

# **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICO E ESTRUTURAL PARA PONTES ESTAIADAS DE PEQUENO PORTE**

André Melli Corrêa – andremcorrea@hotmail.com

Arthur Bene Cannizza – arthur\_cannizza@hotmail.com

Giovanna Ciccotti Parize – giovannaparize@gmail.com

Henrique Dinis (Orientador) – henrique.dinis@mackenzie.br

## **RESUMO**

As pontes estaiadas são conhecidas como uma solução construtiva comumente utilizada para grandes vãos. Porém, observa-se que também são utilizadas para situações de vãos menores. Nota-se uma lacuna de conhecimento sobre a relação entre a aplicação dessas pontes e o tamanho de vão ideal que justifique utilizar o método. Este trabalho analisa o desempenho estrutural das pontes estaiadas, especialmente as de pequeno vão; busca identificar situações em que essa opção se justifica estruturalmente para sua aplicação e não apenas como apelo estético. Mostra-se pertinente esse estudo, portanto, por apresentar, por meio de demonstrações numéricas e exemplos, constatações e justificativas para sua aplicabilidade. Para a demonstração analítica estrutural, utiliza-se o *software* Ftool, a partir da elaboração de uma simulação de um vão único sustentado por estais, onde se pesquisa um tamanho de vão mínimo em que a partir deste, o uso dos estais estaria assumindo unicamente, como função estrutural, a sustentação do tabuleiro. Nessa hipótese, a rigidez do tabuleiro não mais exerceria influência sobre sua estabilidade. A partir deste resultado, são analisadas pontes estaiadas de pequeno vão, já construídas, com o intuito de avaliar por mera observação, se o método construtivo utilizado se justifica estruturalmente e funcionalmente.

## **ECONOMIC AND STRUCTURAL FEASIBILITY STUDY FOR SMALL CABLE-STAYED BRIDGES**

### **ABSTRACT**

Stayed-cable bridges are known as a commonly used construction solution for large spans. However, it is observed that they are also used for situations with smaller spans. There is a gap in knowledge about the relation between the application of these bridges and the optimal span size that justifies using the method. This article analyzes the structural performance of cable-stayed bridges, especially those with a small span, it seeks to identify situations in which this option is structurally justified for its application and not only as an aesthetic appeal. This study is pertinent, therefore, for presenting, by means of numerical demonstrations and examples, findings and justifications for its applicability. For the calculations, this paper uses the *Software* Ftool for a simulation of a single span supported by

stays, where a minimum span size is required, and from it, the use of the stays would be assuming a structural function, the support of the deck, no longer exerting any influence, the rigidity of the deck on its stability. Based on this result, stayed-cable bridges already built are analyzed, with the intention of observe if the used constructional method justifies itself structurally and functionally.

Keywords: Stayed-cable bridges. Small spans. Structural functioning.

## 1 INTRODUÇÃO

Pontes estaiadas são estruturas suspensas por cabos que partem sempre de seu mastro até o tabuleiro. Este tipo de ponte vem sendo uma opção moderna e economicamente viável para construção com a finalidade de vencer grandes distâncias de vãos, tendo sua concepção estrutural observada desde tempos antigos, como, por exemplo, na sustentação de mastros em embarcações a vela egípcias (TROITSKY, 1977).

Nogueira Neto (2003) explica que um grande obstáculo que os engenheiros enfrentavam no início do uso dessa técnica era a dificuldade de realizar análises do comportamento estático das estruturas, devido ao conhecimento técnico e procedimentos de cálculos insuficientes para avaliar os esforços internos, além do desconhecimento sobre quais os materiais mais indicados para a construção de pontes suspensas.

O uso de estais em pontes cresceu e se aprimorou com o passar do tempo, possibilitando vencer grandes vãos de uma maneira econômica, além de possuir uma arquitetura atraente. Grande parte do aprimoramento desse tipo de construção se deve a evolução dos recursos tecnológicos, como *softwares* para a elaboração de cálculos complexos das estruturas. Antes desses avanços possibilitarem esse aprimoramento, muitas pontes estaiadas eram construídas apenas baseadas em intuição. (RIBEIRO, 2011).

Com esses avanços, surgiram inúmeros estudos que apontam o uso de estais como uma solução adequada para grandes vãos. Porém, observa-se que esta solução construtiva não se faz necessária apenas para estes casos, mas também é aplicável em situações em que é preciso vencer vãos pequenos, localizados geometricamente em curvas acentuadas ou em pontes assimétricas.

Contudo, pode-se observar que existem algumas construções de pontes com vãos pequenos em que se usam estais sem que haja uma justificativa plausível em termos construtivos. Há casos em que elas são usadas como um atrativo arquitetônico, buscando visibilidade icônica para o local ou como uma demonstração de inovação tecnológica e avanço da engenharia.

A utilização desse tipo de ponte tem sido muito procurada nos últimos anos, muito por conta do seu atrativo arquitetônico e pela possibilidade de adoção de grandes vãos. Porém, nem sempre é necessário adotar estais de protensão, pois estes acabam sendo por demais onerosos e muitas vezes,

são aplicados apenas como adorno estético, sem tanta função estrutural, em situações que outros métodos construtivos seriam mais eficientes.

Por conta da recente chegada e sua esbeltez chamativa, muitas empresas utilizam essa técnica mesmo sem saber se ela é realmente necessária. “Isso se deve principalmente ao fato de que as empresas nacionais possuem o domínio da técnica utilizada nestas pontes, e pelo fator estético que foi bem aceito pela população, que considera estas estruturas como ponto de referência e cartão postal para as cidades.” (MAZARIM, 2011, p. 79).

Com isso, pode-se observar que com a evolução dos métodos construtivos, existem inúmeras maneiras, opções e possibilidades para projetar e construir uma ponte estaiada. Porém fica como uma lacuna na literatura saber quais os critérios técnicos para se decidir sobre uma ponte estaiada de pequeno vão, em lugar de uma executada por métodos convencionais. Por isso, deve-se fazer uma análise de cada caso para constatar se esse tipo de ponte é adequado economicamente para a situação estudada.

