

CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS UTILIZANDO AMORTECEDORES POR ATRITO¹

Letícia Fleck Fadel Miguel² e Jorge Daniel Riera³

Resumo: Uma alternativa eficiente para reduzir as amplitudes de vibração de estruturas submetidas a ações dinâmicas é o uso de amortecedores externos. Este trabalho apresenta uma breve descrição das características e testes de três modelos diferentes de amortecedores de vibração por atrito projetados e ensaiados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Em seguida são descritas técnicas que permitem calcular a resposta dinâmica de sistemas providos de amortecedores por atrito em programas computacionais comerciais. Na seqüência, a eficiência de amortecedores por atrito é avaliada por meio da determinação numérica da resposta de um edifício e de uma torre de linha de transmissão, antes e após a instalação de amortecedores por atrito, a excitações sísmica e devida ao vento, respectivamente. Os resultados confirmam a eficiência dos amortecedores em todas as situações analisadas.

Palavras chave: amortecedores por atrito, análise dinâmica, dissipação de energia, resultados experimentais, simulações numéricas.

VIBRATION CONTROL OF STRUCTURES USING FRICTION DAMPERS

Abstract: An efficient alternative to reduce the amplitudes of vibration of structures subjected to dynamic action is the use of external dampers. This paper presents a brief description of the features and testing of three different models of friction dampers designed at the Federal University of Rio Grande do Sul. Next, techniques that allow calculating the dynamic response of systems provided with friction dampers using commercial software are described. Finally, the efficiency of friction dampers is evaluated subjecting a building and a transmission line tower, with and without external friction dampers, to a seismic and wind excitation, respectively. The results confirm the efficiency of the dampers in all situations.

Keywords: dynamic analysis, energy dissipation, experimental results, friction dampers, numerical simulations.

INTRODUÇÃO

Efeitos dinâmicos são freqüentemente induzidos em edifícios altos, pontes e outras estruturas, tanto por causas naturais quanto pelas ações humanas, tais como terremotos, vento e tráfego, causando problemas de operação, desconforto aos usuários, fadiga, dano estrutural e até o colapso. As tendências atuais em projeto estrutural sugerem que em um futuro próximo a maioria das construções, quando suscetíveis a vibrações, serão providas de equipamentos para dissipar energia. Estes sistemas de dissipação de energia podem ser ativos ou passivos. O uso de sistemas passivos, os quais não requerem uma fonte externa de energia, começou na década de 70 e ainda apresenta um vasto potencial para crescimento. Na última década foi realizado um volume significativo de pesquisa sobre sistemas de dissipação, objetivando o desenvolvimento de tecnologia de baixo custo. Numerosos sistemas de amortecimento foram instalados em edifícios e outras estruturas, especialmente nos Estados Unidos e Japão, para melhorar o comportamento dos mesmos sob ações dinâmicas, principalmente excitações ambientais (Soong e Dargush, 1997).

Dentro do grupo de sistemas passivos de dissipação de energia, os amortecedores por atrito desempenham um papel importante, pois, apesar de apresentarem formulações matemáticas mais complicadas que outros sistemas passivos, eles

¹ Artículo recibido el 25 de octubre de 2007 y aceptado el 28 de enero de 2008.

² Prof.^a, Dr.^a, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite 425, 2º andar, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: letffm@ufrgs.br

³ Prof. Ph.D., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha 99, 3º andar, CEP 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: jorge.riera@ufrgs.br

possuem baixo custo de construção, instalação e manutenção, além de uma boa eficiência no controle de vibrações. Outra vantagem é que os amortecedores por atrito possuem propriedades mecânicas relativamente estáveis, as quais não mudam significativamente com o uso ou condições ambientais, qualidade que não é característica, por exemplo, dos amortecedores visco-elásticos.

Neste contexto, o presente trabalho inicia descrevendo três modelos diferentes de amortecedores por atrito projetados, construídos e testados no Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade (LDEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil (Miguel, 2002). O mecanismo de dissipação de energia e os esquemas para controlar a força normal de contato são brevemente descritos. Na sequência, são apresentados resultados representativos obtidos em testes de laboratório destes amortecedores. Também são discutidos dois esquemas computacionais que permitem simplificar a análise de sistemas que envolvem atrito.

Finalmente, a efetividade em aplicações práticas dos amortecedores propostos é avaliada por meio de análise numérica. Primeiro, um edifício de aço de seis andares com 18m de altura e 16m de largura, submetido ao sismo de Caucete, Argentina, 1977, é analisado antes e após a instalação de seis amortecedores por atrito. Em seguida, um teste de vibrações livres de uma torre metálica de linha de transmissão de 82m de altura, danificada no Japão durante um tufão em 1991, foi simulado numericamente. Testes deste tipo são realizados em protótipos, antes da produção em série das torres ser iniciada. A resposta da torre foi determinada antes e após a instalação de amortecedores por atrito. Simulando procedimentos experimentais na indústria, o amortecimento foi obtido de dados de testes de vibrações livres. Uma análise dinâmica da torre sob a ação do vento, não descrita neste trabalho, indicou que o aumento no amortecimento fornecido pelos amortecedores teria permitido que a torre resistisse ao tufão sem dano.

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTES DE AMORTECEDORES POR ATRITO

Como parte de projetos de pesquisa em desenvolvimento relacionados a sistemas passivos de dissipação de energia, três modelos diferentes de amortecedores por atrito, designados modelos A, B e C (Miguel, 2002), foram desenvolvidos e testados no LDEC, UFRGS, Brasil. A Figura 1 mostra os modelos A, B e C, enquanto a Figura 2 apresenta uma vista do modelo A.

