VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas
21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO
COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI
Realização: ABECE ABPE IABSE

Desenvolvimento das Pontes Estaiadas

Vinícius Lopes Bastos [1], Thiago Souza Leite Cerqueira[2], Lucas Eduardo Alves Tachard[3]
Daniel de Souza Machado[4]
[1] **Engenheiro civil / lopesbastos@hotmail.com**
[2] **Engenheiro civil / thiagolsc10@hotmail.com**
[3] **Engenheiro civil / lucastachard@hotmail.com**
[4]**Dr. em engenharia civil / dsmmachadoeng@gmail.com**

Resumo

O presente artigo tem início com a apresentação de importantes aspectos históricos das pontes estaiadas, com o objetivo de ambientar o tema em questão antes de aprofundá-lo. Nesta etapa, são abordados: o início da utilização dos estais, registros dos primeiros projetos de pontes estaiadas e a grande disseminação deste tipo de ponte durante o período de reconstrução após a segunda guerra mundial. O contexto histórico também é apresentado em relação à situação deste tipo de ponte no cenário nacional. Na sequência abordam-se as considerações gerais e informações importantes a cerca da circunstância atual das pontes estaiadas. O trabalho tem prosseguimento com os aspectos conceituais relacionados aos principais elementos estruturais que compõem as pontes estaiadas. No tópico desenvolvimento das pontes estaiadas, trata-se dos avanços evidenciados na fase de concepção do projeto. Também são apresentados argumentos sobre a otimização dos processos relativos à análise, ao projeto e às possibilidades de dimensionamento de estruturas complexas, proporcionada pelos softwares de análise estrutural. Um dos principais progressos na análise das pontes estaiadas, está na melhor compreensão do comportamento das pontes estaiadas submetidas à ação do vento visando reduzir ou suprimir vibrações nos elementos estruturais que a compõem. Muitas das limitações das pontes estaiadas foram superadas pelo desenvolvimento de métodos construtivos específicos e de materiais com maiores capacidades de resistência. A ponte estaiada é uma tendência e tem inspirado a construção de diversas outras pontes no âmbito nacional.

Palavras-chave

Pontes Estaiadas; Pontes Suspensas; Estruturas.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as pontes estaiadas encontram-se em grande destaque, em evidência, tanto no cenário nacional quanto no cenário internacional. É notável o crescimento cada vez maior do número de obras de arte especiais de grande porte e visibilidade sendo projetadas e executadas utilizando esta solução estrutural, que tem como premissa básica a sustentação do tabuleiro através dos estais.

A quantidade de estudos e pesquisas realizados tendo este tipo de ponte como foco é consideravelmente restrita e a disseminação da sua utilização em larga escala é relativamente recente, principalmente no que se refere ao Brasil, país no qual esta alternativa foi introduzida a pouco mais de dez anos.

Entretanto, mesmo em face a estas constatações, é possível observar que os desenvolvimentos alcançados nessa área são de importância extremamente relevante e figuram em diversos aspectos, como por exemplo a concepção estrutural dos projetos, os métodos de cálculo utilizados e os limites transpostos.

Justificando o aprimoramento gerado por estes avanços existentes, que ainda são pouco conhecidos e explorados, os estais já são capazes de proporcionar às pontes a superação de vãos com mais de mil metros de extensão.

Ainda assim, mesmo sendo tão extensas, as pontes estaiadas são capazes de adotar seções transversais bastante esbeltas para compor o tabuleiro, consequentemente, as superestruturas infligem uma carga menor sobre os apoios e não deixam a desejar nem em termos de segurança e nem no aspecto estético.

2. HISTÓRICO

2.1. PONTES ESTAIADAS NO MUNDO.

O conceito estrutural básico e característico das pontes estaiadas é representado por uma estrutura sustentada por estais. A utilização deste mesmo esquema estrutural pode ser facilmente identificada, através dos mais diversos registros históricos, como uma alternativa frequentemente utilizada em algumas das mais antigas civilizações.

