

Uso de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados na Ponte Rio-Niterói Fernanda Monego¹, Douglas Francescato Bernardi²

¹ Centro Universitário da Serra Gaúcha – FSG / Centro de Tecnologia e Inovação / Graduada / fernanda.monego@hotmail.com

² Centro Universitário da Serra Gaúcha – FSG / Centro de Tecnologia e Inovação / Professor / douglas.bernardi@fsg.edu.br

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo explicar o funcionamento dos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados bem como a sua importância no controle de vibrações estruturais provocadas por ações do vento. Durante anos, a Ponte Rio-Niterói sofreu com constantes oscilações em sua estrutura, causadas pelo vento. Esta resposta dinâmica da estrutura ao vento, em alguns casos, pode causar sérios danos às pontes ou ainda seu colapso total, como foi o caso da *Tacoma Narrows Bridge*. A solução encontrada para reduzir estes danos foi a instalação de Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (MADS) que realizam o controle passivo das vibrações causadas pelo vento. Estes dispositivos foram instalados na parte interna das vigas da ponte e atuam promovendo uma redução de até 80% na amplitude das oscilações.

Palavras-chave

Ponte; Vento; Vibrações; Atenuadores Dinâmicos Sincronizados.

Introdução

As pontes são de suma importância para a economia e mobilidade de uma sociedade, o que justifica a elaboração deste trabalho. Como qualquer estrutura, estão sujeitas a ações climáticas que podem comprometer sua integridade. Logo, torna-se importante a instalação de dispositivos que prolonguem a vida útil destas estruturas, melhorando seu desempenho, segurança e reduzindo os custos com manutenções.

Em abril de 2024, Taiwan foi atingido por um forte tremor com magnitude superior a 7 graus na escala Richter. Estruturas foram danificadas e muitos edifícios colapsaram devido ao sismo. No entanto, o prédio mais alto do país se manteve intacto (VIDON, 2024). O Taipei 101, inaugurado em 2004, possui em sua estrutura um artifício projetado para resistir aos abalos sísmicos comuns na região e também suportar os esforços causados pelo vento na imponente estrutura. Neste edifício é utilizado o Atenuador Dinâmico Sincronizado (ADS), que é formado basicamente por um sistema massa-mola-amortecedor, que tem por objetivo dissipar a energia vibratória da estrutura por meio do amortecimento do dispositivo (BRANDÃO, 2021).

No Brasil, essa tecnologia é aplicada à Ponte Presidente Costa e Silva, popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói (Figura 1). A ponte é a principal ligação entre as cidades de Niterói e Rio de Janeiro e desde sua inauguração em 1974, sofria com consideráveis deslocamentos verticais causados pelos esforços do vento, que causavam grande apreensão aos usuários que trafegavam pela ponte. Como alternativa para reduzir estes deslocamentos foram instalados na estrutura Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (MADS) no ano de 2004, e que atualmente ainda provocam a redução das oscilações causadas pelo vento (BATTISTA, PFEIL, 2005).

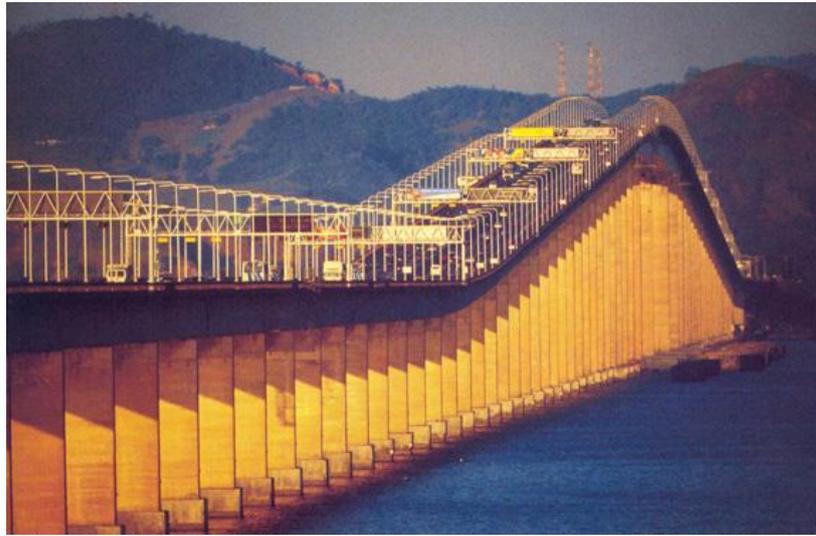


Figura 1 – Ponte Rio-Niterói

Fonte: WordPress.com (2024)

Sistemas de controle de vibrações

Os primeiros conceitos de controle de vibrações remontam ao ano de 1909, quando uma forma básica foi proposta pelo engenheiro alemão Hermann Frahm. Tal sistema era constituído apenas por massa-mola sem menção ao amortecedor, que foi introduzido apenas em 1928 no modelo de Ormondroyd e Den Hartog (KAVEH et al., 2015).

