

PONTE DO MILÊNIO, LONDRES: EFEITO DE MULTIDÃO – UM DESAFIO PARA A ENGENHARIA NO ANO 2000

MILLENIUM BRIDGE, LONDON: CROWD EFFECT - A CHALLENGE FOR ENGINEERING IN 2000

Patrícia Cristina Cunha Nunes

RESUMO

Este trabalho visa uma revisão bibliográfica a respeito de um tema que veio à tona na entrada do século 21, na inauguração de um dos projetos contemplados para a entrada do novo milênio – a Ponte do Milênio em Londres, sobre o rio Thames. O que aconteceu em sua inauguração marcou a história da humanidade quanto ao efeito de multidão, desde a história antiga sendo utilizado como estratégia de guerra. Porém, no ano 2000, fora motivo para o fechamento de um dos mais importantes e inusitados projetos estruturais da História da Engenharia mundial e milhões de dólares em multa para a empresa construtora e responsável por seu projeto. Este artigo traz a revisão bibliográfica de um caso de dinâmica das estruturas em uma vibração específica sofrida por essa passarela devido a um efeito “imprevisto” de esforço lateral provocado pelo caminhar quando muitas pessoas estão próximas umas às outras. Esse efeito, descobertos pelos cientistas ao longo de dois anos de pesquisa incessantes para solucionar suas consequências sobre a passarela foi chamado de “Efeito Multidão”. Ao longo do trabalho será apresentada a solução par ao problema: por meio de um sistema de amortecimento passivo em sua estrutura.

Palavra Chave: Ponte do Milênio, Efeito Multidão, Amortecimento Passivo, Esforços Horizontais.

ABSTRACT

This work aims at a bibliographic review about a theme that came up at the beginning of the 21st century, at the inauguration of one of the projects contemplated for the entrance of the new millennium - the Millennium Bridge in London, over the River Thames. What happened at its inauguration marked the history of humanity in terms of the crowd effect, since ancient history being used as a war strategy. However, in 2000, it had been the reason for the closure of one of the most important and unusual structural projects in the history of world engineering and millions of dollars in fines for the construction company responsible for its project. This article brings a bibliographic review of a case of structural dynamics in a specific vibration suffered by this walkway due to an “unforeseen” effect of lateral effort caused by walking when many people are close to each other. This effect, discovered by scientists over two years of unremitting research to solve its consequences on the catwalk, was called the “Crowd Effect”. Throughout the work, the solution to the problem will be presented: through a passive damping system in its structure.

Keywords: Millennium Bridge, Crowd Effect, Passive Damping, Horizontal Efforts.

INTRODUÇÃO

Marcando o início do século XX, a tecnologia parecia poder prever todos os esforços em uma estrutura. Porém, um fato inusitado, mostrado neste trabalho, se apresentou e a estrutura da passarela de pedestres intitulada originalmente por *Millenium Bridge* mostrou que algo já tão característico de cálculos estruturais podem surpreender as previsões de esforços mais que conservadoras e ficar bem aquém do que poderia ser previsto. Em sua inauguração, a Ponte do Milênio, prevista entrou em vibração tão intensa que, imediatamente à abertura teve de ser fechada para segurança da própria estrutura e dos usuários. Um prejuízo que perdurou por dois anos tanto em termos de mobilidade urbana deste trecho da cidade de Londres quanto para a empresa construtora que contou com a ajuda de dezenas de especialistas para a solução definitiva e do entendimento dos porquês da situação. Esta passarela chegou a ser denominada o *bug* do milênio pela imprensa brasileira (FOLHA, 2008).

A Ponte do Milênio contava com exigências urbanas minuciosas e não poderia ultrapassar determinada cota para não interferir em uma linha de horizonte historicamente característica desta parte da cidade. Além disso, foi uma estrutura inovadora e de grande importância no mundo à época: fruto de um concurso internacional, contava com uma equipe de engenharia (das mais renomadas mundialmente), um artista plástico e um arquiteto. Seu projeto era audacioso pois possuía proporções nunca antes utilizadas na construção de pontes pênsis – sua tipologia estrutural inicial. Sua esbelteza era de grande interesse estético e surpreendeu a construção civil em tudo em termos de cálculos realizado até então. Porém, que deixava a desejar na ação humana imprevista por tratar-se de um efeito psicológico do efeito de estar muito próximos uns dos outros.

