

UNIREDENTOR
ENGENHARIA CIVIL

YAGO DO CARMO ARAUJO
YAGO LESSA DIAS DIUNIZIO

ESFORÇOS EM UMA PONTE DE CONCRETO

Itaperuna – RJ
2021

YAGO DO CARMO ARAUJO
YAGO LESSA DIAS DIUNIZIO

ESFORÇOS EM UMA PONTE DE CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil ao Centro Universitário Redentor.

Orientador: Cristiano Pena Miller

Itaperuna – RJ

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, com certeza sem Ele eu jamais teria tido forças para concluir esse curso, sempre tive fé nos momentos difíceis e apesar de todas as complicações e problemas no percorrer do curso, Ele sempre me ajudou.

Agradeço aos meus pais, em especial a minha mãe, que sempre acreditou em mim, sempre me deu muita força, e nunca me deixou faltar nada durante todo o percurso desse trajeto.

Agradeço a minha namorada Emilly, que sem ela eu definitivamente não teria conseguido chegar aqui, sempre me deu forças em todos os momentos, principalmente nos de desespero.

Agradeço aos meus professores no decorrer do curso, por todos ensinamentos recebidos.

Agradeço ao meu orientador Cristiano, por toda paciência e mensagens fora de hora respondidas.

Agradeço ao meu parceiro de trabalho Yago Lessa Dias Diunizio, que sempre esteve junto durante o processo de desenvolvimento do trabalho

Yago do Carmo Araujo

Dedico este trabalho a Deus. Sem ele nada seria possível. Agradeço a minha família por todo o esforço investido na minha educação. Um agradecimento especial para minha mãe Lucina Lessa Fontes Dias e minha Avó Sara Lessa Fontes Vidal, por terem sido minha base ao longo da minha jornada.

Agradeço à minha namorada Thainá Lopes Leite Araujo que esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico me incentivando.

Sou grato pela confiança depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor Cristiano Pena Miller, orientador do meu trabalho. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo.

Agradeço ao meu parceiro de trabalho Yago do Carmo Araujo, que sempre esteve junto durante o processo de desenvolvimento do trabalho.

Yago Lessa Dias Diunizio

RESUMO

Um dos grandes desafios do homem, sempre foi chegar onde ninguém jamais chegou, conectando destinos diferentes não importando os obstáculos em seu caminho, sejam eles rios, mares ou até mesmo os mais profundos vales. Para se superar esses obstáculos, foram projetadas estruturas de modo que garanta segurança não só para quem utiliza essas obras, mas também para todos aqueles que vivem perto da mesma. As pontes estão presentes no mundo desde a época da ascensão de Roma, na conquista de novos territórios, quanto nos dias atuais, buscando maneiras de reduzir a distância de cidades, municípios, países, etc. No presente trabalho de conclusão de curso, buscamos identificar os esforços e analisarmos e demonstrarmos os cálculos e os procedimentos utilizados na mesma, com um correto dimensionamento e total segurança. Seguindo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para obras rodoviárias e a utilização de softwares para uma obtenção precisa dos esforços, e dos cálculos sobre a estrutura, visa-se analisar e explicar o projeto da construção da superestrutura de uma ponte que se localiza na divisa de Bom Jesus do Itabapoana – RJ e Bom Jesus do Norte – ES. Neste projeto foi aplicado os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia civil.

ABSTRACT

One of man's great challenges has always been to get where no one else has ever gone, connecting different destinations no matter the obstacles in their way, be they rivers, seas or even the deepest valleys. To overcome those obstacles, structures were designed to ensure safety not only for those who use these works, but also for all of those who live close to them. Bridges have been present in the world since the rise of Rome, in the conquest of new territories, as well as in the present day, seeking ways to reduce the distance from cities, municipalities, countries, etc. In this course conclusion work, we seek to identify the efforts and analyze and demonstrate the calculations and procedures used in it, with a current dimensioning and total security. Following the ABNT (Brazilian Association of Technical Norms) standards for road works and the use of software to accurately obtain the efforts and calculations on the structure, the aim is to analyze and explain the project for the construction of the superstructure of a bridge that is located on the border of Bom Jesus do Itabapoana – RJ and Bom Jesus do Norte – ES. In this project, the knowledge acquired during the civil engineering course was applied.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivos Gerais.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 Justificativa.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 Conceitos Gerais	15
2.1.1 Definição de ponte	15
2.1.2 Elementos constituintes	15
2.1.3 Normas brasileiras pertinentes.....	16
2.2 Exemplos de Pontes.....	16
2.3 Características de uma ponte.....	19
2.4 Classificações das pontes	21
2.5 Elementos para a elaboração dos projetos	21
2.6 Solicitações das Pontes	23
2.6.1 Cargas Permanentes	23
2.6.2 Pavimentação.....	23
2.6.3 Peso Próprio dos Elementos Estruturais	23
2.6.4 Ações Variáveis.....	23
2.6.5 Impacto Vertical.....	26
2.6.7 Atritos nos apoios.....	26
2.7 Forças no Guarda-Rodas ou Barreiras.....	27
3. METODOLOGIA.....	29
3.1 Superestrutura.....	29
3.2 Pré-dimensionamento	30
3.3 Concreto Armado	30
3.4 Características Geométricas da Seção	31
3.5 Cálculo das Ações.....	33
3.5.1 Ações permanentes	33
3.5.2 Peso próprio dos elementos estruturais	33

3.5.3	Peso próprio do revestimento do passeio de pedestres.....	34
3.5.4	Peso próprio da pavimentação das pistas de rolamento.....	35
3.5.5	Peso próprio das barreiras	35
3.5.6	Peso próprio do guarda-corpos	35
3.6	Ações variáveis	36
3.6.1	Cargas móveis	36
3.6.2	Ação do vento	36
3.7	Lajes.....	38
3.7.1	Dimensionamento das lajes	38
3.7.2	Linha neutra	39
3.7.3	Área mínima do aço	40
3.7.4	Detalhamento	40
3.7.5	Ancoragem	41
3.7.6	Transpasse.....	42
3.7.7	Armadura.....	43
3.7.8	Longarinas.....	43
3.7.9	Armadura.....	43
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1	Distribuição de cargas	44
4.1.1	Distribuição de cargas e diagrama de solicitações.....	44
4.1.2	Distribuição de cargas de vento de sobrepressão e sucção	45
4.1.2.1	Cálculos de vento de sobrepressão e sucção	47
4.1.2.2	Ações variáveis	50
4.1.2.3	Carga distribuída	50
4.1.2.4	Carga concentrada.....	50
4.1.3	Estado limite de carregamento.....	51
4.1.3.1	Combinação do momento fletor	51
4.1.3.2	Combinação de esforço cortante.....	51
4.1.3.3	Tabelas de esforços devido a momento fletor e combinações.....	52
4.1.3.4	Tabelas de combinação de força cortante	56
4.2	Dimensionamento das lajes.....	60
4.2.1	Determinação das lajes no tabuleiro	60
4.2.2	Lajes de transição	65
4.3	Dimensionamento das Lajes à Flexão.....	68

4.3.1 Dimensionamento das Armaduras Positivas e Negativas	69
4.3.1.1 Dimensionamento a flexão das lajes (ELU)	70
5. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ponte em vigas.....	16
FIGURA 2 – Ponte em treliça.....	16
FIGURA 3 – Ponte internacional da amizade.....	17
FIGURA 4 – Ponte suspensa.....	17
FIGURA 5 – Ponte em estaiada.....	18
FIGURA 6 – Ponte cantiléver.....	18
FIGURA 7 – Elementos componentes de uma ponte.....	19
FIGURA 8 – Exemplos de ponte.....	20
FIGURA 9 – Medidas prancha.....	21
FIGURA 10 – Area de atuação das forças.....	23
FIGURA 11 – Tabela de classes.....	24
FIGURA 12 – Veículos e dimensões.....	25
FIGURA 13 – Atrito nas peças.....	26
FIGURA 14 – Dimensionamento de um guarda rodas.....	27
FIGURA 15 – Seção da ponte em vigas I.....	29
FIGURA 16 – Composição da seção da ponte por figuras planas mais simples.....	30
FIGURA 17 – Seção transversal dividida em trapézios e retângulos.....	33
FIGURA 18 – Esquema de cálculo de carga da estrutura.....	43
FIGURA 19 – Diagrama de momento fletor.....	43
FIGURA 20 – Diagrama de esforço cortante.....	43
FIGURA 21 – Esquema de cálculo de carga de vento de sobrepressão.....	44
FIGURA 22 – Diagrama de momento fletor de carga de vento de sobrepressão.....	44
FIGURA 23 – Diagrama de força cortante de carga de vento de sobrepressão.....	44
FIGURA 24 – Esquema de cálculo de carga de vento de sucção.....	45
FIGURA 25 – Diagrama de momento fletor de carga de vento de sucção.....	45

FIGURA 26 - Diagrama de força cortante de carga de vento de sucção.....	45
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Esforços devido a momento fletor.....	50
TABELA 2 – Combinações de momento fletor.....	52
TABELA 3 – Esforços devido ao cortante.....	54
TABELA 4 – Combinações de esforço cortante.....	56
TABELA 5 – Esforços devido a momento fletor e combinações.....	59
TABELA 6 – Parâmetros de entrada da tabela Rush.....	60
TABELA 7 – Parâmetro de entrada da tabela de Rush para laje de transição.....	63
TABELA 8 - Pré-dimensionamento das lajes.....	66
TABELA 9 - Valores para dimensionamento das armaduras.....	67
TABELA 10 - Tabela 10 - Seções Transversais das lajes do tabuleiro.....	68
TABELA 11 - Seção A-A flexão das lajes (2 e 3 negativa).....	69
TABELA 12 - Seção A-A flexão das lajes (3 e 4 negativas).....	69
TABELA 13 - Seção A-A flexão das lajes (2 e 3 positivas).....	70
TABELA 14 – Comprimento de ancoragem.....	71

1. INTRODUÇÃO

Uma ponte de concreto é uma estrutura que suporta vários esforços nela aplicados. Sendo assim, é importante classificar os esforços que atuam na estrutura com o objetivo de compreender seu funcionamento através dos esforços internos e externos. Os esforços externos são aqueles que são aplicados por outros agentes. Os esforços internos são aqueles que aparecem nos pontos internos dos sólidos da estrutura, oriundos da existência dos externos (SOUZA & MOTA, 2004).

Esses esforços são entendidos através da aplicação e estudo das cargas envolvidas, sejam elas o peso próprio da estrutura ou agentes externos que tem contato direto com a ponte (OLIVEIRA & PIERROT, 2016).

Em geral, essas cargas podem ser divididas em dois grandes grupos: cargas permanentes que são as cargas de elementos estruturais e não estruturais unidos. Os elementos estruturais são aqueles que fazem parte do sistema de resistência e os elementos fixados não estruturais referem-se a parapeitos, barreiras, sinais, etc. E as transitórias, que podem ser os veículos, pedestres, fluidos, terremotos, gelo e colisões. Além disso, dependendo do tipo de estrutura, ela pode sofrer com a aplicação de outras forças, como as forças devido à fluência do encolhimento ou movimento dos suportes (TURMINA, 2016).

Os efeitos do tráfego de veículos em comparação com os efeitos do tráfego de caminhões são muito menores. Esses efeitos incluem forças de impacto (efeitos

dinâmicos), forças de frenagem, forças centrífugas e efeitos de outros caminhões simultâneos. Além do mais, dependendo da localização da ponte, os efeitos sísmicos podem ser irrelevantes ou podem governar o projeto do sistema de resistência de carga lateral (CAVALCANTE, 2019).

As forças estruturais devido ao fluxo de fluidos, água ou ar, são estabelecidas pela equação de Bernoulli, que é a principal equação dos estudos da mecânica dos fluidos, em combinação com coeficientes de correção (COSTA, 2017). As forças de gelo devem ser consideradas quando a estrutura ou os componentes da estrutura estão localizadas em águas de ambientes frios. Existem forças estáticas quando se cruza um lago, um reservatório ou um rio congelado, e há grandes forças dinâmicas quando o gelo se quebra em camadas que atingem a estrutura.

As temperaturas devem ser consideradas na análise da estrutura. O primeiro tipo é o da mudança uniforme de temperatura. Esse tipo de mudança afeta pontes longas e curtas. Além do mais, se os suportes forem restritos, causará força nos pilares da ponte. E o segundo tipo mudança de temperatura é um aquecimento não uniforme ou gradiente de resfriamento (CAVALCANTE, 2019).

Por fim, as cargas de colisão também devem ser consideradas no momento em que se calcula as forças atuantes em uma ponte de concreto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise dos esforços aplicados as vigas de uma ponte de concreto. Depois de realizar os cálculos estruturais, visa colocar em prática os conhecimentos aprendidos ao longo de todo curso de engenharia civil.

Além de fazer a análise e o dimensionamento de todos os elementos da superestrutura da ponte.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento da estrutura, agindo de acordo com as cargas atribuídas;
- Analisar e traçar os gráficos de esforço cortante e momento fletor para o comportamento da estrutura em concreto armado devido ao carregamento;
- Analisar e traçar os gráficos de vento de sobrepressão e vento de sucção na super estrutura devido ao carregamento;
- Apresentar as reações dos esforços adquiridos ao longo da estrutura, para que a ponte se torne estável.

1.2 Justificativa

As pontes surgiram da necessidade humana de superar os obstáculos naturais, conectando pontos para facilitar e agilizar o tráfego de veículos e pessoas, proporcionando também ajuda ao desenvolvimento socioeconômico das cidades.

O sistema estrutural das pontes busca superar esses obstáculos e viabilizar a travessia sobre os mesmos, atendendo à alguns requisitos como funcionalidade, segurança, estética e economia.

A engenharia está sempre em busca de soluções para diversas áreas, atentando-se sempre aos menores custos, menor tempo de execução e melhor desempenho. Nesse contexto, no concreto pretendido, existe um mercado competitivo por conta de seu bom desempenho e pequeno custo comparado aos demais métodos utilizados nos dias de hoje.

O dimensionamento de uma ponte é uma atividade complexa, pois devemos considerar diversos fatores e normas para realização deste procedimento. Assim, existe a utilização de alguns softwares para verificação dos cálculos e no auxílio da obtenção de modelos e informações necessárias para o projeto estrutural de uma ponte.

