

## PONTES ESTAIADAS: OBRAS DE PEQUENOS VÃOS

Rayelle Santiago dos Santos (IC) e Henrique Dinis (Orientador)

**Apoio: PIBIC Mackenzie**

### RESUMO

As pontes estaiadas são reconhecidas como uma solução estrutural comumente utilizada para grandes vãos, porém, observa-se que também podem ser utilizadas para situações de vãos pequenos. Nota-se uma lacuna de conhecimento na aplicação dessas pontes vãos que justifiquem utilizar o método. Este trabalho analisa o desempenho estrutural das pontes estaiadas, especialmente as de pequeno vão justificando estruturalmente sua aplicação. Faz referência para sua utilização em caso de sistemas construtivos complexos, como as pontes em curva ou quando sua utilização é apenas um apelo estético. Mostra-se pertinente esse estudo, ao apresentar por meio de modelos numéricos e exemplos, situações em que a construção de pontes estaiadas em casos de pequenos vãos são justificáveis. Para os cálculos, este trabalho utiliza o *software* Ftool, versão estudantil, efetuando-se a simulação de um vão único sustentado por estais, onde se busca um tamanho de vão mínimo que, a partir dele, o uso dos estais estariam exercendo função estrutural sobre o tabuleiro, sendo assim válida sua contribuição para a sua sustentação. Verifica-se, também, o valor do vão, a partir do qual, o tabuleiro deixa de oferecer resistência estrutural, trabalhando “pendurado” nos estais.

**Palavras-chave:** Pontes Estaiadas. Pequenos vãos. Funcionamento Estrutural.

### ABSTRACT

The cable-stayed bridges are recognized as a structural solution usually used for big spans, but they can also be used for situations with small spans. It is noted a lack of knowledge in the application of this kind of bridges that justify the use of this method. This academic study will analyze the structural performance of cable-stayed bridges, specially if those of small spans justify their application. It makes reference to its use in case of complex building systems, as curved bridges or when its use is just an aesthetic appeal. This study is relevant in presenting by numerical models and real examples, situations where the use of cable-stayed bridges in cases of small spans are justified. For the calculations, it was used the Ftool software, in its student version, simulating only one span supported by cables, looking for a minimum span size, that from it, the use of the cables would be doing their structural function, being valid their contribution for the support of a bridge. It is also checked the size of a span from which the bridge stops offering structural strength, being suspended in the cables.

**Keywords:** Cable-stayed bridges. Small spans. Structural functioning.

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de pontes estaiadas já vem sendo utilizado desde longo tempo. Há relatos de experiências construtivas já na Idade Média, em pontes de madeira. Nas pontes suspensas do século XIX, cabos em forma de estais foram aplicados, muitas vezes, com a finalidade de reforço e contraventamento dos cabos pênsil, em pontes neste sistema. Atualmente, as pontes estaiadas são construídas com cabos formados por um conjunto de cordoalhas protendidas, que têm a função de aliviar os esforços da superestrutura, ou mesmo, de sustentá-la.

As primeiras pontes estaiadas, com tecnologia próxima a que se utiliza hoje, tratou-se de vigamentos metálicos, em que se utilizaram poucos cabos, com a função de aliviar os esforços da superestrutura, pela protensão. Pode-se citar Fritz Leonhardt, na década de 1950, como um dos primeiros projetistas a utilizar assim esta técnica. Uma vez executada a superestrutura, os cabos foram lançados e protendidos, aliviando os esforços decorrentes do peso próprio. Com a obra colocada em funcionamento, para as cargas móveis, os cabos trabalhavam como atirantamento. (BROWN, 1993). Hoje, este é o sistema mais utilizado para as pontes de grandes vãos, com tabuleiros totalmente suspensos pelos estais. Houve uma grande evolução nos sistemas construtivos das pontes estaiadas desde então, que possibilitaram vãos cada vez maiores, em aço e concreto. A primeira obra com vão estaiado considerado de grande magnitude, em competição já com as pontes pênsil, foi a Ponte da Normandia, na França, de 1993. Com 856 m de vão central, foi construída com tabuleiro celular de aço de 21,2m de largura, em balanços sucessivos, vão este ultrapassado posteriormente por outras obras (FREYSSINET, 1994).

A ponte brasileira que se destacou pelo comprimento do vão, foi a ponte Newton Navarro, sobre o Rio Potengi, na cidade de Natal. Inaugurada em 2007, com um vão central estaiado de 400m, a 56m de altura sobre o rio, o maior atingido até o momento. Ver Figura 1. O segundo maior vão é o da Ponte de Porto de Alencastro, sobre o Rio Paranaíba, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Mato Grosso, com três vãos, um central de 350m e dois laterais de 343m. Esta teria sido a primeira ponte estaiada brasileira, mas após o início da construção, ficou paralisada por 10 anos. É seguida, na sequência dos recordes de vão, pela ponte Governador Almir Gabriel, sobre o rio Guamá, no Pará, com 320m (MAZARIM, 2011).



Figura 1: Ponte Newton Navarro, sobre o Rio Potengi, na cidade de Natal.

Fonte: (Dinis, 2021)

Considera-se vãos grandes, aqueles típicos a se adotar para solução estaiada em uma obra, em torno de 300 m, que excedem os vãos de sistemas convencionais, como o de balanços sucessivos.

As pontes estaiadas são também projetadas para pequenos vãos. Em muitas obras se adota esta técnica por mero recurso estético, tendo em vista o efeito visual positivo que causam seus cabos. No entanto, são também aplicadas como recurso para solucionar algumas solicitações especiais a que a superestrutura é submetida, como torção ou pontes contínuas com vãos sem proporção, necessidade de pequena espessura estrutural.

Interessa a este trabalho, as pontes, viadutos e passarelas com vãos considerados pequenos, onde foram aplicados o sistema de estais como solução para problemas estruturais específicos, em que os estais resultaram em bom resultado de projeto.

