

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE AMORTECEDORES TIPO STOCKBRIDGE

MARLON ELIAS MARCHI^{1*}, MARCOS JOSÉ MANNALA², MARCIO TONETTI³

¹Mestrando em Engenharia Mecânica, PUC-PR, Curitiba-PR, marlonmarchi@gmail.com

²Ms. Pesquisador LACTEC, Doutorando em Eng. Mecânica, PUC-PR, Curitiba-PR, mannala@lactec.org.br

³Mestrando, COPEL, Curitiba-PR, marcio.tonetti@copel.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: Este artigo integra o projeto de P&D COPEL/ANEEL intitulado Aumento da Capacidade de Transmissão de Linhas Aéreas: Novas técnicas de projeto com trações elevadas. Este projeto contempla o estudo do comportamento dos cabos condutores, quando tracionados com níveis de tração que superam os critérios usuais de projeto. No entanto, problemas com vibrações eólicas são potencializados ao longo dos cabos condutores à medida que a tração é elevada. Estas vibrações provocam danos devido à fadiga por flexão e por abrasão nos pontos de suspensão dos cabos, podendo causar a interrupção da transmissão de energia. Para isso, foram desenvolvidos dispositivos absorvedores de vibrações como o amortecedor tipo Stockbridge, um dos mais utilizados e focos de vários estudos. Alguns destes estudos se baseiam em ensaios de vibrações que permitem levantar curvas que ilustram o comportamento dinâmico do amortecedor no domínio da frequência, bem como parâmetros vibracionais como, por exemplo, frequências naturais. Por isso, este trabalho propôs analisar experimentalmente o comportamento dinâmico de amortecedores tipo Stockbridge.

PALAVRAS-CHAVE: Amortecedor dinâmico de vibração, stockbridge, vibração em cabos aéreos.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF DAMPERS LIKE STOCKBRIDGE

ABSTRACT: This article is part of the project R&D COPEL/ANEEL entitled Increase of Transmission Capacity of Wire Cables: New techniques of project with high drifts. This project includes the study of the behavior of conductor cables when pulled with traction levels that exceed the usual criteria. However, problems with wind vibrations are amplified through the conductor cables as the tension is high. These vibrations cause damage due to flex fatigue and abrasion in cable suspension points, which can cause interruption of power transmission. For this, it was designed vibration absorbers such as Stockbridge damper, one of the most used and focus of several studies. Some of these studies rely on vibration tests that allow getting curves that show the dynamic behavior of the shock absorber in the frequency domain, as well as vibrational parameters for example natural frequencies. Therefore, this paper proposed to analyze experimentally the dynamic behavior of dampers type Stockbridge.

KEYWORDS: Dynamic vibration absorber, stockbridge, vibration on overhead lines.

INTRODUÇÃO

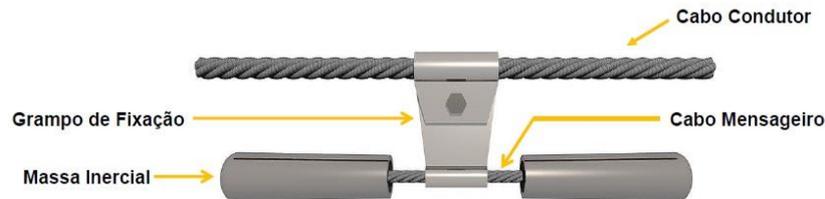
As linhas aéreas de transmissão elétrica estão sujeitas à ação dos ventos, os quais, induzem vibrações eólicas de alta frequência (na ordem de 5 a 120 Hz) e de baixa amplitude (Júnior, 2010). Essas vibrações em níveis indesejados podem causar danos devido a fadiga por flexão e por abrasão nos pontos de suspensão do cabo, levando-o à ruptura (Sauter, 2003). A consequência direta é a falha na transmissão de energia elétrica o que, por sua vez, aumenta os custos de manutenção, pode resultar em sérios acidentes e gerar prejuízos econômicos e sociais para o país (Labegalini et al., 1992).

