



Análise comparativa dos diferentes sistemas de distribuição de estais da Ponte Estaiada da Rodovia do Parque – (BR-448)

Rafael Cariolato Dorneles e Paula Manica Lazzari

Abstract- In this work we performed a simplified comparative analysis of the structure and the constructive method of the cable-stayed bridge of the Rodovia do Parque (BR-448). A study was carried out on the longitudinal distribution of the cables in order to find out the reasons for the Semi-Fan (or Semi-Harp) distribution. For this, besides the original distribution, two more distributions (Harp and Fan) were selected, in order to compare their structural behavior. We used the SAP2000 software to support the analysis. Through this program and the data related to the design of the stationary bridge, obtained through the DNIT, the properties of the materials, dimensions and loads of each piece of the structure were inserted. Analyzing the results, it was concluded that the Semi-Harp system is the most suitable solution for the construction of the bridge, because it includes the qualities of the Harp and Fan system, giving overall stability throughout the structure.

Index Terms—cable stayed bridge, cordock systems, cable

Resumo-Nesse trabalho foi realizada uma análise comparativa simplificada em relação a estrutura e o método construtivo da ponte estaiada da Rodovia do Parque (BR-448). Foi feito um estudo quanto a distribuição longitudinal dos estais com o objetivo de descobrir quais os motivos da distribuição do tipo Semi-Leque (ou Semi-Harpa) ter sido escolhida para a construção da ponte. Para isso, foram selecionadas, além da distribuição original, mais duas distribuições (Harpa e Leque), a fim de fazer uma comparação quanto ao seu comportamento estrutural. Como auxílio ao desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software SAP2000. Através desse programa e dos dados referentes ao projeto da ponte estaiada, obtidos através do DNIT, foram inseridas as propriedades dos materiais, dimensões e carregamentos de cada peça da estrutura. Analisando os resultados, chegou-se a conclusão de que o sistema Semi-Harpa (ou Semi-Leque) é a solução mais adequada para a construção da ponte, pois abrange as qualidades do sistema Harpa e Leque, dando estabilidade global em toda a estrutura.

Palavras-chave—pontes estaiadas, sistemas de cordoalhas, estais

Paula Manica Lazzari é doutora em Engenharia Civil/Estruturas, professora da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville (e-mail: paula.lazzari@ufsc.br).

Rafael Cariolato Dorneles é graduado em engenharia civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Porto Alegre/RS - Brasil (e-mail: rafael_cdorneles@hotmail.com).

I. INTRODUÇÃO

Desde os tempos remotos da história tem-se construído obras de arte especiais, mais precisamente pontes. Obras que, segundo Marchetti (2008), são projetadas para vencer obstáculos (rios, braços de mar, vales profundos, outras vias, etc.), dando continuidade a uma via de comunicação qualquer. Nessa conjuntura, há uma necessidade constante de aprofundar o conhecimento em relação a estes tipos de estrutura, visando evoluir na parte de projeto estrutural e técnicas construtivas.[6]

Para Mazarim [7], as pontes estaiadas vêm se mostrando uma solução interessante desde as civilizações antigas até os dias de hoje. Afirma que, no Egito Antigo, foram utilizadas cordas como meio de sustentação dos mastros nas suas embarcações, e, ainda, que as antigas tribos norte americanas faziam passarelas de madeira sustentadas por cordas. Troitsky (1977, citado por Ytza, 2009) afirma que é provável que as primeiras pontes estaiadas tenham sido feitas colocando um ou mais troncos para cruzar um córrego, ou amarrando troncos com um cipó para atravessar vales estreitos.

Com o passar do tempo, várias pesquisas, estudos, hipóteses foram realizadas para o aperfeiçoamento da sua construção, com várias tentativas e erros. Mazarim (2011) comenta que as primeiras tentativas de construir realmente uma ponte estaiada foi em 1784, quando um carpinteiro alemão chamado C. T. Lescher projetou uma ponte numa estrutura estaiada totalmente de madeira. Com o avanço das ligas metálicas, estas soluções se tornaram mais viáveis e capazes de sustentar maiores esforços e, conseqüentemente, maiores vãos.

Apesar do sucesso de seu desenvolvimento, muitos projetos não deram certo e resultaram em acidentes, sendo decisivos para um abandono parcial como meio construtivo por certo tempo. Para Mazarim (2011) estes acidentes aconteceram principalmente pela falta de conhecimento aerodinâmico das estruturas. A forma como a ação do vento provoca efeitos vibratórios no tabuleiro da ponte e nos estais foi uma incógnita

durante muitos anos. Mas isso não impediu que fossem realizados mais estudos e aprimoramentos, gerando estruturas com melhor desempenho, sendo capazes de sustentar a passagem do vento e o peso próprio.

Conforme Bastos (2014), atualmente as pontes estaiadas encontram-se em grande evidência para o cenário nacional e internacional.[2]. A quantidade de estudos e pesquisas realizados é considerada restrita e a sua utilização em larga escala é considerada recente, principalmente para o Brasil, país no qual foi introduzida a pouco mais de dez anos. Em dados recentes, nos últimos 15 anos, foram contabilizadas mais de 45 obras, entre as executadas e em execução. [5].

No Rio Grande do Sul, o emprego de construções com estruturas especiais estaiadas é ainda mais recente, com obras que não completaram uma década. Dentre elas, pode-se citar o viaduto que se encontra na Av. Unisinos em São Leopoldo; o viaduto na Av. Bento Gonçalves, Porto Alegre; e o viaduto Pinheiro Borda, próximo do estádio Beira-Rio, também em Porto Alegre.