Atualmente, as estruturas estaiadas são aplicadas às pontes, viadutos e passarelas indistintamente, para vãos que variam dos menores, pouco acima de 20m, aos maiores, que atingem mais de 1000m. Sabe-se, que pelo alto custo construtivo dos estais, esta alternativa estrutural se aplicaria especialmente para grandes vãos. Porém, tendo em vista que os estais são uma boa solução para estruturas que apresentam condições específicas de difícil solução estrutural, são também utilizadas para vãos pequenos.

No entanto, há inúmeros exemplos de pontes em que não fica transparente qual justificativa em que se pautou a utilização de estais, em especial, tratando-se de pequenos vãos.

Na verdade, nem está claro, face à literatura existente na área, quais as questões estruturais de difícil solução que encontram boa solução por meio da utilização dos estais, ou de como seria os sistemas estruturais correspondentes. Também não está claro, para qual vão mínimo se considera uma solução em estais justificável estruturalmente, que não seja unicamente por efeito estético, sem função estrutural, especificamente.

Sabe-se que em muitos casos, os estais são utilizados por mero efeito estético. Segundo Mazarim (2011), pontes estaiadas vem sendo utilizadas no Brasil, como um todo, mesmo em situações onde este tipo de ponte não seria normalmente utilizada, mas sim pelo fator estético. Segundo o autor, a população tem aceito este tipo de ponte, como cartão postal para as cidades, tratando-as como referência e ou ícones. No entanto, não fica também claro, em muitos casos, se ao se decidir por uma ponte estaiada pelo seu efeito estético, não se estaria concomitantemente escolhendo a solução estrutural adequada.

Constata-se, assim, uma lacuna na literatura existente que esteja voltada aos conceitos para utilização de pontes estaiadas, em se tratando de pequenos vãos e sua justificativa estrutural.

Os estudos de concepção de pontes estaiadas ainda são recentes no Brasil. As referências de obras realizadas não são suficientes para que as várias pontes construídas sejam agrupadas em tipologias estruturais. Com isso, os modelos estruturais são idealizados em experiências internacionais, muitas vezes pouco documentadas. No entanto, o aperfeiçoamento cada vez maior das técnicas e dos profissionais brasileiros, por meio de obras realizadas, tem feito com que a experiência sobre este tipo de solução estrutural venha sendo cada vez mais ampliado. Alguns trabalhos acadêmicos em nível de mestrado e apresentados em congressos especializados têm causado efeito positivo na difusão do conhecimento que envolve este tema, o que leva ao estudo de novas soluções e novos conceitos para que se acumule experiência para otimizar e implantar pontes estaiadas cada vez mais adequadas ao contexto em que ela se enquadra, em termos de implantação, estruturas, economia e estética. Mas, as informações sobre os princípios estruturais a serem adotados em situações específicas, como de pontes de pequeno vão, em curva, com um único vão, em vigas contínuas com vãos sem proporção, ainda são restritas e pouco divulgadas.

Considerando esta lacuna existente na literatura relativa aos conceitos para utilização em projeto de pontes estaiadas de pequenos vãos e sua justificativa estrutural, faz-se importante qualquer iniciativa para ampliar o conhecimento deste tema, embasado, especialmente na experiência prática. São várias as experiências com projetos de pontes com vãos considerados pequenos que podem se retratadas, a maioria com singularidades estruturais que justificam a utilização de estais, que não seja unicamente por padrões estéticos. É de interesse da comunidade técnica e acadêmica, a formalização deste conhecimento e de sua divulgação.

Interessa neste trabalho, especialmente, as pontes com pequenos vãos, em que o sistema estaiado deu solução a um problema estrutural singular, de modo a estabelecer padrões sobre em que situações os estais se justificam para dar soluções a situações estruturais específicas, em se tratando de pontes de vãos considerados pequenos. De forma geral, com a constante evolução da construção civil, se faz necessário, em qualquer situação,

estudar e referenciar as melhores técnicas para determinada situação, à medida que o conhecimento vai se acumulando sobre cada tema.

Assim, este trabalho estuda a utilização de estruturas estaiadas em pontes, viadutos e passarelas e seus princípios gerais de funcionamento estrutural e tipologias quando aplicados em projeto, mais especificamente, as soluções estruturais aplicadas às pontes existentes de pequenos vãos, que se notabilizaram por criatividade ou arrojo estrutural e em que a solução estaiada se justificou.

Constata-se, ao se observar os casos de obras construídas, justificativas estruturais para a utilização de estais em pontes de pequenos vãos em casos de peculiaridades de curvaturas acentuadas, vãos únicos, dentre outras, mas interessa, especialmente, uma estimativa para a magnitude de vãos mínimos de pontes e viadutos, para que seja justificável a aplicação de estais.

## **2. DESENVOLVIMENTO DO ARGUMENTO**

As pontes estaiadas surgiram da necessidade de se criar grandes vãos, em substituição aos pilares de apoio intermediário para os tabuleiros, através de cabos inclinados e ancorados diretamente no tabuleiro, sustentado por uma torre unida ao pilar, prolongando, assim, o vão a distâncias maiores. Com a restrição dos materiais e processos construtivos, a ideia foi abandonada, ou utilizada como contraventamento de pontes pensil. Mais futuramente, ressurgiu como uma alternativa às pontes pensil, a partir de seu conceito de disposição dos cabos, conectados diretamente ao tabuleiro.

A primeira ponte considerada moderna, exclusivamente estaiada foi a ponte do canal de Donzere, localizada na França, construída no ano de 1951, com vão de 81m, em concreto. O avanço da tecnologia e da concepção das pontes estaiadas, veio a partir das primeiras experiências com as pontes Strömsund, de 1955, projetada por Dischinger e a do rio Rhine, de 1958, por Leonhardt, que mostrou que as superestruturas poderiam se tornar mais leves, esbeltas e flexíveis que as concebidas anteriormente. Foi grande a contribuição de Fritz Leonhardt em seus estudos sobre aerodinâmica, ao propor superestruturas mais leves concebidas com forma aerodinâmica, mostrando que eram mais eficazes estruturalmente que as rígidas, muito mais pesadas. Ambas com vãos relativamente pequenos. (MATHIVAT, 1994). O avanço deste sistema estrutural, internacionalmente, só se difundiu a partir dos anos 1970, com o desenvolvimento dos processos de cálculo e verificação das estruturas e teve um avanço muito significativo nos anos 90, quando ingressaram então no domínio dos grandes vãos, que antes eram reservados às pontes pensis.

