

ANÁLISE DE UMA PONTE ESTAIADA COM DIFERENTES DISPOSIÇÕES DOS ESTAIS

ANALYSIS OF A CABLE STAYED BRIDGE WITH DIFFERENT CABLE ARRANGEMENTS

ANÁLISIS DE UN PUENTE ATIRANTADO CON DISTINTAS DISPOSICIONES DE CABLES

Lara Rúbia Tranin de Almeida¹; Jorge Rodrigues²

¹ Universidade Federal de Pelotas - laraubiaturanin@hotmail.com

² Universidade Federal de Pelotas - jorger@ufpel.edu.br

Resumo: As pontes estaiadas permitem transpor grandes vãos, utilizando seções estruturais mais esbeltas, econômicas e leves com arranjos construtivos esteticamente agradáveis, sendo assim um tipo de ponte muito adotado hoje em dia. Quanto à sua concepção estrutural, são inúmeras as formas de dispor os seus estais, sendo importante compreender como esses elementos estruturais influenciam o comportamento global da estrutura. Neste artigo analisa-se o efeito de diferentes disposições dos estais sobre os esforços que são gerados na estrutura de uma ponte estaiada. Para isso, são desenvolvidos modelos de análise, tendo como base a ponte estaiada do Rio Negro, localizada em Manaus, no estado do Amazonas. O estudo parte da modelagem considerando a disposição dos estais que mais se assemelha ao projeto efetivamente executado, sendo depois feitas as alterações necessárias para consideração de outras duas disposições alternativas dos estais, em harpa e em leque. Faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos para cada uma das disposições dos estais. O trabalho desenvolvido permite concluir que a disposição dos estais adotada na ponte efetivamente construída se configura como a mais satisfatória e adequada.

Palavras-chave: Ponte estaiada. Disposição dos estais. Modelagem. Análise estrutural.

Abstract: Cable stayed bridges allow large spans, using slender, economical, and light structural sections with aesthetically pleasant constructive arrangements, therefore they are a type of bridge which is being increasingly adopted today. As for their structural design, there are innumerable ways of arranging their cables, so it is important to understand the influence of those elements in the overall behavior of the structure. The present paper presents an analysis of the effect of different stay arrangements on the internal forces that are generated in the structure of a cable stayed bridge. For such purpose, analysis models are developed, based on the Rio Negro cable stayed bridge, located in Manaus, in the state of Amazonas. The study starts from the modeling of the cable arrangement adopted in the actually built bridge, and then the necessary modifications are made to model other two alternative stay arrangements, harp and fan. A comparative analysis of the results obtained with the developed models is made. The original concept of the bridge, with the semi-fan stay arrangement, is then verified to be the most satisfactory and adequate among the analyzed alternatives.

Key words: Cable-stayed bridge. Cable arrangement. Modeling. Structural analysis.

Resumen: Los puentes atirantados permiten salvar grandes luces, utilizando secciones estructurales más esbeltas, económicas y livianas con arreglos constructivos estéticamente agradables, siendo así un tipo de puente ampliamente adoptado en la actualidad. En cuanto a su diseño estructural, existen innumerables formas de disponer sus cables, y es importante comprender cómo estos elementos estructurales influyen en el comportamiento general de la estructura. Este artículo analiza el efecto de diferentes disposiciones de cables sobre los esfuerzos que se generan en la estructura de un puente atirantado. Para ello, se desarrollan modelos de análisis, basados en el puente atirantado del Río Negro, ubicado en Manaus, en el estado de Amazonas. El estudio parte del modelado considerando la disposición de cables que más se asemeje al proyecto realmente ejecutado, y luego se realizan los cambios necesarios para considerar otras dos alternativas de disposición de los cables, en arpa y en abanico. Se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos para cada una de las distribuciones de los cables. El trabajo realizado permite concluir que la disposición de los tirantes adoptada en el puente efectivamente construido es la más satisfactoria y adecuada.

Palabras llave: Puente atirantado. Disposiciones de cables. Modelado. Análisis estructural.

1. INTRODUÇÃO

As pontes e viadutos são elementos fundamentais das vias de comunicação atuais, permitindo a transposição de obstáculos naturais, tais como: rios, braços de mar e vales. Inicialmente, foram construídas de forma rudimentar, mas, ao longo do tempo foram evoluindo, à medida que os conhecimentos e a tecnologia se foram desenvolvendo. Atualmente, merecem destaque as pontes estaiadas, objeto do presente artigo.

Os materiais utilizados nas primeiras pontes foram, sobretudo, a madeira, cordas e a pedra. Eram estruturas bastante simples, porém, com a eficiência adequada para a sua função.

Ao longo dos anos houve avanços tecnológicos e evolução do conhecimento na área da engenharia de estruturas, até ao estado atual da engenharia de pontes, com soluções modernas e técnicas inovadoras para a sua construção, com vista ao seu bom desempenho funcional, à sua durabilidade, segurança e economia.

Nos últimos anos, as pontes estaiadas têm vindo a ser a solução estrutural adotada em muitas situações, seja em virtude do seu sucesso para vencer médios e grandes vãos, sem a necessidade de pilares intermédios; seja pelos seus benefícios econômicos; pela possibilidade de otimizar tecnologicamente o uso do aço e ainda, pela sua boa estética.

É perceptível o quanto as pontes estaiadas estão em evidência na engenharia atual, principalmente pelo fato dessas pontes conseguirem vencer vãos consideráveis, com redução de custos, estruturas leves, ótima funcionalidade e uma beleza inigualável.

No presente artigo descreve-se a evolução das pontes estaiadas, a diversidade de projetos e métodos construtivos, de geometrias estruturais, bem como as suas vantagens e funcionalidade. Apontam-se as primeiras e principais pontes deste tipo, surgidas no Mundo e no Brasil. Analisam-se as diferentes concepções existentes, evidenciando a importância de estudar seus componentes estruturais, o método construtivo mais funcional e viável economicamente, suas principais características e vantagens em relação a outras pontes.

É importante entender bem o comportamento dos elementos estruturais das pontes estaiadas, e a influência que cada concepção estrutural tem nos esforços atuantes. Assim, neste artigo, apresenta-se uma análise dos efeitos de diferentes disposições dos estais no comportamento estrutural de uma ponte estaiada, em termos das deformações e esforços no tabuleiro e das forças a instalar nos estais. Essa análise é feita utilizando um modelo de elementos finitos, desenvolvido para o sistema estrutural da ponte do Rio Negro, localizada na Região Metropolitana de Manaus no estado do Amazonas.

Inicialmente, desenvolveu-se um modelo com a disposição dos estais adotada na obra (em semi-leque), sendo depois analisadas duas disposições alternativas,

designadamente, em leque e em harpa. Na análise dos resultados obtidos procurou-se verificar as diferenças de comportamento estrutural da ponte com as três diferentes disposições dos estais, no que se refere às deformações e esforços no tabuleiro e às forças de tensionamento dos estais.

2. BREVE APRESENTAÇÃO HISTÓRICA DAS PONTES ESTAIADAS

Nas pontes estaiadas o tabuleiro é suportado por um conjunto de cabos (estais) ligados a uma ou mais torres ou mastros que sustentam todo o conjunto de cabos e tabuleiro.

O conceito de suspender uma estrutura através de cabos ou cordas é uma solução empregada desde as antigas civilizações, como é o caso dos egípcios ao utilizarem cordas para sustentar as velas de suas embarcações, e dos índios norte-americanos ao sustentarem com cordas, as passarelas de madeira que construíam (Mazarim, 2011).

Em algumas regiões do Mundo desenvolveram-se o que se pode considerar como pontes estaiadas primitivas, as quais eram feitas com troncos de bambu com as extremidades apoiadas em árvores e troncos inclinados amarrados por cipós às árvores (Figura 1). A estrutura primitiva adotada nessas pontes demonstra que os seus construtores conseguiram ter uma razoável percepção de alguns dos princípios da engenharia de pontes (Troitsky, 1977).

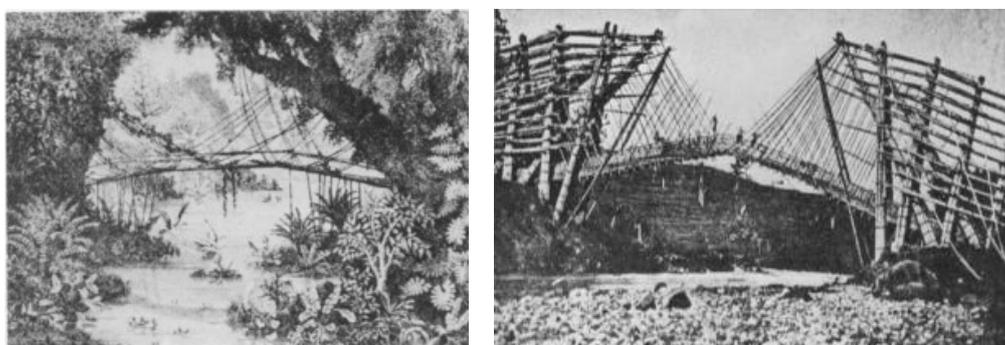


Figura 1 – Pontes estaiadas primitivas de bambu
Fonte: Troitsky, 1977

Ao longo da história, diversas pontes foram projetadas e executadas aplicando a mesma ideia de sustentação através de cordas ou cabos (Ytza, 2009). Em 1784, o conceito de ponte suspensa por cabos inclinados foi aplicado pelo carpinteiro alemão C. J. Löscher, na cidade de Friburgo, na Suíça, ao projetar uma ponte com estrutura estaiada, totalmente em madeira, com um vão de 32 m, conforme se representa na Figura 2.

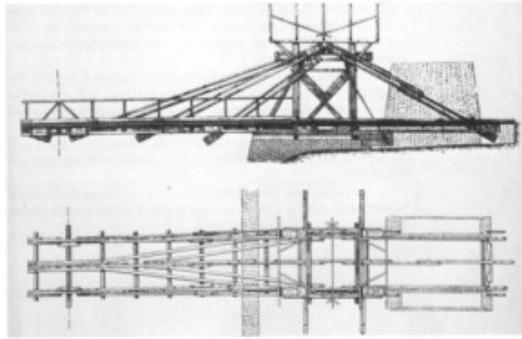


Figura 2 – Ponte de madeira projetada por Löscher em 1784

Fonte: Troitsky, 1977

Em 1817, os engenheiros britânicos Redpath e Brown, projetaram a ponte *King's Meadows*, uma passarela estaiada na Inglaterra, usando estais de arame ligados a torres de ferro fundido, que tinha extensão de aproximadamente 33,6 m (Troitsky, 1977; Ytza, 2009).

