



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Wesley Coelho Torres

CONCEPÇÃO DE PONTE ESTAIADA PARA O LAGO DE PALMAS - TO

PALMAS – TO

2018

Wesley Coelho Torres

CONCEPÇÃO DE PONTE ESTAIADA PARA O LAGO DE PALMAS - TO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) I elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. MSc. Daniel Iglesias de Carvalho

PALMAS – TO

2018

Wesley Coelho Torres

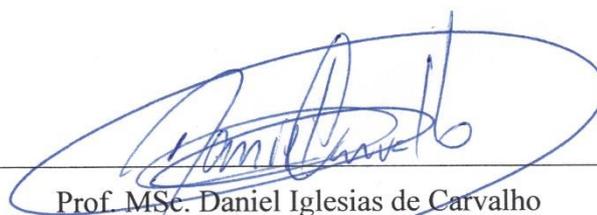
CONCEPÇÃO DE PONTE ESTAIADA PARA O LAGO DE PALMAS - TO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) I elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. MSc. Daniel Iglesias de Carvalho

Aprovado em: 04 / 05 / 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. MSc. Daniel Iglesias de Carvalho

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof.a Dra. Elizabeth Hernández Zubeldia

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2018

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ponte Juscelino Kubitschek	11
Figura 2: Ponte Octávio Frias de Oliveira	12
Figura 3: Ponte dos Imigrantes Nordeste	13
Figura 4: Principais elementos	14
Figura 5: Configuração das estais com a torre	15
Figura 6: Configurações de estais.....	16
Figura 7: Configuração Transversal dos tirantes	17
Figura 8: Suspensão lateral: esforços transversais	18
Figura 9: Tipos de seções utilizando suspensão central	22
Figura 10: Tipos de seções utilizando suspensão lateral	23
Figura 11 - Torres em formatos (a) A, (b) Y invertido e (d) diamante	25
Figura 12 - Torres com pórtico transversal	26
Figura 13 - Imagem aérea do Lago de Palmas - TO.....	28
Figura 14 - Comprimento do vão de compensação	29
Figura 15 - Altura da torre.....	29
Figura 16 - Cargas Móveis	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil
TO	Tocantins
DF	Distrito Federal
SP	São Paulo
JK	Juscelino Kubitschek
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
ASTM	American Society for Testing and Materials
NBR	Norma brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
km	Quilometro
R\$	Real
f_s'	Resistência mínima última à tração
f_y'	Tensão mínima de escoamento
E	Módulo de elasticidade
Mpa	Mega pascal
kN	Quilonewton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	6
1.2	HIPÓTESES	7
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	Objetivo Geral	7
1.3.2	Objetivo Específico	7
1.4	JUSTIFICATIVA	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	ORIGEM.....	9
2.2	PONTO DE EVOLUÇÃO	10
3	TIPOLOGIAS	14
3.1	SISTEMA DOS TIRANTES	16
3.2	SUSPENSÃO DO TABULEIRO	17
3.3	ESTAIS	19
3.3.1	Componentes do Cabo de Estaiamento	19
3.3.2	Proteção dos Cabos	19
3.3.3	Ancoragem	19
3.3.4	Normas e Ensaios	20
3.3.5	Barras	20
3.3.6	Fios	20
3.3.7	Cordoalhas	20
3.4	TABULEIRO - SEÇÃO TRANSVERAL	21
3.4.1	Tabuleiros com Suspensão no Centro	21
3.4.2	Tabuleiros com Suspensão Lateral	23
3.5	TORRE	24
3.5.1	Tipos de Torres	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	APRESENTAÇÃO	27
4.2	Utilização de Ferramentas Computacionais.....	27
4.3	LEVANTAMENTOS	27
4.4	ELABORAÇÃO DO PROJETO	28
4.4.1	Comprimento dos vãos	29

4.5	MODELAGEM DO ESTRUTURA	30
4.6	CARGAS DE PROJETO.....	30
4.6.1	Ações Permanentes	30
4.6.2	Ações Variáveis	30
4.7	ANÁLISE ESTRUTURAL	32
5	CRONOGRAMA	33
6	ORÇAMENTO.....	34
7	REFERENCIAL TEÓRICO.....	35

1 INTRODUÇÃO

Pontes estaiadas são estruturas que chamam atenção por sua imponência e elegância além de serem marcos arquitetônicos são também muito eficazes do ponto de vista estrutural. A configuração de vários sistemas simples permite obter uma estrutura com um funcionamento único, em que o papel de cada um dos elementos que a compõem se encontra muito bem definido (TORNERI, 2002).

A proposta de tabuleiro de pontes com cabos ancorados em torres já é conhecida há algumas tempo, mas apenas no início do século XIX essa opção se tornou viável, tudo graças ao desenvolvimento de barras de ferro forjadas e mais tarde com cordoalhas de aço que ofereceram maior resistência a esforços de tração.

No ano de 1823, o engenheiro, matemático e físico francês Claude Louis Marie Henri Navier publicou resultados de um estudo sobre pontes com tabuleiro suportado por corrente de ferro forjado. As configurações usadas por Naves em seus estudos consistiam em um sistema tipo leque e outro sistema em forma de harpa, modelos simples contendo vários cabos e que são usados nos dias atuais (WALTHER, 1985).

As forças de protensão nos cabos e a configuração geométricas desse tipo de ponte é função de alguns fatores como: relação entre vãos livre, quantidade de apoios, arquitetura e custos. Outro fator importante para o desenvolvimento dessas estruturas foram o aparecimento dos computadores, que marcou o ponto de partida para os meios e métodos de análise estrutural (VARGAS, 2007).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Visando elaborar um projeto de ponte estaiada, quais as premissas, conceitos e etapas se deve seguir para obter um modelo de ponte que satisfaçam as necessidades de estabilidade estrutural para uma determinada região?

As análises comparativas entre as estruturas obtidas com ajuda de ferramenta computacional serão suficientes para determinar qual melhor tipologia para o projeto em questão?

1.2 HIPÓTESES

O modelo final da ponte para o projeto em questão, será determinado através de análises das solicitações relacionadas às tensões críticos na estrutura, Todas as informações necessárias para este processo serão obtidas através de ferramenta computacional. De forma que, o resultado final do processo, terminará que a tipologia mais favorável será a de sistema de estais em semi-leque. Esse modelo combina um arranjo de estrutura mais equilibrada com melhor distribuição dos esforços.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um projeto de uma ponte com sistema de tirantes e analisar os resultados de deslocamentos verticais de sua estrutura com auxílio de ferramenta computacional.

1.3.2 Objetivo Específico

- Elaborar a concepção de um projeto fictício de ponte estaiada para o lago de Palmas – TO;
- Avaliar a solicitação estrutural relacionadas às tensões produzidas em pontos críticos na estrutura.
- Utilizar ferramenta computacional que possibilite a obtenção desses resultados.

1.4 JUSTIFICATIVA

Pretende-se com este trabalho, instigar as novas gerações de engenheiro civil, a buscarem um norte profissional de especialização. Visto que na região de Palmas – TO, há poucas obras de estrutura com estais. Essas obras envolvem uma tecnologia diferenciada no ramo da Engenharia Civil.

Devido a sua arquitetura moderna, as pontes com sistemas de tirante passam a ter uma utilização crescente, mesmo quando em situações onde o vão pequeno não justifica seu uso, mas quando se pretende fazer uma obra marcante não levando em conta o fator econômico, mas sim a sua integração paisagística com o meio urbano. Portando, este trabalho servirá de material

de pesquisa básica para governos e empresas privadas da construção civil a respeito do tema, com informações simplificadas.

