



João Pedro Mendonça Barbosa
Marden Luís Chagas
Rafael Cordeiro Vieira
Túlio de Paulo Corrêa
Wesley José de Oliveira
Wesley Lúcio da Silva

Desenvolvimento de uma Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical

Arcos - MG

05 de dezembro de 2018

João Pedro Mendonça Barbosa
Marden Luís Chagas
Rafael Cordeiro Vieira
Túlio de Paulo Corrêa
Wesley José de Oliveira
Wesley Lúcio da Silva

Desenvolvimento de uma Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical

Projeto apresentado à disciplina de TAI IV –
Trabalho Acadêmico Integrador IV do curso
de Engenharia Mecânica ministrado no Insti-
tuto Federal de Minas Gerais, Campus Arcos.

Instituto Federal de Minas Gerais

Campus Arcos

Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Flávio Fernandes Barbosa Silva

Arcos - MG

05 de dezembro de 2018

Resumo

O projeto é um seguimento do Trabalho Acadêmico Integrador III [12], realizado no primeiro semestre de 2018 por alunos do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Avançado Arcos*. Desenvolvido, este, com o prazo para a finalização do mesmo, ao segundo semestre de 2018. A Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical é constituída por uma plataforma, que se eleva verticalmente, situada em duas extremidades, a fim de possibilitar o tráfego rodoviário entre dois locais de difícil acesso, assim como o tráfego náutico perpendicular abaixo da plataforma. Portanto, o objetivo deste trabalho é o projeto de uma ponte levadiça treliçada de ascensão vertical, onde tal ponte foi estudada e dimensionada. Foi construído um protótipo representativo, e realizado a animação em 3D no *software Inventor 2016* para uma visualização clara do projeto, onde o mesmo, foi idealizado afim de promover um melhor tráfego de veículos entre as cidades de Santos e Guarujá, permitindo o normal tráfego náutico local.

Palavras-chaves: Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical. Travessia Santos-Guarujá.

Lista de ilustrações

Figura 1 – D.C.L. Carga distribuída.	11
Figura 2 – Distribuição das vigas na pista.	11
Figura 3 – D.C.L. Carga pontual.	11
Figura 4 – D.C.L. esforço cortante.	12
Figura 5 – Momento máximo total.	12
Figura 6 – Propriedades geométricas de perfis estruturais.	14
Figura 7 – Gráfico de deflexão da viga.	15
Figura 8 – Momento gerado na torre.	16
Figura 9 – Gráfico da curva de deflexão da torre.	17
Figura 10 – Mecanismo de funcionamento da parte central.	18
Figura 11 – Raio do cabo.	20
Figura 12 – D.C.L. Peso Parte Central.	21
Figura 13 – Motor W50.	23
Figura 14 – Gerador Diesel.	25
Figura 15 – Bateria e motores elétricos.	26
Figura 16 – Chave interruptora.	26
Figura 17 – Modelagem 3D.	27
Figura 18 – Protótipo.	27
Figura 19 – Cronograma.	29

Sumário

1	INTRODUÇÃO	5
2	OBJETIVOS	6
2.1	Objetivos Gerais	6
2.2	Objetivos Específicos	6
3	JUSTIFICATIVA	7
4	METODOLOGIA	8
4.1	Ponte Levadiça com Ascensão Vertical	8
4.2	Tempo de Elevação	8
4.3	Potência Motora e Componentes	9
5	ESTUDO DE FLEXÃO DA PARTE CENTRAL DA PONTE	10
5.1	Deflexão na viga central	14
5.2	Deflexão na torre	16
6	MECANISMO DE FUNCIONAMENTO - CABOS DE AÇO	18
6.1	Sistema de contrapeso	18
6.2	Fundamentação de tais proporções - Cabos de aço	18
7	DIMENSIONAMENTOS E COMPONENTES - MOTOR E EIXO	21
7.1	Dimensionamento do eixo	21
7.2	Especificações do motor e redução	23
7.3	Dispositivo de segurança	25
8	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	26
9	CONCLUSÃO	27
	Bibliografia	28
	APÊNDICE A – CRONOGRAMA	29

1 Introdução

O projeto Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical foi baseado na necessidade da transição Santos-Guarujá no estado de São Paulo. As duas cidades possuem um tráfego intenso, a travessia mais rápida é realizada através de balsas, que suportam 40 veículos por viagem com duração de aproximadamente 7 minutos, e por vias terrestres o trajeto tem duração de 50 minutos. A demanda das balsas chega a 23 mil usuários em média por dia, gerando saturação e filas de até 2 horas. Dentre as soluções cogitadas e com menos agressividade ao meio ambiente, está a ponte treliçada levadiça vertical [6].

Tais pontes, são utilizadas para que possa haver tanto o tráfego rodoviário quanto marítimo, através da elevação de sua parte central quando necessária à passagem de embarcações.

O TAI IV (Trabalho Acadêmico Integrador) apresenta uma continuidade do TAI III[12] onde a ponte treliçada levadiça vertical foi estudada estruturalmente. O objetivo atual é realizar os dimensionamentos estruturais e especificar o motor ideal para o vão central da ponte, onde ocorre a ascensão da mesma.

2 Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho consiste no dimensionamento de uma ponte levadiça a ser construída no canal de Santos-SP e Guarujá-SP, viabilizando melhor a passagem rodoviária, sem prejudicar o tráfego náutico.

As Pontes Levadiças com Ascensão Vertical são um meio encontrado pelo homem para possibilitar o acesso sobre obstáculos aquáticos a lugares, sem que prejudique o fluxo fluvial ou marítimo, de embarcações. É um modelo de ponte elaborado especificamente para este fim, e que apresenta grandes vantagens comparada a outros modelos de pontes, como:

- Menor custo de construção comparada a outras pontes;
- Menor impacto ambiental comparada a outras pontes;
- Melhor manutenção comparada a outras pontes móveis;
- Viabilidade de trânsito fluvial ou marítimo. [12]

2.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho é referente a parte complementar do projeto elaborado em duas etapas, sendo a primeira desenvolvida no primeiro semestre de 2018 [12], e a parte complementar, final, neste segundo semestre de 2018. Na primeira etapa foi realizado o cálculo estrutural da Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical, a etapa final, possuiu os seguintes objetivos:

- Estudar e dimensionar o mecanismo de funcionamento da plataforma central da ponte;
- Realizar a modelagem matemática do projeto;
- Elaborar a Modelagem 3D da ponte no *Software Inventor 2018*;
- Finalizar o protótipo da Ponte Treliçada Levadiça com Ascensão Vertical.

