



Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil

3

Atena
Editora
Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Camila Alves de Cremo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
A642	<p>A aplicação do conhecimento científico na engenharia civil 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-169-5 DOI 10.22533/at.ed.695200907</p> <p>1. Engenharia civil – Pesquisa – Brasil. 2. Construção civil. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga.</p> <p style="text-align: right;">CDD 338.4769</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Em “A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Civil 3” trazemos vinte e um capítulos que trazem estudos com boas contribuições para a Engenharia Civil.

Temos vários estudos a respeito da utilização da simulação numérica e computacional na resolução de problemas no projeto e execução de estruturas.

O estudo sobre o comportamento de estruturas utilizando determinados materiais proporciona sua validação como alternativa construtiva. Trazemos também análises a respeito de estruturas submetidas a calor intenso, o que permite otimizar os projetos, considerando situações de incêndio.

Tendo em vista a crescente preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais, torna-se imprescindível os estudos que visem soluções ligadas a otimização na utilização de materiais e desenvolvimento de materiais sustentáveis.

A análise de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projetos de engenharia permite realizar comparativos com a finalidade de subsidiar o projetista a optar por ferramentas mais adequadas e seguras, proporcionando uma melhor qualidade em projetos.

Esperamos que esta coletânea seja útil aos seus estudos. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado

CAPÍTULO 8 99

ANÁLISE ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA DA PONTE ESTAIADA DA RODOVIA DO PARQUE – (BR-448)

Rafael Cariolato Dorneles

Paula Manica Lazzari

DOI 10.22533/at.ed.6952009078

ANÁLISE ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA DA PONTE ESTAIADA DA RODOVIA DO PARQUE – (BR-448)

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 03/04/2020

Rafael Cariolato Dorneles

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS Porto Alegre – RS

Paula Manica Lazzari

Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
UFRGS
Porto Alegre – RS

RESUMO: Nesse trabalho foi realizada uma análise estrutural e construtiva 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, somente o peso próprio e as cargas móveis da ponte. 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 ancoragem, estais.

STRUCTURAL AND CONSTRUCTIVE ANALYSIS OF THE CABLE-STAYED BRIDGE OF THE RODOVIA DO PARQUE - (BR-448)

ABSTRACT: In this work was carried out a structural and constructive analysis 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 chosen for the bridge construction. For this, besides the original distribution, two more distributions (Harp and Fan) were selected, in order to make a comparison regarding their structural behavior. As an aid to the development of the work, SAP2000 software was used. 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 covers the qualities of the Harp and Fan system, giving overall stability throughout the structure.

KEYWORDS: cable stayed bridge, anchorage systems, cable.

1 | 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.

Para Mazarim (2011), 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, num projeto de um carpinteiro alemão chamado C. T. Lescher, no qual 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 o vento provoca efeitos de vibração no tabuleiro nos estais, foi uma incógnita durante muitos anos. Mas, isso não impediu de oportunizar mais estudos e aprimoramentos, gerando estruturas com maior rigidez, 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. 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 quinze anos, foram contabilizados mais de 45 obras, entre as executadas e em execução. (LACERDA, 2016).

No Rio Grande do Sul, o emprego de construções com estruturas especiais estaiadas é mais recente ainda, com obras que não chegam a fazer uma década de realização. Dentre elas, pode-se citar a ponte estaiada da Rodovia do Parque, na BR-448, inaugurada em 2013, na qual é objeto de estudo para a realização deste trabalho. Fazendo uma análise estrutural, comparando diferentes distribuições longitudinais da ponte estaiada. Esta análise será feita com a ajuda do *software* SAP2000, sendo consideradas cargas permanentes e acidentais. Além disso, serão estudados os métodos construtivos mais adequados a serem utilizados na execução de estruturas estaiadas.

Não serão partes integrantes nesse trabalho, qualquer outro estudo estrutural que não envolva estruturas estaiadas ou que apresentem semelhanças aparentes, como pontes pênséis entre outras. Os esforços de fundação não entrarão em pauta no projeto, por isso sofreram uma simplificação quanto a sua contribuição na estrutura. Este estudo também não envolverá os efeitos das cargas de vento e da temperatura.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 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.

2.1.1 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, é mais utilizada cordoalhas do que barras rígidas. (MAZARIM, 2011).

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 (GOMES, 2013).

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.

2.1.2 Distribuição longitudinal dos estais

Em função da distribuição topográfica, somente três distribuições foram analisadas para este trabalho. Essas tipologias serão apresentadas nos próximos itens.

