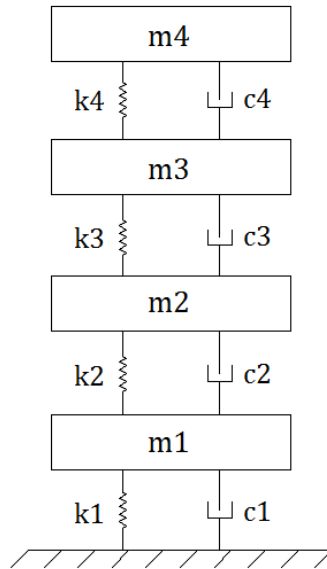


Figure 4. Sistema massa-mola-amortecedor.

A Equação (22) apresenta a função objetivo utilizada na identificação e otimização dos parâmetros.

$$F.O. = \min \left\| \frac{\omega_{ne} - \omega_{nn}}{\omega_{ne}} \right\| \quad (22)$$

onde ω_{ne} é a frequência natural experimental e ω_{nn} é a frequência natural numérica.

As aquisições dos dados experimentais foram feitas a partir de um martelo de impacto PCB Piezotronics® e acelerômetro PCB Piezotronics®, utilizando a placa modelo Data Physics Quattro® e o software SignalCalc ACE, no qual o sinal medido é convertido em gráficos que descrevem o sistema. Com estes resultados gráficos, pode-se obter uma caracterização do sistema real e posteriormente comparar com o modelo computacional gerado em Matlab®.

A Tabela 2 apresenta o intervalo de projeto utilizado para cada uma das variáveis identificadas. Destaca-se que o algoritmo de otimização foi rodado 100 vezes.

Tabela 2. Intervalo de Projeto.

Andar	Massas (kg)	Rigidez (N/m)	Amortecimento (N.s/m)
1	3,90	$1 \times 10^4 \leq k_1 \leq 5 \times 10^5$	$50 \leq c_1 \leq 500$
2	3,90	$1 \times 10^4 \leq k_2 \leq 5 \times 10^5$	$50 \leq c_2 \leq 500$
3	3,90	$1 \times 10^4 \leq k_3 \leq 5 \times 10^5$	$50 \leq c_3 \leq 500$
4	3,90	$1 \times 10^4 \leq k_4 \leq 5 \times 10^5$	$50 \leq c_4 \leq 500$

4. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os valores das frequências naturais experimentais, os valores médios das frequências naturais numéricas obtidas através da simulação computacional e a porcentagem do erro para cada modo, utilizando o algoritmo de ED.

Tabela 3. Valores das frequências naturais experimentais e numéricas.

Modos	f_{ne} (Hz)	f_{nn} (Hz)	Erro (%)
1	4,50	4,4996	0,00744
2	13,25	13,2620	0,09090
3	21,75	21,7595	0,04382
4	27,00	26,9917	0,03063

Pela análise da Tab. 3, observa-se que o método de identificação utilizando a otimização via ED apresentou resultados satisfatórios, visto que identificou de forma precisa os valores numéricos em comparação com os experimentais, que foram obtidos através de ensaios executados de acordo com a descrição na metodologia, apresentando um erro máximo de aproximadamente 0,091% no modo 2.

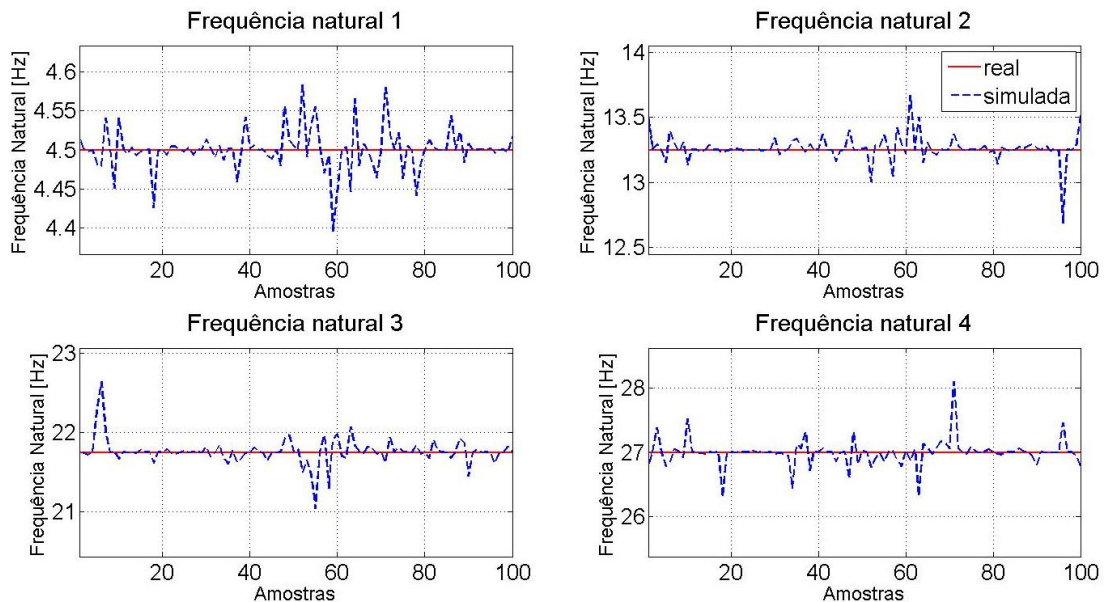


Figura 5. Gráficos das frequências naturais de cada modo.