Para reduzir os danos mecânicos causados pelas vibrações eólicas e assim, aumentar a vida útil dos cabos é necessário reduzir as amplitudes de vibrações das linhas a níveis considerados seguros pelas

normas internacionais (Júnior, 2010). Para isso, foram desenvolvidos dispositivos absorvedores, sendo o amortecedor tipo Stockbridge um dos mais utilizados atualmente (Labegalini et al, 1992).

O amortecedor stockbridge (Figura 1) foi desenvolvido em 1925 por George H. Stockbridge. Este dispositivo consiste em duas massas inerciais presas na extremidade de um cabo flexível denominado de cabo mensageiro, o qual se encontra acoplado a um grampo para fixação no cabo condutor (Labegalini et all, 1992).

Figura 1. Amortecedor tipo Stockbridge simétrico.



Fonte: Melo (2011).

O Stockbridge dissipa energia basicamente por dois mecanismos: pelo amortecimento histerético (devido ao deslizamento interno dos planos cristalinos dos fios que compõem o cabo mensageiro) e pelo amortecimento coulombiano (devido ao atrito entre os fios do cabo mensageiro) (Labegalini et al, 1992).

As principais vantagens do dispositivo Stockbridge são: simples construção, baixo custo e boa eficiência na redução de vibrações no ponto de fixação (Labegalini et al, 1992). Contudo, a sua eficiência é limitada a uma estreita faixa de frequências, localizada em torno das suas frequências naturais (Oliveira, 2011).

Dentro os tipos de amortecedores Stockbridge conhecidos, destacam-se o simétrico e o assimétrico. Os dispositivos simétricos possuem massas e comprimentos dos cabos mensageiros iguais em relação ao grampo de fixação. Considerando a faixa de operação das vibrações eólicas, este absorvedor possui dois graus de liberdade, os quais, correspondem ao primeiro e segundo modo de vibração do absorvedor. Já os amortecedores assimétricos possuem massas e comprimentos de cabos mensageiros diferentes em relação ao grampo de fixação. Este dispositivo pode ter quatro ou mais modos de vibração dentro da faixa de ação das vibrações eólicas, tornando-o mais eficiente (Vecchiarelli et al., 2000).

O amortecedor Stockbridge é acoplado ao cabo condutor próximo aos isoladores. No ponto de acoplamento, o absorvedor exerce uma força e um momento concentrados. Se as características do Stockbridge não estiverem devidamente ajustadas às características dinâmicas do cabo condutor, este terá seu comportamento dinâmico alterado, podendo gerar deslocamentos elevados e, conseqüentemente, danos nos pontos de ancoragem (Vecchiarelli et al., 2000).

Portanto, a resposta de um condutor é fortemente influenciada pelo comportamento dinâmico do amortecedor acoplado (Vecchiarelli et al., 2000). Com o intuito de melhor prever a resposta dinâmica de uma linha de transmissão, sujeita a vibrações eólicas e com amortecedores tipo Stockbridge acoplados, de início é necessário compreender o comportamento mecânico deste dispositivo amortecedor como um sistema mecânico isolado e sujeito a excitações harmônicas. Nesse sentido, este trabalho realizou experimentos, nos quais, o Stockbridge é ensaiado isoladamente em uma máquina excitadora que simula movimentos harmônicos com amplitudes de aceleração constante. O objetivo geral é compreender melhor a resposta dinâmica do amortecedor tipo Stockbridge assimétrico a partir de ensaios experimentais. Para isso, com base nos dados obtidos em laboratório, os seguintes objetivos específicos foram realizados: levantar curvas de resposta no domínio da frequência, identificar as frequências naturais e analisar o comportamento dinâmico do Stockbridge assimétrico em amplitudes de acelerações distintas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e o procedimento experimental empregado na realização dos ensaios mecânicos de vibração do amortecedor tipo Stockbridge.