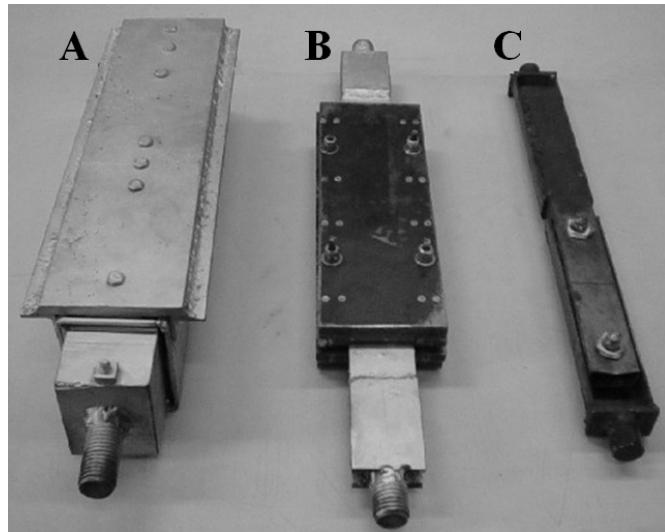


Figura 1: Foto dos modelos A, B e C.

Os amortecedores de vibração por atrito dissipam energia através do atrito entre sólidos. Nos modelos propostos neste trabalho, o atrito ocorre entre duas placas metálicas de latão, o qual foi escolhido pela sua durabilidade e resistência ao desgaste, coeficiente de atrito adequado e baixo custo em comparação com outros materiais. O controle da força normal entre as placas de latão é feito por meio de molas pré-tensionadas, no caso do modelo A, e por parafusos regulados com um medidor de torque nos casos dos modelos B e C. O coeficiente de atrito medido em laboratório para o latão utilizado nos amortecedores é de 0,3 e os níveis de força normal pré-definidos são 12000 N para o modelo A, 10000 N para o modelo B e 2000 N para o modelo C. As áreas definidas pelos ciclos de histerese, mostrados na Figura 3, constituem uma medida da energia dissipada por ciclo pelo amortecedor. Em princípio, os três amortecedores

propostos podem ser instalados em estruturas submetidas a qualquer ação dinâmica, como mostram, por exemplo, as Figuras 6 e 11 dos exemplos.

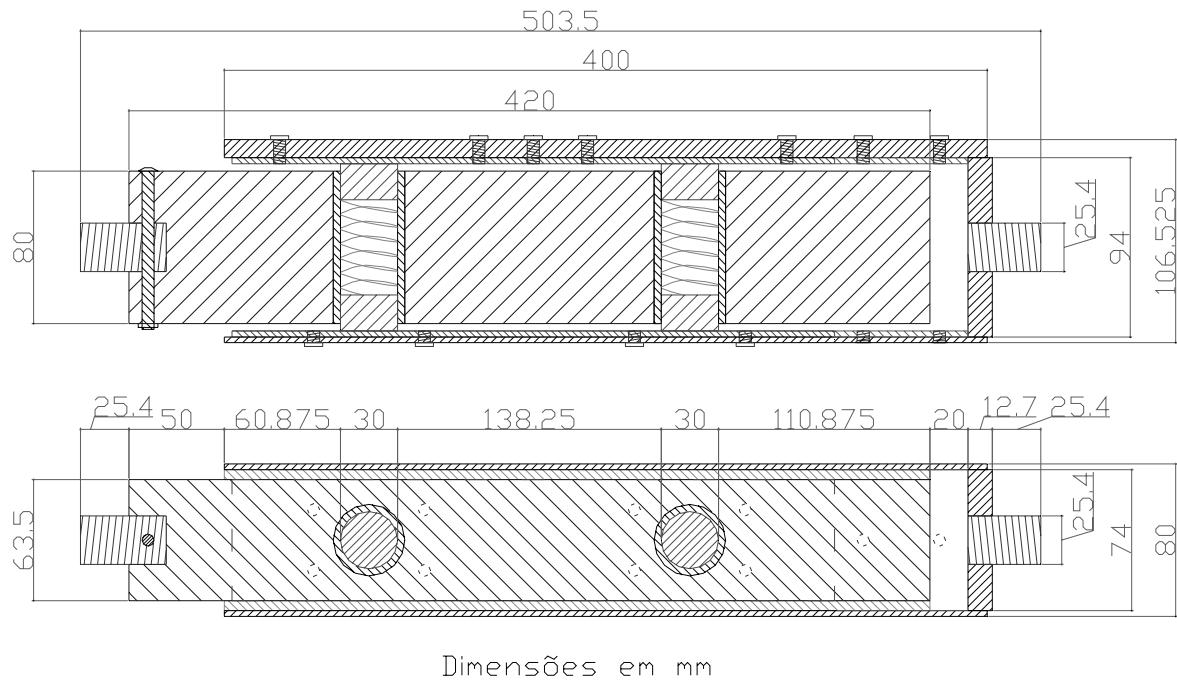


Figura 2: Vista do modelo A.

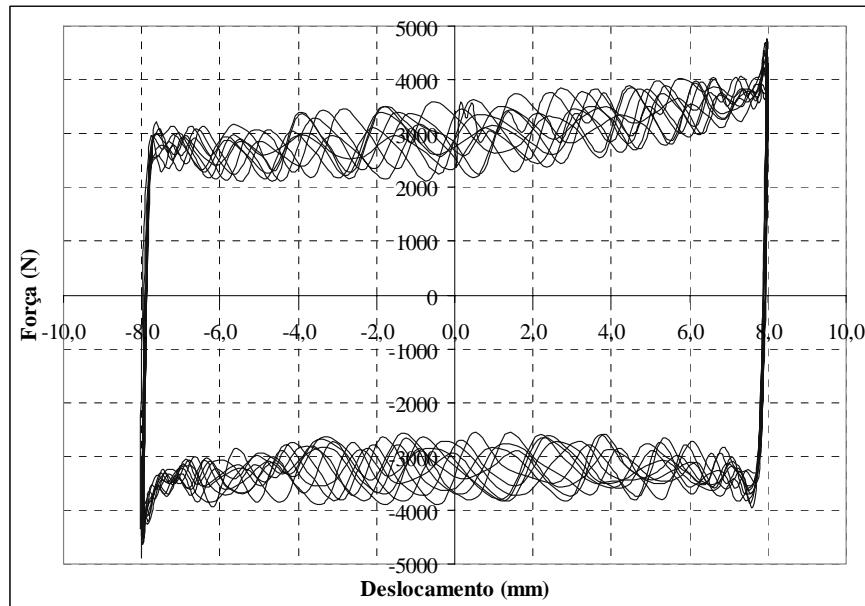


Figura 3: Ciclos de histerese do modelo A ($f = 0,5$ Hz e $a = 8$ mm).