Além destas, também pode-se citar a ponte estaiada da Rodovia do Parque, na BR-448, inaugurada em 2013, a qual é objeto de estudo para a realização deste trabalho. Estudamos essa ponte, realizando uma análise estrutural, comparando diferentes distribuições longitudinais da ponte estaiada (harpa, semi-harpa e leque). Esta análise foi feita com a ajuda do *software* SAP2000, sendo consideradas cargas permanentes e acidentais. Os efeitos das cargas de vento e da temperatura não foram levados em conta. Além disso, serão estudados os métodos construtivos mais adequados a serem utilizados na execução de estruturas estaiadas.

Para realizar este estudo, este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na seção II apresentará o aspecto histórico das pontes estaiadas, juntamente com seu desenvolvimento estrutural apresentado em categorias (I, II e III), a seus componentes estruturais e as tipologias de distribuição longitudinal que serão analisadas. Na seção III será apresentado o desenvolvimento da ponte estaiada na rodovia do parque no *software* SAP2000, informando seus carregamentos e propriedades da estrutura, memorial descritivo e detalhamento construtivo. Na seção IV apresentará os resultados das três diferentes tipologias de pontes estaiada, juntamente com uma análise comparativa. Na seção V apresentará as considerações finais e definirá qual tipologia de ponte é a mais adequada para ser construída.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Aspectos Históricos

Para Mazarim (2011), apesar das pontes estaiadas apresentarem gradual desenvolvimento, elas, frequentemente, continham o mesmo questionamento: como garantir uma

estrutura estável e rígida o suficiente, evitando deslocamentos exagerados provocados pelas passagens de vento ou por uma simples carga móvel.

Após vários desastres, a metodologia para o dimensionamento de pontes estaiadas foi alterada e por falta de confiabilidade da construção, a ideia foi abandonada por um longo tempo. Desta forma, a solução mais adequada para substituí-la, foi a construção de um sistema misto, envolvendo cabos pênses e estais.

Em 1938, o engenheiro alemão Franz Dischinger projetou a Ponte Stromsund, na Suécia, projeto que somente foi concretizado em 1955. Exceto as fundações, toda construção foi feita em aço, com um vão de 182 m, tornando-se uma das primeiras pontes modernas. [7]. A partir deste momento, os estudos de pontes estaiadas voltaram a ser realizados.

Além disso, outro fator importante que ocasionou o retorno de sua construção foi o período pós Segunda Guerra Mundial, que devastou toda a Europa, destruindo várias cidades. A fim de recuperar as cidades de forma mais rápida possível, era necessário um processo construtivo mais acelerado e com rigidez suficiente para ultrapassar grandes vãos, exigindo que as construções se adaptassem com o passar do tempo.

Conforme o avanço nos estudos e nos métodos de dimensionamentos das estruturas, as pontes estaiadas ficaram mais esbeltas. Mesmo assim, nos anos 70 e 80, os vãos atingidos pelas pontes não chegavam a passar dos 500 m, sendo mais viável o uso de pontes pênses, tanto na parte técnica, quanto financeira. Somente a partir dos anos 90 obteve-se um rápido desenvolvimento e um crescimento nos vãos, superando um após o outro. [7].

B. Componentes Estruturais

Segundo Mazarim (2011), de forma geral, uma estrutura estaiada consiste basicamente de um tabuleiro, torres e cabos de sustentação (estais). Numa ponte mais convencional é preciso diversos pontos de apoio para suportar um grande vão. Já em pontes estaiadas, utilizam-se menos pontos de apoio, pois toda a força de sustentação se encontra nos estais transferindo-as para a torre. Sendo assim, não há necessidade do uso de tabuleiros mais rígidos para meio estrutural, tornando-se uma peça mais esbelta e mais agradável visualmente. Com isso, toda a estrutura se torna menos avantajada e com presença de menores desordens em seu entorno.

C. Categorias Estruturais

Segundo Mazarim (2011), a geometria de seus componentes sofreu várias evoluções através dos tempos. Para um melhor entendimento, foi separada em três categorias com suas distinções. Essas categorias serão apresentadas nos próximos itens, e podem ser visualizadas na Figura 1.

Categoria I: Caracteriza-se pelo grande espaçamento longitudinal dos estais, o que sugere que o tabuleiro apresente uma rigidez mais significativa, submetendo-se a elevados esforços de flexão longitudinal. Como os estais são bem espaçados uns com os outros, a carga de resistência dos estais fica maior que em outras soluções, exigindo maiores seções transversais. Sua construção foi bastante comum nas primeiras pontes estaiadas. [7]. Quando a situação apresenta grandes vãos, essa solução não se torna favorável, pois necessita de uma elevada rigidez nas flexões longitudinais, o que complica por ter estais com espaçamento grande. Seu método de construção também é complicado, uma vez que precisa construir um tabuleiro bem extenso para fixar o próximo estai. [7]

Categoria II: Ao contrário da categoria comentada anteriormente, os pontos de ancoragem apresentam um espaçamento menor e com maior quantidade de estais, reduzindo a flexão longitudinal, mas ocasionando um momento transversal. Apesar disso, a peça apresenta um menor esforço, podendo sua geometria ser mais leve e esbelta. Segundo Mazarim (2011), isso é possível, pois, com a proximidade dos estais, o efeito de flexão longitudinal diminui e, além disso, os estais apresentam uma maior verticalidade quando chegam ao tabuleiro, reduzindo os esforços horizontais do mesmo.

Categoria III: Essa categoria não apresenta simetria, não precisando que os pilares estejam estabilizados quando se introduz uma carga acidental. Nesse caso se utiliza um elemento externo com a função de estabilizar a estrutura. Por ter uma geometria ampla e elevado peso próprio, utilizam-se blocos de ancoragens como meio de sustentação. Seu comportamento possibilita a substituição da estrutura em caso de algum desgaste, sem precisar paralisar o seu uso. [9].