O legado cultural deixado por estas civilizações torna possível a constatação do emprego dos mais variados tipos de materiais na composição dos estais. Nas construções das embarcações egípcias, por exemplo, era feito o uso de cordas conectadas ao mastro principal que serviam de apoio para as vigas. Já nos castelos medievais, que possuíam valas e fossos para dificultar a entrada, eram utilizadas correntes que atuavam como sustentáculo para pontes e portões levadiços. Existem ainda, evidencias da utilização de cordões de trepadeiras como elementos de sustentação de passarelas primitivas em Borneo, na Oceania (MACHADO, 2008).

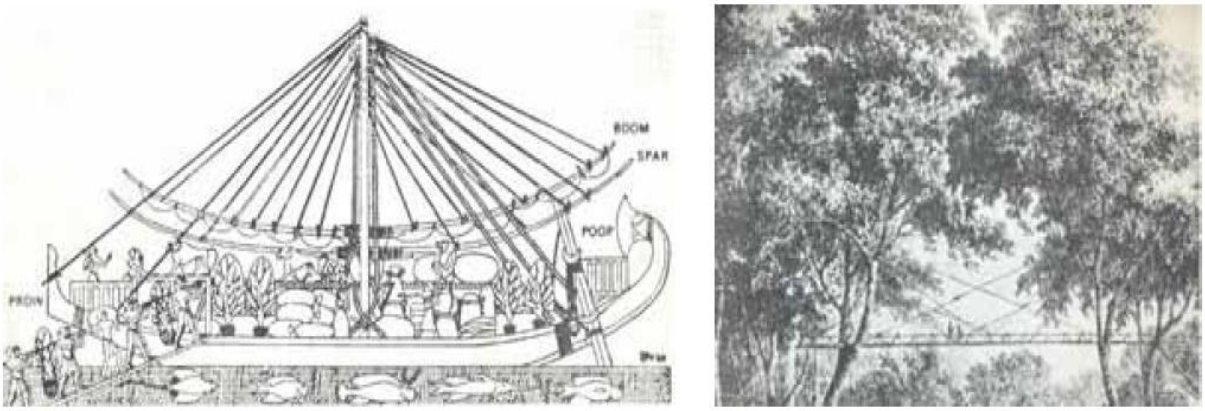

Figura 1 – Embarcação egípcia com estais de corda e passarela arcaica em Borneo com estais de trepadeiras.

Em relação às pontes estaiadas propriamente ditas, existem vários esboços de projetos, inclusive alguns da autoria de Leonardo da Vinci, de estruturas de pontes onde se nota a existência de estais. Entretanto, a primeira ponte estaiada a sair do papel foi projetada e construída pelo carpinteiro alemão Immanuel Löscher em 1784, o material utilizado tanto para o tabuleiro como para os estais foi a madeira (TORNERI, 2002).

Mais adiante, em 1817, os avanços na utilização dos materiais permitiram que os engenheiros britânicos, Brown e Redpath, projetassem e construíssem a passarela de King's Meadow, concebida com estais de ferro e um vão com 34 metros de extensão (TORNERI, 2002).

Ao longo da história é possível evidenciar registros de importante marcos na concepção das pontes estaiadas. No ano de 1821, o arquiteto francês Poyet confeccionou o projeto de uma ponte estaiada na qual todos os cabos convergiam para um mesmo ponto no apoio

principal, configurando o atualmente chamado arranjo em leque. Em contra partida, no ano de 1840, foi proposto por Hatley um novo tipo de arranjo, no qual os cabos se encontravam dispostos paralelamente ao longo dos apoios principais, conhecido como harpa (TORNERI, 2002).

3. ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DAS PONTES ESTAIADAS

3.1. CONCEPÇÃO DO PROJETO.

Alguns dos principais desenvolvimentos das pontes estaiadas podem ser evidenciados na concepção do projeto. A mudança do formato de um elemento estrutural, uma nova maneira de posicionar os tirantes que suportam o tabuleiro, ou ainda, a aplicação de um conceito diferente nos apoios principais, todas estas melhorias idealizadas em projeto são capazes de possibilitar o melhor aproveitamento da estrutura e uma consequente redução dos custos.

3.1.1. Ligação entre os estais e o tabuleiro

Um dos avanços mais evidentes ao logo da história pode ser visto na ligação entre os estais e o tabuleiro. As pontes estaiadas mais antigas e primitivas apresentam estais bastante espaçados ao longo do tabuleiro, que tinha de ser necessariamente bastante rígido para suportar os esforços de flexão, tendo em vista que os vão sujeitos a este efeito eram grandes.

Esta configuração, que apresentava um tabuleiro muito robusto, contava com uma superestrutura excessivamente pesada, transmitindo cargas desnecessárias para infraestrutura e criando pontos de tensões nas ancoragens, que precisavam de reforço. A concepção com estais espaçados se tornou obsoleta, visto que não é a melhor opção técnica e econômica.

Em seguida, as pontes estaiadas começaram a ser concebidas de outra maneira. Os estais passaram a ser múltiplos e apresentavam pequenos espaçamentos. Entretanto, o tabuleiro ainda não era completamente suspenso, os cabos eram dispostos somente nas proximidades das torres e sustentavam as periferias dos apoios principais. Uma das pontes estaiadas pioneiras na utilização de múltiplos estais foi a Ponte Friedrich Ebert, concebida em 1967 por Homberg.

3.1.2. Arranjos para a disposição dos estais

A forma da distribuição dos cabos ao longo do tabuleiro não foi a única a se desenvolver, uma vez que a ligação entre os estais e os mastros também demonstrou uma clara evolução com o passar do tempo. Nos dias atuais existem três principais formas de idealizar a conexão dos cabos ao longo das torres, que são conhecidos como os arranjos tipo leque, tipo harpa e tipo semi-harpa.

O sistema de arranjo dos estais do tipo leque foi proposto em 1821, pelo arquiteto francês Poyet. Neste sistema todos os tirantes, que servem como pontos de suporte para os tabuleiros, tendem a convergir para um único ponto da torre, mais precisamente para o topo da mesma.

Já o sistema de arranjo dos estais do tipo harpa foi sugerido em 1840, por Hatley, e parte do princípio de que todos os cabos da ponte têm sua fixação executada em alturas diferenciadas ao longo da extensão do mastro. Esta diferença na fixação deve manter a proporcionalidade entre a altura da ancoragem do cabo no mastro e a distância da ancoragem do mesmo cabo no tabuleiro. Além disso, os estais devem ser paralelos entre si.

Este tipo de arranjo pode ser exemplificado na ilustração a seguir, que apresenta uma ponte do tipo harpa projetada para ser construída em Ilhéus, Bahia.

Figura 8 – Idealização de ponte estaiada tipo Harpa em Ilhéus, Bahia.

Ambos os sistemas apresentados, o arranjo em leque e o arranjo em harpa, possuem suas vantagens e desvantagens. O arranjo do tipo leque é mais interessante em termos de alívio de cargas e possibilidade de seções mais esbeltas, visto que uma maior verticalidade dos cabos diminui os esforços de compressão impostos ao tabuleiro e também a parcela de esforços

horizontais transmitidos para a torre. Entretanto, a grande desvantagem deste sistema é a ancoragem dos estais no mastro, tendo em mente que o projeto e a execução desta etapa é de extrema complexidade e bastante dispendiosa, em razão da dificuldade imposta pela proximidade dos cabos.