Os amortecedores foram avaliados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, usando a máquina servo-hidráulica universal de ensaios MTS 810 com capacidade de carga de 100 kN. Todos os modelos, sob força normal pré-definida, foram submetidos a testes harmônicos de deslocamento controlado durante mais de 500 ciclos, com freqüências variaram de 0,1 a 3,0 Hz e as amplitudes dos deslocamentos de 1 a 8 mm, resultando em uma faixa de velocidades de deslizamento de 0,06 a 150 mm/s. A Figura 3 mostra ciclos de

histerese registrados para o modelo A para uma freqüência f de 0,5Hz e amplitude do deslocamento a de 8mm, enquanto a Figura 4 apresenta a energia dissipada por ciclo em função da amplitude para todas as freqüências ensaiadas.

Mais detalhes sobre cada um dos três modelos de amortecedores propostos, bem como resultados experimentais adicionais, podem ser encontrados em Miguel (2002).

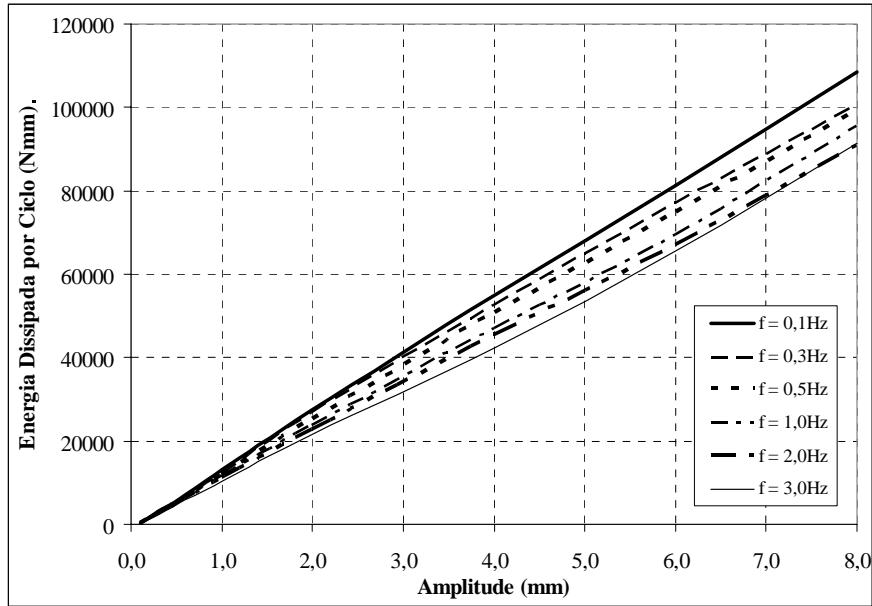


Figura 4: Energia dissipada por ciclo em função da amplitude para o modelo A.

ESQUEMAS COMPUTACIONAIS PARA CONSIDERAR O ATRITO

Devido à não-linearidade e descontinuidade da força de atrito, o processo de cálculo de sistemas que envolvem atrito torna-se difícil. Então, são apresentados a seguir esquemas computacionais propostos por Tan e Rogers (1995) e Mostaghel e Davis (1997), que facilitam o cálculo sem perda significativa da precisão. O primeiro sugere substituir o atrito por amortecimento viscoso equivalente, enquanto o segundo propõe substituir a função sinal descontínua por funções contínuas, considerando quatro modelos simplificados.

Em muitos problemas de engenharia envolvendo atrito, este é tratado como atrito de Coulomb, no qual a magnitude da força de atrito é constante, mas seu sentido é sempre oposto àquele da velocidade de deslizamento. As leis clássicas de atrito de Coulomb podem ser descritas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} F_a &= -\mu_k N \operatorname{sgn}(\dot{x}), \quad \text{para } \dot{x} \neq 0 \\ F_a &\leq \mu_s N, \quad \text{para } \dot{x} = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

sendo F_a a força de atrito, N a força normal, μ_k o coeficiente de atrito dinâmico, μ_s o coeficiente de atrito estático e \dot{x} a velocidade. $\operatorname{sgn}()$ representa a função sinal, dada por:

$$\operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] = \begin{cases} +1 & \text{para } \dot{x}(t) > 0 \\ 0 & \text{para } \dot{x}(t) = 0 \\ -1 & \text{para } \dot{x}(t) < 0 \end{cases} \tag{2}$$

No entanto, as aproximações indicadas em (1) não são suficientes em muitas aplicações. Assim, têm sido propostos outros modelos para descrever as relações entre as tensões normal e tangencial à superfície de deslizamento e a velocidade ou deslocamento relativo entre as superfícies (Oden e Martins, 1985). Visando a quantificação da força de

atrito em Sismologia, os autores propuseram recentemente uma lei modificada de variação com a velocidade de deslizamento (Miguel, 2005; Miguel et al., 2006a; Miguel e Riera, 2007). Cabe ainda salientar que vibrações denominadas de aderência-deslizamento (“stick and slip”) podem acontecer em certas situações, mas em geral não afetam a eficiência do amortecedor.

Em problemas dinâmicos, o sentido da velocidade de deslizamento é variável com o tempo. Conseqüentemente, quando a velocidade muda de sinal, a força de atrito apresenta um salto brusco. Portanto, as muitas mudanças no sentido da velocidade tornam o sistema fortemente não-linear e causam descontinuidades na força de atrito, complicando o processo de avaliação da resposta do sistema. A equação de movimento de um sistema com vários graus de liberdade pode ser escrita como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \vec{F}_{ex} + \vec{F}_a \quad (3)$$

sendo \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente e \vec{F}_{ex} e \vec{F}_a são os vetores de forças de excitação e de atrito, respectivamente.