Os sistemas de controle de vibrações têm por objetivo modificar as propriedades de rigidez e amortecimento da estrutura através da instalação de dispositivos e/ou forças externas que absorvem parte da carga dinâmica (BRANDÃO, 2021).

No sistema passivo de controle, diferentemente do sistema ativo, não é necessária energia externa para seu funcionamento, os dispositivos instalados utilizam o próprio movimento da estrutura para desenvolver os esforços para controle estrutural (SYMANS, CONSTANTINOU, 1999).

De acordo com Brandão (2021), a instalação de sistemas passivos possui custos menores, facilidade de instalação, manutenção e controle em relação aos sistemas ativos. No entanto, no sistema ativo, não há limitações quanto ao controle das faixas de frequência de excitação, devido ao fato destes dispositivos serem geralmente operados por atenuadores hidráulicos ou eletromecânicos que fornecem as forças de controle através de monitoramento com sensores. Porém, os gastos com a alta demanda de energia, bem como a ocasional falta de eletricidade em virtude de desastres naturais como terremotos ou furacões são limitadores (ÁVILA, 2002).

Existe também o sistema semi-ativo, o qual possui um controle dos dispositivos passivos, ao invés de aplicar a força diretamente à estrutura. É adaptável à demanda da estrutura sem a necessidade de grande gasto energético. Já o sistema de controle híbrido combina os sistemas passivo e ativo, em que o sistema ativo é ativado quando o passivo atinge sua capacidade. Com isso, há uma amplificação da faixa de frequência de controle das vibrações (ROSSATO, 2017).

Atenuadores Dinâmicos Sincronizados

Os ADS são um tipo de controle passivo de vibrações cujo objetivo é reduzir a resposta dinâmica da estrutura com a utilização de uma massa conectada à estrutura principal através de uma mola e um amortecedor. O ADS é ativado quando há o movimento estrutural induzido pelo vento ou sismos e o controle da estrutura ocorre através da sintonização da frequência do atenuador com a frequência particular da estrutura. Com a excitação da frequência, o ADS ressoa fora de fase, dissipando assim, a energia através da força de inércia (CHANDRAN, THAMPAN, 2017).

A sintonização da frequência dos ADS pode se dar de diversas formas, como a variação da massa e/ou da rigidez dos amortecedores para cobrir a frequência principal. Na prática, recomenda-se fixar a rigidez dos amortecedores e variar apenas a massa (AVILA, GONÇALVES, 2009).

Os atenuadores dinâmicos sincronizados são de fácil instalação, podendo ser instalados em edifícios, por exemplo, sem interromper as atividades operacionais. Estes dispositivos, além de terem fácil instalação, baixo custo e exigirem pouca manutenção, possuem grande versatilidade, podendo ser projetados de várias formas e tamanhos, facilitando as adequações aos aspectos arquitetônicos (BRANDÃO, 2021). No entanto, alguns cuidados devem ser tomados durante a fase de projeto, necessitando a consideração de alguns fatores como: a quantidade de massa adicionada à estrutura, o percurso do ADS, o atrito entre a massa e a superfície de apoio, a quantidade de força da mola aplicada à estrutura e também o espaço ocupado pelo dispositivo (AVILA, GONÇALVES, 2009).

Um dos ADS mais conhecidos é o utilizado no edifício Taipei 101. O prédio mais alto de Taiwan possui 508 m de altura acima do solo e, com isso, está sujeito a grandes esforços causados pelo vento, além de estar situado em uma região que sofre com terremotos. Buscando aumentar a vida útil da construção, foi instalado na parte superior do edifício uma gigante esfera de aço de mais de aproximadamente 700 toneladas (cerca de 0,24% da massa total do edifício), cuja taxa de oscilação é definida por um pêndulo preso ao 92º andar, o qual seu esquema pode ser visto na Figura 2 (POON et al., 2004).

