

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PONTES RELACIONADO À EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS ESTRUTURAS

Elisabeth Penner¹; Carolina Michalszyszyn²; Júlia Cristina Sieiro³

Resumo

As pontes surgiram da necessidade do homem de ultrapassar barreiras naturais para buscar alimento, abrigo e passaram por diversas mudanças de materiais, de sistemas construtivos e estruturais ao longo dos anos. Antigamente, desde a época das pontes romanas, o estudo das pontes era muito precário e seus sistemas eram superdimensionados, pois eram estruturas rígidas e robustas. O conhecimento acerca de pontes evoluiu junto com o crescimento da Engenharia Civil e da sociedade e, atualmente, os sistemas estruturais de pontes são cada vez mais desafiadores. Neste trabalho, para a comparação da evolução arquitetônica e estrutural entre as antigas e as modernas pontes foi utilizada a frequência natural de vibração como variável de controle de seis modelos de pontes escolhidos, de acordo com o vão e com o material, a saber: pedra, ferro fundido, madeira, concreto armado e protendido e aço.

Palavras-Chave: pontes, sistemas estruturais e frequência natural de vibração.

Abstract

Bridges have appeared due to the necessity of man to overcome natural barriers to look for food and shelter, they went through several changes of materials, construction and structural systems over the years. Historically, since the days of Romans bridges, the study of bridges was very precarious, and their systems were over dimensioned, therefore they were rigid structures. The knowledge about bridges evolved along with the growth of Civil Engineering and society, and, currently, the structural systems of bridges are increasingly challenging. For the comparison of the architectonic and structural evolution between the modern and old bridges, the present work used the natural frequency of vibration as variable control of six models of chosen bridges, according to the will and the material (stone, cast iron, wood, reinforced concrete, prestressed concrete and steel).

Keywords: bridges, structural systems and natural frequency of vibration.

Introdução

As pontes mais antigas eram construídas utilizando-se materiais naturais como a madeira e pedras. As pontes de pedras se tornavam estruturas mais robustas e pesadas, o que dificultava a transposição de grandes vãos. Com a Revolução Industrial, a Europa torna-se pioneira na construção de pontes, e passa a utilizar o ferro fundido e forjado. Após a segunda guerra mundial, o concreto protendido teve grande utilização na reconstrução da Europa, enquanto era utilizado largamente nas Américas.

¹Doutora em Engenharia Civil-USP, professora do curso de Engenharia Civil da UTFPR. E-mail: epenner@utfpr.edu.br.

² Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR. E-mail: carolina_mich@hotmail.com.

³ Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR. E-mail: julia.sieiro@gmail.com.

Atualmente, as pontes estão presentes entre as maiores estruturas construídas pela Engenharia Civil, e com suas estruturas imponentes, alcançam reconhecimento não só pelas inovações construtivas, mas também por possibilitar a conexão entre dois pontos separados por rios, vales ou demais obstáculos.

O presente estudo tem por objetivo a análise da relação entre a frequência natural de vibração obtida por meio da modelagem numérica e a frequência natural esperada. Esta análise baseia-se no estudo das propriedades dos materiais de construção, dos sistemas estruturais das pontes e das características da época em que ela foi construída.

1 Motivação

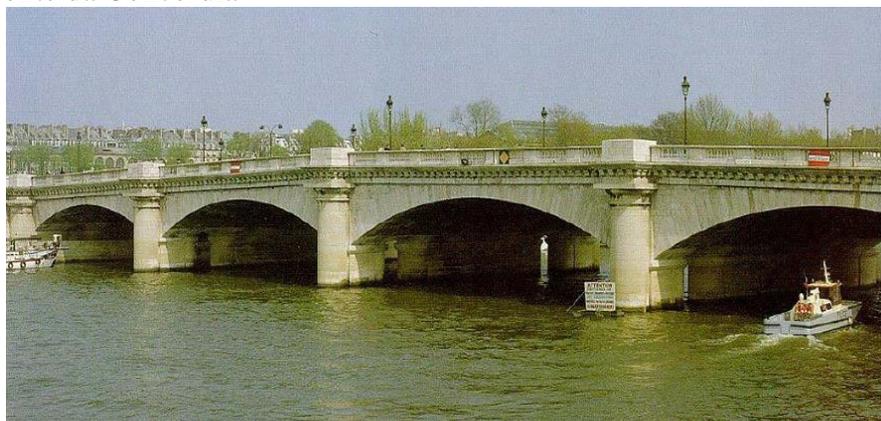
Os estudos anteriores referentes às pontes mais antigas avaliam apenas os sistemas estruturais e construtivos, sem levar em consideração os motivos que levaram cada método evoluir. Frente a essa pouca abordagem, o presente trabalho se justifica com a necessidade de um estudo histórico dos sistemas estruturais de pontes, relacionado com a evolução dos materiais, dos sistemas estruturais, da tecnologia de construção de pontes, de novas teorias de cálculo e das ferramentas computacionais disponíveis (MICHALSZYSZYN; SIEIRO, 2008).

2 Informações básicas sobre as pontes analisadas

2.1 Ponte de pedra – Ponte da Concórdia

A Ponte da Concórdia representa uma grande realização da Engenharia. Constituída por cinco arcos que aumentam de comprimento em direção ao arco médio, a ponte foi a primeira a ter o parapeito aberto, com balaústres, e não maciço como era construído até então. Foi um dos trabalhos finais de Jean Rodolphe Perronet e foi construída entre 1787 e 1791.

Figura 1 - Ponte da Concórdia



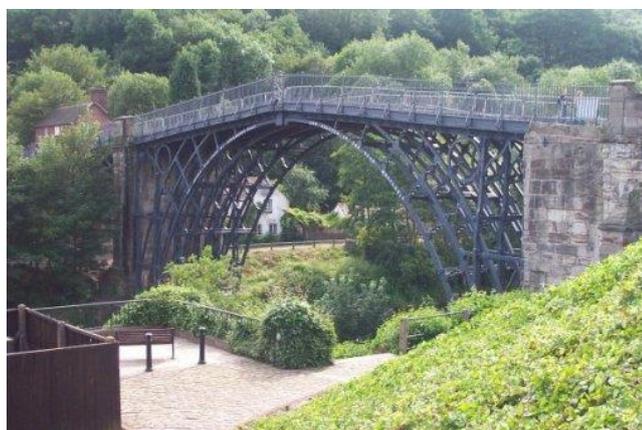
Fonte: www.dec.fct.unl.pt

A ponte, que pode ser vista na figura 1, tem comprimento total de 153 m e é formada por 5 arcos (25 m, 28 m, 31 m, 28 m e 25 m). Foram construídos andaimes para todos os arcos que foram construídos ao mesmo tempo. Para a construção foram utilizadas pedras da prisão da Bastilha. (LEONHARDT, 1979)

2.2 Ponte de ferro fundido – Ponte Coalbrookdale

A ponte Coalbrookdale, também conhecida como *Ironbridge* e ilustrada na figura 2, foi construída por Abrahan Darby III em 1779 e foi a primeira ponte construída em ferro fundido. Seu projeto foi feito pelo arquiteto Thomas Pritchard.