Portanto, uma das alternativas para facilitar a integração da equação (3) é encontrar um modelo equivalente para o amortecimento por atrito. Escolhe-se como modelo equivalente ao amortecimento por atrito o amortecimento viscoso, por este ser o mais conhecido e o mais simples. Esta aproximação pode ser usada em simulações dinâmicas de qualquer sistema mecânico ou estrutural com atrito. Entretanto, esta equivalência pode resultar em um amortecimento viscoso não-proporcional, tornando um pouco mais difícil a sua solução. Neste caso, pode-se usar, por exemplo, a solução proposta por Arroyo (2004) para calcular a resposta de estruturas com amortecedores viscosos.

Para encontrar o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente ao amortecimento por atrito iguala-se a energia dissipada por ciclo pelo amortecedor viscoso equivalente com a energia dissipada por ciclo pelo amortecedor por atrito, no caso de movimento harmônico, como mostra a equação (4):

$$E_{ve} = E_{at} \quad (4)$$

sendo E_{ve} a energia dissipada por ciclo pelo amortecedor viscoso equivalente e E_{at} a energia dissipada por ciclo por atrito. Como:

$$E_{ve} = \pi c_{eq} \omega a^2 \quad (5)$$

sendo c_{eq} o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente, ω a freqüência da excitação e a a amplitude de vibração na ressonância. E:

$$E_{at} = 4 a F_a \quad (6)$$

Resulta finalmente:

$$c_{eq} = 4 F_a / (\pi \omega a) \quad (7)$$

A aproximação sugerida na equação (7) perde precisão na medida em que a resposta afasta-se de uma vibração harmônica, mas é usualmente adequada em aplicações de engenharia. Mais detalhes podem ser encontrados em Tan e Rogers (1995) e Miguel (2002).

Outra alternativa interessante para facilitar o cálculo de sistemas que envolvem atrito é substituir a função sinal descontínua por funções contínuas, como proposto por Mostaghel e Davis (1997). A força de atrito pode ser expressa pela equação (1) e a função sinal é dada pela equação (2).

Mostaghel e Davis (1997) propuseram as seguintes quatro funções contínuas para substituir a função sinal:

$$f_1(\alpha_1, \dot{x}) = \text{erf}(\alpha_1 \dot{x}) \quad (8)$$

$$f_2(\alpha_2, \dot{x}) = \tanh(\alpha_2 \dot{x})$$

$$f_3(\alpha_3, \dot{x}) = (2/\pi) \arctan(\alpha_3 \dot{x})$$

$$f_4(\alpha_4, \dot{x}) = \alpha_4 \dot{x} / (1 + \alpha_4 |\dot{x}|)$$

As constantes α_i 's são todas positivas e seus valores ditam o desejado nível de precisão nas suas respectivas representações da função sinal. A comparação da variação dessas funções apresentadas na equação (8) com a velocidade de deslizamento para o fator $\alpha_i = 10$ ($i = 1, 2, 3, 4$), é ilustrada na Figura 5. Informações adicionais podem ser encontradas em Mostaghel e Davis (1997) e Miguel (2002).

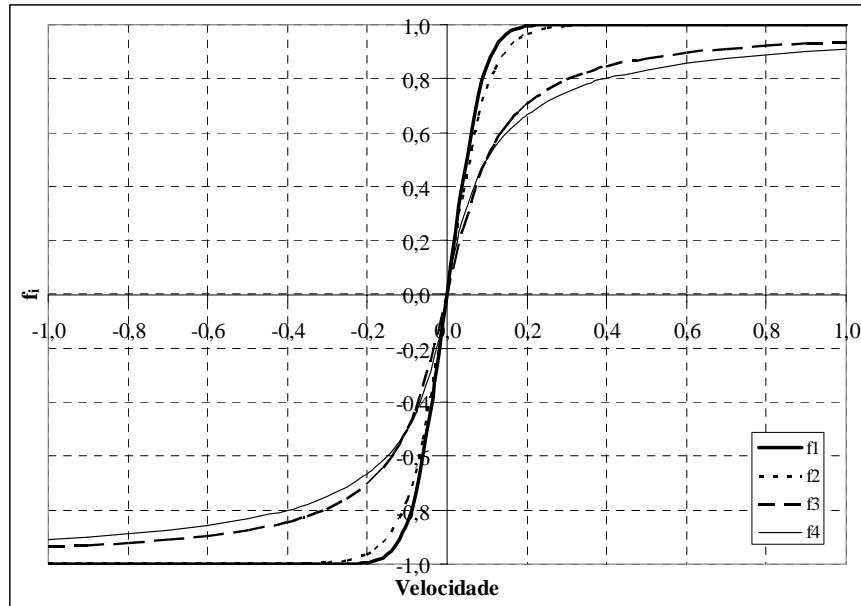


Figura 5: Funções contínuas que aproximam a função sinal.

Nos exemplos apresentados a seguir são utilizados estes esquemas computacionais, sendo a aproximação proposta por Mostaghel e Davis (1997) utilizada no primeiro exemplo, enquanto o esquema sugerido por Tan e Rogers (1995) é aplicado no segundo exemplo.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO DE AMORTECEDORES POR ATRITO EM ESTRUTURAS

A efetividade de amortecedores externos em estruturas submetidas à excitação sísmica foi avaliada anteriormente pelos autores (Miguel e Riera, 2002; Curadelli et al., 2003; Curadelli e Riera, 2004; Curadelli et al., 2006). Curadelli e Riera (2004) mostraram que a confiabilidade de edifícios de médio porte em regiões sísmicas pode ser consideravelmente aumentada pela adição de amortecedores passivos.

Na seqüência, dois exemplos práticos são apresentados para demonstrar a eficiência de amortecedores por atrito em estruturas de aço submetidas à excitação sísmica ou devida ao vento. No primeiro exemplo, um edifício de seis andares submetido à excitação sísmica é analisado, enquanto no segundo exemplo, uma torre de linha de transmissão submetida a carregamento devido ao vento é estudada. Em trabalhos anteriores (Rocha et al., 2004; Miguel et al., 2006b), os autores mostraram a efetividade dos amortecedores propostos em uma passarela submetida à excitação humana.