Tem-se como objetivo, então, entender e analisar o funcionamento estrutural e as técnicas utilizadas das pontes estaiadas e por meio de um estudo numérico, buscar conceitualmente qual seria o menor vão compatível que justifique a utilização técnica de pontes estaiadas. Em seguida com este resultado, utilizando alguns exemplos de pontes estaiadas já executadas sobre pequenos vãos, averiguar as situações de cada exemplo, buscando identificar qual ponte teve a utilização dos estais justificados estruturalmente, ou seja, se houve a real necessidade da utilização dos mesmos.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

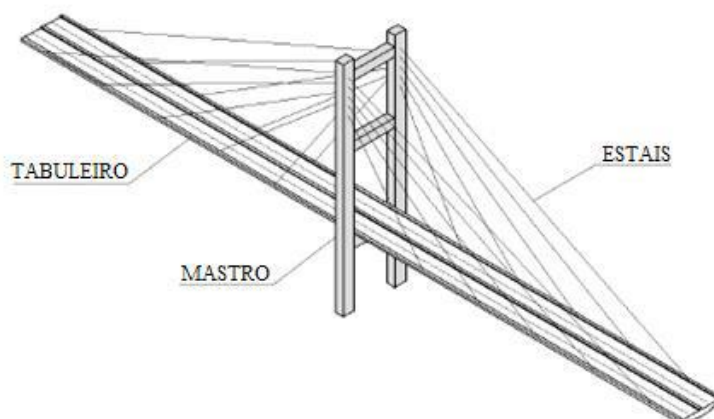
As pontes estaiadas possuem uma vasta gama de aplicações, bem como diferentes configurações possíveis. Pode-se diferenciá-las por suas tipologias, como a disposição dos estais, tipos de tabuleiro e tipos de mastros, em que em cada caso observa-se a solução mais adequada.

Para dar início a um projeto de construção de uma ponte estaiada, primeiro é necessário avaliar o local onde ela será construída, avaliando o vão a ser vencido, a capacidade da resistência do terreno para sua fundação, características funcionais, capacidade periférica para a construção do canteiro e possíveis perigos naturais (YTZA, 2009).

Após ser feito um estudo do local bem elaborado, é necessário encontrar o arranjo construtivo mais adequado a ser utilizado no caso, com o objetivo de encontrar uma maneira mais econômica e que atenda a todas as condições do local. A partir disso, os métodos construtivos e a distribuição de estais já começam a ser analisados mais a fundo.

Os componentes estruturais principais de uma ponte estaiada são: tabuleiro, mastro e estais (CHUNG, 2018) (Figura 1).

Figura 1 — Componentes estruturais de uma ponte estaiada



Fonte: Chung, 2018, p.32.

Sobre a disposição dos estais, classifica-se em disposição transversal e longitudinal. A disposição transversal diz respeito à quantidade de planos de estaiamento da estrutura. Observa-se três tipos: sistema de único plano, sistema de dois planos e sistema alternativo (NOGUEIRA NETO, 2003).

O sistema de único plano apresenta a passagem dos estais ao longo do eixo longitudinal do tabuleiro da ponte. Esse tipo de arranjo apresenta grande rigidez a torção, que surge por conta da assimetria das cargas móveis no plano transversal. Um exemplo de ponte desse tipo é a Ponte Estação Engenheiro Jamil Sabino, onde está localizada a Estação Santo Amaro da linha 5 do Metrô de São Paulo (Figura 2).

Figura 2 — Estação Santo Amaro do Metrô de São Paulo



Fonte: Protende, 2017.

O sistema de dois planos consiste na ancoragem dos estais ao longo das bordas do tabuleiro. Isso faz com que a estrutura se torne mais rígida, minimizando as deformações causadas por ações variáveis, além da redução de torção e a possibilidade de uso de um tabuleiro mais esbelto

(NOGUEIRA NETO, 2003). A Ponte Sergio Motta, em Cuiabá, apresenta esse tipo de sistema de estaiamento. (Figura 3).

Figura 3 — Ponte Sergio Motta



Fonte: Protende, 2017.

O sistema alternativo tem como característica uma distribuição atípica dos estais, o que causa um grande impacto visual e apelo arquitetônico para as obras. A Ponte sobre o rio Lerez e a Ponte Octávio Frias de Oliveira (Figura 4) são exemplos notáveis que usam desse recurso.

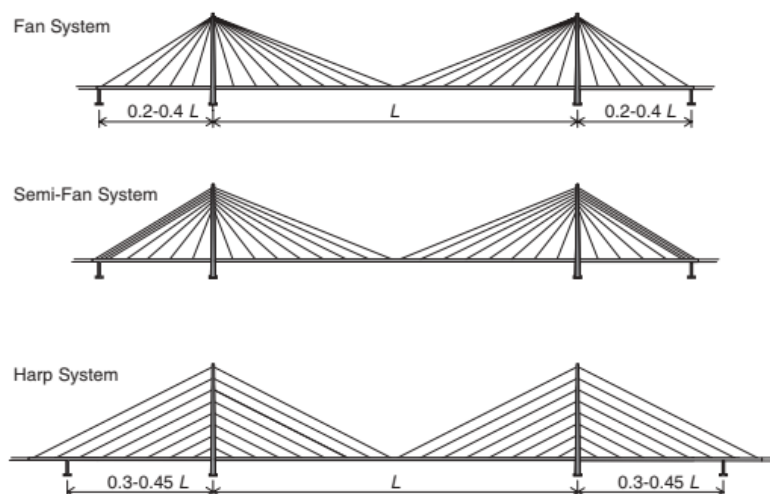
Figura 4 — Ponte Octávio Frias de Oliveira



Fonte: Marcos Leal, 2008.

A respeito da disposição longitudinal dos estais, Gimsing (2012) distingue em três diferentes tipos de configuração: leque, semileque e harpa (Figura 5).

Figura 5 — Tipos de configuração geométrica dos estais



Fonte: Gimsing, 2012, p.2.

Sobre o tabuleiro de uma ponte estaiada, tem-se duas classificações que se diferenciam pelo seu material utilizado. Após um estudo de viabilidade do projeto, se decide qual material deverá ser usado para a execução da estrutura.

Uma dessas opções é o tabuleiro metálico. Esse tipo de tabuleiro apresenta como vantagem a possibilidade de maior controle da qualidade dos materiais empregados, o que resulta em uma minimização de erros construtivos, além de apresentar maior resistência, possibilitando a execução de tabuleiros mais esbeltos (NOGUEIRA NETO, 2003). Não é tão empregado no Brasil por conta dos altos custos do material e da necessidade de mão de obra especializada, sendo esses pontos negativos do seu uso (MAZARIM, 2011).

Os tabuleiros de concreto são os mais usados, devido a sua facilidade no processo construtivo e a possibilidade de ser moldado *in loco*. Porém, apresenta resistência inferior ao metálico, o que faz com que seja necessário seções mais robustas (NOGUEIRA NETO, 2003).

Os mastros de uma ponte estaiada são a estrutura vertical na qual recebe o carregamento atuante do tabuleiro através dos estais. Os tipos utilizados são: simples, duplos e pórticos (NOGUEIRA NETO, 2003).

O mastro simples é caracterizado por suportar apenas um único plano transversal de estais. Sua torre geralmente é formada por uma seção celular. Assim, possuem uma maior rigidez em relação a deformações formadas por ações naturais. Um exemplo de ponte a ser citada é ponte Beeckerwerth a na Alemanha (Figura 6).