Com o objetivo de analisar e demonstrar os esforços em uma ponte de concreto, o trabalho presente apontará os cálculos estruturais e gráficos em uma

estrutura de concreto, analisando o comportamento, como esta age em relação as cargas atribuídas e mostrando os cálculos estruturais e gráficos de esforços da mesma.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Conceitos Gerais

2.1.1 Definição de ponte

“Denomina-se Ponte a obra destinada a permitir a transposição de obstáculos à continuidade de uma via de comunicação qualquer. Os obstáculos podem ser: rios, braços de mar, vales profundos, outras vias etc.” (MARCHETTI, 2008).

De acordo com o ponto de vista sob o qual sejam consideradas, as pontes podem classificar-se de diversas maneiras, sendo as mais comuns quanto à finalidade, quanto ao material com que são construídas, quanto ao tipo estrutural. Quanto ao tempo de utilização, quanto à fixidez ou mobilidade do estrado etc. (PFEIL, Walter, Pontes de Concreto Armado, P.32).

2.1.2 Elementos constituintes

Sob o ponto de vista funcional, as pontes podem ser desmembradas em três itens principais: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. A superestrutura é composta por lajes, vigas principais e secundárias e é o elemento de apoio imediato

do estrado, que compõe a parte útil da obra, sob o ponto de vista de sua finalidade. A superestrutura ganha diretamente as cargas do tráfego. Ela descreve as vigas principais como longarinas e as transversais como transversinas. O tabuleiro e o sistema principal de vigas trabalham de forma integrada (TURMINA, 2016).

2.1.3 Normas brasileiras pertinentes

- NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto;
- NBR 6120: Cargas para cálculo de estruturas de edificações;
- NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações;
- NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido;
- NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre;
- NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas;
- NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado;

2.2 Exemplos de Pontes

Ponte em viga, é considerada um tipo fácil e barato de construção.

Fig 1 - Ponte em Vigas



Fonte: Pedro & Carlos, 2020.

Ponte treliça é aquela cuja superestrutura consiste em treliças, que são elementos de ligação que compõem uma estrutura triangular.

Fig 2 – Ponte Treliça.



Fonte: Pedro & Carlos, 2020.

Ponte em arco possui esse nome por conta de sua forma. Seu material mais utilizado é o concreto, já que tem uma boa resistência, mas outros materiais como pedra ou aço também são utilizados. Uma ponte famosa que podemos usar como exemplo é a Ponte Internacional da Amizade, que liga Brasil e Paraguai.

Fig 3 - Ponte Internacional da Amizade



Fonte: Jackson Lima, 2020.

Pontes suspensas, também conhecidas como ponte pênsil, tem seu peso e sua carga aplicada a ela, sendo sustentadas por uma torre na extremidade e cabos de aço que distribuem o peso da ponte.

Fig 4 - Ponte Suspensa



Fonte: Pedro & Carlos, 2020.

Pontes estaiadas, são parecidas às pontes suspensas. Uma das principais diferenças está no número de cabos utilizados. Neste tipo de ponte, as torres de suporte utilizadas para os cabos são mais curtas e necessitam de menos cabos do que as pontes suspensas. Além do mais, as pontes estaiadas não possuem âncoras e cabos conectados aos pilares e se estendem ao longo de todo o comprimento da ponte.

Fig 5 – Ponte em Estaiada.



Fonte: Pedro & Carlos, 2020.

Ponte em balanço, também chamadas de pontes cantilever, são pontes que são apoiadas em estruturas sólidas em uma única extremidade. O tabuleiro das pontes em balanço se escora em vigas para dissipar a energia gravitacional e cinética proveniente do tráfego de veículos.

Fig 6 – Ponte Cantilever

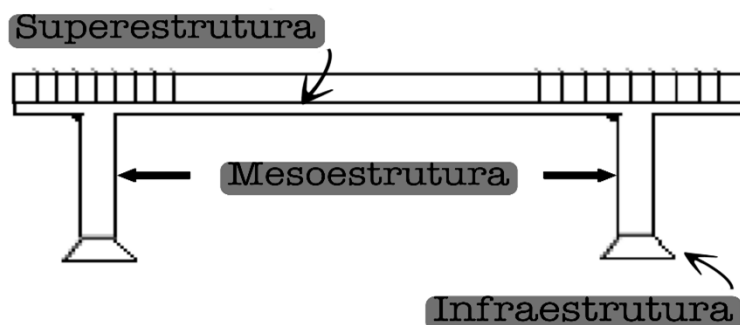


Fonte: Igor Pinheiro, 2019.

2.3 Características de uma ponte

A figura abaixo mostra os elementos que compõem uma ponte, sendo eles: mesoestrutura; superestrutura e infraestrutura.

Fig 7 – Elementos componentes de uma ponte.



Fonte: Yago Lessa, 2021.

Infraestrutura é a parte de uma ponte que é constituída por elementos que tem como objetivo apoiar o terreno e os esforços transmitidos da superestrutura para a mesoestrutura. A infraestrutura, ou fundação, é composta pelos elementos estruturais sob os quais são transmitidos ao terreno no qual a obra está inserida, de uma forma segura e compatível com as características do solo (MARCHETI, 2008).

Mesoestrutura é o elemento que recebe os esforços da superestrutura e os transmite à infraestrutura. A mesoestrutura é composta pelos apoios, que são elementos estruturais que se desenvolvem preferencialmente no sentido vertical podendo também ser inclinados cuja finalidade é fazer chegar às fundações as reações da superestrutura. Estes apoios intermediários subdividem em vãos parciais a extensão total da ponte (MARCHETI, 2008).

A morfologia dos apoios compreende as seguintes soluções:

- Pilares-parede;
- Pórticos;
- Paliçadas;
- Pilares únicos ou apoios em T;
- Torres.

Superestrutura é o elemento de suporte do estrado por onde se trafega, portanto, é a parte útil da obra (MARCHETI, 2008).

Se localiza em cima dos apoios e é constituída pelos seguintes elementos:

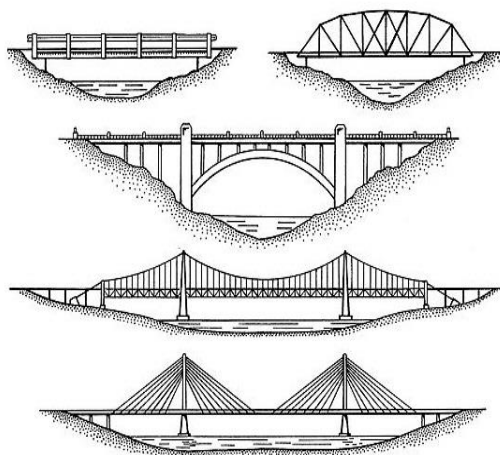
- Tabuleiro;
- Estrutura principal;
- Aparelhos de apoio;
- Enrijamentos;
- Pendurais;
- Timpanos
- Cortinas e abas laterais:

- Juntas de dilatação;
- Dispositivos de proteção;
- Placas de transição,
- Elementos de captação e drenagem.

2.4 Classificações das pontes

A classificação pode ser realizada levando em consideração várias características, e as mais comuns são: a extensão do vão, a finalidade, os materiais utilizados para a sua construção, tipo estrutural, durabilidade e o tipo de tráfego a ser utilizado.

Fig 8 – Exemplos de pontes.

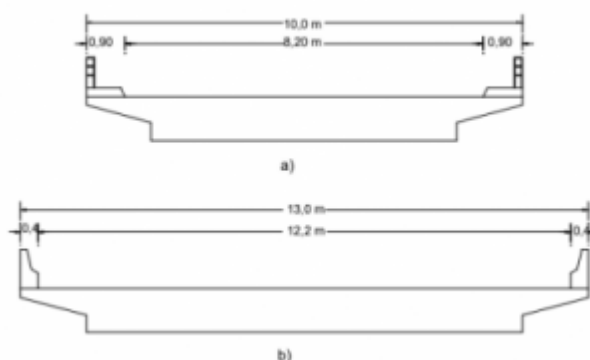


Fonte: Igor Pinheiro, 2019.

2.5 Elementos para a elaboração dos projetos

Os elementos geométricos de uma ponte são originados das características da via e do seu próprio estrado. Estes dependem das condições técnicas pré-estabelecidas pelos órgãos públicos e de acordo com suas jurisdições. Já os elementos geométricos de estrado dependem das características funcionais da ponte (PFEIL, 1979).

Fig 9 - Medidas prancha.



Fonte: Joebson Lima, 2019.

Segundo PFEIL (1979) o projeto é condicionado por diversos elementos que são definidos abaixo:

- Tramo de uma ponte – é a parte de sua superestrutura localizada entre dois elementos contínuos da mesoestrutura;
- Vão teórico do tramo – é a distância medida horizontalmente entre os centros de dois aparelhos de apoios consecutivos;
- Altura de construção – em uma determinada seção é a distância medida verticalmente, entre o ponto mais alto da superfície do estrado e o ponto mais baixo da superestrutura, na seção considerada. É um elemento de grande importância, já que muitas vezes condiciona o tipo de estrutura a ser adotado;
- Altura livre embaixo da ponte – em uma determinada seção é a distância, medida verticalmente, entre o ponto mais baixo da superestrutura e ponto mais alto do obstáculo transposto pela ponte.
- Escondidade – quando o eixo longitudinal da ponte não forma um ângulo reto com o eixo longitudinal do obstáculo transposto, diz-se que a ponte é oblíqua ou esconsa. Uma ponte é esconsa à direita ou à esquerda quando seu eixo longitudinal se inclina para a direita ou para a esquerda da perpendicular ao eixo longitudinal do obstáculo transposto. Ponderamos ainda como elementos geométricos para a definição do nosso projeto a largura das pontes e os seus gabaritos.

Os elementos normativos tem como finalidade fornecer uma base comum para o trabalho dos engenheiros, quantificar os valores mínimos de segurança e definir métodos básicos de cálculo relacionados ao design.

2.6 Solicitações das Pontes

2.6.1 Cargas Permanentes

As cargas permanentes podem ser mencionadas como a carga produzida pelo próprio peso da estrutura e por elementos que estão permanentemente fixos a estrutura, tais como guarda-corpo, guarda-rodas, defensas, passeio, pavimentação, postes de iluminação, etc (MARCHETTI, 2008).

A ABNT NBR 7187:2003, Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido, traz como indispensável a verificação do peso próprio dos elementos estruturais, peso da pavimentação, dos trilhos, dos dormentes, dos lastros, dos revestimentos, das barreiras, dos guarda-rodas, dos guarda-corpos, de dispositivos de sinalização, os empuxos de terra e de líquidos, desde que estes atuem de maneira continua.

2.6.2 Pavimentação

Também de acordo com a ABNT NBR 7187:2003, na avaliação das cargas devidas ao peso da pavimentação deve ser adotado o peso específico do material ou o mínimo de 24 kN/m^3 prevendo-se uma carga adicional de 2 kN/m^2 , para possível recapeamentos futuros.

2.6.3 Peso Próprio dos Elementos Estruturais

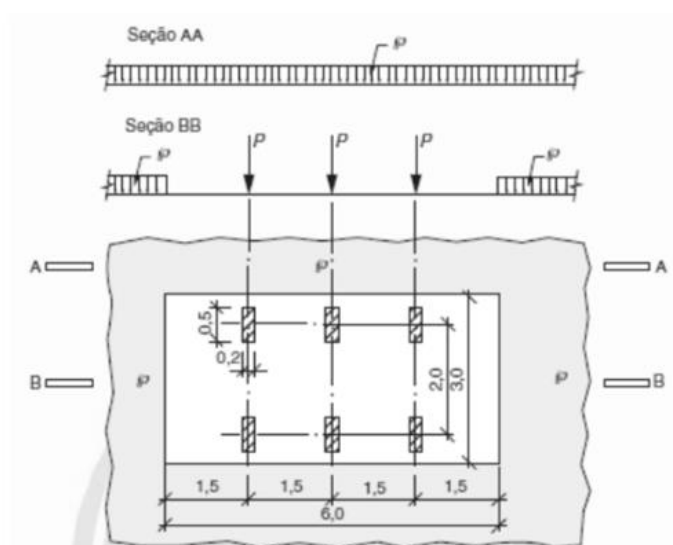
De acordo com a ABNT NBR 7187:2003, deve-se adotar no mínimo 25 kN/m^3 de peso próprio para o concreto armado.

2.6.4 Ações Variáveis.

As ações variáveis, aplicadas nas estruturas de pontes, viadutos e passarelas, estão previstas e normatizadas pela ABNT NBR 7188:2013 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Cargas móveis são todas as cargas produzidas pelo tráfego de veículos e pessoas que circulam na ponte.

A ABNT NBR 7188:2013 define cargas estáticas, a sua disposição e intensidade, para verificações e dimensionamento dos elementos estruturais. A carga móvel rodoviária padrão TB-450 é constituída por um veículo tipo de 450 kN, com seis rodas, $P = 75$ kN (sendo P o valor estático de uma roda do veículo), três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18,0 m², circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5$ kN/m² (sendo p o valor estático da carga móvel uniformemente distribuída).

Fig 10 - Area de atuação das forças.



Fonte: ANBT NBR 7188, 2013.

A tabela abaixo apresenta os tipos de veículos relacionados as classes, o peso adotado e as cargas distribuídas:

Fig 11 – Tabela de classes.