Os gráficos da Fig. 5, apresentam o valor das frequências de cada um dos modos do sistema, através do qual, pode-se melhor observar a baixa variação entre a frequência real e simulada apresentados na Tab. 3.

A Tabela 4, apresenta os valores médios de rigidez e amortecimento identificados computacionalmente.

Tabela 4. Valores de rigidez e amortecimento.

Andar	$K_{\text{médio}}$ (N/m)	Desvio σ	$C_{\text{médio}}$ (N.s/m)	Desvio σ
1	29366,5341	$\pm 18194,7735$	287,3672	$\pm 119,8151$
2	31519,7659	$\pm 10497,7232$	228,3544	$\pm 116,8431$
3	28023,1240	$\pm 11992,5022$	228,3668	$\pm 96,5634$
4	35906,1856	$\pm 12873,9742$	268,9495	$\pm 98,9318$

As Figuras 6 e 7 apresentam os gráficos com os valores de rigidez e amortecimento, respectivamente.

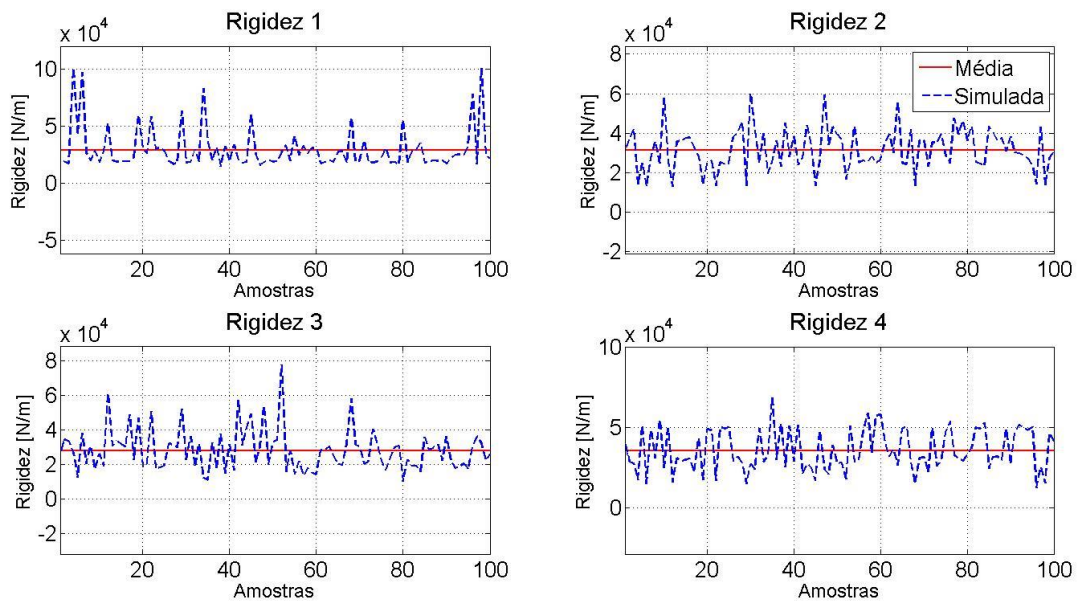


Figura 6. Gráficos dos valores das rigidezes.