Este trabalho poderá ser utilizado por profissionais da área que buscam informações objetivas, pois muitas das tecnologias empregadas na construção de pontes com estais no Brasil é originada de projetos europeus. Mesmo algumas construtoras brasileiras dominando esse tipo de estrutura, há uma carência em tecnologia nacional, com investimento em pesquisa direcionado para o desenvolvimento de projeto, normatização e materiais de construção para essas estruturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ORIGEM

A história revela que a proposta de suportar vãos utilizando cabos preso a uma torre é antiga. Algumas das civilizações mais antigas como os egípcios já utilizavam algumas dessas ideias em várias de suas embarcações. Outras evidências arqueológicas também chamam a atenção, como o caso de cordoalhas de trepadeiras utilizadas para sustentação de passarelas em Borneio, na Oceania (WALTHER, 1985).

Por volta do ano de 1817 com o avanço dos materiais, engenheiros britânicos, Brown e Redpath, projetaram e construíram a passarela de King's Meadow, possuindo vão de 34 metros de extensão e utilizando estais de ferro. Em 1821, surge então o primeiro conceito proposto pelo arquiteto francês Poyet, onde as vigas eram suportadas com barras de aço presa a uma torre, atualmente esse conceito é conhecido como arranjo em leque. Mais a frente em 1840, Hatley propôs um novo tipo de arranjo chamado de “harpa”, onde os cabos eram dispostos de forma paralela (TORNERI, 2002).

Inaugurada em 1883 e um custo aproximada de US\$ 9 milhões, a Ponte do Brooklyn foi proclamada por muitos a “oitava maravilha do mundo”. Com o vão central há mais de 40 metros de altura sobre o rio East e aproximadamente 490 metros de extensão entre as torres. Essa maravilha foi projetada em partes por avaliação de engenharia e outra parte por meio de cálculos, sendo essa estrutura capaz de suportar mais de três vezes a carga de seu projetado original. Essa obra possui grandes torres de alvenaria apoiadas em caixões pneumáticos de aproximadamente 30 por 50 metros em planta.

No ano de 1872, o coronel Washington A. Roebling, diretor chefe do projeto, ficou paraplégico devido a um acidente de descompressão ocasionado durante uma das supervisões na construção de um dos pilares submersos. Permanentemente invalido, dirigiu o restante do projeto na cama, com a ajuda da equipe de engenheiros e de sua esposa (KENNETH M. LEET, 2009).

Outra parte da história é marcada pelos acidentes envolvendo esse tipo de construção. Em 7 de novembro de 1940, a ponte pênsil (Tacoma Narrows) de 1600 metros comprimento caiu, isso poucos meses após a sua inauguração, localizada sobre o Estreito de Tacoma, Washington, Estados Unidos. Este acidente se deu a um colapso gerado por fortes ventos,

mesmo durante sua execução a Ponte de Tacoma balançava, porém nesse mesmo dia, o vento na região atingiu velocidade próxima de 65 km por hora gerando movimentos de torção que levaram a estrutura a colapso. Há vários relatos de acidentes ainda mais antigos como é o caso ocorrido em 1825, onde uma ponte com aproximadamente 78 metros de vão construída sobre o rio Saale, na Alemanha, colapsou quando foi submetida à carga de multidão (WALTHER, 1985).

2.2 PONTO DE EVOLUÇÃO

Mesmo com vários desenvolvimentos de materiais, estudos e métodos de construção de pontes nas décadas 70 e 80, foi na década de 90 que essas estruturas se tornaram uma solução viável em grandes vãos. O avanço de novas tecnologias emprega aos materiais de construção e a evolução dos computadores, foram fatores determinantes para o desenvolvimento de estruturas com tirantes.

Graças a toda essa evolução tecnológica e com o passar de alguns anos, esses modelos de pontes passaram a ter estruturas mais esbeltas, flexíveis e com maior capacidade de vencer grandes vãos. Outra mudança considerável foi na quantidade de estais utilizadas, onde no começo esse número era menor tendo espaçamento longo entre eles. Já na maioria de projetos atuais, passaram a adotar um número maior de estais com espaçamento menor (TORNERI, 2002).

Mesmo assim a Ponte Juscelino Kubitschek ou Ponte JK demonstrada na Figura 1 abaixo, localizada em Brasília – DF do Brasil, que liga o Lago Sul, Paranoá e São Sebastião a parte central da cidade, apresenta uma arquitetura moderna e ousada que utiliza poucos estais em sua composição, dando uma aparência de leveza em sua estrutura. Essa ponte apresenta característica e números que impressionam, no concreto submerso foram utilizados mais de 40.000 m³ e 18.000 toneladas de aço. As estacas possuem profundidade média de 58 metros.

Figura 1: Ponte Juscelino Kubitschek



Fonte: <https://pt.wikipedia.org>

Dados da Ponte JK segundo a Pini:

- ✓ Comprimento Total: 1.200 m
- ✓ Largura Total: 26 m
- ✓ Altura do Tabuleiro: 18 m do nível da água do lago
- ✓ Vãos: 3 Arcos com 240 m cada
- ✓ Altura Total: 61 m do nível da água do lago
- ✓ Custo Aproximado da Obra: R\$ 160 Milhões.

Na Figura 2 temos outro conceito de ponte que utiliza um número maior de estais, é a Ponte de Octávio Frias de Oliveira, localizada na cidade de São Paulo – SP. Fazendo parte do Complexo Viário Real Parque, é formada por duas pistas atirantadas em curvas e independentes que cruzam o rio Pinheiros. Iniciada em 2005 e finalizada em 10 de maio de 2008, é a única ponte do mundo com duas pistas em curva ligada a uma mesma torre.

Entre os vários desafios técnicos no projeto e execução dessa ponte, há a complexidade da distribuição de cargas entre os muitos estais e as seções das pistas de geometria curva. Neste caso, as estais somadas pesam cerca de 462 toneladas que mantêm suspensos dois trechos de 900 metros de comprimento.

Figura 2: Ponte Octávio Frias de Oliveira



Fonte: <http://mobilidadesampa.com.br>

Dados da Ponte Octávio Frias de Oliveira segundo a Isi Engenharia:

- ✓ Comprimentos por seção:
 - Alça de acesso - Margem esquerda: 639 m
 - Alça José Bonifácio de Oliveira – Margem direita: 1.668 m
- ✓ Ponte Estaiada: 580 m
- ✓ Comprimento Total: 2.887 m
- ✓ Altura da Torre: 138 m
- ✓ Quantidade de Estai: 144 estais variando entre 79 e 195 m de comprimento;
- ✓ Volume Total de Concreto: 58.000 m³
- ✓ Custo Aproximado da Obra: R\$ 184 Milhões e mais 40 milhões para sinalização viária.

A ponte dos Imigrantes Nordestinos Padre Cícero José de Souza, localizada entre as cidades de Lajeado e Miracema, em Tocantins. Foi construída para dar continuidade à rodovia que liga a capital Palmas ao norte do Estado como demonstra a Figura 3 abaixo.

Figura 3: Ponte dos Imigrantes Nordeste



Fonte: www.brasil.gov.br

Dados da Ponte dos Imigrantes Nordeste segundo o Governo Federal:

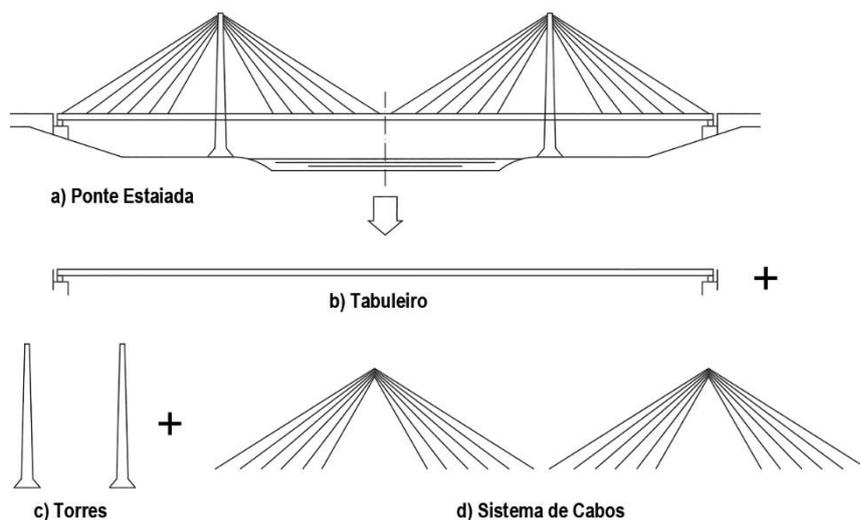
- ✓ Comprimento Total: 609,12 m
- ✓ Largura Total: 16 m
- ✓ Volume Total de Concreto: 15.800 m³
- ✓ Custo da Obra:
 - R\$ 88,7 milhões repassados pelo Ministério da Integração Nacional
 - R\$ 12,2 milhões, a contrapartida do governo estadual
 - Valor Total Aproximado: R\$ 100 milhões.