Classe da ponte	Veículo			Carga uniformemente distribuída				
	Tipo	Peso total		p		p'		Disposição da carga
		kN	t _f	kN/m ²	kgf/m ²	kN/m ²	kgf/m ²	
45	45	450	45	5	500	3	300	Carga em toda a pista
30	30	300	30	5	500	3	300	Carga p' nos passeios
12	12	120	12	4	400	3	300	

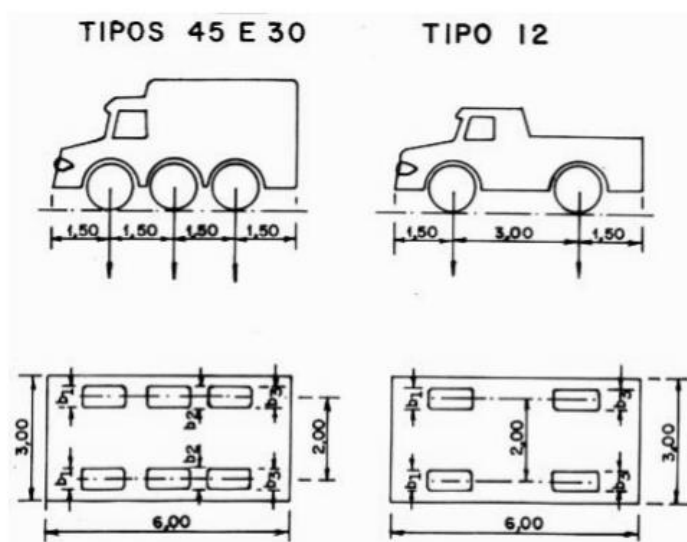


Fonte: NBR 7188, 1982.

Segundo PFEIL (1979), a carga móvel, também conhecida como carga útil, pode se localizar em posições variáveis sobre o tabuleiro da ponte. Para isso, o veículo deve ser orientado no sentido do tráfego e ter sua posição variada longitudinalmente (seção mais solicitada) e transversalmente (viga mais solicitada). No dimensionamento, considera-se todas essas posições pelo método da linha de influência para gerar uma combinação de cargas. O veículo, além do peso, ainda possui as cargas geradas pelo impacto vertical e lateral. O impacto é considerado através de um acréscimo percentual na carga. Para o cálculo do trem tipo a roda do veículo deve-se encostar no guarda-rodas, posição mais desfavorável a estrutura.

A figura a seguir apresenta os dias de veículos e a sua distância entre os eixos para a realização dos cálculos das cargas a serem aplicadas em cada área onde temos o contato da roda com o asfalto aplicado a estrutura:

Fig 12 – Veículos e Dimensões.



Fonte: NBR 7188, 2013.

2.6.5 Impacto Vertical

Pela norma 7188 (2012) as cargas móveis verticais características devem ser majoradas para o dimensionamento de todos os elementos estruturais pelo Coeficiente de Impacto Vertical (CIV), obtendo-se os valores (Q) e (q) para o dimensionamento dos elementos estruturais.

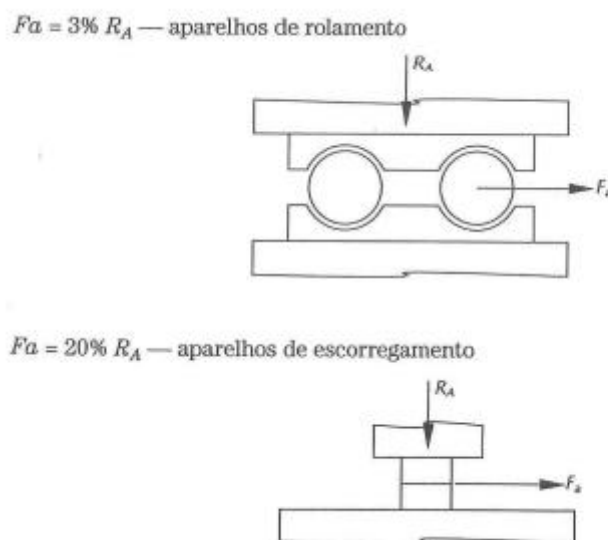
- CIV = 1,35 para estruturas com vão menor do que 10,0m.
- $CIV = 1 + 1,06 * (20 \text{ Liv} + 50)$ para estruturas com vão entre 10,0 e 200,0m. Onde:
- Liv é o vão em metros para o cálculo CIV conforme o tipo da estrutura, sendo:
- Liv = L é usado para estruturas de vão isostático;
- Liv é a média aritmética dos vãos nos casos de vãos contínuos;
- Liv é o comprimento do próprio balanço para estruturas em balanço;
- L é o vão em metros.

2.6.7 Atritos nos apoios

Segundo MARCHETTI o atrito nos apoios é um esforço que deve ser levado em conta no cálculo dos aparelhos de apoio, pilares e encontros. Seu efeito é

geralmente considerado apenas da infraestrutura da ponte. Segundo a NBR 7187, deve-se considerar as seguintes forças de atrito nos aparelhos de apoio:

Fig 13 – Atrito na Peça.



Fonte: Marcheti, 2008.

2.7 Forças no Guarda-Rodas ou Barreiras

Para o cálculo do guarda-rodas, segundo a norma NBR 14.885/2004 as barreiras devem ser projetadas para resistir a uma solicitação transversal de uma carga dinâmica concentrada, aplicada na borda superior da barreira, de dentro para fora da pista de, no mínimo, 200kN.

Abaixo a figura a seguir apresenta o dimensionamento de um guarda-rodas (barreira) utilizado nas rodovias federais:

3. METODOLOGIA

A metodologia do projeto atual foi baseada no trabalho “PROJETO ESTRUTURAL DE UMA PONTE EM CONCRETO ARMADO NA DIVISA ENTRE AS CIDADES DE BOM JESUS DO NORTE (ES) E BOM JESUS DO ITABAPOANA (RJ)” das autoras Lara Alves da Silva Pinto, Luana Cunha Valleriote e Thaís Nunes Rodrigues.

Demonstraremos neste capítulo os procedimentos necessários para a elaboração do projeto. Para a realização deste trabalho, calcularemos apenas a superestrutura, a mesoestrutura e a infroestrutura apresentadas serão hipotéticas.

3.1 Superestrutura

Obtém-se a largura da seção transversal através da soma dos valores das larguras dos seguintes elementos:

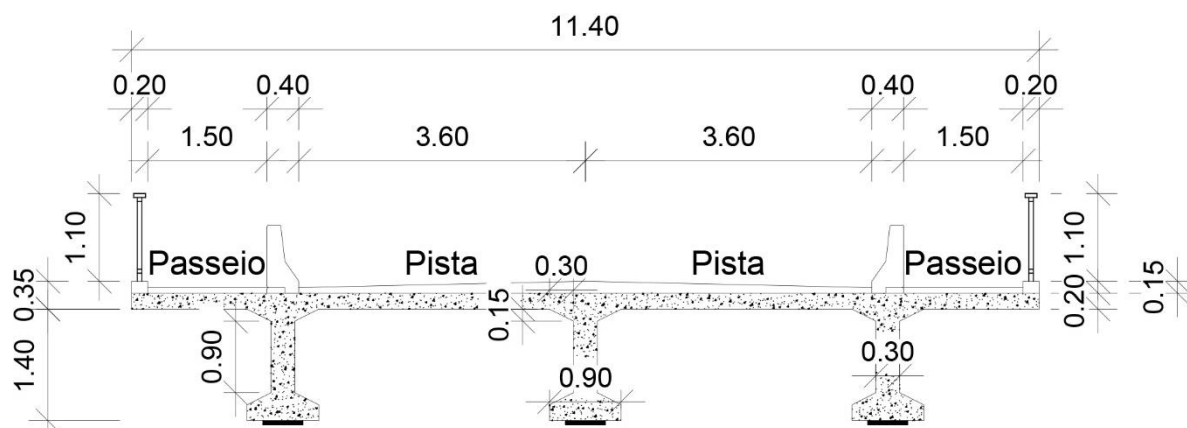
- Faixas de rolamento, rodovia classe I, largura de cada faixa: 3,60 m (Figura 15);
- Faixa para pedestre, largura de cada lado: 1,50 m (DNER, 1996);
- Elementos de Proteção: barreiras e guarda-corpos.

Assim é possível obter para a ponte uma largura total de 11,40 metros. O comprimento total da ponte foi fixado em 73 metros devido ao traçado da rodovia e a escolha dos melhores pontos para fixação dos pilares.

Foi escolhida a seção em vigas porque este é o tipo mais simples de estrutura, sendo adequada para uma ampla faixa de variação de vãos, desde 10 metros, nos pontilhões de concreto armado, até mais de 100 metros, em vigas protendidas de alturas variáveis. Os vãos da estrutura analisada são de aproximadamente 25 metros, assim encaixando perfeitamente para a utilização de uma seção de vigas em concreto armado.

3.2 Pré-dimensionamento

Fig 15 – Seção da ponte em vigas I.



Fonte: Pinto, Valleriote & Rodrigues, 2018.

Com base nos critérios da NBR-7187, foi escolhido a espessura da laje em 20cm, como visto na figura 15, pois segundo esta norma, as lajes destinadas ao tráfego rodoviário não podem possuir espessura menor do que 15.

3.3 Concreto Armado

Foi adotado f_{ck} de 30 Mpa para que as solicitações cortantes das lajes sejam absorvidas completamente pelo concreto.

Segundo a NBR-6118 (2003), a resistência média do concreto a tração é relacionada a resistência característica a compressão através da seguinte equação 1:

$$f_{ct,m} = 3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (1)$$

$$f_{ct,m} = 3 \sqrt[3]{30^2} = 28,97 \text{ MPa}$$

E por se tratar de um valor médio, ainda é preciso definir limites superior e inferior, dados pela equação 2 e 3:

$$f_{ct,sup} = 1,3 \cdot 28,97 = 37,65 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$f_{ct,inf} = 0,7 \cdot 28,97 = 20,28 \text{ MPa} \quad (3)$$

Quando não se possui resultados de ensaios sobre o concreto, deve-se estimar o valor do módulo de elasticidade tangente inicial através da equação 4, que serve para relacionar o valor da resistência característica a compressão do concreto (NBR—6118, 2003).

$$E_{ci} = 5600 \sqrt{30} = 30,67 \text{ GPa} \quad (4)$$

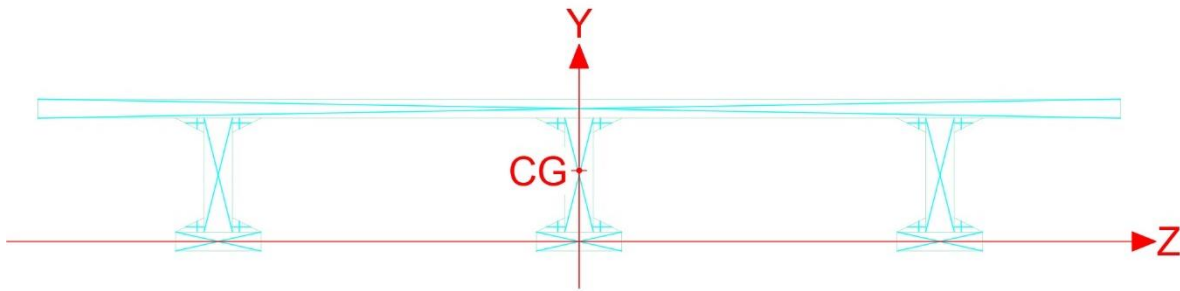
Entretanto, devemos utilizar a equação abaixo para determinar a sollicitação nas análises elásticas e a verificação dos estados de limites, utilizando o módulo de elasticidade secante, que está relacionado ao primeiro, utilizando a equação 5:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 30.672,46 = 26,07 \text{ GPa} \quad (5)$$

3.4 Características Geométricas da Seção

Afim de obter-se o centro de gravidade, é preciso um ponto específico para simplificar os cálculos, a seção foi decomposta em figuras planas como a figura 16 com centros de gravidade conhecidos, após definido o ponto, será definido os valores de centroide da seção Z_{CG} e Y_{CG} .

Fig 16 – Composição da seção da ponte por figuras planas mais simples.



Fonte: Pinto, Valleriote & Rodrigues, 2018.

Para obtenção do Momento de Inércia de uma figura composta, é necessário utilizar o teorema dos eixos paralelos, demonstrado nas equações 6 e 7 para os eixos x, y e z:

$$I_y = 28,4 + (0,0)^2 \cdot 9,9 = 28,40 \quad (6)$$

$$I_z = 1,57 + (-0,06)^2 \cdot 9,9 = 1,60 \quad (7)$$

Onde d é a distância entre eixos e S é a área da figura estudada.

O raio de giração de uma superfície plana em relação a um eixo de referência constitui-se em uma distância particular entre a superfície e o eixo, um raio de giração menor em uma determinada dimensão (eixo) demonstra uma maior tendência de o elemento deslocar-se quando solicitado ao giro em torno deste eixo. Encontra-se este valor através das equações 8 e 9.

$$i_z = \sqrt{\frac{1,6}{9,9}} = 0,40 \quad (8)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{28,4}{9,9}} = 1,69 \quad (9)$$

É preciso definir o módulo de resistência, pois este é um elemento importante para a geometria da seção, é definido pelas equações 10 e 11.

$$W_z = \frac{1,57}{-0,06} = -26,91 \quad (10)$$

$$W_y = \frac{28,4}{0,0} = 0,0 \quad (11)$$

3.5 Cálculo das Ações

As ações são as causas que provocam o aparecimento de deformações nas estruturas, e estas podem ser classificadas em quatro categorias:

- Ações Permanentes Diretas e Indiretas;
- Ações Variáveis Diretas e Indiretas;
- Ações Dinâmicas;
- Ações Excepcionais.

3.5.1 Ações permanentes

Estas são as ações que estão diretamente ligadas ao peso próprio dos elementos estruturais, dos elementos construtivo fixos, empuxos devidos a peso próprio de terras não removíveis e outras ações permanentes aplicadas sobre elas. Já as ações permanentes indiretas, são provenientes de deformações por retração e fluência dos materiais envolvidos, proteção e recalques de apoio e imperfeições geométricas.

5.5.2 Peso próprio dos elementos estruturais

Este corresponde ao peso de todo o concreto das peças estruturais da ponte, como as lajes, vigas, transversinas e cortinas. É expressado pela equação 12:

$$g_1 = S \cdot y_c \quad (12)$$

tabuleiro. De acordo com a NBR – 7187 (2003), o peso específico deve possuir um valor mínimo de 24 KN/m^2 , multiplicando pela seção do pavimento dos passeios dos dois lados, fornece uma carga distribuída de $7,44 \text{ KN/m}$.