3 Justificativa

A baixa acessibilidade de locomoção terrestre entre as cidades litorâneas de Santos-SP e Guarujá-SP, a difícil implementação de uma ponte que não prejudique o fluxo náutico no estuário de santos, complexa elaboração e forte agressão a localidade e vida marinha da região, além do alto custo de construção e manutenção faz necessário um projeto de ponte que facilite o tráfego de veículos terrestres sem prejudicar o meio ambiente e o fluxo náutico, com um menor custo de produção e manutenção. Portanto o projeto de uma ponte levadiça de ascensão vertical torna-se relevante, uma vez a ponte construída possibilitará a passagem de veículos terrestres entre as cidades e sobre demanda o vão central da ponte é erguido possibilitando a passagem de veículos náuticos.

A Ponte proposta pelo grupo possibilita a passagem de veículos terrestres e navios de grande porte. Um sistema interrompe a passagem dos veículos e eleva o vão central da ponte quando navios se aproximam, autorizando a passagem de veículos quando estes navios avançam. A ponte possui dois vãos fixos e um vão móvel elevado verticalmente por motores, o que reduz seus custos de produção e manutenção, além de não prejudicar o ambiente marinho em relação a uma construção de túnel, também pode ser instalada próxima a aeroportos devido a sua altura ser relativamente baixa, quando não há passagem de navios, onde seu vão móvel permanece à mesma altura dos vãos fixos.

Com base no estudo das dificuldades e demandas do trajeto de Santos-SP até Guarujá-SP, foi estabelecido que o projeto realmente é relevante para ser desenvolvido no Trabalho Acadêmico Integrador III[12] e IV. Vale ressaltar que o mesmo, tem grandes chances de futuramente se tornar um produto a ser apresentado para ambos os municípios.

4 Metodologia

Por consequência do dimensionamento realizado na primeira fase do projeto [12], é realizado a seguida definição para a conclusão. Com caráter complementar e com o objetivo de analisar e descrever através da configuração matemática os efeitos da elevação da extensão central da ponte.

O grupo desenvolvedor foi conduzido a promover a elaboração do projeto pelas teorias e modelos contemplados ao 4º período do curso de engenharia mecânica, o que remete tal delimitação.

Estabelece de relevância, elaborar a forma de maior eficiência a exercer a ideia deste projeto. Isto sugere determinar possibilidades e limitações, consequentemente, gerando tal desenvolvimento. Determinar propriedades relacionadas ao movimento vertical central da ponte, de modo, a garantir a integridade dos usuários e como da própria estrutura.

4.1 Ponte Levadiça com Ascensão Vertical

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 [3]. Muitas vezes, os obstáculos a serem vencidos na construção de pontes são correntes de água como rios, córregos e mares.

A ponte mais antiga já construída e registrada no mundo, é a ponte da Caravana situada sobre o rio Meles, em Izmir na Turquia. Esta ponte foi construída por volta de 850 a.C, possuindo então mais de 2860 anos, [10].

Devido a 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 Marchetti(2003) [8], pontes móveis são sistemas que possibilitam, quando necessário, a liberação do tráfego aquático.

4.2 Tempo de Elevação

A definição do tempo para a completa elevação da parte central é de fundamental importância, ao qual, deve ser definido a partir de análise de alguns fatores decisivos, sendo eles:

- Elevado peso estrutural, requer um prolongado tempo para a elevação;

- Contato próximo e sucessivo com a população, o que requisita cautela quanto à utilização do projeto estrutural;
- Acúmulo de possível engarrafamento gerado pela interrupção do trânsito rodoviário, que demanda a liberação do tráfego de forma mais rápida possível;
- Observação da dimensão de embarcações que passam pelo canal, suscita a elevação da ponte quanto a velocidade e tamanho da embarcação;
- Comparaçāo do tempo de elevação médio com projetos já completos, causa a necessidade de uma possível delimitação.

Condições que orientaram a definição de um tempo ideal, ao qual, a sua escolha será determinante para cálculos posteriores gerados pela elaboração continuada do projeto.

A partir de tal análise, foi-se possível, o estabelecimento de um tempo de 6 minutos para completa elevação, tempo esse, que, entende-se garantir um satisfatório auxílio quanto as prescrições determinadas. Um tempo que trará importante controle quanto a deslocação da estrutura como a segurança ao usuário, e que, ao mesmo tempo, proporcionará limitado engarrafamento gerado durante a paralisação do trânsito rodoviário. Este tempo, será definido como constante e independente à embarcação que por lá passa.

4.3 Potência Motora e Componentes

Definiu-se a utilização de quatro motores ligados à estrutura, sendo um motor por torre, afim de não os sobrecarregar. Dispõe como proposta a apropriação dos mesmos, junto à devida adaptação estrutural, que respeita o dimensionamento ideal já realizado.

Para que um motor seja capaz de exercer a atividade, é utilizado um eixo prolongado, permitindo também que a altura de elevação de cada torre seja a mesma, evitando o desgaste estrutural provocado por um possível contato do vão com a torre, potencialmente provocado pela diferença de altura relativa.

A partir da determinação do tempo para realizar a elevação da extensão, é possível determinar o motor ideal para a efetuação do trabalho exigido e ainda o dimensionamento do eixo prolongado que ligará cada torre.

5 Estudo de flexão da parte central da ponte

Com base nos dados obtidos durante o Trabalho Integrador III [12], foi realizado estudos para composição do trecho central da ponte. A partir disto, foi determinado os esforços atuantes na estrutura, onde definiu-se os elementos complementares, a fim de obter a carga crítica, como veículos e pessoas que trafegam sobre a ponte.

Colhendo informações sobre as vigas, foi observado que nelas são representados elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas, transferindo seus esforços aos seus eixos longitudinais, ou seja, transfere-se seu peso para as treliças de sustentação lateral, de forma que, gere um engastamento em ambos os lados da mesma.

Analizando o tráfego local que liga as cidades de Santos e Guarujá, foi traçado a circulação de veículos pesados, 18,15 metros de comprimento, e duas pessoas por veículo pesado, estimando-se que cada pessoa teria uma massa média de 80 kg. Tal estudo trouxe como resultado a massa crítica de interesse.

Sendo a circulação de veículos pesados de 18,15 metros e a relação de duas pessoas em cada caminhão, com uma massa média de 80kg

Tabela 1 – Massa distribuída na parte central.

Massa da parte central	4735,32 T
Massa total dos veículos pesados	462 T
Total de veículos pesados	14
Massa individual dos veículos pesados	33 T
Massa individual de cada pessoa	80 kg
Massa total das pessoas	2,24 T
Total de pessoas em cada veículo	2
Total de pessoas	28

Fonte: Próprios autores.

Foi estimado a massa total da parte central, em toneladas (T), de acordo com a tabela 1. Resultando em um peso total de:

$$\sum 4735,32 + 462 + 2,24 = 51.01MN \quad (1)$$

Com o peso total foi realizado o diagrama de corpo livre das vigas sob as pistas, e encontrado as resultantes de apoios como demonstrado na figura 1 e 2.