Portanto, a Engenharia Estrutural se deparou com um desafio nunca antes experimentado nessas proporções: descobrir qual era esse efeito até então desconhecido e solucioná-lo o quanto antes. De acordo com Arup (2008), uma equipe de pesquisa estudou o efeito do caminhar humano individualmente e posteriormente em grupo. Somente ao estudar o efeito de uma multidão de pessoas caminhando ao mesmo tempo sobre a mesma ponte puderam entender o que foi chamado de efeito multidão, termo criado após os inesperados acontecimentos. Ao descobrir os esforços laterais gerados no caminhar de uma multidão, a pesquisa criou um sistema de amortecimento para que a ponte pudesse ser usada por milhares de pessoas ao mesmo tempo sem comprometer a estrutura. À época, tratava-se de uma solução ímpar numa estrutura arrojada diante dos esforços laterais causados pela ação humana. Nas seções seguintes ver-se-á tal solução.

O projeto da Passarela

O projeto aprovado foi resultado de uma parceria de três vertentes da criação de uma forma estrutural: a Foster and Partners foi responsável pela arquitetura, a ARUP pela parte estrutural e o escultor Anthony Caro pela estética da forma. Chamada de “Uma faixa de luz sobre o rio” (Fostner&Partner, 2008), Figura 01, que significava em sua premissa de projeto que a passarela deveria contar com horizontalidade e discrição como marco vertical da malha urbana da cidade de Londres, devido à proximidade com a Catedral de *St. Paul* e a galeria de arte *Tate Modern*, Figura 02.

Figura 01 – Horizontalidade da Ponte na paisagem de Londres.



FONTE: Morgenthal, 2008.

Estruturalmente, trata-se de uma ponte pênsil e, de acordo com os autores, “(...) a ponte deveria ser o mais horizontal e plano possível. Por isso, buscou-se a menor altura possível para os pilares de sustentação.” (ARUP, 2001).

Figura 02 – Marcos visuais do entorno imediato da Ponte do Milênio: a) Catedral de *St. Paul*; b) Galeria de arte *Tate Modern*.



FONTE: a) modificado de Itinari, 2008; b) Locationscout net, 2008

A implantação da Ponte tornou possível a ligação do trajeto visual destes dois pontos turísticos tão visitados de Londres, sendo que no tecido urbano já consolidado, o percurso criado reconfigura essa parte da cidade encurtando o caminho entre os dois marcos urbanos citados. Além disso, tornando a travessia exclusiva para pedestres, a poluição causada pelo tráfego de automóveis presente em uma ponte convencional diminui substancialmente (ARUP, 2008), Figura 03.

Figura 03 – Implantação da Ponte do Milênio.



FONTE: modificado de GoogleEarth, 2008.

Uma curiosidade de seu projeto foi a concepção luminotécnica dos arquitetos, enfatizando o caráter horizontal e leve da ponte sem criar interrupções ou reflexos visuais verticais no rio, apesar de seus pilares também serem iluminados. Até mesmo durante a noite, a estrutura mantém a sua linguagem de uma fita sobre o rio. Figura 04 (Foster and Partners, 2008).

Figura 04 – Efeito de fita sobre o rio como projeto luminotécnico da ponte.

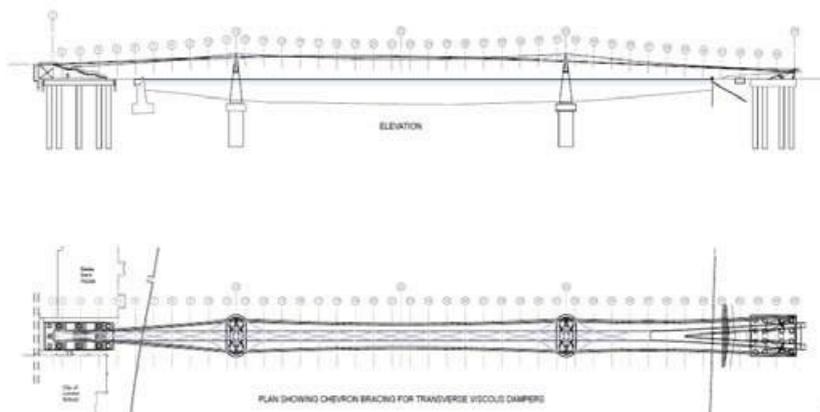


FONTE: modificado de Cloudfront, 2008.