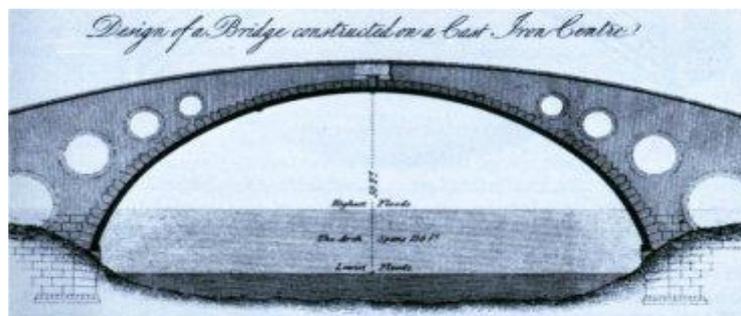
Figura 2 - Ponte de Coalbrookdale



Fonte: Lindenberg Neto (2006).

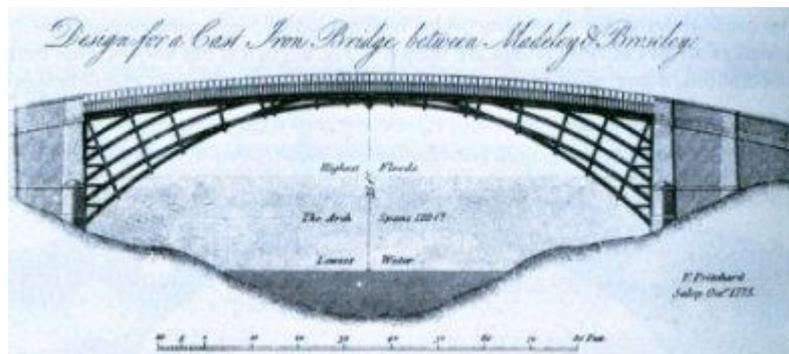
O projeto da ponte Coalbrookdale foi alterado diversas vezes. A primeira configuração, vista na figura 3, descrevia um arco em alvenaria escorado permanentemente por um arco de ferro fundido. A segunda configuração apresenta apenas um arco constituído apenas por ferro fundido, como mostrado na figura 4. A versão final possui cinco arcos semicirculares de ferro fundido (LINDENBERG NETO, 2006)

Figura 3 - Primeira configuração da Ponte de Coalbrookdale



Fonte: Lindenberg Neto (2006).

Figura 4 - Segunda configuração da Ponte de Coalbrookdale



Fonte: Ekeberg; Soyland (2005).

Ainda segundo Lindenberg Neto (2006), os arcos da ponte eram produzidos separados na fundição, na cidade de Coalbrookdale, e transportados pelo rio até o local onde se localizava a ponte, onde eram definitivamente moldados. Como o ferro fundido era um material novo, não se tinha nenhum conhecimento sobre as suas propriedades. Em 1779 dois arcos foram retirados e reforçados, e só após este reforço a ponte foi considerada acabada. A ponte foi projetada com um coeficiente de segurança elevado, representando um verdadeiro exagero, pois uma ponte de ferro gera esforços horizontais bem menores que uma ponte de pedra, sendo assim o talude não recebeu as cargas de compressão que haviam sido previstas e realizaram um movimento na ponte, elevando o cume do arco e danificando a estrutura. A Ponte Coalbrookdale tem um vão de 30 m e atualmente é considerada um monumento nacional britânico.

2.3 Ponte de madeira - Ponte Flisa

Segundo Ekeberg e Soyland (2005), a Ponte Flisa, inaugurada em junho de 2003 é atualmente a ponte de madeira mais longa, com comprimento de 196 m e vão entre os pilares de 70,34 m. Foram realizados estudos na fundação da antiga ponte e foi constatado que ela poderia ser aproveitada para a construção da nova ponte, que foi construída com madeira laminada colada.

A Ponte Flisa faz parte da Rede Nacional de Estradas da Noruega e foi projetada de acordo com as cargas de tráfego nacional norueguês para ter vida útil de 100 anos. A ponte foi analisada por um programa de estruturas tridimensional e para isso foi feito um modelo com 1100 elementos (EKEBERG E SOYLAND, 2005).

De acordo com os autores a Ponte Flisa é um marco mundial para as estruturas de madeira, pois foi possível provar que a madeira é um material resistente e durável. Nas figuras 5, 6 e 7 pode-se observar a Ponte Flisa.

Figura 5 - Ponte Elisa



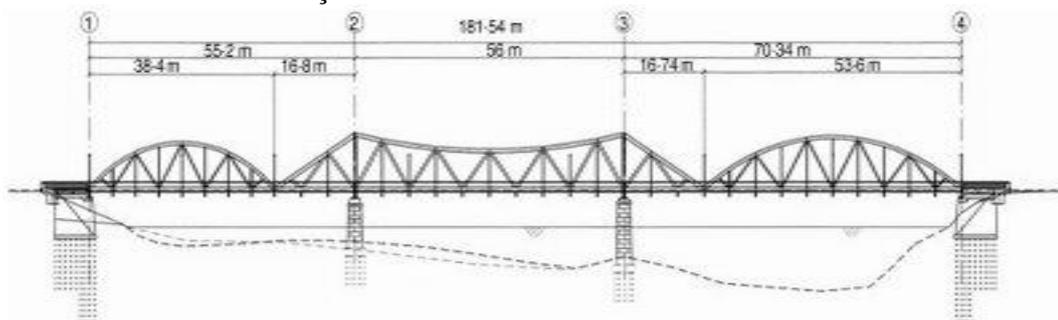
Fonte: Ekeberg; Soyland (2005).

Figura 6 - Ponte Flisa / Vista Frontal



Fonte: Ekeberg; Soyland (2005).