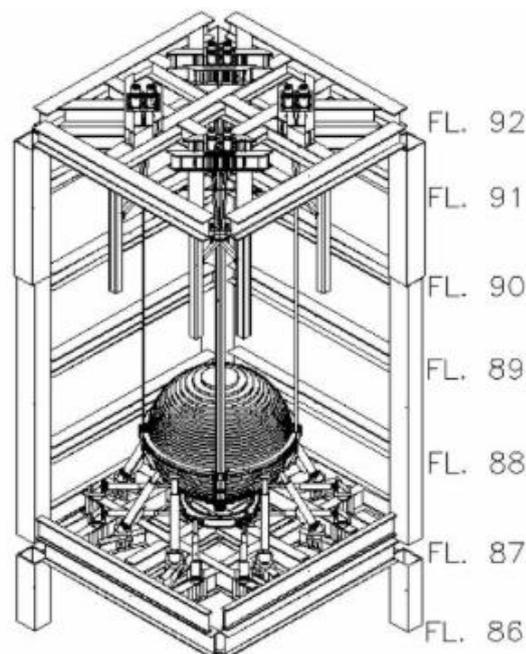


Figura 2 – Atenuador dinâmico sincronizado no edifício Taipei 101

Fonte: Poon et al. (2004)

O efeito de amortecimento varia com a velocidade da massa, ou seja, uma oscilação regular e lenta como a induzida pelo vento, cria uma força de resistência relativamente baixa que proporciona o amortecimento enquanto permite que a massa balance. No caso de terremotos, que provocam solavancos repentinos, a força de resistência aumenta drasticamente, limitando o movimento da massa (POON et al., 2004).

Uma das desvantagens em relação ao uso de um único ADS é a sua sensibilidade a pequenas variações nos parâmetros utilizados no sistema, principalmente na frequência da estrutura ou do amortecimento considerado no projeto (AVILA, GONÇALVES, 2009).

Pequenos deslocamentos na sintonia da frequência podem gerar a ineficácia de um único Atenuador Dinâmico Sincronizado desta forma, o uso de Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados mostra-se mais eficiente que um único em alguns casos (ELIAS, MATSAGAR, 2017). Além disso, o uso de MADS proporciona maior liberdade de escolhas das propriedades e configurações dos amortecedores (AVILA, GONÇALVES, 2009).

De acordo com Yamaguchi e Harnpornchai (1993) os MADS “consistem em um número de pequenos atenuadores cujas frequências de sintonização estão distribuídas em torno da frequência natural de um modo da estrutura a ser controlada”. Segundo Battista e Pfeil (2005) “esse procedimento é aplicável às estruturas que mostram modos compostos ou isolados com frequências bem espaçadas, sujeitas a forças de excitação com magnitudes, distribuição e frequências variáveis”.

Ação do vento em pontes

As pontes são estruturas que estão sujeitas a esforços estáticos e dinâmicos. A gravidade, terremotos e o vento são forças naturais a serem consideradas ao se projetar uma estrutura. A aceleração da gravidade promove uma carga constante à estrutura, e desta forma é considerada uma carga estática, já os terremotos causam um carregamento dinâmico. O vento, em contrapartida, provoca cargas dinâmicas e estáticas que, em estruturas como pontes, pode causar diversos efeitos que culminem em falhas parciais ou totais (VALLIS, 2013).

Quanto ao esforço estático, três tipos de força podem atuar na seção transversal da ponte: arrasto, sustentação e torção. Já as respostas dinâmicas podem ser: martelamento, galope, drapejamento e desprendimento de vórtices (STANDERSKI, 2012).

Os vórtices são pequenos turbilhões na linha do fluxo do vento, causado pelo deslocamento da camada limite da superfície do corpo. A formação destes vórtices ocorre quando há a separação desta camada limite pela geometria de um corpo. Em corpos cilíndricos é difícil precisar a posição exata dos pontos de descolamento dos vórtices, no entanto em corpos com arestas vivas, a posição dos deslocamentos se dá em uma ou mais destas arestas (RIBEIRO et al., 2012).

Os vórtices, ilustrados na Figura 3, causam forças oblíquas em relação à direção do vento. As forças alternadas na direção do vento, chamadas de força de arrasto, ocorrem na frequência do desprendimento individual dos vórtices, já as forças de sustentação que ocorrem na direção transversal do vento acontecem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices. As componentes destas forças tendem a gerar deslocamentos na direção em que agem. Em corpos flexíveis e com baixo amortecimento estrutural, ocorrem oscilações transversais quando a frequência de desprendimento dos vórtices coincide com a frequência natural da estrutura (RIBEIRO et al., 2012).

