

**INSTITUTO FEDERAL**

Minas Gerais

Campus Avançado Arcos

Gabriel Vinícius de Figueiredo

Klinsmann Oliveira Costa

Rafael Cordeiro Vieira

# **Ponte Treliçada Levadiça Vertical Dimensionamento**

Arcos - MG

2018

Gabriel Vinícius de Figueiredo  
Klinsmann Oliveira Costa  
Rafael Cordeiro Vieira

## **Ponte Treliçada Levadiça Vertical Dimensionamento**

Trabalho Acadêmico Integrador - TAI, apresentado às disciplinas referentes ao terceiro período do curso de Engenharia Mecânica ministrado no Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Arcos.

Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG  
Campus Avançado Arcos  
Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Márcio Rezende Santos

Arcos - MG  
2018

# Resumo

A baixada santista é uma região de muita importância para o Brasil, visto que por lá, passa um considerável fluxo de grandes embarcações pelo canal que separa Santos e Guarujá. Esse canal separa duas importantes cidades, que conseqüentemente há um amplo fluxo rodoviário bem como de pedestres que necessitam da travessia. Que contam apenas com a circulação de balsas para continuar o percurso ou se submeter a dar a volta pela ilha de São Vicente passando por Cubatão. Propõe-se então, a implantação de uma ponte treliçada levadiça vertical que possibilitará a travessia rodoviária tal como que permitirá o normal curso náutico. Promovendo uma diminuição ao tempo de espera para a travessia por balsas e diminuindo o custo unitário do usuário, promovendo assim uma melhor acessibilidade a comunidade logradouro, levando em conta sua relação custo/benefício.

**Palavras-chave:** ponte levadiça vertical. Travessia Santos—Guarujá.

# Abstract

The Santos lowland is a region of great importance for Brazil, since there, passes a considerable flow of large vessels through the channel that separates Santos and Guarujá. This channel separates two important cities, which consequently there is a wide flow of road as well as of pedestrians that need the crossing. That only rely on the circulation of ferries to continue the course or to submit to go around the island of São Vicente passing through Cubatão. It is proposed, therefore, the implementation of a latticed vertical drawbridge bridge that will allow the road crossing as it will allow the normal nautical course. Promoting a decrease in the waiting time for the ferry crossing and reducing the user's unit cost, thus promoting a better accessibility to the public community, taking into account its cost / benefit ratio.

**Keywords:** Vertical Drawbridge. Crossing Santos - Guarujá.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Projeto de Ponte Estaiada Santos-Guarujá . . . . .	9
Figura 2 – Projeto de Túnel Santos-Guarujá . . . . .	10
Figura 3 – Ponte Rio Guaíba . . . . .	10
Figura 4 – Dimensões da Calha de Santos . . . . .	11
Figura 5 – Coeficiente de segurança . . . . .	12
Figura 6 – Estrutura de treliças da Ponte . . . . .	13
Figura 7 – Distribuição de vigas e influência . . . . .	14
Figura 8 – Diagrama com forças atuantes . . . . .	14
Figura 9 – Propriedades típicas de materiais mais usados na engenharia . . . . .	15
Figura 10 – Diagrama de Corpo Livre - Viga 3,125 m . . . . .	15
Figura 11 – Curva de força cortante - Viga 3,125 . . . . .	16
Figura 12 – Curva de Momento Fletor - Viga 3,125 m . . . . .	16
Figura 13 – Seção Transversal variante . . . . .	16
Figura 14 – Seção Transversal - Viga Transversal . . . . .	17
Figura 15 – Diagrama de Corpo Livre - Viga 9,17 m . . . . .	18
Figura 16 – Curva de Força cortante - Viga 9,17 m . . . . .	18
Figura 17 – Curva de Momento Fletor - Viga 9,17 m . . . . .	18
Figura 18 – Seção Transversal - Viga Paralela . . . . .	19
Figura 19 – Distribuição de cargas - Treliça em arco . . . . .	20
Figura 20 – Variação de tensão e compressão - Treliça em arco . . . . .	21
Figura 21 – Seção Transversal - Haste externa - Treliça em Arco . . . . .	22
Figura 22 – Seção Transversal - Haste interna - Treliça em Arco . . . . .	22
Figura 23 – Distribuição de carga - Treliça Trapezoidal . . . . .	23
Figura 24 – Variação de tensão e compressão - Treliça Trapezoidal . . . . .	23
Figura 25 – Seção transversal dos cabos . . . . .	24
Figura 26 – Forças pontuais no Eixo . . . . .	25
Figura 27 – Seção Transversal do Eixo . . . . .	26
Figura 28 – Variação de tensão e compressão - Treliça Trapezoidal . . . . .	26
Figura 29 – Protótipo Físico . . . . .	28
Figura 30 – Protótipo Virtual . . . . .	28

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Massa total aplicada sobre as vigas . . . . .	13
Tabela 2 – Tabela de Cargas ao trecho central . . . . .	24
Tabela 3 – Cronograma Previsto . . . . .	29

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>8</b>
2.1	Objetivos Gerais	8
2.2	Objetivos Específicos	8
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>9</b>
3.1.1	Projetos passados e suas inviabilidades	9
3.1.2	Proposta de projeto	10
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Pré-Dimensionamento</b>	<b>11</b>
4.1.1	Considerações Locais	11
4.1.2	Fator de Segurança	12
<b>4.2</b>	<b>Estrutura da Ponte</b>	<b>12</b>
<b>4.3</b>	<b>Dimensionamento de Elementos</b>	<b>13</b>
4.3.1	Vigas Inferiores	13
4.3.1.0.1	Vigas Transversais	15
4.3.1.0.2	Vigas Paralelas	18
<b>4.4</b>	<b>Treliças em Arco</b>	<b>20</b>
<b>4.5</b>	<b>Treliça Trapezoidal</b>	<b>23</b>
<b>4.6</b>	<b>Massa Estrutural</b>	<b>23</b>
<b>4.7</b>	<b>Cabos de Aço - Elevação</b>	<b>24</b>
4.7.1	Pré-dimensionamento	24
4.7.2	Dimensionamento	24
<b>4.8</b>	<b>Torre de Elevação</b>	<b>25</b>
4.8.1	Polias	25
4.8.2	Eixo das Polias	25
4.8.3	Dimensionado da torre	26
4.8.4	Definição dos Contrapesos	27
<b>5</b>	<b>PROTÓTIPOS</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>PROGRESSO CONCLUSIVO</b>	<b>29</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Pontes são estruturas horizontais que possibilitam a ligação de dois pontos equidistantes separados por obstáculos, geralmente utilizadas para possibilitar o tráfego de veículos e pessoas de forma mais rápida (GORGES, 2005). Muitas vezes, os obstáculos a serem vencidos na construção de pontes baseia-se em correntes de água, como rios, córregos e mares.