Figura 7 - Ponte Flisa / Elevação



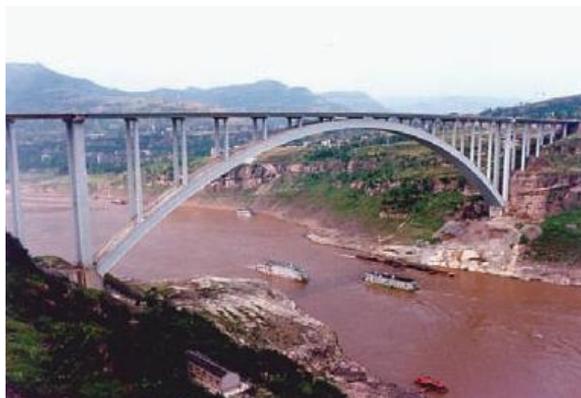
Fonte: Ekeberg; Soyland (2005).

2.4 Ponte de concreto armado / Ponte Wanxian

De acordo com Xie (2008), após a construção da Represa dos Três Desfiladeiros e grande crescimento econômico da região foi necessária a construção da Ponte Wanxian sobre o Rio Yangtze. Para a construção da ponte foi utilizado concreto armado para evitar pilares extremamente altos e submersos. Durante o projeto foram analisados vários tipos de

estruturas, vãos e materiais, o arco de concreto armado foi um desafio para os desenhistas e engenheiros. Para a construção, primeiramente foi instalada a armadura, que foi dividida em 36 partes, cada uma com 60 toneladas. O concreto foi lançado e depois foram construídas as estruturas de sustentação. A ponte tem um vão de 420 m e foi inaugurada em junho de 1997, depois de três anos de construção (XIE, 2008) Na figura 8 pode-se observar a Ponte Wanxian.

Figura 8 - Ponte Wanxian



Fonte: Xie (2008).

2.5 Ponte de concreto protendido - Ponte da Normandia

A ponte da Normandia, que pode ser vista na figura 9, encontra-se na foz do Rio Sena entre Honfleur e Le Havre e segundo Lindenberg Neto (2006), representou um grande avanço para a construção de pontes estaiadas. A ponte foi concluída em 1995 e tem a finalidade de aliviar o tráfego da Ponte Tancarville e facilitar o acesso ao porto de Le Havre.

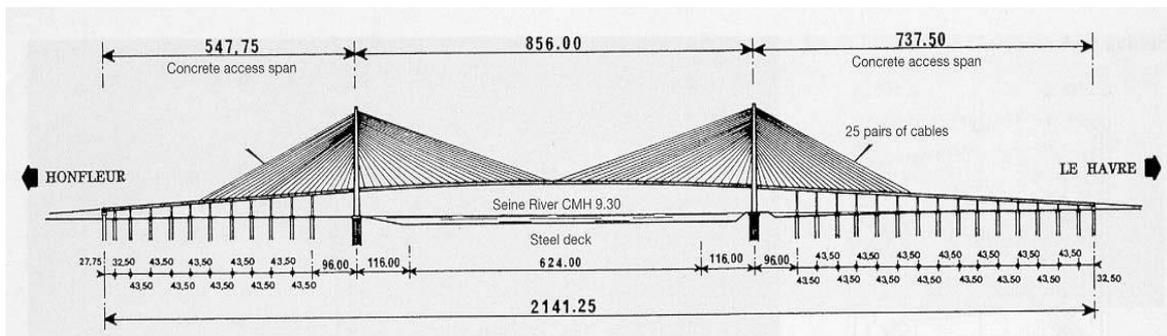
Figura 9 - Ponte da Normandia



Fonte: Lindenberg Neto(2006).

Após anos de estudos, Michel Virlogeux chegou à conclusão de que a ponte deveria ser estaiada, com 2141m de comprimento total e vão central de 856m apoiado em duas torres em forma de Y invertido com 215m de altura. Na figura 10 pode-se observar um esquema da ponte.

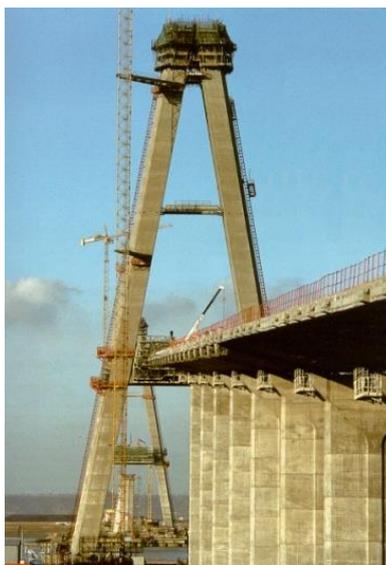
Figura 10 - Esquema da Ponte da Normandia



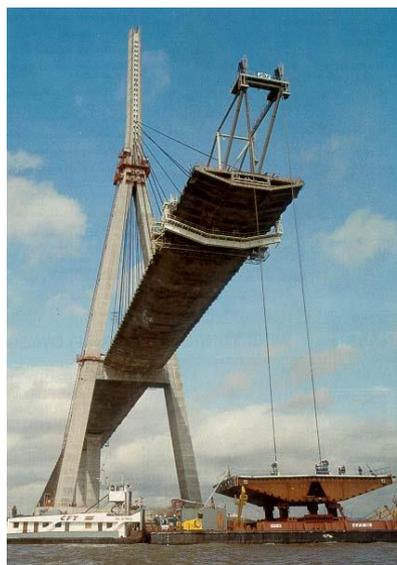
Fonte: Lindenberg Neto (2006).

Segundo Lindenberg Neto (2006), o tabuleiro é uma estrutura híbrida, na qual os 624m centrais são construídos em aço e os 116m de cada extremidade são de concreto protendido. A construção da ponte pode ser vista na figura 11.

Figura 11 - Construção da Ponte da Normandia:



a)



b)

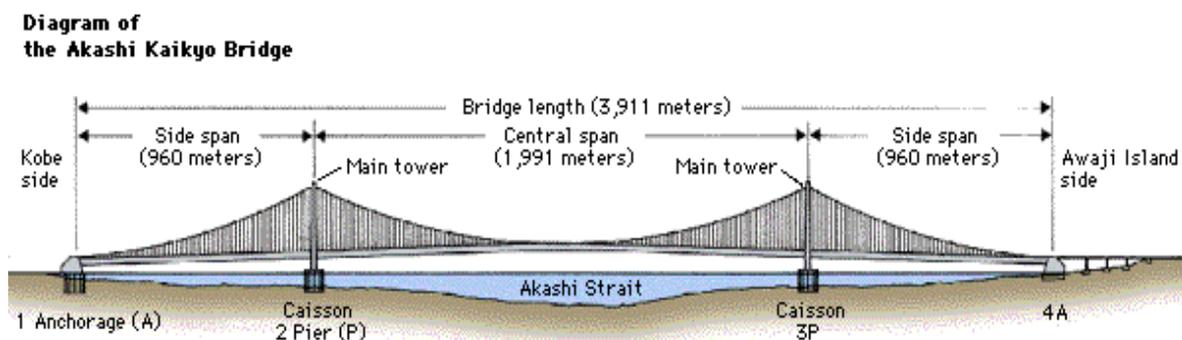
Fonte: Lindenberg Neto (2006).