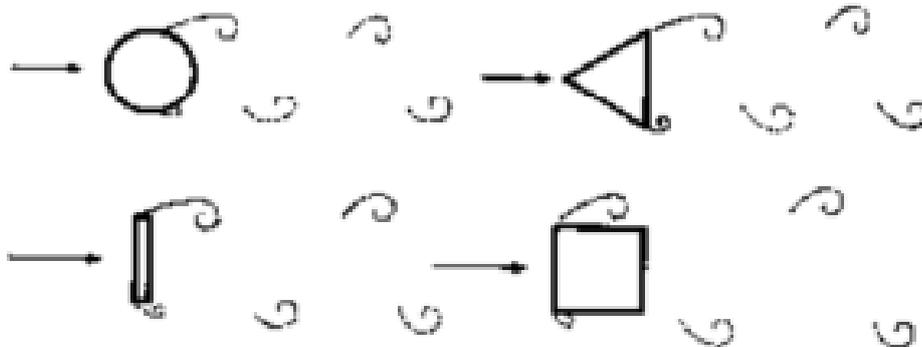


Figura 3 – Desprendimento de vórtices em diferentes geometrias

Fonte: Hallak (2002)

Um caso de grande repercussão dos efeitos do vento em pontes foi o incidente com a ponte Tacoma Narrow, nos Estados Unidos, ocorrido em 1940. A ponte, que possuía um vão central de 840 metros e dois vãos laterais de 300 metros, entrou em colapso pouco tempo após sua inauguração. Segundo Vallis (2013), na fase de projeto da estrutura, o vento foi considerado apenas como uma força lateral, no entanto vibrações verticais ocorriam frequentemente. Apesar disso, esse movimento vertical galopante não foi o que causou o colapso total da ponte e sim o movimento divergente de torção, como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 - Movimento da Tacoma Narrows Bridge antes do colapso

Fonte: Vallis (2013)

O desastre da ponte Tacoma, bem como os estudos realizados após o colapso da estrutura para analisar sua causa, auxiliaram no entendimento da necessidade de considerar a influência dos esforços causados pelo vento em pontes na totalidade de seus perfis de velocidade, intensidade e turbulência (VALLIS, 2013).

Em termos de vulnerabilidade aerodinâmica, o formato do tabuleiro da ponte é um dos mais importantes itens a serem analisados. Quanto mais aerodinâmico for o tabuleiro, melhor será seu comportamento frente aos esforços do vento. Já para tabuleiros com arestas vivas, existem mais localizações de separação do escoamento, o que reduz a velocidade crítica da estrutura. Além disso, o amortecimento estrutural da ponte também deve ser levado em consideração. Estruturas de concreto possuem razão de amortecimento estrutural maior do que estruturas de aço, o que torna pontes metálicas mais vulneráveis à ação do vento (VALLIS, 2013).

Ponte Presidente Costa E Silva

Inaugurada em 1974, a Ponte Presidente Costa e Silva é popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói justamente por ser a principal conexão entre estas duas cidades. A ponte, localizada próximo ao Aeroporto Santos Dumont, foi pensada para ligar as duas cidades, passando pela Baía de Guanabara, sem interferir no tráfego marítimo e aéreo (BESSA, 2019). Sua construção durou cerca de 4 anos e meio e contou, ao longo deste período, com cerca de 10.000 pessoas trabalhando ativamente na obra (SIQUEIRA, 2024).

Ao todo foram utilizados cerca de 560.000 m³ de concreto em toda a obra sendo que cerca de 77.000 m³ foram aplicados submersamente utilizando uma dosagem que dispensa o uso de adensamento vibratório, ou seja, concreto autoadensável. Tal técnica hoje em dia é comum, no entanto na época era de rara utilização (SIQUEIRA, 2024).

Segundo Jarosi (2020), a ponte possui um total de 13,29 km de extensão. A maior parte da estrutura foi executada utilizando peças pré-moldadas de concreto protendido, exceto o trecho central que foi executado em aço. Estruturalmente, a ponte pode ser dividida em três partes: os vãos de acesso em terra, que são formados por longarinas pré-moldadas em forma de “barriga de peixe”; os vãos de acesso sobre o mar, com cerca de 8 quilômetros de extensão executados em concreto protendido com aduelas pré-moldadas, que possuem intervalos de 80 metros, além de dois vãos adjacentes aos centrais

com 92 e 114 metros; por fim, os vãos centrais, formados por uma viga contínua central de 300 metros e duas laterais de 200 metros (PEDROSO, 2024). Um croqui da ponte pode ser observado na Figura 5.