Devido a rigidez, limitação de altura e comprimento de vãos, muitas pontes se tornam uma barreira para o transporte marítimo. Com isso, novos sistemas de pontes foram desenvolvidos, possibilitando uma variação de transportes pela mesma área, sendo criadas as pontes móveis. Segundo Koglin (2003), pontes móveis são sistemas que possibilitam, quando necessário, a liberação do tráfego aquático.

Dessa forma, o presente estudo consiste em trabalhar com o sistema de ponte levadiça vertical. Koglin (2003) afirmava que, esse tipo de ponte consiste em um sistema composto por torres que são localizadas nas quatro extremidades do vão a ser movido verticalmente em linha reta. Estas torres possuem um sistema de roldanas de contrapeso em sua parte superior, com cordas conectadas nessas roldanas e ao vão de elevação, possibilitando, assim, o movimento vertical do mesmo com força contínua.

Portanto, será elaborado neste trabalho o estudo voltado à implantação de uma ponte levadiça vertical de forma satisfatória e duradoura na Travessia de Santos-Guarujá, além de aplicar neste, conhecimentos obtidos nas disciplinas do 3º e 4º semestre do curso de Engenharia Mecânica ministrados pelo Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Arcos.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho consiste no dimensionamento de uma ponte levadiça a ser instalada no canal entre Santos e Guarujá, viabilizando melhor a passagem rodoviária, sem prejudicar, no entanto, o tráfego marítimo.

### 2.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho será dividido em duas etapas, sendo a primeira a ser desenvolvida na disciplina de TAI III, e a segunda na disciplina de TAI IV. A primeira etapa visa o a parte estática da ponte, não incluindo o movimento vertical proposto:

- Analisar o porque da inviabilidade de outros projetos que já foram propostos ao local estudado.
- Estudar e compreender termos e teorias relacionadas a pontes levadiças e suas aplicações;
- Realizar um estudo de viabilidade para implantação da ponte de elevação vertical;
- Identificar os principais componentes de uma ponte;
- Explicar conceitos aplicados na estruturação da ponte;
- Analisar o desempenho da estrutura.
- Elaborar um protótipo em escala reduzida para demonstração do funcionamento da ponte em estudo.

A segunda etapa desse trabalho consiste no funcionamento do sistema de elevação vertical do segmento de pista a ser elevado, buscando:

- Estudar e compreender termos e teorias relacionadas a sistemas de elevação vertical;
- Estudar o funcionamento de um sistema de elevação e seus principais componentes;
- Explorar o funcionamento do sistema de elevação vertical;
- Analisar o desempenho do sistema de elevação.
- Aprimorar o protótipo desenvolvido anteriormente.

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

### 3.1 JUSTIFICATIVA

#### 3.1.1 Projetos passados e suas inviabilidades

- Ponte Estaiada Santos-Guarujá

Em março de 2013, o governador de São Paulo, Geraldo Alckmin vetou o projeto de uma ponte estaiada proposto pelo seu antecessor José Serra, ao qual alegou problemas como agressão ao espaço aéreo brasileiro que por lei não pode haver obras perto do porto de Santos com mais de 75 metros de altura, além do alto custo de construção e seu custo significativo em manutenção, foram fatores importantes como esses que o governador vetou o projeto da construção da ponte.

Figura 1 – Projeto de Ponte Estaiada Santos-Guarujá



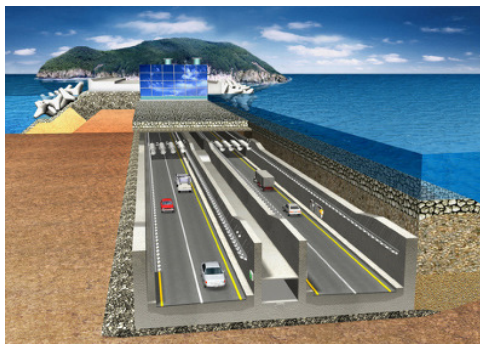
Fonte: <http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/ultimas-noticias/governo-de-sp-anuncia-projeto-paraponte-entre-santos-e-guaruja-1/> (Acesso em: 17 de Abr. 2018)

- Túnel Santos-Guarujá

Em 2013, foi lançado um projeto pelo qual revigorava um problema sobre a travessia de carros entre as cidades de Santos e Guarujá, que constituía em um túnel com aproximadamente cerca de 1,5 km que se passava debaixo de uma faixa de mar onde os navios entram no porto de Santos.

O projeto não saiu do papel por mútuos fatores, dentre os principais, a forte agressão à localidade pela preservação da vida marinha, e principalmente pelo alto custo da obra e seu elevado custo de manutenção, tendo em vista que o Brasil passava por crise desde de 2013, o governador do estado de São Paulo, Geraldo Alckmin vetou temporariamente o projeto devido a crise ao qual o país passava.

Figura 2 – Projeto de Túnel Santos-Guarujá



Fonte: <http://petcivil.blogspot.com.br/2011/06/tunel-submerso-e-opcao-mais-racional-na.html> (Acesso em: 17 de Abr. 2018)

### 3.1.2 Proposta de projeto

Depois de analisados projetos passados e seus respectivos estudos, o grupo propôs um novo método para viabilizar o tráfego de carros e navios, baseando na ponte do Rio Guaíba, localizada na capital Porto Alegre, no estado do Rio Grande do sul. Ela consiste em ser uma ponte funcional, com menor ênfase no impacto visual.

Apenas um segmento da ponte é elevada, como mostra a imagem.