O conceito das pontes estaiadas poderia ter tido uma aplicação mais generalizada, porém, devido à carência de métodos para análise e dimensionamento dos seus elementos, e ainda, à insegurança gerada pela ocorrência de alguns acidentes envolvendo estas pontes, que resultaram, sobretudo, da falta de conhecimento sobre os efeitos aerodinâmicos, houve uma certa rejeição deste tipo de pontes durante alguns anos (Ytza, 2009; Mazarim, 2011).

Um exemplo de acidente devido a efeitos aerodinâmicos em pontes é o ocorrido na passarela de *Dryburgh Abbey*, construída em 1817, na Escócia, possuindo uma estrutura híbrida (pênstil ou suspensa e estaiada) com extensão de 79,3 m. Esta ponte já sofria vibrações muito perceptíveis quando atravessada por pedestres, dessa forma, devido à instabilidade aerodinâmica, a ponte colapsou em 1818, seis meses após sua conclusão (Troitsky, 1977).

Diante dos desastres e acidentes ocorridos, Claude Navier publicou em 1823 o artigo *Mémoires sur les Ponts Suspendus*, onde faz um estudo sobre pontes suspensas por correntes inclinadas e geometria definida, comparando dois sistemas. No primeiro, os cabos eram ancorados no topo dos mastros, enquanto no segundo, os cabos, em maior número, eram ancorados ao longo da altura dos mastros, conforme se representa na Figura 3 (Ytza, 2009).

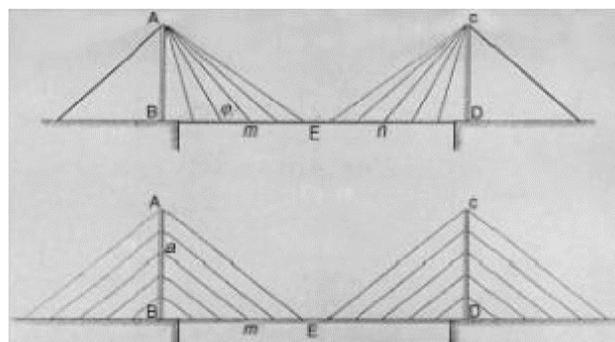


Figura 3 – Sistemas de pontes estaiadas com correntes propostos por Navier

Fonte: Troitsky, 1977

Navier, em seus estudos sobre pontes com tabuleiro suportado por correntes de ferro, constatou a dificuldade em distribuir a carga nas ancoragens de maneira uniforme, visto que as imperfeições durante a construção poderiam acarretar que alguns cabos ficassem com esforços reduzidos e outros com excesso de esforços, e as ligações das ancoragens com a torre e o tabuleiro não permitiam o controle correto das tensões (Gimsing e Georgakis, 2012).

Conforme já se referiu para a passarela de *Dryburgh Abbey*, em algumas pontes adotou-se uma estrutura híbrida, em que se utilizam tanto estais quanto cabos em forma de catenária (cabos pênseis ou de suspensão). A opção por esta concepção fez com que as pontes exclusivamente estaiadas fossem abandonadas por um longo período (Mazarim, 2011).

Outro exemplo de ponte com estrutura híbrida é a ponte de Brooklyn (Figura 4), conectando o sul de Manhattan a Brooklyn, em Nova York (Mazarim, 2011). Esta ponte foi inaugurada em 1883, após 14 anos de construção. Foi projetada por John Roebling e possui uma extensão total de 1059,9 m com um vão central de 486,5 m. Nesta ponte, o trecho central do seu vão central é sustentado inteiramente por cabos parabólicos (cabos pênseis), enquanto os trechos próximos às torres são sustentados por estais protendidos. Percebeu-se que com os estais inclinados protendidos das extremidades, aumentava-se bastante a rigidez da ponte suspensa, o que favorecia a estabilidade aos efeitos aerodinâmicos (Mazarim, 2011). As torres desta ponte são constituídas por alvenaria de pedra, uma vez que, à época da sua construção, ainda não se dominava bem a construção com uso do concreto armado.



Figura 4 – Ponte de Brooklyn em Nova York, EUA
Fonte: De Steffen, 2017

As pontes com estruturas integralmente estaiadas tornaram-se bem aceitas com o desenvolvimento dos aços de construção, o qual possibilitou que barras de aço e, depois, fios, passassem a ser amplamente produzidos com resistências mecânicas elevadas, resultando na substituição das pontes com estruturas híbridas pelas pontes estaiadas (Gomes, 2013).

O conceito moderno de pontes estaiadas foi retomado após o fim da II Guerra Mundial. Nessa ocasião, aliada à falta de aço na Alemanha, ao desenvolvimento e emprego de novas tecnologias no processo produtivo de aços de maior resistência e, igualmente, de

concretos de melhor qualidade, foi possibilitada a sua utilização de forma mais eficiente. A combinação desses fatores proporcionou aos projetistas reconstruírem, com mais criatividade e com aplicação de novos recursos tecnológicos, as pontes destruídas durante a guerra (Ytza, 2009).

Os estudos do engenheiro alemão Franz Dischinger foram determinantes para o desenvolvimento das pontes estaiadas. Analisando várias pontes pênséis e estaiadas já construídas e visando compreender a utilização conjunta de estais e cabos pênséis, assim como o uso de estais protendidos, acabou por conceber e projetar a ponte de Strömsund, cujas obras foram concluídas em 1955, na Suécia (Mazarim, 2011). Esta ponte (Figura 5) tem um vão central de 183 m e vãos laterais de 75 m. É construída totalmente em aço, exceto sua fundação, e a disposição dos estais é em formato de leque (Mazarim, 2011; Gomes, 2013).



Figura 5 – Ponte de Strömsund na Suécia
Fonte: Structurae, 2010

O projeto da ponte de Strömsund, foi o primeiro onde se utilizou a técnica de determinação das forças nos estais durante a construção, através de análises numéricas mais sofisticadas. Com esse avanço tecnológico foi possível prever melhor as forças atuantes sobre os estais, idealizando-se então, estais mais eficientes (Gomes, 2013).

Em virtude do avanço cada vez maior das ligas metálicas e da utilização de softwares para análise estrutural, as pontes estaiadas ganharam definitivamente espaço, evoluíram e passaram a ser amplamente utilizadas (Mazarim, 2011).

Das diversas pontes estaiadas existentes atualmente ao redor do Mundo, destacamos duas delas, em razão de sua importante funcionalidade para os locais nos quais foram construídas e pela beleza e forte apelo estético que lhes agregam.

A primeira é o Viaduto de Millau (Figura 6), formado por oito trechos construídos em aço e suportados por estais ligados a mastros, apoiados sobre pilares de concreto, com alturas de até 245 m. Esta obra foi concluída em 2004, próxima de Millau, no sudoeste da França, atravessando o vale do Rio Tarn. Tem um comprimento total de 2460 m, com seis vãos centrais de 342 m cada e dois vãos nas extremidades com 204 m cada (Mazarim, 2011; Gomes, 2013).



Figura 6 – Viaduto de Millau na França
Fonte: Accioly, 2018

A segunda é a Anzac Bridge (Figura 7) inaugurada em dezembro de 1995 em Sidney na Austrália. Seu comprimento total tem 805 m, sendo o vão principal de 345 m. Além das suas quatro pistas rodoviárias em cada sentido, esta ponte ainda conta com uma ciclovia e uma passarela para pedestres (Prandi, 2016).



Figura 7 – Anzac Bridge em Sidney, Austrália
Fonte: Prandi, 2016

3. AS PONTES ESTAIADAS NO BRASIL

No Brasil, o surgimento das pontes estaiadas é mais recente do que em outros países, pelo fato de a técnica construtiva utilizada nessas construções ter demorado a inserir-se e disseminar-se pelo país. Foi somente a partir da assessoria de empresas estrangeiras que os profissionais brasileiros aprimoraram suas técnicas e passaram a utilizar o conceito estrutural das pontes estaiadas na construção das pontes nacionais (Mazarim, 2011).

A primeira ponte estaiada a ser projetada no Brasil foi a Ponte de Porto Alencastro (Figura 8), localizada sobre o Rio Paranaíba, entre os estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (Ytza, 2009). Esta ponte tem um comprimento total de 660 m e foi concluída em 2003.



Figura 8 – Ponte de Porto Alencastro
Fonte: Muller, 2018

A Ponte de Porto Alencastro foi construída praticamente ao mesmo tempo da Ponte Estação Metroviária Engenheiro Jamil Sabino, construída sobre o Rio Pinheiros, em São Paulo, com uma extensão total de 126 m (Ytza, 2009). De fato, a primeira ponte estaiada a ser inaugurada no Brasil, foi esta última obra (Figura 9), em 2000. Esta ponte é também denominada “Ponte Estação” pelo fato de sustentar uma estação de metrô, ou seja, a estação da linha 5 do metrô é a própria ponte (Mazarim, 2011).



Figura 9 – Ponte Estação Metroviária Engenheiro Jamil Sabino
Fonte: Enescil, 2018

Com o desenvolvimento de tecnologias aplicadas às pontes estaiadas, seja em relação aos materiais aço ou concreto, seja com referência aos estais e suas ancoragens, ou ainda ao seu fascínio estético e à sua execução, tem-se verificado o emprego mais frequente dessas pontes no Brasil (Ytza, 2009).

De entre as pontes estaiadas projetadas e construídas no Brasil é de destacar a Ponte Octávio Frias de Oliveira (Figura 10), sobre o Rio Pinheiros na cidade de São Paulo, pois além dos avanços tecnológicos em sua construção, está entre as maiores construídas no Brasil, destacando-se, também, por possuir dois tabuleiros em trajetória curva que se cruzam a níveis diferentes. É assim, uma obra de destaque da engenharia moderna de pontes.



Figura 10 – Ponte Otávio Frias de Oliveira
Fonte: Alckmin, 2008

A Ponte Octávio Frias de Oliveira teve a sua construção iniciada em 2005. O projeto da Empresa Municipal de Urbanização da Prefeitura de São Paulo (EMURB), para satisfazer as condições locais, previu, inicialmente, a construção de duas pontes estaiadas. Entretanto, considerando as interferências visuais e técnicas geradas por essa solução, definiu-se no projeto executivo a construção de uma única ponte com dois tabuleiros (Mazarim, 2011).

Tendo em vista a demanda estrutural da ponte ter apenas um mastro e a restrição geométrica necessária para interligar as duas vias desse local, a opção tecnicamente viável para o projeto foi a utilização de dois tabuleiros curvos, em níveis altimétricos diferentes, sustentados a partir de um único mastro central em formato de “X”. Assim, para suportar o tabuleiro foram utilizados 18 pares de estais em cada um dos quatro vãos da ponte, totalizando 144 estais (Mazarim, 2011).

