

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Cristiano Hoss

**PROJETO DE UMA PONTE EM ARCO
INFERIOR EM CONCRETO ARMADO**

Porto Alegre
dezembro 2014

CRISTIANO HOSS

**PROJETO DE UMA PONTE EM ARCO
INFERIOR EM CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rubem C. Schwingel

Porto Alegre
dezembro 2014

CRISTIANO HOSS

**PROEJTO DE UMA PONTE EM ARCO
INFERIOR DE CONCRETO ARMADO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador Rubem Schwingel e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Prof. Rubem C. Scwhingel
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador/a

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rubem C. Schwingel (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa (UFRGS)
Dr.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a glória do DEUS Soberano, que me
capacitou para realizar o mesmo, aos meus pais,
Lademir e Clair, e minha noiva Giovana, que sempre me
inspiraram com seus exemplos e seu apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a DEUS por me permitir chegar até aqui.

Agradeço ao professor Rubem C. Schwingel, pela sua dedicação, tempo disponibilizado, pela experiência e conhecimento compartilhado. Por me ensinar que uma base teórica sólida é fundamental para o desempenho da profissão de engenheiro.

Agradeço a todos os professores que contribuíram na formação necessária para a realização deste trabalho e em especial à Professora Carin Schmitt pela perseverança em aconselhar e direcionar os alunos em seus trabalhos de conclusão.

Agradeço a engenheira Claudia Gewehr, pelo apoio e assistência técnica na elaboração deste trabalho.

Agradeço a toda minha família, que de forma simples e humilde, me apoiaram para seguir em frente. Aos meus pais Lademir e Clair, aos meus irmãos Diego e Danimar, por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço em especial a minha noiva, a qual amo muito, Giovana por estar ao meu lado me apoiando e suportando em todo este percurso.

Portanto, quem ouve estas minhas palavras e as pratica é como um homem prudente que construiu a sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram contra aquela casa, e ela não caiu, porque tinha seus alicerces na rocha.

Jesus Cristo (Mt.7:24-25)

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento de um projeto de uma ponte rodoviária urbana de concreto armado, em arco inferior, com eixo retilíneo, esconsa, construída com elementos pré-fabricados. As fundações, os encontros e alguns elementos de ligação serão moldados *in loco*. A obra será executada no município de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, no cruzamento entre a avenida Ipiranga e a rua Machado de Assis. A concepção estrutural foi definida tendo em vista o desafio que uma ponte em arco inferior de concreto armado apresenta. Esta ponte é constituída por três arcos inferiores paralelos, que são interligados por três vigas transversais. Estas vigas recebem os tabuleiros e transmitem as ações para os arcos que sustentam a estrutura. Nos extremos das pontes, os tabuleiros se apoiam nas paredes de contenção. Estas recebem, também, os arcos, por meio de uma estrutura conhecida como cálice, e descarregam as solicitações geradas sobre as fundações profundas, necessárias devido as condições de contorno apresentadas pelo solo. Fez-se inicialmente um pré-dimensionamento da estrutura, dividindo a mesma em estruturas menores e mais simplificadas, para definir as seções iniciais e as propriedades dos materiais que foram utilizadas no modelo tridimensional. O modelo foi desenvolvido no SAP2000, com elementos *shell* e *frame*. Em seguida aplicaram-se sobre ele os carregamentos permanentes, variáveis e excepcionais. Desta forma se mensurou os esforços solicitantes atuantes sobre a estrutura. Para cada elemento estrutural, realizou-se o dimensionamento da armadura necessária. Iniciando-se pelo arco, depois as lajes protendidas da pista e do passeio, a laje central e as vigas transversais (*in loco*) e, por fim, a fundação. Após se fez o detalhamento de cada elemento estrutural e sua armadura, como também os cortes, plantas baixas e plantas de montagem da estrutura. Considerou-se o caso de transporte e içamento das peças pré-fabricadas e os devidos esforços solicitantes que atuam nestas etapas. Neste trabalho não se teve o objetivo de analisar a viabilidade econômica da estrutura ou a comparação entre diversas soluções. Os conceitos e as prescrições normativas existentes foram apenas aplicados e não se teve o objetivo de desenvolver uma nova teoria para o assunto. Em todas as etapas foi de fundamental importância a pesquisa bibliográfica.