3 TIPOLOGIAS

Saber qual tipo de ponte deverá ser utilizada depende inicialmente do vão central a ser vencido na obra. Indica que as pontes com estais são mais econômicas quando utilizadas em vãos inferiores a 1500 metros, onde a eficiência das estais são maiores. Já em vãos superiores e 1.500 metros, os esforços normais que serão transmitidos ao tabuleiro através das estais são muito elevados tornando até mesmo difícil a sua execução (TORNERI, 2002).

Segundo Walther (1985), os elementos principais de uma estrutura de ponte com tirante são os pilares, tabuleiro, estais e a torre como mostra a Figura 4, que por sua vez são ancorados a torre, criando assim, apoios de intermédio no vão do tabuleiro. As ancoragens (cabos) são elementos responsável por ligam a torre aos pilares ou blocos de ancoragem, utilizados em muitos caso para reduzir os esforços de momento fletor, deslocamento da torre e tabuleiro caso os carregamentos dos vãos central e lateral sejam diferentes.

Figura 4: Principais elementos

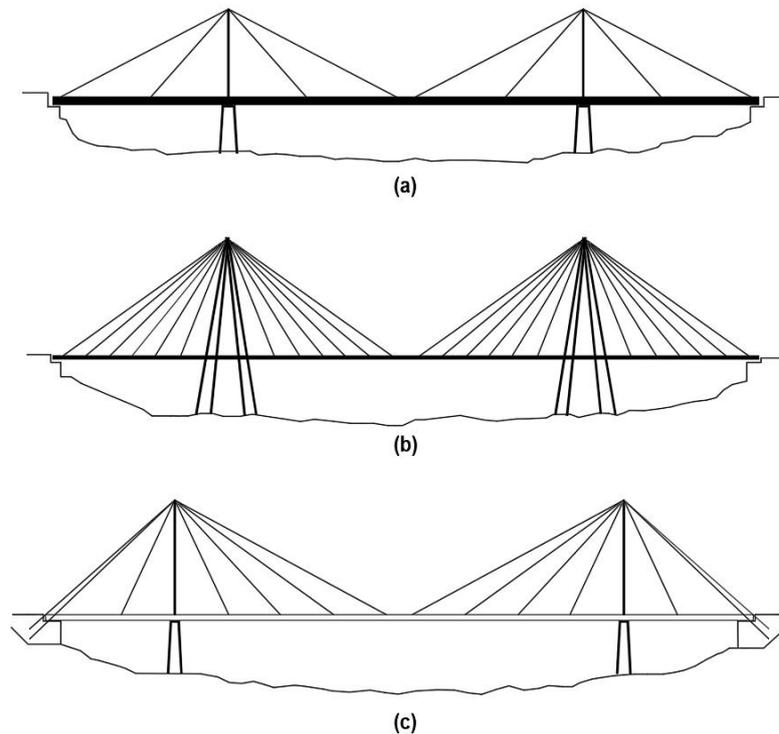


Fonte: WALTHER, 1985

Os modelos mais frequentes dessas pontes têm entre dois a três vãos. A tipologia de dois vãos estaiados com uma torre é muito utilizada em pequenos vãos, sendo um vão principal e um vão lateral de compensação, que pode ser simétrico ou assimétrico em relação a torre. Em

alguns modelos há pilares intermediário no vão de compensação, oferecendo vantagens no desempenho da estrutural como ilustra a Figura 5.

Figura 5: Configuração das estais com a torre



Fonte: WALTHER, 1985

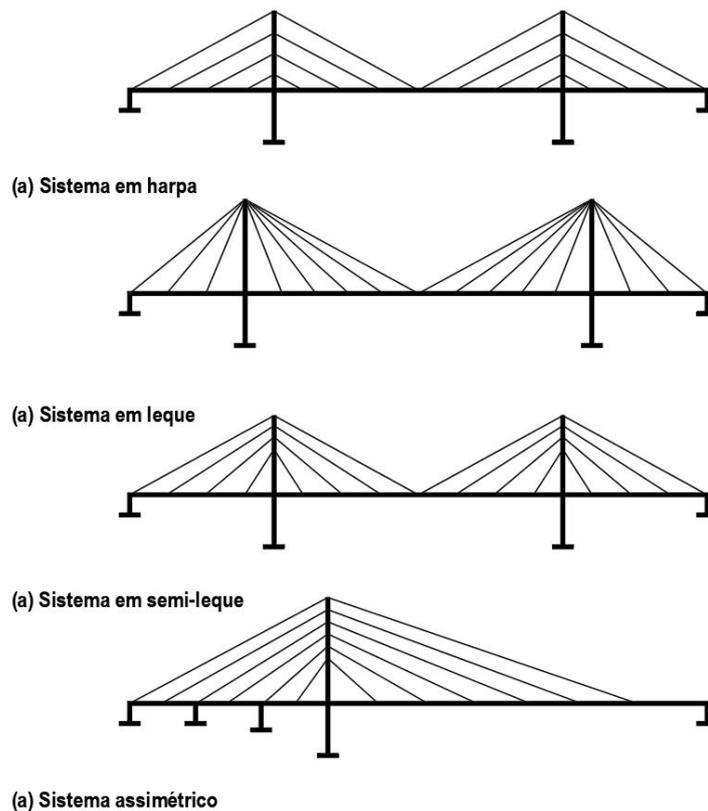
Em alguns casos a torre pode ser inclinada, normalmente no sentido dos estais de retenção. Embora isso possa parecer apenas uma questão de estética, a inclinação da torre permite reduzir as forças nos tirantes de retenção, levando em conta o peso próprio da torre, sendo excêntrico em relação à base.

Nos modelos apresentados na Figura 5 acima, os estais de ancoragem possuem papel fundamental, pois devem equilibrar as cargas do vão central com o vão de compensação, reduzindo o momento fletor no tabuleiro e gerando apenas tensão de compressão para a torre. Isso possibilita torres e tabuleiros mais esbeltos.

3.1 SISTEMA DOS TIRANTES

Os sistemas de estaiamento são divididos em três modelos, onde os tirantes ancorados ao topo da torre caracterizam um formato chamada de leque, já nos outros dois modelos, os tirantes são distribuídos numa certa altura a partir do topo da torre podendo assim ser chamados de semi-leque ou harpa conforme a Figura 6.

Figura 6: Configurações de estais



Fonte: WALTHER, 1985

Para o modelo em leque, é necessário o uso de dispositivos especiais, usualmente metálicos, que permita ancoragem ou desvio dos tirantes no topo da torre. Nesta configuração o peso final dos cabos será menor se comparado ao modelo em harpa utilizando uma torre de mesma altura. Isto ocorre devido a inclinação das estais serem maior, sendo necessário seções de cabos menores para suportar a mesma carga. A desvantagem desse modelo é a solicitação apenas no topo da torre. Nessa configuração, são transferidas forças não equilibradas ao topo da torre principalmente quando existe sobrecargas em um só vão (sobrecargas excêntricas).

No modelo semi-leque temos uma configuração intermediária entre os modelos leque e harpa, que distribui os tirantes na torre de forma que se tenha espaçamento suficiente para a ancoragem, buscando que a inclinação das mesmas com a horizontal seja a maior possível.