3.5.4 Peso próprio da pavimentação das pistas de rolamento

De posse do valor da área da seção das pistas de rolamento, somadas aos acostamentos, deve-se multiplicá-la pelo valor do peso específico da pavimentação, que também é fixado pela norma NBR-7187 (2003) em 24 KN/m^2 . Porém a mesma norma adverte para a possibilidade de recapeamento da pavimentação, a adoção de uma sobrecarga de 2 KN/m^2 para compensar o efeito da ocorrência destas situações ao longo da vida útil da obra. Multiplica-se a área da pavimentação, uma sobrecarga de 2 KN/m^2 compensando assim o efeito dessas situações e prolongando a vida útil da obra, assim chegando a uma carga distribuída de $22,80 \text{ KN/m}$.

3.5.5 Peso próprio das barreiras

Deve-se multiplicar o valor da área da seção da barreira pelo peso específico do concreto. O concreto foi definido anteriormente como 25 KN/m^2 , e a barreira uma área de $0,22 \text{ m}^2$, assim obtendo um carregamento de $5,50 \text{ KN/m}$ em ambos os lados da ponte.

Assim sendo, o carregamento distribuído devido as barreiras foi de 11 KN/m .

3.5.6 Peso próprio do guarda-corpos

A base do guarda-corpo também foi de concreto armado, possuindo uma área de seção transversal de $0,03 \text{ m}^2$, obtendo um carregamento de $0,75 \text{ KN/m}$ para cada guarda-corpo da ponte. Segundo a NBR-6120 (1982) – Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações, recomenda-se utilizar uma carga vertical mínima de 2 KN/m . Logo, o carregamento vertical distribuído dos dois guarda-corpos foi de $5,50 \text{ KN/m}$.

3.6 Ações variáveis

De acordo com a NBR-6118 (2003), ações variáveis diretas são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da edificação, ação do vento e da água.

3.6.1 Cargas móveis

Segundo a NBR-7187 (2003), cargas móveis são consideradas cargas estáticas majoradas por um coeficiente de impacto, dependendo se a ponte for rodoviária ou ferroviária. O valor do coeficiente de impacto para o caso da ponte do nosso trabalho é de 1,23, expressado pela equação 13:

$$\varphi = civ . cnv . cia \quad (13)$$

onde, l é o comprimento do vão teórico de cada elemento carregado.

Com base na NBR-7188 (1982), para esse tipo de tráfego da rodovia, essa ponte é de classe 45. Portanto o veículo tipo possui 450 KN de peso total, com uma carga uniformemente distribuída na pista de 5 KN/m² e uma carga distribuída nos passeios de 3 KN/m². A carga final distribuída na pista de rolamento foi de 41,70 KN/m devido aos passeios de 4,17 KN/m.

3.6.2 Ação do vento

A velocidade de projeto pode ser obtida pela equação 14:

$$V_p = S1 . S2 . S3 . V0 \quad (14)$$

Sendo,

$S1$ o valor topográfico;

$S2$ o fator de rugosidade;

$S3$ o fator estatístico;

$V0$ a velocidade básica.

Tem-se:

$$V_p = 37 \cdot 1,0 \cdot 0,94 \cdot 1,1 = 38,26 \text{ m/s}$$

Com a velocidade de projetos, é possível calcular a pressão dinâmica do vento em N/m^2 , através da equação 15:

$$q = 0,613 \cdot 38,26^2 = 897,33 \text{ N/m}^2 \quad (15)$$

Determinando assim, o componente de forças que age sobre a edificação, segundo a equação 16:

$$F = q \cdot Ca \cdot l \quad (16)$$

Sendo,

q a pressão dinâmica do vento;

Ca o coeficiente de força de arrasto;

l o vão da obra em metros.

Segundo a NBR-6123 (1988), para calcular o coeficiente de arrasto, utiliza-se a equação 17 e 18:

$$\frac{h}{l_1} = \frac{4,60}{73,00} = 0,06 \quad (17)$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{73,00}{11,40} = 6,40 \quad (18)$$

Sendo,

h a altura;

l_1 a dimensão de referência na superfície frontal de uma edificação;

l_2 a dimensão de uma edificação na direção do vento.

3.7 Lajes

Para se obter os resultados referente a solicitações nas lajes do tabuleiro, será utilizado as equações nos itens a seguir.

3.7.1 Dimensionamento das lajes

Utilizando-se das tabelas de Rüsh (1965), é possível encontrar os valores para o dimensionamento das lajes, de acordo com suas características.

Com os valores em mãos, definimos os valores para:

- $M_{zmVeículo}$ = momento fletor no vão da direção z.
- $M_{xmVeículo}$ = momento fletor no vão da direção x.
- $M_{zemVeículo}$ = momento fletor nos extremos da direção z devido ao veículo-tipo.

$$M_{zmq} = 1,24 (7,5 \cdot 0,247 + 0,50 \cdot 0,00 + 0,30 \cdot 0,08) = 2,322 T/m$$

$$M_{zeq} = 1,24 (7,5 \cdot 0,479 + 0,50 \cdot 0,018 + 0,30 \cdot 0,35) = 4,576 T/m$$

$$M_{xmq} = 1,24 (7,5 \cdot 0,134 + 0,50 \cdot 0,00 + 0,30 \cdot 0,042) = 1,254 T/m$$

Para o cálculo da força cortante atuante na laje do tabuleiro, o processo se assemelha com o anterior.

Em seguida pode-se definir a altura útil da laje pela equação 19 e 20:

$$d = (2,5 - 0,1n) \lambda \quad (19)$$

Sendo,

d = altura útil da laje (cm);

n = número de bordas engastadas da laje;

λ = dimensão da laje em metro, sendo:

$$\lambda \geq \begin{cases} \lambda \cdot x \\ 0,7\lambda_y \end{cases} \quad (20)$$

$$77,18 \geq \begin{cases} 0,8 \cdot 77,18 \\ 77,18 \end{cases}$$

$$d = 0,9 \cdot 0,2 = 0,18 \text{ m}$$

Após obtido o valor útil da laje, manteve-se o que fora estipulado inicialmente de 0,20 m, uma altura padrão para os tabuleiros.

3.7.2 Linha neutra

Através da equação 21, é possível encontrar o valor da altura da linha neutra.

$$x = 1,25 \cdot d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{M}{0,425 \cdot d^2 \cdot f_{cd} \cdot b_w}} \right] \quad (21)$$

$$x = 1,25 \cdot 0,2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{77,18}{0,425 \cdot 0,3 \cdot (0,20)^2 \cdot 21,43}} \right] = 0,25$$

Domínio 2 e 3 (x23) e domínio 3 e 4 (x34), relacionados à altura da linha neutra.

$$x_{23} = 0,259 \cdot 0,15 = 3,95 \text{ cm}$$

$$x_{34} = 0,628 \cdot 0,15 = 9,42 \text{ cm}$$

3.7.3 Área mínima do aço

Após a verificação do domínio da linha neutra, é possível calcular a área mínima de aço pela equação 22:

$$A_{s,min} = 0,15 \cdot 0,15 = 2,25 \text{ m}^2 \quad (22)$$

Logo após é necessário fazer o cálculo da área de aço para satisfazer as condições da estrutura, demonstrada pela equação 23:

$$A_s = \frac{Mze}{(r_{smin} - 0,4 \cdot 0,094) \cdot 500} \quad (23)$$

$$A_s = \frac{77,18}{(0,15 - 0,4 \cdot 0,094) \cdot 500} = 13,23 \text{ m}^2$$

3.7.4 Detalhamento

O espaçamento é determinado pela equação 24.

$$S_{cal} = 100 \cdot \frac{0,0314}{1,32} = 23,75 \text{ cm} \quad (24)$$

Segundo a NBR 6118:2003, o espaçamento máximo e o número de barras deve atender as equações 25 e 26.

$$S_{max} = \begin{cases} 100 \cdot \frac{0,0314}{0,023} = 139,63 \text{ cm} \\ 20 \text{ cm} \\ 2 \cdot h \end{cases} \quad (25)$$

$$N_{barras} = \frac{A_s}{A_{\emptyset 20}} \quad (26)$$

$$N_{barras} = \frac{13,23}{3,14} = 4,21 \cong 5 \text{ barras}$$

3.7.5 Ancoragem

Primeiro deve se obter o valor de f_{ctd} utilizando a equação 27, em seguida deve-se encontrar o valor referente a resistência de aderência, equação 28.

$$f_{ctd} = 0,7 \cdot \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (27)$$

$$f_{bd} = n1 \cdot n2 \cdot n3 \cdot f_{ctd} \quad (28)$$

Onde, $n1$ é dado pelo tipo de superfície, $n2$ pela condição de aderência e $n3$ pela bitola da armadura.

$$f_{ctd} = 0,70 \cdot 0,30 \cdot \frac{\sqrt[3]{30^2}}{1,4} = 14,49 \text{ MPa}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 2,25$$

Com os valores de cima, é possível determinar o comprimento básico de ancoragem, utilizando a equação 29.

$$l_b = \frac{\emptyset \cdot f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} \quad (29)$$

$$l_b = \frac{20 \cdot 434,78}{4 \cdot 2,25} = 95,29 \text{ mm}$$

Desta forma define-se pela equação 30, o comprimento de ancoragem. O valor encontrado deve atender a equação 31.

$$l_{b,nec} = \alpha \cdot \frac{l_b A_{s, calc}}{A_{s, min}} \geq l_{b, min} \quad (30)$$

$$l_{b,nec} = 95,29 \cdot \frac{13,23}{15,71} = 80,24 \text{ mm}$$

$$l_{b, min} \geq \begin{cases} 0,30 \cdot l_b \\ 10 \cdot \phi \\ 10 \text{ cm} \end{cases} \quad (31)$$

$$l_{b,nec} = 95,29 \cdot \frac{13,23}{15,71} = 80,24 \text{ mm}$$

Os valores obtidos em l_b e $l_{b, nec}$ são comparados ao valor encontrado em $l_{b, min}$, então caso sejam inferiores a este, deve-se adotar o valor de 200 mm.

3.7.6 Transpasse

Afim de se obter os valores referentes ao transpasse, deve-se utilizar as equações 32 e 33.

$$l_{ot, min} = \begin{cases} 20 \text{ cm} \\ 15 \cdot 10 \\ 0,30 \cdot 1,2 \cdot 200 \end{cases} \quad (32)$$

$$l_{ot} = 1,2 \cdot l_{ot, min} \quad (33)$$

$$l_{ot} = 1,2 \cdot 200 = 240 \geq 200 \text{ mm}$$

Deve se conferir se o valor de l_{ot} satisfaz as condições imposta pela equação.

3.7.7 Armadura

De acordo com a NBR 6118:2003, é estabelecido para as armaduras positivas de distribuição, retração e temperatura nas lajes em balanço, um espaçamento máximo de 33 cm, disposto pela equação 34. No que se refere aos esforços cortantes, a norma citada anteriormente, determina que a resistência cisalhante de um elemento estrutural, deve seguir as condições impostas pelas equações 35 e 36.

$$A_{s,DRT} \geq \begin{cases} 2,06 \\ 0,9 \text{ cm}^2/m \end{cases} \quad (34)$$

$$50,09 \leq 763,71 \text{ (Laje 1)} \quad (35)$$

$$174,47 \leq 763,71 \text{ (Laje 2)} \quad (36)$$

Onde, x é igual aos valores de resistência cisalhante obtidos na laje 1, e y é referente aos valores obtidos na laje 2.

3.7.8 Longarinas

Afim de dimensionar as longarinas, será utilizado o software Eberick, para assim determinar os carregamentos distribuídos.

3.7.9 Armadura

Como visto também em lajes, deve-se verificar as resistências das bielas das vigas às forças cortantes, utilizando do mesmo método de cálculo. Obtendo-se posteriormente os resultados para a armadura transversal, através da equação 37.

$$A_{sw} = \frac{mse}{(d - 0,4x) \cdot f_{yd}} \quad (37)$$

$$A_{sw} = \frac{-3147,98}{0,90 \cdot 0,15 \cdot 434,78} = -53,22 \text{ cm}^2$$

Adquirindo-se então o resultado para o espaçamento, através da equação 38.

$$S = \frac{A_{sw}}{0,79} \quad (38)$$

$$S = \frac{-53,22}{0,79} = 67,37$$

Com estes valores em mãos, segundo a NBR 6118:2003, há um limite de espaçamento máximo, que é respeitado pela seguinte relação:

$$966,25 \leq 1583,68 \text{ então } S_{max} = 90 \leq 300 \text{ mm}$$

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Distribuição de cargas

4.1.1 Distribuição de cargas e diagrama de solicitações

A Carga distribuída total é a soma de todas as ações permanentes, que são: Peso próprio dos elementos estruturais; peso próprio do revestimento de passeio de pedestres; peso próprio da pavimentação das pistas de rolamento; peso próprio das

barreiras; peso próprio dos guarda-corpos. Com a soma de todos esses valores, foi possível chegar de 151,24 kN/m.

Fig 18 – Esquema de calculo de carga da estrutura.

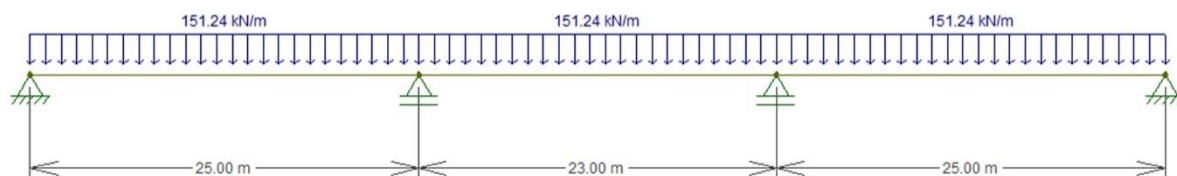


Fig 19 – Diagrama de momento fletor.