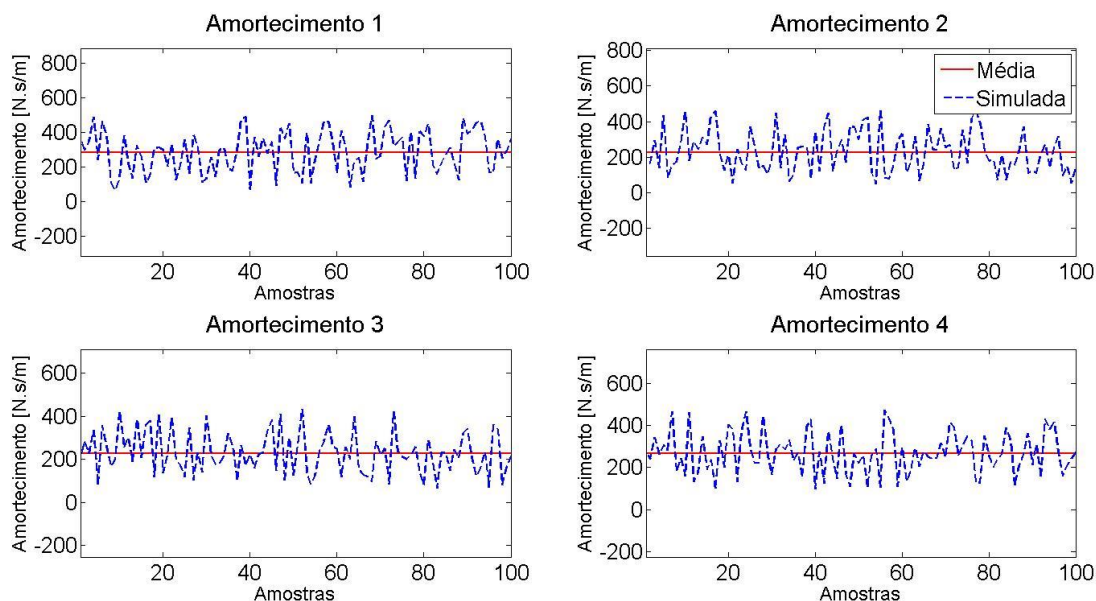


Figura 7. Gráficos dos valores dos amortecimentos.

A partir dos resultados apresentados na Tab. 4 e nas Figs. 6 e 7, observa-se um alto valor para o desvio padrão nas medidas entre os valores obtidos para rigidez e amortecimento, o que já era esperado, devido ao fato do algoritmo buscar combinações de valores para rigidez e amortecimento visando minimizar a função objetivo dada pela Eq. (22). Ressalta-se que esta minimização foi obtida conforme observado pelos resultados apresentados pela Tab. 3.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o projeto, construção e validação de uma estrutura para análise de abalos sísmicos. Após a construção desta estrutura, foi possível obter um modelo para discretização do sistema de 4gdl. Com o propósito de validação da estrutura, foram feitas aquisições de dados experimentais para que pudessem ser confrontados com parâmetros numéricos através de simulação computacional. Em termos de técnicas de identificação e otimização, foi utilizado o método heurístico conhecido como Evolução Diferencial.

Apesar da discrepância dos valores de rigidez e amortecimento simulados, os resultados obtidos revelaram uma convergência dos valores numéricos com os experimentais em termos das frequências naturais conforme pode ser observado a partir dos resultados apresentados na Tab.3.

De um modo geral, pode-se concluir que os métodos propostos para a construção e validação da estrutura de análise de abalos sísmicos foram satisfatórios, visto que foram identificados os parâmetros de rigidez e amortecimento do sistema a partir das frequências naturais experimentais utilizando a técnica de otimização por evolução diferencial.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Coburn, A. and Spence, R., 2002, "Earthquake Protection", Ed. John Wiley & Sons, Cambridge, United Kingdom, pp. 01-12.
- Craig Jr, R. R. and Kurdila A. J., 2006, "Fundamentals of Structural Dynamics", Second Edition, Ed. John Wiley & Sons, New York, United States of America, pp 650-665.
- Keshtkar, H., Alimardani, A., Abdi, B., 2011, "Optimization of Rotor Speed Variations in Microturbines", Energy Procedia, v.12 pp. 789-798.
- Rao, S. S., 2011, "Mechanical Vibrations", Fifth Edition, Ed. Pearson, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America, pp 13-54.
- Silva, D. O., Vieira, L. G. M., Lobato, F. S., Barrozo, M. A. S., 2012, "Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 61, pp. 1-7.
- Vanderplaats, G. N., 1999, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", Third edition, USA: VR D INC. Colorado Springs.

- Zingone, A., 2015, "Vibration Analysis and Structural Dynamics for Civil Engineers: Essential and Group-Theoretic Formulations", Ed. Taylor & Francis Group, pp. 3-19.
- Zou, D., Wu, J., Gao, L., Li, S., 2013, "A modified differential evolution algorithm for unconstrained optimization problems", Neurocomputing, v. 120, pp. 469-481.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

PROJECT OF A STRUCTURE FOR EARTHQUAKE ANALYSIS

Ricardo Hideo Sakomura, rhsakomura@gmail.com¹
Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹
Fabian Andres Lara Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹
Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹
Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Federal Technological University of Parana - campus Cornelio Procopio, Avenue Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio, PR – Postal Code 86300-000,

Abstract. *The project consists of a fully metallic structure, and it has the purpose of analysis and simulation in a model of building that has been affected by small excitations that represents earthquakes. The system is composed of a base and "floors" made of aluminum that is fixed (by common screws) to stainless steel plates (sustention) by pieces of steel (that has long "l" shape). The experimental arrangement has 4 degrees of freedom. The data collected from the excitation were transmitted to a software and it was possible to obtain corresponding graphs to the displacement of the structure both in the field of time and frequency. From the analysis, it was possible to determine the structural parameters and verify the system's behavior. It has made possible to allow the validation of the model.*

Keywords: *metallic structure, model of building, analysis of earthquake*