O tabuleiro da ponte foi executado com o método dos balanços progressivos, iniciando-o nos mastros até se encontrar com os viadutos de acesso (Figura 11). Além disso, para o controle das forças aplicadas nos cabos foram instaladas células de carga nos pontos de ancoragem dos estais, as quais possibilitaram a verificação das tensões durante a montagem. Com isso, evitou-se a sobrecarga de determinados estais e houve uma melhor garantia da estabilidade do tabuleiro no decorrer da construção da ponte (Mazarim, 2011).



Figura 11 – Construção da Ponte Otávio Frias de Oliveira
Fonte: Téchne, 2008

4. CONCEPÇÃO ESTRUTURAL DAS PONTES ESTAIADAS

O desenvolvimento do projeto de uma ponte depende das características necessárias para a via de comunicação onde ela se insere. Destacam-se a localização da ponte, sua extensão, largura e altura total, a importância e o objetivo dessa ponte (rodoviária, ferroviária, passarela), a durabilidade desejada, o prazo para execução da obra, os materiais que serão utilizados e o orçamento. Diante dessas características e das necessidades do local de implantação da obra, procura-se escolher qual o tipo de estrutura que é mais adequado e funcional para a ponte em questão (Ytza, 2009).

As pontes de concreto podem ser de cinco tipos estruturais: em viga; em pórtico; em arco; pênséis e estaiadas. O processo de concepção no projeto de grandes pontes requer um longo aprendizado, dependendo do estudo e análise de soluções empregadas em muitas pontes e do extenso conhecimento conceitual de pontes. Nesse sentido, o projetista deve saber em quais casos cada um dos cinco tipos de ponte é mais vantajoso, e de que modo as condições do terreno de fundação, a extensão do vão e a altura da ponte influenciam na escolha do sistema estrutural (Leonhardt, 1979).

No projeto de grandes pontes é fundamental analisar e efetuar cálculos comparativos entre diferentes tipos estruturais, a fim de estabelecer dimensões mais econômicas (as quais não prejudiquem a estrutura da ponte) e confirmar qual a melhor solução a ser adotada. Hoje em dia essa tarefa encontra-se facilitada, levando em conta os programas computacionais existentes (Leonhardt, 1979).

Enquanto uma ponte convencional, como a ponte em viga, exige diversos pontos de apoio (pilares intermédios) para vencer um grande vão, a ponte estaiada é capaz de vencer o mesmo vão contando com apenas um único ponto de apoio para o seu mastro ou torre. A utilização das pontes estaiadas resulta assim, em geral, em menores influências sobre o ambiente e o entorno da obra (Mazarim, 2011). As pontes estaiadas são também bem aceitas pelo meio técnico e pela população em geral, por seu estilo arquitetônico esbelto e esteticamente agradável.

As pontes estaiadas são pontes em que o tabuleiro é sustentado por cabos inclinados fixados nas torres ou mastros (Leonhardt, 1979). Em razão da disposição dos cabos poder variar, as pontes estaiadas têm diversas alternativas quanto à sua concepção estrutural.

Os componentes estruturais de uma ponte estaiada incluem: o tabuleiro, as torres e o seu sistema de cabos (estais) (YTZA, 2009), conforme se indica na Figura 12.

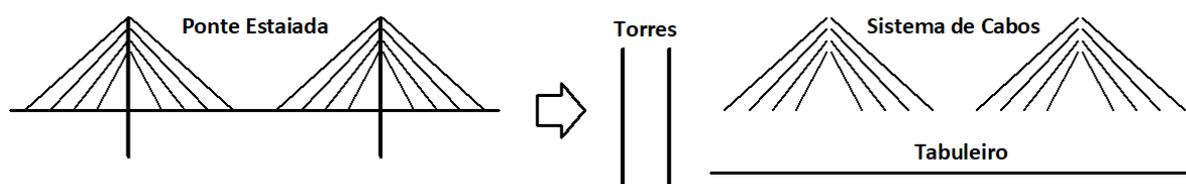


Figura 12 – Componentes estruturais de uma ponte estaiada
Fonte: Ytza, 2009 (adaptado pelos autores)

Considerando as inúmeras possibilidades de arranjos estruturais das pontes estaiadas, é função do projetista conceber o melhor sistema estrutural com a finalidade de aperfeiçoar o comportamento global da estrutura. Para isso, é fundamental o conhecimento aprofundado sobre todos os elementos estruturais deste sistema (Gimsing; Georgakis, 2012).

O projeto preliminar de uma ponte estaiada envolve: escolha do arranjo estrutural da ponte, determinação da altura das torres, das dimensões do vão e das seções transversais dos seus elementos e do nível de tensão inicial que deve ser aplicado em seus estais (Ytza, 2009).

As forças a instalar nos estais podem ser calculadas através de diversos métodos, diretamente relacionados à concepção da ponte (Ytza, 2009). Pode-se considerar que há quatro métodos principais: método do tabuleiro articulado em todos os estais (MTA), método de anulação dos deslocamentos (MAD), método de anulação das reações em apoios fictícios (MAR), método de anulação dos deslocamentos com o decorrer da construção (MAD evolutivo). Em todos estes métodos o objetivo é a anulação de deslocamentos no tabuleiro e que se tenha uma distribuição razoável de esforços.

No sentido longitudinal, os cabos inclinados podem ser arranjados segundo dois formatos principais, a forma em leque e a forma em harpa (Leonhardt, 1979).

O formato em leque é caracterizado por concentrar os estais no topo da torre, os quais partem deste ponto até atingirem a ligação com o tabuleiro, enquanto o sistema em harpa apresenta os estais distribuídos ao longo da altura da torre, havendo então simetria na disposição e estais paralelos entre si (Gomes, 2013).

Leonhardt (1979), ao comparar os formatos em leque e em harpa, considera a disposição em leque como a mais eficiente do ponto de vista estrutural e a mais econômica. Entretanto, avalia o formato em harpa como mais agradável em relação à aparência estética quando se tem a utilização de poucos cabos.

Almeida (2013) considera que o formato em leque é mais vantajoso do que a disposição em harpa, pois o ângulo formado entre os cabos e o tabuleiro é maior, resultando na otimização do consumo de aço, em menores esforços axiais sobre o tabuleiro e um menor esforço de flexão nas torres. Em contrapartida, tem-se a dificuldade de ancorar todos os estais em conjunto no topo da torre, visto as ancoragens dos estais demandarem um espaço mínimo para a sua instalação.

Com o objetivo de facilitar a ancoragem de vários cabos na parte superior das torres, desenvolveu-se uma solução com os cabos ancorados uns abaixo dos outros, resultando uma disposição intermediária dos cabos entre a forma em leque e em harpa (Leonhardt, 1979).

Essa disposição intermediária é denominada por forma em semi-leque, a qual aproveita a boa capacidade de suporte de cargas e esforços do tabuleiro do formato em leque, associada à facilidade construtiva do formato em harpa, ou seja, tem-se a facilidade

de acomodar as ancoragens dos estais, umas embaixo das outras, ao longo de um trecho superior das torres, com maiores inclinações entre os cabos e o tabuleiro (Almeida, 2013).

Na Figura 13 representam-se as três disposições longitudinais clássicas dos estais das pontes estaiadas.

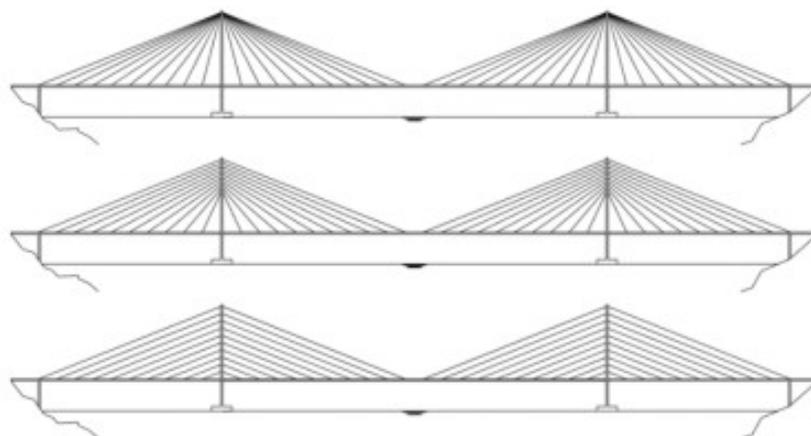


Figura 13 – Disposições dos estais em pontes estaiadas, por ordem, Leque, Semi-Leque e Harpa
Fonte: Pedro, 2007

Uma ponte estaiada com distâncias grandes entre os pontos de suspensão do tabuleiro, tendo, assim, poucos cabos inclinados, deve ser considerada como uma ponte em viga, com apoios intermediários, que neste caso não são pilares, mas os estais (Leonhardt, 1979). Esta concepção exige uma altura maior para o tabuleiro para que ele tenha maior resistência à flexão, necessária por causa do maior vão entre pontos de suspensão. Outra possibilidade é adotar uma distância menor entre os pontos de suspensão do tabuleiro, o que acarreta a utilização de uma quantidade maior de cabos. Com esta concepção, o tabuleiro pode ter uma altura menor na direção longitudinal, já que os cabos inclinados dispostos ao longo do tabuleiro funcionam à tração e transferem as cargas do tabuleiro para as torres.

Para entender melhor a evolução da geometria dos estais nas pontes estaiadas podem ser consideradas três categorias distintas de pontes, as quais ajudam a compreender como as concepções estruturais influenciam na distribuição das cargas e no comportamento global da estrutura (Mazarim, 2011).

A primeira categoria (Figura 14) considera um número menor de estais, dispostos com um grande espaçamento longitudinal no tabuleiro. Isso exige tabuleiros mais rígidos, para poderem suportar os maiores esforços de flexão longitudinal que se verificam neles. Além disso, os próprios estais têm que ter seções transversais mais robustas, visto terem de suportar uma maior carga do tabuleiro, por serem mais espaçados entre si (Mazarim, 2011).

A concepção estrutural da categoria 1 foi muito utilizada na construção das primeiras pontes estaiadas, por possuírem vãos menores (Lazzari, 2016). Para grandes vãos, esta solução não é indicada, pois o tabuleiro deve apresentar elevada rigidez aos esforços de flexão longitudinal em razão do grande espaçamento entre os estais. Além disso, nessa

categoria de pontes o método construtivo torna-se mais difícil, pois é preciso construir uma larga extensão de tabuleiro até ser alcançado o próximo ponto de ancoragem de um estai.