Com o valor da massa total distribuída, a carga pontual, figura 3, é de: $6631,04 \cdot 10^6 N \cdot m$.

O diagrama de corpo livre representa melhor as forças, podendo calcular as reações

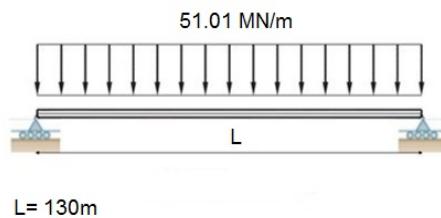


Figura 1 – D.C.L. Carga distribuída.

Fonte: Próprios autores.

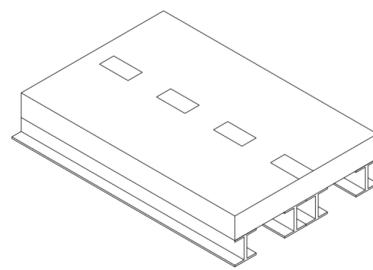
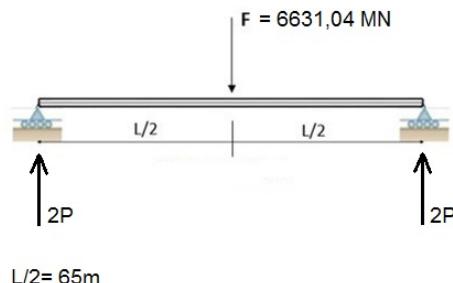


Figura 2 – Distribuição das vigas na pista.

Fonte: Próprios autores.

de apoio, realizando o somatório de momento em relação ao ponto A, como mostra na figura 3.



$$L/2 = 65\text{m}$$

Figura 3 – D.C.L. Carga pontual.

Fonte: Próprios Autores.

$$\sum Ma = 0 \quad (2)$$

$$-6631,04 \cdot 10^6 \cdot 65 + 2P \cdot 130 = 0$$

$$P = 165.8 \text{ MN}$$

O $\sum Ma$ é o somatório de momento em relação ao ponto A e o P é a variável dos apoios.

Com o valor de P, através do somatório de momento, foi plotado o gráfico de esforço cortante, afim de determinar os esforços atuantes.

Os dados do gráfico abaixo, figura 4, representam o valor de P, encontrado no momento, para que seja factível encontrar o momento máximo, visando qual seria o S_{req} , informado pelo manual de projetos figura 6, no qual estará o mais próximo do ideal para uma construção dessa escala.

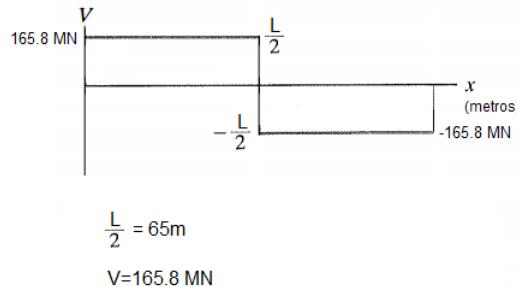


Figura 4 – D.C.L. esforço cortante.

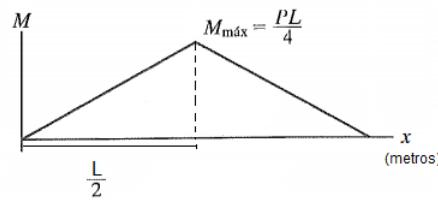
Fonte: Próprios autores.

O momento máximo pode ser obtido a partir da seguinte formula:

$$M_{máx} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (3)$$

Em que o $M_{máx}$ é o momento máximo total, P é a variável dos apoios e o L o comprimento da parte central da ponte. Obtendo-se então:

$$\frac{165770 \cdot 10^3 \cdot 130}{4} = 538.73 MN \cdot m$$



$$\frac{L}{2} = 65\text{m}$$

$$M_{máx} = 538.73 \text{ MN.m}$$

Figura 5 – Momento máximo total.

Fonte: Próprios autores.

A seleção dos aços estruturais foi realizada com base em um aço de baixa liga e uma resistência mecânica alta, utilizado em estruturas metálicas que buscam obter a

redução de peso devido a sua maior resistência se comparado com um aço carbono comum.

Tabela 2 – Opções de materiais na utilização da viga.

NBR - 7007	Aços	Resistência mínima ao escoamento (MPa)
	AR 415	415
ASTM	A 575 - Grau 50	345
	A 572 - Grau 60	415
NBR 7007	Grau MR - 250	250

Fonte: Próprios autores.

De acordo com as pesquisas realizadas, foi utilizado o aço AR 415. A tensão admissível obtida através da tensão de escoamento, é de:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{FS} \quad (4)$$

Onde σ_e é a tensão de escoamento, e o FS é o fator de segurança, em conformidade com relatório do TAI III [12] $FS=3$, obtém-se:

$$\frac{415}{3} = 138,33 MPa$$

Com o $M_{máx}$ e a quantidade de vigas na parte central definida, encontra-se qual o $M_{máx}$ de cada uma das vigas.

$$\frac{M_{máx}}{52} \quad (5)$$

O $M_{máx}$ é o momento máximo em relação a cada uma das partes distribuídas na viga. Sendo 52 o número de vigas na subdivididas em relação a parte central de 130 metros.

$$\frac{5387525000}{52} = 103,61 MN \cdot m$$

Com o valor da Tensão Admissível e o valor de cada parte das vigas, foi realizado o calcular do $S_{requerido}$, conforme os dados de sua aplicação, onde:

$$S_{req} = \frac{M_{máx}}{\sigma_{adm}} \quad (6)$$

O S_{req} , valor tabelado, encontrado em manuais de projetos, $M_{máx}$ é o momento máximo de cada uma das vigas e o σ_{adm} é a tensão admissível. Obtém-se:

$$S_{req} = \frac{103606250N.m(10^3mm/m)^3}{138,33 \cdot 10^6} = 748,97mm^3$$

Após o cálculo do S_{req} e com base na tabela encontrada no livro de Resistência dos Materiais, figura 6, foi obtido o modelo estrutural da viga W, baseando-se no S_{req} encontrado. [4]

Descrição	Seções de abas largas ou perfis em W				Unidades SI							
	Área mm × kg/m	Altura mm	Espessura da alma t_{alma}	Aba largura b_{aba}	Aba espessura t_{aba}		eixo x-x			eixo y-y		
					$10^6 mm^4$	$10^3 mm^3$	mm	$10^6 mm^4$	$10^3 mm^3$	mm	$10^6 mm^4$	$10^3 mm^3$
mm × kg/m	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
W460 × 68	8.730	459	9,14	154,0	15,4	297	1.290	184	9,41	122	32,8	
W460 × 60	7.590	455	8,00	153,0	13,3	255	1.120	183	7,96	104	32,4	
W460 × 52	6.640	450	7,62	152,0	10,8	212	942	179	6,34	83,4	30,9	
W410 × 85	10.800	417	10,90	181,0	18,2	315	1.510	171	18,0	199	40,8	
W410 × 74	9.510	413	9,65	180,0	16,0	275	1.330	170	15,6	173	40,5	
W410 × 67	8.560	410	8,76	179,0	14,4	245	1.200	169	13,8	154	40,2	
W410 × 53	6.820	403	7,49	177,0	10,9	186	923	165	10,1	114	38,5	
W410 × 46	5.890	403	6,99	140,0	11,2	156	774	163	5,14	73,4	29,5	

Figura 6 – Propriedades geométricas de perfis estruturais.