Descrição estrutural da Ponte do Milênio

De acordo com seus arquitetos, a ponte inovou completamente os limites da tecnologia: medindo 320 metros, é uma ponte suspensa de torres muito baixas – nunca se havia tentado este feito exatamente porque a estabilidade dessa tipologia estrutural reside tanto na grande altura das duas torres quanto no desenho da catenária de seu cabo principal, Figura 05. Essa leveza estética foi uma grande inovação estrutural: a proporção entre as torres e a extensão do vão é seis vezes mais baixa do que a proporção de uma ponte pênsil comum. (ARUP, 2008).

Figura 05 – Estrutura da Ponte do Milênio.



FONTE: Reseachgate, 2008.

Nas fundações, houveram dificuldade de implantação: 16 metros de vão em sítio histórico na chamada “bandeja norte”, Figura 06(a). Todo cuidado e acurácia foram necessários durante a execução das escavações e seu efeito nas estruturas ao redor (Arup, 2008). Já o desafio da “bandeja sul”, onde existe uma ancoragem em sistema de escoras e tirantes, essa estrutura de aço é apoiado em estacas de 3 metros de profundidade, que se apoiam em dezesseis tubulões de concreto de 2m por 28m de profundidade para transferir os esforços dos cabos para o terreno, Figura 06(b). As fundações dos Pilares Centrais: cada Pilar possui dois tubulões de 6m de diâmetro e 20m de profundidade, Figura 06(c).

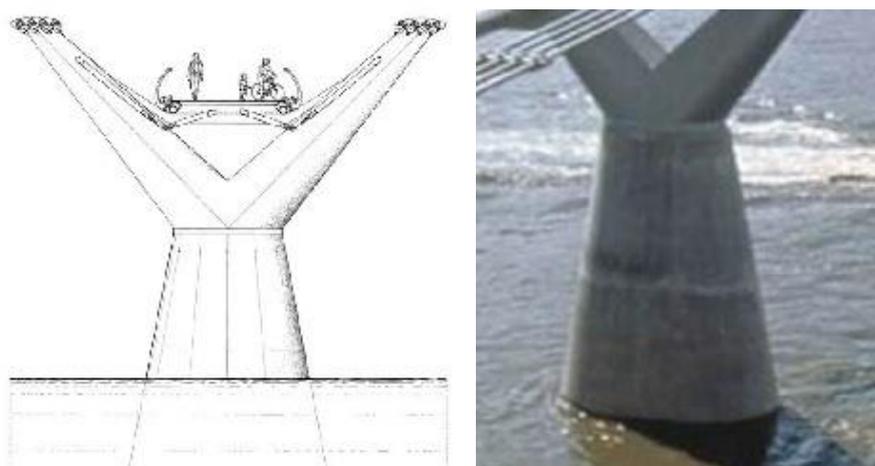
Figura 06 – Fundações da Ponte do Milênio: a) bandeja norte; b) bandeja sul; c) pilares centrais.



FONTE: Modificado de Arup, 2008.

Os pilares centrais têm ancoragem em aço ligada às estacas por duas paredes de concreto. Daí seguem para 12 pilares de concreto de 2mx28m. Duas armaduras em forma de Y suportam oito cabos que correm ao longo das laterais do deck prescrevem a funicular, ao longo de 4 metros do tabuleiro, enquanto braços transversais de aço se prendem aos cabos em intervalos de 8 metros para apoiar o próprio deck, Figura 07. A Parte dos pilares que se abre é oca, presa à base por barras de aço.

Figura 07 – Pilares centrais em Y.