2.1.2.1 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 (MAZARIM, 2011).

2.1.2.2 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. (MAZARIM, 2011).

Dentre as principais desvantagens desse sistema, está a construção do topo da torre. Tanto na prática quanto no cálculo, esse processo abrange enorme complexidade na sua execução. (VARGAS, 2007). Para Walther (1985, citado por TORNARI, 2002) 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.

2.1.2.3 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. (MAZARIM, 2011). Vale ressaltar que essa configuração apresenta um visual esteticamente agradável.

2.1.3 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 (MAZARIM,2011).

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 (MAZARIM, 2011).

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.

2.1.4 Torre

Também denominada de mastro ou pilone, tem a principal função de transmitir para a fundações as cargas originadas pelo sistema de cabos. (GOMES, 2013). 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.

2.2 Métodos Construtivos

Para construção de uma ponte, deve ser levada em conta os seus 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 está 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. (COMBAULT, 2008 citado por YTZA, 2009). Para a construção da ponte estaiada na BR-448 foi utilizado o método de Balança Sucessivo, que será explicado a seguir.

2.2.1 Balanças Sucessivos

É o método construtivo que melhor se adapta às obras estaiadas, sendo o método mais utilizado (STUCCHI, 1999 citado por YTZA, 2009). 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.

3 | PONTE SOBRE O RIO GRAVATAÍ

3.1 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. (DNIT, 2011). 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 45, através das exigências das Normas Brasileiras e especificações do DNIT, sendo o

trecho estaiado, às recomendações do Eurocode. (DNIT, 2011).

3.2 Estrutura 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 seção retangular vazada com dimensão externa de 3,00 m x 3,00 m. (DNIT, 2011).

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.

O trecho inicial da superestrutura foi construído com escoramento direto após a concretagem e em seguida a 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 do 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 HDPE, para conter raios ultravioletas. (DNIT, 2011).

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. (DNIT, 2011).

3.2.1 Propriedades dos materiais

Os parâmetros de cada material utilizado 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 foram levados em conta no *software* SAP2000.

Aço CA-50	Concreto	Aço para Estaiamento CP-170 RB
$E_s = 21000000 \text{ tf/m}^2$	$E_c = 3541700 \text{ tf/m}^2$	$E_s = 19500000 \text{ tf/m}^2$
$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$	$f_{ptk} = 1770 \text{ MPa}$
$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,40$	Veículo-Tipo de 45 tf
$f_{yd} = 43500 \text{ tf/m}^2$	$f_{cd} = 28,6 \text{ MPa}$	Carga por roda: 7,5 tf
	$f_{ctk} = 3,51 \text{ MPa}$	Carga de multidão distribuída: 0,500 tf/m ²

Quadro 1 : Propriedades dos Materiais

Seguindo a NBR-7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982) e através dos dados do projeto da ponte estaiada sobre o Rio Gravataí, o veículo-tipo da superestrutura apresenta classe 45, com 45 tf 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.

3.2.2 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.

Peso Próprio da Viga (g1)	Pavimento e Recapeamento (g2)
$g1 = 2,50 \text{ tf/m}$ - seção vazada	Carga Adicional de $0,2 \text{ tf/m}^2$
$g2 = 4,53 \text{ tf/m}$ - seção cheia	PAV = $1,18 \text{ tf/m}$
Peso Próprio da Laje sobre a Viga (g1*)	Guarda-Rodas (g2)
$g1^* = 2,16 \text{ tf/m}$	Guarda-Rodas Lateral = $0,6165 \text{ tf/m}$
Peso Próprio da Transversina (g1)	Guarda-Rodas Central = $0,2466 \text{ tf/m}$
$g1 = 2,17 \text{ tf/m}$	

Quadro 2: Cargas Atuantes

3.3 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 das fundações. Estas foram substituídas por apoios com restrição total dos movimentos, ou seja, foram engastados. Para inserir os carregamentos no *software*, foram aplicadas as cargas do peso próprio e em seguida as de carga móvel, que foram nomeadas respectivamente de *Dead* e *Moving*. 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.

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 1 a seguir.