Figura 6 — Ponte Beeckerwerth, sobre o rio Reno



Fonte: Structurae, 2010.

O mastro do tipo duplo (ou gêmeos) tem como característica a presença de dois planos transversais de estais. Possui os mesmos aspectos estruturais de uma ponte com mastro simples. Um dos exemplos que pode ser citado é a ponte L'aire des Champs d'Amour, na França (Figura 7).

Figura 7 — Ponte L'aire des Champs d'Amour



Fonte: Structurae, 2002.

O último tipo a ser citado é o mastro pórtico, que tem como característica uma formação transversal composta por duas torres contraventadas entre si. Esse tipo de mastro é dividido entre algumas variações. As mais utilizadas são a do tipo portal (torres unidas por vigas de travamento) (Figura 8), pórtico “A” (ligadas em sua extremidade) (Figura 9) e a delta (ligadas em seu meio e formando um prolongamento vertical) (NOGUEIRA NETO, 2003).

Figura 8 — Ponte Sergio Motta (tipo portal)



Fonte: Protende, 2017.

Figura 9 — Ponte Fred Hartman (pórtico “A”)



Fonte: AECOM, 2021.

Como verificou-se, as pontes estaiadas se tratam de estruturas de protensão externas através de cabos (estais), fixados em sua torre, sustentando o seu tabuleiro. Foi demonstrado também que existem várias maneiras de se executar os seus cabos, seus mastros e seus tabuleiros, seja pela forma de distribuição, formato estrutural, ou material. Em seguida, deve-se levar em consideração qual o método construtivo a ser utilizado na ponte estaiada, que também por sua vez, existem algumas opções para cada tipo de situação.

## 2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE PONTES PELO MÉTODO CONVENCIONAL

Existem inúmeros métodos construtivos quando se diz respeito a pontes estaiadas, porém com o passar do tempo, históricos de construções e a evolução da tecnologia na área, se sobressaíram três métodos que se tornaram os mais utilizados. São eles: cimbramento geral, balanços sucessivos moldados *in loco* e balanços sucessivos com elementos pré-moldados.

O método mais convencional na construção de pontes em concreto é o de cimbramento geral. É subdividido em cimbramento fixo e cimbramento móvel. Esse método consiste na construção de uma estrutura moldada *in loco* com a utilização de apoios para a sustentação durante sua execução. Para que seja possível sua construção, elas são feitas sobre locais onde não possuem nenhum obstáculo (rios) ou construções (rodovias e ferrovias) que possam impedir seu cimbramento. Também é necessário que sejam feitas em locais onde não há uma altura significativa (YTZA, 2009).

No cimbramento fixo, as escoras são desmontadas após a sua utilização. Normalmente são feitas de madeira, treliças ou vigas metálicas. Nesse tipo, as escoras podem ou não ser utilizadas em outras partes da construção após seu uso não ser mais necessário no trecho.

Já no cimbramento móvel, as escoras são executadas com dispositivos que permitem a locomoção do cimbramento, sem que este seja desmontado, após a execução de um trecho da ponte (YTZA, 2009).

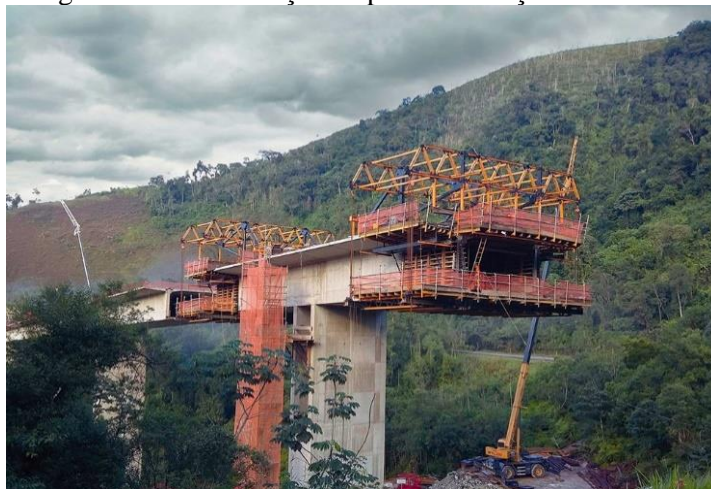
Atualmente, essa solução estrutural é considerada muito complexa e dispendiosa, já que para realizar o cimbramento de uma ponte é preciso uma grande quantidade de materiais de escoramento e uma mão de obra especializada, trazendo um custo bastante elevado à construção. Assim, ao longo do tempo foram sendo desenvolvidos outros métodos, atendendo a princípios de racionalização e facilidades construtivas.

Na evolução dos sistemas construtivos, em métodos para o concreto moldado *in loco*, surge o de balanços sucessivos (Figura 10). Nesse tipo de construção, não há necessidade da utilização de escoras e seus tabuleiros são executados em sua própria obra. São realizadas a partir de aduelas protendidas com formas móveis, tornando possível o deslocamento para moldar suas estruturas ao longo de sua construção. A execução de pontes estaiadas por este método nada se difere



construtivamente de sua forma convencional com protensão interna, unicamente, que se cria uma atividade a mais, que é a introdução e protensão dos estais.

Figura 10 — Construção de pontes balanços sucessíveis



Fonte: ULMA C y E, S.Coop., 2018.

Sua execução, na forma convencional, geralmente é realizada em locais onde é necessário vencer vãos que possuem uma grande altura, sobre rios de alta velocidade de correnteza ou sobre rodovias com uma grande quantidade de tráfego, em que não é possível a utilização das escoras para a sua sustentação (YTZA, 2009). Quando estaiada, unicamente é utilizada para vãos maiores. Esse método é considerado muito flexível e possui uma alta produtividade, trazendo uma redução no custo com a mão de obra e com a reutilização das formas.

Um dos empecilhos dessa técnica é a influência da cura e resistência do concreto, já que pode acontecer deformações nas partes concretadas. Com a construção sendo realizada a partir de aduelas, as flechas causadas pelo concreto podem resultar uma diferença de nível na hora de seu fechamento (YTZA, 2009).

Já o método de balanços sucessivos com elementos pré-moldados consiste na utilização de aduelas pré-moldadas, feitas no próprio canteiro de obra. Sua construção é a mais viável economicamente, já que, com as duelas pré-moldadas, existe um ganho de velocidade na construção, não sendo necessário o uso de formas nem escoramento e tem uma redução na mão de obra. Este método foi o escolhido para utilizado neste estudo.