Fonte: [4]

A escolha da viga foi realizada com a análise de quantos kg/m ela possui, optando-se pelo modelo W410 x 46, que possui um $S_{req} = 774 \cdot 10^3 mm^3$.

5.1 Deflexão na viga central

Considerando toda a parte de elevação central como uma viga de material homogêneo, foi utilizada para o cálculo de deflexão uma equação diferencial de quarta ordem, demonstrada no livro Equações Diferenciais com Aplicações em Modelagem [14]:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = w(x) \quad (7)$$

Sendo:

E= Módulo de Young;

I= Momento de Inércia;

w(x)= Carga por unidade de comprimento.

Realizando a integração quatro vezes da equação chegou-se ao seguinte resultado:

$$y(x) = c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3 + \frac{\omega_0}{24EI}x^4$$

Utilizando a variável L como sendo o comprimento, e aplicando as condições de contorno $y(0)=0$, $y''(0)=0$, $y(L)=0$ e $y''(L)=0$ elimina-se as duas primeiras constantes de acordo com a ordem sequencial das integrações, ficando:

$$y(x) = c_2x + c_4x^3 + \frac{\omega_0}{24EI}x^4$$

Dando prosseguimento às condições de contorno é feita a aplicação em $y(L)=0$ e $y''(L)=0$, substituindo a variável x por L e realizando a derivação indicada:

$$y(L) = c_2L + c_4L^3 + \frac{\omega_0}{24EI}L^4 = 0$$

$$y''(L) = 6c_4L + \frac{\omega_0L^2}{2EI} = 0$$

Isolando c_3 e c_4 e realizando a substituição, chegou-se a seguinte função:

$$y(x) = \frac{\omega_0x}{24EI}(L^3 + x^3 - 2Lx^2) \quad (8)$$

Substituindo os valores de carga distribuída sobre a viga de 51,01 MN já calculados para um estado crítico de carga, juntamente com o momento de inércia de toda a parte central de $1,06 m^4$, o módulo de elasticidade do aço AISI 420 de 220 GPa e seu comprimento de 130 m, chega-se a seguinte função e gráfico, tendo uma deflexão de 0,08 m:

$$y(x) = -\frac{51,01 \cdot 10^6 \cdot x}{24 \cdot 220 \cdot 10^9 \cdot 1,06 \cdot 10^4} \cdot (130^3 + x^3 - 2 \cdot 130 \cdot x^2)$$

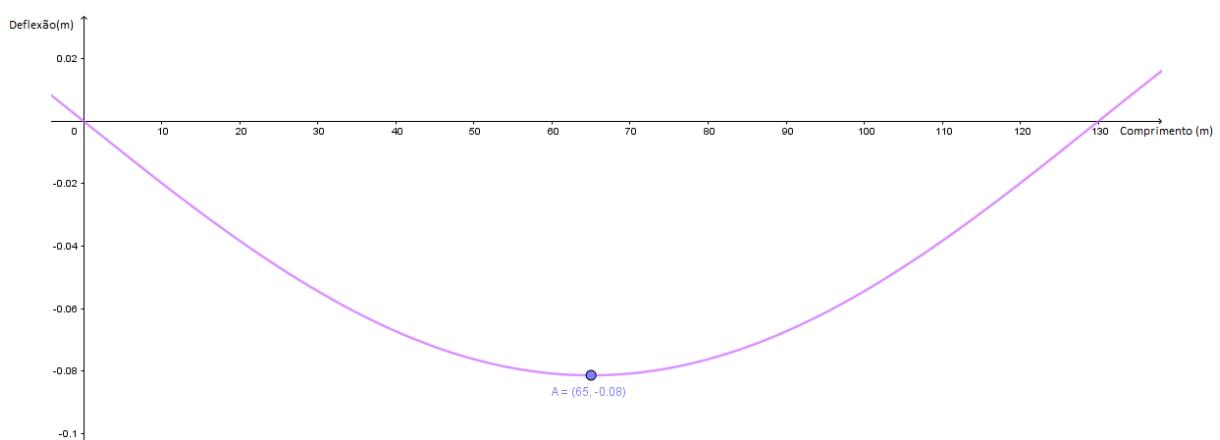


Figura 7 – Gráfico de deflexão da viga.

Fonte: Próprios Autores.

5.2 Deflexão na torre

Na deposição de carga na torre, é gerado, de forma consequente, um momento resultante, já que tal carga atua de forma deslocada do centro geométrico da estrutura. Isto significa que a base da torre, para evitar a tendência de giro, compensará com um momento equivalente e contrário ao atuante como mencionado.

A existência deste momento na estrutura, será capaz de defletir a torre ao longo de seu comprimento, algo que deverá ser analisado e contido se necessário. A determinação foi auxiliada pela mesma equação diferencial utilizada para as vigas. A definição de tal equação é justificada em estabelecer a torre como uma estrutura engastada em um de seus lados e ser livre pelo lado oposto, do formato:

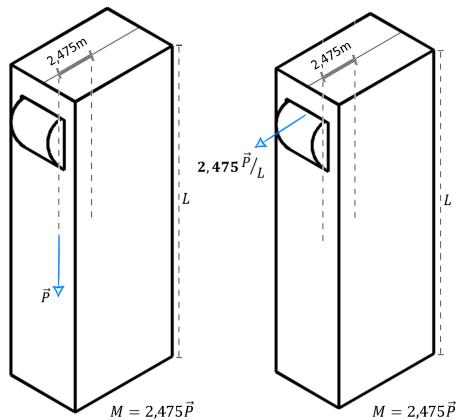


Figura 8 – Momento gerado na torre.