A versatilidade das pontes estaiadas conduz a uma ampla variedade de configurações geométricas. O arranjo dos estais, o tipo de superestrutura e o estilo dos mastros podem ser

facilmente ajustados de acordo com as condições locais. Os modelos estruturais adotados para as pontes estaiadas são os mais diversos, havendo variações na forma das torres, podendo ser duplas, em Y invertido, ou um mastro único, como também, na disposição dos cabos, que podem ser em harpa, leque ou um misto entre estas duas disposições. Os tabuleiros normalmente são em vigas contínuas de dois ou três vãos, apresentando uma simetria que favorece o equilíbrio da torre que ancora os cabos. Em pontes de vão pequeno, admite-se inclusive um único vão, sendo que o equilíbrio dos cabos, do outro lado da torre, podem ocorrer com os cabos, por exemplo, ancorados em uma fundação trabalhando à tração, como mostra a Figura 2 (LEONHARDT, 1979).

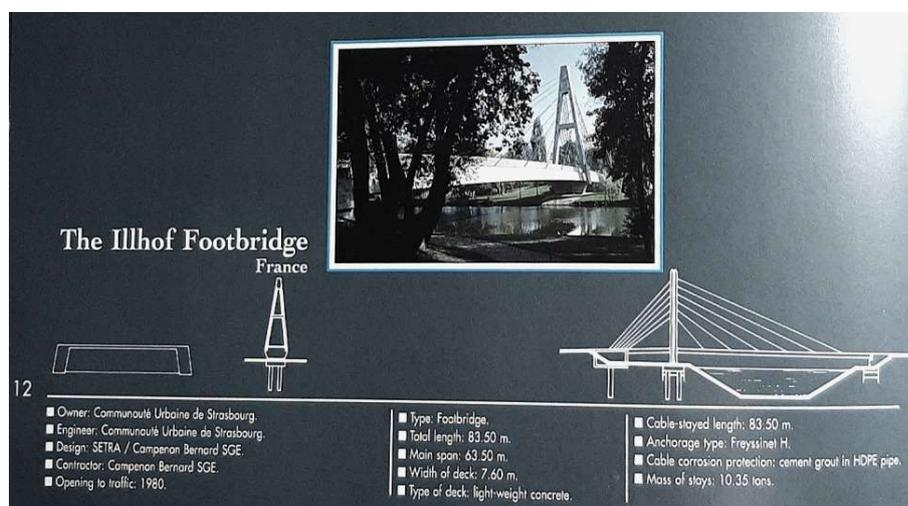


Figura 2 – Ponte The Illhof Footbridge

Fonte: Freyssinet, 1994.

De forma geral, sem maiores estudos, poderia-se dizer que as pontes estaiadas são mais economicas que as pencil a partir de vãos inferiores a 1200m, devido a maior eficacia dos estais e métodos construtivos mais simples. No entanto, o maior vão atingido até então foi com a ponte Sutong, finalizada em 2008, que atingiu um vão de 1088m, ainda aquém desta marca, mas em vias de ser superado, por outras obras em estudo. Deve-se ressaltar, por outro lado, que cada situação deve ser analisada particularmente, e vários outros fatores são considerados para a escolha do sistema construtivo, como a infraestrutura, cuja escolha depende das condições locais, relacionados com o subsolo. Também, ainda, para a escolha e concepção da superestrutura, estão envolvidos diversos aspectos, tais como: materiais disponiveis no local, mão-de-obra qualificada, questoes arquitetonicas, tecnicas construtivas e equipamentos disponíveis, dentre outros. (MAZARIM, 2011).

Pontes estaiadas com vãos pequenos ou médios também são construídas. O sistema de estaiamento traz boa solução estrutural para várias situações de superestrutura, como

exemplo, em vigas contínuas com vãos desequilibrados, pontes em curva e outras situações específicas que são caso a caso analisadas, para verificar se os estais trazem algum benefício estrutural. Segundo Chung (2017), para viabilizar obras estaiadas curvas, deve-se sempre efetuar estudos, já que diversos fatores terão influência, tais como a curvatura, a posição do mastro, inclinação dos cabos e a geometria da seção transversal, que definem o comportamento de pontes estaiadas assim concebidas, através de modelos estruturais. Ainda, segundo o autor, na forma curva, as qualidades estéticas das obras estaiadas ficam mais realçadas, além de muitas vezes impressionantes. As obras curvas demonstram naturalmente arrojo estrutural, o que as destacam esteticamente, como pode ser verificado, na Figura 3, a Ponte Octávio Frias de Oliveira, sobre o Rio Pinheiros em São Paulo, com um único mastro e “X”, sustenta dois tabuleiros em curva, que se cruzam sobre o rio.



Figura 3 – Ponte Octávio Frias de Oliveira

Fonte: Marcos Leal, 2008.

Várias pontes se notabilizaram pelo arrojo estrutural, mesmo que com vãos relativamente pequenos, por notabilidades estruturais, algumas curvas e outras não. Pode-se citar como exemplo, as projetadas pelo arquiteto/engenheiro Santiago Calatrava. A mais conhecida, a ponte Alamillo, em Sevilha, de 1992, com um único vão de 200m, com cabos ancorados em uma única torre, sem cabos de retaguarda, com a torre ancorando todo o esforço com trabalho de engaste à flexão. Outra obra sua que se evidenciou, foi a passarela de pedestres Trinity, em Saltford, Londres, em 1995, com um viga do vão principal, que no encontro com a torre, se subdivide em duas vigas com curvaturas opostas. O comprimento total do tabuleiro é de 78 m (JODIDIO, 1998). Também, uma obra de destaque, a passarela em Aveiros, Portugal, de 2006, caracteriza-se por um tabuleiro circular completo, apoiado por três apoios, um deles com um mastro duplo inclinado, que por cabos suspendem e aliviam os três vãos assim formados, Figura 4. O tabuleiro é composto por um círculo de 26m de diâmetro e 2m de largura (CHUNG, 2017) Um exemplo de ponte estaiada de pequeno vão, mesmo não

sendo curva, a exemplo, a ponte Kamizuma, no Japão, de 1990, com dois vãos, um principal de 103m e o segundo de 39m, cujos esforços de desbalanceamento dos estais foram absorvidos por uma caixa ancoragem no apoio extremo do menor vão. Como menor vão documentado na literatura, a passarela de acesso à Chent Opera, na Bélgica, de 1993, com um único vão de 17,5m, em estruturas metálicas, com os cabos de retaguarda ancorados por tração em fundação (FREYSSINET, 1994).