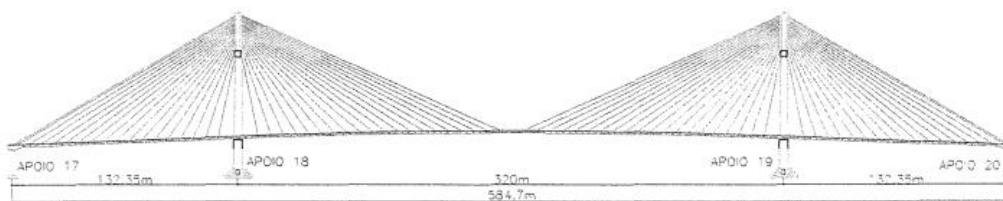
Apesar de seus pontos positivos, por ser uma estrutura muito flexível, deve-se analisar alguns tipos de situações. De acordo com Claudio (2010), “(...) este sistema sofre influência de problemas relacionados à fluência e retração do concreto e à relaxação do aço, que causam deformações elásticas e plásticas, levando a dificuldades no momento do fechamento da estrutura”.

## 2.2 PONTES ESTAIADAS PELO MÉTODO CONSTRUTIVO DE BALANÇOS SUCESSIVOS

O método de balanços sucessivos para a construção de pontes estaiadas consiste na utilização da mesma sequência executiva estrutural de uma ponte convencionalmente executada pelo método dos balanços sucessivos, reduzindo-se, no entanto, ou mesmo eliminando-se a protensão interna do tabuleiro, que é substituída pelo efeito de suspensão causado pelos estais, que são aplicados à medida que avança o balanço que formará o vão.

Um bom exemplo de construção da ponte estaiada em balanços sucessivos em concreto, que pode ser citado é a do Rio Guamá, localizada em Belém – PA (Figura 11). Ela possui uma grande importância para a região, já que interliga toda a região metropolitana da capital do estado do Pará, tirando as necessidades do uso das balsas fluviais. Sua construção se deu início no ano de 2000 e foi inaugurada após dois anos de obra. A ponte possui um comprimento total de 584,7 metros, tendo um vão central de 320 metros, equilibrado por outros dois vãos adjacentes de 132,35 metros, dois mastros de estaiamento de 76,2 metros de altura e mais dois apoios extremos (NOGUEIRA NETO, 2003).

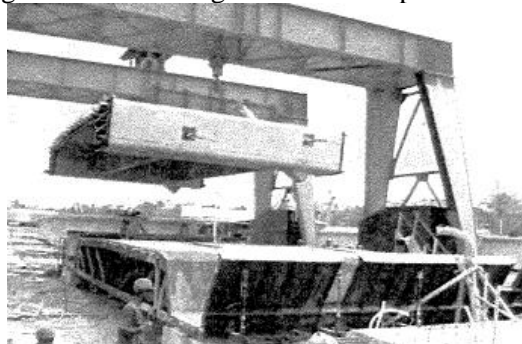
Figura 11 — Características gerais da ponte sobre o Rio Guamá



Fonte: Nogueira Neto, 2003, p.94.

De início, a obra seria executada por meio de balanços sucessivos e com tabuleiros moldados *in loco*. Porém, pela necessidade de reduzir o prazo de entrega, optou-se por mudar a metodologia e utilizar tabuleiros pré-moldados. Suas aduelas foram moldadas com 14,20 metros de largura e 7,20 metros de comprimento, totalizando 68 segmentos (NOGUEIRA NETO, 2003) (Figura 12).

Figura 12 — Montagem de aduelas pré-moldadas



Fonte: Nogueira Neto, 2003, p.115.

Suas estruturas foram executadas com concreto 40 MPa, fazendo com que a desforma seja feita após 12 horas e dando início a protensão de suas transversinas. Com o término de sua montagem a aduela é transportada para o pátio de estocagem. Diferente das aduelas, o início da montagem do

tabuleiro é feito de outra maneira, sendo executado pelo método de cimbramento (Figura 13) nos seus 27 metros iniciais.

Figura 13 — Cimbramento no início da montagem do tabuleiro da Ponte sobre o Rio Guamá



Fonte: Nogueira Neto, 2003, p.115.

Após sair da estocagem, as aduelas são transportadas por pórticos móveis sobre trilhos até o local de embarque, onde são movidas por flutuantes até o local pré-estabelecido. Em seguida, essas aduelas são içadas através de macacos hidráulicos e elevadas em uma altura de 24 metros. A partir disso, elas são precisamente posicionadas e interligadas com a estrutura por meio de suas barras (Figura 14) (NOGUEIRA NETO, 2003).

Figura 14 — Içamento de aduelas ponte sobre o Rio Guamá

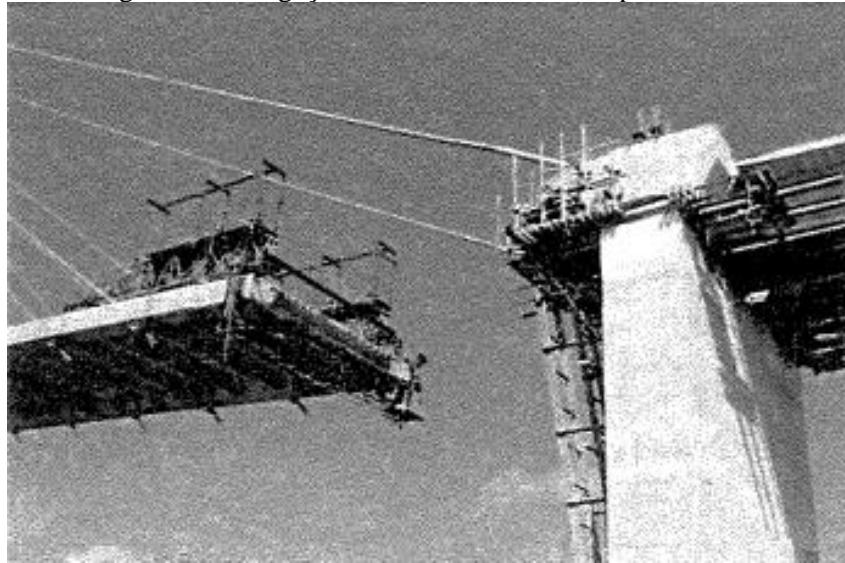


Fonte: Protende, 2017.

Logo após a ligação das aduelas, é realizado a forma e armação em um trecho de 40 centímetros, que é responsável pela ligação do próximo segmento. Com o término da junção dos segmentos, se dá início a ligação dos estais para a suspensão das estruturas e dar continuidade a execução do tabuleiro (NOGUEIRA NETO, 2003).

Em seus apoios extremos foram feitas aduelas moldadas *in loco* sobre cimbramento metálico, e utilizados dois pares de estais. O par de estais ancorado na estrutura do pilar foi tensionado antecipadamente, com o intuito de minimizar deformações sobre a torre. O outro par, localizado na penúltima aduela do tabuleiro, só foi tensionado após a execução de trecho de junção (Figura 15).