Fonte: Próprios Autores.

$$v = \frac{P}{6EI} \cdot (-x^3 + 3Lx^2) \quad (9)$$

Onde v , representa o comprimento de deflexão para cada unidade de comprimento x da torre analisada. A consideração do engastamento de um de seus lados, faz-se definir, dois valores iniciais:

$$v(0) = 0$$

$$v'(0) = 0$$

Onde a sua deflexão e curvatura de deflexão, a derivada primeira, são nulos na origem do plano cartesiano.

Determinando P com a carga atuante no eixo da polia superior com a soma do contrapeso e uma fração da massa do vão central, de modo a gerar, através de uma equivalente carga normal ao comprimento, que origina o mesmo momento atuante. E, é tradado como o módulo de elasticidade do aço, já que na estrutura há em grande parte a armadura de aço e I como o momento de inercia da figura de sua seção transversal. Como demonstrado:

$$v = -2,6 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 3,82 \cdot 10^{-4} \cdot x \quad (10)$$

Este resultado gera um $v_{máx} = 0,0178$ m, um resultado que representa segurança, já que a deflexão será em um valor próximo de zero. No gráfico a seguir, tem-se a deflexão da torre ao longe de sua estrutura de comprimento igual a 70.

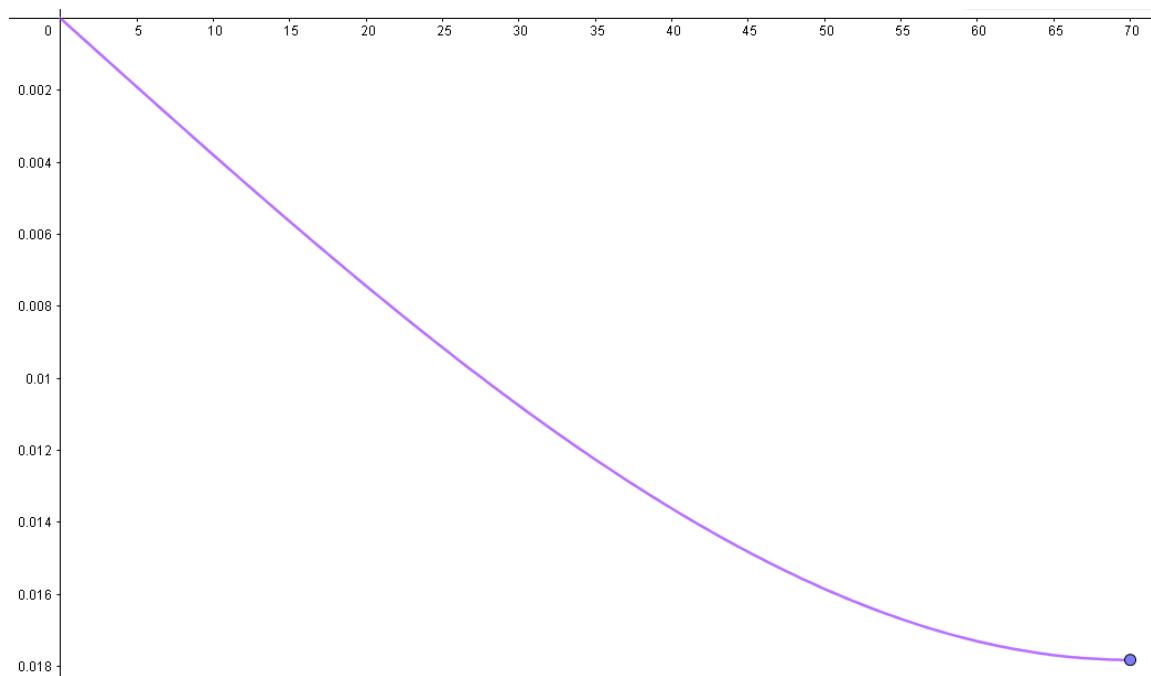


Figura 9 – Gráfico da curva de deflexão da torre.

Fonte: Próprios Autores.

6 Mecanismo de funcionamento - Cabos de aço

6.1 Sistema de contrapeso

O mecanismo de funcionamento foi projetado com um sistema de contrapeso, este definido anteriormente em [12], onde contrapesos são responsáveis por equilibrar 80% do peso total da estrutura da ponte, e os outros 20% ligados diretamente aos eixos motores, que possibilitaram a ascensão da ponte, além de duas polias e uma redução de engrenagem para cada motor, e 4 mancais, em cada lado da plataforma central.

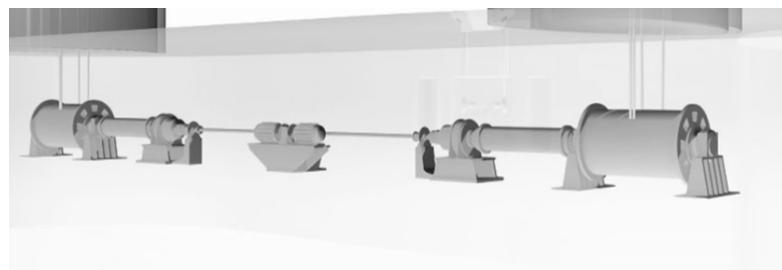


Figura 10 – Mecanismo de funcionamento da parte central.

Fonte: [9].

6.2 Fundamentação de tais proporções - Cabos de aço

O sistema de elevação da parte central da ponte é feito por cabos que são submetidos a tração, que estão ligados diretamente na parte central da ponte e ao contrapeso. Os cabos são dimensionados de maneira a suportar a tração gerada pela elevação do vão e o contrapeso. Com dados obtidos no TAI III [12], será utilizado 10 cabos em cada torre de elevação totalizando 40 cabos.

Por medida de segurança o acionamento da elevação do vão central não poderá ser feito com automóveis ou pessoas sobre o vão. Com tais determinações, os cabos serão projetados para elevar somente o peso estrutural de 4735,32t de cargas do trecho central mais 23,92t das vigas inferiores, totalizando 4759,24t.

Para aplicação dos cálculos realizou-se pesquisas de materiais utilizados em cabos, chegando à conclusão de usar o material AISI 420, devido a propriedades mecânicas que se enquadram no projeto. O AISI 420 é um aço inoxidável martensítico que possui um bom tratamento térmico de têmpera, e alta resistência à corrosão em diferentes meios, além de alta resistência ao desgaste [5].

Após estudos do material AISI 420 foram encontradas as seguintes propriedades:

Tabela 3 – Resistencia mecânica AISI 420.

Propriedades AISI - 420	
Límite de Resistência (MPa)	650
Módulo de Elasticidade (GPa)	220

Fonte: [5].

O dimensionamento do cabo a ser utilizado será pela tensão de limite de resistência à tração, devido a tensão atuante, limitando-se pelo fator de segurança utilizado no projeto. Com base nos estudos realizados a tabela abaixo, tabela 3, mostra que o limite de resistência é de 650 MPa, portanto a tensão a ser utilizada é 216,66 MPa pela utilização do fator de segurança 3. Sua seção transversal consequentemente é um círculo, sendo adotada como a variação do raio mais adequado para a elevação.