Figura 14 – Disposição dos estais da categoria 1
Fonte: Mazarim, 2011

Na segunda categoria (Figura 15) o número de cabos é maior, havendo uma distância menor entre eles. Assim, os estais passam a suportar grande parte das cargas atuantes no tabuleiro, reduzindo a flexão longitudinal deste e permitindo que ele possa ter seções mais leves e esbeltas. Há também uma maior verticalidade dos estais, o que reduz os esforços horizontais atuantes no tabuleiro. Esta geometria facilitou a construção das pontes pelo método dos balanços sucessivos, pois, devido à maior proximidade dos estais, os tabuleiros podem ser executados a partir das torres em direção aos vãos (Lazzari, 2016; Mazarim, 2011).



Figura 15 – Disposição dos estais da categoria 2
Fonte: Mazarim, 2011

As pontes estaiadas da categoria três (Figura 16) apresentam o diferencial de terem uma disposição dos estais que é assimétrica em relação às torres. Além disso, as cargas atuantes na estrutura não são estabilizadas nas torres, mas transmitidas pelos cabos de retaguarda a um bloco de ancoragem, garantidor da estabilidade do conjunto. Os blocos de ancoragem são estruturas robustas, com elevado peso próprio, suficiente para resistir às forças transmitidas pelos estais sustentadores do tabuleiro (Mazarim, 2011).

Na categoria três incluem-se também as pontes com apenas um mastro, solução que é muito útil para casos em que já existe algum obstáculo natural, má condição de fundação ou algum outro fator que impeça a execução de pilares no centro do vão (Mazarim, 2011).

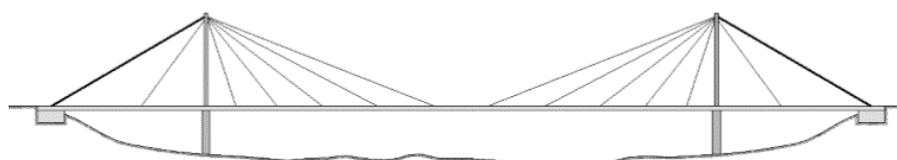


Figura 16 – Disposição dos estais da categoria 3
Fonte: Mazarim, 2011

As pontes estaiadas permitem uma grande flexibilidade na sistematização dos seus elementos estruturais, seja na distribuição longitudinal dos estais, na forma de ancorar os cabos, na seção transversal e forma geométrica das torres e tabuleiro, assim como nos métodos construtivos e materiais empregados (Mazarim, 2011).

Considera-se assim importante abordar, especificamente, cada um dos componentes estruturais das pontes estaiadas e as inúmeras maneiras de dispor os mesmos.

5. COMPONENTES ESTRUTURAIS DAS PONTES ESTAIADAS

Os principais componentes estruturais das pontes estaiadas são o tabuleiro, as torres e os estais. O tabuleiro da ponte recebe as cargas do seu peso próprio e do tráfego, as quais são transferidas para os estais e, em parte, para os pilares, resistindo assim, a esforços de flexão e compressão. Os estais transferem essas cargas às torres de ancoragem, que por sua vez as transmitem aos pilares de fundação (Almeida, 2013; Calado, 2011).

5.1 Tabuleiro

O tabuleiro é o elemento da ponte por onde transitam os veículos, sendo assim, responsável por receber os carregamentos provenientes da utilização da ponte, como as cargas móveis do tráfego e, obviamente, as cargas do seu peso próprio, transferindo-as para os pontos de ancoragem dos estais (Gomes, 2013; Lazzari, 2016).

Nas primeiras pontes estaiadas predominaram tabuleiros construídos em estrutura metálica, pois devido ao grande espaçamento entre os pontos de fixação dos estais, os esforços de flexão longitudinal eram maiores e por isso era necessário utilizar tabuleiros mais resistentes e mais rígidos (Lazzari, 2016).

Os tabuleiros de concreto teriam que ser muito espessos e pesados para terem a rigidez necessária, por isso, utilizaram-se, nas primeiras pontes estaiadas, os tabuleiros metálicos, que satisfaziam as exigências de rigidez sem ter que possuir geometrias muito robustas (Mazarim, 2011).

Ao longo do tempo e com os avanços na modelagem numérica, aperfeiçoaram-se as geometrias utilizadas para os tabuleiros, possibilitando a utilização de seções transversais mais esbeltas e aerodinâmicas (Lazzari, 2016).

A seção transversal empregada nos tabuleiros é influenciada pelo plano de suspensão a ser utilizado, bem como pelo espaçamento entre os pontos de ancoragem dos estais. Quanto ao plano de suspensão, este pode ser: um plano central exatamente no eixo da seção transversal ou dois planos de suspensão localizados sobre as laterais da seção transversal. Já a esbelteza do tabuleiro é condicionada pelo espaçamento entre os estais, ou seja, quanto maior for o número de estais, menor será o espaçamento entre os mesmos e, conseqüentemente, menor será o esforço de flexão sobre o tabuleiro. Assim este tabuleiro

pode ter espessuras menores, possuindo seção transversal mais esbelta (Almeida, 2013).

Quando se utiliza a suspensão central, o plano de estais suspende o tabuleiro pelo seu eixo e, dessa forma, sob o efeito das cargas do tráfego de veículos, o tabuleiro fica submetido a esforços de torção maiores, por isso, nessa situação, é usual adotarem-se seções em caixão que têm uma rigidez à torção maior. Em contrapartida, para a suspensão lateral, devido a existirem dois planos de estais sobre as bordas laterais da seção, podem-se empregar seções mais esbeltas e aerodinâmicas, como as seções em laje com vigas (Almeida, 2013).

Um exemplo de ponte estaiada com plano de suspensão central é o Viaduto de Millau na França, já mencionado neste trabalho (Figura 6). Por outro lado, para o plano de suspensão lateral, em que os estais localizam-se nas bordas da seção transversal, tem-se como exemplo a Ponte de Porto Alencastro, também já referida neste trabalho (Figura 8).

Em relação aos materiais que os constituem, os tabuleiros das pontes estaiadas podem ser: de concreto, em aço e mistos de aço e concreto. A escolha de uma destas opções influencia diretamente no método construtivo a ser empregado, no sistema de suspensão dos cabos e no custo total da obra (Lazzari, 2016).

Os tabuleiros de concreto podem ser moldados in loco ou ser feitos com peças pré-fabricadas. As principais vantagens em utilizar tabuleiros de concreto nas pontes estaiadas relacionam-se ao custo menor deste material em comparação ao aço, e usando-se as peças pré-moldadas para construção do tabuleiro, é possível acelerar o processo construtivo da obra como um todo, além de facilitar a execução pelo método construtivo dos balanços sucessivos. No entanto, há a desvantagem do tabuleiro ficar com um elevado peso próprio, resultando no aumento das dimensões das seções transversais dos cabos, torres e pilares (Mazarim, 2011; Lazzari, 2016).

Apesar das primeiras pontes estaiadas com tabuleiros em concreto apresentarem seções ligeiramente robustas e pesadas, com o avanço dos estudos, experiências e desenvolvimento da tecnologia, houve uma racionalização no dimensionamento dessas seções, objetivando o emprego de estruturas mais resistentes, aerodinâmicas e de menor peso (Lazzari, 2016).

Outro fator que permitiu a utilização de seções mais esbeltas e de seções vazadas foi o surgimento do concreto protendido. O uso desse material concilia o melhor aproveitamento da resistência à compressão do concreto com a redução dos efeitos de flexão sobre o tabuleiro, e usando seções vazadas, alivia-se o peso próprio da estrutura e reduz-se o consumo de material (Lazzari, 2016).

Os tabuleiros com seção em aço foram muito utilizados nas primeiras pontes estaiadas, sendo que estes são aproximadamente 80% mais leves que os tabuleiros em concreto. Com isso, há significativa redução nas dimensões dos estais, pilares e fundações, porém o próprio custo do material e seu processo executivo apresentam custo mais elevado em vista dos tabuleiros constituídos por concreto (Lazzari, 2016).

A utilização dos tabuleiros em aço é muito favorecida quando a estrutura pretende

atingir grandes vãos, pois nesses casos, é fundamental para o dimensionamento dos outros elementos estruturais o alívio do peso próprio da estrutura. Por outro lado, com a redução do peso da estrutura, ela se torna mais suscetível às ações do vento e vibrações, então, deve-se ter um maior cuidado e verificação quanto a este fator (Mazarim, 2011).

As maiores desvantagens do emprego do aço nas estruturas de pontes são a necessidade de mão-de-obra especializada para execução do serviço e também a necessidade de realizar manutenções mais frequentes durante a vida útil da obra, por ser um material mais suscetível aos ataques de agentes externos (Almeida, 2013).

Verifica-se também que o custo para executar tabuleiros com estrutura em aço no Brasil é bastante elevado, tanto pelo preço do próprio material, quanto pelo custo das empresas que executam o serviço (Mazarim, 2011).

Os tabuleiros mistos feitos em concreto e aço possuem o material concreto utilizado nas lajes e o uso do aço para outros componentes estruturais. Entre as vantagens da utilização conjunta desses materiais tem-se: estruturas mais leves pela aplicação de perfis metálicos, praticidade no transporte e na colocação dos perfis metálicos, longa vida útil das lajes de concreto e aceleração do processo executivo (Mazarim, 2011; Lazzari, 2016).

5.2 Estais

Os estais são componentes estruturais cuja principal finalidade é suportar o tabuleiro das pontes estaiadas, portanto, são responsáveis pela transferência dos carregamentos oriundos do tabuleiro para as torres (Nunes, 2010; Lazzari, 2016).

Os estais são constituídos, essencialmente, por três componentes: os elementos de tensionamento, os sistemas de ancoragem e os sistemas de proteção (Lazzari, 2016).

Os elementos de tensionamento dos estais são os garantidores da transmissão das cargas do tabuleiro até aos mastros (Lazzari, 2016). Esses elementos podem ser constituídos por um conjunto de barras ou cordoalhas, os quais formam cada estai. Tratando-se de barras rígidas, estas podem compor os estais através de barras únicas ou por diversas barras paralelas entre si.

A solução mais comumente empregada para constituição dos estais tem sido a utilização de cordoalhas (Mazarim, 2011). As cordoalhas são formadas por um conjunto de fios que se mantêm unidos através do seu enrolamento helicoidal em torno do fio central em uma ou mais camadas. Os estais são compostos por diversas cordoalhas.

A cordoalha composta por sete fios é amplamente utilizada nos estais de pontes estaiadas, visto sua facilidade de manuseio, acomodação e aplicação. Para melhorar a sua durabilidade, as cordoalhas utilizadas em estais possuem tratamento de galvanização, sendo circundadas em cera de petróleo e revestidas por tubo de polietileno de alta densidade (PEAD) (Gomes, 2013).

Em relação aos sistemas de ancoragem dos estais, existem diversos tipos, conforme a tecnologia empregada por cada empresa. No entanto, em geral, os sistemas de ancoragem

devem permitir possíveis ajustes ao longo do processo executivo, objetivando manter as tensões necessárias para o nivelamento do tabuleiro, além de possibilitar a substituição e manutenção dos estais. O fato do sistema de ancoragem permitir realizar ajustes assegura o melhor funcionamento do conjunto, pois evita que estais menos alongados recebam maiores cargas do que outros que se encontram mais alongados (Mazarim, 2011).