Figura 3 – Ponte Rio Guaíba



Fonte: <http://wp.clicrbs.com.br/santoangelo/2011/10/01/santo-angelo-recebe-exposicao-a-ponte-doguaiba/> (Acesso em: 17 de Abr. 2018)

Este mecanismo permite que a ponte tenha uma forma mais reduzida que os projetos anteriores, propiciando a mesma, adequação ao determinado lugar de aplicação, o maior porto da América Latina.

Relacionando-o aos decorridos projetos, pode-se dizer que o seu custo de produção será consideravelmente mais baixo, além de que, causará um impacto ambiental e social também reduzido.

## 4 METODOLOGIA

Todo o princípio da pesquisa partiu de um problema que afeta gravemente a população do litoral do estado de São Paulo. A falta de acessibilidade, seja por meios terrestres ou aquaviários entre as cidades de Santos e Guarujá gera um transtorno enorme para quem passa pela região. Com o intuito de resolver esse problema ou de minimiza-lo, foi proposto um estilo de ponte levadiça no qual interligaria as duas cidades.

A partir das ideias propostas e a análises feitas, foi estipulado o dimensionamento da ponte e de todas as suas estruturas, o que deu um marco fundamental para que as outras partes do projeto como os cálculos e o protótipo fossem feitos.

As reuniões semanais e o seguimento do cronograma e as metas propostas levaram ao ápice de produção de todos os integrantes do grupo, o que foi fundamental em relação ao tempo previsto por toda a coordenação e desenvolvimento do mesmo.

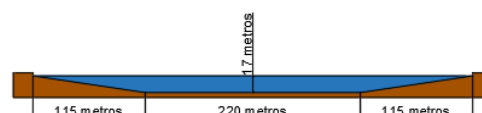
### 4.1 Pré-Dimensionamento

#### 4.1.1 Considerações Locais

As cidades de Santos e Guarujá são separadas por uma faixa de água de 450 metros de extensão, deste modo, para a implantação de uma ponte na região, seria conveniente determinar seu comprimento igual a 460 metros, uma vez que esta teria parte de sua extensão em terra, conectando a Av. Alm. Saldanha da Gama na Cidade de Santos à Av. Ademar de Barros localizada na cidade de Guarujá.

A definição do vão central foi dimensionado a partir de outras pontes levadiças, considerando também a altura média de cargueiros com calado máximo de 13,2 metros permitidos pelo porto de Santos. Portanto o trecho de elevação foi definido com um total de 130 metros, suficientes para a mão dupla do tráfego naval exigido para aquela região.

Figura 4 – Dimensões da Calha de Santos



Fonte: Autoria Própria

Por possuir uma calha proporcional com dimensões de 450 metros de largura total e 220 metros centralizados onde se encontra o maior calado, deste modo sendo propício para a

navegação, foram distribuídos 165 metros de comprimento para cada trecho correspondente as extremidades da ponte.

### 4.1.2 Fator de Segurança

O fator de segurança é um coeficiente adimensional, ele representa uma margem de segurança que se distancia do limite de resistência das matérias, valorizando a segurança dos projetos, apesar do aumento do custo. Para sua definição, será escolhido o maior fator de segurança exigido dentre as características encontradas na tabela a seguir:

Figura 5 – Coeficiente de segurança

INFORMAÇÃO	QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES	C.S.
<b>DADOS DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DISPONÍVEIS A PARTIR DE TESTES</b>	O material usado realmente foi testado	1,3
	Dados representativos de testes do material disponíveis	2,0
	Dados razoavelmente representativos de testes do material	3,0
	Dados insuficientemente representativos de testes do material	5,0+
		<b>CS_2</b>
<b>CONDIÇÕES AMBIENTAIS NOS QUAIS O MATERIAL SERÁ UTILIZADO</b>	São idênticas às condições dos testes do material	1,3
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	2,0
	Ambiente moderadamente desafiador	3,0
	Ambiente extremamente desafiador	5,0+
		<b>CS_2</b>
<b>MODELOS ANALÍTICOS PARA FORÇAS E TENSÕES</b>	Os modelos foram testados em experimentos	1,3
	Os modelos representam precisamente o sistema	2,0
	Os modelos representam aproximadamente o sistema	3,0
	Os modelos são aproximações grosseiras do sistema	5,0+
		<b>CS_2</b>

Fonte: Projeto de Máquinas - Beer

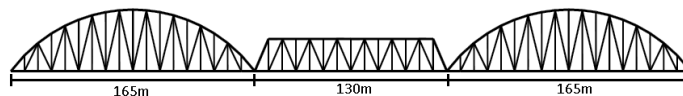
Considera-se em que o material utilizado no presente projeto é bem conhecido, já que foi escolhido com exatidão. Relacionada as condições ambientais, julga-se que é com maior conveniência a escolha do fator 3, já que o fator 5 seria favorável em condições ambientais extremas, como terremoto e tsunamis, oque não condiz com as verdadeiras condições.

## 4.2 Estrutura da Ponte

Após estudos encima dos vários modelos de ponte, a escolha por um que apresentasse maior custo/benefício, baixo peso estrutural e alta eficiência levou a ser escolhido o sistema de ponte treliçada, sendo também considerado a essa estrutura um treliçamento por arcos, uma vez que este possui um sistema de distribuição de cargas mais eficaz. No entanto, a faixa de pista a ser elevada não contará com esse sistema, tendo assim apenas treliças normais, pois neste não será exigido tanto esforço.

Para a elevação da parte central foram dimensionadas duas torres de 54 m<sup>2</sup> em cada uma de suas extremidades, contendo internamente os contrapesos e roldanas necessárias para erguê-la.

Figura 6 – Estrutura de treliças da Ponte



Fonte: Autoria Própria

## 4.3 Dimensionamento de Elementos

### 4.3.1 Vigas Inferiores

Para definir o material do qual serão constituídas as vigas e suas respectivas medidas, foi avaliado a situação crítica em que um trecho específico da ponte passaria. Para isso, foi considerado em que nela agisse uma deposição de carga máxima, isto é, em uma situação hipotética. Cada carga determinada será somada ao total, que age ao trecho de 165 m da ponte.