A Ponte da Normandia passou por três testes reais, no primeiro observou-se os deslocamentos verticais, no segundo foi provocada uma vibração vertical causada por um cabo amarrado a um barco. No último teste o deslocamento foi horizontal, também tracionado por um barco (LINDENBERG, 2006).

2.6 Ponte de aço - Ponte Akashi-Kaikyo

A ponte Akashi-Kaikyo, localiza-se no estreito de Akashi, entre a cidade de Kobe e a Ilha Awaji e tem o objetivo de estimular o intercâmbio cultural e estimular o crescimento econômico do oeste japonês. Segundo Lindenberg Neto (2006), a obra representou um desafio para a engenharia, pois a região possui fortes correntes, grande profundidade, mau tempo e riscos de terremotos e furacões. Concluída em 1998, a ponte possui 3911m de comprimento total e 1991m de vão central, que pode ser visto nas figuras 12 e 13.

Figura 12 - Esquema da Ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: Lindenberg Neto (2006).

Figura 13 - Ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: Lindenberg Neto (2006).

De acordo com Lindenberg Neto (2006), foi escolhido para esta ponte um tabuleiro treliçado para proporcionar rigidez à ponte e impor baixa resistência à passagem do vento, foram instaladas placas estabilizadoras para direcionar o vento reduzindo assim a torção do tabuleiro. Em maio de 1988 iniciou-se a construção dos dois caixões de concreto armado com 80m de diâmetro. Em abril de 1992, as torres de aço começaram a ser levantadas com a ajuda

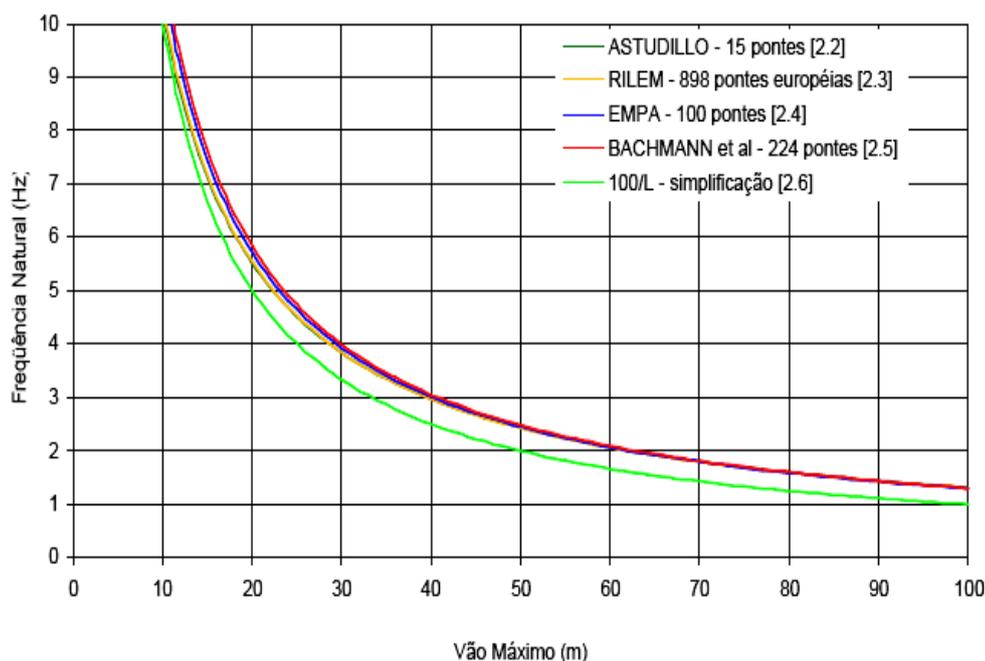
de guindastes, cada torre é formada por 30 segmentos. Os cabos são formados por 290 feixes, cada um com 127 fios de aço galvanizado de alta resistência à tração.

3 Procedimentos metodológicos

Para a realização deste estudo empregou-se o *software* SAP 2000, onde foram feitas modelagens numéricas de cada uma das seis pontes descritas no capítulo 3. Apenas os resultados referentes às vibrações livres foram considerados. A partir da análise dos modelos no SAP 2000, os valores considerados para o estudo foram os valores obtidos para a frequência natural de vibração correspondente à participação de massa no eixo vertical (z).

Como valores esperados foi empregado o gráfico da figura 14 que representa diferentes curvas que relacionam o máximo vão e a frequência natural de vibração, independente da geometria ou do material. Percebe-se uma mesma tendência de todas as curvas.

Figura 14 - Gráfico relacionando vão máximo e frequência natural



Fonte: Penner (2001).

A partir da comparação entre os valores obtidos, os valores esperados e as características da ponte foram feitas a análise de resultados e as conclusões finais do estudo.

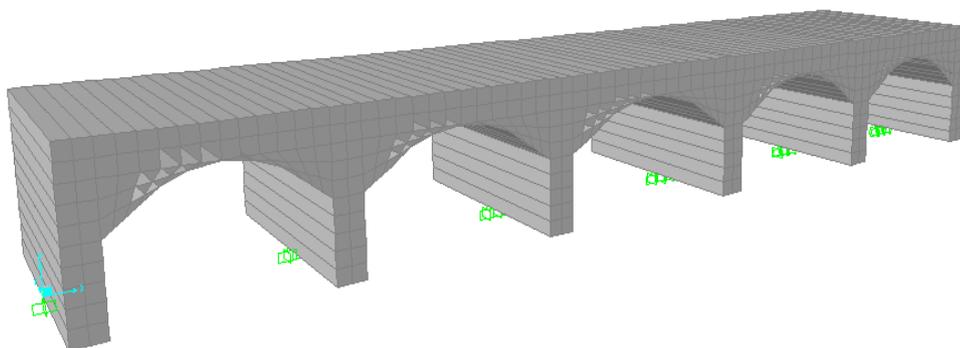
4 Modelagem e análise das estruturas

As propriedades dos materiais tais como resistências, módulo de elasticidade e peso específico para cada uma das pontes foi considerado de acordo com valores usuais obtidos na literatura clássica.