No que se refere aos sistemas de proteção, o tipo de proteção mais amplamente empregado nos estais são os tubos de polietileno de alta densidade, os quais garantem resistência aos efeitos da radiação ultravioleta e proteção contra os processos corrosivos e efeitos do tempo. Atualmente, tem-se utilizado também o tubo anti-vandalismo, constituído por aço de alta resistência aplicado junto à ancoragem dos estais no tabuleiro até certa altura, a fim de evitar a destruição dos estais por atos de vandalismo (Lazzari, 2016).

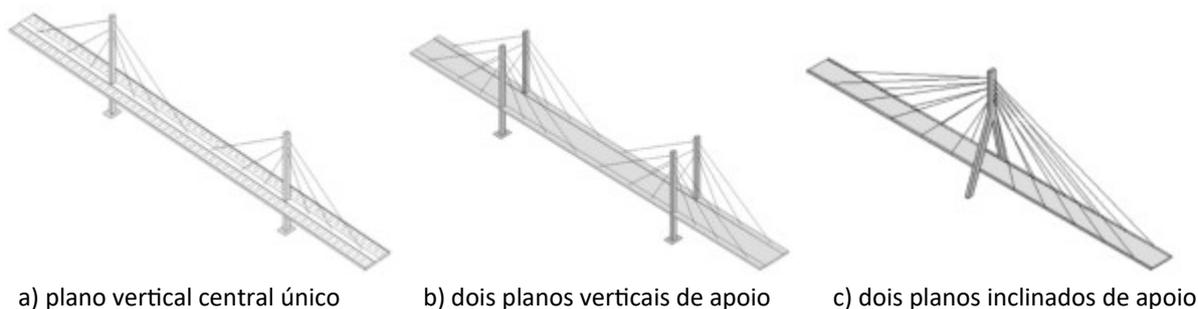
Nos tubos de polietileno de proteção dos estais são muitas vezes utilizadas cores vivas visando a estética da ponte, de acordo com o seu projeto arquitetônico. Como exemplo, podem-se observar na Figura 17 os tubos de polietileno, de cor amarela, e os tubos anti-vandalismo, de cor cinza, em uma ponte estaiada.



Figura 17 – Sistemas de proteção dos cabos nas pontes estaiadas
Fonte: Figueiredo, 2015

Os cabos de uma ponte estaiada podem ser dispostos de várias maneiras, o que influencia diretamente o desempenho da estrutura, os materiais utilizados, o custo da obra, a geometria dos elementos e a metodologia construtiva. Podem-se dispor os cabos de diversas formas no que se refere às suas distribuições transversais e longitudinais (Mazarim, 2011).

No que se refere à disposição transversal dos cabos, as principais geometrias adotadas, atualmente, são (Mazarim, 2011): um plano vertical central único, dois planos verticais de apoio e dois planos inclinados de apoio, conforme se representa na Figura 18.



a) plano vertical central único

b) dois planos verticais de apoio

c) dois planos inclinados de apoio

Figura 18 – Distribuição transversal dos estais

Fonte: Mazarim, 2011

As pontes estaiadas com um plano vertical central de cabos (Figura 18a), apesar de serem estruturas esteticamente elegantes, têm desvantagens do ponto de vista estrutural, em função da suspensão total do tabuleiro ser realizada, somente, pelo eixo central da ponte. Dessa forma, no caso de surgirem cargas assimétricas no tabuleiro, este fica muito suscetível aos efeitos de torção além de sofrer com a instabilidade estrutural. Outro ponto desfavorável dessa concepção de uma ponte estaiada está relacionado à elevada força atuante sobre os estais resultando em estais de maiores diâmetros e ancoragens mais rígidas (Lazzari, 2016).

No caso do emprego de tabuleiros mais largos é recomendado que se utilizem disposições dos cabos contendo dois planos de suspensão, pois a carga resistida pelos estais assim como os efeitos de torção sobre o tabuleiro serão reduzidos (Mazarim, 2011).

Com a utilização de dois planos verticais de apoio (Figura 18b), é possível suportar tabuleiros mais largos (contendo até um maior número de faixas de rodagem) que permitem a incidência de cargas dinâmicas e assimétricas, sem que sejam gerados altos esforços de torção e instabilidade da estrutura. Além do mais, essa solução é também vantajosa porque os mastros ficam posicionados nas laterais do tabuleiro, evitando-se interferências das dimensões do mastro com a passagem do tráfego pelo tabuleiro (Lazzari, 2016).

Tratando-se de dois planos inclinados de apoio (Figura 18c), frequentemente usam-se torres com a forma em “A” ou “Y” invertido. Nesse formato, os estais ligam as extremidades do tabuleiro ao topo da torre. Assim, não há interferência das torres com o tabuleiro, além de o sistema se apresentar bastante atrativo esteticamente. Em contrapartida, este sistema de cabos pode interferir no gabarito rodoviário da ponte devido à inclinação existente entre os cabos e o tabuleiro. Para minimizar essa interferência, pode-se alocar os pontos de ancoragem externamente ao tabuleiro ou então aumentar a largura do tabuleiro, visando colocar os cabos o mais distante possível da pista de rolamento (Lazzari, 2016; Mazarim, 2011).

Existem diferentes formas de dispor os estais longitudinalmente, conforme as demandas de projeto ou visando buscar o efeito visual desejado. Entre as disposições mais difundidas e regularmente utilizadas estão os formatos: leque, semi-leque, harpa, assimétrica, extradorso e múltiplos vãos (Lazzari, 2016).

As disposições em leque, semi-leque e harpa já foram previamente descritas e exemplificadas na Figura 13.

A disposição assimétrica é normalmente utilizada quando as condições topográficas a exigem, sendo utilizados blocos de ancoragem para equilibrar o sistema estrutural. Já o modelo estrutural extradorso é caracterizado por conter torres consideravelmente mais baixas, justamente, devido aos locais de emprego terem limitações de altura das estruturas, como é o caso de regiões próximas a aeroportos. Por último, a solução com múltiplos vãos permite a utilização de qualquer um dos formatos referidos anteriormente, desde que utilizados de forma repetida. Essas estruturas têm sido frequentemente utilizadas em locais com grandes vãos, sobretudo montanhas, vales e grandes rios (Lazzari, 2016).

5.3 Torres

As torres, também designadas por pilones ou mastros, são os elementos responsáveis por suportar as componentes verticais da força dos estais e o esforço de compressão oriundo do tabuleiro. Além disso, os mastros devem ser dimensionados para sustentar os esforços devidos à aceleração e frenagem dos veículos, efeitos aerodinâmicos e fenômenos sísmicos. Com isso, garante-se a estabilidade global do conjunto da ponte (Lazzari, 2016).

O comportamento estrutural das torres é diretamente influenciado pelas componentes das forças nos estais. Suas estruturas de grande altura e as solicitações predominantemente à compressão fazem com que estas torres sejam construídas normalmente em concreto armado (Gomes, 2013).

No que se refere à conexão entre a torre e o tabuleiro, quanto mais esbelta for a torre, menor será a sua resistência aos momentos fletores longitudinais, sendo assim necessários tabuleiros mais rígidos. Quando se tem torres mais rígidas contendo um número suficiente de estais, é possível que os tabuleiros sejam mais esbeltos e não fiquem submetidos a altos esforços de flexão (Lazzari, 2016).

As torres podem ter diversas formas, sendo as mais utilizadas em “A”, “Y” invertido, “H”, diamante, mastro único ou formas particulares (Almeida, 2013). Essas formas dependem principalmente da configuração longitudinal da ponte, sendo assim condicionadas pelo arranjo espacial dos cabos, podendo ser no eixo da seção transversal ou nas laterais. Além do mais, os formatos empregados relacionam-se com os esforços atuantes sobre a torre, bem como, ao tipo de ancoragem no tabuleiro.

As torres podem estar centradas no eixo da seção transversal, situação em que é frequente utilizar um mastro único. Podem também estar sobre as laterais do tabuleiro, sendo o estaiamento efetuado lateralmente sobre as bordas da seção transversal, caso em que são comumente empregadas torres com formas em “A”, “H” e diamante (Almeida, 2013).

A altura das torres é influenciada pela inclinação dos estais, sendo recomendado que

o ângulo de inclinação entre o estai mais comprido e a horizontal seja maior que 25°, a fim de evitar o surgimento de deflexões dos estais muito elevadas sobre o tabuleiro (Lazzari, 2016).

6. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DAS PONTES ESTAIADAS

O método construtivo de uma ponte precisa ser definido no início do projeto, pois tem uma grande influência na concepção e no projeto dessa obra. A definição do melhor procedimento construtivo está profundamente ligada as condições do local da obra, suas particularidades geográficas e geotécnicas, a altura da ponte em relação ao nível do terreno, profundidade e velocidade do rio que é cruzado, durabilidade, fatores econômicos, equipamentos a serem utilizados, entre outros aspectos necessários a cada projeto em particular (Lazzari, 2016; Nunes, 2010).

Os mais relevantes métodos construtivos utilizados em pontes são o cimbramento geral (cambre apoiado no solo), lançamento progressivo e balanços sucessivos (Lazzari, 2016).

A construção de uma ponte através do cimbramento geral é efetuada nos casos em que a diferença de altura entre a ponte e o terreno é pequena e o solo possui boa capacidade resistente. Sua utilização interfere diretamente no tráfego abaixo da ponte e a estrutura do cembre não é capaz de resistir a fortes correntes de água (Nunes, 2010; Ytza, 2009).

Existem dois tipos de cimbramento: o cimbramento fixo e o cimbramento móvel. O cimbramento fixo é caracterizado pela montagem de apoios temporários, que são retirados após a utilização, podendo ou não ser reutilizados em outras partes da construção da ponte. Já o cimbramento móvel ou deslizante é constituído por um sistema de treliças móveis (metálicas), que são deslocadas conforme a concretagem do tabuleiro da ponte avança (Lazzari, 2016).

A solução construtiva por lançamento progressivo é frequentemente aplicada nos casos em que não se pode interferir no tráfego por debaixo da ponte. Neste método construtivo, são fabricados trechos de tabuleiro, fora da sua posição final, que vão sendo empurrados, através de macacos hidráulicos, o que faz com que deslizem sobre os pilares até à sua posição final no tabuleiro completo da ponte (Nunes, 2010). Neste processo, até que encontre o próximo ponto de apoio sobre um pilar, um trecho do tabuleiro fica em balanço. Para reduzir o comprimento desse balanço e o correspondente momento fletor negativo, é fixada uma treliça metálica na extremidade do trecho, atuando como um prolongamento do tabuleiro e atingindo os pontos de apoio em momento anterior ao tabuleiro (Nunes, 2010).