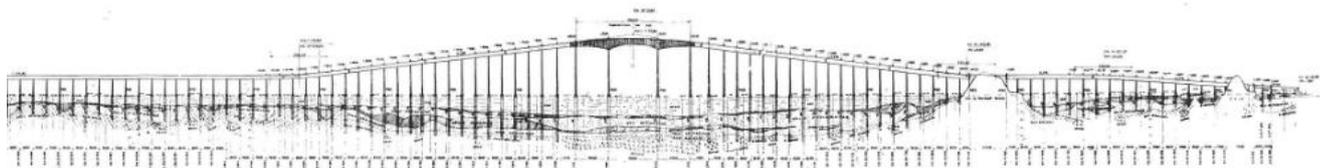


Figura 5 – Representação da vista lateral da Ponte Rio Niterói

Fonte: Tammen & Bergendoff, Noronha (1978)

Os vãos centrais foram projetados para possibilitar a passagem de navios petroleiros sob a ponte. Neste trecho foram utilizadas vigas-caixão gêmeas de aço de alta resistência, conforme visto na Figura 6 (PEDROSO, 2024). As pontes com seção caixão possuem grande capacidade de distribuição de carga e alta resistência à torção. Por possuir uma mesa inferior e uma superior também oferecem grande resistência à flexão para momentos positivos e negativos. A grande rigidez torcional não permite instabilidades como no caso da ponte Tacoma Narrow, além de permitir a instalação de dispositivos aerodinâmicos em seu interior (STANDERSKI, 2012).

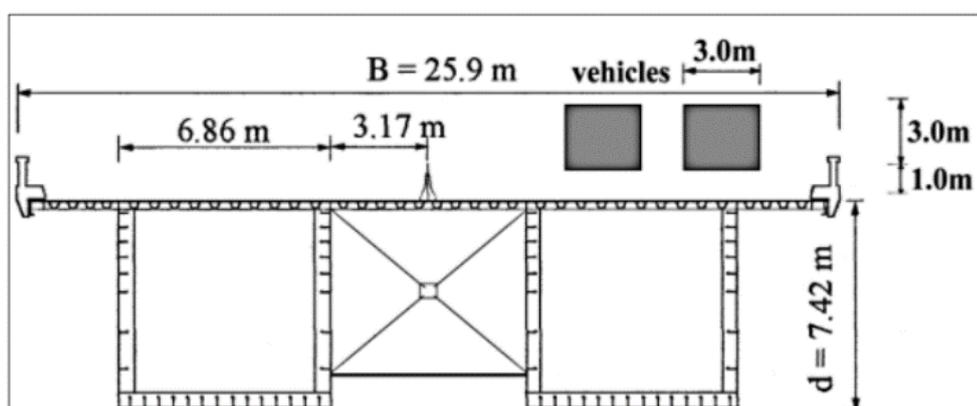


Figura 6 – Seção transversal típica da ponte metálica.

Fonte: Battista, Pfeil (2005)

Segundo Battista e Pfeil (2005) o trecho que compreende os três vãos centrais da ponte está localizado a cerca de 65 metros acima do nível do mar. A inexistência de obstáculos próximos à área de construção suficientes para gerar turbulência no vento e o posicionamento da ponte sobre águas calmas, submete a estrutura a forças aeroelásticas provocadas por fluxos de vento suave, quase laminar. Os ventos neste local, vindos de Sudoeste têm velocidade média entre 50 e 70 km/h, podendo ter rajadas de até 100 km/h.

Para velocidades na faixa de 55 a 60 km/h sustentadas por alguns minutos, ocorre a oscilação no primeiro modo de flexão vertical da estrutura, causada pela ressonância induzida pelo desprendimento de vórtices, que se iguala a frequência fundamental da ponte (OLIVEIRA, 2010). Quanto ao modo de torção axial, o travejamento das vigas gêmeas no vão central confere rigidez torcional suficiente para evitar oscilações para ventos com velocidade inferior a 200 km/h (BATTISTA, PFEIL, 2005). Desde sua inauguração em 1974, a Ponte Rio-Niterói registrou eventos de oscilação vertical causados por ventos transversais na faixa de 55 a 60 km/h, ocorridos uma ou duas vezes a cada dois anos. Os primeiros relatos de fortes oscilações na ponte datam de 17 de agosto de 1980, quando uma tempestade atingiu a região e provocou deslocamentos verticais que levaram condutores apreensivos a abandonarem seus veículos na ponte (BATTISTA, PFEIL, 2005). Ao longo dos anos foram