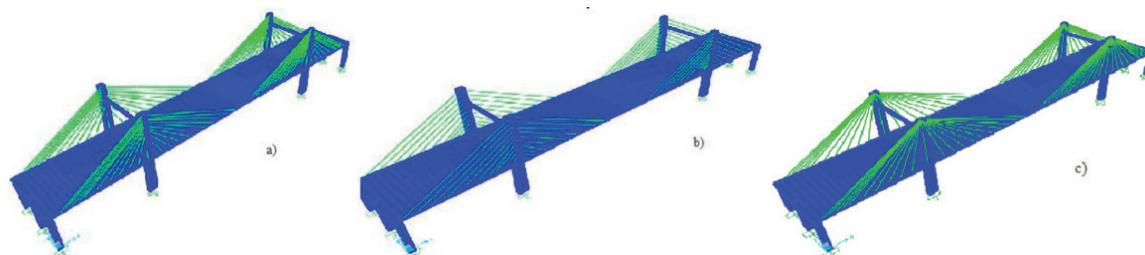


Figura 1: Pontes Estaiadas lançadas no SAP2000: a) Semi-Harpa ou Semi-Leque; b) Harpa e c) Leque

4 | RESULTADOS

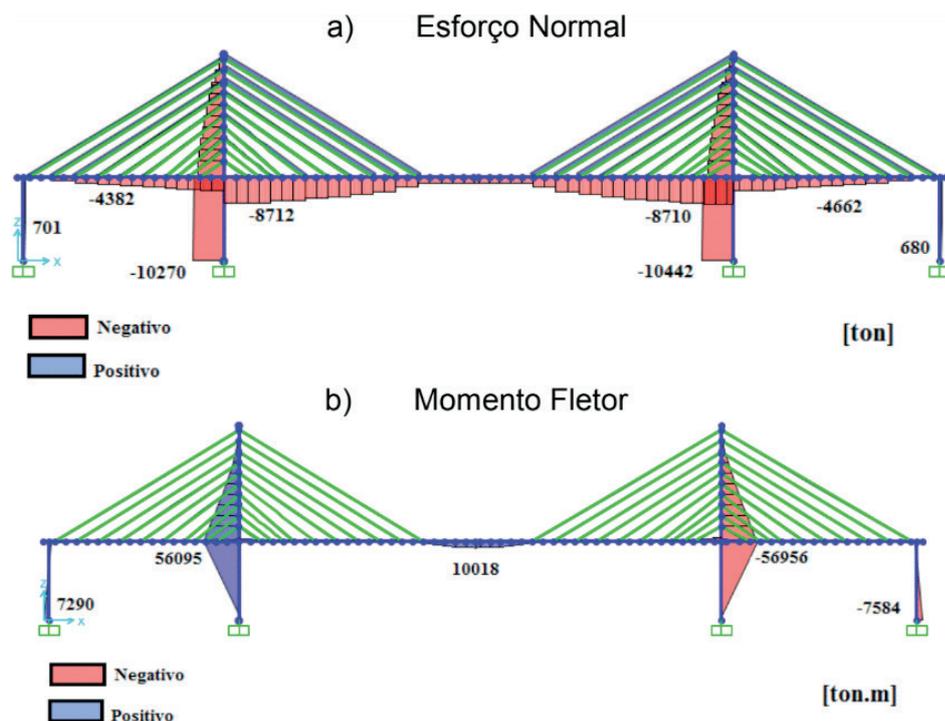
Após feitas as três tipologias de pontes estaiadas, partiu-se para a análise de cada elemento de cada um dos modelos, através das solicitações originadas de seus carregamentos (Esforço Normal, Momento Fletor) gerados pelo programa.

4.1 Sistema Harpa

Segundo Torneri (2002), este sistema é considerado instável por apresentar uma simetria na distribuição dos estais e nas rigidezes 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, 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. Observando os valores de Esforço Normal na tabela, percebe-se que quanto mais afastado os estais ficam da torre, maior valor de esforço normal nos estais.

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 pode ser analisado na Figura 2 a seguir.