Figura 15 — Ligação do tabuleiro com seu apoio externo



Fonte: Nogueira Neto, 2003, p.121.

Após isso, foi moldada uma única aduela responsável pelo fechamento e vão central, em que unia os trechos formados por balanços sucessivos. (Figura 2.17). Com o término, a ponte deu finalidade ao serviço de pavimentação e, com os estais retensionados, se possibilitou a abertura para o tráfego (NOGUEIRA NETO, 2003).

Figura 16 — Construção da ponte estaiada sobre o Rio Guamá



Fonte: Protende, 2017.

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente, foram efetuadas pesquisas bibliográficas para embasar o tema em questão e buscar referências sobre pontes executadas, em concreto e sua sistemática construtiva. Foram investigados as técnicas executivas e os procedimentos para o cálculo estrutural, considerando apenas as abordagens principais.

A parte prática do trabalho corresponde a um estudo de modelagem numérica, onde se buscou um valor mínimo de vão para uma ponte estaiada em que os estais se justificam tecnicamente, por demonstração conceitual. Como método de trabalho, se lançará um modelo teórico, com cálculos

elaborados pela teoria linear, simulando uma ponte com dois vãos simétricos e engastados em um apoio central, havendo uma torre virtual com vinculação indeslocável (rígida) para os estais, na horizontal. No desenvolvimento da rotina dos cálculos, se considerará, somente um dos vãos, já que são simétricos, como também, somente a componente vertical da força imposta pela protensão do estai, lançando-se um estai na extremidade de cada nova aduela lançada, cuja força de protensão anule a deformação vertical, pela ação unicamente do peso-próprio. Assim, somente se considerará a componente vertical da força, em sua primeira ação de deslocabilidade, ou seja, irá se desprezar a contribuição da deslocabilidade do cabo na sequência executiva. A seguir se prolongará o balanço em mais uma aduela, também com 5,0 metros, mantendo a força inicial inalterada e lançando-se na extremidade, mais uma força, também com a finalidade de zerar a deformação final na extremidade desta segunda aduela. Reforçando, não se considerou a correção das forças dos cabos anteriores, ou seja, os afrouxamentos não serão utilizados no cálculo. Esta sistemática se repetirá, até que as forças que zeraram as deformações em cada etapa, tenderem a um valor constante. A este comprimento acumulativo do balanço corresponde teoricamente ao vão, a partir do qual, o tabuleiro estará suspenso pelos cabos, ou seja, justificando a atuação dos estais.

Por fim, é efetuada uma análise de viabilidade técnica e econômica a alguns exemplos de pontes estaiadas existentes, analisando quais os possíveis benefícios diretos e indiretos que a utilização de estais poderia trazer para a obra, se comparando com outro método construtivo. Também com essa análise, será feita uma analogia ao resultado do experimento numérico, comparando-se o valor de vão mínimo calculado pela simulação aos vãos das pontes analisadas, avaliando-se uma justificativa técnica-estrutural para o uso de seus estais.

## 4 ESTUDO DE CASO

A princípio, foi iniciado pela simulação no *software* Ftool o estudo numérico, seguindo-se da aplicação dos resultados na análise de algumas pontes de pequenos vãos.

### 4.1. ESTUDO DE MODELAGEM NUMÉRICA

A obra escolhida como parâmetro dimensional para o estudo de modelagem numérica foi a Ponte de Porto de Alencastro, sobre o Rio Paranaíba. Essa possui um vão central de 350 metros, uma altura de viga de 1,5 metros e aduelas com altura de 1,5 metros, 5 metros de comprimento e 16 metros de largura (DINIS, 2021). Pela relação vão/espessura do tabuleiro, verifica-se tratar-se de espessura mínima. Seu peso próprio foi calculado a partir da multiplicação da área da seção transversal pelo peso específico do concreto ( $\gamma_c = 19 \text{ kN/m}^3$ ), resultando em um valor da carga distribuída de  $195 \text{ kN/m}^2$ .

Partindo-se de um vão de 5 metros em balanço e uma viga constante de 1,5 metros de altura, considerando apenas o peso próprio do tabuleiro de concreto, aplicou-se as forças na extremidade do

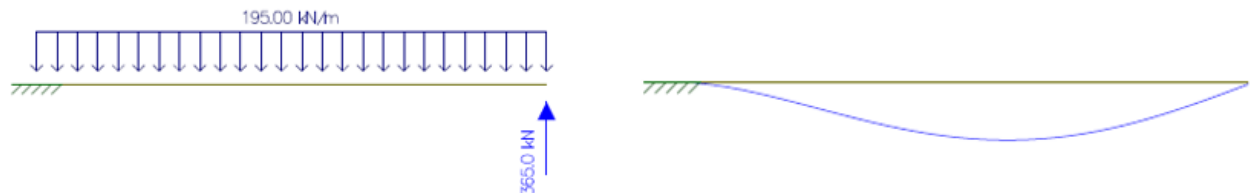
balanço assim formado e foi obtido o resultado das deformações (figura 17). Com o intuito de anular a referida deformação, foi sucessivamente aplicada uma força vertical na extremidade do balanço, que anulasse a deformação (figura 18).

Figura 17 — Balanço com 5 metros e sua respectiva deformação



Fonte: (Elaborado pelos autores)

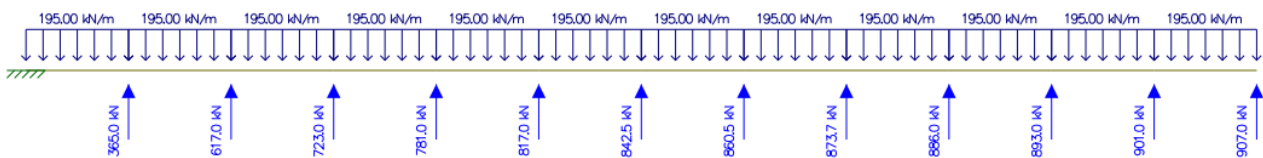
Figura 18 — Balanço com 5 metros com força vertical e a deformação anulada



Fonte: (Elaborado pelos autores)

Repetiu-se esse procedimento de 5 em 5 metros até que as forças verticais aplicadas tendessem a ficar constante (figura 19 e 20).