A tabela 4 mostra as composições químicas que o material possui, sendo que para que o material seja inoxidável deverá ter no mínimo 10,5% de cromo na sua composição [1].

Tabela 4 – Composição química do AISI 420.

Composição Química Aço Martensítico / AISI - 420	
C	0,15% máx.
Mn	1,00% máx.
Si	1,00% máx.
P	0,040% máx.
S	0,030% máx.
Cr	12,0% a 14,0%
N	0,50% máx.

Fonte: [5].

O material inoxidável possui características importantes, que para sua aplicação tornam-se necessárias devido as condições do ambiente onde se encontram, como a maresia, podendo com o tempo gerar corrosão, e assim perder suas características e propriedades, tornando-se um problema futuro.

Com o material a ser utilizado já definido, e com a tensão admissível de 216,66 MPa, foi possível encontrar qual o menor raio a ser utilizado, figura 11, no qual os 40 cabos possuirá.

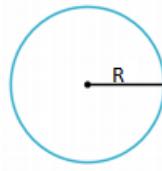


Figura 11 – Raio do cabo.

Fonte: Próprios autores.

Utilizando-se a equação seguinte:

$$\sigma_{adm} = \frac{P_c}{A} \quad (11)$$

Onde σ_{adm} é a tensão admissível, P_c é a força de tração feita por cada cabo e A é área circular dos cabos, figura 11.

$$216,66 \cdot 10^6 = \frac{1167203,61}{\pi \cdot r^2}$$

$$r^2 = \frac{1167203,61}{\pi \cdot 216,66 \cdot 10^6}$$

Portando o menor raio a ser utilizado é de:

$$r = 0,041m$$

O alongamento dos cabos é dado pela variação de seu comprimento original, com o seu comprimento final. Realizando os cálculos, sua formulação é dada por:

$$\delta = \frac{P_c \cdot L}{A \cdot E} \quad (12)$$

Onde P_c é a força de tração dos cabos, L é o comprimento, A é a área circular e E é o módulo de elasticidade do material.

$$\delta = \frac{1167203,61 \cdot 70}{\pi \cdot (0,04141)^2 \cdot 220 \cdot 10^9}$$

Portanto o elongamento de cada cabo será de:

$$\delta = 0,069m$$

7 Dimensionamentos e componentes - Motor e eixo

7.1 Dimensionamento do eixo

O eixo sofre esforços do peso da estrutura central e da força que o motor realiza para provocar a ascensão da ponte. O dimensionamento do eixo é de fundamental importância para o projeto, afim de garantir que todo o sistema opere sem problemas de quebras ou desgastes.

Cada torre possui um contrapeso que corresponde a 20% do peso total da parte central, que está ligada por cabos a um eixo e este impulsionado por motores. Portanto para realizar o dimensionamento do eixo, é necessário considerar que o motor utilizado deverá ser capaz de superar o mínimo de 20% da massa total da parte central da ponte.

$$\text{Massa total} = 4,76 \text{ toneladas}$$

$$20\% \text{ da massa total} = 951.848 \text{ kg}$$

$$\text{Peso da parte central da ponte, referente a } 20\% \text{ da massa total} = 9,34 \text{ MN}$$

Com a massa total da parte central, encontra-se a força peso, que estará atuando sobre cada eixo do motor, e através da equação de cálculo do momento, equação 2, obtém-se a força perpendicular provocada sobre cada eixo.

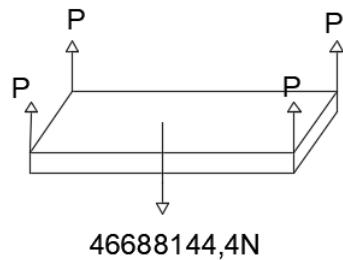


Figura 12 – D.C.L. Peso Parte Central.

Fonte: Próprios Autores.

$$P = 9,34 \text{ MN}$$

$$\sum \overrightarrow{Ma} = 0$$

$$-P \cdot 65 + 2F \cdot 130 = 0 \quad (13)$$

$$F = 2,34 \text{ MN}$$

Em que P é a força peso equivalente a 20% que atua no um eixo, F são as duas forças exercidas pelo eixo contrária a força peso, e 65 e 130 as distâncias até o ponto A.

Através do diagrama de corpo livre mostrado na figura 12 da parte central e do cálculo de momentos, encontra-se a força necessária que cada motor deve realizar para realizar a ascensão da parte central da ponte. o Torque é definido como:

$$T = F \cdot c \quad (14)$$

Para encontrar o raio do eixo (c), utiliza-se a fórmula da torção, encontrada abaixo:

$$\tau_{adm} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (15)$$

Onde J é o momento polar de inércia da área da seção transversal, calculado pela equação a seguir:

$$J = \frac{\pi \cdot c^4}{2} \quad (16)$$

$$J = \frac{\pi \cdot c^4}{2}$$

Substituindo o momento polar de inércia na equação de τ_{adm} (14):

$$\tau_{adm} = \frac{2 \cdot T \cdot c}{\pi \cdot c^4}$$

$$c^2 = \frac{2 \cdot 2.334.407,22}{\pi \cdot 139 \cdot 10^6}$$

O menor raio para o eixo deverá ser de:

$$c = 0,1034m$$

Substituindo o raio c na equação (13), encontra-se o torque resultante do peso de 20% da estrutura em cada motor:

$$T = 2.334.407,22 \cdot 0,1034$$

$$T = 241,38 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

7.2 Especificações do motor e redução

Com os cálculos anteriores foi possível especificar o modelo do motor. O grupo entrou em contato com a WEG Brasil, onde foi encontrado o motor WEG W50. Foi determinado o motor de 8 polos devido ao maior torque nominal, e do sentido de rotação do motor, possível em sentido horário e anti-horário.

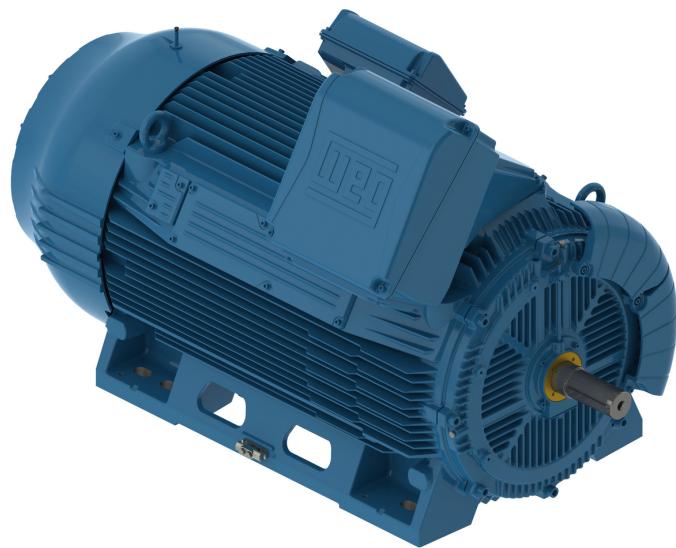


Figura 13 – Motor W50.