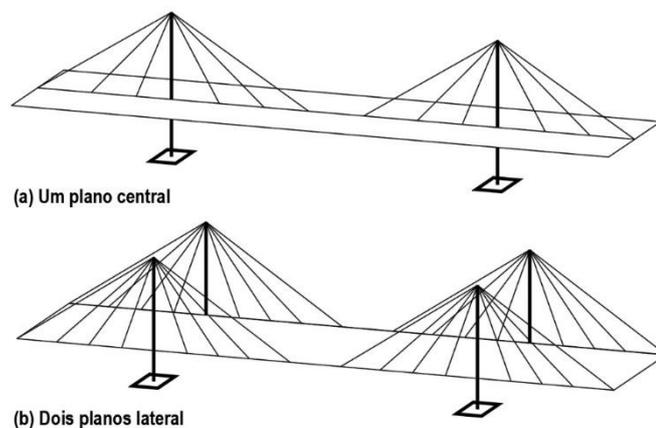
Já no modelo em harpa, todos os tirantes são paralelos entre si, eliminando a concentração de estais no topo da torre. Esse modelo consiste em uma solução pouco econômica em termos de peso dos tirantes, porém com a utilização de torres mais altas é possível garantir uma inclinação favorável que possa diminuir a quantidade de aço nos tirantes.

A configuração dos tirantes no sentido longitudinal, dependerá de fatores relacionados a topografia do terreno e comprimento do vão a ser vencido. Segundo Vargas (2007), para uma economia dos tirantes, a disposição ideal ou ótima seria de forma onde os cabos estivesse no ângulo de 45° com relação a horizontal. Embora haja uma tendência em diminuir esse ângulo de inclinação que visa reduzir o componente vertical das forças proveniente dos cabos. Na grande maioria desses projetos, o vão lateral quase sempre é dimensionado com um comprimento menor que a metade do vão de centro (WALTHER, 1985).

3.2 SUSPENSÃO DO TABULEIRO

A suspensão do tabuleiro pode ser adaptável em vários planos de suspensão, do ponto de vista estético, um plano de suspensão é a melhor solução. O tabuleiro pode ser totalmente suspenso pelos tirantes ou parcialmente suspenso, neste caso as torres são um apoio para o tabuleiro como demonstra a Figura 7.

Figura 7: Configuração Transversal dos tirantes

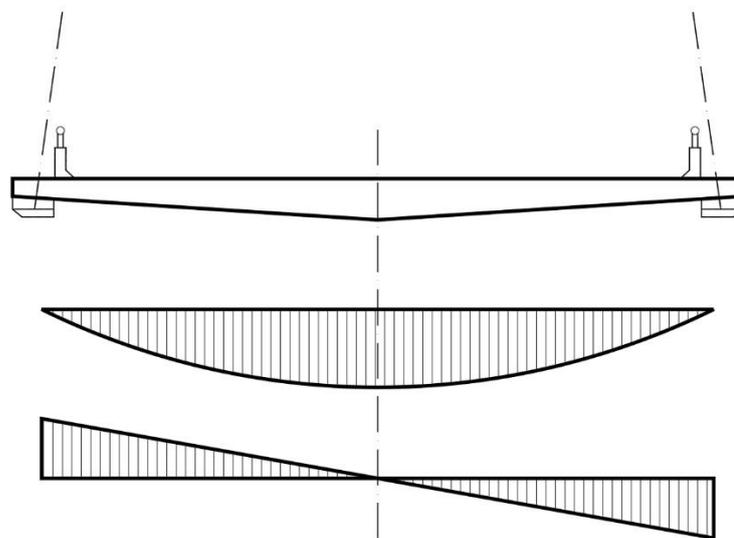


Fonte: WALTHER, 1985

O sistema de suspensão com um plano central é visto como o melhor modelo estético, porém este modelo gera cargas mais assimétricas para o tabuleiro com grandes torções exigindo assim uma seção de maior rigidez. A desvantagem desse modelo é a solicitação da seção da base da torre ser maior, o mesmo ocorre com o tabuleiro quando colocado no centro da torre. Por outro lado, este sistema trabalha com um menor número de estais que possibilitando melhor distribuição dos esforços graças ao tabuleiro com maior rigidez.

O sistema de suspensão lateral, tornou-se o mais adotado dentre os projetos de ponte estaiadas, principalmente quando há necessidade de tabuleiros largos. Nesse modelo os esforços podem ser equilibrados na seção do tabuleiro, que por vez necessita de seção mais esbelta conforme a Figura 8. Os momentos de flexão transversais máximo ocorre no meio da seção e para as cortantes nas ancoragens dos estais (WALTHER, 1985).

Figura 8: Suspensão lateral: esforços transversais



Fonte: WALTHER, 1985

Em outros casos onde há tabuleiros mais largos, os momentos de flexão transversais tender a ser maior que o longitudinal, para estes tipos de casos torna-se necessário o uso de três planos de suspensão. Como já mencionado anteriormente, o ângulo de inclinação ideal para os estais é de 45° , sendo o limite mínimo de 25° para cabos mais longo e máximo de 65° em cabos curtos. A definição de espaçamento máximo dos estais, dependerá do vão intermediário, largura e formato do tabuleiro além do método construtivo.

Para Vargas (2007), utilizando tabuleiro metálico ou misto pode-se construir balanços sucessivos, adotando como regra espaçamento de 15 a 25 metros. Já para tabuleiro em concreto armado, se utiliza uma concepção de espaçamento entre 5 e 10 metros.

3.3 ESTAIS

3.3.1 Componentes do Cabo de Estaiamento

O estaiamento de uma ponte é formado por cabos, onde cada um é composto de um feixe de cordoalhas em paralelas. Esse elemento é formado por um conjunto de fios de aço, onde a montagem desses fios circunda de forma helicoidal um outro fio central.

3.3.2 Proteção dos Cabos

A proteção dos cabos é feita através de um processo especial contra corrosão. Essa proteção é essencial, pois quaisquer imperfeições na superfície do aço podem gerar pontos de concentração de tensão, em alguns casos tensão superior à admissível. O processo de galvanização altera as propriedades mecânica do aço e a protege. Outra proteção é a utilização de cera, feita entre todos os fios da cordoalha.

As bainhas ou tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) garantem segurança a impermeabilidade à água e ação de resistência à raios ultravioleta. Outra proteção utilizada são os tubos contra vandalismo, formado por um revestimento de cerca de 5 mm de espessura instalado na base das estais, junto ao tabuleiro, formando uma proteção mecânica para o conjunto.

3.3.3 Ancoragem

Toda transferência de cargas dos cabos para os apoios, tabuleiro ou torres, é de responsabilidade da ancoragem. Podendo a mesma ser ativa (ancoragem regulável), para realizar atividade de tensionamento, ou passiva (ancoragem fixa), caso a mesma sofra atividade de tensionamento. Normalmente se executa as ancoragens ativas no tabuleiro e as passivas nas torres, facilitando dessa forma o trabalho de execução.

3.3.4 Normas e Ensaio

Atualmente não existe normas brasileiras (NBR) de fabricação de estais e execução de ancoragens. Por esta razão utiliza-se normas internacionais, como a ASTM, que especifica as características de fabricação das barras, fios, e cordoalhas empregadas na execução de obras estaiadas.