1. Materiais

1.1 Amortecedor Stockbridge

O amortecedor utilizado nos ensaios de vibração foi o Stockbridge assimétrico (Figura 2).

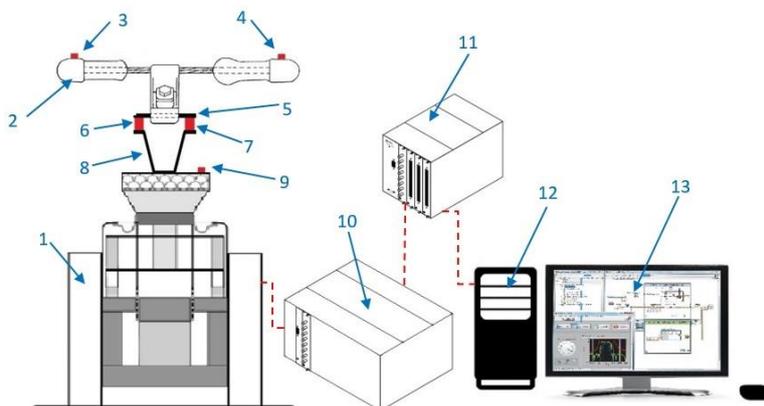
Figura 2. Stockbridge assimétrico utilizado nos ensaios.



1.2 Bancada de Ensaio

A Figura 2 mostra o desenho esquemático da bancada experimental empregada nos ensaios de vibração do amortecedor Stockbridge assimétrico.

Figura 2. Desenho esquemático da bancada de ensaios.



Os equipamentos e recursos da bancada, indicados na Figura 2 pela respectiva numeração, são: (1) excitador eletrodinâmico ou *shaker*; (2) amortecedor tipo Stockbridge assimétrico; (3) e (4) acelerômetros do tipo ICP; (5) base de aço para acoplamento do amortecedor; (6) e (7) células piezoelétricas com capacidade de medição de 445N pico cada; (8) base de aço e em formato V; (9) acelerômetro do tipo ICP; (10) amplificador de potência do *shaker*; (11) condicionador de sinal com módulos de aquisição de sinais dos acelerômetros e das células piezoelétricas; (12) computador desktop com placa condicionadora de sinais; (13) programa *LabView*[®].

A bancada de ensaios da Figura 2 permite gerar um movimento harmônico com amplitude de aceleração controlada. Assim para uma determinada aceleração da base de excitação do *shaker*, obtém-se a resposta do Stockbridge em uma dada faixa de frequência.

Os sinais obtidos pelos acelerômetros, o controle da frequência de excitação e da amplitude de aceleração do *shaker*, bem como o processamento dos dados são realizados por um condicionador de sinal, o qual, é controlado por uma placa condicionadora de sinais através de um computador desktop e do programa *LabView*[®].

2. Métodos

Os ensaios em laboratório consistiram em deslocar, verticalmente e com amplitude de aceleração constante, a base de excitação onde o Stockbridge se encontrava rigidamente fixo. Os valores de aceleração constante da base variaram de 0,2 a 0,8 m/s², com incrementos de 0,2 m/s².

Para cada amplitude de aceleração da base, mantida como constante, o *shaker* promovia a excitação do amortecedor na faixa de 5 a 120 Hz, sendo a sua resposta vibracional obtida, processada e

registrada pelo sistema de aquisição, controle e processamento de dados. Desse modo, foram obtidos no domínio da frequência as amplitudes de aceleração de três acelerômetros, sendo um da base de deslocamento do *shaker* (seta 9 da Figura 2) e os outros dois, das extremidades externas das massas menor e maior (setas 3 e 4, respectivamente, da Figura 2).