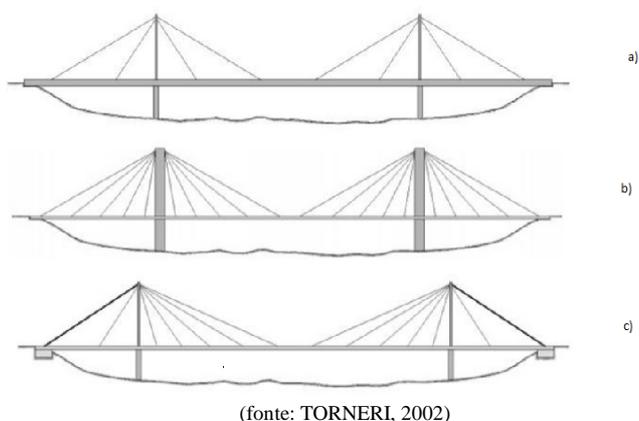


Figura 1: Representação longitudinal das categorias I (a), II (b) e III (c)

D. Estais

Formado por um agrupamento de cordoalhas ou barras, os estais são o principal componente de uma estrutura estaiada, responsável pela transferência da carga do tabuleiro para a torre. Usualmente, usam-se estais com cordoalhas de sete fios, com um distanciamento de seis a doze metros. Segundo Mazarim (2011), seu sistema é dividido em três partes: tensionamento, proteção e ancoragem.

Os elementos de tensionamento têm como responsabilidade transferir o carregamento do tabuleiro até o mastro. Quando se tem uma situação, na qual a solução envolve barras rígidas, os componentes vão ser barras únicas ou barras paralelas, ao invés de fios. Ultimamente, são mais utilizadas cordoalhas que barras rígidas. [7].

O sistema de ancoragem, de maneira geral, serve para ancorar os estais na torre e no tabuleiro, permitindo que se possa efetuar alguma manutenção, caso necessário. Esse sistema apresenta grande dimensão e elevado peso próprio, com a capacidade de resistir aos esforços provenientes dos estais. O sistema também efetua um isoalongamento dos estais, para manter o mesmo carregamento e funcionamento, segundo Mazarim (2011). O bom funcionamento dos estais está condicionado ao correto funcionamento das ancoragens [4].

A proteção é normalmente revestida de polietileno de alta densidade (PEAD) e apresenta resistência a raios ultravioletas, protegendo da corrosão e ao intemperismo. Além disso, invariavelmente usa-se tubo anti-vandalismo, com alta resistência e altura suficiente para conter vândalos. Os componentes dos estais podem ser visualizados na Figura 2 abaixo.



(fonte: MAZARIM, 2011)

Figura 2: Apresentação dos componentes dos estais

E. Distribuição Longitudinal dos Estais

Existem muitos tipos de arranjos estruturais para a distribuição longitudinal dos estais. Em função da distribuição topográfica, somente três distribuições foram analisadas para este trabalho. Essas tipologias serão apresentadas nos próximos itens e podem ser visualizadas na Figura 3.

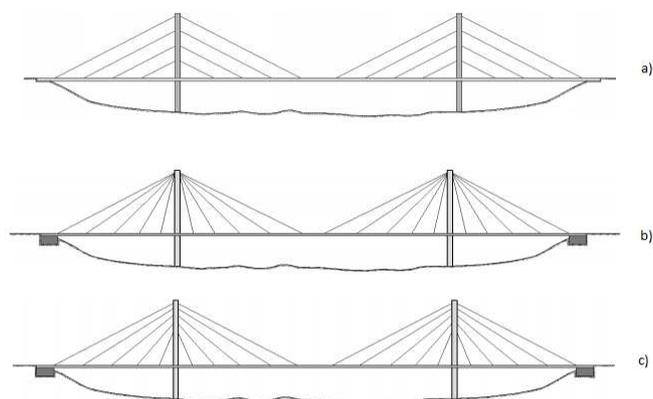
Harpa: Esse formato faz com que os estais tenham uma distribuição paralela e distanciamentos iguais entre si, oferecendo uma mesma inclinação e simetria ao sistema. No aspecto estético é bastante agradável visualmente. Na parte estrutural, torna-se eficiente com a ação das cargas permanentes, fazendo as forças na carga horizontal atuarem no mastro e as verticais na fundação, mantendo um equilíbrio [7].

Leque: Nessa configuração, diferente da harpa, os estais encontram-se ancorados no topo do mastro, dando uma maior ênfase nas forças verticais e menor para as horizontais, diminuindo o acúmulo de tensões no sistema de ancoragem do tabuleiro. Sua flexibilidade proporciona ganhos consideráveis quando são submetidos a movimentos horizontais, como abalos sísmicos. Com a inclinação dos estais, a força dos cabos para equilibrar as cargas verticais fica menor, e com isso, seu diâmetro fica menor. [7].

Dentre as principais desvantagens desse sistema, está a construção do topo da torre. Tanto na prática quanto no cálculo, esse processo abrange enorme complexidade e detalhamento na sua execução. [9]. Para Walther [8] essa região apresenta grande concentração de tensões e só pode ser construída com muita precisão e elevado custo. Vale destacar também que esse acúmulo de estais no mastro não transmite um visual agradável na parte estética da estrutura. Em função de sua complexidade construtiva, cálculo e custo elevado, essa solução não é muito usada no Brasil.

Semi-Harpa ou Semi-Leque: Esse sistema tornou-se uma solução viável como um meio de juntar os benefícios da configuração em harpa e em leque e também para solucionar os problemas que os dois apresentam.