observadas amplitudes de 25 a 60 centímetros, totalizando deslocamentos de até 1,20m. Nestes eventos de grandes oscilações o tráfego era bloqueado na ponte. Entretanto, por vezes os bloqueios não eram realizados em tempo hábil e os motoristas acabavam trafegando pela ponte durante estes eventos (OLIVEIRA, 2010). As câmeras de monitoramento de tráfego instaladas na ponte registraram a movimentação do tabuleiro da ponte no ano de 1997.

Utilização De MADS Na Ponte Rio-Niterói

Com o objetivo de reduzir as oscilações que tanto causavam apreensão e transtorno aos usuários da Ponte Presidente Costa e Silva, a Coppe – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – , por meio do engenheiro Ronaldo Battista, foi contratada pela Ponte S/A, então concessionária administrativa da ponte, para realizar a instalação de um dispositivo capaz de reduzir as grandes amplitudes de oscilações que a estrutura vinha sofrendo devido ao vento.

De acordo com Battista e Pfeil (2005), foram realizados testes em túnel de vento com modelagens da estrutura da ponte, cobrindo o vazio inferior entre as vigas-caixão, porém não foram observados resultados significativos. Alguns outros acessórios foram cogitados para reduzir a resposta dinâmica da estrutura ao vento, entretanto foram descartados devido ao acréscimo substancial de massa à estrutura. O procedimento a ser adotado então, foi a implantação de dispositivos de controle.

Um sistema de Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados foi então projetado para realizar o controle passivo das oscilações provocadas pelo vento. O posicionamento do sistema na parte interna das vigas-caixão pode ser observado na Figura 7.

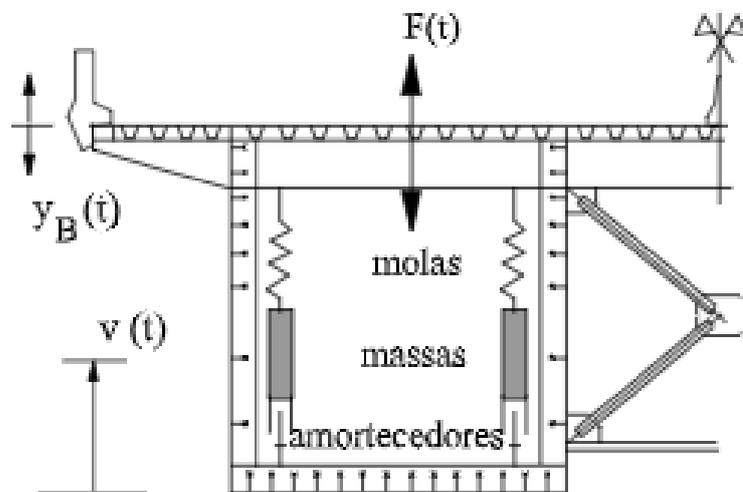


Figura 7 – Posicionamento dos ADS nas vigas-caixão

Fonte: Battista, Pfeil (2005)

No total foram instalados 32 atenuadores dinâmicos sincronizados, cuja massa de 2,2 toneladas de cada um corresponde a apenas 0,5% do total da estrutura metálica. A faixa de amplitude dos deslocamentos relativos entre as massas e a estrutura é mantida através do amortecimento adequado. As dimensões das vigas-caixão permitem acomodar com folga as amplitudes das massas dos atenuadores. São utilizadas seis longas molas presas à travessa superior do pórtico que sustentam as caixas das massas a uma certa altura entre o topo e o fundo da viga, conforme é visto no protótipo exibido na Figura 8. Ao todo, 192 molas foram utilizadas nos 32 ADS. Os amortecedores são formados por pares de cabos extensores feitos com feixes de material viscoelástico (BATTISTA, PFEIL, 2005).