Figura 4 – Ponte Pedonal Circular em Aveiros

Fonte: In Chung (2017)

No Brasil, a primeira experiência de projeto de pontes estaiadas ocorreu em 1979, um viaduto em curva, em torno de um mastro de 45m de altura, para acesso à Estação de Transbordo da Lapa, Salvador, pelo arquiteto João Figueiras Lima (LINABO, 2000). No entanto, nas técnicas pelas quais as pontes estaiadas se generalizaram, no Brasil, a primeira obra foi a ponte estação Eng<sup>o</sup> Jamil Sabino, sobre o Rio Pinheiros, em São Paulo, que abriga a estação de Santo Amaro da Linha 5 do Metrô, inaugurada em 2002, Figura 5, constituindo-se por uma viga contínua estaiada com um vão central de 122m e dois vãos laterais, na retaguarda, um com 65m e outro com 50m. (NOGUEIRA NETO, 2006). A ponte que mais se notabilizou pelo arrojo estrutural e estética foi a Octávio Frias de Oliveira, sobre o rio Pinheiros, em São Paulo, inaugurada em 2008, Figura 3, apresenta um forte impacto visual com suas duas pistas independentes curvas, com aproximadamente 290 m de comprimento estaiado, cada, cruzadas entre si, em curvaturas opostas, tendo como sustentação, uma torre em X, com 138 m de altura. Também se destacou, pelo seu forte impacto estético, a passarela Joaquim Falcão Macedo, localizada em Rio Branco, no Acre, com um vão central de 110m e dois laterais de 45m, possui dois mastros bem inclinados para o centro da curvatura do tabuleiro. (MAZARIM, 2011).



Figura 5 – Estação Santo Amaro do Metrô de São Paulo

Fonte: Protende, 2017.

As pontes estaiadas se consagraram como um dos mais versáteis sistemas de construção de pontes, ao conciliarem o método dos balanços sucessivos aplicados a pontes de estruturas contínuas, executadas por segmentos sucessivos, com o efeito de atirantamento, conseguido pelos cabos em leque. Ainda, com a aplicação de forças de protensão nos cabos, alivia-se as deformações de flexão do tabuleiro. Os cabos normalmente têm baixa rigidez, relativamente às estruturas das pontes, com a protensão, elimina-se parte das deformações axiais dos cabos. Desta forma, pode-se dizer que as pontes estaiadas são pontes em balanços sucessivos com cabos de protensão externos. O sistema estrutural é complexo, por ser iterativo, modificando-se a cada novo segmento executado e a cada cabo que venha a ser protendido. Nogueira (2003) explica em detalhes o processo construtivo das pontes estaiadas em concreto executadas pelo método dos balanços sucessivos. Por outro lado, o sistema estrutural e construtivo assim conseguido é bem mais esbelto que os sistemas convencionais, exigindo considerações estruturais mais refinadas. Dinis (2021) expõe que a rigidez de cada elemento estrutural que compõe o conjunto entra na resolução estática da estrutura, contribuindo para os cálculos, as deformabilidades axiais do mastro, estais e dos próprios tabuleiros, quando esbeltos, como também as deformabilidades flexionais da torre e do tabuleiro, e torcionais do tabuleiro e mastro, quando a obra for curva. Na construção segmentada, em carga, os cálculos são acumulativos a cada etapa de execução. Ver Figura 6.

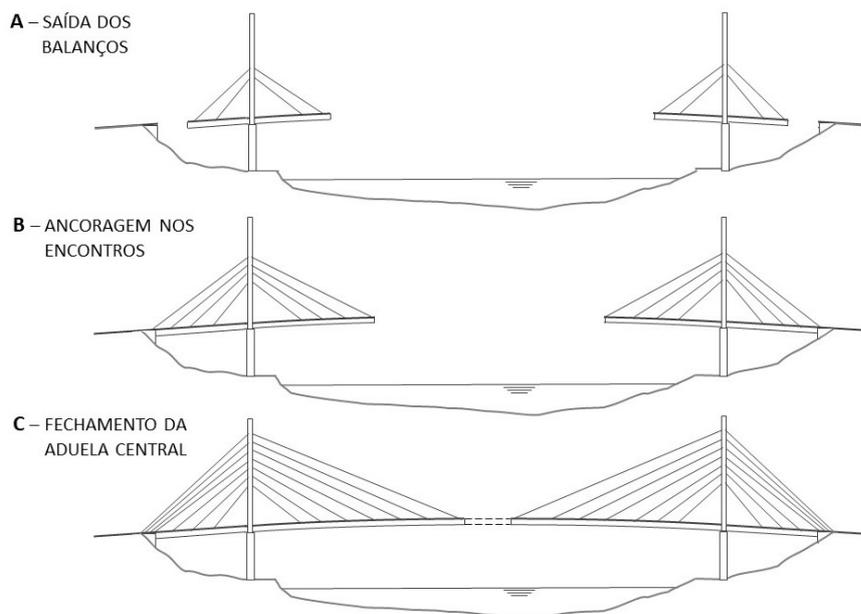


Figura 6: Esquema construtivo de uma ponte estaiada em balanços sucessivos.