Ao fazer a distribuição das ancoragens ao longo do pilar, as ligações ficam menos complexas e o topo do pilar fica menos carregado de estais, permitindo que o mastro fique mais esbelto. No geral, a inclinação dos cabos é maior do que no sistema em harpa. Sua inclinação variável e bem distribuída faz com que as forças horizontais aplicadas no tabuleiro fiquem menores, semelhante ao sistema em leque. [7]. Vale ressaltar que essa configuração apresenta um visual esteticamente agradável.



(fonte: TORNERI, 2002)

Figura 3: Representação da distribuição longitudinal: harpa (a), leque (b) e semi-harpa (c)

F. Tabuleiro

Também denominado de viga de enrijecimento, sua finalidade é transferir as cargas de seu peso próprio e cargas móveis para os pontos de ancoragem dos cabos. O tabuleiro comporta-se como um elemento de compressão na ponte, sendo um fator importante para o funcionamento do sistema de cargas horizontais, como as cargas de vento [7].

Os tabuleiros de concreto podem ser pré-moldado ou moldado *in- loco*. Inicialmente, eram estruturas bem rígidas, mas, após a inclusão de um maior número de estais e o uso do concreto protendido, ficaram mais esbeltas e mais vinculadas ao fator estético [7].

Nas primeiras pontes estaiadas construídas, foram usados tabuleiros metálicos, por apresentarem maior rigidez para conter a flexão longitudinal de uma estrutura com poucos estais ancorados e também pela facilidade de execução. Segundo Mazarim (2011), esses materiais são 80% mais leves que os tabuleiros de concreto, gerando uma redução das dimensões dos elementos estruturais, porém são mais caros.

Também existe o tabuleiro misto (concreto e aço), que ao trabalhar de forma conjunta com estes dois segmentos, pode-se ter inúmeras vantagens. Segundo Mazarim (2011), o uso do aço possibilita uma seção reduzida e uma facilidade na instalação e condução do material e o concreto traz benefício na sua durabilidade e na execução.

G. Torre

Também denominada de mastro ou pilone, tem a principal função de transmitir para as fundações as cargas originadas pelo sistema de cabos. [4].

Em função do esforço de compressão aplicado e da distribuição dos estais, as torres apresentam grandes alturas. Por apresentar resistência à compressão, normalmente o

material mais usado é o concreto. Apesar de existirem torres em aço, o uso desse material deve ser bem planejado e estudado, em função do custo, mão-de-obra, estabilidade estrutural e disponibilidade de material.

H. Métodos Construtivos

Para construção de uma ponte, devem ser levados em conta os parâmetros específicos necessários para fazer um estudo aprofundado e apresentar as suas propriedades técnicas. Quem realiza essa tarefa na maioria dos casos é o Estado, a concessionária ou algum órgão privado.

Segundo Ytza (2009), dentre as características que são levadas em conta estão a localização, finalidade, importância, durabilidade, cronograma de obra e o custo. A importância da ponte e a durabilidade desejada levam ao estudo de materiais a serem utilizados e a forma que estes devem ser preparados e implementados. [10]. Os principais métodos construtivos estão indicados abaixo.

Cimbramento Geral: Método antigo, mais utilizado em zonas de baixo gabarito, solos resistentes e sem congestionamento de ferrovias e estradas. Não se deve usar quando a ponte necessita atravessar correntes de água. Existem dois tipos de cimbramento ou estaqueamento, que se usam na construção; os fixos e os móveis. De forma geral, esse procedimento apresenta dificuldade na sua construção. Por isso, se a obra for complexa, esse método vai interromper ao invés de solucionar a construção da ponte, além de ser um procedimento de custo elevado.

Balanços Sucessivos: É o método construtivo que melhor se adapta às obras estaiadas, sendo o método mais utilizado [10]. Esse procedimento construtivo é indicado quando a altura da ponte em relação ao terreno for grande, sendo necessário obedecer ao gabarito de navegação durante a construção.

Sua construção é feita por segmentos (aduelas), formando consolos que vão avançando sobre o vão. Dessa solução, existem dois métodos construtivos. Um deles é o método *in loco*, na qual se utiliza formas deslizantes para a realização da concretagem e quando se atinge a resistência, as aduelas são protendidas. Se utilizar aduelas pré-moldadas, elas serão feitas no canteiro de obras e transportadas com auxílio de treliças metálicas até atingir o extremo do balanço e logo são protendidas longitudinalmente.

Lançamentos Progressivos: Solução utilizada quando se tem greides elevados, rios, vales profundos ou construções de grande porte. A estrutura é feita nas margens da obra e concretada sobre formas metálicas fixas. Quando se chega à resistência calculada, ela é empurrada até atingir a posição

final ao longo do vão, com o auxílio de macacos hidráulicos e sobre aparelhos de apoios deslizantes de Teflon sobre os pilares. Segundo Ytza (2009), esse método apresenta rápida execução, redução na mão de obra, redução de formas e é mais eficaz que o método de cimbramento geral.

III. DESENVOLVIMENTO

A. Ponte sobre o Rio Gravataí

Considerações Gerais: A ponte estaiada na Rodovia do Parque, na BR-448, apresenta uma extensão total de 268 m. Ela é composta por um segmento central, sobre o Rio Gravataí, com distância de 148 m e mais dois com comprimento de 60 m cada, nas extremidades. Sua seção transversal apresenta 31,40 m de largura. [3].

A rodovia apresenta seis faixas de rolamento em duas pistas separadas por uma guia central, seguindo as recomendações de segurança padrão DNIT. Além disso, o projeto está vinculado para veículos de Classe 450, através das exigências das Normas Brasileiras e especificações do DNIT, sendo o trecho estaiado, às recomendações do Eurocode. [3].