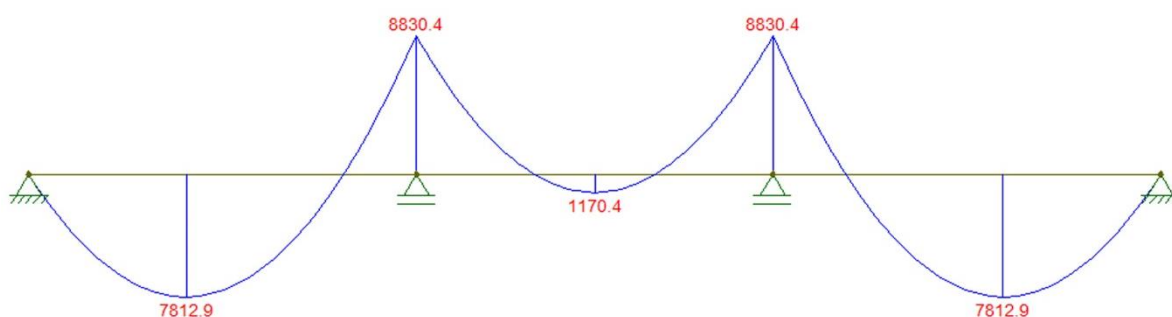
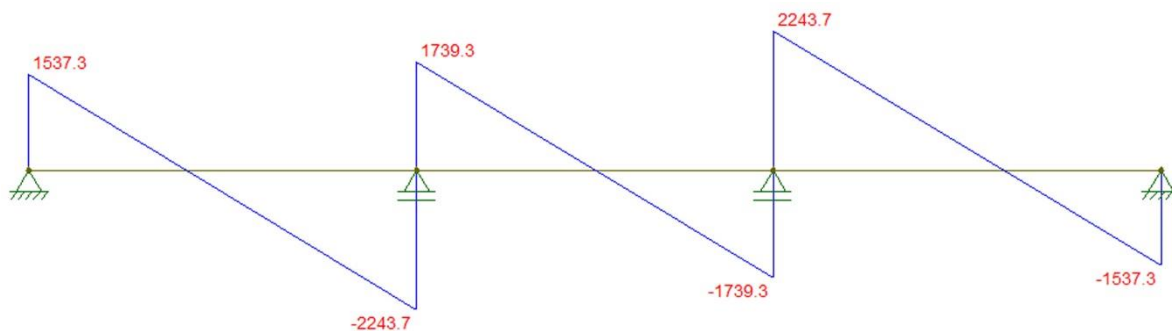


Fig 20 – Diagrama de esforço cortante.



4.1.2 Distribuição de cargas de vento de sobrepressão e sucção

O coeficiente de arrasto (C_a) é obtido por meio da razão entre a largura e a altura do elemento. Assim sendo, a largura do tabuleiro é de 11,40m e 3,6m de altura (considerando o veículo junto), foi obtido um coeficiente de 1,00.

De acordo com a IAP (1998), o coeficiente de empuxo vertical de vento sobre o tabuleiro é de 0,5, tendo assim a força de pressão de 5,11 kN/m e sucção de -5,11 kN/m.

Fig 21 – Esquema de cálculo de carga de vento de sobrepressão.

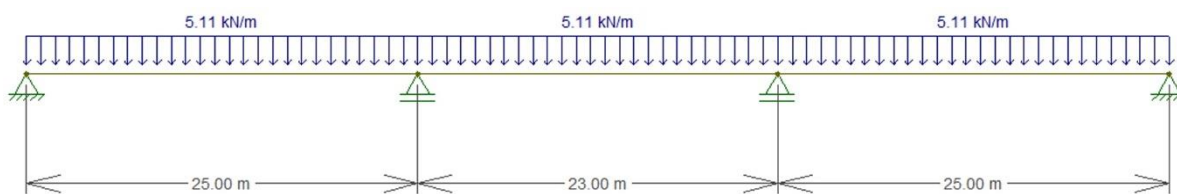


Fig 22 – Diagrama de momento fletor de vento de sobrepressão.

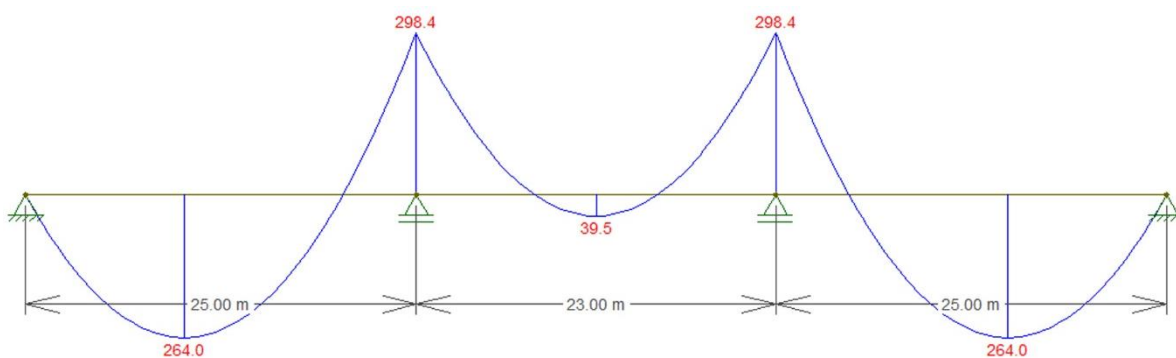


Fig 23 – Diagrama de força cortante de vento de sobrepressão.

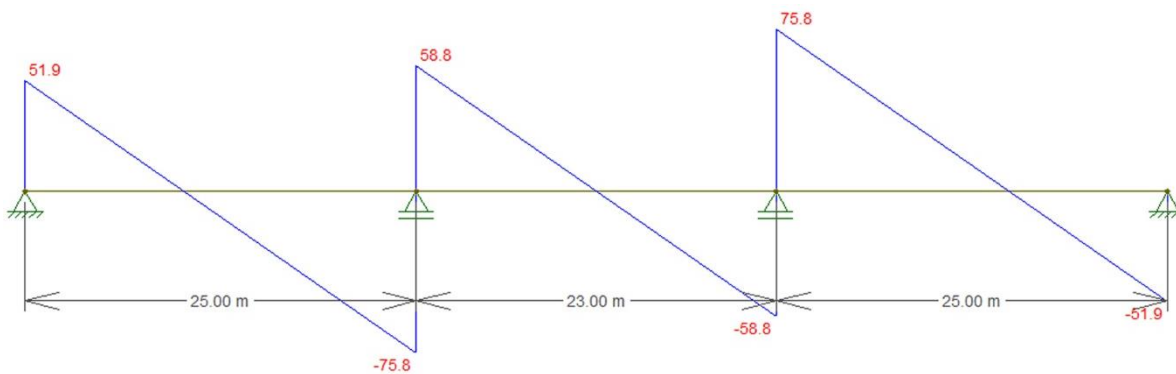


Fig 24 – Esquema de cálculo de carga de vento de sucção.

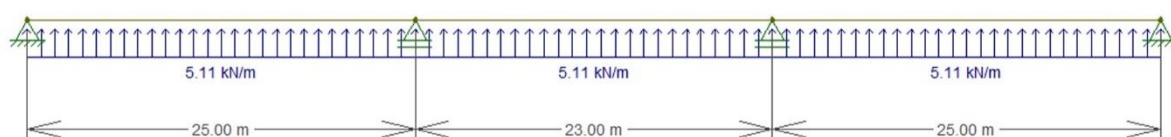


Fig 25 – Diagrama de momento fletor de vento de sucção.

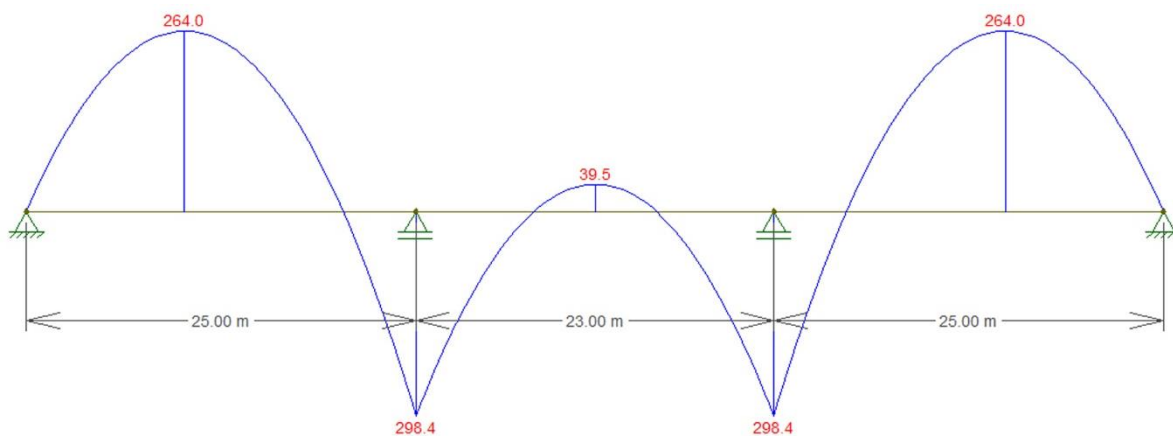
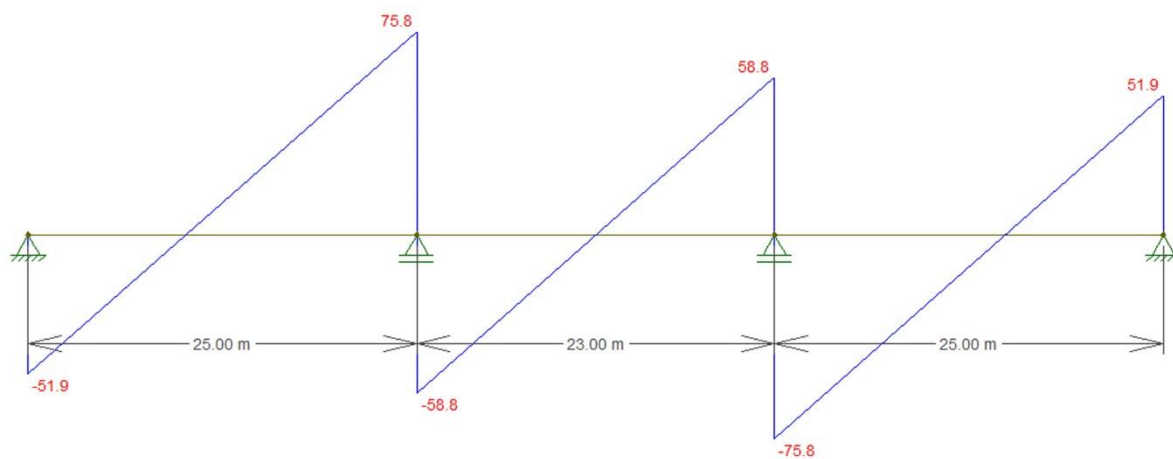


Fig 26 – Diagrama de força cortante de vento de sucção.



4.1.2.1 Cálculos de vento de sobrepressão e sucção

Velocidade Básica do Vento (V_0) = 37 m/s

Fator topográfico (S_1) = 1

Categoria do terreno e altura (S_2) = 0,94 (categoria 2, classe B)

Fator estatístico (S_3) = 1,10

Velocidade de Projeto

$$V_p = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 = 38,26 \text{ m/s ou } 137,73 \text{ km/h}$$

Pressão dinâmica do vento

$$q = 0,613 * V_p^2$$

$$q = 0,90 \text{ kN/m}^2$$

Classificação F1 – 111 até 180 – Moderado (137,73 km/h)

Forças devido ao vento

$$F = q * C * A$$

Coeficiente de arrasto

Gabarito do veículo tipo = 2

$$e_{\text{Tabuleiro}} = 1,6$$

$$h \text{ fundo do tabuleiro} = 1$$

$$h = 4,6$$

$$a = 23,54$$

$$b = 11,4$$

$$l_1 = 73$$

$$l_2 = 11,4$$

$$h/l_1 = 0,06$$

$$l_1/2 = 6,4$$

$$C_a = 1$$

$$Q = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

$$F_a = 3,24 \text{ kN/m}$$

Cargas de vento de arrasto (F_a)

$$V_p = 38,26 \text{ m/s}$$

$$r = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$q = 897,33 \text{ N/m}^2 = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

$$e_{\text{Tabuleiro}} + \text{gabarito veículo} = 3,6 \text{ m}$$

$$L = 11,4 \text{ m}$$

$$L/h = 3,17$$

$$C_d = 1,1$$

$$F_a = 3,24 \text{ kN/m}$$

$$\text{Fator de combinação} = 0,5$$

$$F_a \text{ corrigido} = 1,62 \text{ kN/m}$$

Força de vento de sobrepressão (F_{sob}) e de sucção (F_{suc})

Coeficiente de pressão

Verificação da sucção

$$\text{tg } q = 0,0250$$

$$\text{largura do tabuleiro} = 4\text{m}$$

$$0,5 \cdot 2 = 2\text{m}$$

Verificação de sobrepressão

$$0 \leq \text{tg } q \leq 0,2$$

$$\text{tg } q = 0,025$$

$$C_p = 2$$

$$q = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

$$L_{\text{tabuleiro}} = 11,4 \text{ m}$$

$$F_p = 20,52 \text{ kN/m}$$

Cargas de vento de sobrepressão e sucção segundo a norma Espanhola

$$V_p = 38,26 \text{ m/s}$$

$$r = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$q = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

$$L_{\text{tabuleiro}} = 11,4 \text{ m}$$

$$C_p = 0,5$$

$$F_p = 5,11 \text{ kN/m}$$

Valores finais das forças de vento

$$\text{Força de arrasto } (F_a) = 1,62 \text{ kN/m}$$

$$\text{Força de sobrepressão } (F_{sob}) = 5,11 \text{ kN/m}$$

$$\text{Força de sucção } (F_{suc}) = -5,11 \text{ kN/m}$$

4.1.2.2 Ações variáveis

Vão teórico = 23,54

Coeficiente de impacto = 1,23

4.1.2.3 Carga distribuída

Pistas de rolamento

Largura da pista = 7,2

Carregamento = 6,15 kN/m²

Carregamento = 44,28 kN/m

Passeio

Largura do passeio = 1,5

Carregamento = 3 kN/m²

Carregamento = 4,5 kN/m

4.1.2.4 Carga concentrada

Carga por eixo do veículo = 184,50

Carregamento = 6,15 kN

Carga = 147,6 * 3 = 442,80 kN

Força centrífuga

Raio = 345

C = 0,22

Peso veículo tipo = 450

Força = 97,83

Efeitos da aceleração e frenagem

Carregamento tabuleiro

Carga = 3300

Porcentagem = 0,05

Força = 165

Veículo tipo

Carga = 450

Porcentagem = 0,3

Força = 135

Total = 300

4.1.3 Estado limite de carregamento

As combinações do momento fletor e do esforço cortante da estrutura, ou seja, o estado limite de carregamento, foram obtidos através da análise do nó 1, com o auxílio do software Ftool.