4.1 Ponte da Concórdia - pedra

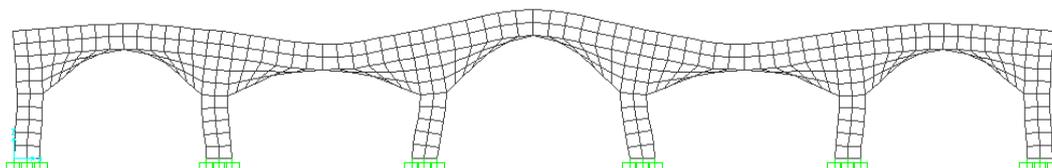
A Ponte da Concórdia foi modelada utilizando-se apenas elementos de casca. Baseada em observações de diversas vistas da ponte a dimensão dos pilares foi estimada e sua base considerada engastada. Considerou-se também uma altura maior para representar a parte submersa da ponte. Na figura 15 pode-se observar a vista tridimensional da ponte modelada, com 390 elementos e na figura 16 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 15 - Modelo 3D / Ponte da Concórdia



Fonte: As autoras (2018).

Figura 16 - Modo de vibração da Ponte da Concórdia

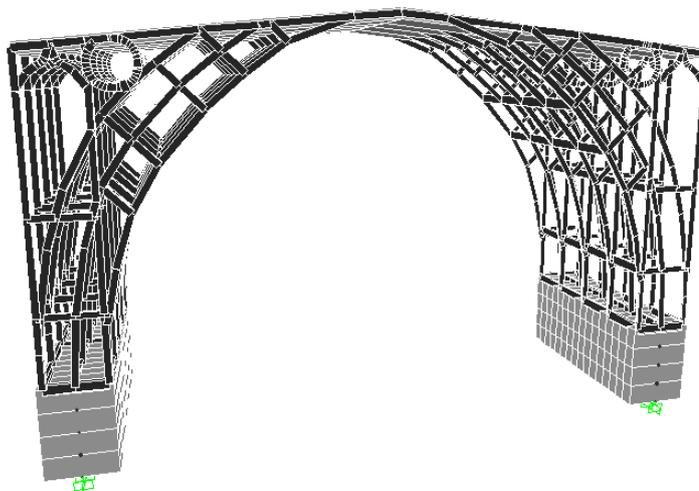


Fonte: As autoras (2018).

4.2 Ponte Coalbrookdale – ferro fundido

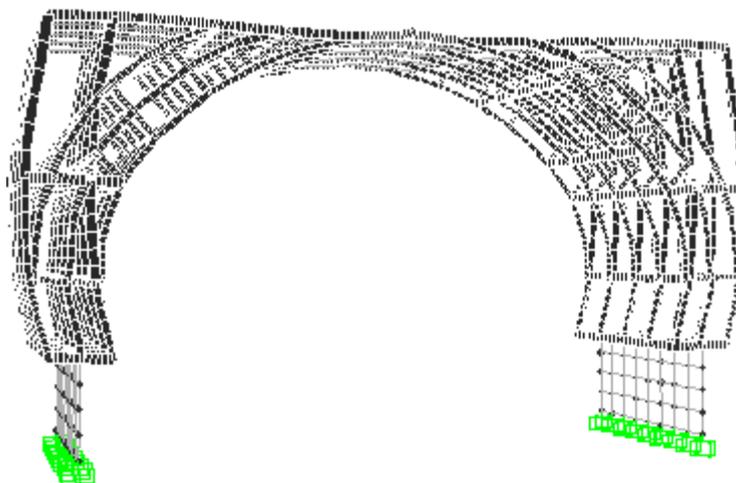
Os arcos da ponte Coalbrookdale foram modelados com elementos de barra, com as dimensões da seção transversal estimadas por observação nas vistas da ponte. Foram feitos cinco arcos igualmente espaçados, travados entre si e ligados ao tabuleiro de concreto, apoiados em pilares curtos e engastados de concreto. Tanto o pilar quanto o tabuleiro são elementos de casca. No total foram utilizados 984 elementos, sendo 728 de barra e 256 de casca. O modelo da ponte pode ser visto na figura 17 e na figura 18 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 17 - Modelo – Ponte Coalbrookdale



Fonte: As autoras (2018).

Figura 18 - Modo de vibração da Ponte Coalbrookdale



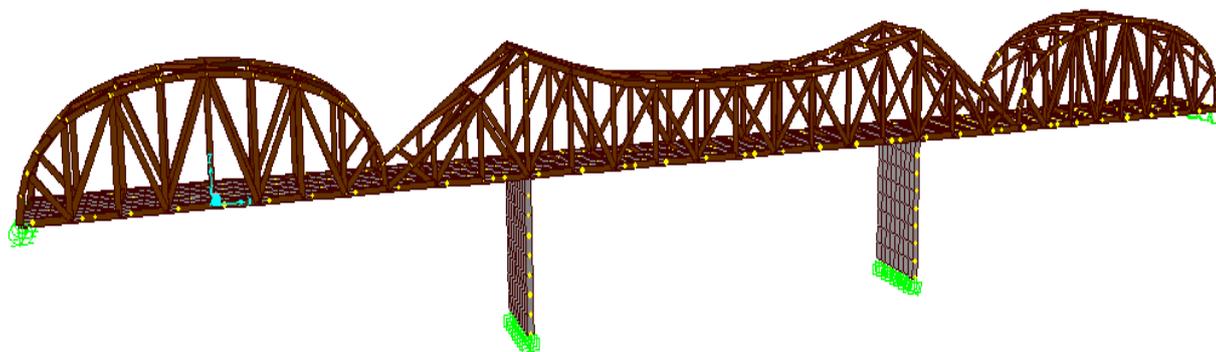
Fonte: As autoras (2018).

4.3 Ponte Flisa - madeira

A modelagem da ponte Flisa foi elaborada com a combinação de elementos de barra e casca. Nos pilares e no tabuleiro utilizou-se elementos de casca, sendo o pilar em concreto armado. As treliças foram modeladas com elementos de barra com a área da seção transversal estimada com base na pesquisa e observação de fotos da ponte. As dimensões da ponte foram obtidas por meio do esquema de elevação, conforme ilustra a figura 7.