FONTE: a) Pinterest, 2020; b) modificado de Arup, 2008

A estrutura metálica da ponte foi totalmente modulada. Segundo a ARUP (2008), essa modulação faz com que essas grandes estruturas sejam fabricadas em série, o que faz com que o preço seja mais barato, mesmo esta passarela chegando a cinquenta e cinco milhões de reais. A cada oito metros estão os braços da estrutura, que

distribuem os esforços do deck para os cabos de sustentação, Figura 08. Os cabos de Sustentação estão somente 2,3m acima do tabuleiro, mas, ainda assim, garantem a navegabilidade exigida no edital do concurso para a passarela.

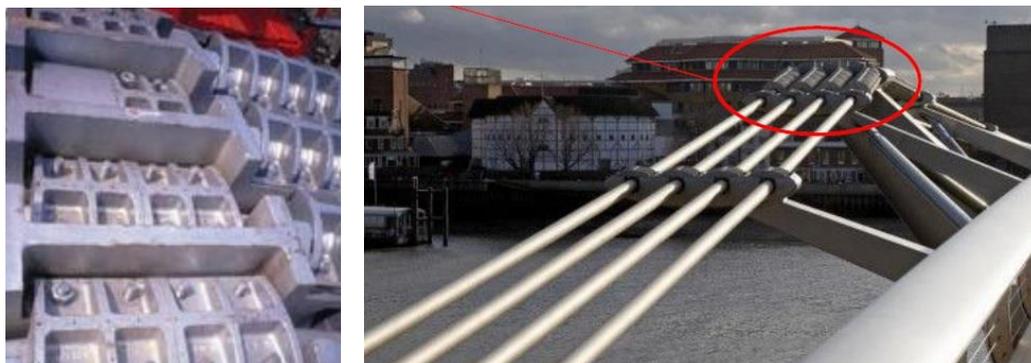
Figura 08 – Cabos nos braços do deck.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

Uma das partes importantes para a manutenção do funcionamento das pontes pênsis reside na tensão dos cabos de sustentação. Assim sendo, com o sistema inovador proposto a esse projeto, foram elaboradas conexões sustentam os cabos nos pilares centrais. São cruzados por parafusos para evitar que os cabos percam a tensão necessária, mantendo a rigidez necessária à ponte, Figura 09. De cada lado do tabuleiro existem 4 cabos tensionados que providenciam a rigidez por tração, tanto na vertical quanto horizontal. O guarda-corpo foi pensado em termos da melhor aerodinâmica para o esforço solicitante do vento.

Figura 09 – Conexão dos cabos.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

O fenômeno da vibração lateral sincronizada e a imprevisibilidade da natureza do fenômeno

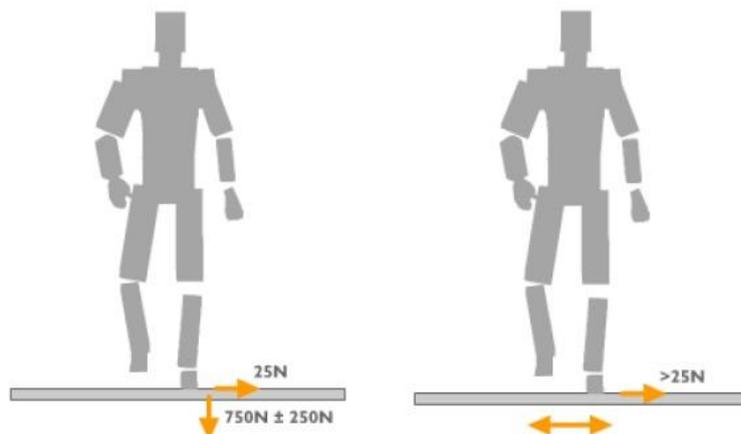
A ponte foi inaugurada em Junho do ano 2000, com a previsão em projeto da passagem de 80 a 100 mil pessoas. Porém, a ponte começou a vibrar excessivamente de forma imprevisível, promovendo uma deformação maior do que o considerado seguro. Situação de pânico à parte, para evitar danos à população e à estrutura, a ponte foi interditada imediatamente ficando por dois anos em estudo até a total solução do fenômeno. (ARUP, 2001)

Foram inúmeros os especialistas do mundo todo a colaborar para o entendimento do

fenômeno, sob responsabilidade da construtora. Fora um exaustivo e completo trabalho de pesquisa sobre o caminhar humano. Universidades foram consultadas e a pesquisa se tornou um processo de descoberta no meio acadêmico.