Fonte: (Dinis, 2021)

Ainda, segundo Chung (2017), em geral, a maioria das estruturas são bem resolvidas pela Teoria da Elasticidade, em que se adotam hipóteses que levam a resultados satisfatórios em estruturas de pequenos deslocamentos e deformações. No caso de pontes estaiadas, no entanto, tais hipóteses deixam de ser válidas, o que se leva à análise pela Teoria Não-linear da Elasticidade. Nela, consideram-se os efeitos de segunda ordem, fundamentais à análise da estabilidade de elementos lineares mais flexíveis, como é o caso dos estais que, tracionados, se deformam segundo uma catenária bastante sensível à força de tração. Além disso, os efeitos de instabilidade, tanto locais como globais, devem ser estudados de forma a garantir a segurança na concepção da estrutura, especialmente quando se considera o carregamento dinâmico devido ao vento em conjunto com o tráfego. Assim, os projetos de pontes estaiadas devem considerar suas várias etapas de construção e os efeitos acumulativos sobre as partes já executadas, os efeitos temporais sobre os materiais, as ações climáticas, influenciando todos no resultado. Verifica-se, no entanto, que ocorre uma boa previsibilidade no comportamento estrutural dos sistemas estruturais, nas variabilidades em que se aplicam mais comumente.

## 2.1 EXPERIMENTAÇÃO ANALÍTICA

Mesmo sendo possível se chegar a conclusões sobre o uso de estais em pontes de vãos considerados pequenos, por meio de referências bibliográficas, tendo por base livros técnicos, artigos científicos, teses, estudos práticos de obras realizadas, para que se tenha

uma visão mais precisa sobre a atuação dos cabos estaiados sobre a estabilidade das pontes, é necessário, também analisar os princípios básicos estruturais que orientam o projeto das pontes estaiadas e como se deu sua evolução ao longo do avanço da tecnologia e recursos para o cálculo estrutural, como também, distinguir os condicionantes e requisitos que levaram à aplicação de estais em estruturas estaiadas para pontes de pequenos vãos em situações de peculiaridades, que dão geralmente solução a problemas de curvaturas acentuadas, superestrutura com vigas contínuas com vãos sem proporção, pontes com um único vão, pontes com limitações de espessura estrutural, dentre outros, que justificam o uso de estais para dar uma solução de estabilidade às obras e não propriamente, para viabilizar a capacidade resistente dos vigamentos da superestrutura em situações de pequena espessura.

Desta forma, é possível traçar paralelos através de constatações que identifiquem uma previsibilidade de comportamento estrutural para questões estruturais similares, relativamente às pontes estaiadas de pequenos vãos. Outrossim, concluir a respeito das justificativas que levam a se considerar vantajosa a aplicação de estais em pontes e viadutos de vãos considerados pequenos em situações de peculiaridades e constatações sobre a previsibilidade de comportamento estrutural, requer experimentações estruturais a partir de tratamento analítico. Para tanto, tendo em vista o grande universo de possibilidades estruturais, como também, a complexibilidade que envolve o projeto das pontes estaiadas, cabe buscar um modelo de análise representativo que expresse de forma simples os conceitos que se deseja demonstrar.

Assim, para utilizar os recursos computacionais, idealizou-se um modelo de ponte com um único vão, buscando o menor vão estaiado que justificaria esta solução estrutural, nos moldes em que se aplica o sistema construtivo em estais, atualmente. Para o modelo, será considerado um tabuleiro com um único vão principal, duas vigas longitudinais, sustentado por dois planos de estais, engastado em um dos apoios, simulando uma continuidade rígida, formando um binário em fundação trabalhando à tração. No ponto deste apoio de engaste será lançada a torre de sustentação dos cabos. O sistema construtivo do tabuleiro será em balanços sucessivos. A partir de uma espessura mínima do tabuleiro, justificável por razões construtivas, quer se saber qual será o vão do tabuleiro neste sistema, que venha a trabalhar com o efeito dos estais. Por hipótese, assume-se este comportamento, quando na sequência de aumento do vão, a cada segmento incrementado, que a força em cada novo estai, a cada novo segmento, venha a convergir para um valor constante. A força no estai será sempre a que zere a deformação no extremo do balanço. Considerando que os cálculos são referenciais comparativos, pode-se tirar conclusões dispensando-se o refinamento do processo, como

considerar a iteratividade entre etapas de progressão executiva, análise não-linear, deformações diferidas no tempo, etc. Será utilizado o recurso computacional software Ftool.

Como resultado dos trabalhos, prevê-se chegar às seguintes conclusões: Determinar um valor estimativo para o que se pode considerar um vão mínimo que justifique a utilização de estais, na otimização do modelo estrutural de uma ponte, reservadas todas as possíveis variações nas variantes de projeto; considerando esta ordem de grandeza para um vão mínimo de uma ponte estaiada, justificar a aplicação de estais em pontes estaiadas existentes considerada de pequenos vãos; estabelecer uma relação deste vão mínimo com as demais pontes de vãos pequenos implantadas em situações consideradas peculiares.

Será considerado vão mínimo, quando a rigidez do vigamento à flexão pouco contribuir para a capacidade resistente do sistema, ou seja, quando as deformações no extremo do balanço forem zeradas praticamente pelo efeito da força de protensão do estai. Nesta situação, a cada incremento de vão, a força no estai tende a um valor constante, já que não haverá mais a contribuição da rigidez do vigamento do tabuleiro. Esta consideração foi assumida em função dos ensaios estruturais efetuados já neste processo de verificação, em análises que precederam à construção do modelo final.

Para a construção do modelo de processamento, assumiu-se as seguintes premissas e considerações:

1. O tabuleiro terá duas vigas independentes interligada por uma laje, recebendo, cada uma delas, uma linha de estai, ou seja, trata-se de uma obra com dois planos de representação, como mostrado na Figura 7. Desta forma, bastará avaliar o comportamento de uma viga independentemente do conjunto.

