

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
ENGENHARIA CIVIL

SILVIO BEZERRA CORTEZ FILHO

PONTES ESTAIADAS: DIFERENCIAIS CONSTRUTIVOS E ESTRUTURAIS EM
RELAÇÃO A OUTROS TIPOS DE PONTES

NATAL/RN

2018

SILVIO BEZERRA CORTEZ FILHO

**PONTES ESTAIADAS: DIFERENCIAIS CONSTRUTIVOS E ESTRUTURAIS EM
RELAÇÃO A OUTROS TIPOS DE PONTES**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção de título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

NATAL/RN

2018

Catálogo na Publicação – Biblioteca do UNI-RN
Setor de Processos Técnicos

Cortez Filho, Silvio Bezerra.

Pontes estaiadas: diferenciais construtivos e estruturais em relação a outros tipos de pontes / Silvio Bezerra Cortez Filho. – Natal, 2018.
95 f.

Orientador: Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira.
Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

1. Estais – Monografia. 2. Balanços sucessivos – Monografia. 3. Protensão – Monografia. I. Pereira, Fábio Sérgio da Costa. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

SILVIO BEZERRA CORTEZ FILHO

**PONTES ESTAIADAS: DIFERENCIAIS CONSTRUTIVOS E ESTRUTURAIS EM
RELAÇÃO A OUTROS TIPOS DE PONTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira
Coordenador do Curso e Professor Orientador

Prof. PhD. Werner Farkatt Tabosa
Coordenador de TCC

Prof. Esp. Antemildo Batista de Andrade
Professor Externo

Dedico este trabalho a meus pais por eles estarem ao meu lado durante toda a minha vida e por se constituírem como pessoas que me deram total apoio e força nessa jornada acadêmica, me oferecendo os estímulos necessários para que eu pudesse superar os obstáculos e me tornasse um homem melhor, como também agradeço aos demais familiares e amigos por todo o suporte que me foi dado nas horas mais difíceis que precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me proporcionado mais essa conquista.

Aos meus pais Silvio Bezerra Cortez e Simone Maria da Silva Cortez por acreditarem e incentivarem as minhas escolhas em todos os momentos da minha graduação, dando a mim todo o suporte e apoio para que pudesse superar todas as dificuldades encontradas no caminho.

Ao professor PhD. Fábio Sérgio da Costa Pereira, pela dedicação em suas orientações prestadas na elaboração deste trabalho, incentivando-me e colaborando no desenvolvimento de meu trabalho.

“Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Desde os primórdios, o ser humano vem buscando desenvolver o seu conhecimento para que as possibilidades de um aumento da qualidade de vida sejam exploradas ao máximo. Entre tantos parâmetros, construir vem sendo uma questão bastante difundida entre todos esses anos. A começar do início da história humana, conhecimentos e habilidades de engenharia têm sido necessários para a evolução do padrão de vida, maior capacidade de locomoção, diversificação dos métodos de construir, maior qualidade nas maneiras de fazer edificações necessárias para abrigo e proteção, estruturas que possibilitam a locomoção, etc. Dentre essas estruturas, as pontes se destacam pela sua grande diversidade de utilizações e importância na vida humana. A necessidade de transcender bloqueios e impedimentos que dificultavam uma passagem rápida por determinado local fez com que o homem desenvolvesse uma estrutura capaz de fazer uma quebra de paradigmas que se perpetuavam por muitos anos. Essas construções, que tem por objetivo maior transpor um obstáculo para estabelecer a continuidade de uma via de qualquer natureza, vêm ganhando processos de execução e fabricação cada vez mais aprimorados. Neste trabalho, os diferenciais construtivos e estruturais das pontes estaiadas será à base do desenvolvimento do texto e do estudo de caso. Pontes estaiadas podem ser descritas como estruturas que visam a suspensão do seu tabuleiro através de cabos ancorados no topo de torres ou ao longo das mesmas. Este tipo de ponte possui um elevado grau de hiperasticidade, podendo vencer grandes vãos da ordem de centenas de metros. Tornando, assim, necessário uma boa compreensão das configurações possíveis na fase de pré-dimensionamento de projeto, objetivando a otimização de recursos e uma boa distribuição dos esforços na estrutura de uma forma global. O estudo dos diferenciais construtivos e estruturais das pontes estaiadas foi analisado de forma a apresentar todos os métodos da construção da ponte Newton Navarro, como a técnica de balanços sucessivos, a minimização do tempo de obra, a economia com formas e escoras, a diminuição da quantidade de pilares e o maior vão alcançado.

Palavras-chave: Estais. Balanços sucessivos. Protensão.

ABSTRACT

From the beginning, the human being has sought to develop his knowledge so that the possibilities of an increase in the quality of life are exploited to the maximum. Among so many parameters, building has been a very widespread issue among all these years. Beginning at the beginning of human history, knowledge and engineering skills have been necessary for the evolution of the standard of living, greater capacity for locomotion, diversification of methods of construction, greater quality in the ways of making buildings necessary for shelter and protection, structures that they allow the locomotion, etc. Among these structures, the bridges stand out for their great diversity of uses and importance in human life. The need to transcend blockades and impediments that hindered a rapid passage through a given location led man to develop a structure capable of breaking down paradigms that had been perpetuating for many years. These constructions, whose main purpose is to overcome an obstacle to establish the continuity of a road of any nature, have been gaining increasingly improved execution and manufacturing processes. In this work, the structural and structural differentials of the staked bridges will be the basis for the development of the text and the case study. Staked bridges can be described as structures that aim to suspend your board through cables anchored at or above towers towers. This type of bridge has a high degree of hyperasticity, being able to overcome large spans of the order of hundreds of meters. Thus, it is necessary to have a good understanding of the possible configurations in the project pre-dimensioning phase, aiming the optimization of resources and a good distribution of the efforts in the structure in a global way. The study of the structural and structural differentials of the staped bridges will be analyzed in order to present all the methods of construction of the Newton Navarro bridge, such as its construction by successive balances, the minimization of the construction time, the economy with shapes and anchors, of the number of pillars and the greater number reached.

Keywords: Estais. Successive balances. Protension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte Newton Navarro, Natal (RN)	21
Figura 2 – Ponte para peões sobre o rio Kotmalae, Sri Lanka	22
Figura 3 – Ponte Romana de Vila Formosa.....	23
Figura 4 – Ponte de Verona (Itália).....	24
Figura 5 – Iron-Bridge, primeira ponte em ferro fundido (Grã-Bretanha).....	25
Figura 6 – Tower Bridge, Londres (Inglaterra).....	27
Figura 7 – Ponte de Runyang, Nanjing (China)	31
Figura 8 – Ponte Gilberto Amado, Rio Piauí, Sergipe (Brasil)	32
Figura 9 – Ponte Para o Céu (Malásia)	32
Figura 10 – Ponte de Rialto, Veneza (Itália)	33
Figura 11 – Ponte Presidente Costa e Silva (Rio-Niterói), Rio de Janeiro (Brasil) ...	34
Figura 12 – Ponte Ferroviária São João, Rio Douro, Porto (Portugal).....	34
Figura 13 – Ponte Henry Hudson, Nova Yorke (USA).....	35
Figura 14 – Ponte Golden Gate, São Francisco (USA)	35
Figura 15 – Ponte Octávio Frios de Oliveira, São Paulo (Brasil)	36
Figura 16 – Representação de superestruturas das pontes	36
Figura 17 – Ponte de laje pré-moldada	37
Figura 18 – Ponte de viga.....	38
Figura 19 – Pontes na disposição do tabuleiro	38
Figura 20 – Construção da Ponte sobre o Rio Claro (Brasil).....	40
Figura 21 – Construção da Ponte Octávio Frias, São Paulo (Brasil)	40

Figura 22 – Ponte em Viga.....	41
Figura 23 – Ponte em Trelças.....	42
Figura 24 – Ponte em Arco.....	43
Figura 25 – Ponte Suspensa	45
Figura 26 – Ponte Estaiada, Rio de Janeiro (Brasil)	46
Figura 27 – Ponte em Balanço, Rio Madeira (Brasil).....	46
Figura 28 – Estrutura de uma Ponte.....	47
Figura 29 – Instalação de pilares para ponte Estaiada.....	55
Figura 30 – Processo de ancoragem em bloco	56
Figura 31 – Confeção do tabuleiro de ponte estaiada	56
Figura 32 – Implantação de pilares	57
Figura 33 – Técnica de lançamento progressivo	57
Figura 34 – Sistema de disposição de estais	59
Figura 35 – Sistemas em semileque e harpa	61
Figura 36 – Ponte Estaiada de Millau (França)	63
Figura 37 – Ponte Estaiada de Great Belt Bridge (Dinamarca)	70
Figura 38 – Ponte Newton Navarro, Natal, Rio Grande do Norte (Brasil).....	79
Figura 39 – Vista da Ponte Newton Navarro, Natal, Rio Grande do Norte (Brasil)...	80
Figura 40 – Execução das obras na Ponte Newton Navarro	81
Figura 41 – Arquitetura moderna da Ponte Newton Navarro	82
Figura 42 – Vista da Ponte sob a visão de um pedestre	83
Figura 43 – Corte transversal do convés da Ponte.....	84

Figura 44 – Construção da Ponte com balanços sucessivos	84
Figura 45 – Construção da Ponte Newton Navarro	85
Figura 46 – Construção por balanços sucessivos	85
Figura 47 – Construção do segmento da torre	86
Figura 48 – Elevação e seção vertical do pilar	88
Figura 49 – Construção da Ponte Newton Navarro	91
Figura 50 – Dimensões da ponte Newton Navarro	93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL DE ESTUDO	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Geral	17
1.3.2 Específicos	18
1.4 IMPORTÂNCIA DO TEMA	18
2 METODOLOGIA	19
3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
4 HISTÓRICO DAS PONTES	21
4.1 AS PRIMEIRAS PONTES	21
4.2 AS PONTES ROMANAS	22
4.3 AS PONTES NA IDADE MÉDIA	23
4.4 PONTES NO PERÍODO DA RENASCENÇA	24
4.5 PONTES NA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	25
4.6 TIPOS DE PONTES LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO O SEU MATERIAL	27
4.6.1 Pontes de madeira	27
4.6.2 Pontes de pedra	27
4.6.3 Pontes metálicas	28
4.6.4 Pontes de concreto armado	28
4.6.5 Pontes de concreto protendido	28
5 CLASSIFICAÇÃO DAS PONTES	29
5.1 AÇÕES	29
5.2 PROCESSOS PRODUTIVOS	29
5.3 COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL	29
5.4 ANÁLISE ESTRUTURAL	29
5.4.1 Material da superestrutura	30
5.4.2 Comprimento	30
5.4.3 Natureza de tráfego	31
5.4.4 Desenvolvimento planimétrico	32

5.4.5 Desenvolvimento altimétrico	33
5.4.6 Sistema da superestrutura	33
5.5 SEÇÃO TRANSVERSAL	37
5.6 POSIÇÃO DE TABULEIRO	36
5.7 PROCESOS DE EXECUÇÃO	39
5.7.1 Ponte em viga	41
5.7.2 Ponte de treliças	42
5.7.3 Ponte de arco	43
5.7.4 Ponte suspensa	44
5.7.5 Ponte estaiada	45
5.7.6 Ponte em balanço	46
5.8 COMPONENTES ESTRUTURAIS	47
6 PROJETOS DE PONTES ESTAIADAS	48
6.1 CIMBRAMENTO GERAL:	49
6.2 LANÇAMENTOS PROGRESSIVOS	50
6.3 BALANÇOS SUCESSIVOS	51
6.4 FUNDAMENTOS DO PROJETO DE UMA PONTE ESTAIADA	58
6.5 CONCEPÇÕES PRELIMINARES	63
6.6 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DA ESTRUTURA	64
6.7 NÃO LINEARIDADE DOS ESTAIS	66
6.8 CONSIDERAÇÃO DA FADIGA	67
7 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE PONTES ESTAIADAS	68
7.1 LIGAÇÕES ENTRE ESTAIS E TABULEIRO	68
7.2 ARRANJO PARA A DISPOSIÇÃO DOS ESTAIS	69
7.3 PLANOS DE ESTAIS	69
7.4 CONFIGURAÇÃO DAS TORRES	70
7.5 INFLUÊNCIA AERODINÂMICA	71
7.6 MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL	71
7.7 ELEMENTOS DE TENSIONAMENTO	72
7.7.1 Barras	72
7.7.2 Fios	73
7.7.3 Cordoalhas	

7.7.4 Cabos	75
7.8 SISTEMA DE ANCORAGEM	75
7.8.1 Tubo guia	76
7.8.2 Amortecedor	76
7.8.3 Desviador	77
7.9 PROTENSÃO	77
7.9.1 Galvanização	77
7.9.2 Cera	78
7.9.3 Baina de HDPE (High Density Polyethylene)	78
7.9.4 Tubo de HDPE (High Density Polyethylene)	78
7.9.5 Tubo Anti-Vandalismo	78
8 ESTUDO DE CASO (PONTE NEWTON NAVARRO)	79
8.1 A PONTE NEWTON NAVARRO	79
8.2 ARQUITETURA	81
8.3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	83
8.4 ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO	87
8.5 AERODINÂMICA DA ESTRUTURA	89
8.6 DESIGNER	89
8.7 CONSTRUÇÃO	90
9 CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL DE ESTUDO

O projeto de toda grande estrutura, seja ela feita de qualquer tipo de material, é o produto de um processo criativo constituído de uma sequência de alternativas, onde cada uma procura melhorar a anterior, até que se atinja uma solução suficientemente boa para ser construída. Esse processo parte das condições locais, onde a obra deve ser implantada (topografia, geologia, condições climáticas, tráfego, etc.) e considerando os materiais e as técnicas construtivas disponíveis, os tipos estruturais e as teorias conhecidas, procura criar uma obra que atenda às funções previamente definidas, com uma série de qualidades especificadas.

Assim, é preciso que a obra, além de atender às funções para que foi construída, seja suficientemente segura, econômica e estética. Entende-se aqui por segura a obra que tem probabilidade aceitável de manter suas características ao longo da vida útil e que avisa quando precisa de manutenção. Estética é a obra agradável de ser observada, bem inserida no local de implantação. Econômica é a solução que satisfaz as funções, segurança e estética com um custo próximo do mínimo.

Na verdade, esse processo criativo não termina no projeto, mas estende-se à execução e inclusive à manutenção. Em função deste processo rigoroso, as pontes tendem a ser ligadas a sua beleza. O conhecimento sobre diversos tipos de projetos de pontes nos possibilitam os saberes necessários para satisfazer às condições de uso as quais elas foram projetadas.

Este trabalho tem por objetivo principal descrever os diferenciais técnicos das pontes estaiadas, destacando os seus aspectos históricos, o estado da arte atual e seus elementos construtivos e estruturais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na atual conjuntura do cenário da construção civil no Brasil, os novos métodos científicos utilizados nas construções ganham cada vez mais espaço. Saber lidar com o compromisso de uma estrutura coerente em sua segurança e funcionalidade aliada com uma estética agradável e inovadora é de fundamental importância para conseguir lugar no mercado. As pontes estaiadas são exatamente essa “nova” maneira de se construir transposições de obstáculos associando funcionalidade, economia e beleza. Esse trabalho mostrará com clareza a importância desse tipo de estrutura a nível mundial e nacional, criando subsídios para a sua utilização em obras que necessitam de maior vão livre e agilidade.

Devido a grande necessidade de constante desenvolvimento das vias, rodovias e estradas comerciais ou de passeios em todo o país, vê-se na construção das pontes uma indispensabilidade quando o quesito é a superação de grandes vales ou grandes extensões de água. Com isso, as pontes estaiadas oferecem possibilidades que podem servir de grande motivação para o crescimento do número desses tipos de estruturas em todo o território nacional. Sabendo do enorme espaço territorial nacional, aliado com grande número de obstáculos em terra e água que abrangem enorme parte do país, a necessidade do aumento da interligação de diversos locais para fluxos comerciais ou sociais, foi escolhido este tema pela maior agilidade na construção, pela grande capacidade de superar vãos enormes com menos pilares, proporcionando mais economia e agilidade na edificação e por toda a questão estética que envolve as pontes estaiadas, levando mais beleza e confortabilidade aonde as mesmas se localizam.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar todo o aparato histórico das pontes em nível nacional e mundial, visando apresentar a importância dessas

estruturas no cotidiano das pessoas, bem como demonstrar as etapas construtivas das mesmas, explicar os tipos de pontes e seus componentes estruturais.

1.3.2 Específicos

Além disso, o trabalho a seguir visa à análise das pontes estaiadas, descrevendo as suas principais características estruturais e os seus métodos de construção, levando as suas principais diferenças e vantagens em relação às demais pontes.

1.4 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Atualmente, as pontes vêm ganhando uma importância bastante significativa no cenário nacional e internacional. Em muitas cidades brasileiras, o número de rodovias urbanas que são construídas é cada vez maior, visando facilitar o fluxo dos veículos automotores, porém, a consequência não poderia ser pior, pois a escolha por essa estratégia cria barreiras de acessibilidade, ou seja, o pedestre se torna um ponto excludente no processo de crescimento urbano. Com isso, construir pontes é um fator consequente à construção de estradas, visto que, em muitos casos, obstáculos surgirão e deverão ser superados com essas estruturas.

Hoje em dia, as pontes estaiadas encontram-se em grande destaque, em evidência, tanto no cenário nacional quanto no cenário internacional. É notável o crescimento cada vez maior do número de edificações especiais de grande porte e visibilidade sendo projetadas e executadas utilizando esta solução estrutural, que tem como premissa básica a sustentação do tabuleiro através dos estais. O uso de estruturas estaiadas para transpor obstáculos não é propriamente uma novidade. Pelo menos desde os anos 1940, pontes e passarelas sustentadas por cabos de aço (estais) são erguidas em todo o mundo para vencer médios e grandes vãos. Mas nos últimos anos, esse sistema construtivo vem apontando, no Brasil, como principal tendência para a construção de pontes e viadutos, em detrimento das pontes pênsis e fixas. As razões para isso vão desde a maior preocupação dos administradores públicos com o impacto estético desses grandes elementos nas

idades, ao aperfeiçoamento da tecnologia, que culminou em aços de alta resistência, estais e ancoragens mais avançadas, bem como softwares que facilitaram a análise das estruturas, além da rapidez executiva.

Os estudos e pesquisas para este tipo de ponte são muito recentes no Brasil, por isso, surge como uma grande alternativa para as construções que necessitarão de grandes vãos, diminuindo a quantidade de pilares e custo executivo das fundações proporcionando a estrutura uma estética bastante agradável.

2 METODOLOGIA

A base de estudos e pesquisa deste trabalho foi baseada em análises oriundas de bibliografias nacionais e internacionais de diversos autores.

O desenvolvimento desse trabalho foi realizado visando a mostra dos diferenciais construtivos e estruturais das pontes estaiadas em relação a outras pontes, evidenciando como exemplo destes diferenciais citados um estudo de caso da Ponte Newton Navarro.