Fonte: [13].

Tabela 5 – Especificações do motor Weg W50.

Motor Weg W50 8 Polos	
Potência	590 kW (800 CV)
Torque	642 kgfm
Frequência	60 Hz
Tensão nominal	440 V
Corrente nominal	945 A
Rotação	900 Rpm

Fonte: [13].

A velocidade de ascensão ideal já definida indica que o RPM do eixo do motor deve ser baixa, portanto deve-se usar um motor de 8 polos, onde seu número de revoluções por minuto é 900 RPM, tabelado conforme a tabela 6. Mesmo assim ainda é necessário realizar a redução do RPM, afim de atingir a velocidade de ascensão determinada. Um inversor de frequência acoplado ao motor reduzirá as revoluções do motor até encontrar

0,9284 RPM, velocidade ideal, possibilitando que o motor trabalhe de acordo com o tempo de ascensão determinado.

Tabela 6 – RPM em relação ao número de polos.

Frequência de 60Hz		Frequência de 50Hz	
Nº de polos	Rotação Síncrona	Nº de polos	Rotação Síncrona
2 polos	3.600 RPM	2 polos	3.000 RPM
4 polos	1.800 RPM	4 polos	1.500 RPM
6 polos	1.200 RPM	6 polos	1.000 RPM
8 polos	900 RPM	8 polos	750 RPM

Fonte: [2].

O número de vezes que necessita aumentar o torque do motor, através da redução de RPM, se dá pela razão entre o torque da força peso realizada ao eixo, pelo torque do motor que é fornecido pela WEG [13]:

$$Redução = \frac{Torque\ do\ eixo}{Torque\ do\ motor} \quad (17)$$

$$Redução = \frac{241.377,7065}{6.295,8693} = 38.4\ vezes$$

Porém, como sabe-se que o mecanismo possui perdas em seus componentes, se faz necessário que seja considerada todas as eficiências.

$$Eff_{eng} = 96\% - Eficiência\ de\ engrenagem$$

$$Eff_{mancal} = 95\% - Eficiência\ de\ mancal$$

$$Eff_{polia} = 98\% - Eficiência\ de\ polia$$

Fonte: [7]

A eficiência total do mecanismo de funcionamento pode ser calculada através do produto da transmissão de engrenagens, do sistema de polia, e dos dois mancais no eixo.

$$Eff_{total} = Eff_{eng} \cdot 2 \cdot Eff_{mancal} \cdot Eff_{polia} \quad (18)$$

$$Eff_{total} = 0,84$$

Para determinar ao certo quantas vezes deve ser realizada a redução, utiliza-se a relação:

$$Redução\ real = \frac{Redução}{Eff_{total}} \quad (19)$$

$$\text{Redução real} = \frac{38,3390593}{0,849072}$$

$$\text{Redução real} = 45,16$$

O sistema de redução irá reduzir os 900 RPM do motor em aproximadamente 46 vezes, pois como o torque é inversamente proporcional à velocidade de rotação, proporcionará que o motor tenha um torque maior que o torque realizado pela força peso no eixo.

Para que o motor chegue à mesma velocidade de ascensão definida, é necessário a utilização de um inversor de frequência, que reduzirá os 19,57 RPM, tabelado WEG [13] após a acoplagem do sistema de redução ao motor, nos 0,92 RPM desejados, sem que haja alteração no torque. [13]

7.3 Dispositivo de segurança

Em uma possível falta de energia elétrica os motores ficariam totalmente inoperantes. Por isso, possuem sistemas de segurança que acionam um freio quando estes estão desenergizados. Porém a falta de energia provoca a inutilização tanto das vias terrestre quanto náuticas, dependendo da posição de parada do sistema após a interrupção de energia elétrica. Afim de evitar a falta de funcionamento do projeto, inclui o dimensionamento de um gerador diesel, um dispositivo que transformará energia mecânica produzida por um motor diesel em energia elétrica que alimentará os motores da ponte.

No momento em que precisar de realizar a ascensão da ponte e falta de energia elétrica for constante, o gerador será acionado para suprir a demanda energética dos motores e equipamentos elétricos da ponte.



Figura 14 – Gerador Diesel.

Fonte: [11].

8 Construção do protótipo

Para a ascensão da parte central do protótipo foi utilizado 2 motores de vidro elétrico automotivo devido a estrutura não ser extremamente complexa, além da economia para o projeto do protótipo.

Os motores de 12 V são alimentados por uma bateria VRLA (Bateria Chumbo-Ácida Regulada por Válvula) de 12V e 7Ah e podem ser controlados automaticamente por um conjunto Arduino e Drive Ponte H L298N ou mecanicamente por uma chave seletora inversora de rotação.



Figura 15 – Bateria e motores elétricos.

Fonte: Próprios autores.

No protótipo foi utilizado uma chave interruptora de 6 pinos, figura 16, a qual funciona como um dispositivo inversor de rotação, onde seu esquema de ligação permite que ao direcionar a chave para um dos lados forneça energia para o dispositivo e ao inverter a chave ocorre a inversão de polaridade na alimentação, permitindo a rotação dos motores elétricos em ambos os sentidos.

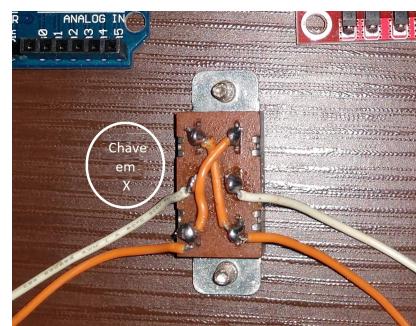


Figura 16 – Chave interruptora.

Fonte: Próprios autores.

9 Conclusão

Neste trabalho foi abordado sobre o assunto da ascensão de elevação da parte central da ponte, onde foi projetado o dimensionamento do mecanismo de elevação da mesma que interligará a cidade de Santos a Guarujá. O projeto estendeu-se durante dois semestres, sendo neste o foco na parte central da estrutura.

Dos cálculos realizados e com os resultados obtidos, foi possível garantir o funcionamento do mecanismo de ascensão da ponte, comprovado através dos cálculos de flexão, dimensionamento dos eixos, mecanismos de funcionamento dos cabos, dentre outros que os valores obtidos estão de acordo com os conceitos estudados e projetados.