(fonte: Ajustada pelo autor, 2016)

Figura 4: Ponte estaiada da Rodovia do Parque na BR-448, Porto Alegre

Estruturas e Detalhes Construtivos: As torres apresentam uma seção quadrada vazada com dimensão variada, com base de 6,00 m x 3,00 m e topo de 4,00 m x 3,00 m. Na parte superior da torre estão instaladas as ancoragens destinadas a instalação dos estais. Também foi projetada uma travessa que interliga as duas torres transversalmente, sendo elas de concreto protendido moldadas *in loco*. Na extremidade da torre, possuem dois pilares detalhados numa sessão retangular vazada com dimensão externa de 3,00 m x 3,00 m. [3].

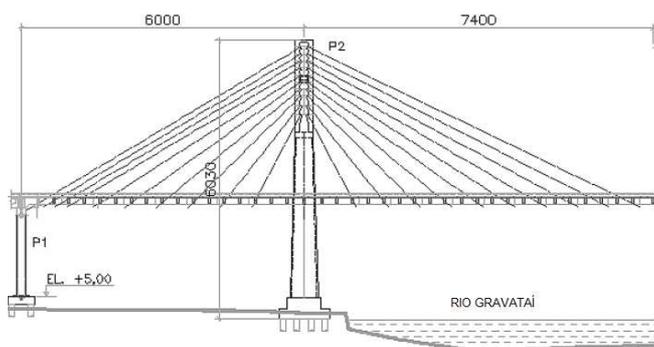
Todo o trajeto sobre o rio Gravataí foi projetado em balanços sucessivos, com tabuleiros moldadas *in loco*, sendo 18 presentes no vão central e 7 em cada extremidade do vão, cada um com 6,60 m de comprimento. Segundo o DNIT, o fechamento central foi executado com escoramento suspenso nas aduelas finais com comprimento final de 5,60 m. A cada

3,30 m, foram instalados transversinas metálicas com variação na altura entre 1,25 m e 1,75 m, com 79 unidades no total. As vigas longitudinais, na qual se instala as ancoragens, possuem segmento constante com altura de 1,60 m e largura variável entre 1,40 m e 1,60 m. Essas vigas possuem duas unidades, cada uma localizada nas extremidades do tabuleiro na seção transversal da estrutura.

Esse projeto apresenta três tipos básicos de ancoragens fixas e reguláveis, atendendo todos os requisitos ditos através das normas internacionais:

- a) 31 cordoalhas com diâmetro de 15,7 mm;
- b) 37 cordoalhas com diâmetro de 15,7 mm;
- c) 55 cordoalhas com diâmetro de 15,7 mm.

Segundo o DNIT, para obter melhor qualidade da ancoragem, foram realizados ensaios do efeito de fadiga por laboratório especializado com quantidade mínima de $2,10 \times 10^6$ ciclos na unidade ancoragem-estai. A geometria da ponte estaiada da BR-448 pode ser vista na Figura 5 a seguir.



(fonte: Ajustada pelo autor a partir do memorial descritivo do DNIT [3], 2018)

Figura 5: Geometria da ponte estaiada

O trecho inicial da superestrutura foi construído com escoramento direto após a concretagem, seguido pela protensão nas travessas que interligam as duas torres. Após a instalação, tensionamento do primeiro estai e liberado o escoramento, foram instalados os carros de concretagem das próximas aduelas e as demais peças da ponte estaiada. O tensionamento dos estais foi feito com auxílio de um macaco tipo monocordoalha, levando em conta a possibilidade de um estaiamento global no tabuleiro, para uma possível correção no greide da ponte. Finalizado o estaiamento, foi instalado tubos anti-vandalismo e tubos em PEAD (polietileno de alta densidade), para conter raios ultravioletas. [3].

O concreto apresenta resistência característica à compressão (f_{ck}) de 40 MPa, com presença de sílica ativa e aditivos, para dar estabilidade e maior trabalhabilidade ao concreto e a/c =

0,45, para minimizar a retração e garantir a resistência suficiente para estaiamento após 3 dias de cura.

Na ponte estaiada da BR-448, o sistema de estais escolhidos foram cordoalhas múltiplas de sete fios, bastante utilizada no Brasil e no exterior, com resistência que equivale ao aço CP-170 RB. Para essa tipologia, o número de cordoalhas mais comum está na faixa de 19 a 161 cordoalhas. A atuação dos estais se deve pelas solicitações do peso próprio e da força axial aplicada na estrutura. [3].

Propriedades dos Materiais: Para dar início à análise estrutural da ponte estaiada sobre o rio Gravataí, é necessário estabelecer os parâmetros de cada material utilizados no projeto. Esses dados foram retirados através do memorial descritivo e memória de cálculo do DNIT.

Todas as propriedades de cada material, para cada peça da estrutura estaiada, estão apresentados no Quadro 1 abaixo. Todos os dados presentes foram levados em conta no *software* SAP2000.

Quadro 1: Propriedades dos Materiais

Aço CA-50	Concreto
$E_s = 206010000 \text{ kN/m}^2$	$E_c = 34744077 \text{ kN/m}^2$
$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,40$
$f_{yd} = 434783 \text{ kN/m}^2$	$f_{cd} = 28,6 \text{ MPa}$ $f_{ctk} = 3,51 \text{ Mpa}$
Aço para Estaiamento CP-170 RB	Veículo-Tipo de 450kN
$E_s = 191295000 \text{ kN/m}^2$	Carga por roda: 75kN
$f_{ptk} = 1770 \text{ MPa}$	Carga de multidão distribuída: 4,905 kN/m ²

Seguindo a NBR-7188 [1] e através dos dados do projeto da ponte estaiada sobre o Rio Gravataí, o veículo-tipo da superestrutura apresenta classe 450, com 450 kN de peso total. A carga móvel de pontes rodoviárias ou também chamado de trem-tipo é composta por um veículo e a carga uniformemente distribuída. A área do veículo é retangular e apresenta 3,00 m de largura e 6,00 m de comprimento.