Edifício submetido à excitação sísmica

Como um primeiro exemplo da efetividade de amortecedores por atrito, um edifício de aço de seis andares (Figura 6) com 18m de altura e 16m de largura, submetido ao sismo de Caucete, Argentina, 1977 (Figura 7), é analisado antes e após a instalação de seis amortecedores por atrito. As propriedades da estrutura são apresentadas na Tabela 1. As seis freqüências naturais do edifício são: 0,93, 2,45, 3,98, 5,06, 6,19 e 7,33 Hz. A equação diferencial de movimento do sistema com os amortecedores por atrito instalados é expressa por:

$$\ddot{\mathbf{M}\vec{x}} + \ddot{\mathbf{C}\vec{x}} + \ddot{\mathbf{F}_a} + \ddot{\mathbf{K}\vec{x}} = \ddot{\mathbf{F}_{ex}} \quad (9)$$

sendo \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} as matrizes de massa, amortecimento viscoso e rigidez, respectivamente, $\ddot{\mathbf{F}_{ex}}$ é o vetor de forças externas e $\ddot{\mathbf{F}_a}$ é o vetor de forças de atrito, expresso por:

$$\ddot{\mathbf{F}_a} = \mu \cos(\phi) \{N_i \operatorname{sgn}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - N_{i+1} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i)\} \quad (10)$$

sendo μ o coeficiente de atrito, N_i a força normal do amortecedor do pavimento i , \dot{x}_i a velocidade do pavimento i e ϕ o ângulo de inclinação dos amortecedores com a horizontal.

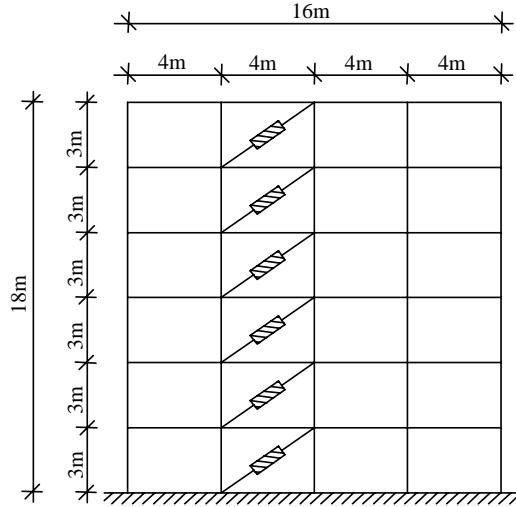


Figura 6: Edifício de aço de seis andares com seis amortecedores por atrito.

Um programa em linguagem Matlab foi desenvolvido para obter a resposta do edifício antes e após a instalação dos amortecedores. O programa utiliza o método explícito das diferenças finitas centrais, que é um método de integração direta das equações de movimento no domínio do tempo, e também, conforme explicado anteriormente, é substituída a função sinal descontínua pela função contínua da tangente hiperbólica, de acordo com a função f_2 da equação (8). O modelo analítico utilizado para representar o edifício é o “shear building” com 1 grau de liberdade por pavimento, cujas massas e rigidezes são listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do edifício de aço.

Pavimento	Rigidez (k_i) em MN/m	Massa (m_i) em toneladas
1	195,0	254,65
2	162,0	254,65
3	140,5	254,65
4	130,0	254,65
5	90,0	254,65
6	85,0	254,65

Inicialmente a estrutura é analisada sem amortecimento adicional, isto é, apenas com seu amortecimento próprio de 1%. Em uma segunda análise, incorporam-se ao edifício seis amortecedores por atrito de igual capacidade por pavimento, tipo o modelo A, mas com capacidade de 300 kN para se fazer a comparação do deslocamento máximo no topo do edifício antes e após a instalação dos seis dissipadores de energia. Como pode ser visto na Figura 8, a resposta em termos de deslocamento máximo no topo do edifício obtida após a instalação dos seis amortecedores por atrito foi reduzida 50% em relação à resposta antes da instalação dos dissipadores.

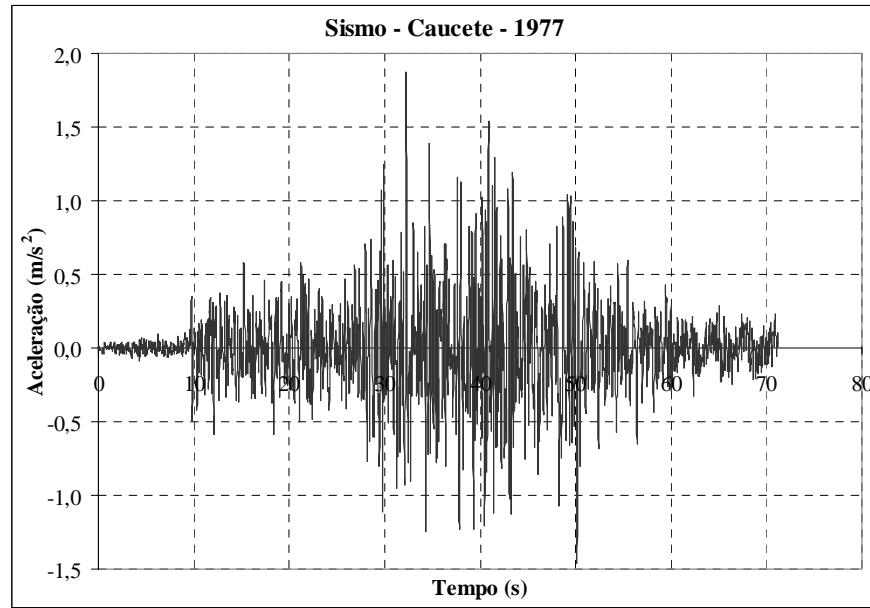


Figura 7: Sismo de Caucete, Argentina, 1977.