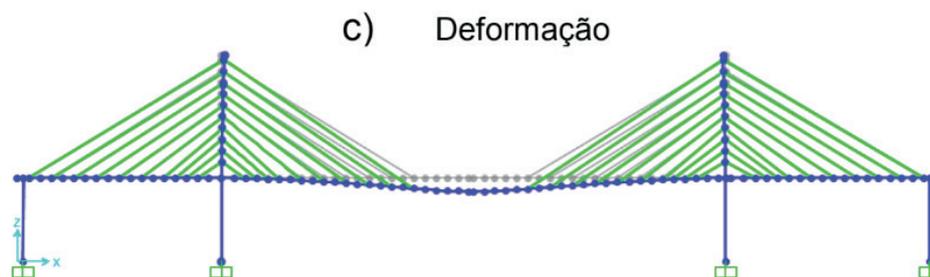


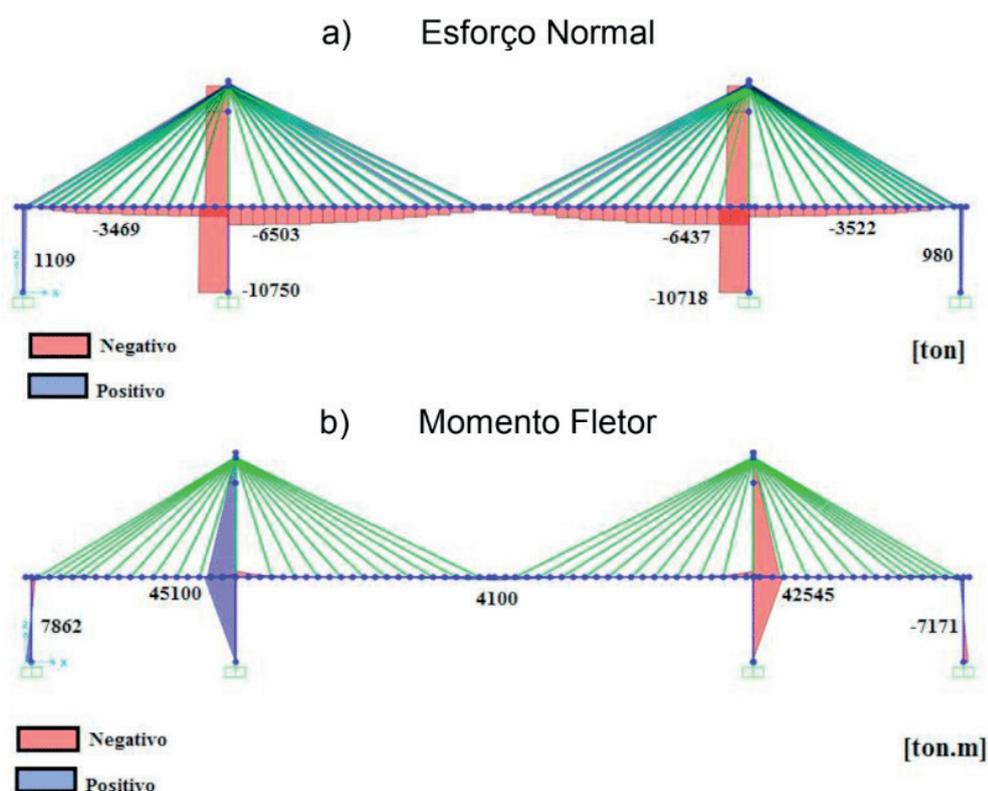
Figura 2: Sistema Harpa: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação

4.2 Sistema leque

Nesse sistema, 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 valores pequenos em relação ao sistema Harpa e Semi-Harpa. Por esse motivo que 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, apresenta efeitos de compressão em toda a sua estrutura. Por esse motivo que para dar estabilidade global, necessita de um torre rígida.

Essas observações podem ser analisadas na Figura 3 a seguir.



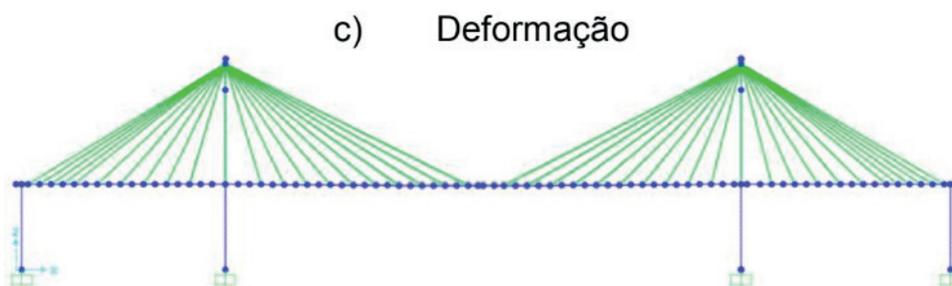


Figura 3: Sistema Leque: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação

4.3 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 encontrados no topo do mastro, com elevados efeitos de solicitações por tração em cada estai ancorado. Indicando que a torre precisa ser bem rígida. Se houver uma melhor distribuição das tensões dos estais, causará um alívio dessas tensões. Já na configuração em Harpa, apresenta uma simetria na distribuição dos estais dando maior variabilidade nas solicitações, tanto verticais quanto horizontais, causando um desequilíbrio 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 4 a seguir.