4.1.3.1 Combinação do momento fletor

Para se obter os resultados de momento fletor, foram usadas as equações 39 a 41:

$$M_{d,mov} \quad (39)$$

$$= \begin{cases} 1,4 \cdot 2646,3 + 1,4 \cdot 802,6 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 89,4 = 4.903,556 \text{ KN/m} \\ 1,4 \cdot (-2646,3) + 1,4 \cdot (-802,6) + 1,4 \cdot 0,6 \cdot (-89,4) = - 4.903,556 \text{ KN/m} \end{cases}$$

$$M_{d,wsob} \quad (40)$$

$$= \begin{cases} 1,4 \cdot 2646,3 + 1,2 \cdot 89,4 + 1,4 \cdot 0,7 \cdot 802,6 = 4.616,528 \text{ KN/m} \\ 1,4 \cdot (-2646,3) + 1,2 \cdot (-89,4) + 1,4 \cdot 0,7 \cdot (-802,6) = - 4.616,528 \text{ KN/m} \end{cases}$$

$$M_{d,wsuc} = 1,0 \cdot 2646,3 + 1,2 \cdot (-89,4) = 2.521,14 \text{ KN/m} \quad (41)$$

4.3.3.2 Combinação de esforço cortante

Para obtenção dos valores de combinação do esforço cortante, foi utilizado as equações 42 a 44:

$$M_{d,mov} \quad (42)$$

$$= \begin{cases} 1,4 \cdot 1345,8 + 1,4 \cdot 379,2 + 1,4 \cdot 0,6 \cdot 51,9 = 2.493,82 \text{ KN/m} \\ 1,4 \cdot (-2646,3) + 1,4 \cdot (-802,6) + 1,4 \cdot 0,6 \cdot (-89,4) = - 2.493,82 \text{ KN/m} \end{cases}$$

$$M_{d,wsob} \quad (43)$$

$$= \begin{cases} 1,4 \cdot 1345,8 + 1,2 \cdot 51,9 + 1,4 \cdot 0,7 \cdot 379,2 = 2.347,856 \text{ KN/m} \\ 1,4 \cdot (-1345,8) + 1,2 \cdot (-51,9) + 1,4 \cdot 0,7 \cdot (-379,2) = - 2.347,856 \text{ KN/m} \end{cases}$$

$$M_{d,wsuc} = 1,0 \cdot 1345,8 + 1,2 \cdot (-51,9) = 1.282,1 \text{ KN/m} \quad (44)$$

4.1.3.3 Tabelas de esforços devido a momento fletor e combinações

Tabela 1 – Esforços devido à Momento Fletor.

Nós	Carga Permanent e	Cargas Variáveis			
		Carga Móvel		Carga de Vento	
		menor	maior	Sobrepressão	Sucção
0	0	0	0	0	0
1	2646,30	553,40	802,60	89,40	-89,40
2	3764,90	920,30	1141,90	127,20	-127,20
3	4747,30	1245,80	1439,80	160,40	-160,40
4	5593,30	1529,90	1696,40	189,00	-189,00
5	6303,10	1772,80	1911,70	213,00	-213,00
6	7037,30	1974,20	2134,40	237,80	-237,80
7	7429,00	2178,60	2253,20	251,00	-251,00
8	7684,40	2283,60	2330,60	259,60	-259,60
9	7803,40	2347,20	2366,70	263,70	-263,70
10	7786,10	2361,50	2369,60	263,10	-263,10
11	7632,50	2314,90	2350,50	257,90	-257,90
12	7215,70	2188,50	2290,20	243,80	-243,80

13	6744,10	2045,40	2145,40	227,90	-227,90
14	6136,10	1861,00	1988,60	207,30	-207,30
15	5391,90	1635,30	1790,40	182,20	-182,20
16	4511,30	1368,20	1550,90	152,40	-152,40
17	3494,40	1059,80	1270,00	118,10	-118,10
18	1926,50	584,30	947,80	65,10	-65,10
19	591,50	179,40	453,90	20,00	-20,00
20	-879,70	-266,80	35,30	-29,70	29,70
21	-2487,30	-754,40	-424,70	-84,00	84,00
22	-4231,20	-1283,30	-926,10	-143,00	143,00
23	-6111,40	-1853,30	-1468,80	-206,50	206,50
24	-8127,90	-2465,10	-2052,80	-251,40	251,40
25	-7254,00	-2678,20	-2200,10	-245,10	245,10
26	-5812,70	-2049,80	-1763,00	-196,40	196,40
27	-4506,50	-1626,30	-1366,80	-152,30	152,30
28	-3335,50	-1243,90	-1011,60	-112,70	112,70
29	-2299,60	-902,40	-697,40	-77,70	77,70
30	-1128,60	-601,80	-342,30	-38,10	38,10
31	-407,90	-264,90	-123,70	-13,80	13,80
32	177,60	-60,00	53,90	6,00	-6,00
33	628,00	104,00	190,50	21,20	-21,20
34	943,30	226,90	286,10	31,90	-31,90
35	1123,40	308,90	340,70	38,00	-38,00
36	1153,50	349,80	349,80	39,50	-39,50
37	1018,40	308,90	340,70	34,40	-34,40
38	748,10	226,90	286,10	25,30	-25,30
39	342,80	104,00	190,50	11,60	-11,60
40	-197,70	-60,00	53,90	-6,70	6,70
41	-873,30	-264,90	-123,70	-29,50	29,50
42	-1984,30	-510,80	-342,30	-67,00	67,00
43	-2975,20	-902,40	-697,40	-100,50	100,50
44	-4101,20	-1243,90	-1011,60	-138,60	138,60
45	-5362,30	-1626,30	-1366,80	-166,50	166,50
46	-6758,50	-2049,80	-1763,00	-228,40	228,40
47	-8289,90	-2514,30	-2200,10	-280,10	280,10
48	-6768,40	-2678,20	-2052,80	-228,70	228,70
49	-4842,80	-1853,50	-1468,80	-163,60	163,60
50	-3053,50	-1283,30	-926,10	-103,20	103,20
51	-1400,40	-754,40	-424,70	-47,30	-47,30
52	116,30	-266,80	35,30	3,90	-3,90
53	1496,70	179,40	453,90	50,60	-50,60

54	3125,10	584,30	947,80	105,60	-105,60
55	3494,40	1059,80	1270,00	141,50	-141,50
56	5113,50	1368,20	1550,90	172,80	-172,80
57	5903,20	1635,30	1790,40	199,50	-199,50
58	6556,60	1861,00	1988,60	221,50	-221,50
59	7073,70	2045,40	2145,40	239,00	-239,00
60	7551,10	2188,50	2290,20	255,10	-255,10
61	7750,10	2314,90	2350,50	261,90	-261,90
62	7812,80	2361,50	2369,60	264,00	-264,00
63	7739,20	2347,20	2369,60	261,50	-261,50
64	7529,30	2283,60	2330,60	254,40	-254,40
65	7183,00	2178,60	2253,20	242,70	-242,70
66	6509,30	1974,20	2134,40	219,90	-219,90
67	5845,10	1772,80	1911,70	197,50	-197,50
68	5044,50	1529,90	1696,40	170,40	-170,40
69	4107,50	1245,80	1439,80	138,80	-138,80
70	3034,30	920,30	1141,90	102,50	-102,50
71	1824,80	553,40	802,60	61,70	-61,70
72	478,90	145,20	422,00	16,20	-16,20

Tabela 2 – Combinações de momento fletor.

Nós	Carregamento Principal			Pior Situação	
	1	2	3		
	Carga Móvel	Vento Sobrepressão	Vento Sucção		
0	0	0	0	0	0
1	4903,56	4616,53	2521,14	4903,56	-4903,56
2	6976,37	6568,00	3586,82	6976,37	-6976,37
3	8796,68	8281,78	4522,74	8796,68	-8796,68
4	10364,34	9757,69	5328,70	10364,34	-10364,34
5	11679,64	10996,01	6004,90	11679,64	-11679,64
6	13040,13	12276,85	6704,38	13040,13	-13040,13
7	13765,92	12960,14	7077,60	13765,92	-13765,92
8	14239,06	13405,59	7320,96	14239,06	-14239,06
9	14459,65	13613,31	7434,22	14459,65	-14459,65
10	14432243228,98	13591,09	7417,76	14438,98	-14438,98

11	14192,84	13350,05	7271,44	14192,84	-14192,84
12	13513,05	12687,70	6874,38	13513,05	-13513,05
13	12636,74	11863,29	6425,04	12636,74	-12636,74
14	11548,71	10829,59	5845,88	11548,71	-11548,71
15	10208,27	9558,33	5136,82	10208,27	-10208,27
16	8615,10	8049,06	4297,94	8615,10	-8615,10
17	6769,36	6302,10	3329,06	6769,36	-6769,36
18	4078,70	3717,08	1835,36	4078,70	-4078,70
19	1480,36	1300,92	563,50	1480,36	-1480,36
20	-1630,05	-1534,62	-838,12	-1630,05	1630,05
21	-4608,94	-4339,13	-2369,70	-4608,94	4608,94
22	-7840,42	-7381,51	-4031,00	-7840,42	7840,42
23	-11324,04	-10661,29	-5822,30	-11324,04	11324,04
24	-15041,38	-14146,82	-7775,94	-15041,38	15041,38
25	-14110,96	-13123,38	-6910,86	-14110,96	14110,96
26	-11172,48	-10421,54	-5537,74	-11172,48	11172,48
27	-8713,85	-8116,09	-4293,28	-8713,85	8713,85
28	-6505,83	-6046,50	-3177,72	-6505,83	6505,83
29	-4548,07	-4212,57	-2190,82	-4548,07	4548,07
30	-2454,56	-2223,14	-1075,26	-2454,56	2454,56
31	-953,51	-849,98	-388,58	-953,51	953,51
32	329,14	309,86	169,20	329,14	-329,14
33	1163,71	1095,57	598,32	1163,71	-1163,71
34	1747,96	1645,66	898,64	1747,96	-1747,96
35	2081,66	1959,85	1070,20	2081,66	-2081,66
36	2137,80	2013,00	1098,20	2137,80	-2137,80
37	1931,64	1807,81	970,24	1931,64	-1931,64
38	1469,13	1363,14	712,68	1469,13	-1469,13
39	756,36	682,85	326,56	756,36	-756,36
40	-366,41	-344,96	-188,32	-366,41	366,41
41	-1618,26	-1523,52	-832,00	-1618,26	1618,26
42	-3549,42	-3372,40	-1890,50	-3549,42	3549,42
43	-5513,06	-5190,33	-2834,50	-5513,06	5513,06
44	-7599,56	-7154,74	-3907,16	-7599,56	7599,56
45	-9923,90	-9334,09	-5129,20	-9923,90	9923,90
46	-12523,48	-11790,46	-6438,74	-12523,48	12523,48
47	-15361,16	-14462,01	-7897,76	-15361,16	15361,16
48	-13417,35	-12420,58	-6448,22	-13417,35	13417,35
49	-9512,24	-8825,39	-4613,76	-9512,24	9512,24
50	-6158,21	-5677,01	-2909,02	-6158,21	6158,21
51	-3056,45	-2766,09	-1466,62	-3056,45	3056,45

52	215,52	202,87	110,84	215,52	-215,52
53	2773,34	2611,04	1425,86	2773,34	-2773,34
54	5790,76	5451,82	2977,26	5790,76	-5790,76
55	6789,02	6334,86	3296,30	6789,02	-6789,02
56	9475,31	8920,70	4871,58	9475,31	-9475,31
57	10938,62	10298,37	5623,90	10938,62	-10938,62
58	12149,34	11438,17	6246,50	12149,34	-12149,34
59	13107,50	12340,27	6739,10	13107,50	-13107,50
60	13992,10	13173,08	7193,96	13992,10	-13992,10
61	14360,84	13520,29	7383,44	14360,84	-14360,84
62	14477,12	13629,73	7443,20	14477,12	-14477,12
63	14371,98	13523,19	7373,10	14371,98	-14371,98
64	14017,56	13181,17	7173,14	14017,56	-14017,56
65	13414,55	12604,12	6843,22	13414,55	-13414,55
66	12285,90	11512,59	6201,44	12285,90	-12285,90
67	11025,42	10333,11	5568,60	11025,42	-11025,42
68	9580,40	8963,33	4805,94	9580,40	-9580,40
69	7882,81	7355,82	3913,18	7882,81	-7882,81
70	5932,78	5510,58	2890,80	5932,78	-5932,78
71	3730,19	3427,65	1738,42	3730,19	-3730,19
72	1274,87	1106,70	456,22	1274,87	-1274,87

4.1.3.4 Tabelas de combinação de força cortante

Tabela 3 – Esforços devido ao cortante.