- Carga por Automóveis - Os caminhões têm a maior densidade de peso por metro dentre os veículos, e sua escolha apontaria maior interesse. Foi definido em que na extensão da ponte, nas seis vias de tráfego, há somente caminhões pesados e de dois eixos.
- Carga por Pessoas - Foi considerado que nos dois passeios, tenham dez pessoas por metro quadrado, e um valor médio de 80 kg por pessoa.
- Massa Própria - O concreto armado das pistas também exerce esforços nas vigas. Sua espessura é de 0.37 m e largura de 25 m. Também considerado o peso de postes de iluminação de 12 m.

Tabela 1 – Massa total aplicada sobre as vigas

	Massa em Toneladas (t)
Caminhão Pesado de dois Eixos	1633 t
Pessoas	528 t
Massa Própria	3816,075 t
Massa Total	5977,075 t

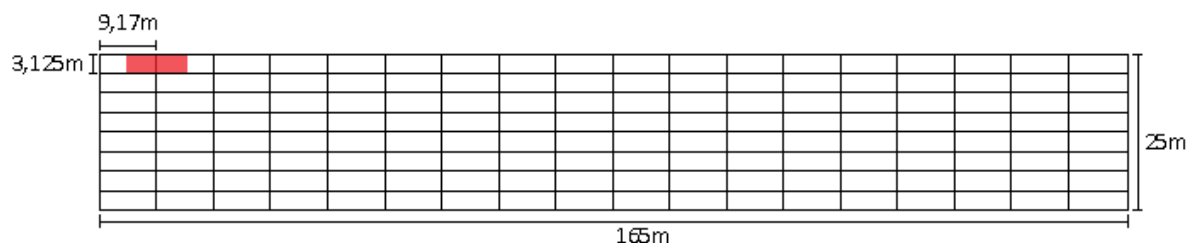
Fonte: Autoria Própria

A carga total está atuando ao longo das dimensões da estrutura de 4125 m<sup>2</sup>, corresponda-se a aproximadamente 1,45 t/m<sup>2</sup>.

Com a massa total encontrada será possível a determinação do posicionamento ideal para as vigas. Considerada alta, a massa exigira muitas vigas. Sua elaboração será

então por vigas paralelas e transversais ao sentido da ponte, proporcionando uma menor área de influência as vigas, possibilitando também a utilização de vigas com dimensões reduzidas.

Figura 7 – Distribuição de vigas e influência

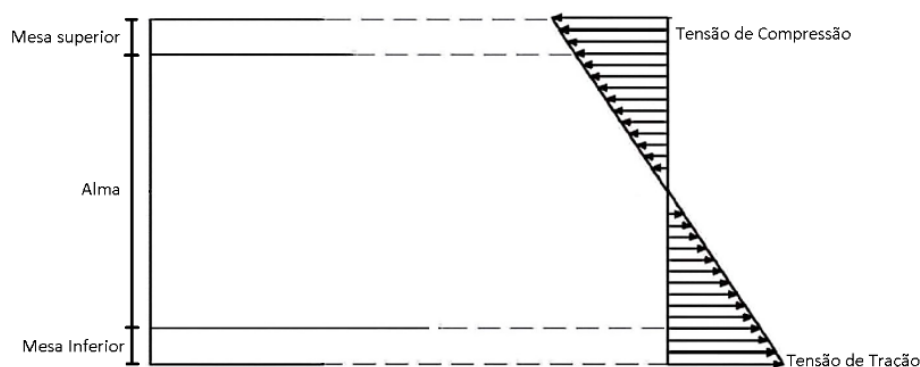


Fonte: Autoria Própria

A imagem mostra a distribuição definida, através de vigas paralelas e transversais. Em vermelho, representa a área de influência de cada viga a carga atuante, conclui que cada viga deverá suportar a aproximadamente 41,55 t.

As vigas sofrerão por atuação de cargas transversais a ela, isto representa em que em sua estrutura, a região dita superior sofrerá por compressão, já o lado oposto por tração.

Figura 8 – Diagrama com forças atuantes



Fonte: Autoria Própria

Considera-se o material utilizado, o Aço - ASTM A572 - G50 por apresentar características de interesse, relacionadas ao tipo de carga solicitante. Naturalmente, o aço apresenta menor resistência a compressão, sendo atributo de cautela.

Suas características são equivalentes ao aço de reforço - alta resistência. O limite de resistência de compressão correspondente é 415 MPa. A aplicação do fator de segurança representa dividir o limite de resistência do material pelo fator adimensional, como já anunciado, o fator de segurança escolhido foi de equivalência 3.

Figura 9 – Propriedades típicas de materiais mais usados na engenharia

Material	Densidade kg/m <sup>3</sup>	Limite de resistência			Tensão de escoamento <sup>3</sup>		Módulo de elasticidade, GPa	Módulo de elasticidade transversal, GPa	Coeficiente de expansão térmica, 10 <sup>-6</sup> /°F	Ductilidade, porcentagem de alongamento em 50 mm
		Tração, MPa	Compressão, MPa	Cisalhamento, MPa	Tração, MPa	Cisalhamento, MPa				
Aço										
Estrutural (ASTM-A36)	7860	400			250	145	200	77,2	11,7	21
Baixa liga e alta resistência										
ASTM-A709 Classe 345	7860	450				345	200	77,2	11,7	21
ASTM-A913 Classe 450	7860	550				450	200	77,2	11,7	17
ASTM-A992 Classe 345	7860	450				345	200	77,2	11,7	21
Temperado e revenido ASTM-A709 Classe 690	7860	760				690	200	77,2	11,7	18
Inoxidável, AISI 302										
Laminado a frio	7920	860	520				190	75	17,3	12
Recozido	7920	655	260			150	190	75	17,3	50
Aço de Reforço										
Média resistência	7860	480	275	200	77	11,7				
Alta resistência	7860	620	415	200	77	11,7				

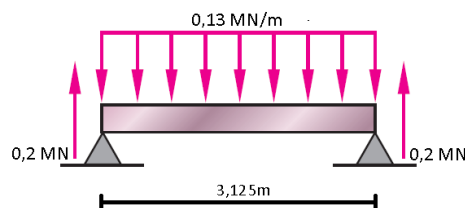
Fonte: Mecânica dos Materiais - Beer

$$\frac{415 \text{ MPa}}{3} = 138,33 \cdot 10^6 \text{ Pa}, \quad (4.1)$$

#### 4.3.1.0.1 Vigas Transversais

Com a carga atuante em cada viga, é possível definir as reações aos apoios, considerando-se como carga distribuída.