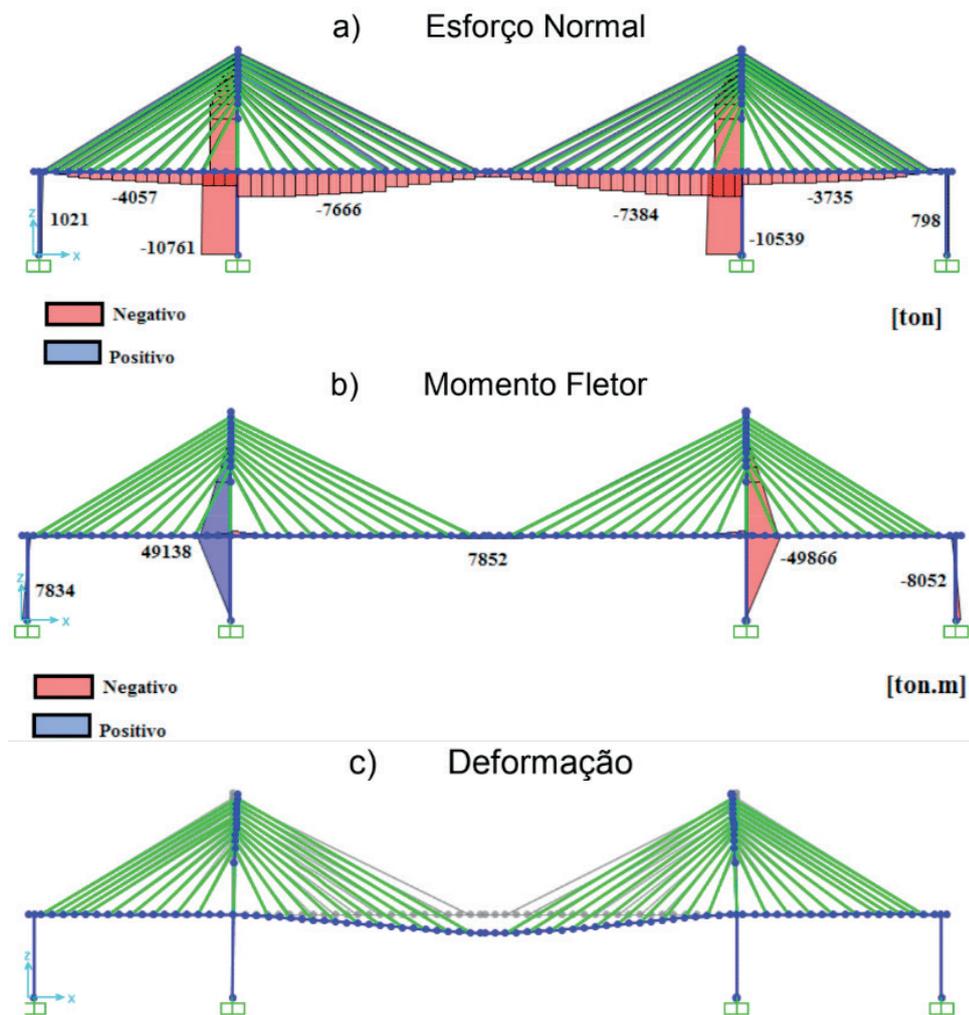


Figura 4: Sistema Semi-Leque ou Semi-Harpa: Solicitações de: a) Esforço Normal, b) Momento Fletor e c) Deformação

5 | 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 a 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 a conclusão que distribuição Semi-Harpa é a alternativa mais correta para se construir, pois numa distribuição Harpa, apesar de sua simetria ser esteticamente agradável, ela é uma estrutura instável com variação na distribuição de ancoragem e nas solicitações de esforço normal tanto horizontal quanto vertical. E numa distribuição em Leque todos os estais estão extremamente tensionados, necessitando de uma torre rígida, além de um cálculo preciso e de um especialista na execução da obra.

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.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR-7188 – **Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre** – Rio de Janeiro, ABNT, 1982, 4 p.

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.

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.

LACERDA, I. G. **Pontes Estaiadas com Selas ou Ancoragens Individuais** 7 p. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2016.

MARCHETTI, O. **Pontes de concreto armado**. 237 p. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.

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.

TORNERI, 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.

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.

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.