Figura 19 — Balanço com 60 metros com as respectivas forças verticais



Fonte: (Elaborado pelos autores)

Figura 20 — Esquema das deformações no balanço assumido com 60 metros, representando o limite da ação da rigidez do tabuleiro na rigidez do vão



Fonte: (Elaborado pelos autores)

## 4.2 DISCUSSÃO

Verificou-se nesse estudo, que para a execução de um balanço, em segmentos sucessivos, a rigidez do tabuleiro começa a perder sua influência no avanço do balanço, a partir do comprimento do balanço que alcance 20 vezes a altura do tabuleiro e de sua inércia correspondente (interpretação dos valores da experimentação). Nesse caso, com a altura do tabuleiro constante, de 1,5 metros, a rigidez do tabuleiro começou a perder sua influência nos seus primeiros 30 metros. A partir desta

relação “comprimento de balanço / espessura do tabuleiro”,  $L/e = 20$ , interpreta-se que são os estais que sustentariam os incrementos de aumento de vão.

Demonstra-se, assim, de forma simplista, que para o conceito de ponte sustentada por estais, estes se justificam para valores de balanço acima daqueles que ultrapassam esta relação,  $L/e = 20$ , mantendo-se a altura da viga constante. Desta forma, para um tabuleiro contínuo, em que o vão central é formado por dois balanços opostos, o valor deste vão central será o dobro do comprimento do balanço, ou seja, valendo-se da relação “comprimento de balanço / espessura do tabuleiro”, chega-se a um valor para a espessura de 1/40 do vão central, referindo-se ao vão encontrado na simulação numérica de 60,0 m. Mantêm-se, a partir de valor de vão, uma espessura constante.

Por experimentações práticas, em tabuleiros executados em balanços sucessivos, como em vigas contínuas protendidas, com protensão interna, a altura de uma viga contínua corresponde a 1/20 do vão central, metade do encontrado no experimento em questão, mas com uma redução de altura em direção do vão, através de uma curvatura parabólica, do apoio para o centro do vão. Desta constatação, verifica-se, como decorrência, que a altura da viga para os balanços que formam o vão central, para o vão de 60,0 m, será de 1/10 do comprimento do balanço (DINIS, 2021).

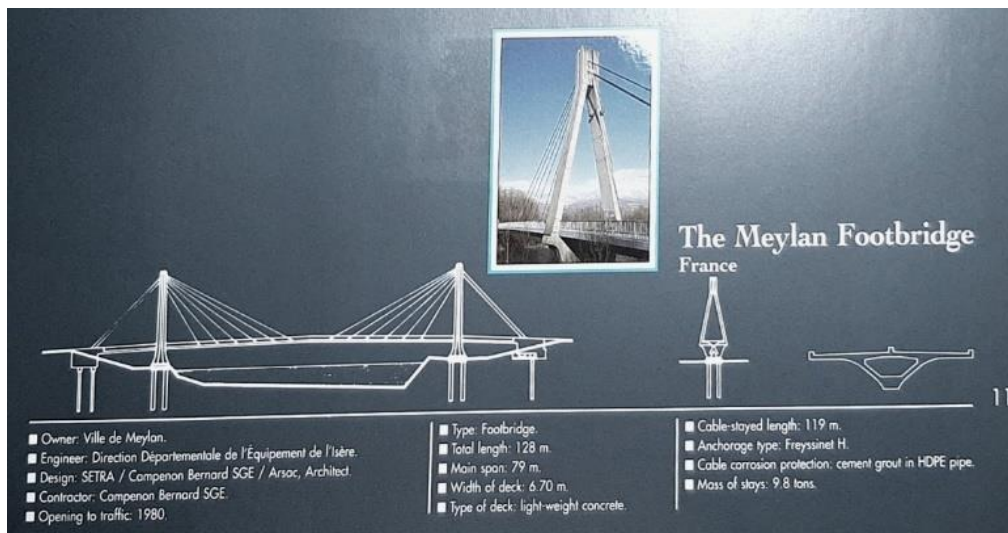
De forma geral, a altura da viga de uma ponte estaiada é reduzida de 1 a 10 vezes, em relação a uma ponte em balanço sucessivo de concreto protendido, referindo-se à altura da viga na região do apoio, dependendo do valor do vão, já que para as pontes estaiadas, a espessura do tabuleiro é invariável, variando de 1,5 a 2,0 m, por razões construtivas ou de aerodinâmica. Assim, após este valor do vão, 60,0 m, a relação “altura da viga/comprimento do vão” se mantém para as pontes em balanços sucessivos e as pontes estaiadas têm a altura da viga constante (DINIS, 2021).

#### 4.3 ANÁLISE DE PONTES EXEMPLOS DE PEQUENO VÃO

As pontes estudadas foram obtidas do livro de reportagem de obras realizadas pela empresa Freyssinet Internacional (FREYSSINET, 1994).

##### 4.3.1 Ponte: The Meylan Footbridge

Trata-se de uma ponte com três vãos contínuos e um vão central de 79 metros. Em balanços sucessivos convencional, o vão central teria nos apoios 4 metros de altura, considerando a relação de altura da viga por comprimento do vão de 1:20, decrescendo para o centro do vão a 2 metros. Já em pontes estaiadas esta ponte poderia ter a altura da viga de 1,5 metros, como verificado nos estudos numéricos. Haveria um ganho significativos na altura média estrutural. Mas também, verifica-se que a passarela implantada tem seu piso junto à superfície do terreno. Se executada em balanços sucessivos usando concreto protendido convencional, seria necessário altear seu passeio por rampas ascendentes com 2,5 metros acima do executado.



Fonte: Freyssinet, 1994.

### 4.3.2 Ponte: The Illhof Footbridge

Trata-se de uma ponte de 83,5 metros de comprimento, com um vão central em balanço (até o vínculo com o apoio) de 63,5 metros. Caso fosse usado o método de balanços sucessivos, na proporção já mencionada anteriormente, o vão em balanço teria que ter uma altura da viga aproximadamente de 6 metros no apoio, correspondendo à relação de altura de viga pelo vão de 1:10 para vão duplo. Já em pontes estaiadas, a altura de viga continua poderia ser de 1,5 metros, reduzindo-se drasticamente a altura da viga. Se executada em balanços sucessivos, seria necessário altear por rampas ascendentes com 4,5 metros acima de seu piso, já que a ponte estaiada se dá início a partir do mesmo nível do terreno com uma altura de viga de 1,5 metros, o que iria onerar significativamente as obras dos acessos à ponte.

Figura 22 — Ponte The Illhof Footbridge



Fonte: Freyssinet, 1994.