3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é disposto em capítulos, onde é feita uma clara divisão das informações apresentadas.

O capítulo de número 1 trata da introdução do assunto posteriormente abrangido no trabalho, onde o mesmo será dividido no enquadramento geral do assunto, mostrando que este trabalho tem por objetivo principal descrever os diferenciais técnicos das pontes estaiadas, destacando os seus aspectos históricos, o estado da arte atual e seus elementos construtivos e estruturais, ainda mostrando os objetivos gerais, objetivos específicos e a importância do tema na atualidade pela qual o mesmo está inserido.

No capítulo 2, tem-se disposta a metodologia que o trabalho implantará do no seu desenvolver.

O capítulo 3 tem por objetivo a amostra do material apresentado durante a pesquisa e o resumo de cada capítulo disposto no trabalho.

No capítulo 4, é apresentado o conceito de pontes e como essas estruturas atuam. Neste capítulo, também é mostrado o desenvolvimento das pontes através da história, bem como as primeiras pontes feitas, as pontes romanas, as pontes na idade média, as pontes no período da renascença e as pontes na Revolução Industrial.

Em seguida, o capítulo 5 apresenta a classificação geral das pontes, seguindo em divisões.

O capítulo 6 descreve os aspectos de projetos das pontes estaiadas.

Na sequência, o capítulo 7 apresenta os aspectos construtivos das pontes estaiadas.

O Capítulo 8 mostra o estudo de caso da ponte Newton Navarro demonstrando as aplicações técnicas desenvolvidas ao longo deste trabalho, bem como as funcionalidades e diferenciais técnicos da ponte estaiada.

No capítulo 9, foram mostrados os resultados finais dos estudos aqui desenvolvidos, bem como as conclusões e verificações sobre o estudo de caso anteriormente mostrado.

4 HISTÓRICO DAS PONTES

Pontes são estruturas que tem por objetivo principal a passagem por obstáculos, sejam eles grandes vãos de águas, como rios e lagos, ou grandes espaços entre terras, como abismos ou vales. As pontes permitem que pedestres ou veículos possam passar sobre um lugar que anteriormente não poderia ser cruzado. Quando a ponte tem como maior objetivo a transposição de vales, outras vias ou obstáculos em geral não constituídos por água denomina-se a edificação por viaduto (Figura 01).

Figura 01 – Ponte Newton Navarro, Natal (RN)



Fonte: Veja... (2012).

4.1 AS PRIMEIRAS PONTES

Desde tempos remotos, o homem necessita de ultrapassar obstáculos em busca de alimento ou abrigo. Há indícios que as primeiras pontes surgiram de forma natural, seja pela queda de árvores sobre obstáculos de água, seja pela formação natural de vegetação sobre percursos antes não transitáveis. Com isso, o homem viu que poderia também imitar esses feitos. Eventualmente, foram deslocados, de

modo peculiar, árvores e pranchas de pedras para lugares que possuíam empecilhos para o deslocamento.

Com o passar dos milênios, a vida humana tornou-se cada vez mais sedentária. Então, a atividade de construção de pontes tornou-se cada vez mais necessária. Surgiram, então, as primeiras pontes de pedra, talhadas de forma rudimentar, mas que abrangiam grande eficiência na sua funcionalidade. Consequentemente ao desenvolvimento da humanidade, as edificações em pontes foram se desenvolvendo paulatinamente. Os indícios das construções de pontes em arcos vêm desde a antiga Mesopotâmia no Egito, na Grécia e em toda a Pérsia (Figura 02).

Figura 02 – Ponte para peões sobre o rio Kotmalae, Sri Lanka



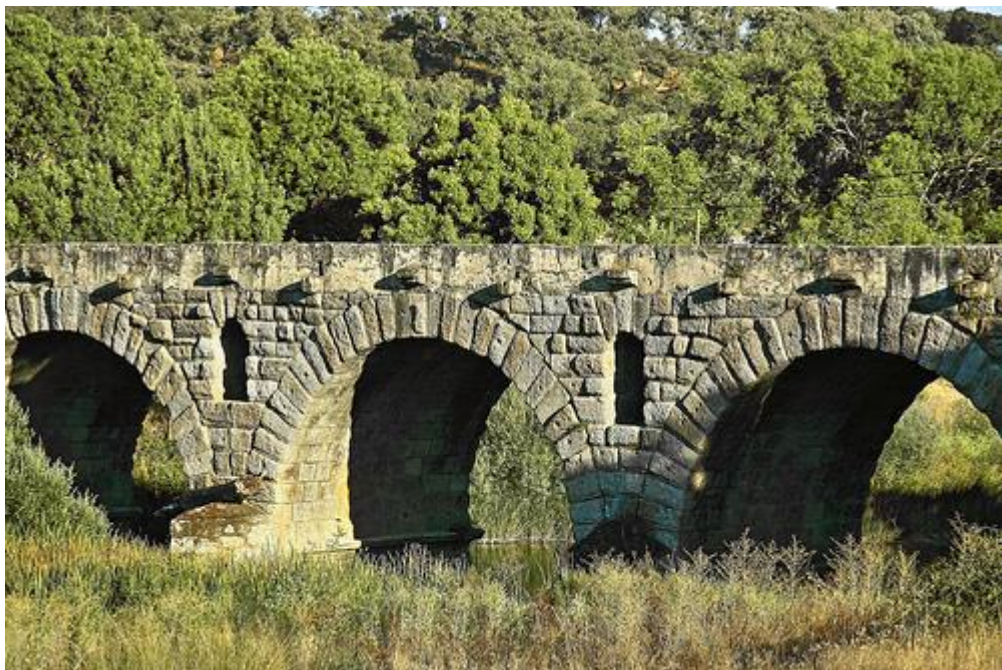
Fonte: Prandi (2011).

4.2 AS PONTES ROMANAS

A primeira ponte romana teria sido construída no Tibre no ano 621 A.C. e foi chamada de *Pons Sublicius* ("Ponte das Estacas"). É no século III A.C. que os

romanos começam a se dedicar à construção de pontes em arco, atingindo um desenvolvimento nas técnicas de construção e projeto nunca antes visto e dificilmente superado nos mil anos seguintes. Exemplos desta magnífica capacidade de construção são algumas pontes que perduraram até aos nossos dias, como, por exemplo, a *Pons Aelius* (hoje ponte Sant'Angelo - 134 A.C.), sobre o Tibre, onde terá sido usada pozzolana (uma espécie de cimento que mantém a resistência mesmo submerso), a ponte de Alcántara, em Toledo ou o aqueduto de Segóvia (século I). Os arcos foram usados pela primeira vez no Império Romano, para a construção de pontes e aquedutos, alguns dos quais ainda hoje se mantêm de pé. Os romanos foram também os primeiros a usar o cimento, o que reduziu a variação da força que a pedra natural oferecia. Pontes de tijolo e argamassa, foram construídas após a era Romana, à medida que se ia abandonando a tecnologia do cimento (Figura 03).

Figura 03 – Ponte Romana de Vila Formosa



Fonte: Pontes Origens... (2012).

4.3 AS PONTES NA IDADE MÉDIA

Na idade média, o desenvolvimento das pontes foi subordinado fortemente pela igreja católica. O conhecimento oriundo desde à construção de antigas cúpulas

foi usado na expansão e manutenção de construções daquele período da história humana, tendo importância fundamental nos conhecimentos utilizados atualmente. A finalidade das pontes era basicamente o de transpor obstáculos para fins de passagem. Porém, data desta época a construção de pontes para fins militares e comerciais.

Com grandes pontes construídas, enorme conhecimento e novas técnicas de edificar, a idade média marcou com uma imensa contribuição no campo da estratégia de diversificar os arcos de suporte. Passou-se, então, a usar arcos orgivais, que davam bastante elegância as edificações, como também mais segurança e menor tempo (Figura 04).

Figura 04 – Ponte de Verona (Itália)



Fonte: Sobral (2012).

4.4 PONTES NO PERÍODO DA RENASCENÇA

Durante o período da renascença, houve uma grande necessidade de deslocação entre muitos lugares na Europa. Isso levou a um crescimento exacerbado das técnicas construtivas das pontes daquela época. Foi nesse período que surgiram os primeiros projetos de pontes em treliças, pensados pelos grandes artistas renascentistas.

Na França do século XVI, os ensinamentos e estudos das diversas formas de construir pontes ganhou muita força. Foi aí que esse país se tornou a grande potência mundial na construção de pontes, pelo incentivo do rei Luís XVI. Manter as pontes do reino em bom estado e permitir um fluxo tranquilo em todo o espaço francês serviu de grande importância para que surgisse a primeira escola de engenharia do mundo, a “École des Ponts et Chaussées”. Foi nessa época que as pontes ganharam grandes vãos (Figura 05).

Figura 05 – Iron-Bridge, primeira ponte em ferro fundido (Grã-Bretanha)



Fonte: Prandi (2011).

4.5 PONTES NA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Com advento da Revolução Industrial, no século XIX, foram desenvolvidos sistemas de armações em ferro-forjado para pontes mais largas, mas o ferro dificilmente possuía a força de tensão suficiente para suportar as grandes cargas dinâmicas exigidas nomeadamente pela estrada de ferro com as recém-inventadas locomotivas a vapor. A invenção de novos métodos de fabricação do aço, que tem uma maior força de tensão, permitiu a construção de pontes mais aptas para estas novas necessidades. As pontes suspensas modernas fazem a sua aparição nesta época, primeiro com correntes metálicas e depois com fios de aço entrelaçados permitindo vãos cada vez mais extensos. A introdução destes novos tipos de ponte e

de materiais, não impede o ressurgimento de pontes de treliça em madeira nos EUA e na Grã-Bretanha devido, nomeadamente, ao baixo custo e à grande disponibilidade da matéria-prima.

Entre meados do século XIX e meados do século XX, com o grande desenvolvimento do caminho de ferro e das comunicações em geral, foram desenvolvidos numerosos projetos de pontes. O uso do aço em vez do ferro ou ferro-fundido veio possibilitar atingir vãos cada vez maiores. Estas pontes foram construídas em arco, vigas reticuladas e suspensão. Foram desenvolvidas novas técnicas para a construção de fundações recorrendo ao uso de cilindros metálicos em ferro que eram pressurizados e afundados nos locais de construção dos pilares das pontes.

No seu interior os operários escavavam o solo macio até chegarem à pedra estável sob o leito do rio. Só mais tarde se viria a descobrir a importância de uma lenta descompressão evitando assim a morte e a doença de numerosos trabalhadores.

Ainda que os métodos de construção e as técnicas de projeto ganhassem cada vez mais domínio pelos projetistas, somando com a vasta possibilidade de materiais cada vez mais resistentes, foi visto que a influência dos ventos nas estruturas poderia acarretar um enorme malefício às estruturas. Paulatinamente ao desenvolvimento de grandes estruturas, a queda e desmoronamento de pontes acorreram com mais frequência. Acidentes eram registrados com muita frequência em todo o mundo. Como exemplo, nos estados Unidos no ano de 1940, a ponte Tacoma Narrows desabou por causa da influência do vento. Com seus 853 metros de vão e com 2,5 metros de largura, a ponte não resistiu a ventos de 68 Km/h e colapsou pouco depois da sua construção.

Foi então que os engenheiros tomaram conhecimento da importância de calcular a incidência da força dos ventos que eram causadas nas pontes, afim de uma maior segurança para as estruturas (Figura 06).

Figura 06 – Tower Bridge, Londres (Inglaterra)



Fonte: Prandi (2011).

4.6 TIPOS DE PONTES LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO O SEU MATERIAL

Um histórico das pontes pode ser feito, de forma resumida, a partir dos materiais empregados em sua construção. Desta forma, têm-se na ordem os seguintes tipos de pontes:

4.6.1 Pontes de Madeira

A madeira tem sido empregada desde a antiguidade na construção de pontes, inicialmente com arranjos estruturais bastante simples. Destaca-se que com esse material chegou-se a construir pontes com vãos consideráveis, como o da ponte construída em 1758, sobre o rio Reno, com 118 metros de vão.

4.6.2 Pontes de Pedra

A pedra, assim como a madeira, era empregada desde a antiguidade, na construção de pontes. Os romanos e os chineses já construíam abóbadas em pedra antes de cristo. Os romanos chegaram a construir pontes em forma de arco

semicircular com até 30 metros de vão. Foi grande o número de pontes de pedras construídas pelos romanos; a maior parte destas desabaram, principalmente por problemas de fundação ou então foram demolidas por questões bélicas, mas existem algumas que permanecem até os dias de hoje. Na idade média, as abóbadas ficaram mais abatidas, chegando a atingir vãos de até 50 metros.

4.6.3 Pontes Metálicas

Embora as principais pontes metálicas tenham surgido no fim do século XVIII, em ferro fundido, foi a partir da metade do século seguinte, com o desenvolvimento das ferrovias – que produziam cargas bem mais elevadas que as que ocorriam até então – é que floresceu o emprego do aço na construção das pontes. Cabe destacar que já a partir de 1850, construíam-se pontes em treliça com 124 metros de vão.

4.6.4 Pontes de Concreto Armado

As primeiras pontes em concreto apareceram no início do século 20. Eram pontes em concreto simples em arco triarticulado, com o material substituindo a pedra. Embora já se empregasse o concreto armado na execução do tabuleiro das pontes de concreto simples, foi a partir de 1912 que começaram a ser construídas as pontes de vigas e de pórtico em concreto armado, com vãos de até 30 metros.

4.6.5 Pontes de Concreto Protendido

Embora as primeiras pontes em concreto protendido tenham sido feitas a partir de 1938, foi após a segunda guerra mundial que o concreto protendido começou a ser empregado com grande frequência, por causa da necessidade de se reconstruir rapidamente um grande número de pontes destruídas durante a guerra.

5 CLASSIFICAÇÃO DAS PONTES

Nas pontes, devem ser considerados os seguintes aspectos técnicos:

5.1 AÇÕES

Devido ao caráter da carga de utilização das pontes, torna-se necessário considerar alguns aspectos que normalmente não são considerados nos edifícios. Nas pontes, em geral, deve-se considerar o efeito dinâmico das cargas, e devido ao fato das cargas serem móveis, torna-se necessário determinar a envoltória dos esforços solicitantes e a verificação da possibilidade de fadiga dos materiais.

5.2 PROCESSOS PRODUTIVOS

Em razão da agressividade do local da implantação, que é comum na construção de pontes, existem processos de construção que são específicos para a construção de pontes.

5.3 COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL

A composição estrutural utilizada nas pontes difere das empregadas em edifícios, em razão das cargas de utilização, dos vãos a serem vencidos e dos processos de construção.

5.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Na análise estrutural existem simplificações e recomendações em função da composição estrutural, como por exemplo, o cálculo da estrutura em grelha considerando elementos indeformáveis numa direção.

Em toda edificação, alguns parâmetros devem ser atendidos, sejam eles dispostos a finalidade funcional ou estética. Com as pontes, esses parâmetros são atendidos de maneira a determinar a segurança, economia, estética e finalidade.

Os custos de construção de uma ponte devem ser diminuídos ao máximo, porém, sempre garantindo o uso de materiais eficientes e de boa qualidade. Mas em alguns casos, os custos se tornam bastantes elevados pelo fato do compromisso estético ser muito importante. Algumas pontes ganham até mesmo a fama de verdadeiras obras de arte pela sua exuberante beleza.

Segundo Walter Pfeil (1979), as pontes podem ser classificadas segundo vários critérios, sendo os mais importantes destacados na seguinte ordem:

5.4.1 Material da Superestrutura

As pontes se classificam segundo o material da superestrutura em:

1. De madeira;
2. De alvenaria;
3. De concreto simples;
4. De concreto armado;
5. Mistas (concreto e aço);
6. Concreto protendido;

Nas pontes, geralmente emprega-se concreto armado em sua infraestrutura, com isso não será feita uma classificação segundo o material usado na confecção da infraestrutura.

5.4.2 Comprimento

Segundo o seu comprimento, as pontes podem ser classificadas em:

1. Galerias (bueiros) – de 2 a 3 metros;
2. Pontilhões – de 3 a 10 metros;
3. Pontes – acima de 10 metros;

Essa classificação tem importância apenas para apresentar as denominações que as pontes recebem em função do seu comprimento ou porte, embora não exista consenso sobre as faixas de valores aqui indicadas (Figura 07).

Existe ainda uma divisão que é:

1. Pontes de pequenos vãos – até 30 metros;
2. Pontes de médios vãos – de 30 a 60 metros;
3. Pontes de grandes vãos – acima de 60 metros

Figura 07 – Ponte de Runyang, Nanjing (China)



Fonte: Prandi (2011).

5.4.3 Natureza de Tráfego

Segundo a natureza do tráfego, as pontes podem ser classificadas em:

7. Rodovias;
8. Ferrovias;
9. Passarelas;
10. Aerovias;
11. Aquedutos;
12. Mistas;

O tráfego principal que será empregado nas pontes é associado as suas denominações. Cada ponte é responsável por um tipo de tráfego. Porém, ainda existem as pontes mistas, que são aquelas destinadas a mais de um tipo de tráfego.

5.4.4 Desenvolvimento Planimétrico

Segundo o desenvolvimento em planta do traçado, as pontes podem ser classificadas em:

13. Retas – Ortogonais e esconsas (Figura 08);
14. Curvas (Figura 09);

Figura 08 – Ponte Gilberto Amado, Rio Piauí, Sergipe (Brasil)



Fonte: Oliveira, E. (2012).

Vê-se, também, na figura a seguir (Figura 09):

Figura 09 – Ponte Para o Céu (Malásia)



Fonte: Prandi (2012c).

“Em função do ângulo que o eixo da ponte forma com a linha de apoio da superestrutura, estas pontes podem ser divididas em ortogonais (quando o ângulo formado é 90°) e esconsas (quando ângulo formado é diferente de 90°).” Mounir, Khalil El Debs (2017, página 286).

5.4.5 Desenvolvimento Altimétrico

As pontes se classificam segundo o seu desenvolvimento altimétrico em:

15. Retas – horizontal e em rampa (Figura 10);
16. Curvas – tabuleiro convexo e côncavo;

Figura 10 – Ponte de Rialto, Veneza (Itália)



Fonte: A BELEZA... (2013).

5.4.6 Sistema da Superestrutura

As pontes podem ser classificadas quanto ao sistema estrutural da superestrutura em:

1. Ponte em viga (Figura 11);
2. Ponte em pórtico (Figura 12);

3. Ponte em arco (Figura 13);
4. Ponte em pênsil (Figura 14);
5. Ponte em estaiada (Figura 15)

Figura 11 – Ponte Presidente Costa e Silva (Rio-Niterói), Rio de Janeiro (Brasil)



Fonte: A ponte... (2016a).

Figura 12 – Ponte Ferroviária São João, Rio Douro, Porto (Portugal)



Fonte: Ponte... (2018).