Primeiramente estudou-se o caminhar de uma pessoa. Ao analisá-lo, verificou-se a devida consideração do esforço vertical, inicialmente previsto no projeto. Porém, de acordo com o mesmo modelo, o esforço lateral de uma pessoa caminhando seria desprezível em relação aos esforços como um todo, Figura 10.

Figura 10 – Estudo do caminhar humano.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

Segundo os estudos da ARUP (2008), esses esforços horizontais do caminhar humano não seriam suficientes para causar o movimento causado no dia da inauguração. Porém, não contaram com a tendência natural humana quando reunida numa multidão: sincronizar o caminhar (!). Esse é o chamado “efeito de multidão” nunca antes observado com tal magnitude e, assim, tornou-se uma fonte autoexcitável da vibração excessiva da passarela porque, ao desequilibrar-se com a vibração, a multidão de pé empurra a ponte para voltar ao equilíbrio e, esta, responde com maior amplitude do movimento, em reação.

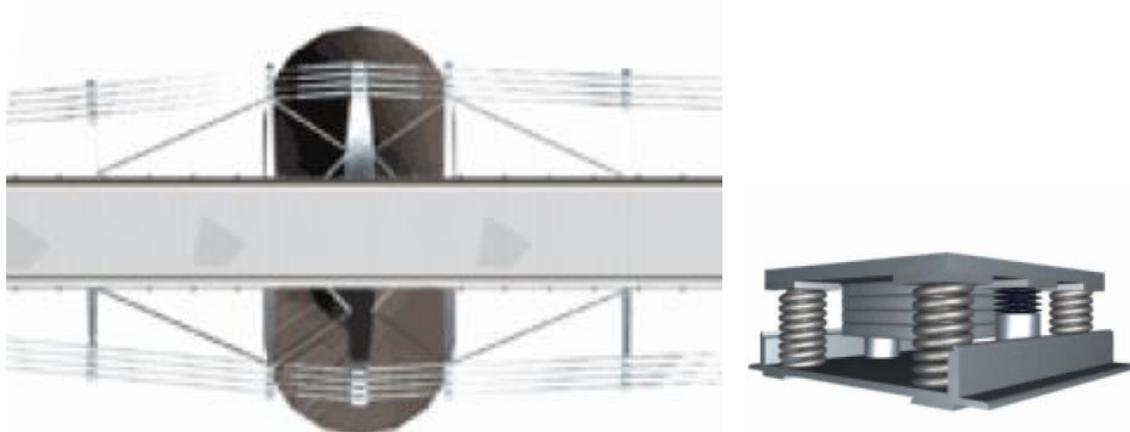
Solucionado o “mistério” da vibração lateral, o próximo passo do estudo seria realizar os testes com um número maior de pessoas andando ao mesmo tempo, inicialmente, registrados em laboratório. Com um resultado insuficiente para entender o efeito real, os testes passaram a ser realizados na própria ponte com instrumentos de medição instalados na ponte (ARUP, 2001). Assim pôde-se chegar a esse movimento lateral criado entre a ponte e os pedestres, chamado de Excitação Lateral Sincronizada e partir para as soluções para a esbeltez da estrutura.

Solução para a Excitação Lateral Sincronizada da Ponte do Milênio

Uma vez que a origem do problema fora conhecida, era o momento de encontrar uma solução. Para diminuir a oscilação lateral, poder-se-ia tomar dois caminhos: o primeiro, aumentar a rigidez da estrutura – porém, esta solução foi imediatamente descartada por alterar substancialmente a forma da passarela. O segundo, seria criar um mecanismo de amortecimento do movimento. Adotada pela construtora, o desafio passou a ser criar um sistema de amortecimento na estrutura que a impedisse de entrar em ressonância com os esforços laterais causados pelos pedestres mas sem gasto de energia que, de acordo com o edital, também seria premissa de projeto.