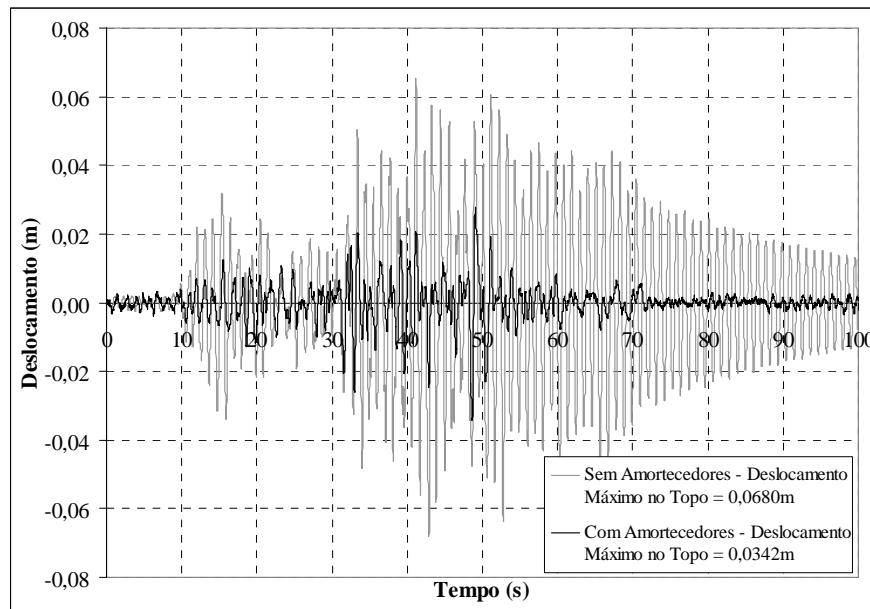


Figura 8: Resposta do edifício em termos de deslocamento no topo sem e com amortecedores por atrito.

Observa-se na Figura 9 que aumentando gradualmente a força de atrito nos amortecedores, o deslocamento máximo no topo da estrutura vai diminuindo até alcançar um valor limite para uma capacidade de cada amortecedor de aproximadamente 300 kN. Aumento adicional da capacidade dos amortecedores não altera significativamente o deslocamento no topo de 0,033 m, isto é, a metade do deslocamento máximo no mesmo nível sem amortecedores. Já a Figura 10 mostra a variação do esforço cortante máximo na base em função da capacidade de cada amortecedor. Novamente observa-se que a partir de uma capacidade de aproximadamente 150 kN a redução no cortante torna-se marginal. Em termos de esforços máximos na estrutura, o valor de projeto para o sismo considerado seria 150 kN.

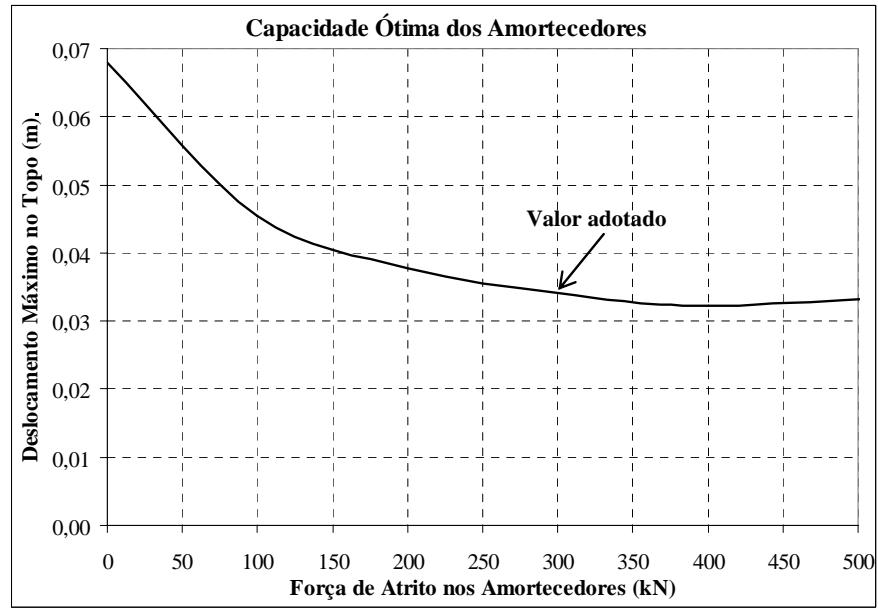


Figura 9: Deslocamento máximo no topo do edifício em função da força de atrito nos amortecedores.

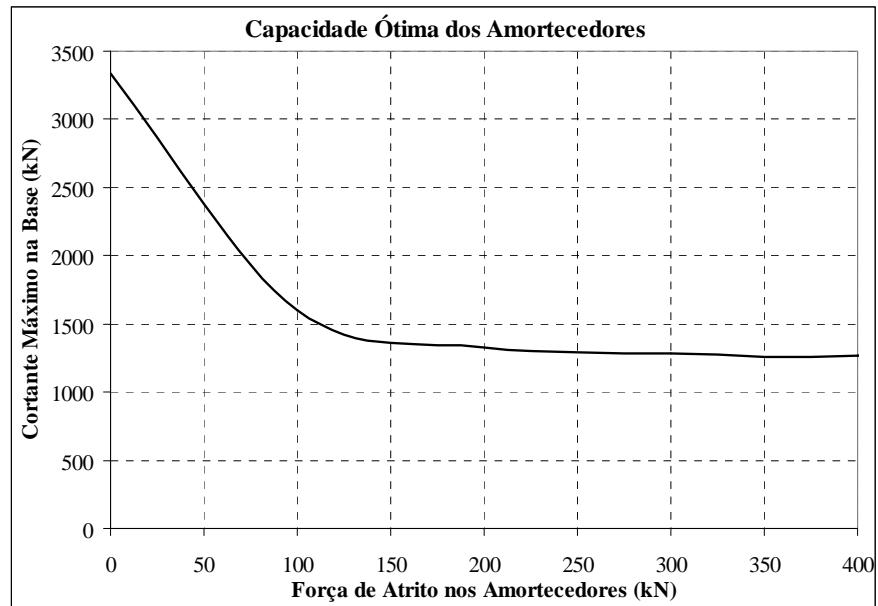


Figura 10: Cortante máximo na base do edifício em função da força de atrito nos amortecedores.