Figura 13 – Ponte Henry Hudson, Nova Yorke (USA)



Fonte: As dez... (2012).

Figura 14 – Ponte Golden Gate, São Francisco (USA)



Fonte: A ponte... (2016b).

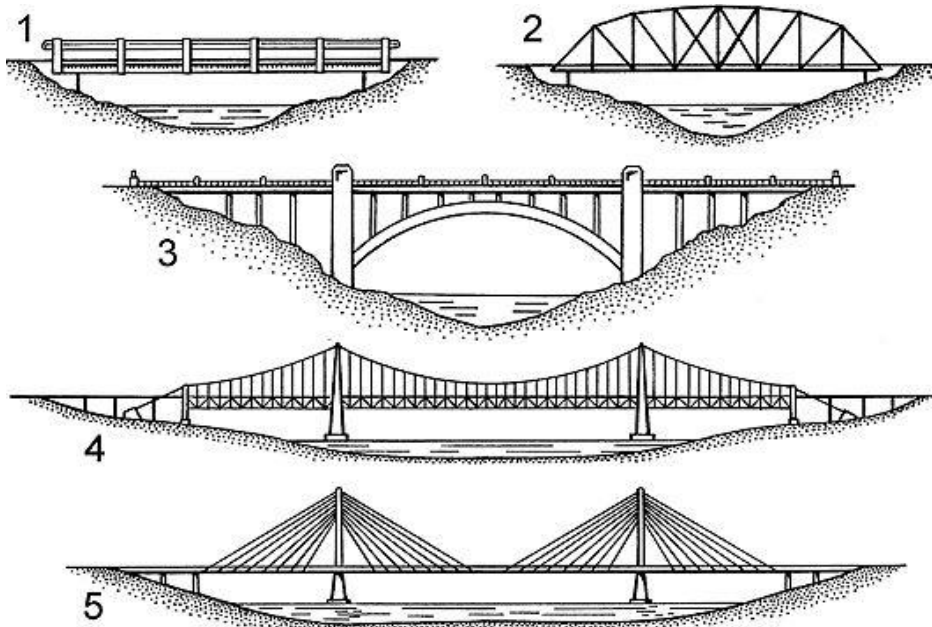
Figura 15 – Ponte Octávio Frios de Oliveira, São Paulo (Brasil)



Fonte: Prandi (2012d).

Por causa dos tipos de amarração de elementos em sua estrutura, esses tipos de pontes apresentam subdivisões, como por exemplo, uma ponte em viga simplesmente apoiada (Figura 16).

Figura 16 – Representação de superestruturas das pontes



Fonte: Tipos... (2013).

5.5 SEÇÃO TRASVERSAL

Quanto à seção transversal, as pontes de concreto se classificam em:

1. Ponte de laje – maciça e vazada;
2. Ponte de viga – seção em T e seção celular;

Segundo Mounir, Khalil El Debs (2007), existe ainda um tipo de ponte de viga: a viga em forma de treliça (Figura 17). No entanto, esse tipo de seção transversal é pouco utilizado nas pontes de concreto, o que justifica a não inclusão nesta classificação (Figura 18).

Figura 17 – Ponte de laje pré-moldada



Fonte: Pontes... (2018).

Figura 18 – Ponte de viga



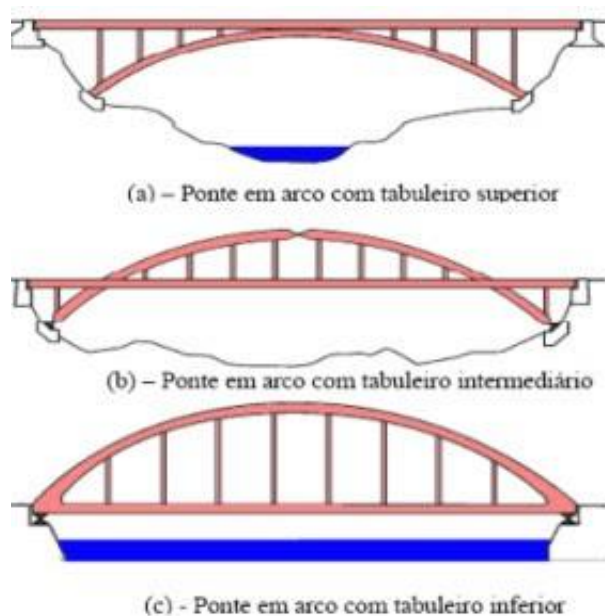
Fonte: Oliveira (2015)

5.6 POSIÇÃO DE TABULEIRO

Quanto à posição do tabuleiro, as pontes se classificam em (Figura 19):

1. Ponte com tabuleiro superior;
2. Ponte com tabuleiro intermediário
3. Ponte com tabuleiro inferior;

Figura 19 – Pontes na disposição do tabuleiro



Fonte: Leme (2007 apud PONTES..., 2008).

As pontes com tabuleiro superior recebem também a denominação de pontes com tabuleiro normal e as pontes com tabuleiro intermediário e inferior são também chamadas de pontes com tabuleiro rebaixado.

5.7 PROCESOS DE EXECUÇÃO

As pontes de concreto serão a base para os processos de execução apresentados (Figura 20 e figura 21) a seguir:

1. Construção com concreto moldado no local;
2. Construção com elementos pré-moldados;
3. Construção com balanços sucessivos;
4. Construção com deslocamentos progressivos;

A construção com concreto moldado no local é a denominação aqui apresentada para o tipo de execução do concreto armado e que consiste na concretagem da superestrutura no local, com o emprego das fôrmas apoiadas em cimbramento fixo. A construção com emprego de elementos pré-moldados, na sua forma mais comum, consiste no lançamento de vigas pré-moldadas por meio de dispositivo adequado, seguido na aplicação de parcela adicional de concreto moldado no local, em fôrmas que se apoiam nas vigas pré-moldadas, eliminando ou reduzindo drasticamente o cimbramento.

Em linhas gerais, a construção das pontes em balanços sucessivos é feita a partir dos lados dos balanços dos pilares, em segmentos; a fôrma para a moldagem de cada segmento anterior, sendo, portanto, necessário que o concreto desse segmento esteja com a resistência adequada. Também, neste caso, elimina-se o cimbramento. Existe também a alternativa de se fazer estes segmentos pré-moldados.

A construção com deslocamentos progressivos consiste na execução da ponte em segmentos, em local apropriado junto à cabeceira da ponte, à medida que o concreto de cada segmento vai adquirindo a resistência adequada, a ponte é progressivamente deslocada para o local definitivo, também eliminando o cimbramento. “). Mounir, Khalil El Debs (2017, página 325).

Figura 20 – Construção da Ponte sobre o Rio Claro (Brasil)



Fonte: Nakamura (2012).

Figura 21 – Construção da Ponte Octávio Frias, São Paulo (Brasil)



Fonte: Estruturas... (2016).

Com o desenvolvimento do conhecimento sobre a análise das forças atuantes em uma ponte, com a progressão da engenharia e da arquitetura, pode-se construir pontes com vãos cada vez maiores e com menos pilares de sustentação. As forças incidentes sobre esses corpos são cada vez mais estudadas e os métodos para contê-las e minimizá-las ganham mais espaço entre os calculistas. Assim,

pode-se transferir essas forças para pontos mais resistentes na estrutura. Podem-se ser citados, segundo Mounir, Khalil El Debs (2007), entre essas pontes, as seguintes estruturas:

5.7.1 Ponte em Viga

É o tipo estrutural mais empregado no Brasil na atualidade. A sua construção é feita com vigas de aço em baixo e betão ou então em peças pré-fabricadas. Este é o tipo de ponte tecnicamente mais simples e consequentemente mais fácil de construir. Neste tipo de ponte uma viga horizontal é suportada em ambas as suas extremidades por pilares. É caracterizada por vinculações que não transmitem momentos fletores da superestrutura para a infraestrutura (Figura 22 a seguir).

O sistema de superestruturas de pontes em vigas é caracterizado principalmente por vigas longitudinais denominadas longarinas que tem como principal função suportar o tabuleiro que receberá o tráfego de veículos e/ou de pedestres. Em muitos outros casos de pontes em vigas ainda são adicionados vigas transversais que tem como função aumentar a rigidez do sistema estrutural.

As vinculações típicas das pontes em vigas são as vigas simples apoiadas sem balanço, vigas simplesmente apoiadas com balanço, pontes com vigas contínuas e vigas gerber.

Figura 22 – Ponte em Viga



Fonte: Grigorev (2017).

5.7.2 Ponte de Treliças

Este tipo de ponte é construído juntando elementos retos. Tanto são feitas em metal como em madeira. A madeira mais usada para a compressão enquanto o metal é usado para suportar a tração. Este tipo de ponte foi muito popular nos EUA de 1870 a 1930. Essas pontes utilizam treliças — sistemas de barras de aço entrelaçadas — para manterem sua sustentação. Deste modo, as treliças das pontes são compostas de muitas barras de aço que, juntas, apoiam uma grande quantidade de peso e se estendem por grandes distâncias.

Pode-se observar que a maioria dos casos de construção de pontes em treliça o formato das peças é relativamente simples. Porém, depois de montadas, as treliças ocupam espaços maiores em comparação a outros modelos. Por exemplo, as vigas de aço ocupam espaços 20 vezes maiores do que cabos de aço, podendo servir de distração para condutores, gerando alguns problemas de tráfego. As treliças são utilizadas por serem estruturas de caráter rígido, transferindo a carga a partir de um ponto único a uma área muito mais ampla, garantindo maior absorção de peso e impacto. A característica econômica das pontes em treliça é que as mesmas necessitam de menos gastos para a sua construção, uma vez que utilizam materiais mais eficientes. Sendo assim, um dos tipos de pontes mais utilizados no mundo (Figura 23).

Figura 23 – Ponte em Treliças



Fonte: Ponte... (2017).

5.7.3 Ponte de Arco

Tem este nome devido à sua forma. A ponte mais antiga deste tipo ainda existe e foi construída na Grécia em 1300 A.C. (Ponte Arkadiko). No entanto quem ficou conhecido por construir pontes deste tipo foram os romanos. Pode ser feita de estrutura metálica, pedra ou concreto. O arco utilizado como forma para a ponte tem uma vantagem em particular quando o quesito é o comportamento estrutural, pois apresenta a possibilidade de ter os esforços de flexão reduzidos.

No caso particular em arcos de concreto, a possibilidade de redução da flexão resultando na predominância da compressão, é adequada ao material, permitindo o seu uso em grandes vãos e baixando o custo por causa da redução do material a ser utilizado.

As pontes em arco podem ser projetadas com tabuleiro superior, sustentado por montantes, com tabuleiro inferior, sustentado por pendurais ou tirantes, ou ainda o sistema misto que envolve a confecção do arco intermediário, sustentado lateralmente por montantes e no centro por pendurais. Nas estruturas com arco intermediário e inferior, grandes esforços horizontais são ocorridos na base do arco, tornando necessária a existência de um excelente terreno para a fundação da estrutura. Quando a obra for de concreto armado, deve-se prever um plano de concretagem bem definido para que se possa reduzir os efeitos de retração e deformação lenta do material (Figura 24).

Figura 24 – Ponte em Arco



Fonte: Prandi (2012a).

5.7.4 Ponte Suspensa

Este tipo é uma ponte que está sustentada por cabos de aço que são suportados por torres em cada extremidade. Tecnicamente, a carga da ponte é transformada na elasticidade dos cabos. Algumas das pontes suspensas populares incluem a ponte Golden Gate de Estados Unidos, a Ponte Humber da Inglaterra e da Ponte Tsing Ma da China. É o tipo de ponte caracterizada por ter um tabuleiro suspenso, sendo sustentado por cabos de suspensão verticais, que agem como suspensórios (Figura 25).

A tecnologia utilizada na confecção de pontes suspensas é relativamente simples:

1. São utilizadas torres verticais que são a conexão entre a ponte e o solo. São elas que, verdadeiramente, suportam o peso da estrutura e do tráfego que passará sobre o tabuleiro;
2. Todo o peso do tabuleiro é transmitido das torres para as torres por meio de cabos de suspensão, ao invés de ser transmitido diretamente a elas;
3. Existem vários cabos principais e também um cabo que faz a ligação entre as duas torres, podendo, com isso, fazer uma distância maior entre as duas torres, aumentando o comprimento do vão efetivo de tabuleiro;
4. É um sistema muito utilizado em regiões de montanhas;
5. Para evitar qualquer problema de ordem estrutural no tabuleiro, como quebras e fissurações, o mesmo deve ser construído com uma excelente qualidade de propensão;

Figura 25 – Ponte Suspensa



Fonte: Ponte... (2012b).

5.7.5 Ponte Estaiada

Estas são quase semelhantes às pontes suspensas na sua estrutura, mas com algumas diferenças. A principal diferença é a quantidade de cabo usada. Na ponte estaiada, as torres de suporte usadas para cabos são relativamente curtas e requerem menos quantidade de cabos em relação à ponte suspensa, sendo realizada a protensão dos estais. A primeira vista, a ponte estaiada pode parecer apenas uma variação de uma ponte suspensa, porém, esses tipos de estruturas diferem das suas anteriores por não precisarem de duas torres para garantir a sustentação total do tabuleiro. Os estais (cabos) são conectados diretamente à torre, deixando de lado a necessidade de um cabo principal. Com isso, vê-se que as pontes que utilizam esse tipo de disposição estrutural usam os cabos sempre na diagonal.

A torre de uma ponte estaiada será sempre a responsável pela absorção de forças de compressão. Quando utilizado aço no sistema de proteção, o esforço total sobre a torre pode ser diminuído, o que garante maior segurança e diminuição dos impactos lançados diretamente ao tabuleiro. As pontes estaiadas são ideais quando se quer ultrapassar vãos grandes, mas ainda assim um pouco menores que os das pontes suspensas (Figura 26).

Figura 26 – Ponte Estaiada, Rio de Janeiro (Brasil)



Fonte: Linha... (2016).

5.7.6 Ponte em Balanço

Estas pontes são suportadas apenas numa das extremidades. Duas das pontes cantilever mais populares incluem a Ponte Quebec do Canadá e a Oakland Bay Bridge de San Francisco, como mostrada na figura a seguir (Figura 27).

Figura 27 – Ponte em Balanço, Rio Madeira (Brasil)



Fonte: Rocha (2013).

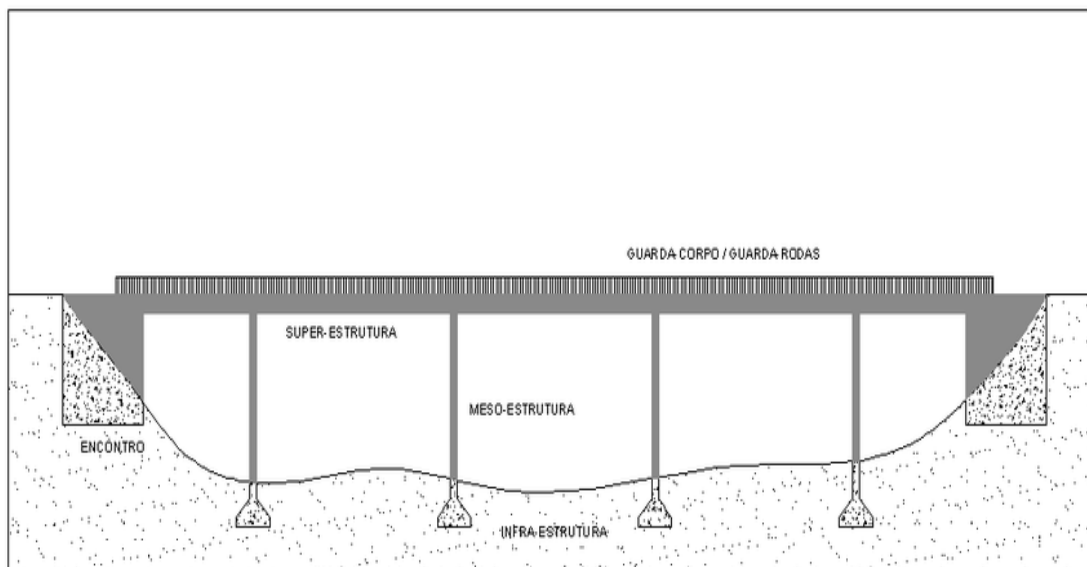
5.8 COMPONENTES ESTRUTURAIS

Segundo Pfeil, Walter (1979), em sua maioria, as pontes, sob o ponto de vista funcional e estrutural, são divindades em partes constituintes que se complementam formando toda a estrutura. A infraestrutura ou fundação de uma ponte é a sua parte “invisível, por meio da qual os esforços do projeto serão transferidos ao solo ou rocha”. A infraestrutura da ponte é composta pelos blocos, sapatas, estacas ou tubulões, assim como outras peças de ligação que tem o trabalho de unir os seus diversos elementos entre si, e destes com a mesoestrutura, como por exemplo, os blocos de cabeça de estacas e vigas de enrijecimento desses blocos (Figura 28 a seguir).

A mesoestrutura de uma ponte é constituída pelos pilares, elementos que recebem os esforços gerados pela superestrutura e os transmitem à infraestrutura, em conjunto com os esforços recebidos diretamente de outras forças solicitantes da ponte, tais como pressão do vento e da água em movimento na sua base.

A superestrutura de uma ponte é composta geralmente de lajes e vigas principais e secundárias, é o elemento de suporte imediato do estrado, que constitui a parte útil da obra, sob o ponto de vista da sua finalidade.

Figura 28 - Estrutura de uma Ponte



Fonte: Figura... (2018).

6 PROJETOS DE PONTES ESTAIADAS

O conceito de uma ponte deve ser selecionado levando em conta o número de parâmetros específicos relacionados com as reais características da real construção que será desenvolvida. Geralmente, esses parâmetros são especificados pelo proprietário, que na maioria dos casos é o Estado, a concessionária ou alguma relevante organização privada. Essas características são, geralmente, a localização da ponte, o propósito da ponte (autopista, rodovia), a importância da ponte, a durabilidade desejada, o cronograma de execução da obra e a economia. Cada uma dessas características leva aos estudos de outros problemas particulares. No caso da localização, as condições geográficas e geotécnicas (capacidade de resistência do terreno de fundação) características do cruzamento (a altura do escoramento, regime, profundidade do rio) e possíveis perigos naturais humanos (terremotos, vento ou impactos). O propósito da ponte leva geralmente ao estudo da dimensão e detalhes apropriados. A importância da ponte e a durabilidade desejada levam ao estudo de materiais a serem utilizados e a forma que esses devem ser preparados e implementados.

Pela importância, tanto pelo processo construtivo, como na influência no arranjo estrutural e avaliação dos esforços solicitantes durante a fase construtiva, o assunto recebe um tratamento de destaque dentro da tecnologia de construção das pontes.

As pontes estaiadas vêm se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos, obtendo sucesso devido ao fato de cobrirem grandes vãos de forma bem econômica.