3.3.5 Barras

As barras utilizadas em obras atirantadas, devem ter conformidade com as especificações ASTM A722. Onde para cada lote contendo 20 toneladas de aço, é necessário realizar ensaios estáticos, com os requisitos abaixo:

- ✓ Resistência mínima última à tração: $f_s' = 1035 \text{ Mpa}$
- ✓ Tensão mínima de escoamento: $f_y' = 0,85 f_s'$
- ✓ Módulo de Elasticidade: $E = (200000 \pm 5\%) \text{ Mpa}$

3.3.6 Fios

É o componente básico na confecção de cabos e cordoalhas, os fios utilizados em obras atirantadas devem estar em conformidade com as especificações ASTM A421. Segundo o Post-Tensioning Institute (2001), os mesmos devem passar por ensaios estáticos e dinâmicos. Dessa forma para cada lote de 25 toneladas de aço, é necessário realizar ensaios que atenda aos requisitos descritos abaixo:

- ✓ Resistência mínima última à tração: $f_s' = 1655 \text{ Mpa}$
- ✓ Tensão mínima de escoamento: $f_y' = 0,90 f_s'$
- ✓ Módulo de Elasticidade: $E = (200000 \pm 5\%) \text{ Mpa}$

3.3.7 Cordoalhas

Formadas pela montagem de vários fios que circundam de forma helicoidal um fio central com uma ou várias camadas, devem estar em conformidade com as especificações ASTM A416. O mesmo deve passar por ensaios estáticos e dinâmicos segundo o Post-Tensioning

Institute (2001). Onde para cada lote de 10 toneladas de aço, é necessário realizar ensaios estáticos, devendo atender os seguintes requisitos abaixo:

- ✓ Resistência mínima última à tração: $f_s' = 1860$ Mpa
- ✓ Tensão mínima de escoamento: $f_y' = 0,90f_s'$
- ✓ Módulo de Elasticidade: $E = (197000 \pm 5\%)$ Mpa

3.4 TABULEIRO - SEÇÃO TRANSVERAL

O tabuleiro é a seção transversal que condiciona toda a estrutura de uma ponte estaiada, devido a suas características aerodinâmicas e de peso próprio. Em resumo, a escolha correta do modelo de tabuleiro no processo de concepção é muito importante, pois, o mesmo está ligado diretamente a fatores econômico e de comportamento global das estruturas. A distribuição vertical das forças entre os pontos de ancoragem dos estais se dar através dele, considerando-se apoios elástico intermediários.

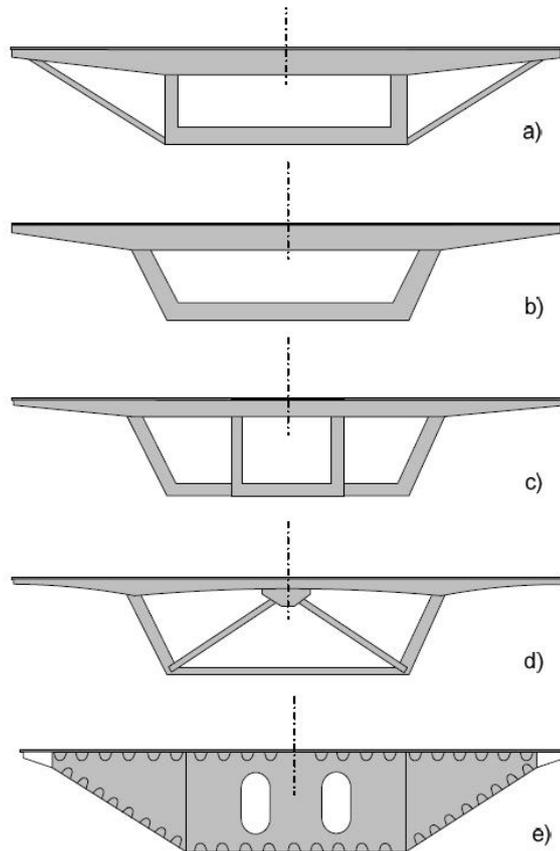
A seção transversal é condicionada pelo plano de suspensão, assim a utilização de suspensão múltipla permite adotar tabuleiros mais esbeltos, conferindo momentos fletores menores entre os pontos de apoio. A utilização de vigas com altura reduzida e o formato aerodinâmico como mencionado, melhora o comportamento do tabuleiro quando o mesmo é solicitado pelo vento transversal.

A classificação de um tabuleiro para pontes atirantadas pode ser obtida através de alguns critérios, onde um deles é a definição do tipo de material, neste contexto os mais comuns são em estrutura metálica, concreto e mistas. Com relação ao custo global desse tipo obra, a definição do tipo de material do tabuleiro se torna um dos critérios relevantes, pois o mesmo influenciará no dimensionamento de outros elementos estruturais.

3.4.1 Tabuleiros com Suspensão no Centro

Quando se utiliza plano de suspensão central, o tabuleiro necessita de maior resistência a torção, condicionando a seção transversal a utilizar tabuleiro do tipo caixão. Para esse tipo de suspensão pode-se utilizar alguns dos modelos representados abaixo na Figura 9.

Figura 9: Tipos de seções utilizando suspensão central



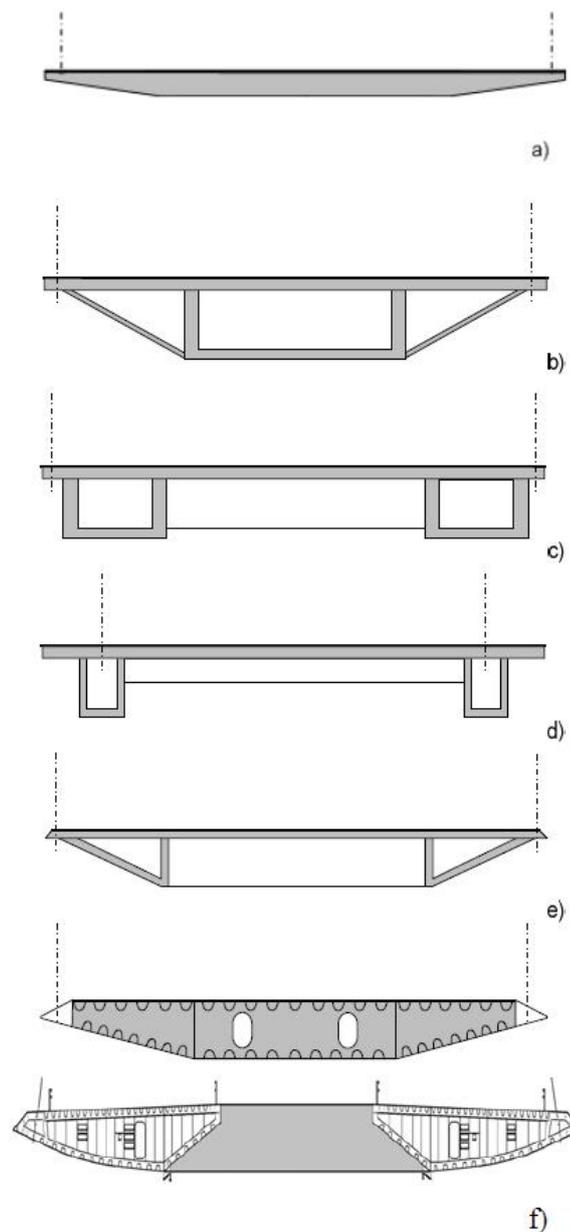
Fonte: Dissertação - Carlos Miguel Cabeçadas Calado (Universidade Técnica de Lisboa)

- a) Caixaão central estreito com almas verticais e escoras de apoio dos consoles e vigas transversais;
- b) Caixaão trapezoidal com almas inclinadas e vigas transversais de suporte dos consoles;
- c) Caixaão tricelular, composto por módulo central rígido com almas verticais, dois módulos laterais trapezoidais com almas inclinadas de suporte aos consoles;
- d) Escoras inclinadas no interior do caixaão do tabuleiro de concreto;
- e) Tabuleiro totalmente metálico compondo um trapézio exterior com forma aerodinâmica.

3.4.2 Tabuleiros com Suspensão Lateral

A utilização desse modelo de suspensão possibilita adotar tabuleiros mais esbelto, a Figura 10 ilustra alguns desses modelos. Em pontes com vão muito longo é importante utilizar seções com maior rigidez a torção.

Figura 10: Tipos de seções utilizando suspensão lateral



Fonte: Dissertação - Carlos Miguel Cabeçadas Calado (Universidade Técnica de Lisboa)

3.5 TORRE

É o elemento da ponte de tirantes onde são ancorados os estais que suspendem a carga vertical do tabuleiro. Normalmente o desenvolvimento da torre é considerado desde a fundação até a última ancoragem dos tirantes, onde a mesma pode também apoiar o tabuleiro. A definição da geometria da torre tende a uma solicitação voltada para o funcionamento estrutural e estética, que dependem dos seguintes aspectos:

- ✓ Configuração do sistema de tirante (leque, semi-leque ou harpa);
- ✓ Tipo de suspensão do tabuleiro (central ou lateral);
- ✓ Utilização de apoio para o tabuleiro nas torres;
- ✓ Espaço de ancoragem e tensionamento dos tirantes no interior da torre;
- ✓ Estrutura do tabuleiro.