Figura 10 – Diagrama de Corpo Livre - Viga 3,125 m



Fonte: Autoria Própria

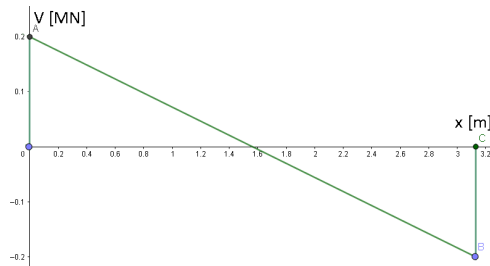
Definindo o diagrama de força cortante ( $V$ ) será possível determinar o diagrama do momento fletor que é a integral de  $V$ .

De  $x = 0$  até  $x = 3,125$  a curva obedece a função  $f(x) = -0,128x + 0,2$ . Os pontos A e B apresentam as posições das cargas pontuais. Determinado a função, será possível então obter o diagrama do momento.

A função correspondente ao mesmo intervalo é  $f(x) = -0,064x^2 + 0,2x$ , o momento máximo encontra-se ao meio da estrutura e corresponde a  $0,15625 \text{ MN}\cdot\text{m}$ .

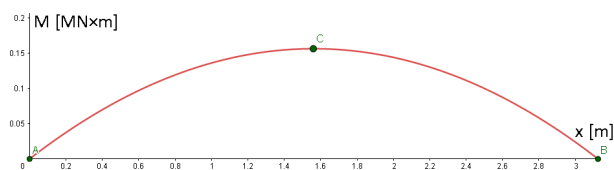


Figura 11 – Curva de força cortante - Viga 3,125



Fonte: Autoria Própria

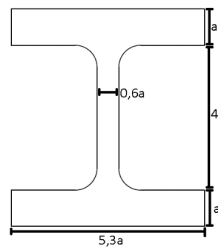
Figura 12 – Curva de Momento Fletor - Viga 3,125 m



Fonte: Autoria Própria

O dimensionamento da viga será limitado a uma tensão de 138,33 MPa. Para a determinação da viga mais adequada, será considerada proporções de uma viga IPBV 100, de forma, a substituir suas dimensões por uma variável.

Figura 13 – Seção Transversal variante



Fonte: Autoria Própria

Será essencial a determinação do momento de inércia da peça, o cálculo será necessário ao próximo passo. Defina-se pela igualdade:

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + d^2 \cdot b \cdot h \quad (4.2)$$

O cálculo de inércia será realizado para cada peça e posteriormente somados. B corresponde a base, h a altura e d é a distância até o centro de gravidade.

$$I = 70,334a^4 \quad (4.3)$$

O cálculo de tensão será calculado pela seguinte igualdade:

$$\sigma_{\text{Máx}} = \frac{M \cdot C}{I} \quad (4.4)$$

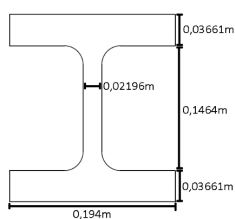
Onde M representa o momento da estrutura e C a distância do centro de massa até a sua extremidade coordenada mais distante. A aplicação da igualdade será em função da variável "a", como a seguir:

$$138,33 \cdot 10^6 \text{ Pa} = \frac{159105,94 \cdot 3a}{70,33a^4} \quad (4.5)$$

$$a \approx 0,03661 \quad (4.6)$$

Com "a" definido, será determinado as verdadeiras dimensões da viga de comprimento de 3,125 m.

Figura 14 – Seção Transversal - Viga Transversal

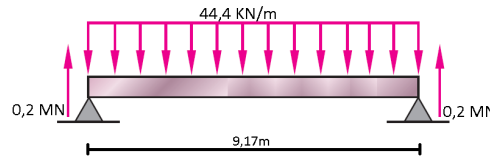


Fonte: Autoria Própria

## 4.3.1.0.2 Vigas Paralelas

Realizado de mesma forma, o primeiro passo é a realização do diagrama de corpo livre.

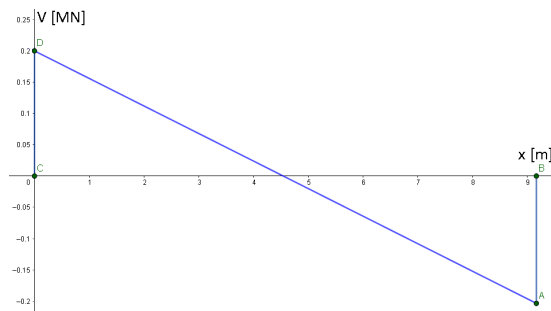
Figura 15 – Diagrama de Corpo Livre - Viga 9,17 m



Fonte: Autoria Própria

Forças anunciadas, possível a realização do diagrama de esforço cortante.

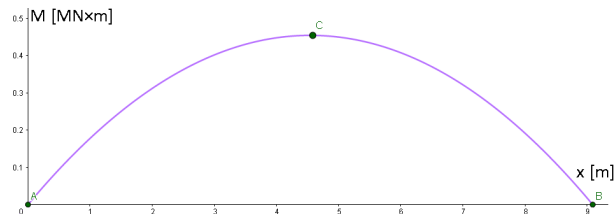
Figura 16 – Curva de Força cortante - Viga 9,17 m



Fonte: Autoria Própria

Entre  $x = 0$  e  $x = 9,17$  a curva obedece  $f(x) = -0,044x + 0,2$ , a integral da curva corresponde ao comportamento do momento fletor.

Figura 17 – Curva de Momento Fletor - Viga 9,17 m



Fonte: Autoria Própria

A curva obedece  $f(x) = -0,022x^2 + 0,2x$ . O momento máximo se encontra no meio da viga, ao qual, tem magnitude bem superior ao momento máximo da viga menor, isso indicara maiores dimensões para essa viga, o seu valor corresponde a  $0,45 \text{ MN}\cdot\text{m}$ .

O momento de Inércia será o mesmo, já que considerado a mesma seção transversal variante, como também a distância do centro geométrico até a extremidade.