Nos atuais modelos de construção de pontes estaiadas, todos os esforços são absorvidos pela parte superior do tabuleiro, por meio de vários cabos que se encontram concentrados em uma torre apoiada em um bloco de fundação. A fixação dos cabos deve ser realizada de uma maneira em que o formato final fique semelhante a um leque, com um ponto fixado no pilar, em forma de harpa, com cabos paralelos partindo de vários pontos do pilar, ou em disposição mista.

Esse tipo de ponte é de excelente escolha quando se quer ultrapassar grandes vãos, mas não é aconselhável utilizá-la quando se tem curvas muito acentuadas no percurso.

Para a pista de rolagem da ponte, as estruturas estaiadas podem utilizar os tabuleiros de aço, que formam uma placa ortotrópica, e os de concreto, mais tradicionais. De acordo com o manual “Pontes e viadutos em vigas mistas”, publicado pelo centro Brasileiro das Construções em Aço (CBCA), os tabuleiros de aço em pontes estaiadas são indicados para pontes que precisam vencer grandes vãos, superiores a 200 metros. Isso por que a estrutura em aço é mais leve que a de concreto. Já os tabuleiros de concreto substituem os metálicos quando a necessidade é de vencer vãos menores.

As pontes estaiadas são formadas basicamente por um tabuleiro (composto, por sua vez, por vigas e laje), sistemas de cabos (que tem a finalidade de suportar o tabuleiro), torres que suportam os cabos e os blocos e/ou pilares de ancoragem. Os principais métodos construtivos para viadutos e pontes estaiadas são ditos a seguir.

6.1 CIMBRAMENTO GERAL:

O cimbramento é utilizado quando a estrutura está localizada em uma zona de baixo gabarito e com o solo resistente. O cruzamento não está congestionado com estradas ou ferrovias e a ponte não tem que atravessar uma corrente de água. Há dois tipos de cimbramento:

1. Cimbramento fixo: o cimbramento é considerado fixo quando ele é desmontado após a sua utilização, podendo ser utilizado em outras partes da ponte. No cimbramento fixo, os tipos mais comuns utilizados são: cimbramento de madeira, de treliças ou vigas metálicas. Consiste na montagem de apoios que são retirados após a construção da ponte. Os cuidados que devem ser analisados na construção de cimbramentos fixos são: fundação e contraventamento do cimbramento, contra-flechas para compensar recalques ou de formações nas vigas e treliças, cuidados na concretagem, cuidados na desforma (descunhar do centro para os apoios

de todos os vãos e só desmontar após o cimbramento completo) e vistoria antes, durante e depois da concretagem.

2. Cimbramento móvel: o cimbramento é considerado móvel quando existem dispositivos que permitem deslocar o cimbramento, sem desmontá-lo, após a desmoldagem de um segmento da ponte. Esse sistema consiste na execução de vão por vão da ponte, por meio da treliça de escorregamento deslizante sobre os rolos dispostos em vigas transversais. Os cuidados na utilização deste tipo de cimbramento são: escolher a posição da junta e o seu travamento, influência do método construtivo no cálculo, interferências que podem impedir o deslocamento das formas ou da treliça e levar em conta os cinco cuidados do cimbramento fixo.

6.2 LANÇAMENTOS PROGRESSIVOS:

Nesse método, a superestrutura é fabricada nas margens e empurrada para a sua posição final ao longo dos vãos, comportando-se como um balanço. Esta é uma solução competitiva quando se está na presença de rios ou vales profundos e obras de grande extensão. A primeira aplicação desse método vem de 1950 na França, na construção da ponte *Vauxsurv-seine*. Em 1959, na construção de uma ponte sobre o Rio Agne, na Austrália, a empresa Auteried, venceu os 280 metros da obra com quatro vãos de até 85 metros.

Neste método, a superestrutura é confeccionada nas margens da obra e empurrada para a sua posição final ao longo dos vãos. Esta se comporta como um balanço na medida em que vai avançando até encontrar o próximo apoio. Cada procedimento é executado sobre formas metálicas fixas, sendo concretado sobre o anterior já construído, permitindo a continuidade das armaduras na região das juntas. A estrutura é empurrada por macacos hidráulicos e sobre aparelhos de apoios deslizantes de “Teflon” sobre os pilares que, dependendo do tamanho real do vão, podem ser provisórios. Uma vez que o trecho da estrutura fica em balanço até alcançar os apoios, se utiliza uma treliça metálica fixada nesse lugar que alcança o

apoio antes da estrutura, diminuindo o balanço e reduzindo o momento negativo durante a fase de construção.

Esse método de construção de pontes estaiadas apresenta os seguintes detalhes:

1. Eliminação do cimbramento;
2. Redução das formas na execução;
3. Redução da mão-de-obra;
4. Rápida execução da superestrutura;
5. Industrialização da construção;

Essa é uma solução atrativa quando se está na presença de greides elevados, rios ou vales profundos e obras com potencial de grande proporção (vãos de até 50 metros para evitar a construção de pilares provisórios). Recomenda-se, para a execução desse método, modular os vãos intermediários com comprimentos iguais e vãos extremos com comprimento de até 75% do comprimento dos vãos intermediários. Esse procedimento e adoção de segmentos com comprimentos iguais à metade do comprimento dos vãos intermediários asseguram que as emendas dos diversos segmentos coincidam com os quartos do vão, região em que os esforços internos são menores.

Nesse tipo de construção, a protensão é realizada em duas etapas. A primeira na fase construtiva devendo se centrada em relação à variação das cargas solicitantes devidas ao peso próprio durante a execução da obra. A segunda etapa é realizada após à execução do tabuleiro, para a complementação da primeira etapa, tendo em vista as solicitações de sobrecarga permanente e carga móvel.

6.3 BALANÇOS SUCESSIVOS:

É o sistema mais utilizado e particularmente indicado quando a altura da ponte em relação ao terreno é grande, em locais sujeitos a correnteza forte e onde é necessário obter altos gabaritos de navegação durante a execução da obra. O método consiste na construção da obra em segmentos formando consolos que avançam sobre o vão a ser vencido. A cada nova aduela, os estais correspondentes

são protendidos a fim de se suportar o peso da nova estrutura. Esse sistema foi criado em 1930, pelo engenheiro brasileiro Emílio Baumgart para a construção do vão central da ponte Herval, localizada sobre o Rio Peixe, em Santa Catarina. É o método construtivo que melhor se adapta a construção de pontes estaiadas, sendo o método mais utilizado. O processo é indicado para as seguintes situações:

1. Quando a altura da ponte em relação a terreno é grande;
2. Em rios com correnteza violenta;
3. Em rios e canais que é necessário obter gabaritos de navegação;

Esse método consiste na construção da ponte em segmentos, formando consolos que avançam sobre o vão a ser vencido. Existem duas técnicas básicas para a construção de pontes mediante o método de balanços sucessivos; uma delas emprega aduelas pré-moldadas, as quais se levantam mediante o apoio de guinchos e outros equipamentos e a outra técnica consiste em construir aduelas *in loco*.

Quando as aduelas são moldadas *in loco*, a concretagem é utilizada com auxílio de formas deslizantes escoradas nos trechos já executados e, quando atingida a resistência requerida, as aduelas são protendidas. As aduelas pré-moldadas são fabricadas no canteiro e transportadas por meio de treliças metálicas até a extremidade do balanço, onde são protendidas longitudinalmente. Entre as aduelas, pode-se utilizar a cola epóxi, que serve para lubrificar a superfície e diminuir o efeito das imperfeições das juntas entre as mesmas, impermeabilizar a junta e contribuir para a transmissão das tensões de cisalhamento. A execução em aduelas pré-moldadas pode ser feita por dois métodos: o sistema *short-line* e o sistema *long-line*.

1. Sistema *SHORT-LINE*: as aduelas são fabricadas com o uso de apenas uma forma metálica, para atender todas as diferenças e mudanças entre as seções transversais das aduelas, assim como as conformidades em planta e projeto do perfil geométrico da estrutura. Essa forma é sofisticada e tem um custo bastante elevado.
2. Sistema *LONG-LINE*: nesse sistema, é fabricada uma forma que atenda a todo o vão, podendo ser aproveitada para outros vãos das mesmas

dimensões. Esse sistema é mais conservador, já que pode-se construir várias aduelas com referências topográficas da primeira. A forma e a armação são montadas sobre um escoramento metálico ou sobre uma pista de concreto que poderá servir de forma de fundo. As aduelas são montadas de uma maneira que fique uma perfeita acoplagem entre si, onde cada aduela concretada na seção anterior serve de forma para a próxima.

Também nos dois processos a construção do tabuleiro é feita através do deslocamento de treliças simétricas desde os apoios até o centro do vão, onde é feito o fechamento central. Cada treliça está apoiada na borda do balanço já construída e suporta as futuras aduelas. Para que se possa contrabalancear o peso do concreto, a forma e o peso dos equipamentos, a treliça utiliza um contrapeso. O mesmo representa um aumento no carregamento que deve sustentar o balanço durante a etapa construtiva. Atualmente, ancora-se a parte posterior da treliça ao balanço já construído mediante barras metálicas. O avanço da treliça é feito mediante apoios em perfis metálicos que servem de trilhos para a movimentação de todo o sistema.

Uma vez ancorada a treliça, são feitas armações dos reforços e a concretagem. Quando o concreto da aduela atinge a resistência desejada, faz-se a protensão. A execução de uma aduela depende do avanço da treliça, do ajuste da forma, da armação do reforço, dos cabos e ancoragens, da concretagem e da protensão. Geralmente, as vigas longitudinais possuem uma distribuição de cabos protendidos para resistir aos momentos fletores que atuam em toda a fase da estrutura. A execução deve ser bem controlada, principalmente em relação as deformações da estrutura. Normalmente, a concretagem do trecho central é realizada nos períodos com menor variação de temperatura, para que os esforços térmicos não provoquem esforços no trecho até o endurecimento do concreto.

Sempre que possível, projeta-se a obra para que os balanços sejam feitos simetricamente em relação ao apoio, evitando grandes desequilíbrios entre as cargas da estrutura. Quando os balanços são desiguais ou há balanços em apenas um vão, pode-se utilizar lastro no vão anterior no balanço ou até mesmo a estais

ajustáveis ao desenvolvimento do vão, suportados por torres provisórias e ancorados no apoio anterior. Esse sistema oferece diversas vantagens, uma das mais importantes é que pode-se vencer vãos livres que podem atingir aproximadamente 300 metros. Sendo assim, uma solução atrativa para vales profundos, rios com correntezas fortes, vias com forte trânsito e com pouco espaço de circulação. A construção sucessiva é um processo cíclico, que permite uma redução de custo das formas devido à possibilidade de reutilização, e redução do gasto com mão de obra, graças à velocidade de execução. A construção de pontes mediante esse tipo de método sofre influência de alguns problemas relacionados à fluência e retração do concreto. O fator principal para este fenômeno é a diferença de níveis das aduelas no fechamento da estrutura. O peso próprio, a protensão longitudinal, o peso dos equipamentos de construção e as variações térmicas causam variações não somente elásticas, também causando deformações plásticas, produto da fluência, retração e relaxação do aço. Assim, anteriormente a construção, devem ser determinados os deslocamentos para permitir as definições de cotas de concretagem durante a construção.

Um exemplo desse procedimento prático em ponte estaiada foi realizado na ponte de Porto Alencastro, construída sobre o Rio Parnaíba, na divisa de Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. A ponte possui um vão com 350 metros com um total de 136 estais. Seu tabuleiro possui um vão de 16 metros e os mastros tem uma altura de 95 metros, aproximadamente.

Como forma de garantir o mínimo de qualidade na prestação dos serviços, tanto em relação ao projeto, quanto na execução, os contratantes normalmente exigem que a empresa/escritório tenha histórico comprovado de realização de obra estaiada. Esse ponto, aliás, é um gerador de polêmica. Há quem defenda que restringir as empresas com experiência prévia comprovada é fundamental para a perfeita execução da obra. Em São Paulo, inclusive, isso culminou na proibição da formação de consórcios pela Empresa Municipal de Urbanização (Emurb), no edital para a construção da ponte estaiada sobre o rio Pinheiros.

Entidades como o SindusCon-SP, porém, defendem que há dezenas de empresas de engenharia aptas a enfrentar com sucesso o desafio de executar esse tipo de obra sem terem feito uma ponte semelhante. Proibi-las de disputar sob

alegação de complexidade seria restringir a concorrência. Uma solução meio-termo é utilizada nos editais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), que exigem a qualificação técnica na construção de pontes estaiadas ou em pontes de concreto protendido executadas por balanços sucessivos.

Executar um projeto de ponte ou viaduto estaiado exige uma equipe de engenheiros com experiência e conhecimento técnico apurado. Isso se aplica desde a execução das fundações das torres, à execução das aduelas do tabuleiro e a disposição dos tirantes. Existem três momentos críticos da execução de estruturas estaiadas aos quais o contratante precisa fiscalizar: o controle da resistência do concreto, o tracionamento dos estais e, finalmente, o controle das flechas do tabuleiro.

Entre as falhas que ocorrem com certa frequência, está a protensão mal realizada, que exige retrabalho e pode comprometer o andamento da obra. O processo construtivo é apresentado nas figuras a seguir (Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33).

Figura 29 – Instalação de pilares para ponte Estaiada



Fonte: Nakamura (2011).

Figura 30 – Processo de ancoragem em bloco



Fonte: Nakamura (2011).

Figura 31 – Confeção do tabuleiro de ponte estaiada



Fonte: Nakamura (2011).

Figura 32 – Implantação de pilares



Fonte: Nakamura (2011).

Figura 33 – Técnica de lançamento progressivo



Fonte: Nakamura (2011).

6.4 FUNDAMENTOS DO PROJETO DE UMA PONTE ESTAIADA

As pontes estaiadas requerem projetos distintos do que as demais pontes, envolvendo toda uma tecnologia no campo da engenharia civil. Do ponto de vista de construção, essas edificações exigem bastante esmero na execução e uma interface constante com o projeto elaborado de modo que todas as premissas teóricas sejam verificadas ao longo do processo executivo. Com o aumento da tecnologia e a busca por novas tecnologias, os projetos de pontes estaiadas vem ganhando cada vez mais espaço no Brasil atualmente. Se o ponto de vista analisado for o método de projeto, o uso de ferramentas de análises estruturais cada vez mais sofisticadas é essencial, a fim de se mostrar uma maior fidelidade de execução ao projeto desenvolvido e maior segurança.

Os projetos de pontes estaiadas necessitam também de um grande cuidado nas etapas construtivas de uma obra. Esta etapa é essencial para que no final do projeto os resultados requeridos em termos de forças dos estais e cargas no tabuleiro sejam compatíveis com os previstos anteriormente no projeto.

Embora que os projetos de pontes estaiadas sejam adquiridos por diversas empresas nacionais, a tecnologia utilizada em projetos no Brasil tem origem em estudos realizados na Europa. Ainda assim, é sabido que o meio técnico nacional necessita de maior investimento para que se tenha a mesma qualidade de projeto que as maiores potências mundiais na construção desses tipos de pontes.

Usualmente, considera-se necessário o uso de uma estrutura estaiada quando o vão a ser vencido em projeto é superior a 200 metros, onde esse sistema se tornara rentável e eficiente. Contudo, os vãos superiores a 1600 metros são mais propensos a receberem estruturas suspensas. Assim, as pontes pênsis terão mais rentabilidade e serão mais úteis em vãos muito grandes.

O grande atrativo econômico desta solução está na possibilidade do emprego de estruturas esbeltas, além de conferir características estéticas cada vez mais exploradas por arquitetos ao redor do mundo. Especificamente no Brasil, apesar das estruturas ainda não se aproximarem dos grandes vãos empregados no continente asiático, o desenvolvimento

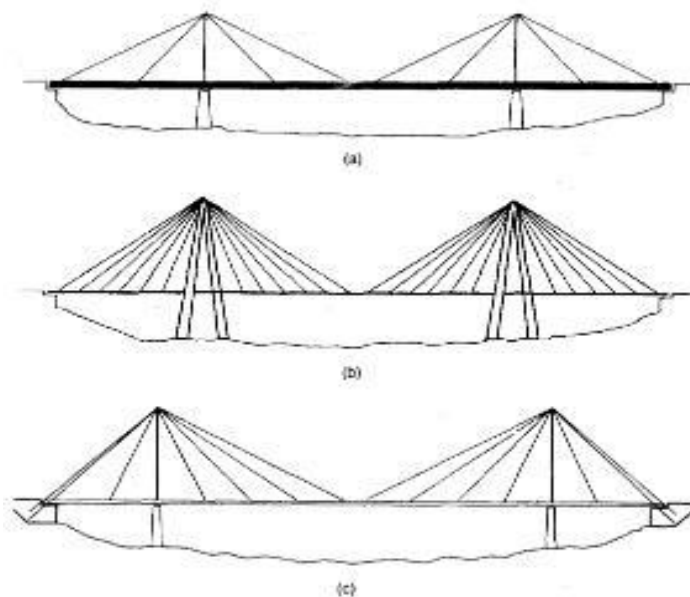
tecnológico na área tem sido significativo, com a integração deste tipo de obra no contexto urbanístico das principais metrópoles. Ressalta Renan Ribeiro Setubal Gomes (2013, página 25).

Estudos realizados no Brasil e em outros países revelam que inúmeros sistemas estruturais podem ser desenvolvidos para estruturas estaiadas. Mas, basicamente, a estrutura se divide em quatro partes no projeto:

1. Sistema de estaiamento;
2. Tabuleiro principal, ou viga de enrijecimento;
3. Pilone, ou torre, ou mastro;
4. Ancoragens de extremidade;

O sistema de estaiamento é formado, basicamente, por grandes cabos (também chamados de estais), que fazem uma conexão direta entre o tabuleiro e o pilone. O sistema pode ter três configurações geométricas distintas. Essa configuração geométrica tem total influência no comportamento estrutural do sistema. São conhecidas configurações geométricas: sistema em leque, harpa e semileque (ou semi-harpa) (Figura 34).

Figura 34 – Sistema de disposição de estais



Fonte: Walther et al. (1985 apud CAMBUNDO, 2010, p. 2).

Os vários tipos de sistemas de estaiamentos se diferenciam pela disposição de amarras dos cabos nos pilones, conforme a figura 34 apresentada anteriormente. São usualmente feitos em pontes estaiadas três tipos de disposição dos estais no pilone: leque, semileque e harpa.