Nós	Carga Permanente	Cargas Variáveis		
		Carga Móvel		Carga de Vento
		maior	menor	Sobrepessão
0	1537,30	466,20	422,70	51,90
1	1345,80	408,20	379,20	45,50
2	1202,30	364,60	335,60	40,60
3	1058,70	321,10	292,10	35,80
4	915,10	277,50	248,50	30,90
5	771,50	234,00	205,00	26,10
6	484,30	190,40	146,90	21,20
7	436,50	132,40	103,40	14,70
8	292,90	88,80	59,80	9,90
9	149,30	45,30	16,30	5,00
10	5,70	1,70	-27,30	0,20
11	-137,80	-41,80	-70,80	-4,70

12	-281,40	-85,40	-128,90	-9,50
13	-472,90	-143,40	-172,40	-16,00
14	-616,40	-187,00	-216,00	-20,80
15	-760,00	-230,50	-259,50	-25,70
16	-903,60	-274,10	-303,10	-30,50
17	-1047,20	-317,60	-346,60	-35,40
18	-1190,80	-361,20	-404,70	-40,20
19	-1382,20	-419,20	-448,20	-46,70
20	-1525,80	-462,80	-491,80	-51,60
21	-1669,40	-506,30	-535,30	-56,40
22	-1813,00	-549,90	-578,90	-61,30
23	-1956,60	-593,40	-622,40	-66,10
24	-2100,10	-637,00	-666,00	-71,00
25	-2243,70	484,10	-680,50	-75,80
26	1548,70	469,70	440,80	52,30
27	1405,70	426,30	397,40	47,50
28	1262,80	383,00	354,10	42,70
29	1119,80	339,60	310,70	37,80
30	976,80	281,80	252,90	33,00
31	786,20	238,50	209,60	26,60
32	643,30	195,10	166,20	21,70
33	500,30	151,70	122,80	16,90
34	357,40	108,40	79,50	12,10
35	214,40	65,00	36,10	7,20
36	71,50	21,70	-21,70	2,40
37	-119,10	-36,10	-65,00	-4,00
38	-262,10	-79,50	-108,40	-8,90
39	-405,00	-122,80	-151,70	-13,70
40	-548,00	-166,20	-195,10	-18,50
41	-690,90	-209,60	-238,50	-23,30
42	-833,90	-252,90	-296,30	-28,20
43	-1024,50	-310,70	-339,60	-34,60
44	-1167,40	-354,10	-383,00	-39,40
45	-1310,40	-397,40	-426,30	-44,30
46	-1453,40	-440,80	-469,70	-49,10
47	-1596,30	-484,10	-513,10	-53,90
48	-1739,30	637,00	-527,50	-58,80
49	2052,30	622,40	593,40	69,30
50	1908,70	578,90	549,90	64,50
51	1765,10	535,30	506,30	59,60
52	1621,50	491,80	462,80	54,80

53	1477,90	448,02	419,20	49,90
54	1334,40	404,70	361,20	45,10
55	1142,90	346,60	317,60	38,60
56	999,30	303,10	274,10	33,80
57	855,80	259,50	230,50	28,90
58	712,20	216,00	187,00	24,10
59	568,60	172,40	143,40	19,20
60	425,00	128,90	85,40	14,40
61	233,60	70,80	41,80	7,90
62	90,00	27,30	-1,70	3,00
63	-101,50	-16,30	-45,30	-1,80
64	-197,20	-59,80	-88,80	-6,70
65	-340,80	-103,40	-132,40	-11,50
66	-484,30	-146,90	-190,40	-16,40
67	-675,80	-205,00	-234,00	-22,80
68	-819,40	-248,50	-277,50	-27,70
69	-963,00	-292,10	-321,10	-32,50
70	-1106,50	-335,60	-364,60	-37,40
71	-1250,10	-379,20	-408,20	-42,20
72	-1393,70	-422,70	-451,70	-47,10
73	-1537,30	-466,20	-422,70	-51,90

Tabela 4 – Combinações de esforço cortante.

Nós	Carregamento Principal			Pior Situação
	1	2	3	
	Carga Móvel	Vento Sobrepressão	Vento Sucção	
0	2848,50	2681,76	1464,64	2848,50
1	2493,82	2347,86	1282,10	2493,82
2	2227,76	2097,37	1145,46	2227,76
3	1961,79	1846,98	1008,58	1961,79
4	1695,60	1596,35	871,84	1695,60
5	1429,62	1345,96	734,96	1429,62
6	962,39	894,29	454,62	962,39
7	808,81	761,43	415,92	808,81
8	542,70	510,94	279,04	542,70
9	276,64	260,41	142,30	276,64
10	10,53	9,93	5,98	10,53
11	-295,99	-268,88	-131,22	-295,99
12	-582,40	-533,58	-268,10	-582,40
13	-916,86	-853,41	-450,50	-916,86

14	-1182,83	-1103,76	-587,28	-1182,83
15	-1448,89	-1354,29	-724,02	-1448,89
16	-1715,00	-1604,78	-860,90	-1715,00
17	-1981,06	-1855,31	-997,64	-1981,06
18	-2267,47	-2120,01	-1134,52	-2267,47
19	-2601,79	-2439,70	-1316,82	-2601,79
20	-2867,98	-2690,32	-1453,56	-2867,98
21	-3133,96	-2940,71	-1590,44	-3133,96
22	-3400,15	-3191,34	-1727,18	-3400,15
23	-3666,12	-3441,73	-1864,06	-3666,12
24	-3932,18	-3692,22	-2000,70	-3932,18
25	-4157,55	-3914,19	-2137,58	-4157,55
26	2869,69	2701,71	1475,48	2869,69
27	2604,70	2452,25	1339,20	2604,70
28	2339,99	2203,04	1203,02	2339,99
29	2074,91	1953,45	1066,88	2074,91
30	1789,76	1689,88	930,60	1789,76
31	1456,92	1371,65	748,96	1456,92
32	1191,99	1122,20	612,92	1191,99
33	927,00	872,75	476,64	927,00
34	662,28	623,53	340,46	662,28
35	397,21	373,94	204,32	397,21
36	132,50	124,73	68,14	132,50
37	-261,10	-236,04	-113,50	-261,10
38	-526,18	-485,63	-249,64	-526,18
39	-790,89	-734,85	-385,82	-790,89
40	-1055,88	-984,30	-522,10	-1055,88
41	-1320,73	-1233,61	-658,28	-1320,73
42	-1605,97	-1497,31	-794,42	-1605,97
43	-1938,80	-1815,55	-976,06	-1938,80
44	-2203,66	-2064,86	-1112,24	-2203,66
45	-2468,59	-2314,35	-1248,38	-2468,59
46	-2733,58	-2563,81	-1384,66	-2733,58
47	-2998,44	-2813,12	-1520,84	-2998,44
48	-3222,91	-3034,29	-1656,98	-3222,91
49	3802,79	3580,19	1955,28	3802,79
50	3536,82	3329,80	1818,40	3536,82
51	3270,62	3079,17	1681,66	3270,62
52	3004,65	2828,78	1544,78	3004,65
53	2738,20	2577,98	1408,04	2738,20
54	2472,62	2327,91	1271,26	2472,62

55	2117,72	1993,77	1088,86	2117,72
56	1851,75	1743,38	951,98	1851,75
57	1585,70	1492,89	815,34	1585,70
58	1319,72	1242,50	678,46	1319,72
59	1053,53	991,87	541,72	1053,53
60	787,56	741,48	404,84	787,56
61	432,80	407,48	222,54	432,80
62	166,74	156,95	85,80	166,74
63	-207,03	-189,01	-98,98	-207,03
64	-406,03	-372,48	-187,82	-406,03
65	-672,14	-622,97	-324,70	-672,14
66	-958,36	-887,57	-461,34	-958,36
67	-1292,87	-1207,36	-643,88	-1292,87
68	-1558,93	-1457,89	-780,62	-1558,93
69	-1825,04	-1708,38	-917,50	-1825,04
70	-2090,96	-1958,77	-1054,14	-2090,96
71	-2357,07	-2209,26	-1191,02	-2357,07
72	-2623,12	-2459,79	-1327,76	-2623,12
73	-2787,60	-2639,13	-1464,64	-2787,60

4.2 Dimensionamento das lajes

4.2.1 Determinação das lajes no tabuleiro

Laje 1 = Laje 4 – Balanço

Elementos estruturais

Área = 0,36 m²

Peso = 25 kN/m³

Carga = 9 kN/m

Passeio de pedestres

Área = 0,16 m²

Peso = 24 kN/m³

Carga = 3,84 kN/m

Guarda-corpo

Área = 0,03 m²

Peso = 25 kN/m³

Carga = 0,75 kN

Metálico

Carga total = 2 kN/m

Carga vertical total = 9 + 3,84 + 0,75 + 2 = 15,59 kN/m

Momento devido a carga permanente = -17,54 kN/m

Cortante devido a carga permanente = -23,39 kN

Ações variáveis

Largura do passeio = 1,5

Peso = 3 kN/m²

Carregamento = 4,5 kN/m

Momento devido a carga móvel = -5,06 kN/m

Cortante devido a carga móvel = -6,75 kN

Cargas de vento

Momento de vento de sobrepressão = -5,75 kN/m

Cortante de vento de sobrepressão = -7,67 kN

Momento de vento de sucção = 5,75 kN/m

Cortante de vento de sucção = 7,76 kN

Tabela 5 – Esforços devido a momento fletor e combinações.

Esforços devido a Momento Fletor				Combinações			
Carga Permanente	Cargas Variáveis			Carregamento Principal			Pior Situação
	Carga Móvel	Carga de Vento		1	2	3	
		Sobrepressão	Sucção	Carga Móvel	Vento Sobrepressão	Vento Sucção	
-17,54	-5,06	-5,75	5,75	-36,47	-37,56	-16,51	-37,56
Esforços devido ao Cortante				Combinações			
	Cargas Variáveis			Carregamento Principal			

Carga Permanente	Carga Móvel	Carga de Vento		1	2	3	Pior Situação
		Sobrepressão	Sucção	Carga Móvel	Vento Sobrepressão	Vento Sucção	
-23,39	-6,75	-7,67	7,67	-48,63	-50,09	-22,01	-50,09

Lajes 2 = Laje 3 – Biengastadas

Elementos estruturais

Espessura = 0,2 m

Peso = 0,5 T/m³

Carga = 0,5 T/m²

Pavimentação das pistas de rolamento

Espessura = 0,07 m

Peso = 2,4 T/m³

Carga = 0,17 T/m²

Peso recapeamento = 2 kN/m²

Carga = 0,2 T/m²

Cargas das lajes = 0,87

Ações variáveis

Vão teórico = 23,54

Coefficiente de impacto = 1,24

Tabela 6 – Parâmetros de entrada da tabela de Rush.

Nº da Laje	2	3
Espessura Pav	0,07	0,07
Espessura Laje	0,20	0,20
Lz	3,60	3,60
Lx	73,00	73,00
Lx/Lz	infinito	infinito
t	0,84	0,84
t/a	0,42	0,42
Lz/a	1,80	1,80

Carga Permanente – Momento Fletor		
Kmzm	0,0417	0,0417
Kmxm	0,0069	0,0069
Kmze	0,0833	0,0833
g (t/m ²)	0,87	0,87
Mzmg	0,47	0,47
Mzeg	0,94	0,94
Mxmg	0,08	0,08
Carga Permanente – Cortante		
Qz	1,56	1,56
Carga Móvel – Momento Fletor		
MzmVeículo	0,247	0,247
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,25	0,216	0,216
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,25	0,290	0,290
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,50	0,175	0,175
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,50	0,250	0,250
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,25	0,260	0,260
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,50	0,220	0,220
MzmP	0,000	0,000
Lz/a = 1,5	0,000	0,000
Lz/a = 2,0	0,000	0,000
MzmP'	0,080	0,080
Lz/a = 1,5	0,050	0,050
Lz/a = 2,0	0,100	0,100
Mzmq	2,322	2,322
MzeVeículo	0,479	0,479
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,25	0,400	0,400
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,25	0,560	0,560
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,50	0,340	0,340
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,50	0,510	0,510
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,25	0,496	0,496
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,50	0,442	0,442
MzeP	0,018	0,018
Lz/a = 1,5	0,000	0,000
Lz/a = 2,0	0,030	0,030
MzeP'	0,350	0,350
Lz/a = 1,5	0,350	0,350
Lz/a = 2,0	0,350	0,350

Mzeq	4,576	4,576
MxmVeículo	0,134	0,134
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,25	0,134	0,134
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,25	0,168	0,168
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,50	0,080	0,080
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,50	0,096	0,096
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,25	0,154	0,154
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,50	0,090	0,090
MxmP	0,000	0,000
Lz/a = 1,5	0,000	0,000
Lz/a = 2,0	0,000	0,000
MxmP'	0,042	0,042
Lz/a = 1,5	0,030	0,030
Lz/a = 2,0	0,050	0,050
Mxmq	1,254	1,254
Carga Móvel - Cortante		
QzVeículo	1,171	1,171
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,25	1,320	1,320
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,25	1,380	1,380
tabela Lz = 1,5 e t/a = 0,50	0,730	0,730
tabela Lz = 2,0 e t/a = 0,50	0,810	0,810
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,25	1,356	1,356
1,5<Lz/a<2, t/a = 0,50	0,778	0,778
QzP	0,032	0,032
Lz/a = 1,5	0,020	0,020
Lz/a = 2,0	0,040	0,040
QzP'	0,084	0,084
Lz/a = 1,5	0,030	0,030
Lz/a = 2,0	0,120	0,120
Qzq	10,900	10,900
Combinações		
	Laje 2	Laje 3
Mzm (tfm)	3,908	3,908
Mze (tfm)	7,718	7,718
Mxm (tfm)	1,864	1,864
Mzm (kNm)	39,080	39,080
Mze (kNm)	77,180	77,180
Mxm (kNm)	18,640	18,640
Qz (tf)	17,447	17,447
Qz (kN)	174,47	174,47

4.2.2 Lajes de transição

Elementos estruturais

Espessura = 0,20 m

Peso = 2,5 tf/m³

Carga = 0,5 tf/m²

Pavimentação das pistas de rolamento

Espessura = 0,07 m

Peso = 2,4 tf/m³

Carga = 0,2 tf/m²

Recapeamento

Peso = 2 kN/m²

Carga = 0,20 tf/m²

Carga total = 0,5 + 0,17 + 0,20 = 0.87 tf/m²

Ações variáveis

Vão teórico = 4

Coeficiente de impacto = 1,23

Carga distribuída = 0,3 tf/m²

Carregamento = 0,5 tf/m²

Tabela 7 – Parâmetro de entrada da tabela de Rush para laje de transição.