Cargas Atuantes: Em seguida foram definidas as cargas atuantes de cada peça da ponte estaiada. Todas as cargas apresentadas no Quadro 2 a seguir, foram inseridas no programa SAP2000. A carga móvel foi considerada por uma carga distribuída de forma uniforme.

Quadro 2: Cargas Atuantes

Peso Próprio da Viga (g_1)
$g_1 = 24,525 \text{ kN/m}$ - seção vazada
$g_2 = 44,4393 \text{ kN/m}$ - seção cheia
Peso Próprio da Laje sobre a Viga (g_1^*)
$g_1^* = 21,1896 \text{ kN/m}$
Peso Próprio da Transversina (g_1)
$g_1 = 21,2877 \text{ kN/m}$
Pavimento e Recapeamento (g_2)
Carga Adicional de $1,962 \text{ kN/m}^2$
PAV = $11,576 \text{ kN/m}$
Guarda-Rodas (g_2)
Guarda-Rodas Lateral = $6,05 \text{ kN/m}$
Guarda-Rodas Central = $2,1419 \text{ kN/m}$

Modelagem da Ponte sobre o Rio Gravataí: Após obter todos os dados, foi lançado o modelo da ponte estaiada da BR-448 no *software* SAP2000. Com esse programa, foram definidas as propriedades dos materiais, carregamentos, geometrias e dimensões de cada peça. Primeiramente, foi feito o projeto original (Sistema Semi-Leque) da ponte, sem nenhuma alteração na sua geometria ou na distribuição dos estais, à exceção da base da torre e das fundações. Estas foram substituídas por apoios com restrição total dos movimentos, ou seja, foram engastados, não sofrendo nenhuma alteração na sua modelagem original.

No Sistema em Leque, toda a distribuição da ancoragem foi direcionada para topo da torre. Já no Sistema em Harpa, a distribuição dos estais no tabuleiro foi o mesmo que da torre. Essas três tipologias de organização podem ser observadas na Figura 6 a seguir.

Para inserir os carregamentos no *software*, foram aplicadas as cargas do peso próprio e em seguida as de carga móvel, que foi distribuída no mesmo instante em todos vãos. Sendo nomeadas respectivamente de *Dead* e *Moving*. Levando em consideração o coeficiente de impacto multiplicado pelo valor da carga móvel. Após esse procedimento, as cargas foram fundidas em uma única configuração chamada *Comb*, na qual soma-se as cargas de movimento e de peso próprio.

IV. RESULTADOS

Depois de feitas as três tipologias de pontes estaiadas, partiu-se para a análise de cada elemento estrutural (torre, viga, tabuleiro e estais) de cada um dos modelos, através das solicitações originadas dos carregamentos (Esforço Normal e Momento Fletor) gerados pelo programa SAP2000. Segundo Torneri (2002), o comportamento estrutural de uma ponte estaiada se deve principalmente a interação de cada parâmetro.

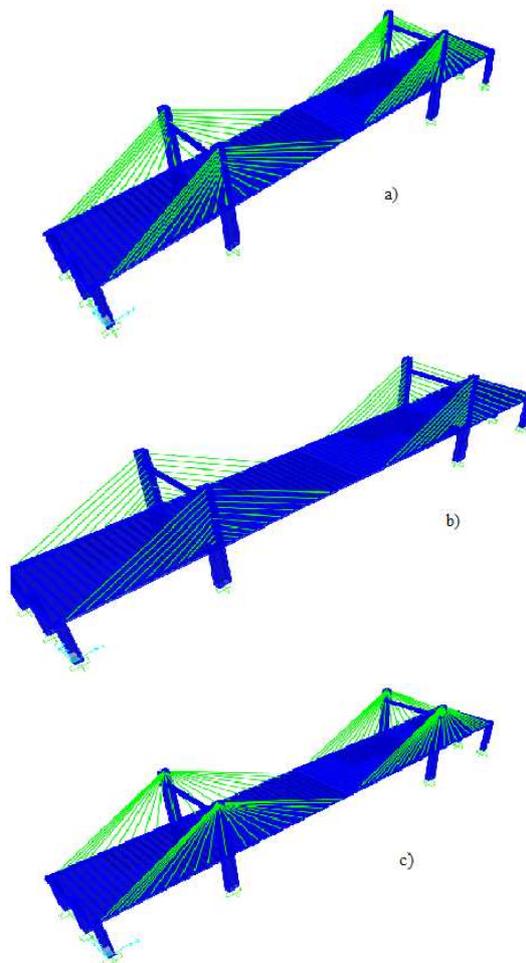


Figura 6: Pontes Estaiadas lançadas no SAP2000: a) Semi-Harpa ou Semi-Leque; b) Harpa e c) Leque

A. Sistema Harpa

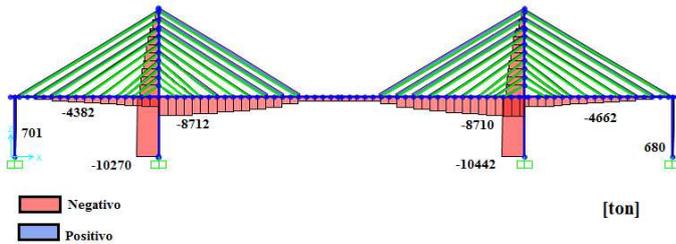
Segundo Torneri (2002), este sistema é considerado instável por apresentar uma simetria na distribuição dos estais e nas medidas de rigidez à flexão e uma distribuição assimétrica das cargas em função da variação da altura e do espaçamento dos estais dando maior deformabilidade ao tabuleiro. Além disso, quanto mais próximos os estais ficam no tabuleiro, mais ele sofrerá esforços horizontais da Força Normal, dando instabilidade na estrutura. Analisando os diagramas das solicitações de Esforço Normal e Momento Fletor (Figura 7), percebe-se que as torres apresentam maior valor de Esforço Normal comparado ao tabuleiro, indicando que o tabuleiro é a estrutura mais rígida e a torre mais esbelta.