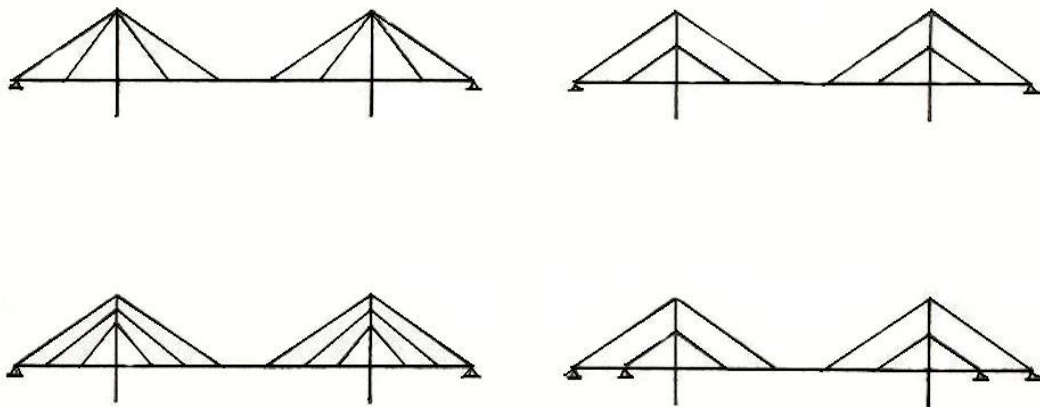
1. Pode-se representar o sistema por “sistema de leque”, onde o estais são colocados em um único ponto no topo do pilone e assim são direcionados, a partir desse ponto, para os diversos locais em todo o tabuleiro.
2. O sistema em harpa se diferencia do sistema em leque por apresentar a distribuição dos estais em todo o comprimento da torre, fazendo com que os estais tenham a mesma inclinação e conferindo simetria para o sistema.
3. Diferenciando-se do sistema em leque pelo fato de distribuir os estais em torno do trecho superior do pilone. O sistema em semileque é o sistema mais utilizado no Brasil. É um sistema que apresenta algumas vantagens técnicas em relação aos outros dois apresentados. Em relação ao sistema em harpa, esse sistema possibilita explorar maior distribuição dos estais ao longo do tabuleiro, deixando esses elementos estruturais mais eficientes e econômicos. Já em relação ao sistema em leque, este se diferencia pela possibilidade de maior facilidade de acomodação das ancoragens e uma maior facilidade executiva do pilone.

É comum nos projetos a especificação de sempre se manter a distribuição dos estais ao longo do tabuleiro de forma constante. Assim, quando o vão maior é superior ao dobro do comprimento dos vãos laterais, os estais mantidos mais próximos dos vãos laterais são dispostos mais próximos uns dos outros. Usualmente, os estais das extremidades são denominados estais de ancoragem e são de extrema importância quando os sistemas utilizados são dos tipos leque e semileque (Figura 35).

A posição definida para o ponto de ancoragem de extremidade também é um fator conceitual importante no lançamento de uma estrutura

estaiada com a geometria em harpa. Como se procura adotar o número de estais no vão central igual ao número de estais no vão lateral, embora não seja obrigatório, o vão lateral terá comprimento próximo à metade do vão central, e passa a ser interessante que sejam criados pontos de ancoragem no trecho dos vãos extremos. Esta medida faz com que as rigidezes dos vãos central e lateral sejam diferentes e que a função de ancoragem dos vãos laterais seja favorecida. A mesma medida pode ser adotada para um sistema com geometria semileque. Define Renan Ribeiro Setubal Gomes (2013).

Figura 35 – Sistemas em semileque e harpa



Fonte: Gomes, D. (2010).

A questão da ancoragem nos vãos extremos em projetos de pontes estaiadas é de fundamental importância para o desenvolvimento da obra, onde são comumente empregados blocos de pesos nas extremidades que se encarregam de transmitir ao terreno os esforços de ancoragem.

Em projetos mais modernos de estruturas estaiadas, tem sido utilizado amplamente o emprego de estais alto-ancorados no tabuleiro. A alto-ancoragem consiste em posicionar os estais no próprio tabuleiro, gerando uma força de componente horizontal de compressão e uma maior liberdade da carga vertical transmitida ao apoio externo. Os tirantes são também empregados para combater o alívio na carga vertical.

A distribuição dos estais na direção transversal da ponte também apresenta uma série de vastas possibilidades, levando ao projetista a determinação da forma mais adequada para o projeto, levando em consideração as questões estéticas e estruturais, onde uma vez definido o posicionamento, será decisivo para a escolha da seção transversal do tabuleiro.

Essa escolha deve atender a questão do combate aos esforços de tração ao longo da estrutura, sendo assim, a distribuição de estais transversais a mais comum e adequada para a maioria dos casos. Usando parâmetros parecidos, em casos de pontes onde ocorrerá passagem de tráfego ferroviário e rodoviário, é viável a aproximação dos estais laterais para a parte central da estrutura, visando reduzir a flexão transversal do tabuleiro. Entre outras diversas formas de distribuição dos estais, é muito comum que se utilize uma linha de estais no centro do tabuleiro ou a utilização de estais inclinados nas extremidades do tabuleiro, com torres em forma de “A” e duas linhas centrais de estais.

Em sua maioria, as literaturas e obras utilizadas para os estudos de pontes estaiadas denotam que grande parte dos projetos envolvem uma estrutura com um vão central de maiores dimensões e dois vãos laterais menores. Sendo que, em alguns casos específicos, esta configuração padrão não é possível de ser feita, sendo necessário o projeto de uma estrutura com vãos múltiplos direcionais. Neste caso, um artifício utilizado é simular a estrutura de uma ponte estaiada de vãos múltiplos através de vários segmentos-padrão de três vãos. Neste caso, o compromisso estrutural é atendido, porém, a estética da ponte não ficará tão agradável, sendo este projeto deixado, muitas vezes, de lado por razões arquitetônicas.

Uma estrutura estaiada formada por vãos contínuos apresenta certos problemas do ponto de vista estrutural. A ausência dos estais de ancoragem nas extremidades faz com que seja necessário fazer um projeto mais específico para que se tenha uma maior rigidez à flexão da torre para garantir pequenos deslocamentos no topo da estrutura, pois os estais de ancoragem são responsáveis por estabilizar a torre quando a estrutura é submetida a carregamentos assimétricos. Esse tipo de problema ocorre muitas vezes para a condição de carga móvel posicionada em um dos vãos adjacentes a torre.

Em Millau, na França, ocorre um grande exemplo de estrutura estaiada continua com vários vãos. A estrutura é composta por tabuleiro e torre feitos em aço. Assim, vê-se que neste caso as torres estão engastadas nos pilares e nas vigas de enrijecimento, onde a seção das torres e pilares se separam na altura da viga de rigidez (Figura 36).

Figura 36 – Ponte Estaiada de Millau (França)



Fonte: VIADUTO... (2016).

6.5 CONCEPÇÕES PRELIMINARES

Pontes estaiadas são estruturas altamente hiperestáticas, portanto, modelos computacionais capazes de representar adequadamente o comportamento físico da estrutura com aceitáveis tolerâncias para os erros são indispensáveis.

Como na maioria dos projetos de estrutura, a análise do sistema é realizada em várias etapas. A primeira delas é responsável pelas dimensões iniciais dos elementos estruturais. Nesta fase, são realizadas uma série de simplificações nos modelos considerados, que em geral não consideram os efeitos de segunda ordem.

Verificado a solução estrutural preliminar, parte-se para a segunda etapa, em que uma análise dos estados limites últimos e de serviço são verificadas,

considerando os efeitos da não-linearidade física e geométrica, o que é indispensável, visto que estas estruturas são bastante deformáveis, causando esforços e deslocamentos de segunda ordem.

Em um projeto de uma ponte estaiada procede-se um pré-dimensionamento de todos os elementos da estrutura. Nesta fase é fundamental um bom conhecimento por parte do projetista do comportamento global da estrutura e da influência de cada elemento neste comportamento. Na segunda fase, define-se a seção dos estais e o seu pré-alongamento através de métodos simplificados. Calculam-se, a partir daí, os esforços e deformações devido às cargas permanentes através de uma análise estática. Após esta etapa, verifica-se se há necessidade de alteração das dimensões dos elementos, principalmente dos estais, devendo-se dimensioná-los de modo que se tenha flecha nula no tabuleiro para o carregamento permanente ou até mesmo uma contra-flecha inicial. Por final, realiza-se uma análise dinâmica e das frequências naturais, assim como uma checagem dos esforços nas fases construtivas.

Na fase inicial podem-se utilizar modelos planos de análise para uma melhor compreensão da estrutura, mas na fase final é recomendável um modelo espacial mais complexo. Na fase final torna-se mais conveniente o uso de programas computacionais baseados no método dos elementos finitos, para que se possam considerar os efeitos da não-linearidade física e geométrica.

6.6 COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DA ESTRUTURA

Como na maioria dos projetos estruturais, pode-se considerar uma simplificação bastante conveniente na fase de projeto preliminar, que é a suposição de um comportamento linear da estrutura quando submetido às cargas de serviço. No entanto, por se tratar de uma estrutura com elementos bastante esbeltos e por estar sujeita à fluência e fissuração, para as pontes estaiadas, essa suposição pode não prever com aceitável aproximação o comportamento real da estrutura no que diz respeito aos esforços transmitidos, portanto, torna-se necessária uma análise não-linear, principalmente quando se considera a estrutura submetida ao carregamento último, onde as respostas se tornam ainda mais não-lineares. O objetivo principal

desta consideração é tentar aproximar os resultados do modelo estrutural ao do comportamento real, levando a uma previsão inteiramente confiável.

Na análise linear, a simplificação de transformar a estrutura real em um conjunto de barras interligadas, com condições de contorno e propriedades adequadas, leva a um modelo de grande utilidade e com relativa simplicidade. No entanto, o resultado desta análise é uma estrutura deformada, onde as equações de equilíbrio não são satisfeitas, pois ela foi calculada apenas na configuração indeformada. Portanto, pode-se concluir que quanto maior a flexibilidade da estrutura, maior o erro de aproximação ao se considerar uma análise linear ao invés de uma não-linear. Resumindo, resolveu-se o problema de forma aproximada e a solução obtida pode não ser mais aplicável na análise.

Quando se pretende considerar a não-linearidade ao estudo de estruturas reais, vê-se a necessidade da utilização de uma ferramenta computacional eficaz, tornando possível na prática a resolução do sistema. Na consideração da não-linearidade durante a modelagem, o engenheiro deve decidir quais fontes de não-linearidade são relevantes e devem ser consideradas, idealizando uma maneira de representá-la.

Pode-se considerar na análise a não-linearidade tanto do material quanto geométrica, ou a consideração de cada um separadamente. Em uma análise elástica linear, considera-se que o material não escoar e que suas propriedades não variam, além disso, as equações de equilíbrio são formuladas em sua geometria indeformada, podendo-se considerar que suas deformações são tão insignificantes que podem ser desprezados seus efeitos de segunda ordem. A desconsideração das suposições mencionadas anteriormente pode ser feita separadamente. Pode-se considerar apenas a não-linearidade geométrica, onde o material ainda apresenta comportamento elástico linear, mas os deslocamentos finitos são considerados na formulação das equações de equilíbrio. Também é possível a consideração apenas da não-linearidade do material, onde as propriedades variam de acordo com as tensões solicitantes. E, como uma forma mais geral, podem-se considerar ambos os efeitos de não-linearidade.

Dentre as principais fontes de não linearidade podem ser citadas:

1. Efeitos geométricos: como as imperfeições iniciais ou contraflechas e o efeito $P-\Delta$, que são os momentos adicionais causados por cargas axiais aplicados em locais onde há deslocamento horizontal;
2. Efeitos do material: como fissurações do concreto armado;
3. Efeitos combinados: Deformação plástica mais o efeito $P-\Delta$, deformações das conexões, contribuições de sistemas secundários na resistência e na rigidez.

Em pontes estaiadas, dificilmente é possível se considerar todas as fontes de não-linearidade em um modelo e obter o comportamento real da estrutura com todos os detalhes, sendo que os principais a serem considerados se originam de três fontes principais, são elas:

1. Relação força axial – alongamento: não-linear para cabos inclinados devido à catenária gerada pelo peso próprio, pois parte dos deslocamentos ocorre devido sua deformação e a outra parte devido à mudança de flecha no cabo, assim a rigidez axial aparente do cabo cresce quando a tensão de tração aumenta;
2. Relação momento – força normal – curvatura: não-linear para as torres e o tabuleiro sob ação da flexão oblíqua composta;
3. Mudança na geometria devido aos grandes deslocamentos: em pontes estaiadas, deformações da ordem de meio metro ou mais podem ocorrer sob ações de cargas de serviço, assim, a rigidez dos elementos na configuração deformada devem ser calculadas.

6.7 NÃO LINEARIDADE DOS ESTAIS

A não-linearidade exibida pelo cabo se deve à mudança da geometria do mesmo sob ação crescente do carregamento e ao efeito de segunda ordem produzido pela tensão atuante ao longo do cabo. Deste modo, verifica-se um

aumento do comprimento do cabo devido ao estiramento elástico e à mudança de geometria decorrente da alteração da flecha.

Um procedimento bastante usual na literatura para se representar um elemento de cabo em uma análise linear é uma sua representação como um elemento retilíneo entre seus pontos de ancoragem. Para este elemento, adota-se um módulo de elasticidade equivalente ao de um cabo curvo também chamado de Módulo de Dischinger. Esta consideração é feita para se considerar a perda de rigidez do cabo submetido ao peso próprio. Uma aproximação que é bastante utilizada é obtida com a expressão a seguir:

$$E_{eq} = E / \{ 1 + [(y/l)^2] \cdot E / 12 \sigma^2 \}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade do material do cabo;

l = Projeção horizontal do comprimento do cabo;

y = Peso por unidade de volume do aço (peso específico);

σ = Tensão de tração média no estai;

E_{eq} = módulo de elasticidade equivalente.

6.8 CONSIDERAÇÃO DA FADIGA

A fadiga é um aspecto de difícil consideração, pois não é possível prever na prática a frequência e intensidade com que as cargas atuarão na estrutura. Deve-se ainda considerar a provável existência de efeitos secundários, como por exemplo, a vibração dos cabos devido à ação do vento, de difícil consideração e que eventualmente reduzem a resistência à fadiga. A verificação da segurança à fadiga consiste em se garantir que a variação das tensões nos estais não ultrapassem valores limites resistentes, que, em geral, são obtidos de ensaios. As variações de tensões nos tirantes dependem basicamente da relação entre as sobrecargas de utilização e as cargas permanentes. Para pontes estaiadas rodoviárias esta relação situa-se em torno de 0,25, o que faz com que a verificação da segurança à fadiga

não seja, em geral, um dos condicionantes mais importantes para o dimensionamento dos estais.

Não existe ainda no meio técnico um consenso a respeito das tensões máximas e mínimas, assim como das flutuações de tensões. Mas vários autores recomendam, para a combinação rara, um valor para a tensão máxima de 45% do valor de $tk f$, que é o valor de ruptura característico do aço dos estais.

As flutuações de tensões devem respeitar o valor admissível de 125 MPa, que admite um número de ciclo de carregamento superior a 2.10^6 , valor este, obtido de ensaios de fadiga em cordoalhas isoladas.

O valor da tensão mínima admissível também não se encontra definida em norma ou na literatura, mas alguns autores utilizam em seus trabalhos um valor de 15% do valor de $tk f$.

7 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE PONTES ESTAIADAS

Alguns dos principais desenvolvimentos das pontes estaiadas podem ser evidenciados na concepção do projeto. A mudança do formato de um elemento estrutural, uma nova maneira de posicionar os tirantes que suportam o tabuleiro, ou ainda, a aplicação de um conceito diferente nos apoios principais, todas estas melhorias idealizadas em projeto são capazes de possibilitar o melhor aproveitamento da estrutura e uma consequente redução dos custos.

7.1 LIGAÇÕES ENTRE ESTAIS E TABULEIRO

Um dos avanços mais notáveis nas pontes estaiadas diz respeito as ligações entre os estais e o tabuleiro. As pontes estaiadas mais antigas e primitivas apresentam estais bastante espaçados ao longo do tabuleiro, que tinha de ser necessariamente bastante rígido para suportar os esforços de flexão, tendo em vista que os vão sujeitos a este efeito eram grandes. Esta configuração, que apresentava um tabuleiro muito robusto, contava com uma superestrutura excessivamente pesada, transmitindo cargas desnecessárias para infraestrutura e criando pontos de tensões nas ancoragens, que precisavam de reforço. A concepção com estais

espaçados se tornou obsoleta, visto que não é a melhor opção técnica e econômica. Em seguida, as pontes estaiadas começaram a ser concebidas de outra maneira. Os estais passaram a ser múltiplos e apresentavam pequenos espaçamentos. Entretanto, o tabuleiro ainda não era completamente suspenso, os cabos eram dispostos somente nas proximidades das torres e sustentavam as periferias dos apoios principais. Uma das pontes estaiadas pioneiras na utilização de múltiplos estais foi a Ponte Friedrich Ebert, concebida em 1967 por Homberg.

7.2. ARRANJO PARA A DISPOSIÇÃO DOS ESTAIS

A disposição dos estais com o mastro nessas pontes também mostrou um grande desenvolvimento com o passar do tempo. Atualmente, existem três diferentes formas de idealizar a conexão dos cabos ao longo das torres: os tipos leque, harpa e semi-harpa.

7.3 PLANOS DE ESTAIS

O aumento do número de planos de estais possibilitou de maneira eficaz a transposição de barreiras com relação à largura do tabuleiro. Pontes estaiadas que apresentam apenas um único plano central de estais são consideradas estruturas limpas, simples e bem vistas do ponto estético. Sob o ponto de vista estrutural, porém, esse tipo de estrutura de estais implica na limitação de algumas características, pois a seção transversal do tabuleiro é apoiada apenas no centro e funciona como uma espécie de gangorra com apenas dois balanços. Deixando, assim, esse sistema estático vulnerável a aplicação de cargas assimétricas, podendo gerar desequilíbrios e altíssimos esforços de torção na superestrutura.

Além do ponto negativo em relação aos esforços de torção, a estabilidade da estrutura também fica comprometida e a passagem da torre pelo tabuleiro tem de ser cuidadosamente pensada e executada para não interferir nas faixas de tráfego. Estas desvantagens fazem desta configuração um esquema estrutural ineficaz para tabuleiros mais largos. Uma alternativa interessante para minimizar estas desvantagens é a adoção de dois planos de estais nas extremidades do tabuleiro. A

implantação desta nova configuração irá eliminar o problema da torção gerado pelas cargas assimétricas, uma vez que a seção transversal do tabuleiro irá funcionar como um elemento biapoiado, assim, o tabuleiro apenas sofre a solicitação de uma flexão transversal. Tendo em mente que esta outra concepção, com dois planos, conta com estais ancorados nas extremidades da superestrutura, torna-se de fácil planejamento e execução a passagem do mastro, sem nenhuma interferência, pela pista de rolamento. Por fim, uma vez que a superestrutura conta com mais pontos de suporte, é possível afirmar que ela será mais estável de uma maneira geral. A ilustração da ponte Great Belt Bridge demonstra este modelo a seguir (Figura 37):

Figura 37 – Ponte Estaiada de Great Belt Bridge (Dinamarca)



Fonte: Prandi (2011).

Com isso, vê-se a necessidade de adotar uma configuração com dois planos de estais. Para larguras muito extensas, pode-se adotar um plano de cabos centrais além dos externos para que se diminua o vão.