O processo construtivo por balanços sucessivos é o principal método de construção de tabuleiros nas pontes estaiadas, em especial quando se deseja vencer grandes vãos neste

tipo de estruturas. A construção do tabuleiro através deste método pode ser realizada tanto pela concretagem dos vãos in loco, como pela adição de aduelas pré-fabricadas para compor o tabuleiro (Almeida, 2013).

O processo construtivo por balanços sucessivos é o mais generalizado, pois permite a construção transpondo qualquer obstáculo sob o tabuleiro, visto que o método consiste na construção de segmentos que partem dos apoios, originando balanços que avançam pelo vão a ser vencido sem interferir abaixo da estrutura (Almeida, 2013; Ytza, 2009).

A colocação dos estais no processo construtivo por balanços sucessivos é sequencial e alternada com a construção das aduelas, visto que os estais devem ser colocados por etapas conforme a evolução da estrutura ao longo do vão (Almeida, 2013).

7. CASO DE ESTUDO BASEADO NA PONTE DO RIO NEGRO

7.1 Dados Gerais da Ponte do Rio Negro

O caso de estudo deste artigo é baseado, conforme já mencionado, na Ponte do Rio Negro (Figura 19). Esta obra é constituída por um trecho corrente e um trecho estaiado. Seu tabuleiro tem duas pistas em cada sentido, possuindo 73 vãos e 3.595 m de extensão total.



Figura 19 – Ponte do Rio Negro no estado do Amazonas
Fonte: Severiano, 2017

O trecho corrente desta ponte tem 71 vãos de 45 m cada e largura do tabuleiro de 20,70 m, totalizando assim 3.195 m de extensão, enquanto o trecho estaiado é composto por dois vãos de 200 m e largura do tabuleiro de 22,60 m, tendo assim um comprimento total de 400 m. Seus vãos estaiados têm uma única torre em forma de “Y invertido” com os estais dispostos em dois planos de suspensão sobre as laterais do tabuleiro. Esta torre ancora um conjunto de duas vezes 26 estais para cada lado, totalizando 104 estais com a disposição longitudinal no formato semi-leque.

A disposição dos estais da Ponte do Rio Negro segue uma geometria da categoria 2, visto seu grande número de estais e a proximidade longitudinal entre eles.

O tabuleiro desta ponte é constituído por aduelas pré-moldadas e protendidas, tendo sido executado através do método construtivo dos balanços sucessivos. Nesse método, é

efetuado o içamento de cada uma das aduelas, que são interligadas umas às outras e recebem a protensão de anexação. Após a protensão da aduela, os estais são instalados na mesma, de forma a sustentar o tabuleiro e avançar com a execução ao longo do vão. De cada lado da torre foram executadas 26 aduelas, totalizando 52 peças ao longo do trecho estaiado.

A torre da ponte é um elemento estrutural consideravelmente esbelto. É constituída por concreto com resistência à compressão de 40 MPa (C40), possui 103 m de altura e três tipos diferentes de seção transversal (Figura 20).

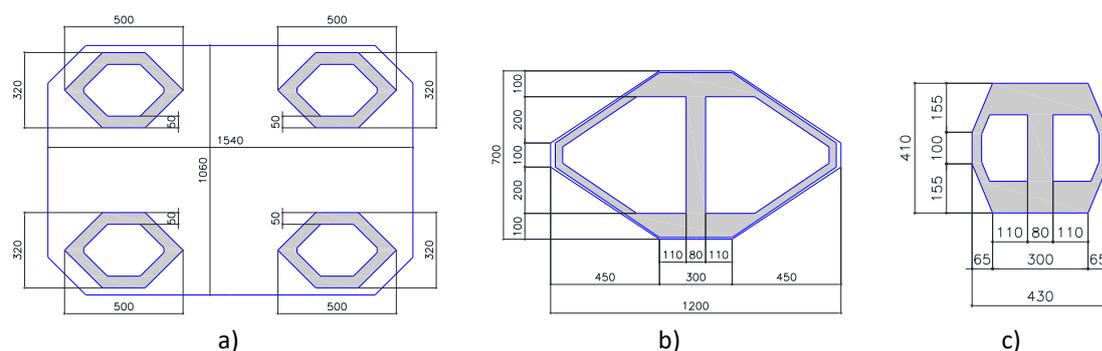


Figura 20 – Seções transversais da torre: a) Seção até a laje de travamento; b) Seção inicial da câmara de estais e c) Seção final da câmara de estais

Fonte: Enescil, 2018

Os estais foram instalados em concordância com a colocação alternada das aduelas nos vãos. Dessa forma, promoveu-se o crescimento proporcional dos vãos para ambos os lados da torre, mantendo o equilíbrio de forças. Uma aduela por vez, para ambos os lados, foi recebendo os estais constituídos por cordoalhas com 15,2 mm de diâmetro. Assim, tem-se um total de 26 pares de estais para cada lado dos vãos da ponte e o número de cordoalhas por estai variando de 52 a 72, sendo 72 o número de cordoalhas adotado para o estai mais comprido e distante da torre, e 52 para o estai mais curto e próximo à torre.

Na Figura 21 apresentam-se as seções longitudinal e transversal do trecho estaiado na zona da torre e na Figura 22 a seção transversal do tabuleiro.

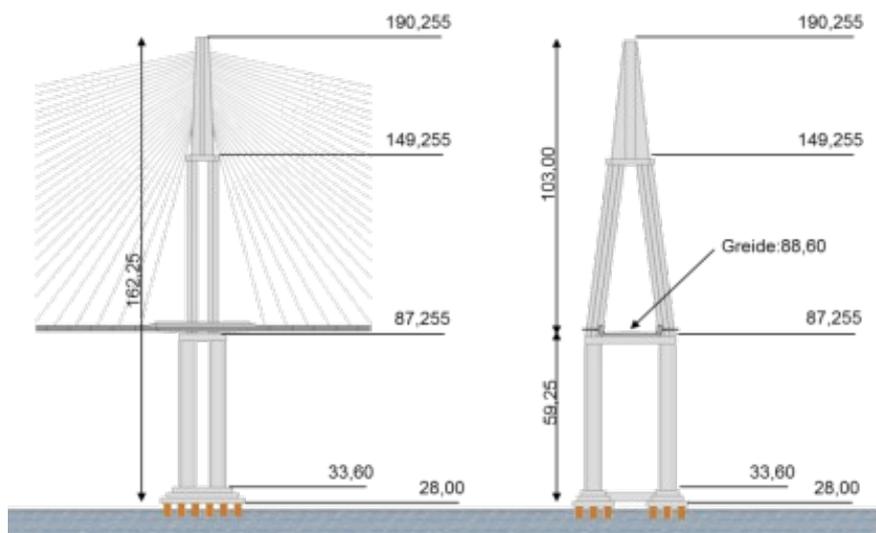


Figura 21 – Seções longitudinal e transversal do trecho estaiado na zona da torre
Fonte: Enescil, 2018

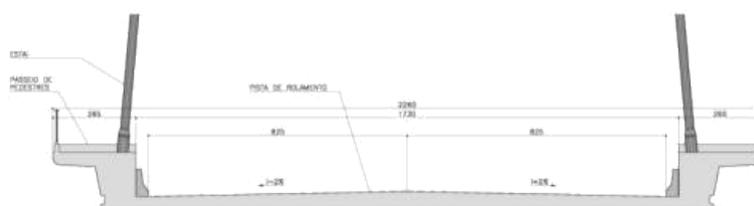


Figura 22 – Seção transversal do tabuleiro
Fonte: Enescil, 2018

7.2 Modelos de Análise Desenvolvidos e Análises Efetuadas

Considerando que o objetivo principal das análises efetuadas foi a comparação dos esforços e deformações no tabuleiro para diferentes disposições dos estais (harpa, leque e semi-leque) foram desenvolvidos três modelos de análise.

Inicialmente, foi desenvolvido o modelo com uma disposição dos estais próxima da efetivamente adotada na ponte do Rio Negro, sendo apenas consideradas algumas simplificações. Posteriormente, foram desenvolvidos outros dois modelos, com os estais com disposição em harpa e com disposição o mais próxima possível do formato em leque.

A criação dos modelos estruturais a serem analisados teve como base as informações e os dados referentes ao projeto da ponte. No entanto, foram assumidas algumas alterações e simplificações em relação à estrutura original.

No modelo da estrutura da ponte, o tabuleiro fica apoiado na travessa que interliga as duas partes (“pernas”) que compõem a torre e sobre as vigas localizadas sobre os pilares extremos de transição do trecho estaiado para os trechos correntes. Nos trechos entre a torre e os pilares extremos, o tabuleiro fica suspenso pelos 52 estais ancorados na torre.

Nos modelos desenvolvidos, a suspensão do tabuleiro é lateral e constituída por dois planos verticais de 26 estais para cada lado da torre, os quais têm um espaçamento de 6,9 m

horizontalmente no tabuleiro. Já quanto ao espaçamento vertical entre estes estais por toda a altura das duas partes constituintes da torre, tem-se para o modelo em harpa uma distância de 3,5 m, para o modelo em semi-leque o espaçamento de 2 m, e para o modelo que mais se aproxima do formato em leque, a distância mínima de 1 m.

Para o modelo referente à configuração em semi-leque, considerou-se que cada estai tem entre 52 a 72 cordoalhas, conforme o projeto original da ponte. O modelo do sistema em leque possui as mesmas atribuições quanto ao número de cordoalhas do modelo original, porém com alteração da distância vertical entre os estais na torre. Já para a modelagem no formato em harpa, foi fixado o número de 60 cordoalhas para todos os estais, além da distância vertical ser a maior entre os três modelos, tendo em vista a necessidade de simetria e mesma inclinação entre todos os cabos.

A idealização da torre foi baseada nas características do projeto original da ponte, considerando apenas algumas simplificações em relação ao formato e seções transversais da torre para que os modelos assumissem diferentes disposições dos estais.

A modelagem da torre foi realizada com elementos de barra, mantendo as alturas estipuladas em projeto. As três diferentes seções transversais consideradas, foram todas simplificadas para o formato retangular com dimensões apropriadas. A forma em “H”, adotada para a torre dos modelos, conserva a suspensão lateral e quantidade de cabos do projeto original, além de permitir a ancoragem dos cabos para outras concepções estruturais.

As fundações da torre e dos pilares de extremidade, foram modeladas através de apoios rígidos, ou seja, estas estruturas estão engastadas nas fundações.