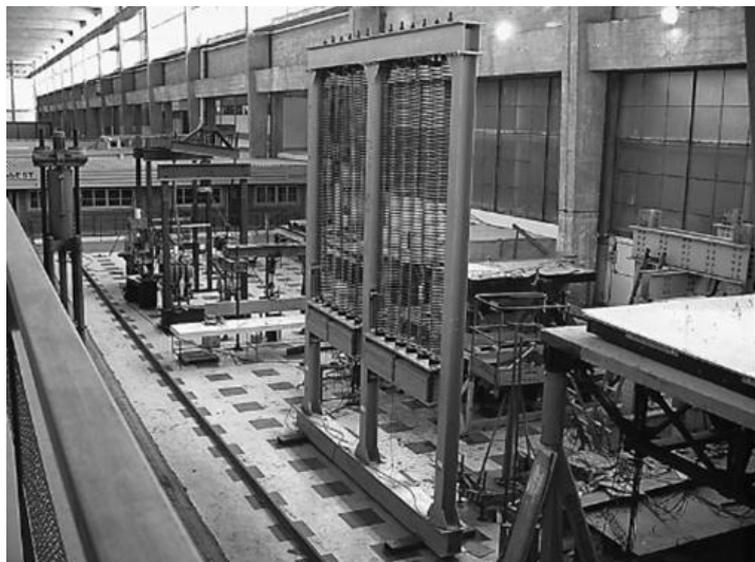


Figura 8 – Unidade de protótipo para ensaios

Fonte: Battista, Pfeil (2005)

No momento em que a estrutura da ponte sofre os efeitos do vento e passa a sofrer oscilações, os atenuadores produzem as forças de controle responsáveis por contrabalancear as forças produzidas pela estrutura. Com a adição dos MADS no interior das vigas caixão (Figura 9), a amplitude das oscilações na Ponte Presidente Costa e Silva teve redução de cerca de 80%, resultando em valores próximos a 10 centímetros de pico a pico, que não são capazes de causar desconforto aos usuários ou danos à estrutura (COPPE, 2004).

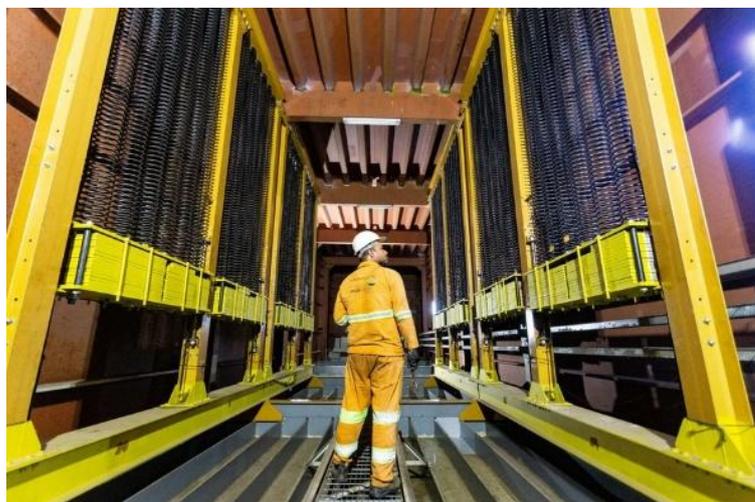


Figura 9 – Posicionamento dos ADS nas vigas-caixão

Fonte: O Globo (2023)

Conclusões

As pontes são construções de suma importância social e econômica, pois fazem a ligação entre diferentes regiões. Devido ao formato de sua estrutura, geralmente esbelta, os esforços causados pelo vento devem ser cuidadosamente analisados devido à possibilidade de causar severos impactos às pontes. Apesar de muitas vezes as oscilações não apresentarem riscos significativos às estruturas, o conforto e segurança aos motoristas que trafegam na estrutura também deve ser considerado.

A Ponte Rio-Niterói sofreu anos com grandes oscilações em seu tabuleiro nos vãos centrais. Tais oscilações geravam apreensão nos milhares de condutores que diariamente faziam o uso da estrutura. Para este caso, a melhor solução foi a utilização de um controle passivo de vibrações por meio da instalação de múltiplos atenuadores diâmetros sincronizados. A instalação destes dispositivos foi possível graças ao tipo de seção das vigas-caixão que sustentam o tabuleiro nos vãos centrais, pois possuem espaço suficiente para acomodar os conjuntos de massa-mola-amortecedor necessários para balancear as vibrações causadas pelo vento. Apesar de as estruturas metálicas serem mais suscetíveis aos impactos do vento, a geometria da seção das vigas dos vãos centrais auxilia na rigidez torcional. A facilidade de instalação e manutenção fizeram desta uma solução muito adequada e que perdura até os dias de hoje, controlando as vibrações nesta estrutura que faz a ligação entre duas importantes cidades brasileiras.