Os dados obtidos foram armazenados e convertidos em arquivos com extensão .txt. Em seguida, estes dados foram manipulados através do programa *Matlab* com o intuito de gerar curvas referentes ao comportamento dinâmico do amortecedor Stockbridge como, por exemplo, curvas de resposta no domínio da frequência de cada acelerômetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais são apresentados nas Figuras 11 a 17 e mostram o comportamento dinâmico do Stockbridge em quatro patamares de aceleração.

As Figuras 11 e 13 mostram as curvas de força no domínio da frequência referentes aos lados da massa maior e menor, respectivamente. Já as Figuras 12 e 14 exibem as curvas de resposta no domínio da frequência dos lados da massa maior e menor do amortecedor, respectivamente. A Figura 15 ilustra as quatro amplitudes de acelerações mantidas nos ensaios do Stockbridge. E por fim, as Figuras 16 e 17 correspondem as curvas de Impedância Mecânica obtidas para o Stockbridge ensaiado. As frequências naturais do amortecedor estão resumidas na Tabela 2, de acordo com a respectiva amplitude de aceleração.

Figura 3. Curvas de resposta no domínio da frequência, sendo (a) referente à resposta do lado da massa menor e (b) referente à resposta do lado da massa maior do amortecedor Stockbridge.

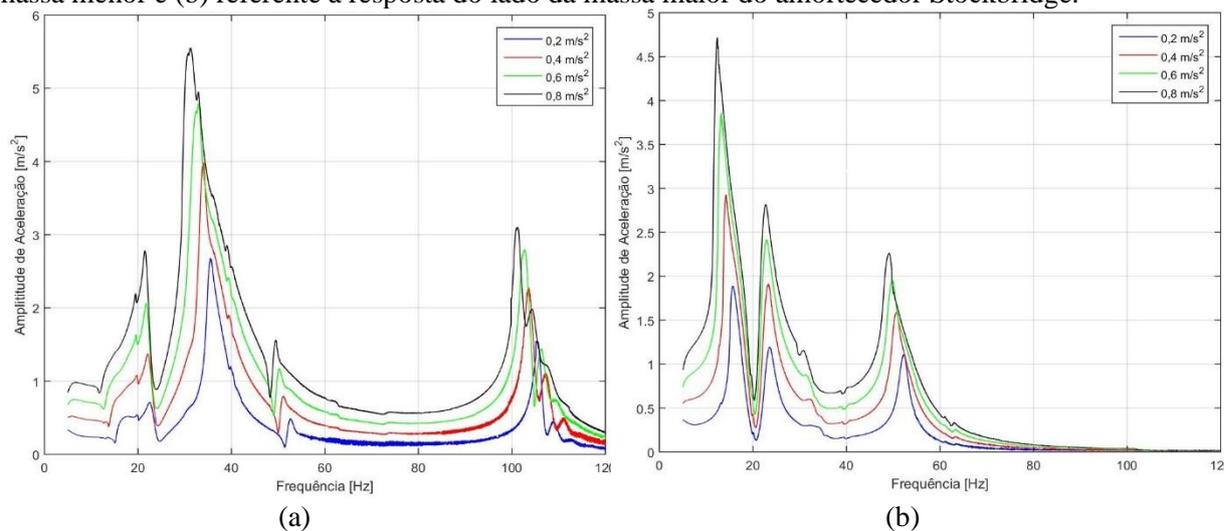


Figura 4. Curva de resposta no domínio da frequência referente a base na qual o amortecedor se encontrava fixado.

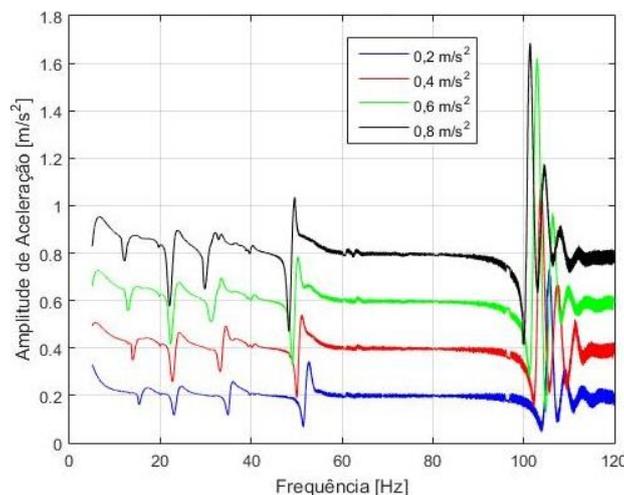


Tabela 1. Frequências naturais do amortecedor Stockbridge assimétrico ensaiado.