Segundo Torneri (2002), os demais componentes da ponte determinam o comportamento estrutural da torre devido a sua interação, já o sistema de tirantes adotado influi em sua rigidez longitudinal. Em sistema de harpa onde as cargas são assimétricas no tabuleiro, adota-se torres com maior rigidez à flexão. Com o sistema de leque, a rigidez no sentido longitudinal das torres terá pouca influência no comportamento da estrutura, pois as tensões de momentos fletores nesse sentido serão transferidas para os cabos de ancoragem.

Para definição da altura das torres, Walther (1985) em seu estudo paramétrico, utilizou 23,5% do vão central. Em muitos caso adota-se a altura da torre com variação de 20% até 25% do vão central. É de grande importância ressaltar que a altura da torre definirá a inclinação dos tirantes, onde o ângulo de inclinação dos cabos mais longos e a horizontal não sejam inferior a 25°, caso isto ocorra, as deflexões no tabuleiro serão muito altas.

De forma geral, pontes estaiadas oferecem inúmeras possibilidade de configuração para as estruturas, onde independentemente do número de vão, essas estruturas comportam-se como pontes totalmente suspensas no sentido longitudinal. Simplificando, a configuração dos elementos deve garantir o caminho mais simples para os esforços, devendo ser projetada de forma que apenas as solicitações normais sejam aplicadas às torres.

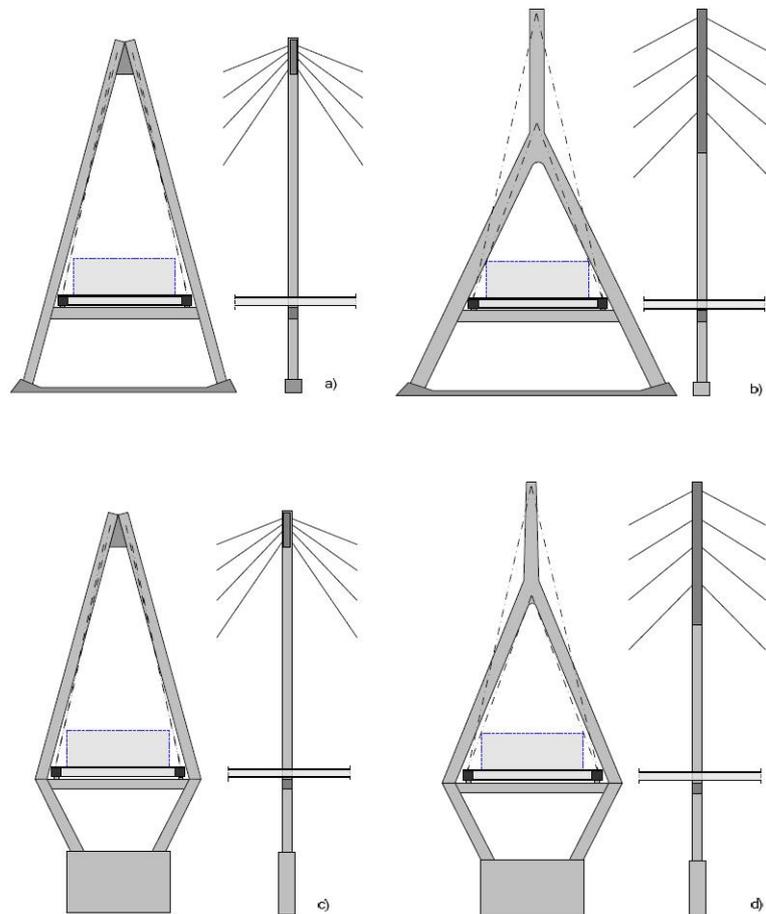
3.5.1 Tipos de Torres

Devido a sua geometria, as torres das pontes de tirantes podem se classificar da seguinte maneira:

- ✓ Torre com fuste único vertical ou inclinado;
- ✓ Torre com dois fustes;
- ✓ Torre em A e Y invertido;
- ✓ Torre em pirâmide;
- ✓ Torre em pórtico transversal e longitudinal;
- ✓ Torre com formas particulares.

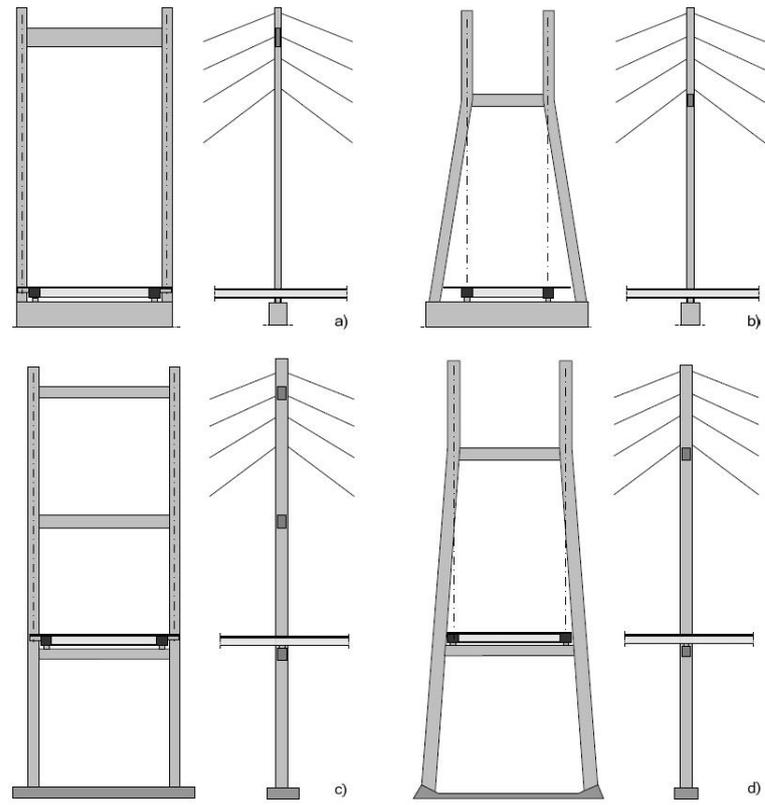
Nas Figuras 11 e 12 seguintes demonstra de alguns desses modelos de torres

Figura 11 - Torres em formatos (a) A, (b) Y invertido e (d) diamante



Fonte: Dissertação - Carlos Miguel Cabeçadas Calado (Universidade Técnica de Lisboa)

Figura 12 - Torres com pórtico transversal



Fonte: Dissertação - Carlos Miguel Cabeçadas Calado (Universidade Técnica de Lisboa)

4 METODOLOGIA

4.1 APRESENTAÇÃO

Este trabalho tem como metodologia um estudo de caráter bibliográfico, onde foi selecionado o Lago de Palmas – TO, para um projeto fictício de ponte estaiada. Pretende-se com este trabalho demonstrar as etapas preliminares na concepção desse tipo de estrutura.

4.2 Utilização de Ferramentas Computacionais

Além do processo de pesquisa bibliográfica, será utilizada para a realização deste estudo, uma ferramenta computacional que auxilie nas análises de tensões produzidas em pontos críticos na estrutura. Atualmente no mercado existem várias ferramentas computacionais que trabalham com análises estrutural, um deles é o Robot Structural Analysis Professional da empresa Autodesk que será utilizada para elaboração do projeto.

Para fazer uso dessa ferramenta e de outras como AutoCad e Revit que também serão utilizadas na parte de desenho técnico, será necessário um cadastro on-line no site <https://www.autodesk.com.tw/education/free-educational-software>, onde será disponibilizada uma licença estudantil válida por 3 anos.