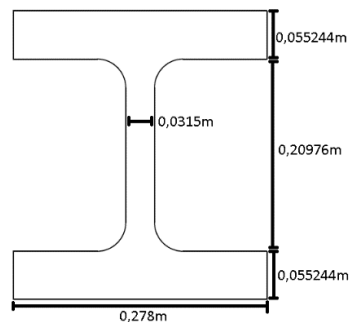
$$\sigma_{\text{Máx}} = \frac{M \cdot C}{I} \quad (4.7)$$

$$138,33 \cdot 10^6 \text{ Pa} = \frac{467685,5844 \cdot 3a}{70,33a^4} \quad (4.8)$$

$$a \approx 0,05244 \text{ m} \quad (4.9)$$

Como previsto, as dimensões da viga maior apresentam maior dimensionamento, visto que nela atua um momento com maior magnitude, mesmo com a mesma carga atuante. Sua dimensão será então:

Figura 18 – Seção Transversal - Viga Paralela



Fonte: Autoria Própria

O posicionamento como descrito das vigas garantiram a estabilidade da estrutura ainda com considerável margem de segurança.

Dimensões definidas, será preciso determinar a massa total resultante das vigas, tal valor será necessário para o posterior dimensionamento das treliças. Para a obtenção da massa das vigas deverá ser realizado o produto entre o volume total e a densidade do aço, que corresponde a  $7800 \text{ kg/m}^3$ . Dessa forma, a massa total das vigas transversais serão:

$$0,017838 \text{ m}^2 \cdot 25 \text{ m} \cdot 19 \cdot \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 66,09 \text{ t} \quad (4.10)$$

De mesma forma será calculado a massa para as vigas paralelas, obterá então a massa:

$$0,040618 \text{ m}^2 \cdot 165 \text{ m} \cdot 9 \cdot \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 470,48 \text{ t} \quad (4.11)$$

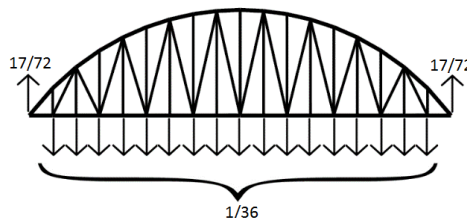
Pelo maior dimensionamento e comprimento total, as vigas paralelas têm significativa massa maior em relação às vigas transversais.

## 4.4 Treliças em Arco

Nas treliças, são encontradas somente tensão de tração ou compressão, a determinação é feita à realização do cálculo de nós. Foi optado em considerar uma carga atuante total igual a 1, de forma que, os resultados encontrados serão coeficientes de multiplicação da verdadeira carga atuante.

Devido a distribuição constante da carga, cada nó estará com a mesma intensidade de força. Cada lateral da ponte recebera carga de 1/2.

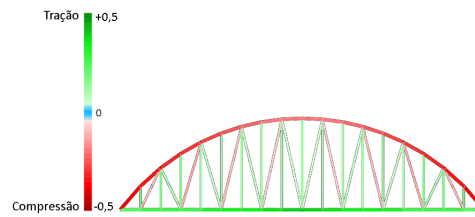
Figura 19 – Distribuição de cargas - Treliça em arco



Fonte: Autoria Própria

Através do software Matlab, foi possível determinar cada tensão atuantes nas hastes das treliças, e assim analisar o seu comportamento, a imagem a seguir mostra pela variação de tonalidade das cores, representando as tensões de tração e compressão.

Figura 20 – Variação de tensão e compressão - Treliça em arco



Fonte: Autoria Própria

Na observação deste gráfico, é possível facilmente perceber o comportamento das tensões ao longo das treliças. As hastes mais comprimidas são as superiores, que se encontram nas extremidades, o seu coeficiente de carga corresponde a 0,3313 ou 33,13 % da carga atuante, por sua vez, as hastes mais tracionadas são as inferiores que se encontram ao centro das treliças, o coeficiente corresponde a 0,2649 ou 26,49 %.

Novamente, o dimensionamento estará em função da tensão de compressão, que corresponde a menor resistência. Logo, deverá ser analisada a treliça mais comprimida, isto é, a haste que sofre 33,13 % da carga máxima. A carga máxima corresponde a soma das massas das vigas juntamente com a carga crítica já definida. Sua determinação tornara a estrutura das treliças resistente o suficiente para suportar a carga crítica ainda com a margem de segurança, definida como 3.

$$66,09 t + 470,48 t + 5977,075 t = 6513,64 t \quad (4.12)$$

O produto da carga total em Newtons com o coeficiente da haste mais comprimida determinará a força atuante na mesma, isto é:

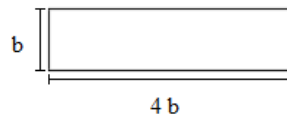
$$63442113,71 N \cdot 0,3313 = 21018372,27 N \quad (4.13)$$

O limite de resistência do aço de alta resistência a compressão é 415 MPa, a aplicação do fator de segurança limita a tensão máxima a 138,33 MPa. A definição da dimensão será considerada como variante, a uma seção transversal retangular.

Com a tensão limite definida e a força atuante, torna então, a variável b determinável, através do cálculo de tensão:

$$138,33 \cdot 10^6 Pa = \frac{21018372,27 N}{4a^2} \quad (4.14)$$

Figura 21 – Seção Transversal - Haste externa - Treliça em Arco



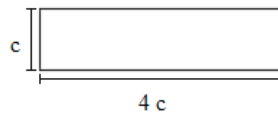
Fonte: Autoria Própria

$$a = 0,1949 \text{ m} \quad (4.15)$$

Observando ainda o gráfico, visivelmente não é necessário a utilização da mesma seção transversal nas hastes internas, vista que, as tensões atuantes nas mesmas representam coeficientes mais limitados.

Determina-se então, a haste interna mais comprimida para o dimensionamento das treliças internas. O coeficiente correspondente tem intensidade de 5,43 % da carga atuante, as hastes internas também terão seção retangular.