No que se refere às propriedades dos materiais, consideraram-se os estais constituídos por aço CP 177-RB, com cordoalhas de 15,2mm de diâmetro, enquanto para a torre e o tabuleiro consideraram-se as propriedades de um concreto C40.

Nas análises efetuadas consideraram-se as cargas permanentes, ou seja, o peso próprio da estrutura (calculado considerando a seção transversal dos elementos e o peso específico dos materiais) e o peso de elementos não estruturais (restantes cargas permanentes, para as quais se assumiu um valor de 3 kN/m² o que, para a largura do tabuleiro de 22,6 m, resulta em uma carga de 67,8 kN/m distribuída longitudinalmente.

Calculou-se uma estimativa inicial da força nos estais considerando que em pontes estaiadas com vários estais, pode-se assumir que o tabuleiro é uma viga contínua sobre apoios elásticos (Gomes, 2013). As forças assim determinadas são apenas uma primeira aproximação das forças nos estais, pois, a simplificação assumida, pode resultar em valores superavaliados ou subavaliados. Os elementos de cabo, que representam os estais nos modelos desenvolvidos, foram definidos considerando as estimativas iniciais das forças assim calculadas, as quais são determinantes para a definição da geometria inicial desses elementos e a sua criação nos modelos de análise.

A partir da estimativa inicial das forças nos estais, foi efetuada a análise da estrutura e calculados os deslocamentos verticais do tabuleiro. Como as forças a instalar nos estais

devem corresponder a uma situação em que os deslocamentos verticais do tabuleiro são praticamente nulos, fez-se em seguida uma análise de ajuste das forças nos estais até se chegar a essa situação de deformações verticais nulas no tabuleiro. Como a rigidez dos estais depende das forças neles instaladas, isto obrigou a fazer uma análise de tipo não linear.

Nos três modelos desenvolvidos, correspondentes às diferentes disposições dos estais consideradas, foi efetuada a análise não linear de determinação das forças nos estais até se chegar à situação de deformações verticais praticamente nulas (o que se considerou ter sido alcançado com deslocamentos verticais inferiores a 15 mm).

Da Figura 23 à Figura 25 apresentam-se os três modelos desenvolvidos.

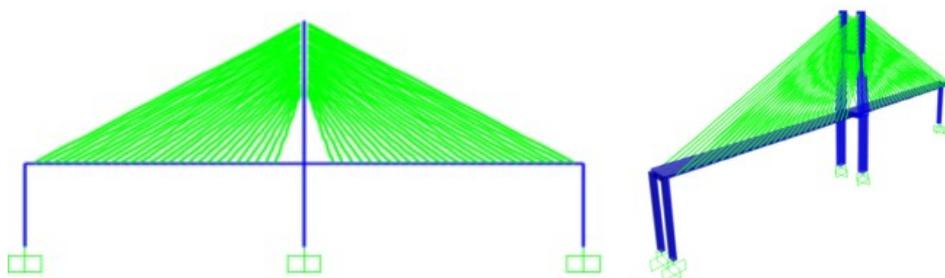


Figura 23 – Modelo com a disposição dos estais em semi-leque
Fonte: Almeida, 2018

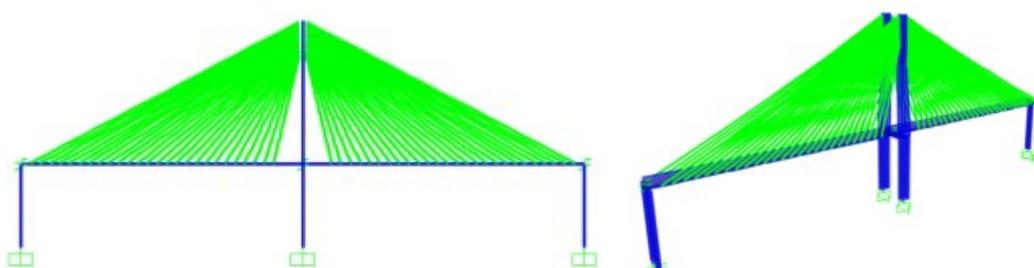


Figura 24 – Modelo com a disposição dos estais em leque
Fonte: Almeida, 2018

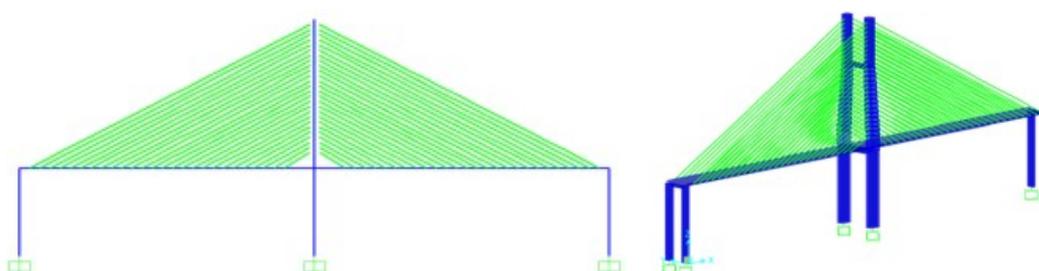


Figura 25 – Modelo com a disposição dos estais em harpa
Fonte: Almeida, 2018

7.3 Apresentação e Análise de Resultados

De modo a ilustrar o processo de cálculo das forças nos estais para as três disposições de estais consideradas no trabalho desenvolvido, apresentam-se na Figura 26 as

deformadas dos modelos de análise, calculadas para diferentes forças de tensionamento dos estais.

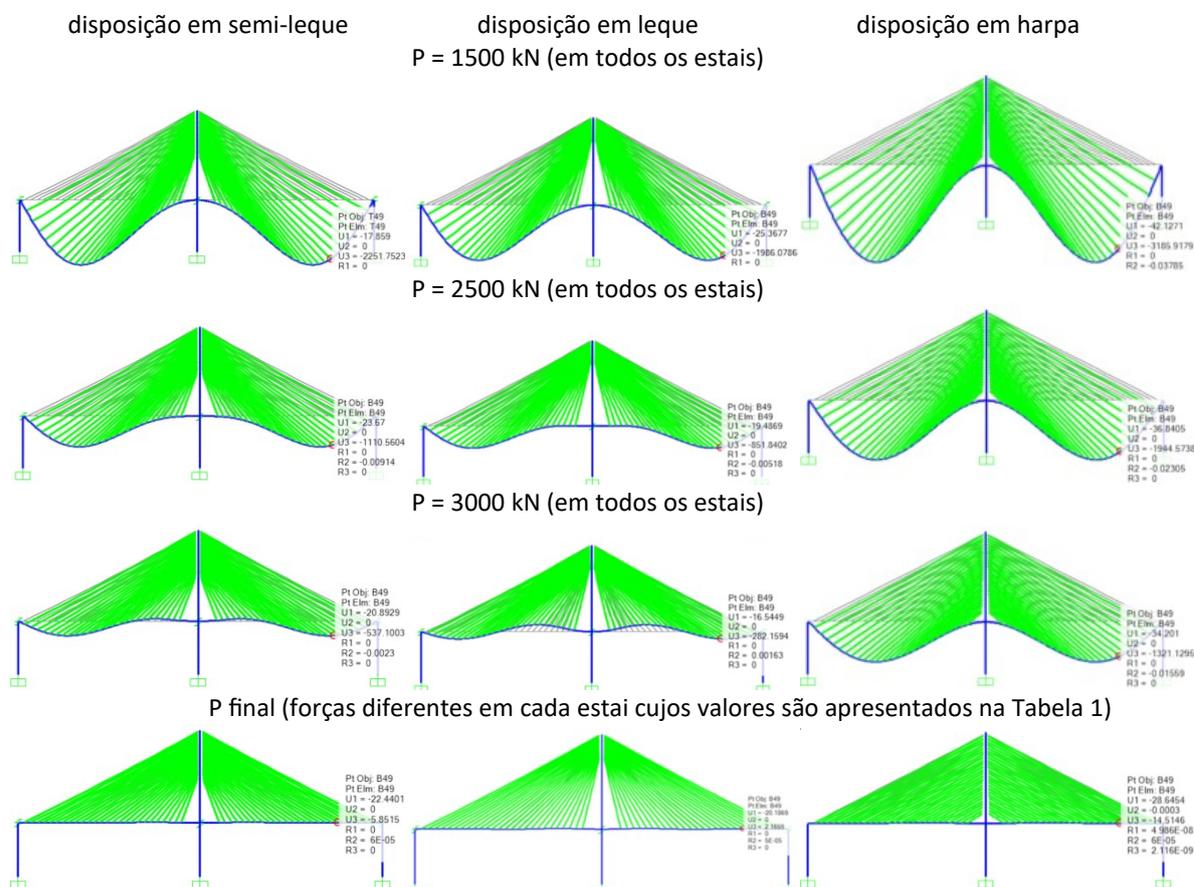


Figura 26 – Deformadas dos modelos analisados para diversas forças nos estais
Fonte: Almeida, 2018

Da primeira linha à terceira linha da Figura 26, apresentam-se as deformadas para forças iguais em todos os estais, de 1500 kN, 2500 kN e 3000 kN, respectivamente. Na última linha dessa figura apresenta-se a deformada final, obtida após o processo de ajuste das forças nos estais até que se obtiveram deformações verticais praticamente nulas no tabuleiro. Neste último caso, as forças não são iguais em todos os estais, pois resultaram do referido processo de ajuste, sendo os seus valores apresentados na Tabela 1 onde também estão indicados os valores dos deslocamentos verticais dos pontos de ancoragem dos estais no tabuleiro.

Tabela 1. Deslocamentos verticais (δ_z) no tabuleiro e forças (P) nos estais

Estai	disposição em semi-leque		disposição em leque		disposição em harpa	
	δ_z (mm)	P (kN)	δ_z (mm)	P (kN)	δ_z (mm)	P (kN)
01 e 27	-9,68	2850	-4,20	2990	-13,30	5850

02 e 28	-2,98	2880	4,00	2930	-7,70	5500
03 e 29	3,92	2900	11,10	2950	-1,10	4300
04 e 30	8,86	2490	15,00	2290	4,90	3995
05 e 31	11,32	2530	15,40	2300	9,70	3980
06 e 32	11,39	2560	13,10	2390	13,00	3975
07 e 33	9,48	2650	8,60	2400	14,80	3975
08 e 34	6,15	2730	2,70	2420	15,20	3970
09 e 35	2,08	2780	-3,60	2450	14,30	3980
10 e 36	-2,06	2800	-9,20	2470	12,30	3980
11 e 37	-5,61	2880	-13,40	2480	9,50	3980
12 e 38	-8,12	2920	-15,50	2530	6,20	3980
13 e 39	-9,33	2970	-15,40	2540	2,60	3980
14 e 40	-9,26	3015	-13,00	2630	-1,00	3995
15 e 41	-8,27	3600	-9,20	3370	-4,40	3995
16 e 42	-7,06	3615	-5,10	3400	-7,50	3995
17 e 43	-6,10	3620	-1,60	3430	-10,10	4050
18 e 44	-5,58	3615	0,80	3500	-12,20	4050
19 e 45	-5,51	3710	2,10	3550	-13,70	4055
20 e 46	-5,85	3800	2,20	3650	-14,50	4055
21 e 47	-6,47	3830	1,30	3690	-14,70	4055
22 e 48	-7,14	3870	0,20	3700	-14,20	4055
23 e 49	-7,59	3820	-1,80	3600	-13,00	4050
24 e 50	-7,48	3850	-0,30	3800	-11,10	4045
25 e 51	-6,60	3800	-3,60	3750	-8,60	4045
26 e 52	-4,90	3750	-3,40	3680	-5,70	4050

Fonte: Almeida, 2018

Analisando as deformadas apresentadas na Figura 26 é imediato constatar que para as mesmas forças nos estais, as deformações verticais do tabuleiro são bastante superiores com a disposição dos estais em harpa do que com as outras duas disposições consideradas. Sob este ponto de vista, as disposições em semi-leque e em leque são semelhantes, com deformações verticais um pouco inferiores nesta última disposição.