7.4 CONFIGURAÇÃO DAS TORRES

O desenvolvimento das pontes estaiadas está diretamente ligado as inovações geométricas, como por exemplo, os tipos de limitações impostas pelo

mastro ao sistemas das pontes estaiadas, a a interferência causada no tabuleiro, que é, em muitos casos, perfurado pelo apoio principal.

Uma das concepções de torres que elimina esta intercessão indesejada é a chamada torre em “A”, utilizada pela primeira vez em 1959, na Ponte Severin. Este tipo de torre nasce a partir de dois apoios diferentes que avançam como dois pilares distintos e se aproximam um do outro à medida que avançam na altura, se encontrando em um determinado ponto acima do tabuleiro. Este modelo elimina completamente qualquer contato indesejado do pilar com a pista de rolamento, entretanto, é preciso analisar a inclinação dos cabos cuidadosamente, para que estes não interfiram no tráfego da ponte.

7.5 INFLUÊNCIA AERODINÂMICA

Uma das principais limitações apresentadas pelas pontes estaiadas era a sua vulnerabilidade ao efeito do vento sobre a estrutura suspensa, até de serem realizados pesquisas e estudos mais esclarecedores nesse âmbito, muitas obras de arte suspensas por estais apresentavam problemas de instabilidade aerodinâmica. Este problema foi um dos principais responsáveis pela baixa na utilização das pontes estaiadas durante o século XIX, não sendo mais um problema atualmente para a sua execução.

7.6 MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

Com o aumento gradativo da tecnologia no campo da engenharia, os métodos de cálculos estruturais para as pontes estaiadas vêm se aprimorando a cada dia.

O projeto de uma ponte estaiada ganha metodologias mais simples quando submetido às novas ferramentas de cálculos, que simplificam os complexos processos que envolvem o projeto de uma ponte. Este fato pode ser claramente ilustrado pela introdução dos softwares de cálculo estrutural no ambiente dos escritórios de projetos de pontes.

Estes softwares possibilitam a criação de um modelo virtual fiel daquilo que se pretende construir, com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura da maneira mais próxima possível da realidade. A fase preliminar do projeto, que inclui a concepção e o pré-dimensionamento de uma estrutura viável pode ser bastante simplificada, uma vez que o projeto pode ser rapidamente modelado em computador para que as dimensões e os esforços possam ser verificados para que a viabilidade daquilo que foi proposto na idealização da estrutura seja confirmada.

Outra vertente importante da análise estrutural realizada nos modelos virtuais é em relação ao comportamento dinâmico da ponte. Os softwares fornecem, para serem examinados pelo projetista, os modos de vibração que atuam na estrutura, dessa maneira, o autor do projeto tem todos os parâmetros necessários para avaliar a eficiência da sua concepção.

7.7 ELEMENTOS DE TENSIONAMENTO

Os estais são elementos encarregados de transferir os esforços advindos do tabuleiro para as torres. Ele é composto basicamente pelo sistema principal de tensionamento, pelos sistemas de ancoragem e pelos itens necessários à sua proteção. Os elementos de tensionamento em pontes estaiadas podem ser descritos no texto a seguir.

7.7.1 Barras

As barras são componentes produzidos com o intuito de serem pré-tensionados. O estai pode ser composto por uma única barra ou por um conjunto delas paralelas entre si.

As barras empregadas em obras estaiadas devem estar em conformidade com as especificações presentes na ASTM A722. Além disso, elas devem atender a todos os critérios e exigências impostas através da realização de ensaios estáticos e dinâmicos.

Para cada lote de 20 toneladas de aço, é necessária a realização de ensaios estáticos, devendo-se obedecer aos seguintes requisitos:

1. Mínima resistência última à tração: $F_s = 1035 \text{ MPa}$
2. Mínima tensão de escoamento: $F_y' = 0,85 F_s'$
3. Módulo de elasticidade: $E = (200000 \pm 5\%) \text{ MPa}$

Caso contrário, todo o lote deve ser rejeitado.

Para a realização do ensaio dinâmico, deve-se coletar uma amostra de 5 metros para cada 20 toneladas de aço, sendo o comprimento mínimo de 20 diâmetros, mas não inferior a 61 cm. O corpo de prova é então exposto a uma tensão superior a 45% de F_s' com uma variação de tensão dada em função do número de ciclos a que a amostra é submetida.

Encerrado o ensaio de fadiga, a amostra é submetida a um ensaio estático, onde a tensão de ruptura não deve ser inferior a 95% de F_s' .

Caso o corpo de prova seja rejeitado em um dos testes, uma nova amostra é coletada, se obtiver novamente um resultado negativo, todo o lote de onde se obteve a amostra deve ser rejeitado.

Normalmente as barras são utilizadas em passarelas, onde a variação de tensões é baixa, pois há uma dificuldade de se garantir que a barra apresente dobras durante sua montagem, que levaria a um comprometimento de seu comportamento.

7.7.2 Fios

É o componente básico para a confecção de cordoalhas e cabos. Os fios empregados em obras estaiadas devem estar em conformidade com as especificações presentes na ASTM A421.

A princípio, os fios de relaxação baixa são mais indicados para compor os estais.

Os fios que compõem os estais também devem passar por ensaios estáticos e dinâmicos.

Para cada lote de 25 toneladas de aço, é necessária a realização de ensaios estáticos, devendo-se obedecer aos seguintes requisitos:

4. Mínima resistência última à tração: $F_s' = 1655 \text{ Mpa}$
5. Mínima tensão de escoamento: (Relaxação Baixa): $F_y' = 0,90 F_s'$
6. Mínima tensão de escoamento: (Relaxação Normal): $F_y' = 0,85 F_s'$
7. Módulo de elasticidade: $E = (200000 \pm 5\%) \text{ MPa}$

Caso contrário, todo o lote deve ser rejeitado.

Para a realização do ensaio dinâmico de fadiga, deve-se coletar uma amostra de 5 metros para cada 10 toneladas de aço, sendo o comprimento mínimo de 30 cm. O corpo de prova é então exposto a uma tensão superior a 45% de F_s' com uma variação de tensão dada em função do número de ciclos a que a amostra é submetida.

Encerrado o ensaio de fadiga, a amostra é submetida a um ensaio estático, onde a tensão de ruptura não deve ser inferior a 95% de F_s' . Caso o corpo de prova seja rejeitado em um dos testes, dois novos ensaios devem ser realizados com a mesma amostra, se obtiver novamente um resultado negativo, todo o lote de onde se obteve a amostra deve ser rejeitado.

7.7.3 Cordoalhas

As cordoalhas caracterizam-se basicamente por serem formadas de uma montagem de fios que circundam helicoidalmente um fio central em uma ou mais camadas. A ASTM A416 descreve as características de fabricação das cordoalhas empregadas em obras estaiadas. As cordoalhas que compõem os estais também devem passar por ensaios estáticos e dinâmicos. Para cada lote de 10 toneladas de aço, é necessária a realização de ensaios estáticos, devendo-se obedecer aos seguintes requisitos:

8. Mínima resistência última à tração: $F_s' = 1860 \text{ MPa}$
9. Mínima tensão de escoamento: $F_y' = 0,90 F_s'$
10. Módulo de elasticidade: $E = (197000 \pm 5\%) \text{ Mpa}$

Caso contrário, todo o lote deve ser rejeitado.

Para a realização do ensaio dinâmico de fadiga, deve-se coletar uma amostra de 5 metros para cada 10 toneladas de aço, sendo o comprimento mínimo de 100 cm.

O corpo de prova é então exposto a uma tensão superior a 45% de σ_f com uma variação de tensão dada em função do número de ciclos a que a amostra é submetida. Encerrado o ensaio de fadiga, a amostra é submetida a um ensaio estático, onde a tensão de ruptura não deve ser inferior a 95% de σ_f .

Caso o corpo de prova seja rejeitado em um dos testes, dois novos ensaios devem ser realizados com a mesma amostra, se obtiver novamente um resultado negativo, todo o lote de onde se obteve a amostra deve ser rejeitado. Atualmente, tem-se utilizado com grande frequência feixes de cordoalhas paralelas na composição dos estais.

7.7.4 Cabos

Os cabos caracterizam-se basicamente por serem formados de uma montagem de cordoalhas que circundam helicoidalmente em torno de uma cordoalha central ou outro cabo. A ASTM A603 descreve as características de fabricação dos cabos empregadas em obras estaiadas.

A principal vantagem das cordoalhas reside no fato de apresentar maior resistência à tração e maior módulo de elasticidade. Porém, os cabos são mais flexíveis, podendo realizar maiores curvaturas no topo das torres. Devidos estas características, as cordoalhas são mais utilizadas em pontes estaiadas e os cabos mais utilizados em pontes pênséis.

7.8 SISTEMA DE ANCORAGEM

A ancoragem é o dispositivo responsável por transferir as cargas dos cabos aos apoios onde esta é ancorada, seja o tabuleiro ou a torre.

As ancoragens podem ser ativas, onde se realiza a atividade de tensionamento, ou passiva, onde a ancoragem sofrerá a atividade de

tensionamento. Normalmente as ancoragens ativas estão no tabuleiro e as passivas nas torres devido a facilidade de acesso e trabalho, mas nada proíbe que a ancoragem da torre também seja ativa.

As cordoalhas são tensionadas individualmente e sua ancoragem também é individual através de cunhas de aço (dispositivo semelhante às ancoragens convencionais).

Após todas as cordoalhas terem sido ancoradas, um ajuste na tensão pode ser realizada simultaneamente em todas as cordoalhas de um estai através de uma anel de ajuste presente na parte externa do dispositivo de ancoragem. Com isso, pode-se alongar ou afrouxar simultaneamente todas as cordoalhas em uma única operação, aumentando ou aliviando a tensão no estai.

O sistema de ancoragem deve ser submetido a um ensaio visando verificar a resistência à corrosão.

7.8.1 Tubo guia:

O tubo guia é o tubo metálico existente a partir da placa de ancoragem, com a função de proteger o trecho inicial das cordoalhas, além de definir o ângulo de partida do estai.

O tubo guia deve estar em conformidade com as exigências da ASTM A53, sendo todos os ensaios descritos pela ASTM A673.

A espessura de sua parede deve ser suficiente para resistir aos esforços provocados pelo manuseio e transporte, além da pressão interna provocada eventualmente pelo seu preenchimento com grout. No entanto, esta espessura não deve ser inferior a 10mm.

7.8.2 Amortecedor

Este dispositivo tem a principal função de amenizar o efeito da fadiga, reduzindo a amplitude de oscilação das tensões atuantes nas cordoalhas devido a ação das cargas acidentais. Este sistema é posicionado no interior do tubo guia, na extremidade oposta a placa de ancoragem.

O amortecedor é composto de vários anéis de elastômeros entre chapas metálicas.

7.8.3 Desviador

Tem a principal finalidade de garantir o paralelismo entre as cordoalhas no interior do tubo guia. É um cilindro plástico posicionado junto ao amortecedor. Este recebe furos de acordo com o número de cordoalhas que compõem o estal, fazendo com que cada orifício do desviador tenha uma respectiva cordoalha na placa de ancoragem. Garantindo assim, que toda cordoalha que atravessa o desviador tenha sua ortogonalidade com a placa de ancoragem.

7.9 PROTENSÃO

A proteção dos elementos de tensionamento é de fundamental importância, pois imperfeições na superfície do aço provocam o aparecimento de pontos de concentração de tensão, que podem levar ao aparecimento de uma tensão superior à admissível.

7.9.1 Galvanização:

Proteção realizada através da imersão a quente do fio, proporcionando camadas de cobertura de zinco. Este tipo de proteção possui a vantagem de não ser danificada facilmente com o manuseio e de possuir o preço relativamente baixo se comparado aos outros tipos de proteção.

A ASTM A586 E A603 classificam esta proteção em razão da espessura da camada de revestimento, sendo classificada em A, B ou C. O processo de galvanização altera as propriedades mecânicas do aço, pois a tensão de ruptura pode apresentar uma redução em torno de 5%. No entanto, os valores de tensão última de resistência já consideram a influência da proteção dos elementos tensionados.

7.9.2 Cera

A aplicação da cera deve ser realizada completamente entre todos os fios que compõem a mesma cordoalha. Este material, além de proteger o fio, deve ser quimicamente estável e não reativo com o aço.

7.9.3 Bainha de HDPE (High Density Polyetilene)

Assegura total impermeabilidade à água. Este material não deve reagir com o grout e nem com a cera que envolve os fios, além de possuir suas características inalteradas quando exposto a elevadas temperaturas.

7.9.4 Tubo de HDPE (High Density Polyetilene)

Além de possuir as características já descritas para a bainha de HDPE, deve ser resistente a ação dos raios ultravioletas. Uma placa de HDPE com espessura de 1,0mm proporciona a mesma proteção contra os raios ultravioletas verificada em um muro de concreto de 1,8 m de espessura.

As especificações da HDPE são encontradas na ASTM D3035 e ASTM F714.

A espessura do tubo de HDPE não deve ser inferior a 1/18 de seu diâmetro externo. Um aspecto positivo deste tipo de proteção é que ele também proporciona um menor coeficiente de arrasto quando comparado ao coeficiente de arrasto equivalente ao conjunto de cordoalhas.

7.9.5 Tubo Anti-Vandalismo

Consiste de um revestimento de aço de 6 mm de espessura na base do estai, junto ao tabuleiro, com o intuito de proteger mecanicamente o estai contra danos acidentais ou intencionais.

8 ESTUDO DE CASO (PONTE NEWTON NAVARRO)

Tendo em vista a escolha do tema “Pontes estaiadas: diferenciais Construtivos e Estruturais em relação a outros tipos de pontes”, a ponte Newton Navarro será o objeto de estudo de caso para a obtenção dos dados e conclusões deste trabalho sobre os parâmetros e pesquisas apresentadas no mesmo.

8.1 A PONTE NEWTON NAVARRO

A ponte Newton Navarro, como vista na figura a seguir (Figura 38), está localizada no extremo norte da cidade de Natal, capital do estado brasileiro do Rio Grande do Norte. Ela liga os bairros da zona norte da capital potiguar e os diversos municípios do litoral norte do estado aos bairros da zona leste de Natal, e até mesmo servindo de rota para os bairros e praias da zona sul da capital, além de diversas outras regiões da cidade passando pelo rio Potengi.

Figura 38 – Ponte Newton Navarro, Natal, Rio Grande do Norte (Brasil)



Fonte: Oliveira, M. (2013).

Situada na cidade do Natal, a estrutura liga as margens do Rio Potengi, onde se esvazia no oceano atlântico. A ponte foi inaugurada para a utilização no mês de dezembro do ano de 2007, no então governo da gestão de Wilma de Faria. A ponte recebeu o jargão de Ponte de todos, que seria assim conhecida em todo o Brasil. Seu nome – Newton Navarro – foi em homenagem a um ilustre artista potiguar que se destacou pela pintura e música, mas também como grande escritor.

A nova estrutura permitiu uma importante capacidade para aquela nova via: a expansão da área urbana em direção ao litoral norte, através do Rio Potengi, com consequências positivas para o desenvolvimento da economia de toda a população das novas áreas abrangidas pela nova edificação, sendo assim áreas de forte valor cultural para o estado, além de possuir forte poder turístico (Figura 39).

Figura 39 – Vista da Ponte Newton Navarro, Natal, Rio Grande do Norte (Brasil)



Fonte: Ponte... (2013).

A existência de um porto urbano na foz do Rio Potengi foi de fundamental importância para o dimensionamento da estrutura, com isso, a nova ponte exigiu uma altura de plataforma compatível com o trânsito de grandes navios e, em particular, da frota de navios que fazem a importante rota entre Natal e Fernando de Noronha.

A necessidade de um novo cruzamento que conectou diretamente a cidade de Natal com a comunidade da Redinha foi uma carência sentida por mais de uma década, porém, somente em 2004 o projeto poderia ser concretizado e que seria completado em pouco mais de quatro anos. A ponte principal, estacionada por cabos, tem uma extensão de comprimento de 212 metros e mais duas abordagens de aproximadamente 94 metros de extensão, dando um comprimento total de 400 metros, aproximadamente. O seu deck percorre o Rio Potengi a uma altura considerável de 58 metros, capacitando, assim, a passagem de grandes embarcações. Ainda, possui duas pistas de estradas, bem como duas pistas de emergência e duas calçadas. A ponte tem ainda, 24 metros de largura principal. Um esboço da sua construção é visto na figura a seguir (Figura 40).

Figura 40 – Execução das obras na Ponte Newton Navarro



Fonte: Ponte... (2014).

8.2 ARQUITETURA

A ponte Newton Navarro tem uma estrutura mista em concreto armado e concreto protendido possuindo como uma das características particulares uma esbeltez de estrutura bastante elevada. A morfologia da ponte segue os critérios de

simetria estrutural, sempre buscando certo equilíbrio formal coerente entre as massas estruturais dos elementos que se elevam acima dos níveis da rua e que lhe permitem o sistema de suspensão e outros sistemas que garantem o sistema de suporte principal da ponte.

O convés da ponte é formado por um par de vigas laterais, uma série de travessas e uma laje maciça de concreto. Os seus pilares e torres, de cerca da mesma altura, estão conectados ao nível do convés por uma grande travessa que endurece o sistema transversal. Desta forma, a ponte possui a estrutura característica com o formato parecido ao “H”. O conjunto estrutural é formado pelos seus principais elementos: os pilares, feixes, torres e vigas, e são organizados em torno de um par de planos paralelos que trazem visivelmente as características de equilíbrio e simetria da estrutura (Figura 41).

Figura 41 – Arquitetura moderna da Ponte Newton Navarro



Fonte: Cardoso (2015).

A imagem que a Ponte Newton Navarro transporta para os seus observadores é de duas grandes velas transparentes que, a partir das quais, a conexão rodoviária é automaticamente suspensa. Os viadutos de aproximação possuem o sistema inteiramente ligado ao de cais emparelhados da ponte principal.

A profundidade de seus feixes de convés é da mesma ordem de grandeza que a do deck suspenso. Sua altura de torres é de 107 metros acima do nível do mar, o que torna a ponte uma estrutura bastante alta, como uma das principais pontes urbanas do Brasil na atualidade.