Simulações numéricas com outros sismos sugerem que o valor ótimo da capacidade total dos amortecedores encontra-se na faixa entre 0,10 e 0,25 do cortante máximo na base do edifício. Assim, a soma das capacidades dos amortecedores a instalar no edifício deve ser igual a um valor entre 10 e 25% do cortante máximo na base. Observe-se que os pilares de apoio dos amortecedores estão sujeitos a flutuações da carga axial. Admitindo conservadoramente que todos os amortecedores podem desenvolver carga igual a sua capacidade e em fase, a amplitude máxima de ditas flutuações foi estimada em 30% da carga devida ao peso próprio. Estudos adicionais são necessários para estabelecer critério de projeto menos conservador.

Torre de linha de transmissão submetida à excitação devida ao vento

Efeitos dinâmicos devido à ação do vento podem causar, em estruturas com freqüências naturais menores que 2 Hz e baixo amortecimento, amplitudes de vibração acima dos limites de operação permitidos ou dano por fatiga. Por outro lado, a amplificação da resposta devido à turbulência atmosférica em estruturas altamente amortecidas é normalmente desprezível. A instalação de amortecedores externos é, portanto, uma alternativa atraente para aumentar o amortecimento global, até a contribuição ressonante da resposta total à ação do vento tornar-se insignificante.

Para validar o projeto do amortecedor, um teste dinâmico de vibrações livres de uma torre de linha de transmissão de 82m de altura foi numericamente simulado. As propriedades mecânicas da torre selecionada, danificada no Japão durante um tufão em 1991, são descritas em Murotsu et al. (1994) e Miguel et al. (2004) para um modelo 2D. É prática comum determinar a resposta da torre, antes da produção em série iniciar, em um teste padrão, com forças horizontais que simulam as cargas de vento do projeto. Assim, foi simulado um teste de vibrações livres antes e após a instalação de três amortecedores por atrito, como mostrado na Figura 11. Foi verificado que a razão de amortecimento crítico no modo fundamental aumentou mais de 600% em relação ao valor original. As três primeiras freqüências naturais da torre são 0,99, 3,12 e 5,79 Hz e a razão de amortecimento crítico original no modo fundamental foi admitida igual a 1%. O conceito de amortecimento viscoso equivalente, descrito anteriormente, foi utilizado para simular os amortecedores por atrito e o software Ansys foi adotado nestas análises. Os valores dos coeficientes de amortecimento equivalente utilizados nas simulações realizadas no Ansys variam de 270 kNs/m a 701 kNs/m. A Figura 12 mostra a carga aplicada no topo da torre, seguindo a prática convencional para testes dinâmicos de torres de linhas de transmissão (Kempner et al., 1981; Riera et al., 1983). A Figura 13 mostra a resposta em vibrações livres do topo da torre sem e com amortecedores por atrito. Detalhes adicionais podem ser encontrados em Miguel et al. (2004).

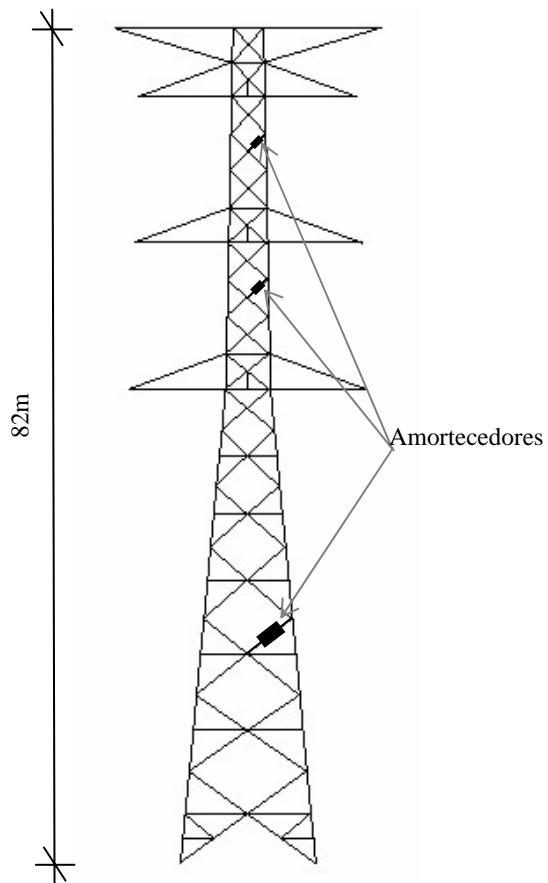


Figura 11: Torre de linha de transmissão com três amortecedores por atrito.

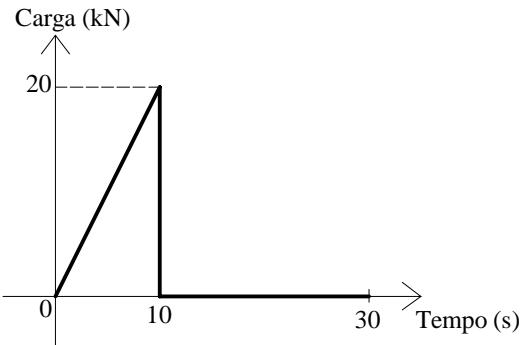


Figura 12: Carga horizontal aplicada no topo da torre.

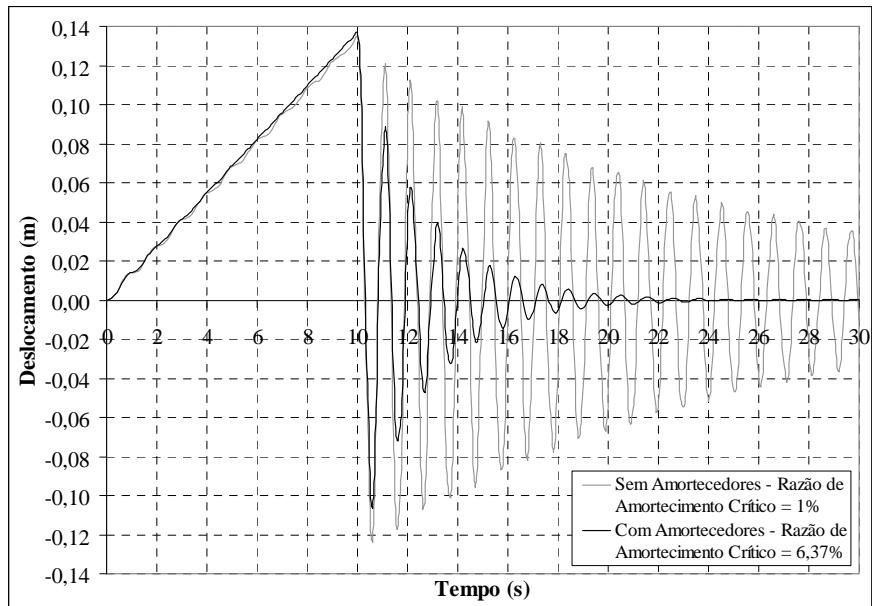


Figura 13: Resposta da torre em termos de deslocamento no topo sem e com amortecedores por atrito.