A constatação referida anteriormente, traduz-se no facto que as forças nos estais, necessárias para anular as deformações verticais no tabuleiro, são superiores na disposição em harpa e semelhantes entre si nas outras duas disposições, como se pode verificar nos valores apresentados na Tabela 1.

Para além das deformações verticais do tabuleiro e das forças nos estais, também se analisaram os diagramas de momento fletor no tabuleiro obtidos para os três modelos desenvolvidos. Esses diagramas são apresentados na Figura 27.

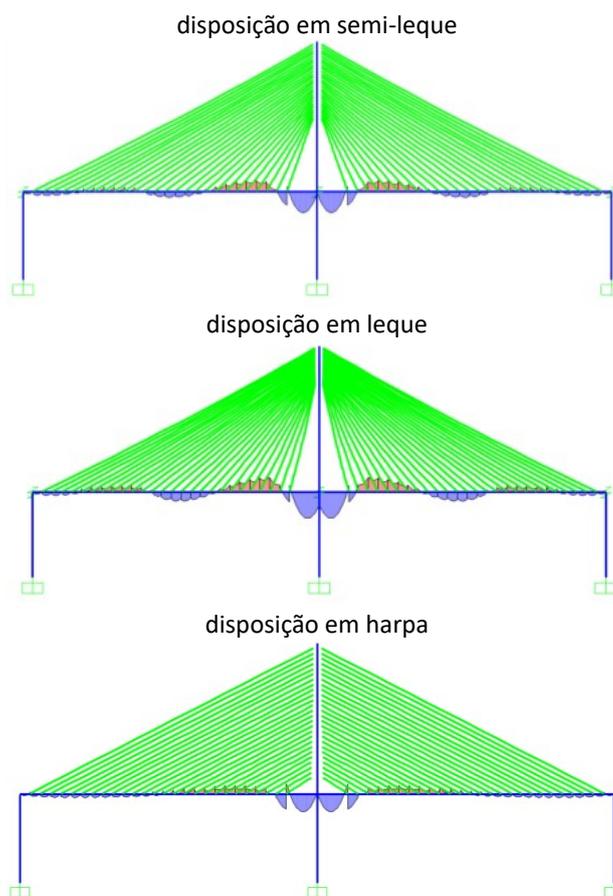


Figura 27 – Diagramas de momento fletor no tabuleiro
Fonte: Almeida, 2018

Analisando os diagramas de momento fletor apresentados na Figura 27 é perceptível que os máximos momentos positivos se verificam no trecho do tabuleiro próximo da torre, enquanto os máximos momentos negativos se verificam em seções ao longo do vão, com início na terceira aduela aproximadamente.

Em relação aos máximos momentos negativos verifica-se que ao aumento da inclinação dos estais com o plano horizontal corresponde um aumento da magnitude dos momentos no tabuleiro. Assim, na disposição em leque verificam-se os maiores momentos fletores negativos; na disposição em harpa obtiveram-se os menores momentos fletores negativos e a disposição em semi-leque corresponde a uma situação intermédia.

No que se refere aos máximos momentos positivos, o modelo com que se obtiveram menores valores é o correspondente à disposição em semi-leque. Depois, o da disposição em harpa e, finalmente, os maiores valores foram obtidos com a disposição em leque.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo descreveram-se as diferentes concepções estruturais das pontes

estaiadas, procurando evidenciar as funções de cada um dos seus componentes estruturais, tendo como objetivo a escolha do melhor tipo estrutural e construtivo para estas pontes.

Realizou-se uma análise comparativa para verificar a influência que a disposição dos estais tem, em termos dos esforços e deformações no tabuleiro e das forças nos estais. Para isso, considerou-se um caso de estudo baseado na Ponte do Rio Negro, realizando sua modelagem pelo método de elementos finitos. Foram assim desenvolvidos três modelos de análise, um com a disposição dos estais em semi-leque, outro com a disposição em leque e o terceiro com a disposição em harpa.

Considerando os três modelos desenvolvidos, sujeitos à ação das cargas permanentes, fez-se uma análise de determinação das forças nos estais de modo a obter deformações verticais praticamente nulas no tabuleiro.

Para a disposição em harpa obtiveram-se maiores deslocamentos verticais do tabuleiro e, conseqüentemente, a necessidade de forças de tensionamento dos estais maiores do que para as outras duas disposições. Já no que se refere ao momento fletor no tabuleiro, a disposição em harpa foi aquela com que se obtiveram os menores valores.

As disposições em leque e semi-leque apresentam resultados próximos entre si. Os deslocamentos verticais do tabuleiro e as forças de tensionamento dos estais da disposição em leque são mais adequados do que os da disposição em semi-leque, porém, quanto aos momentos fletores no tabuleiro, os valores são consideravelmente maiores na disposição em leque do que na disposição em semi-leque.

A escolha da concepção estrutural de uma ponte estaiada depende de vários parâmetros. Para o caso de estudo considerado neste trabalho, a disposição dos estais em semi-leque (que é a efetivamente adotada na Ponte do Rio Negro) é de fato a que possui o melhor desempenho em termos do comportamento global da estrutura, pois ao mesmo tempo em que perde em questão de forças e deslocamento para a disposição em leque e em esforços no tabuleiro para a disposição em harpa, seu comportamento estrutural pode ser considerado como globalmente melhor do que o correspondente às outras duas disposições.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, C. **Foto do Viaduto de Millau**. Disponível em: <http://mundoengenharia.com.br/maior-ponte-do-mundo-viaduto-de-millau/>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ALCKMIN, C. **Foto da Ponte Octávio Frias de Oliveira**. Disponível em: <http://pensaremarquitetura.blogspot.com/2009/06/ponte-estaiada-octavio-frias-de.html>. Acesso em: 03 jun. 2018.

ALMEIDA, P. M. N. **Cálculo de esforços em tabuleiros de pontes de tirantes durante a fase construtiva**. 2013. 158 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

ALMEIDA, L. R. T. **Concepção e análise de pontes estaiadas**. 2018. 97 f. Trabalho de Graduação - Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, 2018.

CALADO, C. M. C. **Concepção estrutural das pontes de tirantes**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2011.

DE STEFFEN. **Foto da Ponte de Brooklyn**, nov. 2017. Disponível em:
<<https://lovingnewyork.com.br/ponte-do-brooklyn/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ENESCIL. **Foto da Estação de Metrô Engenheiro Jamil Sabino**. Disponível em:
<http://www.enescil.com.br/index.php/br/estacao-de-metro-engenheiro-jamil-sabino>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

ENESCIL. **Ponte Estaiada sobre o Rio Negro. Seção transversal do tabuleiro**. Disponível em:
<http://www.enescil.com.br/index.php/en/cable-stayed-bridge-over-the-negro-river>. Acesso em: 10 out. 2018.

ENESCIL. **Ponte Estaiada sobre o Rio Negro. Seção longitudinal e transversal do trecho estaiado**. Disponível em:< <http://www.enescil.com.br/index.php/en/cable-stayed-bridge-over-the-negro-river>. Acesso em: 10 out. 2018.

ENESCIL. **Ponte Estaiada sobre o Rio Negro. Tipos de seção encontrados na torre**. Disponível em:
<http://www.enescil.com.br/index.php/en/cable-stayed-bridge-over-the-negro-river>. Acesso em: 10 out. 2018.

FIGUEIREDO, J. **Foto de Ponte de Laguna**, 2015. Disponível em:
<http://www.cimentoitambe.com.br/ponte-de-laguna-marco-da-engenharia/>. Acesso em: 05 jun. 2018.

GOMES, R. R. S. **Aspectos técnicos e construtivos do projeto de uma ponte estaiada**. 2013. 301 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

GIMSING, N. J.; GEORGAKIS, C. T. **Cable supported bridges: Concept and design**. 3rd. ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.

LAZZARI, P. M. **Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos**. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LEONHARDT, F. **Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto**. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. v. 5.

MAZARIM, D. M. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo. 2011.

MULLER, H. L. **Foto da Ponte de Porto Alencastro**, ago. 2018. Disponível em:
<https://mapio.net/wiki/Q10351441-pt/>. Acesso em: 01 jun. 2018.

NUNES, D. S. **Avaliação dos esforços de montagem dos cabos das pontes estaiadas**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

PEDRO, J. J. O. **Pontes Atirantadas Mistas – Estudo do comportamento estrutural**. Dissertação de Doutorado (Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

PRANDI, J. **Foto da Ponte Anzac Bridge- Sidney- Austrália**. Disponível em: <https://megaengenharia.blogspot.com/2016/05/anzac-bridge-sidney-australia.html>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SEVERIANO, A. **Foto do perfil longitudinal da Ponte Rio Negro**, fev., 2017. Disponível em: <http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2017/02/ponte-rio-negro-ganha-nome-do-jornalista-phelippe-daou-em-manaus.html>. Acesso em: 10 out. 2018.

STRUCTURAE. **Strömsund Bridge in Sweden**, nov. 2010. Disponível em: <http://www.structurae.de/>. Acesso em: 01 jun. 2018.

TÉCHNE. **Detalhes Construtivos da Ponte Estaiada Octavio Frias de Oliveira**, mar. 2008. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/132/artigo286484-1.aspx>. Acesso em: 03 jun. 2018.

TROITSKY, M. S. **Cable Stayed Bridges: Theory and Design**. William Clowes & Sons Limited: London, 1977.

YTZA, M. F. Q. **Métodos construtivos de pontes estaiadas: Estudo da distribuição de forças nos estais**. 151 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2009.