Para Torneri (2002), em função do espaçamento e pelo número de estais, ocorre um melhoramento na distribuição das cargas de toda a estrutura, garantindo uma estabilidade global. Sua flecha de deformação, em função da presença de cabos rígidos próximos à torre, fez seu valor ficar menor se comparado ao sistema Semi-Leque. Além disso, conforme os

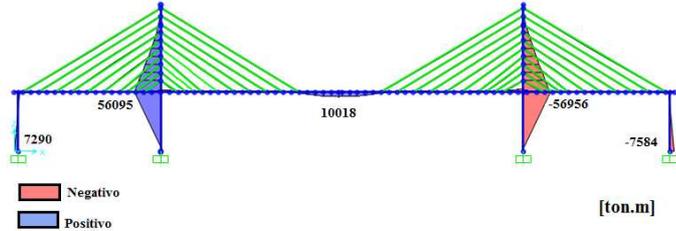
estais vão se avançando na torre, o comprimento do estais fica mais curto e mais rígido, fazendo as solicitações da estrutura ficarem menos evidentes.

Para melhor entendimento, esse sistema pode ser comparado a uma gangorra em seu ponto de equilíbrio, se houver algum excesso de carregamento em algum ponto da estrutura, o sistema ficará instável. O resultado das solicitações do sistema Harpa pode ser analisado na Figura 6 a seguir.

Esforço Normal:



Momento Fletor:



Deformação:

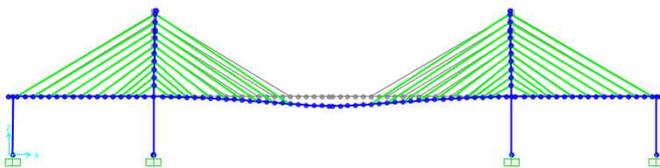


Figura 7: Sistema Harpa: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação

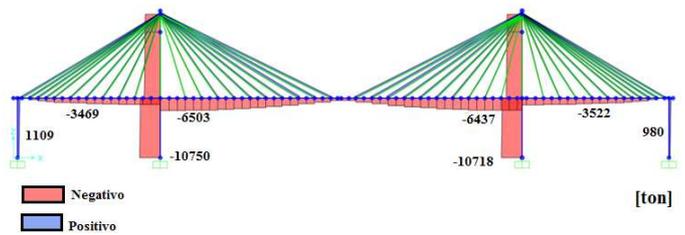
B. Sistema Leque

Nesse sistema, devido à variação da inclinação dos estais, o efeito do Esforço Normal no vão central é 25% menor se comparada com o sistema em Harpa. Em função dos cabos estarem essencialmente tensionados e ancorados em um único ponto, no topo do mastro, o deslocamento da torre e a deformação do tabuleiro são menores comparados às outras configurações. Encontrou-se pouca deformação no plano longitudinal, pois com o aumento da tração no cabo, ele fica mais rígido e a flecha diminui.

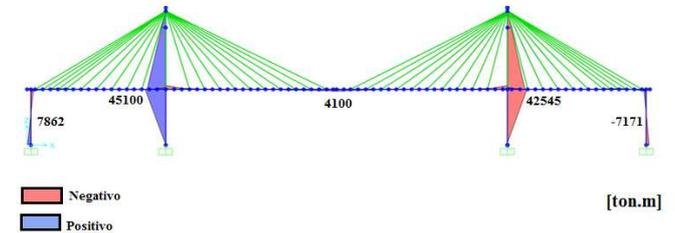
Em função dos estais estarem bem tensionados e verticalizados, as solicitações de Esforço Normal e Momento Fletor apresentaram valores pequenos em relação ao sistema Harpa e Semi-Harpa. Por esse motivo o tabuleiro apresenta pouca evidência de momento no diagrama de Momento Fletor. Analisando a torre, percebe-se que, em função dos estais

estarem ancorados no topo, a torre apresenta efeitos de compressão em toda a sua estrutura. Por isso é necessário ter uma torre rígida para dar estabilidade global na estrutura. Essas observações podem ser analisadas na Figura 8 a seguir.

Esforço Normal:



Momento Fletor:



Deformação:

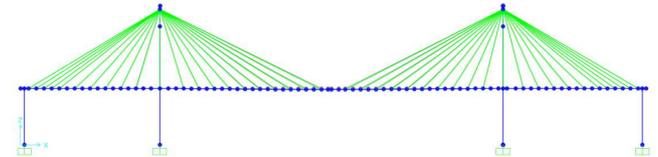


Figura 8: Sistema Leque: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação.

C. Sistema Semi-Leque ou Semi-Harpa

Analisando os diagramas de solicitações de Esforço Normal e Momento Fletor, referentes ao sistema Semi-Leque ou Semi-Harpa, tem-se a conclusão de que seus resultados, no geral, ficam intermediários em relação ao Sistema Harpa e Leque. Como já mencionado anteriormente, esse sistema surgiu para fundir as qualidades dos Sistema Harpa e Leque e melhorar os defeitos presentes.