#### DOIS PLANOS DE SUSTENTAÇÃO

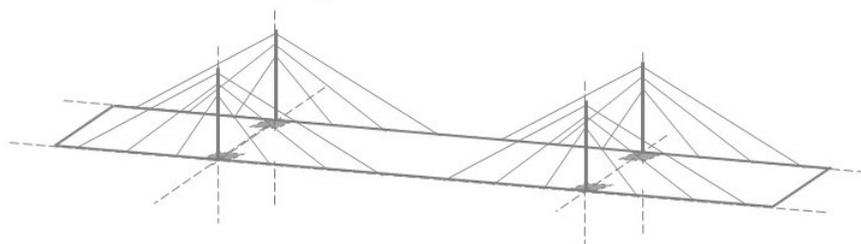


Figura 7: Exemplo do obras com dois planos de sustentação

Fonte: (Dinis, 2001)

2. Considerou-se, para a altura da viga, a mínima dimensão construtiva para fixação do estai avaliada em 1,8m, valor este avaliado em observação a projetos executados, estimativo e considerado coerente.

3. A seção da ponte está representada na Figura 10, considerando-se a mínima largura coerente para o tráfego rodoviário em vias de uma única pista.
4. Considerando a adoção de torre rígida, ou seja, que apresenta deformabilidade horizontal muito pequena, relativamente à deformabilidade do vigamento do tabuleiro, pode-se prescindir de sua representação no modelo, assumindo-se um vínculo fixo. Na evolução das análises, constatou-se que interessaria ao resultado, unicamente a componente vertical da força de protensão no estai, como representada na Figura 8. Desta forma, aplicou-se unicamente uma força vertical representando a atuação da protensão do estai.

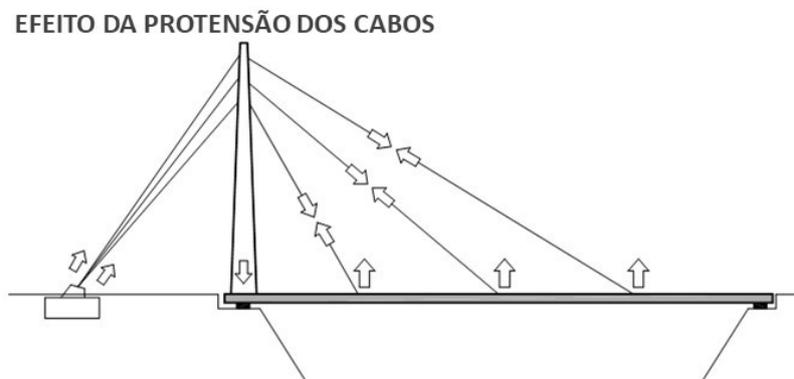


Figura 8: Componentes das forças de protensão dos estais em ponte de único vão.

Fonte: (Dinis, 2021)

5. Tendo em vista que se deseja unicamente estimar uma ordem de grandeza deste vão mínimo, não se efetuou as correções nas forças dos segmentos anteriores a cada novo estai, devido à influência nas deformações dos estais anteriores pela protensão de um novo estai. Adotou-se, por simplicidade dos cálculos, que a cada segmento novo, todas as forças aplicadas teriam o mesmo valor, aquele que anula a deformação no extremo do balanço. O apoio foi considerado engastado.
6. Considerou-se que as forças nos estais convergem para um valor constante, quando a variação entre a nova força e a anterior não superar 2%.

A construção utilizada como exemplo para o estudo de modelagem numérica foi a Ponte The Illhof Footbridge – Strasbourg, inaugurada em 1980 e que possui um esquema estrutural condizente ao que se deseja estudar. Esta possui um único vão central estaiado de 84,00m e o equilíbrio dos estais se dá por meio de um bloco de fundação que oferece um

engastamento externo e independente ao tabuleiro. O espaçamento dos estais é de 12,0m (Freyssinet, 1994), ver Figura 9.

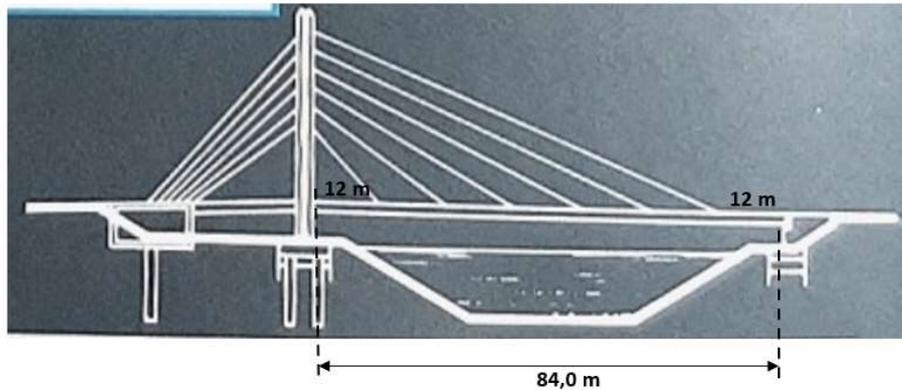


Figura 9: Perfil longitudinal do modelo estrutural adotado, como no exemplo indicado.  
Fonte: (Freyssinet, 1994)

A seção transversal proposta é constituída por duas vigas paralelas de 1,40m x 1,80m, interligadas por uma laje pré-moldada com 0,20m de espessura. As demais características da seção podem ser vistas na Figura 10.

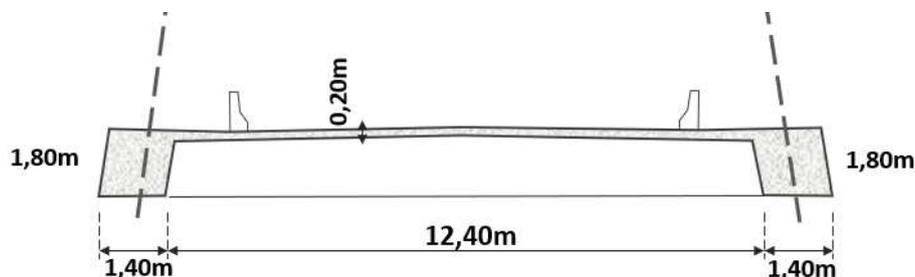


Figura 10: Seção transversal do modelo estrutural adotado  
Fonte: Autor

O peso próprio foi calculado a partir da multiplicação da área da seção transversal pelo peso específico do concreto ( $25 \text{ kN/m}^3$ ).

Todos os cálculos foram efetuados para meia seção, tendo em vista a plena simetria, tanto estrutural, como de carregamentos. O momento de inércia  $I$  da seção do calculado somente com a contribuição da viga, já que a laje é pré-moldada.