Nº da Laje	3
Espessura Pav	0,07
Espessura Laje	0,20
Lz	4,00
Lx	11,40
Lx/Lz	infinito
T	0,84
t/a	0,42
Lz/a	2,00
Carga Permanente - Momento Fletor	

Kmzm	0,1250
Kmxm	0,0208
Kmze	0,0000
g (t/m ²)	0,87
Mzmg	1,74
Mzeg	0,00
Mxmg	0,29
Carga Permanente - Cortante	
Qz	1,74
Carga Móvel - Momento Fletor	
MzmVeículo	0,471
tabela Lz/a = 1,5 e t/a = 0,25	0,340
tabela Lz/a = 2,0 e t/a = 0,25	0,487
tabela Lz/a = 1,5 e t/a = 0,50	0,290
tabela Lz/a = 2,0 e t/a = 0,50	0,438
1,5<Lz/a<2,0, t/a = 0,25	0,487
1,5<Lz/a<2,0, t/a = 0,50	0,438
MzmP	0,000
Lz/a = 1,5	0,000
Lz/a = 2,0	0,000
MzmP'	1,000
Lz/a = 1,5	0,500
Lz/a = 2,0	1,000
Mzmq	4,717
MzeVeículo	0,000
tabela Lz/a = 1,5 e t/a = 0,25	0,000
tabela Lz/a = 2,0 e t/a = 0,25	0,000
tabela Lz/a = 1,5 e t/a = 0,50	0,000
tabela Lz/a = 2,0 e t/a = 0,50	0,000
1,5<Lz/a<2,0, t/a = 0,25	0,000
1,5<Lz/a<2,0, t/a = 0,50	0,000
MzeP	0,000
Lz/a = 1,5	0,000
Lz/a = 2,0	0,000
MzeP'	0,000
Lz/a = 1,5	0,000
Lz/a = 2,0	0,000
Mzeq	0,000
MxmVeículo	0,495

tabela $Lz/a = 1,5$ e $t/a = 0,25$	0,206
tabela $Lz/a = 2,0$ e $t/a = 0,25$	0,288
tabela $Lz/a = 1,5$ e $t/a = 0,50$	0,138
tabela $Lz/a = 2,0$ e $t/a = 0,50$	0,205
$1,5 < Lz/a < 2,0$, $t/a = 0,25$	0,631
$1,5 < Lz/a < 2,0$, $t/a = 0,50$	0,205
MxmP	0,000
$Lz/a = 1,5$	0,000
$Lz/a = 2,0$	0,000
MxmP'	0,190
$Lz/a = 1,5$	0,090
$Lz/a = 2,0$	0,190
Mxmq	4,634
Carga Móvel - Cortante	
QzVeículo	1,155
tabela $Lz/a = 1,5$ e $t/a = 0,25$	1,320
tabela $Lz/a = 2,0$ e $t/a = 0,25$	1,360
tabela $Lz/a = 1,5$ e $t/a = 0,50$	0,660
tabela $Lz/a = 2,0$ e $t/a = 0,50$	0,720
$1,5 < Lz/a < 2,0$, $t/a = 0,25$	1,360
$1,5 < Lz/a < 2,0$, $t/a = 0,50$	0,720
QzP	0,000
$Lz/a = 1,5$	0,000
$Lz/a = 2,0$	0,000
QzP'	0,500
$Lz/a = 1,5$	0,350
$Lz/a = 2,0$	0,500
Qzq	10,841
Combinações	
	Laje 3
Mzm (tfm)	9,034
Mze (tfm)	0
Mxm (tfm)	6,891
Mzm (kNm)	90,340
Mze (kNm)	0,000
Mxm (kNm)	68,910
Qz (tf)	17,608
Qz (kN)	176,08

4.3 Dimensionamento das Lajes à Flexão

Dados de projeto

Tipo de Aço= CA – 50

f_{yk} (MPa)= 500,00

f_{ck} (MPa) = 30,00

f_{ctm} (MPa) = 28,97

$f_{ctk, inf}$ (MPa) = 20,28

$f_{ctk, sup}$ (MPa) = 37,66

E_{ci} (MPa) = 30672,46

Módulo de Elasticidade Inicial do Concreto, NBR 6118/2003.

E_{cs} (MPa) = 26071,59

Módulo de Elasticidade Inicial do Concreto, NBR 6118/2003.

$N = 0,2$

Coeficiente de Poisson do Concreto, item 8.2.9, NBR 6118/2003.

G_c (Mpa) = 10428,64

Módulo de Elasticidade Transversal do Concreto, NBR 6118/2003.

E_y (Mpa) = 210000

Módulo de Elasticidade Transversal do Concreto, NBR 6118/2003.

Cargas Permanentes (g)

$g_{concreto\ armado}$ (kN/m³) = 25,00

Peso Específico do Concreto Armado, item 8.2.2 da NBR6118/2003

$g_g = 1,4$

Coeficiente de Majoração das Ações Permanentes Desfavoráveis para o ELU, item 11.7.1 da NBR6118/2003

Cargas Acidentais (q)

q (kN/m²) = 2,00

(Sobrecarga de Utilização)

$$g_q = 1,4$$

Coefficiente de Majoração das Ações Acidentais Variáveis Gerais para o ELU, item 11.7.1 da NBR6118/2003

Tabela 8 – Pré-dimensionamento das lajes.

<i>Pré-dimensionamento das Lajes</i>	
$h_{\min} \text{ (m)} =$	0,20

Cálculo dos Momentos Fletores Atuantes nas Lajes		
Laje	Forma de Trabalho	$h_{laje} \text{ (m)}$
L1	1 direção	0,20
L2	2 direções	0,20
L3	2 direções	0,20
L4	1 direção	0,20

Estado Limite Último (ELU)

$$g_s = 1,15$$

$$g_c = 1,40$$

Coefficientes de Minoração das Resistências para o ELU, item NBR6118/2003

$$\phi_{yd} = 2,070$$

Limite de escoamento do aço

$$f_{yd} \text{ (Mpa)} = 434,78$$

$$f_{cd} \text{ (Mpa)} = 21,43$$

Resistência do Aço e do Concreto para fins de cálculo no ELU

$$f_{ctd} \text{ (Mpa)} = 14,49$$

4.3.1 Dimensionamento das Armaduras Positivas e Negativas

$$f_{\max} \text{ da bitola (mm)} = 25,00$$

Diâmetro Máximo da Bitola do Aço Utilizado, item 7.4.7 da NBR6118/2003

$$f_{adotado} \text{ (mm)} = 10,00$$

Diâmetro Adotado no Cálculo

$$C_{nom} \text{ (cm)} = 3,00$$

Cobrimento Nominal, item 7.4.7 da NBR6118/2003

$$d_{\text{máx}} (\text{cm}) = 3,60$$

Diâmetro Máximo do Agregado do Concreto Utilizado, item 7.4.7.6 da NBR6118/2003

Tabela 9 – Valores para dimensionamento das armaduras.

N_b	1,500
n_1	2,250
n_2	1,000
n_3	1,000
f_{ctd} (Mpa)	14,485
f_{bd} (Mpa)	32,591

$b \text{ (m)} =$	1,00
-------------------	------

4.3.1.1 Dimensionamento a flexão das lajes (ELU)

Tabela 10 – Seções Transversais das lajes do tabuleiro.

SEÇÃO A-A	1	2
	(-)	(-)
Eixo	Z	Z
M_{sd} (kNm)	37,560	77,180
M_{sd} , corrigido (kNm)	61,744	
h_{laje} (m)	0,20	0,20
c_{nom} (cm)	3,00	
$f_{adotado}$ (mm)	20,00	
A_f (cm ²)	3,14	
r_{smin} (%)	0,15	
d_y (cm)	14,00	
d_x (cm)	16,00	
$d_{\text{médio}}$ (cm)	15,00	
x (cm)	3,08	
x_{34} (cm)	9,42	
Domínio de Trabalho	Domínio 2	
r_{smin} (%)	0,15	
$A_{smín}$ (cm ²)	2,25	
A_s (cm ²)	10,31	
$A_{SUTILIZADO}$ (cm ²)	10,31	
Sc_{alc} (cm)	30,46	
$Smáx$ (cm)	139,63	
$máx[2h \text{ ou } 20]$ (cm)	20,00	
$SUTILIZADO$ (cm)	20,00	
nº de barras	5	

Tabela 11 – Seção A-A flexão das lajes (2 e 3 negativas).

SEÇÃO A-A	2	3
	(-)	(-)
Eixo	Z	Z
M _{sd} (kNm)	77,180	77,180
M _{sd} , corrigido (kNm)	77,180	
h _{laje} (m)	0,20	0,20
c _{nom} (cm)	3,00	
f _{adotado} (mm)	20,00	
A _f (cm ²)	3,14	
r _{smin} (%)	0,15	
d _y (cm)	14,00	
d _x (cm)	16,00	
d _{médio} (cm)	15,00	
x (cm)	3,08	
x ₃₄ (cm)	9,42	
Domínio de Trabalho	Domínio 3	
r _{smin} (%)	0,15	
A _{smin} (cm ²)	2,25	
A _s (cm ²)	10,31	
A _{sUTILIZADO} (cm ²)	10,31	
S _{cálc} (cm)	30,46	
S _{máx} (cm)	139,63	
máx _[2h ou 20] (cm)	20,00	
S _{UTILIZADO} (cm)	20,00	
nº de barras	5	

Tabela 12 – Seção A-A flexão das lajes (3 e 4 negativas).

SEÇÃO A-A	3	4
	(-)	(-)
Eixo	Z	Z
M _{sd} (kNm)	77,180	77,180
M _{sd} , corrigido (kNm)	61,744	

h_{laje} (m)	0,20	0,20
C_{nom} (cm)	3,00	
$f_{adotado}$ (mm)	20,00	
A_f (cm ²)	3,14	
r_{smin} (%)	0,15	
d_y (cm)	14,00	
d_x (cm)	16,00	
$d_{médio}$ (cm)	15,00	
X (cm)	3,08	
X_{34} (cm)	9,42	
Domínio de Trabalho	Domínio 2	
r_{smin} (%)	0,15	
A_{smin} (cm ²)	2,25	
A_s (cm ²)	10,31	
$A_{sUTILIZADO}$ (cm ²)	10,31	
$S_{cálc}$ (cm)	30,46	
$S_{máx}$ (cm)	139,63	
$máx_{[2h \text{ ou } 20]}$ (cm)	20,00	
$S_{UTILIZADO}$ (cm)	20,00	
nº de barras	5	

Tabela 13 – Seção A-A flexão das lajes (2 e 3 positivas).

SEÇÃO A-A	2	3
	(+)	(+)
Eixo	Z	Z
M_{sd} (kNm)	39,080	39,080
M_{sd} , corrigido (kNm)	61,744	61,744
h_{laje} (m)	0,20	0,20
C_{nom} (cm)	3,00	3,00
$f_{adotado}$ (mm)	20,00	20,00
A_f (cm ²)	3,14	3,14
r_{smin} (%)	0,15	0,15
d_y (cm)	14,00	14,00
d_x (cm)	16,00	16,00
$d_{médio}$ (cm)	15,00	15,00
X (cm)	2,08	2,08
X_{34} (cm)	9,42	9,42
r_{smin} (%)	0,15	0,15
A_{smin} (cm ²)	2,25	2,25

A_s (cm ²)	7,64	7,64
$A_{s\text{UTILIZADO}}$ (cm ²)	7,64	7,64
$S_{\text{cálculo}}$ (cm)	41,12	41,12
$S_{\text{máx}}$ (cm)	139,63	139,63
$máx_{[2h \text{ ou } 20]}$ (cm)	20,00	20,00
$S_{\text{UTILIZADO}}$ (cm)	20,00	20,00
nº de barras	5	

Tabela 14 – Comprimento de ancoragem.

h_1	2,25	2,25	2,25	2,25
h_2	0,70	0,70	0,70	0,70
h_3	1,00	1,00	1,00	1,00
f_{bd} (MPa)	22,81	22,81	22,81	22,81
lb (mm)	95,29	95,29	95,29	95,29
$A_{s, \text{cal}}$ (cm ²)	10,31	7,64	13,23	10,31
A_{se} (cm ²)	15,71	15,71	15,71	15,71
a_1	1,00	1,00	1,00	1,00
$l_{b, \text{min}}$ (mm)	200,00	200,00	200,00	200,00
$l_{b, \text{nec}}$ (mm)	200,00	200,00	200,00	200,00

5. CONCLUSÃO

O projeto de pontes de concreto armado exige um enorme trabalho, contudo, a análise de comportamento de estruturas se tornou muito mais clara em aplicações em problemas reais como o dimensionamento de uma estrutura real.

O desenvolvimento de um projeto estrutural possui uma complexidade elevada e de grande importância já que ele determina a segurança da obra. Deve ser realizado com calma e bastante atenção em todas as etapas do processo.

Quando se trata de dimensionamento de estruturas, sempre se busca a utilização de dados atualizados, principalmente nas cargas que atuam sobre esta estrutura, pois é de extrema importância para os cálculos feitos sobre a mesma.

Com base nos cálculos e esforços que foram obtidos, foi possível analisar toda estrutura (superestrutura), também foi possível traçar os gráficos das cargas atuantes na ponte, com o auxílio do software Ftool, e também do Eberick. Foi apresentado no presente trabalho, todo o processo para analisar os cálculos, gráficos e o comportamento das cargas agindo na estrutura, bem como traçar os gráficos, dimensionar as lajes e a longarina da mesma.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-6118 – Projetos de Estruturas de Concreto – Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, 2003;

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-6120 – Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações – Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, 1982;

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-6123 – Força devido ao Vento em Edificações – Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, 1988;

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-7187 – Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, 2003;

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-7188 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre – Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, 1982;

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-9062 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado, Rio de Janeiro – RJ, 2001;

GAMA, J. A. B.; Pontes de concreto armado. 2014;

MARCHETTI, Osvaldemar. Pontes de Concreto Armado. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2008;

MILLER, Cristiano Pena et al. Aplicação do Modelo de Bielas e Tirantes: Estudo de Caso. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Trabalho JOR0091 - p. 654-663. Campinas – SP, 2006;

OLIVEIRA, A. M. A.; PIEROTT, R. M. R.; Projeto de dimensionamento de uma ponte em concreto armado sobre o Rio Ururaí. 2016;

PFEIL, Walter – Pontes em Concreto Armado, Volume 1. Editora Livros Técnicos e Científicos, 3ª ed. Rio de Janeiro, 1983;

PINTO, L. A. S.; VALLERIOTE, L. C.; RODRIGUES, T. N.; Projeto estrutural de uma ponte em concreto armado na divisa entre as cidades de Bom Jesus do Norte (ES) e Bom Jesus do Itabapoana (RJ). 2018;

RÜSCH, H. – Tabelas para o Dimensionamento de Lajes de Pontes. Editora W. Ernst U. Sohn, Berlim, 1965;

SOUZA, A. N.; MOTA, M. G.; Dimensionamento estrutural de uma ponte em concreto armado. 2004;

TURMINA, G.; Estudo dos esforços atuantes em uma ponte em concreto armado. 2016;