O estudo do funcionamento dessas ferramentas computacionais, será através de bibliografias digitais, vídeo aulas, tutorial em sites e fóruns relacionados aos programas, além de auxílio técnico com profissionais que já utilizam os mesmos.

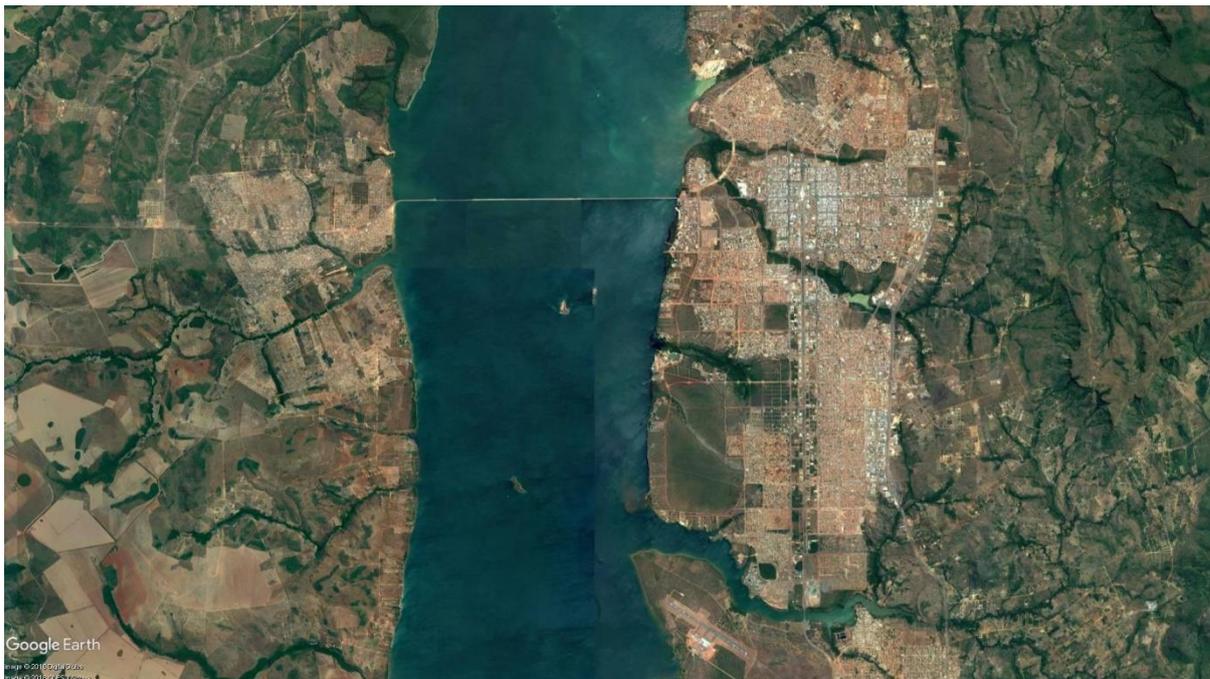
4.3 LEVANTAMENTOS

Como parte inicial do projeto, torna-se necessário a caracterização do Lago de Palmas – TO, visto a importância de se conhecer alguns aspectos particulares como:

- ✓ Topografia (Bases Vetoriais SEPLAN Tocantins);
- ✓ Extensão aproximada do lago (Mapa digital);
- ✓ Profundidade do rio (Bibliografia);
- ✓ Velocidade do vento na região (Software VISUALVENTOS).

Com estas informações levantadas, torna-se possível determinar a melhor situação para locação do projeto. A Figura 13 abaixo demonstra a extensão aérea do lago.

Figura 13 - Imagem aérea do Lago de Palmas - TO



Fonte: Google Earth Pro

4.4 ELABORAÇÃO DO PROJETO

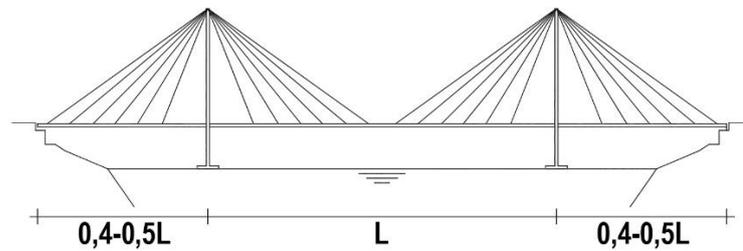
Para Kenneth (2009), como todo projeto de estrutura, a parte de análise é realizada em várias etapas, sendo a principal delas a parte de pré-dimensionamento de seus elementos. Portanto para início de projeto, será adotado apenas um trecho central do lago de 600 m, sendo este o comprimento total da ponte estaiada. Os trechos laterais não farão parte deste trabalho, sendo considerado estruturas complementares. Assim fica definido alguns dos elementos da ponte da seguinte forma:

- ✓ Largura do tabuleiro: 15 m;
- ✓ Seção do tabuleiro: trapezoidal;
- ✓ Espaçamento entre seções do tabuleiro: 5 m;
- ✓ Altura do tabuleiro: 15 m em relação ao nível da lâmina d'água;
- ✓ Modelo das torres: Torre com pórtico transversal;
- ✓ Quantidade de estais: 48 por torre.

4.4.1 Comprimento dos vãos

Para uma melhor distribuição de esforços na estrutura, será utilizado 3 vãos, sendo um vão central de 300m e dois de compensação obedecendo as seguintes proporções conforme a Figura 14.

Figura 14 - Comprimento do vão de compensação



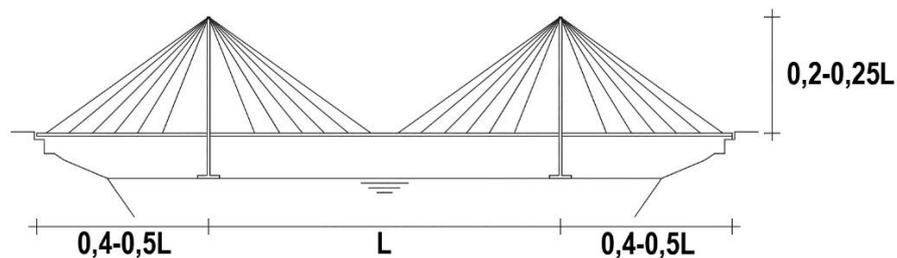
Fonte: Próprio autor

Onde: L = Vão Central

Logo: Vão de Compensação = $0,50 \times 300 = 150$ m

Para definir a altura da torre, será utilizando o método similar ao de Walther (1985), como demonstra a Figura 15.

Figura 15 - Altura da torre



Fonte: Próprio autor

Onde: L = Vão Central

Logo: Altura da torre = $0,25 \times 300 = 75$ m

4.5 MODELAGEM DO ESTRUTURA

A modelagem consiste em representar os elementos da estrutura e seus comportamentos de forma real. Na fase inicial será utilizado modelos planos de análises para uma melhor compreensão da estrutura, sendo utilizado na fase final um modelo espacial mais detalhado. A partir dessa modelagem, poderá ser realizadas modificações em sua concepção variando entre as configurações de estais:

- ✓ Leque
- ✓ Semi-Leque
- ✓ Harpa

Serão utilizados materiais já caracterizados de livros ou monografias existentes para os elementos constituintes da ponte.

4.6 CARGAS DE PROJETO

A NBR 7187 (2003), classifica as ações em permanentes, variáveis e excepcionais, prescrevendo como se devem considerar as ações em projetos de estruturas de pontes. Para este trabalho serão considerados as ações permanentes e ações variáveis de carga móvel.

4.6.1 Ações Permanentes

Segundo NBR 7178 (2003), são ações de intensidade constante ou com pequenas variações durante a fase de construção. Em projeto de pontes, esses tipos de cargas podem ser: peso próprio da estrutura, peso de revestimento, peso de guarda-rodas, empuxos de terras e de líquidos, forças de protensão e deformações.