Partindo-se de um vão de 12,0m em balanço e a seção estrutural de uma viga constante de 1,8m de altura e 1,4m de largura, e considerando-se apenas o peso próprio do tabuleiro de concreto (meia laje pré-moldada + viga), aplicou-se a componente da força vertical do estai no extremo do balanço, de valor tal que anulasse a deformação, na ponta do balanço.



Figura 11 – Balanço com 12,0m e sua respectiva deformação

Fonte: O autor

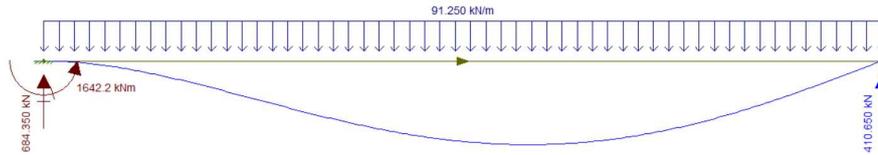
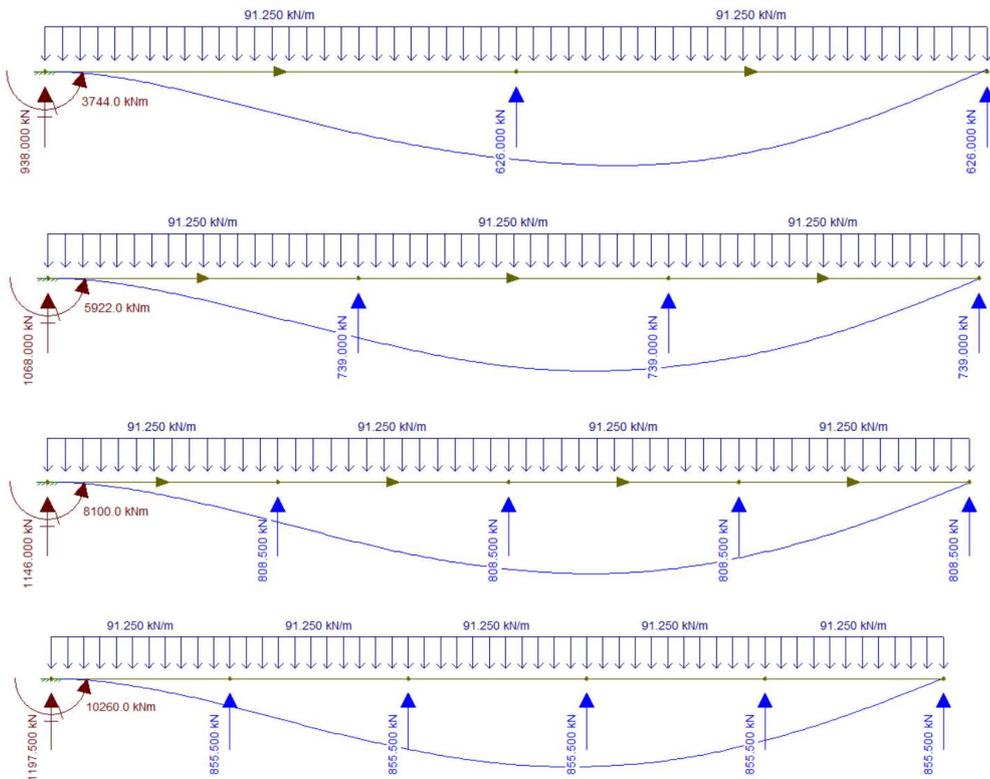


Figura 12: Balanço com 12,0m com a força vertical necessária para anular a deformação no extremo do balanço

Fonte: O autor

Repetiu-se esse procedimento de 12,0m em 12,0m até que as forças verticais aplicadas tendam a ficar constante, considerando-se um desvio em torno de 2% (figura 13).



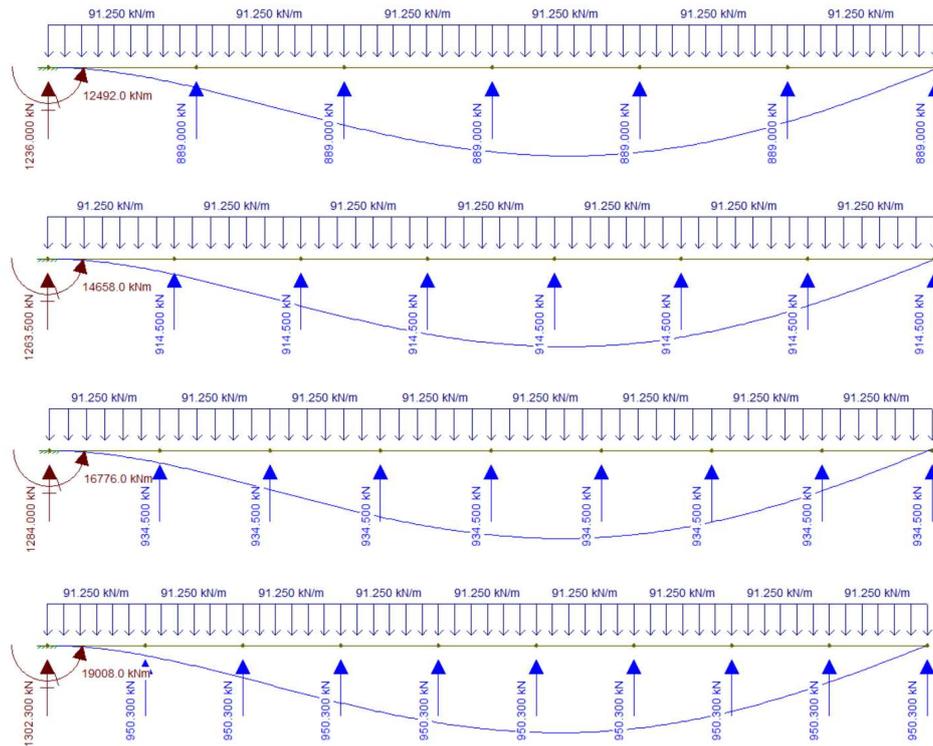


Figura 13: Balanços com 24,0m a 108,0m com as respectivas forças verticais necessárias para anular a deformação no extremo do balanço

Fonte: (Elaborado pelos autores)

Segue-se com a compilação dos resultados no Quadro 1, onde estão indicados os valores das forças verticais (estais) que se aplicadas a cada segmento de 12,0m do balanço, anulariam a deformação no extremo do balanço; os momentos que gerariam no apoio engastado e os respectivos momentos de engaste que ocorreria se o balanço fosse considerado um vão engastado-apoiado.