Outra vantagem do arranjo em leque é o acréscimo de estabilidade diante de abalos sísmicos, devido a maior inclinação dos estais em relação ao tabuleiro, que contribui para uma maior componente vertical da força. Por outro lado, analisando o arranjo do tipo harpa, pode-se afirmar que este sistema proporciona mais benefícios estéticos do que estruturais, porém os cabos menos inclinados requerem uma seção mais robusta para o tabuleiro, e no caso de cargas assimétricas, o mastro também sofre esse aumento de solicitação.

Para Vargas (2007), o arranjo tipo harpa não é a escolha mais ideal quando se trata de custos e de maior estabilidade, mas pode ser compensada pela sua estética. “Deste modo, o sistema em harpa é menos indicado para grandes vãos, uma vez que ele induziria altas tensões de compressão no tabuleiro, levando à necessidade de seções mais enrijecidas” (CLÁUDIO, 2010, p. 13).

O arranjo do tipo semi-harpa apresenta um afastamento definido das ancoragens ao longo da torre, além disso, os estais apresentam inclinações diferentes, que tendem a aumentar à medida que os tirantes se aproximam da torre. Com esta configuração, são mantidas as vantagens do arranjo em leque, que garantem alívio de esforços e seções mais esbeltas, e a complexidade nas ancoragens é eliminada..

3.1.3. Planos de estais

Outra modificação na concepção do projeto que possibilitou a transposição de barreiras em relação à largura do tabuleiro foi o aumento do número de planos de estais. Pontes estaiadas que apresentam apenas um único plano central de estais são estruturas limpas, simples e bem aceitas do ponto de vista estético.

Entretanto, do ponto de vista estrutural, a utilização desta configuração implica em algumas limitações, pois, a seção transversal do tabuleiro é apoiada apenas no centro e funciona como uma espécie de “gangorra”, com dois balanços. Este esquema estático a deixa vulnerável à aplicação de cargas assimétricas, que irão provocar desequilíbrios e, conseguintemente, altos esforços de torção na superestrutura.

Além do ponto negativo em relação aos esforços de torção, a estabilidade da estrutura também fica comprometida e a passagem da torre pelo tabuleiro tem de ser cuidadosamente pensada e executada para não interferir nas faixas de tráfego. Estas desvantagens fazem desta configuração um esquema estrutural ineficaz para tabuleiros mais largos.

Uma alternativa interessante para minimizar estas desvantagens é a adoção de dois planos de estais nas extremidades do tabuleiro. A implantação desta nova configuração irá eliminar o problema da torção gerada pelas cargas assimétricas, uma vez que a seção transversal do tabuleiro irá funcionar como um elemento biapoiado, assim, o tabuleiro apenas sofre a solicitação de uma flexão transversal.

Tendo em mente que esta outra concepção, com dois planos, conta com estais ancorados nas extremidades da superestrutura, torna-se de fácil planejamento e execução a passagem do mastro, sem nenhuma interferência, pela pista de rolamento. Por fim, uma vez que a superestrutura conta com mais pontos de suporte, é possível afirmar que ela será mais estável de uma maneira geral A ilustração da ponte Great Belt Bridge demonstra este modelo.

Figura 10 – Ponte estaiada Great Belt Brigde, com dois planos de estais.

Assim sendo, a configuração com dois planos de cabos externos é bastante adotada e recomendada atualmente. Para o caso de larguras muito grandes, que impliquem em esforços de flexão que excedem a capacidade da seção do tabuleiro, pode-se adotar um plano de cabos centrais além dos externos para diminuir o vão, o que é uma alternativa pouco estudada, ou tem-se a opção de aplicar uma protensão transversal no tabuleiro.

3.1.4. Configuração das torres

Algumas inovações geométricas representaram uma importância bastante significativa para o desenvolvimento das pontes estaiadas, como por exemplo os tipos de limitações impostas pelos mastros ao sistema das pontes estaiadas, é a interferência causada no tabuleiro, que é, em muitos casos, perfurado pelo apoio principal.