Referências

- ÁVILA S. M. Controle Híbrido para atenuação de vibrações em edifícios. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- AVILA, S. M.; GONÇALVES, P. B. Optimal configurations of composite multiple mass dampers in tall buildings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 31, p. 75-81, 2009.
- BATTISTA, R. C.; PFEIL, M. S. Múltiplos atenuadores dinâmicos sincronizados para controle das oscilações induzidas pelo vento na Ponte Rio-Niterói. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, v. 2, n. 1, 2005.
- BESSA, B. C. A importância da análise estrutural dinâmica. João Pessoa, 2019.
- BRANDÃO, F. S. Otimização de atenuadores dinâmicos sincronizados para o controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- CHANDRAN. P. S.; THAMPAN, C. K. P. V. A Study on Vibration Control of Structures due to Seismic Excitation using Tuned Mass Damper, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 8, n. 11, pp. 105-112., 2017.
- COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE desenvolve Atenuadores para a Ponte Rio-Niterói. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/coppe-desenvolve-atenuadores-para-a-ponte-rio-niteroi/>. Acesso em: 19 de maio de 2004.
- ELIAS, S.; MATSAGAR, V. Effectiveness of tuned mass dampers in seismic response control of isolated bridges including soil-structure interaction. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 14, p. 2324-2341, 2017.
- JAROSI, V. S.; AMANN, K. A. P. Estudo E Realização De Modelo Da Ponte Rio- Niterói Para Ensaio Da Linha De Influência. São Bernardo do Campo, 2020
- KAVEH, A.; MOHAMMADI, S.; HOSSEINI, O. K.; KEYHANI, A.; KALATJARI, V.R. Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search. *Transactions of Civil Engineering*, v. 39, n. C1, p. 21-40, 2015.
- OLIVEIRA, S. R. C. Comportamento Aerodinâmico de Estrutura de Ponte com Seção Alterada pela Presença de Veículos. *Mecânica Computacional*, v. 29, n. 33, p. 3329-3346, Buenos Aires, 2010.
- PEDROSO, F. Soluções pioneiras no projeto e execução da Ponte Rio-Niterói. *CONCRETO & Construções-ISSN 1809-7197*, v. 113, n. 113, 2024
- POON, D. Structural design of Taipei 101, the world's tallest building. In: *Proceedings of the CTBUH Seoul Conference*, Seoul, Korea. 2004
- RIBEIRO, M.; BARBOSA, F. S.; HALLAK, P. H. Controle Ativo de Vibrações em Estruturas Induzidas pela Ação do Vento. *Mecânica Computacional*, v. 31, n. 13, p. 2629-2639, 2012.



- ROSSATO, L. V. Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- SIQUEIRA, C. H. P. 50 anos da Ponte Rio-Niterói. *CONCRETO & Construções*-ISSN 1809- 7197, v. 113, n. 113, 2024.
- STANDERSKI, R. Ação estática do vento em tabuleiros de pontes: caracterização aerodinâmica em túnel de vento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- SYMANS, M. D.; CONSTANTINOU, M. C. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering structures*, v. 21, n. 6, p. 469-487, 1999.
- TAMMEN & BERGENDOFF INTERNATIONAL INC., H. N.; ALVES DE NORONHA, A. El puente Río de Janeiro- Niteroi Brasil. *Informes de la Construcción*, [S. l.], v. 31, n. 304, p. 77–91, 1978. DOI: 10.3989/ic.1978.v31.i304.2545. Disponível em: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/2545>. Acesso em: 19 de maio de 2024.
- VALLIS, M. B. Investigação experimental em túnel de vento dos efeitos causados por dispositivos aerodinâmicos na resposta de tabuleiros de ponte frente ao desprendimento de vórtices. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- VIIDON, F. Taipei 101: entenda como arranha-céu de 508 metros de altura resistiu ao terremoto em Taiwan com sistema antissísmico. São Paulo, 2024. Acesso em 13 de Maio de 2024, disponível em O Globo: <https://oglobo.globo.com/mundo/noticia/2024/04/03/taipei-101-entenda-como-arranha-ceu-de-508-metros-de-altura-resistiu-ao-terremoto-em-taiwan-com-sistema-antissismico.ghtml>
- WORDPRESS.COM, Acesso em 24 de Junho de 2024, disponível em https://conhecendoniteroi.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/pedro_henrique21.jpg
- YAMAGUCHI, H.; HARNPORNCHAI, N. Fundamental characteristics of Multiple Tuned Mass Dampers for suppressing harmonically forced oscillations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 22, n. 1,p. 51-62, 1993.