Amplitude de Aceleração [m/s ²]	Frequências Naturais (Hz)				
	1	2	3	4	5
0,2	15,37	23,02	34,94	51,59	103,9
0,4	13,96	22,62	33,22	50,02	102,2
0,6	12,84	22,31	31,20	49,17	101,4
0,8	12,14	22,03	29,81	48,31	100,1

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais do amortecedor assimétrico, exibidos nas Figuras 3, 4 e na Tabela 1, pode-se constatar que:

- O Stockbridge assimétrico tem pelo menos 5 frequências naturais na faixa de 5 a 120 Hz;
- Em face da intensidade da força e das amplitudes de acelerações, as frequências naturais 1, 3 e 4 são dominantes na massa maior. Já as frequências naturais 2 e 5 geram amplitudes de movimento mais significativas na massa menor;
- À medida que a amplitude de aceleração aumenta, todas as frequências naturais do amortecedor diminuem;
- À medida que a amplitude de aceleração aumenta, as faixas de frequência em torno das frequências naturais se tornam mais estreitas, diminuindo a eficiência do stockbridge;
- Os maiores valores de amplitude de aceleração registrados ocorrem na primeira e na segunda frequência natural.

CONCLUSÃO

Com base nas constatações a respeito dos dados experimentais, conclui-se que o Stockbridge assimétrico apresenta um comportamento não linear. Esta não linearidade se deve a diminuição da frequência natural do dispositivo com o aumento da amplitude de aceleração do movimento imposto ao amortecedor.

Outro comportamento que corrobora nesta linha é o fato de que a largura da faixa de frequência, nos pontos de ressonância do amortecedor, diminui com o aumento da aceleração.

Portanto, uma modelagem matemática utilizando equações lineares, como é usualmente feito, não representa a contento o comportamento da amostra testada. Desse modo, torna-se interessante desenvolver uma análise não linear do comportamento dinâmico do Stockbridge tipo assimétrico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho apresenta parte dos resultados obtidos durante a execução do projeto P&D de número PD-6491-0243/2011, intitulado “Aumento da Capacidade de Transmissão de Linhas Aéreas: Novas técnicas de projeto com trações elevadas” da COPEL Geração e Transmissão S.A., executado pelos Institutos LACTEC e integrante do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiro regulamentado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

REFERÊNCIAS

- Júnior, O. H. S. Vibrações em cabos aéreos de linhas de transmissão: estudo teórico e experimental por meio de modelos lineares e não lineares. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. PUC-PR. Curitiba, 2010.
- Labegalini, P. R.; Labegalini, J. A.; Fuchs, R. D.; Almeida, M. T. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. Edgard Blucher. São Paulo, 1992.
- Melo, F. B. N. Desenvolvimento de um dispositivo de fixação para caracterização mecânica das ligas NiTi. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, 2011.
- Oliveira, H. S. Análise dinâmico de um stockbridge pseudoplástico. Projeto de graduação. Universidade de Brasília: Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, 2011.
- Sauter, D. Modeling the dynamic characteristics of slack wire cables in stockbridge dampers. Vom Fachbereich Mechanik der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte. Darmstadt, 2003.
- Vecchiarelli, J; Currie, I. G.; Havard, D. G. Computational analysis of aeolian conductor vibration with a stockbridge. Journal of Fluids and Structures, v. 14, n. 1, pp. 489- 509, 2000.