Uma das concepções de torres que elimina esta intercessão indesejada é a chamada torre em "A", utilizada pela primeira vez em 1959, na Ponte Severin. Este tipo de torre nasce a partir de dois apoios diferentes que avançam como dois pilares distintos e se aproximam um do outro à medida que avançam na altura, se encontrando em um determinado ponto acima do tabuleiro. Este modelo elimina completamente qualquer contato indesejado do pilar com a pista de rolamento, entretanto, é preciso analisar a inclinação dos cabos cuidadosamente, para que estes não interfiram no tráfego da ponte.

3.2. INFLUÊNCIA AERODINÂMICA.

Uma das principais limitações apresentadas pelas pontes estaiadas é a sua vulnerabilidade ao efeito do vento sobre a estrutura suspensa, antes de serem realizados pesquisas e estudos mais esclarecedores nesse âmbito, muitas obras de arte suspensas por estais apresentavam problemas de instabilidade aerodinâmica.

Este problema foi um dos principais responsáveis pela baixa na utilização das pontes estaiadas durante o século XIX, período no qual ocorreram sérios acidentes relacionados a vibrações provocadas pela ação do vento. Um dos acidentes mais representativos deste fato foi o colapso da ponte Tacoma Narrow em 1940, que apesar de ser uma ponte pênsil, representava bem a falta de conhecimento técnico nas pontes suspensas de maneira geral.

As tentativas iniciais de superar esta dificuldade se traduziram no aumento representativo da rigidez da superestrutura na tentativa de diminuir os efeitos das vibrações, no entanto, esta alternativa não se mostrou muito eficiente, visto que, além de não neutralizar completamente os efeitos do vento, ainda provocava um aumento excessivo no peso próprio da estrutura e nos custos da mesma.

A solução mais eficaz não se resumia a enrijecer as peças da ponte para tentar contrapor o vento, mas sim em transformar a geometria da estrutura de maneira a se impor o mínimo

possível e facilitar a passagem do vento. O grande precursor desta ideia foi o engenheiro alemão Leonhardt, que elaborou um estudo direcionado para a questão da instabilidade aerodinâmica nas pontes, através do qual foi possível concluir que a utilização de uma superestrutura livre de formas agudas, adotando formatos aerodinâmicos que oferecem pouca resistência à passagem do vento, era capaz de contribuir para a diminuição das vibrações sofridas.

A partir deste ponto o meio técnico relacionado à construção das pontes estaiadas percebeu que era necessário o desenvolvimento de tabuleiros e estais com formas aerodinâmicas. Dessa maneira, uma das importantes etapas de projeto que passou a ser realizada foi o desenvolvimento de modelos reduzidos das pontes estaiadas para a realização de ensaios em túneis de vento que têm o objetivo de reproduzir e analisar as forças aerodinâmicas incidentes sobre o tabuleiro da ponte.

Com a utilização deste recurso tornou-se possível uma análise detalhada do efeito do vento sobre a superestrutura, quais eram os pontos fortes e fracos do design inicial, quais eram os focos de problemas relacionados às vibrações, quais obstáculos deveriam ser retirados e quais formatos podiam ser melhorados. Os ensaios em túneis de vento tornaram possível o desenvolvimento de geometrias perfeitamente aerodinâmicas para compor as seções transversais dos tabuleiros.

Com o crescente desenvolvimento tecnológico subsequente, passaram a ser desenvolvidos vários dispositivos aerodinâmicos, que auxiliam a estrutura na diminuição dos efeitos negativos provocados pelo vento, principalmente em obras de arte com grandes vãos, onde as oscilações apresentam amplitudes mais largas e frequências mais baixas.

3.3. MODELOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

O avanço tecnológico alcançado pela sociedade a partir da segunda metade do século XX possibilitou o desenvolvimento de novos métodos de cálculo e de ferramentas extremamente necessárias para a simplificação dos complexos processos que envolvem o projeto de uma ponte estaiada. Este fato pode ser claramente ilustrado pela introdução dos softwares de cálculo estrutural no ambiente dos escritórios de projetos de pontes.