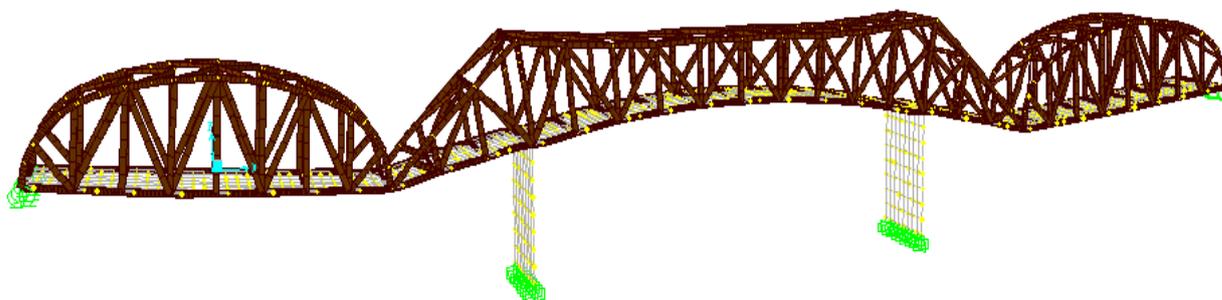
Na figura 19 pode-se observar a vista tridimensional do modelo da ponte, constituída por 1650 elementos e na figura 19 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 19 - Modelo – Ponte Flisa



Fonte: As autoras (2018).

Figura 20 - Modo de vibração da Ponte Flisa

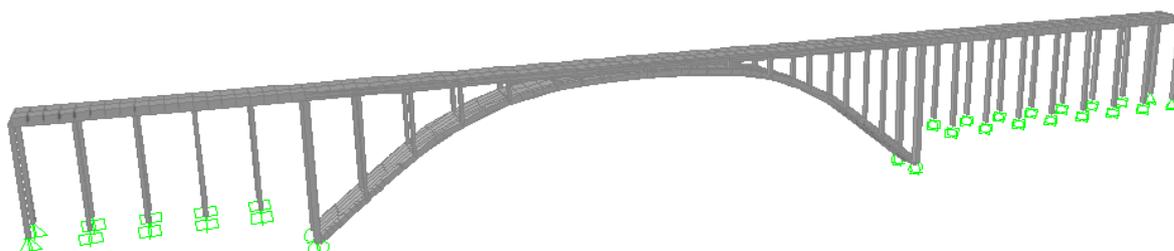


Fonte: As autoras (2018).

4.4 Ponte Wanxian – concreto armado

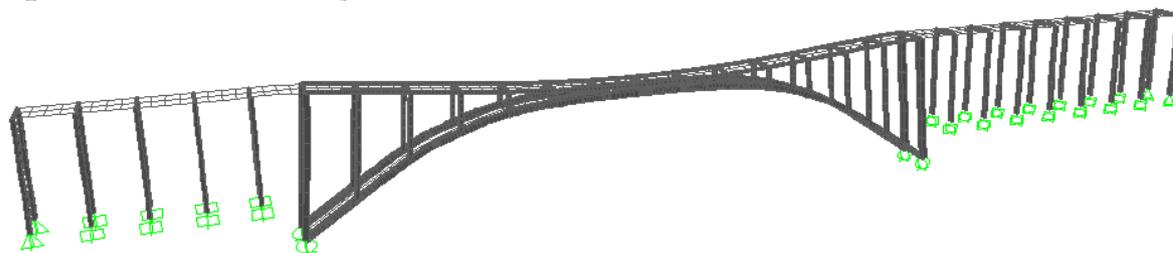
A ponte Wanxian foi dimensionada com o tabuleiro e o arco em elementos de casca e os pilares em elementos de barra, totalizando 596 elementos. As dimensões da ponte foram baseadas no esquema apresentado na figura 8. Na figura 21 pode-se observar a ponte modelada, bem como seus apoios e na figura 22 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 21 - Modelo Ponte Wanxian



Fonte: As autoras (2018).

Figura 21 - Modo de vibração da Ponte Wanxian

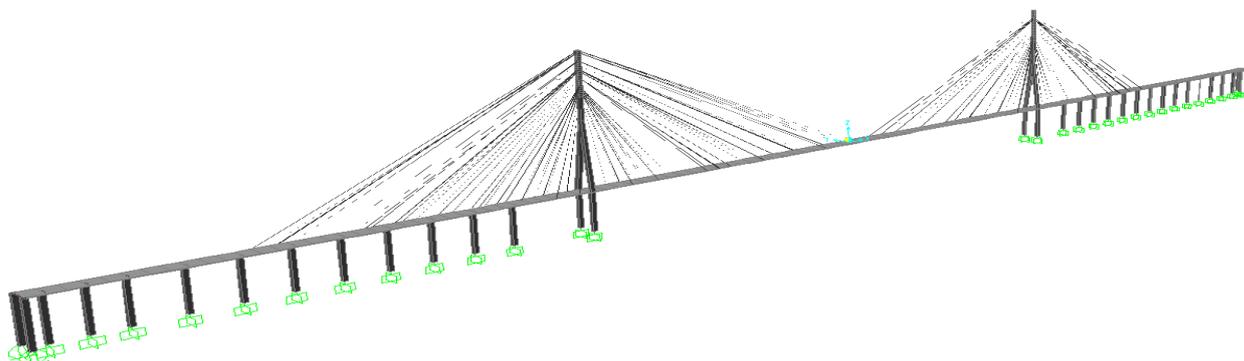


Fonte: As autoras (2018).

2.5 Ponte da Normandia – concreto protendido

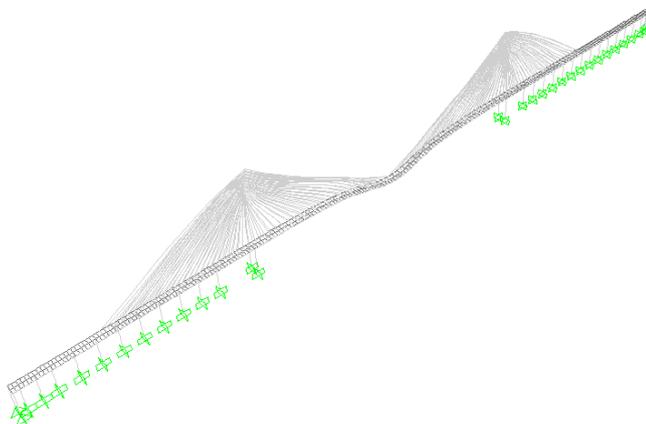
A ponte da Normandia foi modelada utilizando-se 1109 elementos, sendo de casca no tabuleiro e elementos de barra para a representação dos pilares e estais. Os pilares das extremidades foram considerados apoiados e os demais engastados. O modelo pode ser observado na figura 23 e na figura 24 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 23 - Modelo – Ponte da Normandia



Fonte: As autoras (2018).