Figura 22 – Seção Transversal - Haste interna - Treliça em Arco



Fonte: Autoria Própria

$$138,33 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \frac{3446683,154 \text{ N}}{4a^2} \quad (4.16)$$

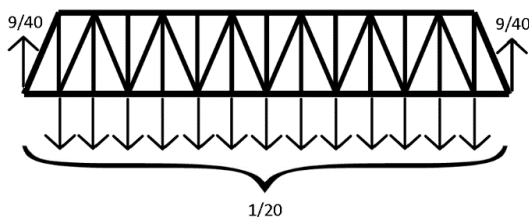
$$c = 0,07892 \text{ m} \quad (4.17)$$

Tais dimensionamentos garantem a estabilidade estrutural das treliças, que foram projetadas para suportar grande carga exigente.

## 4.5 Treliça Trapezoidal

O trecho central da ponte tem menor comprimento comparado às extremidades, nela, a carga atuante terá inferior magnitude. De mesmo método, o primeiro passo é determinar as reações de cada haste às forças distribuídas ao longo da estrutura treliçada.

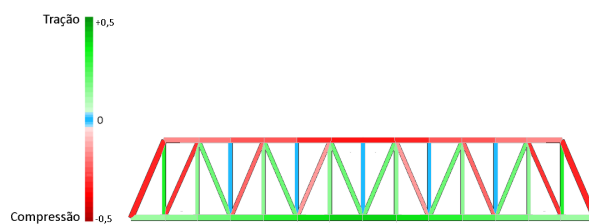
Figura 23 – Distribuição de carga - Treliça Trapezoidal



Fonte: Autoria Própria

A realização dos cálculos, torna-se possível realizar a análise das tensões à estrutura. A Figura 25, demonstra as variações das tensões para as treliças em forma de trapézio.

Figura 24 – Variação de tensão e compressão - Treliça Trapezoidal



Fonte: Autoria Própria

Nota-se a concentração de tensão à região central à estrutura trapezoidal. A haste mais tracionada denomina-se por 0,2583 ou 25,83% da carga atuante. Já a haste mais comprimida tem magnitude de 0,3193 ou 31,93% da carga. A determinação de sua carga crítica será considerada proporcional a carga obtida nas extremidades. Nessa perspectiva, a estrutura treliçada trapezoidal terá que suportar a uma carga total de 5095,28 t.

## 4.6 Massa Estrutural

Considera-se ao dimensionamento das vigas superiores como de mesma seção transversal ao das treliças internas, visto que tal dimensão já representa significativa segurança.

Para determinar a massa total estrutural, basta somar a massa de todos os componentes, de modo a obter o resultado de interesse.



Tabela 2 – Tabela de Cargas ao trecho central

	Massa em Toneladas (t)
Concreto	3006,31 t
Vigas Inferiores	422,75 t
Vigas Superiores	175,34 t
Treliças	1130,92 t
Total	4735,32 t

## 4.7 Cabos de Aço - Elevação

### 4.7.1 Pré-dimensionamento

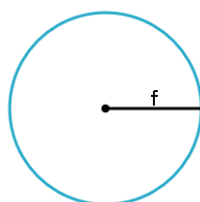
O sistema de elevação ao trecho central da ponte, conta com a tração aos cabos, que ligados do contrapeso aos nós de cada extremidade das treliças trapezoidal, sua performance torna possível o movimento vertical após o acionamento do motor ascensor. Os cabos devem ser dimensionados de maneira a suportar a tração gerada ao erguimento do vão. É de interesse obter uma reduzida seção transversal, permitindo uma boa interação dos cabos com a polia localizada ao topo de cada torre. Será então utilizado 10 cabos a cada nó, somados 40 cabos para o levantamento da estrutura.

Não é permitido o acionamento de elevação com automóveis ou pessoas sobre o vão, para a valorização a segurança dos usuários. Por esse motivo, os cabos serão projetados para elevar somente o peso próprio estrutural, de 4735,32 t.

### 4.7.2 Dimensionamento

O cálculo será realizado utilizando a tensão de limite de resistência à tração, devido a tensão atuante, limitado pelo fator de segurança utilizado ao presente projeto. Na literatura, determina-se tal limite de resistência definido como 615 MPa, logo a tensão utilizada é 206,67 MPa. Sua seção transversal é naturalmente um círculo, será adotado então valor variante para a determinação do cabo mais apropriado.

Figura 25 – Seção transversal dos cabos



Fonte: Autoria Própria

$$206,67 \cdot 10^6 \text{ Pa} = \frac{161337,23 \text{ N}}{\pi f^2} \quad (4.18)$$

$$f = 0,04229 \text{ m} \quad (4.19)$$

Somados 40 cabos análogos serão capazes então, de realizar o erguimento da estrutura central com a tensão limitada pelo fator de segurança.

## 4.8 Torre de Elevação

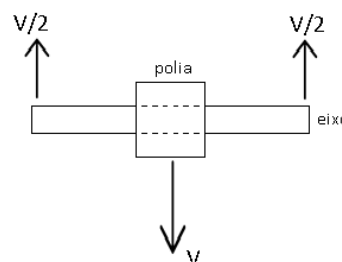
### 4.8.1 Polias

Serão estruturas projetadas para receber ao longo de toda sua vida útil um carregamento constante. Necessita então um dimensionamento avantajado. Por estes fatores, o seu raio será definido como 2,475 m, contando ainda com uma estrutura de Aço - ASTM A572- G50, considerado de alta resistência.

### 4.8.2 Eixo das Polias

O eixo receberá cargas transversais, de modo que, quando o vão se encontra em sua base, sua estrutura terá que suportar a força resultante dos dois lados tracionados dos cabos, exercidos pela ação do contrapeso, que terá dimensões ainda por definir. Sua estrutura será mais exigida ao momento de ascensão do vão, ao qual, a força resultante na mesma, será a soma dos dois lados tracionados dos cabos, como mostra o diagrama.

Figura 26 – Forças pontuais no Eixo

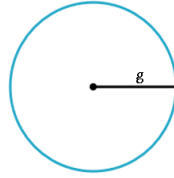


Fonte: Autoria Própria

O eixo então, terá a sua região superior comprimida pela ação das forças atuantes. Da mesma forma será dimensionada de forma a evitar grande tensão por compressão. Sua estrutura se trata do mesmo aço utilizado aos outros materiais, sua tensão limite de compressão corresponde a 415 MPa e a aplicação do fator de segurança torna novamente a tensão limitada a 138,33 MPa.