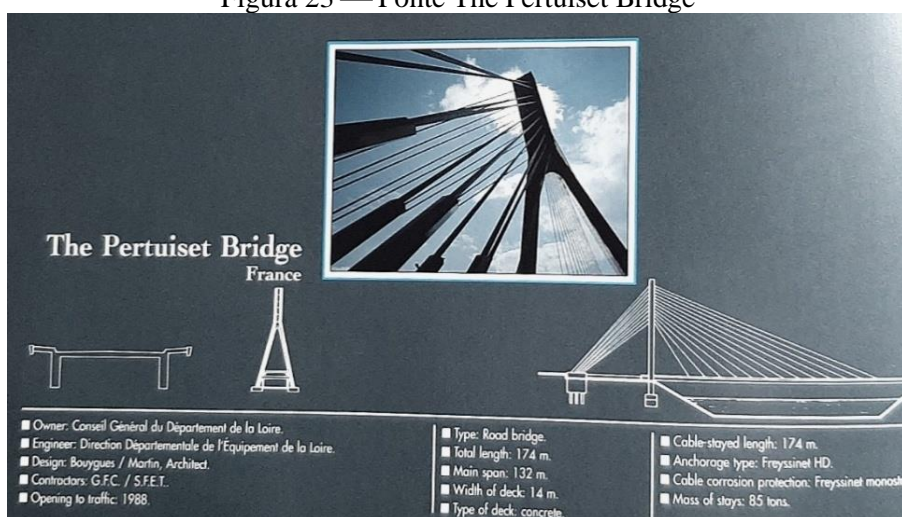
### 4.3.3 Ponte: The Pertuiset Bridge

Trata-se de uma ponte de 174 metros de comprimento, com um vão em balanço de 122 metros. Utilizando o método de balanços sucessivos, sua altura de viga no apoio, acompanhando as



considerações de caso anterior, seria de aproximadamente 13 metros e em sua extremidade, a viga teria aproximadamente 7 metros de altura. Já em pontes estaiadas, a altura de viga contínua poderia ser de 1,5 metros, tendo uma diferença de 11,5 metros em uma ponte protendida, justificando assim, sem grandes análises de comparação de custos a escolha dos estais na ponte.

Figura 23 — Ponte The Pertuiset Bridge

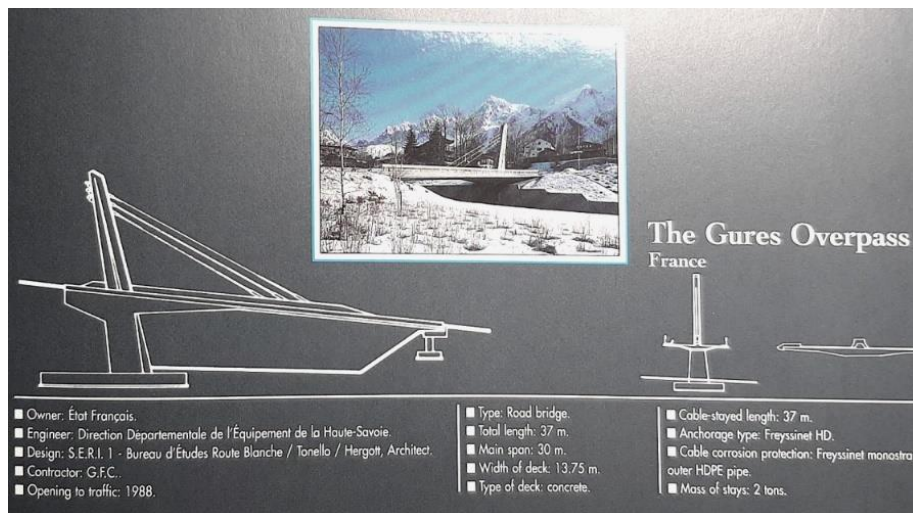


Fonte: Freyssinet, 1994.

#### 4.3.4 Ponte: The Gures Overpass

Trata-se de uma ponte de 37 metros de comprimento, com um vão em balanço de 30 metros (Figura 24). Caso fosse usado o método de balanços sucessivos, o vão do balanço teria que ter uma altura da viga aproximadamente de 1,5 metros na extremidade e 3 metros no apoio. Analisando a solução estrutural adotada, a ponte estaiada apresenta poucos ganhos em espessura estrutural, notando-se que a diferença é mínima para uma ponte protendida e que aos 30 metros de balanço a rigidez do tabuleiro ainda teria influência. Tecnicamente, o uso de estais são pouco justificáveis, neste caso. Verifica-se, pelas evidências, que a solução estaiada foi adotada em grande parte, pelo efeito estético.

Figura 24 — Ponte The Gures Overpass

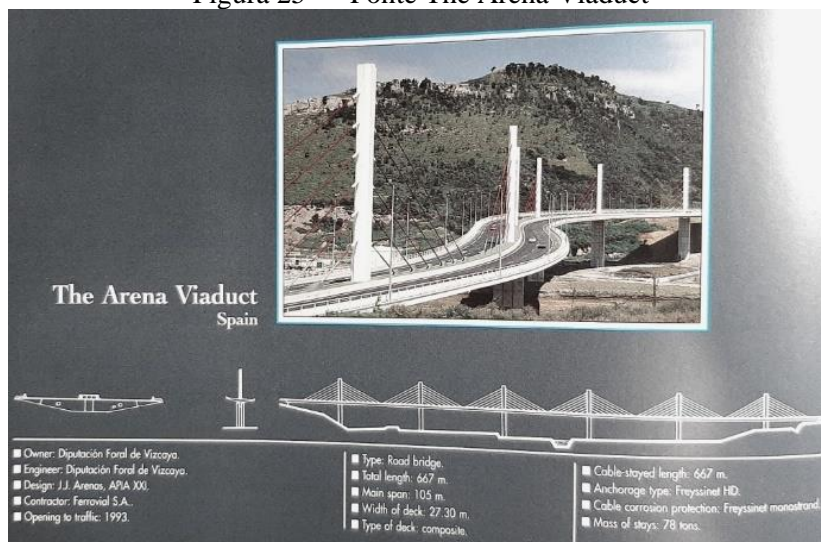


Fonte: Freyssinet, 1994.

#### 4.3.5 Ponte: The Arena Viaduct

Trata-se de uma ponte com sete vãos contínuos, com cinco vãos central de 105 metros (Figura 25). Utilizando o método de balanços sucessivos, o vão central teria nos apoios aproximadamente cinco metros de altura e na região central do vão teria aproximadamente 2,5 metros. Utilizando as pontes estaiadas, a altura de viga executada tem uma altura próxima de 1,5 metros, tendo uma diferença significativa de 3,5 metros para a pretendida. Mas, a maior justificativa técnica para o uso de estais é o formato curvilíneo da ponte, onde o método ajuda a vencer seus vãos, absorvendo mais facilmente, os esforços torcionais sobre o tabuleiro.