Estes softwares possibilitam a criação de um modelo virtual fiel daquilo que se pretende construir, com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura da maneira mais próxima

possível da realidade. A fase preliminar do projeto, que inclui a concepção e o pré-dimensionamento de uma estrutura viável, pode ser bastante simplificada, uma vez que o projeto pode ser rapidamente modelado em computador para que as dimensões e os esforços possam ser verificados para que a viabilidade daquilo que foi proposto na idealização da estrutura seja confirmada.

No decorrer do dimensionamento da estrutura propriamente dito, os programas computacionais são de grande ajuda. No processo do cálculo estrutural de uma ponte estaiada, uma análise não linear dos esforços é de fundamental importância, pois, certos elementos como as torres e os tabuleiros estarão submetidos a elevados esforços de compressão e deformações que irão provocar efeitos de segunda ordem.

Outra vertente importante da análise estrutural realizada nos modelos virtuais é em relação ao comportamento dinâmico da ponte. Os softwares fornecem, para serem examinados pelo projetista, os modos de vibração que atuam na estrutura, dessa maneira, o autor do projeto tem todos os parâmetros necessários para avaliar a eficiência da sua concepção.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho é possível constatar a grande importância de se estudar este tema, pois trata do modelo de ponte com a maior demanda de utilização nos dias atuais. Dentre os avanços analisados, pode-se concluir que o recente desenvolvimento tecnológico, principalmente no que diz respeito aos materiais, softwares e métodos construtivos, alavancou o crescimento das pontes estaiadas de maneira exponencial desde meados do século passado.

Pesquisando a cerca do tema abordado, a fim de enriquecer o trabalho com diversas referências, notamos que existem poucos materiais (artigos, livros, estudo de caso, etc.) elaborados no Brasil sobre pontes estaiadas. Como citado ao longo do trabalho, a disseminação deste tipo de ponte em território nacional é bastante recente, por tanto, existe uma carência em relação ao desenvolvimento de pesquisas e estudos.

Os argumentos apresentados suportam o fato de que as pontes estaiadas ainda são pouco exploradas e necessitam de contribuições acadêmicas. Com isso, sugere-se como trabalhos futuros, focar em estudos que possam embasar e incentivar o aprimoramento de normas técnicas de procedimentos específicos para o projeto e a execução de pontes estaiadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Aços estruturais**. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/construcao-em-aco-acos-estruturais.php> Acesso em: 08 de out. 2013.

CLAUDIO, Renato Gadêlha. **Tipologia das pontes estaiadas com tabuleiro de concreto.** 2010. 76 f. Monografia (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

DOMINGUES, Henrique. Ponte estaiada sobre o rio negro. In: IBRACON, 52., 2010, Fortaleza. **Documentário...** Fortaleza, p. 1-59.

MACHADO, Daniel de Souza. **Caracterização aerodinâmica de cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento.** 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MAZARIM, Diego Montagnini. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil.** 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de estruturas. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PODOLNY, Walter; SCALZI, John B. **Construction and design of cable-stayed bridges**. 99. ed. New York: John Wiley & Sons, 1976. 506 p.

PORTAL METALICA. **Imagens**. Apresenta figura do avanço do lançamento progressivo do viaduto de millau. Disponivel em: <www.metalica.com.br>. Acesso em: 13 de out. 2013.

TORNERI, Paola. **Comportamento estrutural de pontes estaiadas**: comparação de alternativas. 2002. 272 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de estruturas. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

VARGAS, Luiz Arturo Butron. **Comportamento estrutural de pontes estaiadas:** efeitos de segunda ordem. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de estruturas. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo,2007.

YTZA, Maria Fernanda Quintana. **Métodos construtivos de pontes estaiadas:** estudo da distribuição de forças nos estais. 2009. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.