Em Leque, existe um acúmulo de tensões encontrado em um único ponto de ancoragem, no caso no topo do mastro, indicando que a torre necessita ter um comportamento rígido para absorver estes esforços. Na configuração em Harpa, apresenta uma simetria na distribuição dos estais, dando maior variabilidade nas solicitações, tanto verticais quanto horizontais, causando uma instabilidade na estrutura. Mas, ao fazer um agrupamento no sistema de ancoragem e elevar mais próximo do mastro, os esforços horizontais ficarão menos evidentes e a estrutura ficará estável. Essas observações podem ser analisadas através da Figura 9 a seguir.

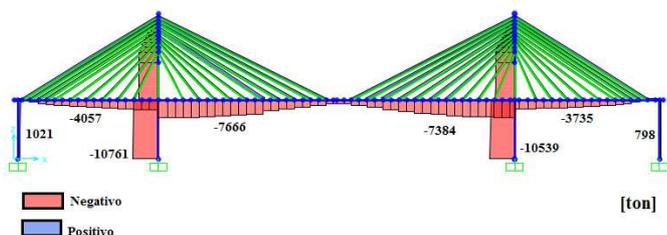
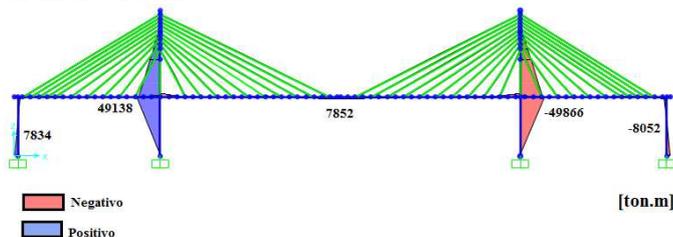
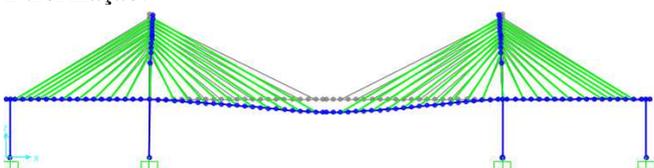
Esforço Normal:**Momento Fletor:****Deformação:**

Figura 9: Sistema Semi-Leque ou Semi-Harpa: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto que projetos e construções vinculadas às pontes estaiadas tem-se aumentado nos últimos anos, foi realizada uma análise construtiva e estrutural de uma ponte estaiada, que se encontra em Porto Alegre, na BR-448, na rodovia denominada de Rodovia do Parque.

O objetivo desse trabalho, foi descobrir os principais motivos que levaram a ponte da Rodovia do Parque a apresentar uma distribuição longitudinal do tipo Semi-Harpa (ou Semi-Leque). Para isso, foram selecionadas, além da distribuição original, mais duas distribuições (Harpa e Leque), a fim de fazer uma comparação quanto ao seu comportamento estrutural.

Como auxílio ao desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o *software* SAP2000. Através desse programa e os dados referentes ao projeto da ponte estaiada, obtidos através do DNIT, foram inseridas todas as propriedades, dimensões e carregamentos de cada peça da estrutura, somente alterando a distribuição de ancoragem. Ao testar o carregamento, foram somente levadas em conta à carga do peso próprio e a carga móvel.

Com base nos resultados das solicitações (esforço normal e momento fletor) de cada tipologia de distribuição longitudinal

da ponte, foi feita uma análise para cada uma delas. Chegou-se à conclusão que a distribuição Semi-Harpa é a alternativa mais correta para se construir, aproveitando as boas características do sistema Harpa e Leque.

Apesar da distribuição em Harpa apresentar uma simetria esteticamente agradável, ela gera deslocamentos maiores no tabuleiro se comparado aos outros tipos de distribuição. Já, em uma distribuição em Leque todos os estais estão extremamente tensionados, necessitando de uma torre mais rígida, além de um cuidado especial na execução das ancoragens da torre.

Por ser uma estrutura que abrange as qualidades das duas tipologias comentadas anteriormente, a Semi-Leque pode ser definida como se fosse uma estrutura “perfeita”, por apresentar um alívio nas tensões dos cabos, um equilíbrio de seus esforços (esforço normal e momento fletor), além de uma simetria visual. Em meio a duas extremidades, encontrou-se uma alternativa intermediária.

Para futuros trabalhos, sugere-se análise quanto às cargas de vento, influência na temperatura, análise de influência dos estais quanto à distribuição transversal.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 7188 (2013) – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre – Rio de Janeiro, 4 p.
- [2] BASTOS, V. L. Desenvolvimento de pontes estaiadas.11p. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2014.
- [3] DNIT-Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica e Ambiental e Projeto Executivo de Engenharia para Implantação de Rodovia Federal: Projeto de Execução da Ponte sobre o Rio Gravataí – Trecho Estaiado, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- [4] GOMES, R. R. S. Aspectos técnicos e construtivos de projeto de uma ponte estaiada. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [5] LACERDA, I. G. Pontes Estaiadas com Selas ou Ancoragens Individuais 7 p. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2016.
- [6] MARCHETTI, O. Pontes de concreto armado. 237 p. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- [7] MAZARIM, D. M. Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2011.
- [8] TORNARI, P. Comportamento estrutural de pontes estaiadas: comparação de alternativas. 272 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [9] VARGAS, L. A. B. Comportamento estrutural de pontes estaiadas: efeitos de segunda ordem. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [10] YTZA, M. F. Q. Métodos construtivos de pontes estaiadas: estudo da distribuição de forças dos estais. 2009. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.