Figura 25 — Ponte The Arena Viaduct



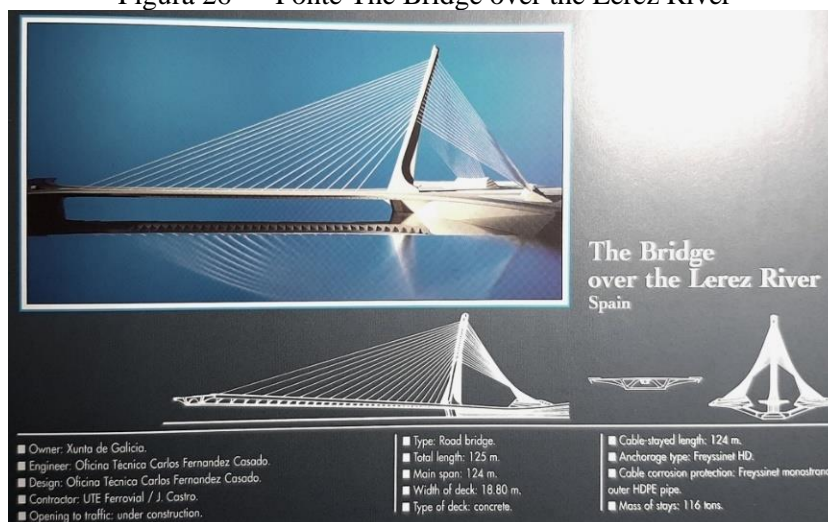
Fonte: Freyssinet, 1994.

#### 4.3.6 Ponte: The Bridge over the Lerez River

Trata-se de uma ponte de 125 metros de comprimento, com um balanço de 124 metros (Figura 26). Utilizando o método de balanços sucessivos, sua altura de viga no apoio seria de aproximadamente 12 metros e em sua extremidade a viga teria aproximadamente 6 metros de altura. Já em pontes estaiadas, a altura de viga contínua poderia ser de 1,5 metros, tendo uma diferença de

10,5 metros relativamente a uma ponte protendida, justificando assim a escolha dos estais na ponte. Caso fosse executada pelo método dos balanços sucessivos, seria necessário altear por rampas ascendentes com 10,5 metros acima de seu piso, já que a ponte estaiada tem seus encontros a partir do mesmo nível do terreno, com uma altura de viga sensivelmente menor.

Figura 26 — Ponte The Bridge over the Lerez River



Fonte: Freyssinet, 1994.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As obras estaiadas têm sido aplicadas para pontes com vãos cada vez, maiores. Aos poucos, por sua simplicidade executiva, vêm substituindo as pontes em solução pênsil. No entanto, verifica-se que sua utilização para vãos médios ou pequenos também tem se tornado frequente. Nos casos de geometrias irregulares, como: não simetria entre pilares; vãos não proporcionados entre si; curvaturas horizontais muito acentuadas, a alternativa estaiada torna a obra tecnicamente viável, estruturalmente ou funcionalmente e, muitas vezes, mais econômica, mesmo que indiretamente.

Demonstrou-se, neste trabalho, a partir da aplicação da modelagem numérica utilizando o *software* Ftool para a elaboração do modelo estrutural, inspirado na Ponte de Porto de Alencastro, utilizando a altura do tabuleiro de 1,5 metros, notou-se que o sistema estrutural da ponte só se faz realmente justificável após os primeiros 30 metros de balanço lançado por este método, verificando-

se, que a partir desse comprimento, a rigidez do tabuleiro perde sua influência. Com isso, pode-se concluir que a estabilidade estrutural, para valores maiores dos vãos, é conseguida a partir da utilização dos estais, por meio da sustentação do tabuleiro.

Demonstra-se, a partir desse exemplo, de forma simplista, que o vão mínimo para pontes estaiadas em que o uso dos estais se justifica estruturalmente é de 20 vezes a altura da viga considerada. Utilizando essa relação “altura de viga/comprimento do vão” obtida, foi realizada uma análise de seis pontes estaiadas de pequeno porte, visando analisar quando o uso de estais é justificável para cada ponte. A análise foi efetuada por meio da avaliação de ganhos indiretos, como exemplo, geometria da obra, estabilidade diante de curvas horizontais e outros fatores nesta direção, já que um comparativo entre custos é específico e particular a cada projeto.

Dentre as pontes analisadas, pode-se constatar que em cinco delas o uso dessa técnica construtiva foi justificável estruturalmente, pois levando em conta a relação considerada para esse estudo, notou-se que os estais estavam exercendo uma função na sustentação do tabuleiro. Foi observado que apenas em uma delas, a ponte estaiada The Gures Overpass, o uso de estais não se justificou estruturalmente, já que o comprimento de seu vão é pequeno.

Conclui-se a partir dessa análise que pontes estaiadas de pequeno porte podem ser justificáveis estruturalmente em diversos casos, mostrando que sua aplicação pode ser vantajosa tecnicamente, não se limitando a apenas pontes de vãos de grande porte. Entretanto, é necessário um estudo que faça uma análise mais profunda sobre a viabilidade econômica, pois o método é consideravelmente mais caro e sua execução mais trabalhosa que a de uma ponte em concreto protendido.

## REFERÊNCIAS

- CHUNG, Gabriela Mariana. **Concepção de tabuleiros curvos e estaiados**. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-24042018-141447/pt-br.php>. Acesso em: 19 abr. 2021.
- CLAUDIO, Renato Gadêlha. **Tipologia das pontes estaiadas com tabuleiro de concreto**. 2010. 76 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- DINIS, Henrique. **Pontes e viadutos: uma visão de projeto**. São Paulo: Editora Mackenzie, 2021. 196 p.
- FREYSSINET. **Cable-stayed Bridges**. Report-Book. GRAPH 2000: France, 1994.
- GIMSING, Niels J.; GEORGAKIS, Christos T. **Cable Supported Bridges: concept and design**. 3. ed. Lyngby: John Wiley & Sons Ltd, 2012. 512p.
- MAZARIM, Diego Montagnini. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de

Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04112011-144914/pt-br.php>. Acesso em: 20 abr. 2021.

NOGUEIRA NETO, Heitor Afonso. **Contribuição ao projeto de pontes estaiadas com estudo dos casos da ponte sobre o rio Pinheiros e a ponte sobre o rio Guamá**. 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258459>. Acesso em: 19 abr. 2021.

RIBEIRO, Catão. **Ponte estaiada é indicada para vencer grandes vãos**. 2011. [Entrevista concedida a] Portal AECweb. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/ponte-estaiada-e-indicada-para-vencer-grandes-vaos/11725>. Acesso em: 04 maio 2021.

TROITSKY, M. S. **Cable-stayed bridges: theory and design**. 2. ed. London: Crosby Lockwood Staples, 1977. 385 p.

YTZA, María Fernanda Quintana. **Métodos construtivos de pontes estaiadas - estudo da distribuição de forças nos estais**. 2009. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-26012009-154659/pt-br.php>. Acesso em: 04 maio 2021.