O peso de cada elemento é considerado de forma automática no ROBOT desde que seja fornecido os valores de peso específico dos materiais e a seção transversal. Segundo a NBR 6118 (2014), a massa específica do concreto para cálculo varia de 24 kN/m^3 a 25 kN/m^3 .

4.6.2 Ações Variáveis

Segundo a NBR 7178 (2003), são ações transitória que compreendem a cargas móveis, cargas de construção, cargas de vento, empuxo de movimentação de terra e efeitos dinâmico de movimentação de água. Para este trabalho será considerado apenas a carga móvel.

A NBR 7188 (2013) define as cargas estática, suas disposições e intensidades, para dimensionamento e verificação de vários elementos estrutural além da verificação global. Desta forma, a carga “P” (kN) é uma carga concentrada vertical estática, aplicada no mesmo nível do pavimento, com valor próprio sem majoração. E a carga “p” (kN/m²) representa uma carga vertical estática distribuída de forma uniforme no mesmo nível do pavimento, com valor próprio e sem majoração.

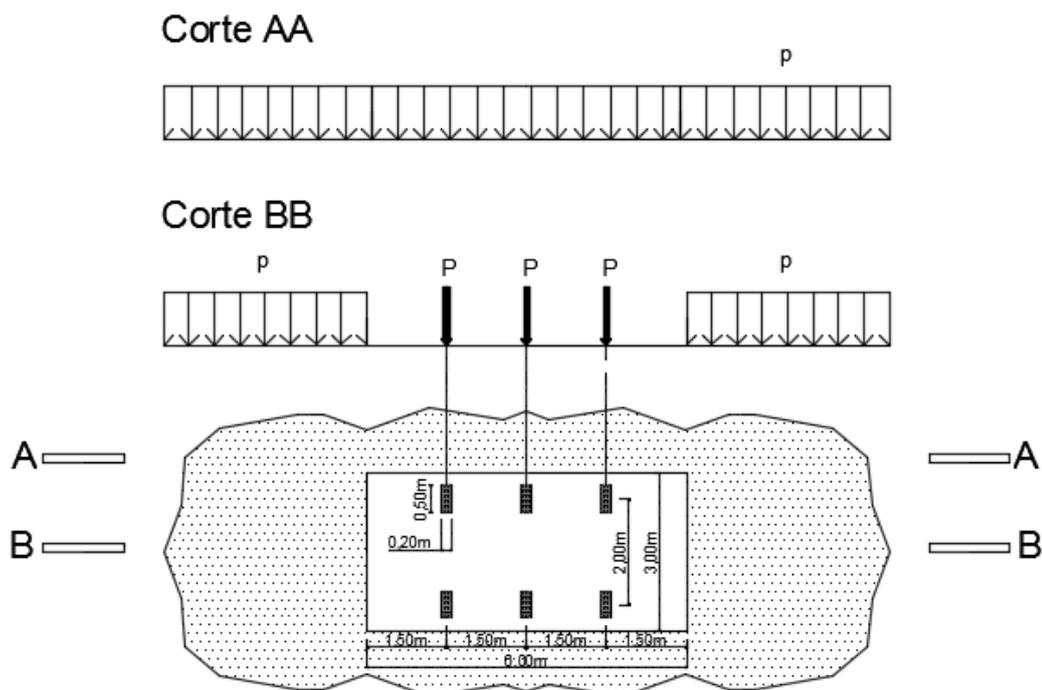
Logo a carga concentrada “Q” (kN) e a carga distribuída “q” (kN/m²), representam valores de carga móvel no nível de pavimento, sendo valores próprio e majorados pelos Coeficientes de Impacto Vertical (CIV), Número de Faixas (CNF) e Impacto Adicional (CIA), assim:

$$Q = P * CIV * CNF * CIA$$

$$q = p * CIV * CNF * CIA$$

Em sua referência, a carga móvel padrão rodoviária é a TB-450, quer representa um veículo tipo de 450kN, possuindo 6 rodas com $P = 75\text{kN}$, três eixos com afastamento de 1,50 m com uma área de ocupação igual a 18,00m², sendo circundada por uma carga distribuída de forma uniforme e constante $p = 5\text{kN/m}^2$ conforme Figura 16 abaixo.

Figura 16 - Cargas Móveis



Fonte: NBR 7188 (2013)

4.7 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para Kimura (2007), a análise estrutural consiste basicamente na obtenção e avaliação da resposta da estrutura perante as ações ao qual foram aplicadas. Resumindo, significa calcular e analisar os deslocamentos e esforços solicitantes de uma estrutura. É a etapa mais importante no processo de elaboração de um projeto estrutural, pois através dos resultados obtidos que o dimensionamento e detalhamento dos elementos serão realizados.

A fase de concepção estrutural é tratada de forma simplificada, onde muitas das vezes são vistas como elementos de comportamento linear. Porém, na concepção de pontes estaiadas, esta analogia não prever com aceitável aproximação o comportamento real das estruturas quando solicitadas a vários esforços. Por esta razão, torna-se necessário uma análise não-linear, que resultará em um modelo de estrutura mais próximo do modelo real (VARGAS, 2007).

Para uma análise estrutural de comportamento não-linear, torna-se necessário a utilização de ferramenta computacional, possibilitando assim o comportamento mais próximo do modelo real da estrutura.

6 ORÇAMENTO

DESPESAS			
Materiais de Consumo e Serviços	Quant.	Valor Unit. (R\$)	Valor Total (R\$)
Folhas de Papel A4	04 resmas	19,80	79,20
Caneta Esferográfica	5 unidades	4,50	22,50
Notebook	1 unidade	3.200,00	3.200,00
Cartuchos para impressão	2 unidades	65,00	130,00
Energia (com taxas de serviços e impostos)	250 (Kwh)	0,95	237,50
Gasolina	50 litros	4,45	222,50
TOTAL DAS DESPESAS (R\$)			3.891,70

7 REFERENCIAL TEÓRICO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118. **Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7187. **Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7188. **Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL, “**Ponte Imigrantes Nordestinos foi inaugurada nesta sexta, em Tocantins**”, Governo do Brasil, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/10/ponte-imigrantes-nordestinos-foi-inaugurada-nesta-sexta-em-tocantins>> Acesso em: 17 de mar. de 2018.

GIMSING, N. J. **Cable supported bridges: concepts and design**. Chichester: John Wiley and Sons, New York, 1983.

GIUSEPPE, Aiello A. N. **Pontes – Apostila 1**. 2014. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

ISI Engenharia, “**Ponte Estaiada Octávio Frias de Oliveira**”, São Paulo: 2010. Disponível em: <<http://www.isiengenharia.com.br/wordpress/espaco-do-engenheiro/ponte-estaiada-octavio-frias-de-oliveira>>. Acesso em: 17 de mar. de 2018.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto Armado: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais**, São Paulo: Pini, 2007.

LEET, Kenneth M. **Fundamentos da análise estrutural** [recurso eletrônico] / Keneth M. Leet, Chia-Ming Uang, Anne M. Gilbert; tradução: João Eduardo Nóbrega Tortello; revisão técnica: Pedro V. P. Mendonça. – 3. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2010.

MIGUEL, Carlos C. C. **Concepção Estrutural das Pontes de Tirantes**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

PINI, “**A tecnologia de estais na Ponte JK, em Brasília**”, São Paulo: 2003. Disponível em: <<http://piniweb17.pini.com.br/construcao/noticias/a-tecnologia-de-estais-na-ponte-jk-em-brasilia-80531-1.aspx>>. Acesso em: 17 de mar. de 2018.

POST - TENSIONING INSTITUTE – PTI. **Recommendations for stay cable design, testing and installation**. USA: Fourth Edition, 2001.

TORNERI, Paola. **Comportamento estrutural de pontes estaiadas: comparação de alternativas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.

VARGAS, Luis. A. B. **Comportamento estrutural de pontes estaiadas: efeitos de segunda ordem**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.

WALTHER, R.; HOURIET, B.; ISLER, W.; MOIA P. **Ponts haubanés**. Lausanne: Presses Polytechniques Romandes, 1985.