Figura 24 - Modo de vibração da Ponte da Normandia

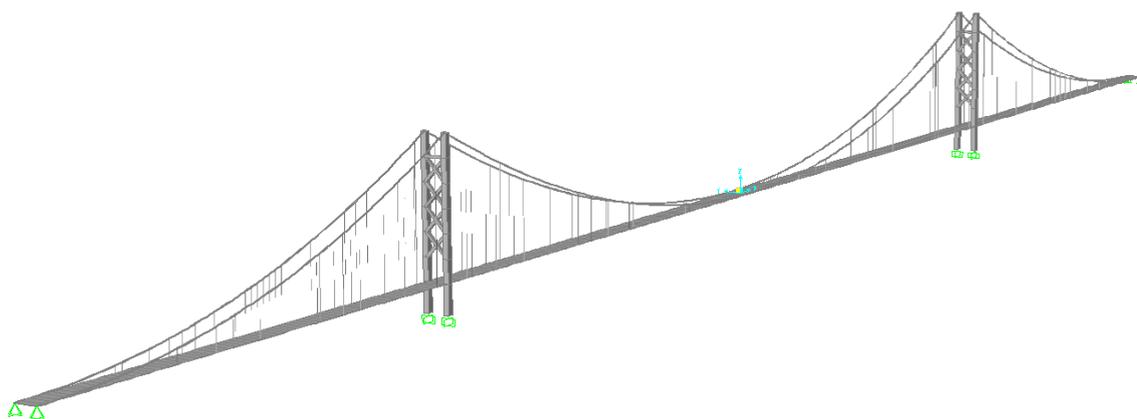


Fonte: As autoras(2018).

4.6 Ponte Akashi-Kaikyo - aço

A ponte Akashi-Kaikyo foi modelada utilizando-se o modelo de ponte pênsil disponível no *software* SAP 2000. Apenas foi acrescentada a treliça entre os pilares e as dimensões dos cabos foram alteradas com base na observação de imagens da ponte. Na figura 25 pode-se observar o modelo tridimensional elaborado, com 2233 elementos e na figura 26 pode-se observar o principal modo de vibração da ponte.

Figura 25 - Modelo – Ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: As autoras (2018).

Figura 26 - Modo de vibração da Ponte Akashi-Kaikyo



Fonte: As autoras (2018).

5 Resultados

Após a modelagem foi feita a análise das pontes no *software* SAP 2000 e foram obtidas as frequências naturais de vibração e a porcentagem de participação de massa no eixo vertical(z).

O intervalo de frequência natural de vibração esperado foi retirado do gráfico da figura 14. Os dados obtidos na análise podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 - Resultados obtidos pela análise computacional

| PONTE | TIPO | MAIOR VÃO (m) | MATERIAL | INTERVALO DE FREQUÊNCIA ESPERADO (Hz) * | FREQUÊNCIA NATURAL (Hz) | PARTICIPAÇÃO DE MASSA % (UZ) |
|----------------------|-----------|---------------|---------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| Concórdia (1791) | Arco | 31 | Pedra | 3,22 a 3,87 | 11,576 | 0,00643 |
| Coalbrookdale (1779) | Arco | 30 | Ferro Fundido | 3,33 a 3,99 | 3,418 | 0,2324 |
| Flisa (2003) | Treliçada | 70,34 | Madeira | 1,42 a 1,80 | 1,785 | 0,03548 |
| Wanxian (1997) | Arco | 420 | Concreto Armado | 0,24 a 0,36 | 0,325 | 0,48307 |
| Normandia (1995) | Estaiada | 856 | Concreto Protendido | 0,11 a 0,19 | 0,133 | 0,104 |
| Akashi-Kaikyo (1998) | Pênsil | 1991 | Aço | 0,05 a 0,09 | 0,086 | 0,1661 |

Fonte: Elaborada pelas autoras (2018).

*Valores do gráfico da figura 14

6 Análise dos resultados

A análise dos resultados foi feita em duas etapas. Primeiramente, foram analisados isoladamente os resultados de cada ponte (7.1 a 7.6) e depois foi feita a análise comparativa (7.7) entre elas.

6.1 Ponte da Concórdia - pedra

A frequência natural de vibração esperada para o vão, segundo a tabela 1, era de 3,22Hz a 3,87Hz. A frequência obtida foi muito acima da expectativa: 11,576Hz.

Os resultados encontrados para esta ponte condizem tanto com a rigidez do material quanto aos recursos disponíveis na época de sua construção (1791). Conforme visto no estudo evolutivo, a ponte foi construída num período em que a engenharia de pontes estava começando a evoluir e pode-se dizer que, pela falta de tecnologia para estudos e testes durante o projeto da ponte, esta foi superdimensionada, pois as solicitações dinâmicas eram muito baixas, ou sequer inexistentes se comparadas ao volume da estrutura. A isso, acrescenta-se o fato de que a pedra é um material bastante rígido, conferindo à ponte um aspecto pouco esbelto.

Outro fator que pode ter contribuído para a obtenção de um valor de frequência muito alto, foi a utilização de elementos de casca para a modelagem da ponte. Se a modelagem fosse feita com elementos sólidos, o resultado se aproximaria do intervalo esperado.

6.2 Ponte Coalbrookdale – ferro fundido

De acordo com a curva da figura 14, a frequência esperada para o vão de 30m era entre 3,33Hz a 3,99Hz. O valor encontrado foi 3,428Hz, conforme o esperado.

O que assegurou esse resultado foi a esbeltes da ponte, pois o ferro é um material bastante rígido, e o fato dela ter sido dimensionada com cinco arcos finos e espaçados garantiu que a frequência natural de vibração estivesse entre o intervalo esperado.

Destaca-se que essa foi a primeira ponte construída em ferro fundido (1779), um material até então desconhecido, de acordo com o que foi estudado anteriormente. Para seu projeto, foram utilizadas técnicas empregadas em materiais já utilizados, principalmente a pedra e a madeira. O peso da estrutura foi considerado menor que o peso da pedra, mas não foi previsto que as ações da ponte de ferro no talude seriam menores, fazendo com que a reação do talude causasse a deformação da estrutura. Apesar dos erros de dimensionamento, a ponte resistiu até os dias de hoje, pois a região deixou de ser um pólo industrial, e as solicitações causadas pelo tráfego sobre a ponte diminuiram. Mas, por muito tempo, ela foi considerada insegura e teve que passar por reforços em dois arcos.

6.3 Ponte Flisa - madeira

Os resultados esperados para a ponte Flisa eram entre 1,42 a 1,80Hz, e o resultado obtido foi 1,785 Hz.

Nesse estudo, é a ponte mais recente (2003), e representa um marco na utilização de madeira na construção de pontes. A madeira é um material pouco rígido se comparado com o aço e sua utilização como principal material na estrutura de pontes não é muito empregado, com exceção de pequenas pontes e passarelas para pedestres, por motivo de preconceito em relação ao seu uso em estruturas.