Por simulação numérica, uma curva similar a da Figura 10 foi obtida, mostrando que a capacidade ótima dos amortecedores desta torre é aproximadamente 40kN. Observa-se que a capacidade ótima total dos amortecedores pode ser estimada como igual a 25% do esforço cortante máximo na base da torre, percentagem que é ligeiramente superior à recomendada para excitação sísmica.

CONCLUSÕES

O trabalho descreve modelos de amortecedores por atrito caracterizados por projetos simples, de baixo custo e considerável capacidade de dissipação de energia. São mostrados resultados típicos de testes de laboratório em protótipos, que demonstram a efetividade dos mesmos e são descritos métodos simplificados de cálculo da resposta dinâmica de sistemas com amortecedores por atrito.

Para ilustrar a influência de amortecedores por atrito no pico da resposta dinâmica de estruturas existentes ou em fase de projeto, um edifício e uma torre de aço foram selecionados. No primeiro exemplo foi avaliada numericamente a resposta dinâmica de um edifício de aço de seis pavimentos de 18m de altura, submetido à excitação sísmica. Foi verificado que após a instalação de seis amortecedores por atrito a resposta em termos de deslocamento máximo no topo foi reduzida 50% em relação à resposta antes da instalação dos dissipadores, enquanto o esforço cortante máximo na

base foi reduzido em 60%. No segundo exemplo foi estudado o efeito da instalação de amortecedores numa torre de linha de transmissão de 82m de altura construída no Japão. Simulações numéricas de um teste de vibrações livres, comumente usado para verificar o projeto das torres, indicaram que após a instalação de três amortecedores por atrito, a razão de amortecimento crítico no modo fundamental aumentou de 1% para aproximadamente 6,5%. Com este nível de amortecimento, a contribuição ressonante da resposta dinâmica da torre submetida a vento turbulento seria reduzida aproximadamente 60%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e da CAPES, Brasil.

REFERENCIAS

- Arroyo, J. R. (2004). "Metodología para calcular la respuesta de estructuras con amortiguadores viscosos", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 4, No. 2, pp. 117-124.
- Curadelli, R. O., Miguel, L. F. F. e Riera, J. D. (2003). "Consideraciones sobre el uso de amortiguadores en el proyecto de estructuras sismorresistentes", XI SIBIS: Décimo Primer Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Curadelli, R. O. e Riera, J. D. (2004). "Reliability based assessment of the effectiveness of metallic dampers in buildings under seismic excitations", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1931-1938.
- Curadelli, R. O., Riera, J. D. e Miguel, L. F. F. (2006). "Seismic up-grading of existing structures through the introduction of external dampers", ECEES: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland.
- Kempner, L., Stroud, R. C. e Smith, S. (1981). "Transmission line dynamic/static structural testing", *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the ASCE, Vol. 107, N° ST10, pp. 1895-1906.
- Miguel, L. F. F. (2002). "Estudo Teórico e Experimental de Amortecedores de Vibração por Atrito", Dissertação de Mestrado, PPGEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 156 pp.
- Miguel, L. F. F. e Riera, J. D. (2002). "Sobre o uso de amortecedores por atrito", XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, UnB, Brasília, DF, Brasil.
- Miguel, L. F. F., Curadelli, R. O. e Riera, J. D. (2004). "Uso de amortecedores por atrito e metálicos no controle de vibrações induzidas pelo vento em torre metálica", XXXI Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Miguel, L. F. F. (2005). "Critério Constitutivo para o Deslizamento com Atrito ao Longo da Falha Sísmica", Tese de Doutorado, PPGEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 229 pp.
- Miguel, L. F. F., Riera, J. D. e Dalguer, L. A. (2006a). "Macro constitutive law for rupture dynamics derived from micro constitutive law measured in laboratory", *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L03302.
- Miguel, L. F. F., Riera, J. D. e Curadelli, R. O. (2006b). "Structural vibration control by means of lead or friction external dampers", 4WCSCM: Fourth World Conference on Structural Control and Monitoring, San Diego, California, U.S.A.
- Miguel, L. F. F. e Riera, J. D. (2007). "A constitutive criterion for the fault: modified velocity-weakening law", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, pp. 915-925.
- Mostaghel, N. e Davis, T. (1997). "Representations of Coulomb friction for dynamic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 5, pp. 541-548.
- Murotsu, Y., Okada, H. e Shao, S. (1994). "Reliability-based design of transmission line structures under extreme wind loads", Proceedings of ICOSSAR 93, Structural Safety & Reliability, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 3, pp. 1675-1681.
- Oden, J. T. e Martins, J. A. C. (1985). "Models and computational methods dynamic friction phenomena", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 52, No. 1-3, pp. 527-634.
- Riera, J. D., Blessmann, J., Nanni, L. F., Galindez, E. E. e Silva, V. R. (1983). "Determinação experimental das propriedades dinâmicas básicas de uma torre de transmissão de 230Kv", VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Linhas de Transmissão, Brasília, DF, Brasil.

- Rocha, M. M., Riera, J. D. e Miguel, L. F. F. (2004). “O uso de amortecedores por atrito para a atenuação de vibrações em uma passarela metálica”, XXXI Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Soong, T. T. e Dargush, G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 368 pp.
- Tan, X. e Rogers, R. J. (1995). “Equivalent viscous damping models of Coulomb friction in multi-degree-of-freedom vibration systems”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 185, No. 1, pp. 33-50.