Conclui-se que obteve êxito nos objetivos pretendidos no decorrer do projeto, tanto de forma teórica, quanto prática na construção do protótipo.

As imagens abaixo apresentam a modelagem 3D da ponte levadiça, figura 17, e o protótipo da ponte de ascensão vertical, figura 18.

Figura 17 – Modelagem 3D.



Fonte: Próprios autores.

Figura 18 – Protótipo.



Fonte: Próprios autores.

Bibliografia

- [1] Arinox. *Porcentagem mínima de cromo*. 2018. URL: <http://www.arinox.com.br/blog/os-tipos-de-aco-inox/>.
- [2] sala da eletrica. *Velocidade Motor Elétrico*. 2012. URL: <https://www.saladaeletrica.com.br/velocidade-motor-eletrico-trifasico/>.
- [3] Wilson Gorges. *Pontes: introdução à engenharia de pontes*. Bookman, 2005. URL: <https://docsslide.net/documents/pontes-prof-wilson-gorges.html>.
- [4] R. C. Hibbeler. *Resistencia dos Materiais 7^a edição*. Pearson, 2010.
- [5] Sid Aço Inox. *Tabela de Propriedades AISI - 420*. 2018. URL: <http://sidacoinox.com.br/tabela-de-propriedades/>.
- [6] Christiane Lourenço. *Travessia de balsas está no limite da capacidade*. Tribuna, 2016. URL: <http://www.atribuna.com.br/noticias/noticias-detalhe/cidades/travessia-de-balsas-esta-no-limite-da-capacidade/?cHash=a594911ba4b22f44f011b8705aad9ee0>.
- [7] Lucas Ribeiro Machado. *Rendimento em transmissões mecânicas*. UFPR, 2016. URL: <http://www.madeira.ufpr.br/>.
- [8] Osvaldemar Marchetti. *Fundações de pontes*. Bookman, 2003. URL: <https://www.blucher.com.br/livro/detalhes/pontes-de-concreto-armado-765>.
- [9] Bordeaux Métropole. *Le Pont Jacques Chaban-Delmas*. Acesso em 23 set. 2018. URL: https://www.youtube.com/watch?v=_f6SUjWVhfQ&t=437s.
- [10] Nadia Pontes. *Qual a ponte mais antiga do mundo?* Super Interessante, 2017. URL: <https://super.abril.com.br/blog/oraculo/qual-a-ponte-mais-antiga-do-mundo/>.
- [11] KOHLER SDMO. *KD2250-UF Grupo gerador*. Acesso em 27 nov. 2018. URL: <https://www.kohler-sdmo.com/EN/Products/PPR/Power-gen-products/KD2250-UF>.
- [12] Gabriel Figueiredo; Klinsmann Costa; Rafael Vieira. *TAI III*. 2018.
- [13] WEG. *W50 800 cv 8 Polos*. Acesso em 11 nov. 2018. URL: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-E1%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W50/W50-800-cv-8P-450L-K-3F-440-V-60-Hz-IC411---TEFC---B3D/p/13067854>.
- [14] Dennis G. Zill. *Equações Diferenciais com Aplicações em Modelagem*. Cengage Learning, 2016.

APÊNDICE A – Cronograma

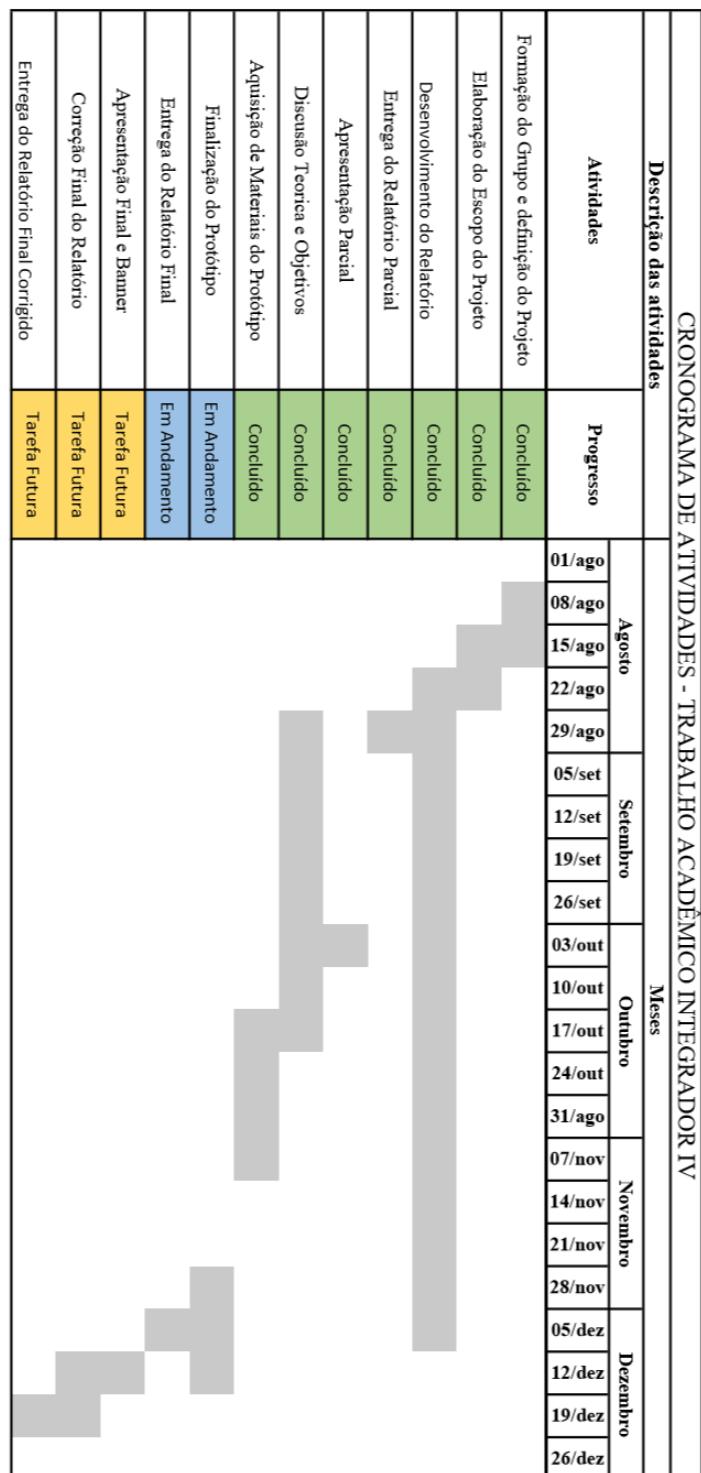


Figura 19 – Cronograma.

Fonte: Próprios Autores.