8.3 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

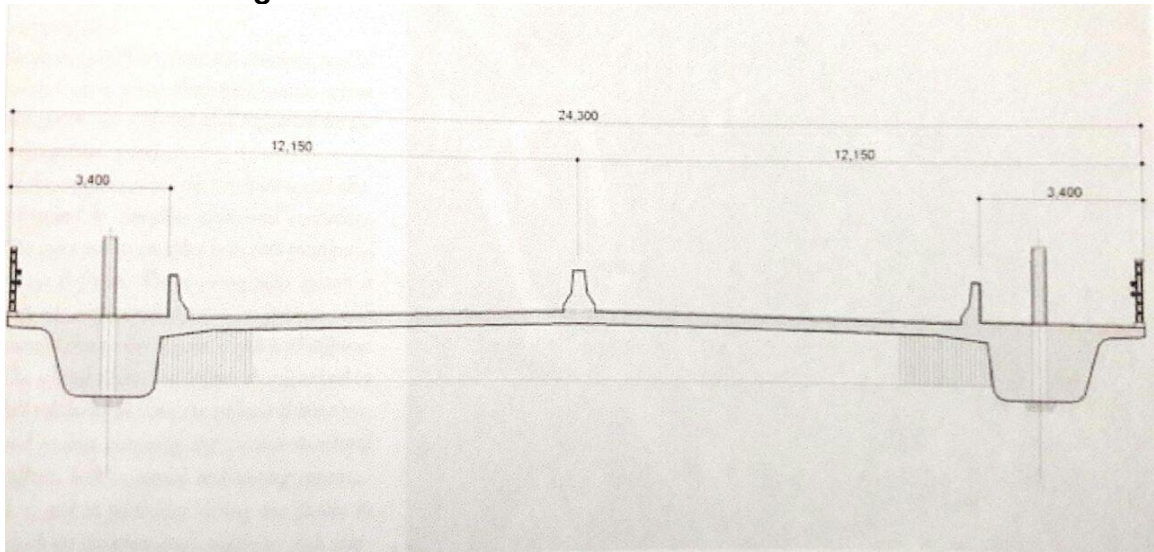
A estrutura principal da ponte é então identificada por dois planos verticais paralelos entre si, em que nos mesmos estão localizados os principais elementos estruturais da edificação: bases, pilares, torres, estradas e principais feixes do convés. O seu pavimento é solidamente unido aos elementos verticais pelos quais é suportado e a partir do qual está suspenso: são os eixos do cais e os pilares, sendo, portanto, contínuos com os dois cais de amarração. Segue, a seguir, a figura (figura 42), representando a visão sob a vista de um pedestre, a figura (Figura 43) mostrando um corte transversal do convés da ponte e a figura (Figura 44) com construção do pavimento da ponte, onde foi empregada a instalação desenvolvida com balanços progressivos. A construção monolítica entre pilares e torres deu rigidez ao sistema estrutural durante a fase de construção.

Figura 42 – Vista da Ponte sob a visão de um pedestre



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

Figura 43 – Corte transversal do convés da Ponte



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

Figura 44 – Construção da Ponte com balanços sucessivos



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

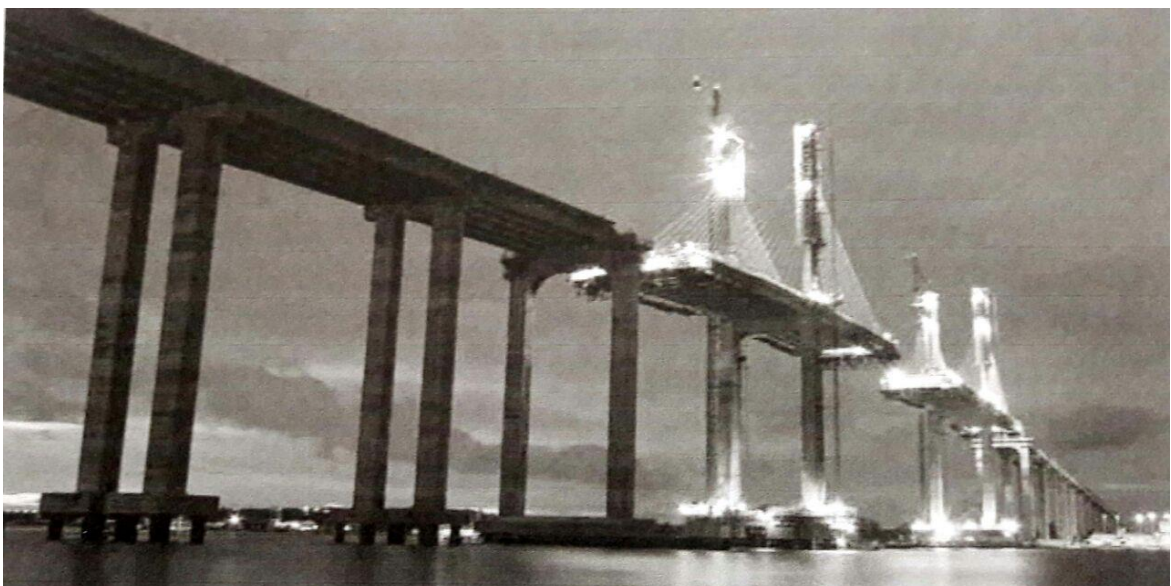
Nas figuras a seguir (Figura 45 e figura 46), pode-se observar a parte final da construção do convés da edificação. Na outra ilustração (Figura 47), vê-se a construção do segmento da torre para o convés. Sua colocação foi concebida graças à aplicação do pré-esforço ao convés e às embarcações.

Figura 45 – Construção da Ponte Newton Navarro



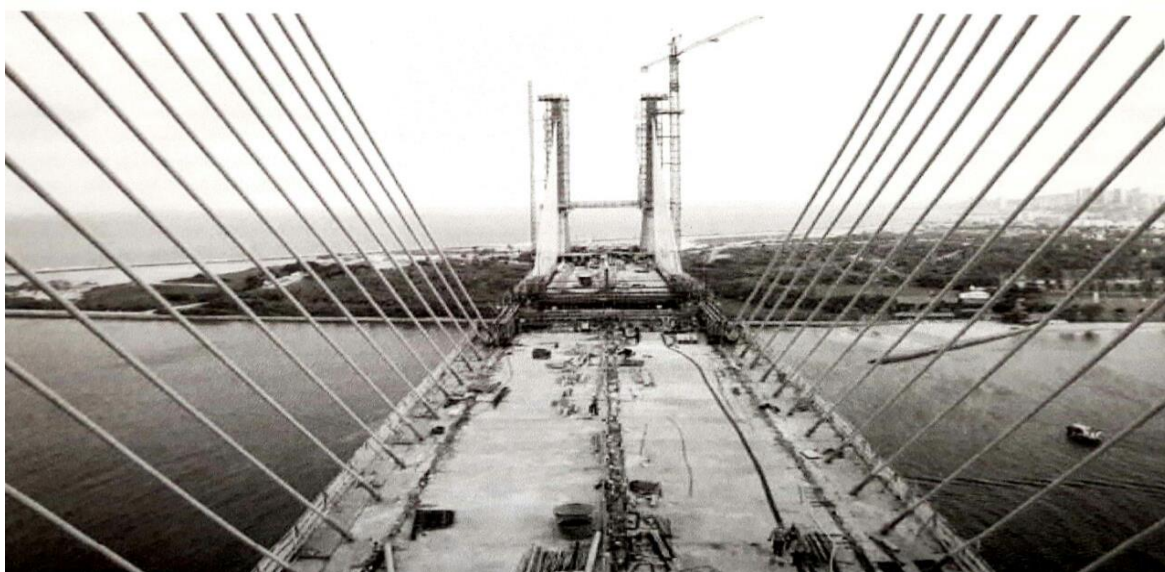
Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

Figura 46 – Construção por balanços sucessivos



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

Figura 47 – Construção do segmento da torre



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

As estruturas com mais de cem metros devem ser muito estáveis, como previsto em projeto. Isso evitaria o uso de juntas móveis entre o convés e os cais da ponte, o que implicaria em problemas de engenharia e sistemas de inspeção e manutenção. Deve-se notar que o esquema realizado na construção da ponte foi possibilitado pela grande altura do convés, o que forneceu a flexibilidade longitudinal necessária para os cais, permitindo-lhes levar os estresses induzidos pelas variações de temperatura e pelo encolhimento e retração do concreto. Além disso, é importante que a grande altura da ponte seja necessária, ou de qualquer forma, muito adequada à rigidez estrutural fornecida pela junção fixa longitudinal e transversal entre a torre e os pilares. Apesar disso, o esquema adotado já havia sido usado com sucesso em uma ponte estaiada com 200 metros de extensão e altura de 23 metros acima da água, construída na cidade de Aracaju. Neste caso, os pilares, para terem a capacidade de rigidez e flexão ideal, foram construídos com um esquema de lâmina dupla.

8.4 ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO

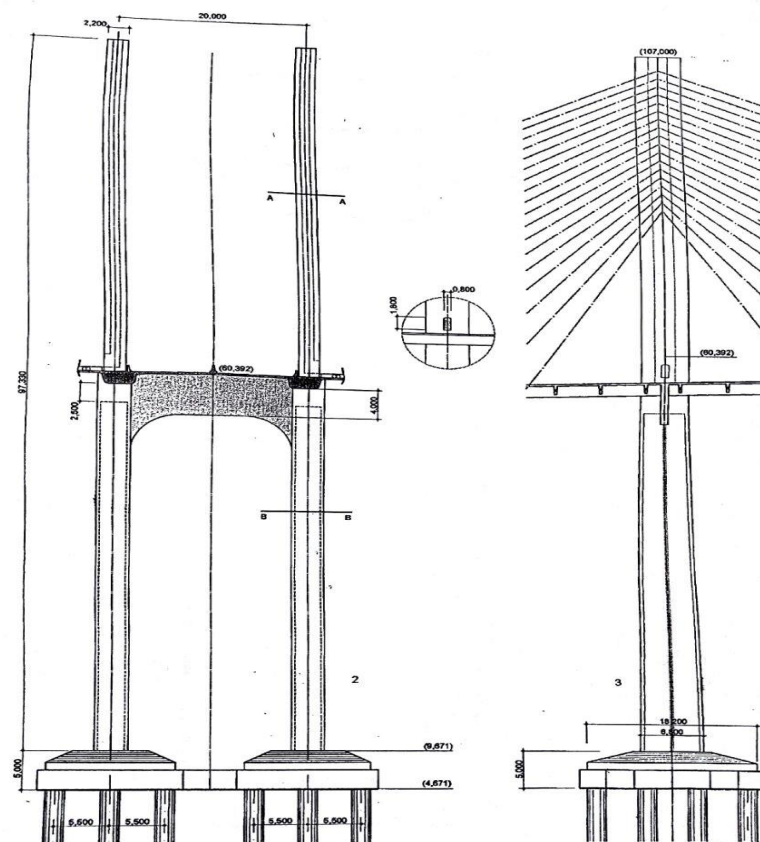
As fundações da ponte foram construídas com bases de profundidades variáveis. Eles carregam pilhas de concreto derramadas em tubos de aço de 1,80 metros de diâmetro e 45 metros de comprimento. O solo é predominantemente granulado. Os poços consistem em caias de seção de concreto armado. Os pilares principais possuem seção de caixa dupla, com cantos de formato arredondados. Cada par de pilares está conectado por uma travessa de parede cheia, equipada com recheios arredondados nas extremidades. Para isso, um esforço prévio longitudinal foi aplicado durante as diferentes fases de execução da obra. Os cais de amarração são de caixa única e estão verticalmente protendidos.

Os pilares são de formatos prismáticos, vazios e relativamente esbeltos no plano transversal. Sua seção é formada pelo desenvolvimento de um retângulo na direção longitudinal, com os dois lados principais formando uma superfície de caráter convexo. A seção foi fortemente reforçada verticalmente. A zona de espera de ancoragem está protendida transversalmente. O convés compreende um par de vigas longitudinais, espaçadas a 20 metros de distância, coplanares com os pilares, torres e estais com uma seção trapezoidal completa. Este tipo de seção de convés foi adotado no projeto da ponte sobre o Rio Guamá, no estado do Pará em 2002. A ponte se mostrou estruturalmente eficiente e prática na construção por vários motivos, entre os quais a ausência de formas internas para a estruturação das vigas, com isso, poupando os gastos com formas. Além disso, as bordas arredondadas dos pilares englobam algumas vantagens tanto formais como de engenharia. Na realidade, eles evitam as concentrações de tensão térmica nas zonas de borda, mas também melhoraram as características aerodinâmicas do convés e concedem uma forma menos rígida e mais natural, aproveitando a oportunidade de construção de concreto em que a forma seja mais facilmente modelada.

As vigas longitudinais são conectadas por uma série de vigas transversais que sustentam a laje e são protendidas com pares de cabos parabólicos. As vigas longitudinais foram submetidas à pré-tensão por um sistema de cabos longitudinais previstos para as fases de construção e por uma série de cabos longitudinais instalados em partes antes e após o fechamento na coroa.

Os estais são formados por alianças paralelas de 15,7 milímetros de diâmetro. Estes, galvanizados e protegidos individualmente por camadas de plásticos, onde também são protegidos por fora por tubos de HDPE com uma superfície rugosa por elevação helicoidal. As ancoras no convés estão espaçadas a cinco metros de distância, correspondendo ao comprimento do segmento. Os fios no convés são alojados em tubos de aço e a carga é transferida de forma muito direta e simples às bancadas com uma estrutura cheia, forte e rígida. As principais forças que equilibram as cargas verticais através dos triângulos de forças formados pelas trações nas estações e pelas compressões dos pilares e das vigas do convés são pelas razões expostas acima, todas contidas no mesmo plano. E são essas igualdades dos níveis das forças principais que evitam a necessidade de grandes cortes transversais superiores entre os pilares. A elevação e seção vertical do pilar podem ser mostradas na figura (Figura 48) a seguir.

Figura 48 – Elevação e seção vertical do pilar



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

8.5 AERODINÂMICA DA ESTRUTURA

Na zona da ponte, existem ventos com frequência de 15 a 18 nós que sopram frequentemente ao nível do mar, vindo da região sudeste, por cerca de 180 dias ao ano. As velocidades no nível da laje da ponte e nas torres são sensivelmente maiores, assim como são as velocidades do projeto de vento, algo em torno de 45 metros por segundo. A direção do vento predominante corresponde substancialmente ao alinhamento longitudinal da ponte e a ausência de vigas transversais nos topos dos pilares e evita uma carga horizontal significativa em grande altura, quase que permanente. Em qualquer caso, a atenção do designer também foi transformada, em profundidade, para as forças transversais de seção no convés. O designer pode abranger boas características de aerodinâmica à forma da seção, através da escolha de seções trapezoidais com asas e carenagens curvas. A estabilidade aerodinâmica foi então verificada durante o serviço e construção, utilizando métodos teóricos: análises de “buffeting e flutter”, usando as características aerodinâmicas das seções de tipo análogo, estudadas em experimentos aerodinâmicos anteriormente.

Os resultados dessas análises foram então verificados através de uma série de testes, desenvolvidos pela LSE – Laboratório de Sistemas estruturais no túnel de vento IPT, em São Paulo, com testes em modelos seccionais aerossóis, para vários ângulos de incidência e diversos graus de amortecimento. Essas verificações confirmaram o pressuposto no projeto, trazendo a sensata influência das barreiras rodoviárias e parapeitos no comportamento aerodinâmico durante o serviço. Verificações semelhantes também foram realizadas nos pilares.

8.6 DESIGNER

O projeto da ponte previa uma série de análises estáticas, dinâmicas e verificações de estados limites de serviço, juntamente com as únicas verificações previstas pelo código brasileiro. As análises estáticas exigiram o passo-a-passo da construção considerando diversos fatores de influência em conformidade com as recomendações do CEB-FIP. A não linearidade dos materiais e os efeitos geométricos de segunda ordem também foram considerados, tanto para a análise do

comportamento de flexão no convés como, mais especialmente, para a análise da estabilidade dos pilares e da estabilidade durante a sua construção.

Considerou-se, em particular, a ação da turbulência do vento e da variabilidade do vento em resposta às imperfeições do projeto inicial. Para as verificações do estado de limite de serviço, entre outras considerações particularmente determinantes e importantes, foi utilizada a do “cracking”. Isto consistiu em garantir o estado limite de descompressão para combinações das cargas quase permanentes e de rachadura por combinações frequentes, em que 80% as cargas móveis foram consideradas. Além disso, as larguras das fissuras foram limitadas pela combinação rara com toda a carga móvel assumida.

8.7 CONSTRUÇÃO

A construção das bases e fundações seguiram fases relativamente típicas: construção das bases, restrição nas cabeças de pilha e na criação de planos de trabalho, construção de formas e instalação de reforços, concretagem das grandes bases, sendo empregados os trabalhadores nos próprios assentos das fundações. Os principais pilares foram construídos com formas deslizantes, uma prática bastante consolidada no Brasil naquela época. Os pilares foram construídos com formas deslizantes e formas escaldas na parte superior. Uma estrutura metálica especial foi prevista na parte superior dos pilares e, em seguida, embutida na sua parte esquerda, para garantir a geometria correta das formas do tubo, que guiam as fixações dos cabos permanentes. Os segmentos do convés sob os pilares, chamados de segmentos de cais, foram derramados com o auxílio de formas e estruturas em voladouros, limitadas às cúpulas e às travessas. Os suportes utilizados para apoiar essas estruturas permanecem nessa fase da construção.

Os segmentos do convés foram encontrados usando quatro pares de vigas de cavaletes auto-lançantes em sobrecarga com a cofragem inferior suspensa. A verticalidade das torres e pilares juntamente com a ausência de travessas superiores, certamente simplificou ou tornou menos complicada a construção de cais e pilares de grade altura e com tolerância de construção próxima. A forma plana do sistema viga/pilar/torre certamente tornou menos oneroso posicionar as formas de

tubulação no convés e nas torres e, sobretudo, minimizou os inevitáveis erros de posicionamento geométrico (Figura 49 a seguir). De fato, acredita-se que foi um dos principais critérios do projeto adotados na ponte Newton Navarro, que, quando o projeto pode simplificar os processos de construção, é alcançada uma melhoria importante na qualidade do resultado final, na segurança do trabalho e na economia da construção. O ciclo típico de construção do convés incluiu inúmeras fases para cada segmento:

1. Avanço e ajuste do sistema de vazamento;
2. Colocação do aço, das bainhas, as âncoras e os cabos;
3. Colocação das formas de tubulação;
4. Derrama de equipamento;
5. Pré-tensão longitudinal e transversal;
6. Instalação das estadias e suas tensões;

Figura 49 – Construção da Ponte Newton Navarro



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

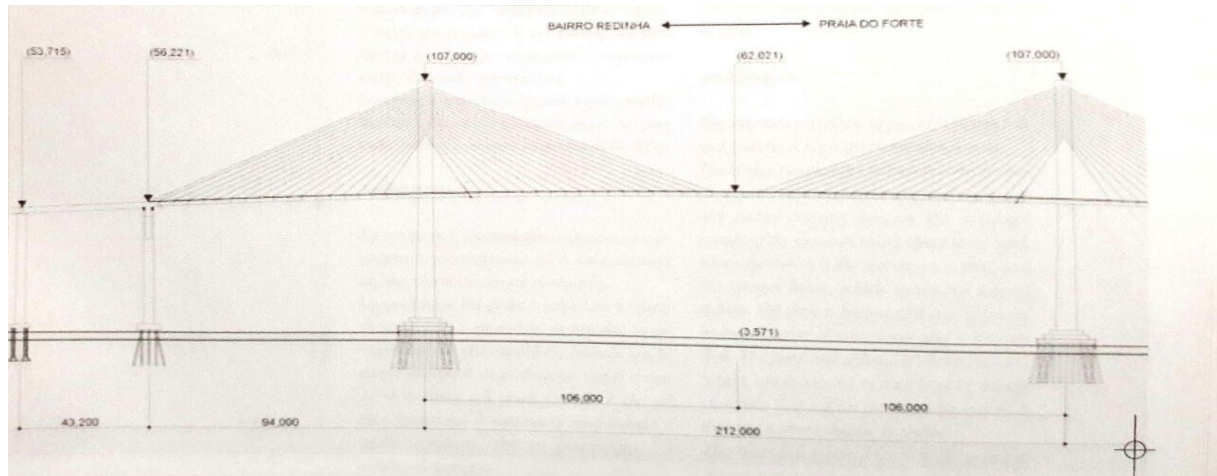
O sequenciamento e a interação dessas fases, diferentemente das outras diversas subfases, são elementos chave para os rápidos e diversos progressos da construção. Um estudo cuidadoso aliado a uma fonte segura de interação com o

local de trabalho refinou e aprimorou essas sequencias, permitindo um resultado bastante satisfatório ao criar, em pleno funcionamento, um segmento com uma superfície de 120 metros quadrados por semana. Um estudo analítico detalhado das fases de construção foi feito para determinar as posições das formas e as tensões a serem aplicadas aos estais em todas as fases de esquemas. Esta engenharia de construção não foi implementada por um esquema rígido e estático, mas sim por um processo flexível e dinâmico.