Portanto, sistemas de amortecedores passivos foram criados para estabilizar a ponte. O primeiro, Figura 11, chamado de amortecedor de movimento vertical, fora posicionado entre o deck e os braços e direciona os esforços do deck. Evitam a sincronização da oscilação, que libera a energia absorvida ao se comprimir e dilatar.

Figura 11 – Amortecedores viscosos.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

O segundo grupo de amortecedores, chamado amortecedor intermediário, fica por baixo do deck. Direcionam os esforços do deck para os outros amortecedores viscosos. Evita a sincronização da oscilação, que libera a energia absorvida ao se comprimir e dilatar, Figura 12.

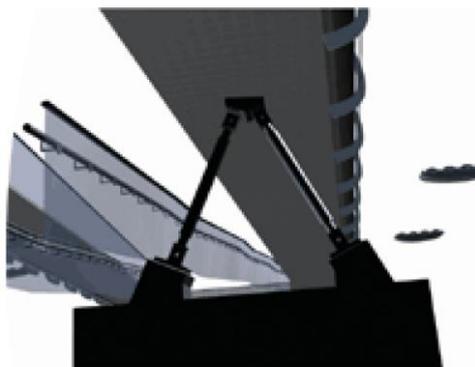
Figura 12 – Amortecedores viscosos.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

O terceiro grupo de amortecimento fica entre o deck e os pilares e um último entre a ponte e o solo na bandeja sul, Figura 13, e são responsáveis para a absorção dos esforços laterais advindos do efeito multidão.

Figura 13 – Amortecedores viscosos.



FONTE: Modificado de Arup, 2008

Conclusões finais da pesquisa realizada

Estudos desenvolvidos a partir do fenômeno denominado efeito de multidão não estudados até o ano 2000 demonstram a clara necessidade da abordagem dinâmica das estruturas cujo comportamento sai do que é estabelecido em padrões e normas conservadoras. Esse movimento oscilatório não é específico da Ponte do Milênio mas pode acontecer em qualquer passarela de pedestres. Foi importante, à época, a empresa construtora abrir caminho das discussões e em conjunto com a comunidade científica exaurir as possibilidades para garantir a segurança urbana e estrutural.

Amortecimentos passivos e corretamente posicionados possibilitaram a manutenção formal e a economia da matriz energética do planeta. Corroborou para o diálogo da Engenharia Estrutural e outros campos de conhecimento, como foi o caso, até mesmo da Psicologia envolvida no fenômeno.

Referências Bibliográficas

ARUP, Ove. Millenium Bridge. Disponível em <<http://info.arup.com/millenniumbridge/>>. Acesso em maio/2008.

Cloudfront. Disponível em <<https://d32dm0rphc51dk.cloudfront.net/cbU1ZOpATGj99kRy9rZkkQ/large.jpg>>. Acesso em abril/2008.

FOLHA DE SÃO PAULO. São Paulo: Grupo Folha, [2000]. Ponte é o novo fiasco do milênio britânico. Disponível em <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/mundo/ft1506200011.htm>>. Acesso em maio/2008.

Fostner & Partner. Millenium Bridge. Disponível em <<http://www.fosterandpartners.com/Projects/0953/Default.aspx>>. Acesso em maio/2008.

Google Earth. Disponível em <<http://earth.google.com/>>. Acesso em julho/2020.

Itinari. Disponível em <<https://img.itinari.com/activity/images/original/8b0ddd74-53cc-4688-84f0-1a6c56501504-istock-133543909.jpg?ch=DPR&dpr=1&w=1200&h=800&s=2a3f9fb40160e2071b0670924dbaf799>>. Acesso em abril/2008.

Locationscout net. Disponível em <https://img.locationscout.net/images/2016-10/millennium-bridge-and-tate-modern-united-kingdom_l.jpeg>. Acesso em abril/2008.

Morgenthal. Disponível em <www.morgenthal.org/bridges.html>. Acesso em abril/2008.

Pintrest. Disponível em <https://www.pinterest.co.uk/pin/56928382781682898/?nic_v2=1a1h2lgfd>. Acesso em maio/2020.

Researchgate. Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-overview-London-Millennium-Bridge-1_fig5_301790332>. Acesso em abril/2008.