Quadro 1: Resultado do cálculo estático dos balanços de 12,0m a 108,0m, com as respectivas forças verticais necessárias para anular a deformação no extremo do balanço.

Fonte: O autor

VÃOS / BALANÇOS (m)	Momento Engaste Vão Estaiado (kNm)	Momento Engaste Vão Livre (kNm)	Força nos estais (kN)
12,0	1.642,2	1.642,2	410,6
24,0	3.744,0	6.570,0	626,0
36,0	5.922,0	14.782,5	739,0
48,0	8.100,0	26.280,0	808,5
60,0	10.260,0	41.062,5	855,5
72,0	12.492,0	59.130,0	889,0
84,0	14.658,0	80.482,5	914,5

96,0	16.776,0	101.120,0	934,5
108,0	19.008,0	133.042,5	950,3

Verifica-se pelos valores obtidos pelo cálculo estático com a aplicação das forças verticais esquemáticas (estais), que ocorre uma estabilização nos valores a partir de vãos na ordem de 100,0m, significando que o tabuleiro perde sua rigidez à flexão como viga de vão livre e passa a trabalhar como um tabuleiro “pendurado” pelos estais. Pode-se verificar, com estes resultados, que as pontes com aplicação de estais têm eficácia estrutural como estaiadas, a partir de vãos na ordem de 100,0m.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a aplicação da modelagem numérica utilizando o *software* Ftool para a elaboração do modelo estrutural, como indicado no esquema elucidativo da Figura 8, utilizando a altura de viga de 1,8 metros, notou-se que o sistema estrutural da ponte só se faz realmente justificável após os primeiros 48m de balanço dessa ponte, pois a partir desse comprimento, a rigidez necessária para a ponte em vão livre, ultrapassaria a resistência estrutural da seção estrutural adotada, que tem altura/vão de 1:20, considerada satisfatória pela prática do concreto protendido, referenciada por professores e profissionais da área. A partir de vãos maiores que 100m, verificou-se pela modelagem numérica, que a rigidez do tabuleiro perde sua influência na contribuição da rigidez à flexão do tabuleiro, levando-o a trabalhar como “pendurado” pelos estais. Com isso, conclui-se que a utilização dos estais se faz necessária para a sustentação do tabuleiro, para esta altura estrutural, a partir de ~40m e que a partir de ~100m, sua contribuição à resistência à flexão passa a ser praticamente constante, justificando assim, a condição de estaiada.

Verifica-se, a partir deste estudo, que pontes estaiadas de pequeno porte podem ser justificáveis estruturalmente em diversos casos, como as pontes curvas ou com estética evidenciada, indicando que sua aplicação não se limita apenas a pontes de vãos de grande porte, como sugere a literatura existente. Entretanto, é sempre necessário um estudo de custo-benefício, especialmente que indique uma análise mais aprofundada sobre a viabilidade econômica, pois o método é consideravelmente mais oneroso e sua execução mais complexa que a de uma ponte em concreto protendido convencional.

No aprofundamento deste estudo, propõe-se uma análise dimensional para comparação dos custos entre a solução convencional em concreto protendido e sua similar estaiada, mesmo que a partir de dados meramente referenciais. Este estudo traria melhores subsídios para as conclusões sobre a utilização de pontes estaiadas com pequenos vãos.

#### 4. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido. Rio de Janeiro, 2003.
- BROWN, D. J. **Bridges: Three Thousands Years of Defying Nature**. Mitchell Beazley: London, 1993.
- CHUNG, G. M. **Concepção de tabuleiros curvos e estaiados**. 100 f. Mestrado em Engenharia Civil: Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- DINIS, H. Pontes e Viadutos: uma visão de projeto. Editora Mackenzie: São Paulo, 2021.
- FREYSSINET. **Cable-Stayed Bridges**. Editado by Freyssinet. Paris, 1994.
- JODIDIO, P. **Santiago Calatrava**. Taschen: Espanha, 1998.
- LEONHARDT, F. **Construções de Concreto: Princípios Básicos da Construção de Pontes de Concreto**. Interciência, Rio de Janeiro, 1979.
- LINABO, INSTITUTO. **João Figueiras Lima – Lelé**. Editorial Blau: Lisboa, 2000.
- MATHIVAT, J. **Les ponts a cables – des origines a la conquetê des grandes portées**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CABLE-STAYED AND SUSPENSION BRIDGES, Deuville, Oct. 1994. **Proceedings**. Deuville: Société Henry, Oct. 1994. P.3 – 32.
- MAZARIM, D. M. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil**. 107 f. Mestrado em Engenharia Civil: Universidade de São Paulo, São, 2011.
- NOGUEIRA NETO, H. A. **Contribuição ao projeto de pontes estaiadas com estudo dos casos da ponte sobre o rio Pinheiros e da ponte sobre o rio Guamá**. 178 f. Mestrado em Engenharia Civil: Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- PFEIL, W. **Concreto Protendido: Processos Construtivos e Perdas de Protensão**. Editora Didática e Científica, Rio de Janeiro, 1979.
- PODOLNY, W; SCALZI, JOHN B. **Construction and Design of Cable-stayed Bridges**. Wiley-Interscience, New York, 1976.
- RILEY, William F.; STURGES, L. D.; MORRIS, D. H. **Mecânica dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- ROIG, J. **Nuevos Puentes**. Gustavo Gilli: Barcelona, 1996.
- WELLS, M. **30 Bridges**. Laurence King Publishing: London, 2002.

**Contatos:** rayellesantiago@hotmail.com e henrique.dinis@mackenzie.br