Na realidade, o trabalho de construção real, sempre diferente em algum grau do que anteriormente foi feito no primeiro passo, envolveu naturalmente a necessidade de adaptações contínuas por em virtude das tolerâncias ineficientes nas operações de jarda: medições, posicionamento e aplicação de forças, e em virtude das várias condições ambientais (vento e temperatura) e de melhorias nos ciclos de produção propostos em várias vezes pelo local de trabalho. A construção do convés, portanto, avançou em quatro frentes paralelas, atingindo primeiro os pilares de amarração e efetuando o fechamento das juntas laterais, e depois efetuando o fechamento na coroa, juntando dois grandes “cantilevers” cada um com 105 metros de comprimento.

O fechamento da coroa foi precedido pela aplicação por macacos colocados na articulação central de uma força longitudinal, capaz de contrair as tensões em longo prazo induzidas por influência e encolhimento. Esta força, apesar de ter sido sensivelmente atenuada pelo rastejo do concreto, agiu de uma forma eficaz na redução de estresse em longo prazo, mantendo um estado de compressão para carga frequente em todos os elementos estruturais e ao obter em tempo infinito a geometria do projeto e a configuração vertical dos pilares. A figura (Figura 50) a seguir, mostra a Ponte Newton Navarro em sua extensão em projeto, vislumbrando as suas dimensões.

Figura 50 – Dimensões da ponte Newton Navarro



Fonte: Miranda. Mario de, (2009)

9 CONCLUSÕES

Tendo em vista todos os dados apresentados no decorrer deste trabalho, pode-se notar os grandes valores apresentados pelas pontes estaiadas no atual cenário da construção civil no Brasil e em todo o mundo. De fato, as estruturas estaiadas são os modelos de pontes com demanda muito grande no momento. Portanto, levando em consideração o seu amplo uso, conclui-se que os recentes avanços tecnológicos na construção civil potencializaram a sua usualidade em inúmeros países. De modo geral, observa-se que as pontes estaiadas são estruturas que possibilitam a elaboração de um projeto que integraliza de maneira eficiente elementos que proporcionam a criação de uma ponte com estrutura integral, duradoura, estaticamente eficiente e que atende de maneira perfeita as exigências a qual foi requerida.

Assim, vê-se que as pontes estaiadas possibilitam uma economia significativa nos gastos em relação a outros tipos de pontes, onde prevalecerá a inexistência de formas, menor quantidade de pilares e a inexistência de escoramento, pois a sua construção é feita com a técnica de balanços sucessivos, aumentando ao máximo a economia com formas e escoras. Conclui-se também que as pontes estaiadas necessitam de um tempo menor para a execução das obras, com maior rapidez na execução, aumentando a produtividade e diminuindo ainda mais o orçamento da obra, e ainda, graças aos estais característicos dessas pontes, o aumento dos vãos e a menor quantidade de pilares. No campo arquitetônico, vê-se que as pontes estaiadas proporcionam um embelezamento particular ao local onde foram instaladas, remanejando um maior atrativo turístico e econômico para a região.

Sendo assim, disposto das informações abrangidas no decorrer do trabalho, sabe-se do grande potencial construtivo das pontes estaiadas. A ponte Newton Navarro se mostra eficiente nos seus princípios de projeto e tem a sua finalidade alcançada com êxito. No mais, a mesma teve uma economia significativa com o desuso de formas e escoras, teve também uma economia significativa com o ganho de vão, diminuindo a quantidade de pilares no decorrer do seu tabuleiro, teve uma maior velocidade de obra, graças ao uso da técnica de balanços sucessivos (sendo

a mesma, uma forma de execução bastante usual para este tipo de ponte que envolve um processo de execução consistente e de enorme rentabilidade e agilidade), que acelerou de forma significativa o processo de execução da obra, dando ainda maior produtividade para as distintas etapas da ponte. A ponte Newton Navarro se diferencia ainda como um grande atrativo turístico para a cidade do Natal, estabelecendo um novo parâmetro de acessibilidade para o litoral da cidade e aumentando de forma significativa o turismo na região.

Não foram realizadas as construções das defensas para a maior segurança da ponte e embarcações que têm rotas que passam sob a ponte, sendo assim uma das maiores carências de sua execução. A ponte não possui um plano de manutenções bem realizado, onde o tempo mínimo para a realização de averiguações de danos é de cinco anos. No entanto, a ponte Newton Navarro não apresenta a realização de manutenções eficientes, conforme as normas sugerem, desde a sua inauguração.

De maneira geral, pode-se dizer que os resultados obtidos através do estudo das pontes estaiadas são satisfatórios, considerando que as mesmas promovem um diferencial construtivo e estrutural particular para essas estruturas que dão as mesmas enormes vantagens em relação a outros tipos de pontes.

REFERÊNCIAS

A BELEZA DAS PONTES. **Papo de arquitetas**, jun. 2013. Disponível em: <<http://papodearquitetas.blogspot.com.br/2013/06/a-beleza-das-pontes.html>>.

Acesso em: 24 jul. 2018.

A MAIOR PONTE ESTAIADA DO BRASIL: ponte Newton Navarro. **Professor Jota Bê**: ciências da religião, teologia, filosofia, educação e Artigos, 2007. Disponível em: <https://joaobosco.wordpress.com/2007/11/30/a-maior-ponte-estaiada-do-brasil-ponte-newton-navarro/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

A PONTE DE NITERÓI, Ponte Presidente Costa E Silva, sobre a baía de Guanabara, no estado brasileiro do Rio de Janeiro. Ela conecta a cidade do Rio de Janeiro com a cidade vizinha de Niterói, no Brasil. **Alamy**, 2016a. Disponível em: <<https://www.alamy.com/stock-photo-the-niteroi-bridge-ponte-presidente-costa-e-silva-about-the-guanabara-123225751.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

A PONTE VERMELHA QUE NÃO É EM SÃO FRANCISCO. **ITChannel**, 2016b. Disponível em: <<http://www.itchannel.pt/news/negocios/a-ponte-vermelha-que-nao-e-em-sao-francisco>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

AECWEB (BRASIL). **Ponte estaiada é indicada para vencer grandes vãos**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/ponte-estaiada-e-indicada-para-vencer-grandes-vaos_11725_0_1> Acesso em: 02 de novembro de 2017.

AS DEZ MELHORES PONTES DE NOVA YORK. **Adoro Nova York**, 2012. Disponível em: <<http://adoro-novayork.blogspot.com.br/2012/05/as-dez-melhores-pontes-de-nova-york.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

BARBOSA, José Campos. **Tipos de pontes**. Disponível em: <<http://www.engenhariapt.com/2013/04/12/tipos-de-pontes/>> Acesso em: 21 de setembro de 2017.

BASTOS, Vinícius Lopes et al. **Desenvolvimento das pontes estaiadas**. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos/trab_23.pdf> Acesso em: 2 nov. 2017.

GE Basics - A Spotter's Guide to Bridge Design: Bridge Basic. Bridge Basic. 2008. Disponível em: <<http://pghbridges.com/basics.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

CAMBUNDO, António Martin. Estaiadas com Tabuleiro de Concreto. **Ebah**, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAg13kAK/renato-claudio-tipologia-das-pontes-estaiadas-com-tabuleiro-concreto?part=2>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

CARDOSO, Roberto. Navarro: um ícone natalense, em todas as direções. **Substantivo plural**, 2015. Disponível em: <http://www.substantivoplural.com.br/navarro-um-icone-natalense-em-todas-direcoes/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

CASTRO NEVES CONSTRUTORA. Viaduto de Millau, a ponte estaiada que vai te surpreender. Disponível em: <<http://www.castronevesconstrutora.com.br/noticias.php?cod=510&tit=viaduto-de-millau-a-ponte-estaiada-que-vai-te-surpreender>>. Acesso em: 21 set. 2017.

CLÁUDIO, Renato Gadêlha. **Tipologia das pontes estaiadas com tabuleiro de concreto**. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2010/Renato_Claudio_Tipologia%20das%20Pontes%20Estaiadas%20com%20Tabuleiro%20de%20Concreto.pdf> Acesso em: 2 nov. 2017.

COSTA, Felipe Francisco. **4 tipos de estruturas de pontes que todo engenheiro deve saber**. Disponível em: <<http://awacomercial.com.br/blog/tipos-estruturas-de-pontes/>> Acesso em: 21 set. 2017.

DEBS, Mounir Khalil El (Org.). Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

DNIT. **Projeto executivo de engenharia para obras especiais**. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/anexo/Projetos/Projetos_edital0138_10-23_2.pdf> Acesso em: 23 out. 2017.

ECIVILNET (BRASIL). **Ponte estaiada**. <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-ponte-estaiada.html>> Acesso em: 26 de setembro de 2017.

ECOPONTES. Pontes Mistas. Disponível em: <http://www.ecopontes.com.br/produtos-ver/pontes-mistas-ecomix/16/?gclid=EAlaIqObChMI_a2wzpLN1wIVFQSRCh2WgwNmEAAYASAAEgIErFD_BwE>. Acesso em: 25 out. 2017.

ENGENHARIACIVIL.COM. **Mesoestrutura de um ponte**. Disponível em: <<https://www.engenhariacivil.com/dicionario/mesoestrutura-de-uma-ponte>>. Acesso em: 26 set. 2017.

ESTRUTURAS ESTAIADAS. **Pet**: Engenharia Civil UEM, 2016. Disponível em: <https://petciviluem.com/2016/07/31/estruturas-estaiadas>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

FIGURA 1: subdivisão genérica de uma estrutura de ponte. **Researchgate**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/280082305_fig1_Figura-1-Subdivisao-Generica-de-uma-Estrutura-de-Ponte>. Acesso em: 24 jul. 2018.

GRIGOREV, Vladimir. **Viaduto de aço da ponte de viga na autoestrada que cruza a cidade de Madeiras**. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-viaduto-de-a%C3%A7o-da-ponte-de-viga-na-autoestrada-que-cruza-madeiras-dia-t-image78416397>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

GOMES, Diego. Estruturas e Sistemas Construtivos: ponte estaiada da Normândia. **Digomes**, 2010. Disponível em: <https://digomes.wordpress.com/2010/page/2/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

GOMES, Lucila Motta. **Ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira**. 2010. Disponível em: <<http://www.isiengenharia.com.br/wordpress/espaco-do-engenheiro/ponte-estaiada-octavio-frias-de-oliveira>>. Acesso em: 22 set. 2017.

GOMES, Renan Ribeiro Setubal. **Programa de projeto de estruturas de pontes estaiadas**. 2013. Disponível em: <<http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli610.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2017.

LEONHARDT, F.. **Construções de concreto**: Princípios básico da construção de pontes de concreto. 6. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.

LINHA 4: Ponte Estaiada da Barra passa por testes de iluminação. G1 Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2016/05/linha-4-ponte-estaiada-da-barra-passa-por-testes-de-iluminacao.html>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

MASON, Jayme. **Pontes em concreto armado e protendido**. São Paulo: S.a., 1977. 305 p.

MIRANDA, Mario de. **Ponte Strallato in Brasile**. Natal: Realizzazioni, 2009. 57 p. (1).

MASON, Jayme. **Pontes em concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro: AS, 1978.

NAKAMURA, Juliana. **Estruturas estaiadas. Infraestrutura Urbana: projetos, custos e construção**, 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/10/estruturas-estaiadas-aplicacoes-indicadas-tipos-de-ancoragem-e-de-243545-1.aspx>>. Acesso em: 21 set. 2017.

NAKAMURA, Juliana. Pontes por balanço sucessivo. **Infraestrutura Urbana: projetos, custos e construção**, 2012. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/21/pontes-por-balanco-sucessivo-tecnica-e-indicada-para-vencer-273265-1.aspx>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

OLIVEIRA, Eliseu. Construção da ponte estaiada de 1,8 km de extensão sobre o rio Piauí está em fase final. **Eliseu Oliveira Representações**, 29 nov. 2012. Disponível em: <<http://eliseuaoliveirarepresentacoes.blogspot.com.br/2012/11/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

OLIVEIRA, Eliseu. Ponte sobre o rio Piauí. Disponível em: <<http://eliseuaoliveirarepresentacoes.blogspot.com.br/2012/11/>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

OLIVEIRA, Rodolfo. **Recuperação da ponte Moju Cidade avança com içamento das últimas vigas: Ponte Moju**. 2015. Disponível em: <<https://fotospublicas.com/recuperacao-da-ponte-moju-cidade-avanca-com-icamento-das-ultimas-vigas/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

OLIVEIRA, Maurício. Meus ângulos favoritos da Ponte Newton Navarro em Natal. **Viagens Possíveis**, 2013. Disponível em: <<http://www.viagenspossiveis.com.br/ponte-newton-navarro-em-natal/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PFEIL, Walter. **Pontes em concreto armado**. São Paulo: S.a., 1979. 433 p.
 PONTE DE SÃO JOÃO. **MapioNet**. Disponível em: <<http://mapio.net/o/2989737/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PONTE NEWTON NAVARRO. **Wikiwand**, 2014. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/pt/Ponte_Newton_Navarro>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PONTE NEWTON NAVARRO: grandiosa, imponente e uma vista lindíssima. **Praias de Natal**. Disponível em: <<http://www.praiasdenatal.com.br/ponte-newton-navarro/>>. Acesso em: 24 jul. 2018a.

PONTE PEDONAL SOBRE O ESTEIRO DE S. PEDRO. **Afaconsult**. Disponível em: <<http://www.afaconsult.com/portfolio/125511/92/ponte-pedonal-sobre-o-estiro-de-s-pedro>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

PONTE ROMANA DE VILA FORMOSA. **Origens.pt**, 2012a. Disponível em: <<http://www.origens.pt/explorar/doc.php?id=473>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PONTE SUSPENSA É ABERTA PARA VEÍCULOS NA CHINA. **UOL Notícias**, 2012b. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/album/2012/04/04/ponte-na-china.htm?mobile>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PONTES EM AÇO. **Lemes e Ribas, Engenharia e Arquitetura**, 2008. Disponível em: <<http://lemeribas.blogspot.com.br/2008/04/as-estruturas-em-arco-permitem-o.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PONTES PRÉ-MOLDADAS. **Lajes Patagônia**. Disponível em: <<http://lajespatagonia.com/v1/pontes-pre-moldadas-em-concreto>>. Acesso em: 24 jul. 2018b.

PORTAL METÁLICA. **Ponte de Millau**. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/ponte-de-millau-a-construcao-da-maior-ponte-estaiada-do-mundo>> Acesso em: 21 de setembro de 2017.

PRANDI, Jair. A ponte em arco mais alta do mundo. **Gigantes do mundo**, 2012a. Disponível em: <gigantesdomundo.org>. Disponível em: <<http://gigantesdomundo.blogspot.com.br/2012/04/ponte-em-arco-mais-alta-do>>

mundo.html>. Acesso em: 29 out. 2017.

PRANDI, Jair. As 10 maiores pontes suspensas do mundo. **Gigantes do mundo**, 2011. Disponível em: <<https://gigantesdomundo.blogspot.com.br/2011/10/as-10-maiores-pontes-suspensas-do-mundo.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PRANDI, Jair. O que fazer em São Paulo: 33 pontos turísticos da maior cidade brasileira. **Viagens e caminhos**, 2012d. Disponível em: <<http://www.viagensecaminhos.com/2012/10/ponte-estaiada-sao-paulo.htm>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PRANDI, Jair. Ponte para o céu – Malásia. **Mega Engenharia**, 2012b. Disponível em: <<https://megaengenharia.blogspot.com/2012/04/ponte-para-o-ceu-malasia.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

PRANDI, Jair. Ponte para o céu – Malásia. **Mega Engenharia**, 2012c. Disponível em: <<https://megaengenharia.blogspot.com/2012/04/ponte-para-o-ceu-malasia.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

ROCHA, Ana Paula. Obra da primeira ponte sobre o Rio Madeira entra em fase de conclusão. **Pini Web**, 2013. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/infra-estrutura/obra-da-primeira-ponte-sobre-o-rio-madeira-entra-em-280542-1.aspx>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

SOBRAL, Samanta. Conexão Itália - Museu cívico Castelvechio. **Conexão Cultural**, 19 mar. 2012. Disponível em: <<http://www.conexaocultural.org/blog/2012/03/conexao-italia-museu-civico-de-castelvechio/>>. Acesso em: 29 out. 2017.

TECNOLOGIA É. **Os tipos de pontes existentes e como funcionam**. Disponível em: <<https://www.tecnologiae.com.br/conheca-alguns-tipos-pontes-existentis-como-funcionam/>> Acesso em: 2 out. 2017.

TIPOS DE PONTES. **Engenharia Portugal**, 2013. Disponível em: <<http://www.engenhariapt.com/2013/04/12/tipos-de-pontes/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

VEJA FOTOS DA PONTE NEWTON NAVARRO, EM NATAL. G1 Rio Grande do

Norte, 24 dez. 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/fotos/2012/12/veja-fotos-da-ponte-newton-navarro-em-natal.html>>. Acesso em: 21 set. 2017.

VIADUTO DE MILLAU, A PONTE ESTAIADA QUE VAI TE SURPREENDER. **Castro Neves Construtora**, 2016. Disponível em: <http://www.castronevesconstrutora.com.br/noticias.php?cod=510&tit=viaduto-de-millau-a-ponte-estaiada-que-vai-te-surpreender>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

WALTHER, Rene. **Cable-stayed Bridges**. Lincoln: Thomas Telford Ltd, 1988.