V corresponde a soma dos dois lados dos cabos tracionados, por ser a maior carga pontual, o eixo será dimensionado por sua magnitude.

Figura 27 – Seção Transversal do Eixo



Fonte: Autoria Própria

$$138,33 \cdot 10^6 \text{ Pa} = \frac{23226744,6 \text{ N}}{\pi g^2} \quad (4.20)$$

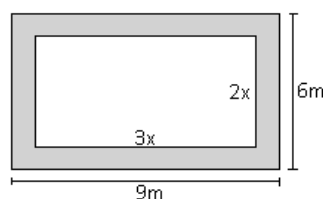
$$g = 0,2312 \text{ m} \quad (4.21)$$

### 4.8.3 Dimensionado da torre

Determinada a carga solicitante em cada polia, será preciso dimensionar as torres, de forma que resistam a compressão gerada em sua estrutura. Definido o seu dimensionamento exterior como 6 m por 9 m, será avaliada qual a espessura necessária.

Para a realização, as dimensões internas serão tratadas como variantes, como mostrada na imagem.

Figura 28 – Variação de tensão e compressão - Treliça Trapezoidal



Fonte: Autoria Própria

O concreto tem uma resistência do a compressão definida de 40 MPa, e ao projeto a tensão não deverá passar de 13,33 MPa, pelo fator de segurança.

$$13,33 \cdot 10^6 \text{ Pa} = \frac{23226744,6 \text{ N}}{54 \text{ m}^2 - 6x^2} \quad (4.22)$$

$$x = 2,95 \text{ m} \quad (4.23)$$

Dessa forma, a área da seção transversal corresponde a  $1,7424 \text{ m}^2$ , suficientes para o suporte da carga solicitante.

#### 4.8.4 Definição dos Contrapesos

O sistema de elevação do trecho central da ponte deve contar com o auxílio dos contrapesos, que tornam possível, um trabalho do motor reduzido e vantajoso. Ao projeto, foi definido, que os contrapesos, devem corresponder a 80% da carga estrutural do trecho de elevação, correspondem a um paralelepípedo maciço de aço. Isso determina que cada contrapeso deve ter 947,06 t. O restante dos 20% da carga, será exercido pelo trabalho do motor.

A distância do contrapeso até uma das extremidades até da torre será definida a 10cm, considerada como segura, já que não existira forças externas que deslocaram o contrapeso do seu movimento natural.

Logo suas dimensões serão 8,65m de comprimento e 5,7 m de largura. A determinação de sua altura será definida por:

$$8,65 \text{ m} \cdot 5,7 \text{ m} \cdot h \cdot \frac{7800 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 947060 \text{ kg} \quad (4.24)$$

$$h = 2,46 \text{ m} \quad (4.25)$$

## 5 PROTÓTIPOS

A realização e conclusão deste projeto foi auxiliada e complementada pela elaboração de protótipos, físico e virtual. Que posterior ao dimensionamento, considerado o motivo de pesquisa, tornam de suas características visíveis, foi considerado de relevante importância.

### Protótipo Físico

Com caráter de demonstração estrutural, a sua construção, foi utilizado MDF (Placa de fibra de média densidade), como material primário, pintados com tintas spray. A Figura 29 demonstra o resultado da montagem.

Figura 29 – Protótipo Físico

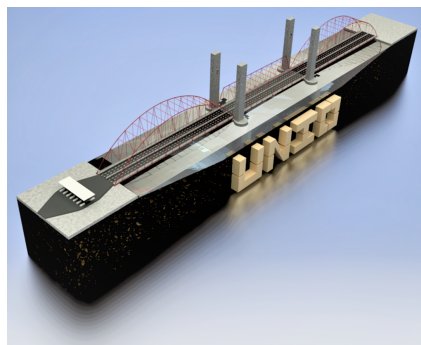


Fonte: Autoria Própria

### Protótipo Virtual Tridimensional

Realizado em AutoDesk Inventor, o protótipo Virtual foi modelado para expressar as verdadeiras dimensões e utilizações de materiais definidos para a estrutura. A Figura 30 exibe suas características com perspectiva em três dimensões.

Figura 30 – Protótipo Virtual



Fonte: Autoria Própria



# REFERÊNCIAS

- AOKI, Nelson. Dogma do Fator de segurança. In: SEFE - Seminário Engenharia Fundações Especiais e Geotecnia, VI, 2008, São Paulo **Anais...** São Paulo: Centro Convenções FECOMERCIO, 2008. p. 22.
- BEER, Ferdinand P. et al. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Mcgraw Hill Bookman. 2011.
- DOBROVOLSKI, V. et al. **Elementos de Construção de Máquinas**. Moscou: Mir Moscou, 1976. 540 p.
- FAKURY, H. et al. **Dimensionamento básico de elementos de estrutura de aço**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 55 p.
- GORGES, wilson. **pontes: introdução à engenharia de pontes**. Curitiba: PUC paraná. 2005.
- HIBBELER, R. C.. **Estática: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson. 2010.
- HIBBELER, R. C.. **Resistencia dos materias**. 5. ed. São Paulo: Pearson. 2013.
- JAYME, Mason. **Pontes em concreto armado e protendido**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: S.A.. 2011.
- KOGLIN, terry l. **Movable Bridges Engineering**. 1. ed. Nova Jersey: wiley. 2003.
- MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de Concreto Armado**. 1. ed. São Paulo: Blucher. 2008.
- MASON, Jayme. **PONTES EM CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO**. Livros técnicos e científicos. Rio de Janeiro: S.A.. 1977.
- MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de Máquinas: guia para engrenagens, correias, rolamentos, chavetas, molas, cabos de aço e árvores**. 9. ed. São Paulo: Érica Ltda. 2011.
- NORTON, Robert L.. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: BookMan. 2013.
- PFEIL, Walter. **PONTES EM CONCRETO ARMADO: ELEMENTOS DE PROJETOS, SOLICITAÇÕES, DIMENSIONAMENTOS**. Livros técnicos científicos. Rio de Janeiro: S.A.. 1979.
- VASCONCELOS, Augusto C.. **Pontes Brasileiras Viadutos e Passarelas**. São Paulo: Pini Editora. 1993.