A ponte Flisa mostra um desempenho surpreendente se comparado a outras pontes de outros materiais. Foi projetada para ter vida útil de 100 anos de serviço, com o mínimo de manutenção requerida, a madeira utilizada é de boa qualidade para suportar intempéries da região, principalmente as baixas temperaturas e a neve.

6.4 Ponte Wanxian – concreto armado

A frequência de 0,325Hz obtida ficou entre o intervalo esperado de 0,24 a 0,36Hz para um vão 420m. O concreto armado é um material menos rígido se comparado ao aço e à pedra, por isso tende a vibrar mais.

A configuração da ponte foi escolhida para evitar a utilização de fundação submersa, e sua construção, mesmo sendo recente (1997), trouxe grandes inovações na técnica da utilização de concreto armado em estruturas em arco, por o vão ser extenso e o concreto não apresentar grande rigidez.

6.5 Ponte Normandia – concreto protendido

A frequência natural de 0,133Hz encontra-se dentro do intervalo esperado de 0,11 a 0,19Hz para o vão de 856m. A configuração de uma ponte estaiada é bastante esbelta, e o concreto, material utilizado na construção da Normandia, concluída em 1995, não pode ser considerado um material muito rígido, mas a utilização conjunta de aço garantiu como resultado final um tabuleiro inovador, que uniu leveza e rigidez.

6.6 Ponte Akashi – Kaikyo - aço

A frequência esperada para o vão de 1991m da ponte pênsil era de 0,05Hz a 0,09Hz, intervalo no qual está a frequência encontrada de 0,086Hz.

Por ser um vão muito grande e a ponte muito esbelta, a rigidez foi assegurada pelo uso do aço como material de construção. Para conter a ação dos ventos em uma região sujeita à fenômenos naturais como tufões e furacões, foi escolhido um tabuleiro treliçado, pois este sistema permite a passagem de vento.

A ponte Akashi-Kaikyo, concluída em 1998, representa um grande conquista da engenharia, tanto pelo seu tamanho, quanto pelas rigorosas condições da região. Ressalta-se que a ponte resistiu a um forte terremoto durante sua construção, sem grandes riscos, apenas houve um afastamento de 1m entre os pilares.

6.7 Análise comparativa

A combinação da rigidez do material com a esbeltes da estrutura é que determinou os valores de frequência, fato que justifica que a Akashi-Kaikyo, construída com aço, o material mais rígido, apresente a menor frequência.

Em contrapartida, o único valor que extrapolou o intervalo esperado para o vão existente, foi a ponte Concórdia. Como a pedra é um material bastante rígido e a estrutura era pouco esbelta, sua frequência não teria como ser baixa. Esta ponte e a Coalbrookdale apresentam vãos similares, e as frequências esperadas eram muito próximas. Por serem materiais de rigidez muito parecida, o fator que pode ter influenciado na grande diferença da

frequência dos modelos é a esbeltez das pontes. A ponte de pedra, com largura maior, era toda maciça e a ponte de ferro é constituída por cinco arcos finos e espaçados, conferindo certa esbeltez ao sistema. As duas pontes foram construídas basicamente na mesma época.

As pontes Flisa, Wanxian, Normandia e Akashi Kaikyo, por serem modernas, contam com avançados métodos de ensaios e programas computacionais para auxiliar os projetistas na determinação das dimensões da estrutura e das propriedades dinâmicas. É possível assegurar que a estrutura seja segura sendo a mais econômica possível, combinando a rigidez do material com a esbeltez da ponte, garantindo que as vibrações não extrapolem os valores esperados e não causem incômodos e desconfortos aos seus usuários.

7 Conclusões

Após um estudo inicial sobre pontes pode-se observar a grande evolução sofrida por suas técnicas e materiais. A evolução na construção das pontes mostra o grande desenvolvimento sofrido pela humanidade, pode-se ver que em cada época utilizou-se um tipo de tecnologia, compatível com o material existente. Os sistemas estruturais foram surgindo de acordo com o crescimento dos conhecimentos técnicos das civilizações antigas e foram modificando-se para acompanhar o crescimento das cidades, o surgimento das locomotivas e as estradas de ferro surgidas na Revolução Industrial. A partir dessa época, grandes construtores tiveram destaques e a construção das pontes tornou-se mais aperfeiçoada com o uso do ferro, aço e concreto.

Com a análise baseada na modelagem numérica ficou claro que as pontes mais antigas eram superdimensionadas para as solicitações que sofriam, uma vez que na época não existia tecnologia de novos materiais e nem metodologias de cálculo. Como a vibração vertical é, basicamente, causada pela ação dos veículos e, antigamente, os meios de transporte eram escassos, raramente pontes como as romanas, medievais e renascentistas sofreriam qualquer perturbação causada por vibrações durante seu uso.

Ressalta-se que para a modelagem das pontes não foram utilizados os projetos e, conseqüentemente, as medidas foram estimadas, bem como as condições de contorno. Mas, procurou-se utilizar as características mais próximas das reais possíveis e, analisando os resultados não houveram efeitos além do esperado.

Os resultados da análise final levam a conclusões sobre o desempenho das estruturas de pontes ao longo dos anos. Comparar-se duas estruturas com vãos tão distintos e construídas em épocas tão diferentes, como a ponte Concórdia (pedra) e a Akashi Kaikyo (aço) mostram

como a engenharia de pontes evoluiu com a descoberta de novos materiais e com o aprofundamento dos estudos, permitindo que as estruturas sejam mais eficientes e econômicas e, principalmente, funcionais.

Referências

EKEBERG, P. K.; SOYLAND, K. **Flisa Bridge, Norway – a record-breaking timber bridge**. 2005. Proceedings of the Institution of Civil Engineers.

LEONHARDT, F. **Construções de concreto, v.6**: Princípios básicos da construção de pontes de concreto. Tradução: João Luís Escosteguy Merino. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. 235 p.

LINDENBERG NETO, H. **Concepção, projeto e realização das estruturas**: Aspecto histórico. São Paulo, 2006. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Laboratório de Mecânica Computacional. Disponível em:

<http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/Estruturas/historia.htm> Acesso em novembro de 2007.

MICHALSZYSZYN, C.; SIEIRO, J. C. **Relação entre a evolução dos sistemas estruturais de pontes e o seu desempenho**. Trabalho de conclusão de curso do curso de engenharia de produção civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, 2008.

PENNER, E. **Avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto**. São Paulo, 2001. 185 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas.

XIE, B. **Wanxian Long Span Concrete Arch Bridge Over Yangtze River in China**. Brijung Islands: Institute of Highway Planning and Surveying of Sichuan, 2008. 8 p