Palavras-chave: NBR 7187/2003. Pontes em Arco. Concreto Armado. Concreto Protendido. Pré-Fabricação. Projeto Estrutural de Ponte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo da divisão estrutural de pontes em arco.....	18
Figura 2 – Ponte de Sando Bron – Suécia.....	19
Figura 3 – Cruzamento de interesse.....	19
Figura 4 – Vista frontal da rua Machado de Assis.....	20
Figura 5 – Diagrama das etapas do trabalho.....	24
Figura 6 – Ponte Gladesville.....	28
Figura 7 – Nomenclatura de ponte em arco.....	33
Figura 8 – Ponte em arco inferior.....	34
Figura 9 – Ponte em arco intermediário.....	34
Figura 10 – Ponte em arco superior.....	34
Figura 11 – Representação esquemática de uma carga móvel.....	40
Figura 12 – Ação do vento para ponte carregada.....	43
Figura 13 – Ação do vento para ponte descarregada.....	44
Figura 14 – Linha de influência para esforço cortante.....	47
Figura 15 – Carregamento permanente.....	50
Figura 16 – Carregamento variável.....	51
Figura 17 – Arco entradas de cargas.....	52
Figura 18 – Combinação 1.....	53
Figura 19 – Carregamento peso próprio.....	53
Figura 20 – Vigas externas.....	55
Figura 21 – Viga central.....	55
Figura 22 – Sistema de coordenadas SAP2000.....	57
Figura 23 – Perspectiva do modelo estrutural.....	58
Figura 24 – Modelo estrutural.....	58
Figura 25 – Orientação do vento.....	60
Figura 26 – Trem I.....	60
Figura 27 – Trem II.....	61
Figura 28 – Trem III.....	61
Figura 29 – Trem IV.....	62
Figura 30 – Calculadora de flexão composta normal.....	64
Figura 31 – Compressão combinação 1.....	64
Figura 32 – Momento fletor combinação 1.....	65
Figura 33 – Esforço cortante combinação 1.....	65

Figura 34 – Torsão combinação 1.....	65
Figura 35 – Calculadora de armadura transversal.....	66
Figura 36 – Envoltória de área de aço por elemento.....	86
Figura 37 – Geometria da estrutura.....	88
Figura 38 – Estrutura lançada.....	89
Figura 39 – Trem tipo I.....	90
Figura 40 – Trem tipo II.....	90
Figura 41 – Trem tipo III.....	91
Figura 42 – Trem tipo IV.....	91
Figura 43 – Momento fletor – combinação 3.....	92
Figura 44 – Corte no centro do vão – combinação 3.....	93
Figura 45 – Corte no quarto de vão – combinação 3.....	93
Figura 46 – Esforço cortante máximo – combinação 4.....	94
Figura 47 – Flecha devido a protensão.....	96
Figura 48 – Passeio superior.....	100
Figura 49 – Modelo de cálculo A_s principal.....	100
Figura 50 – Modelo de cálculo guarda rodas.....	101
Figura 51 – Geometria da laje central.....	102
Figura 52 – Momentos combinação 2.....	103
Figura 53 – Momentos combinação 3.....	104
Figura 54 – Momento fletor combinação 1.....	105
Figura 55 – Esforço cortante combinação 3.....	105
Figura 56 – Momento fletor combinação 2.....	106
Figura 57 – Esforço cortante combinação 2.....	107
Figura 58 – Sondagem.....	108
Figura 59 - Seção transversal do encontro.....	109
Figura 60 – Cálice do arco.....	113
Figura 61 - Bloco sobre estacas.....	114
Figura 62 - Planta baixa do trecho de cálculo.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de k em função do ângulo de incidência.....	45
Tabela 2 – Momento de cálculo.....	51
Tabela 3 – Combinações de cargas arco.....	53
Tabela 4 – Solicitações de cálculo e A_s	54
Tabela 5 – Propriedades dos materiais	57
Tabela 6 – Solicitações no arco – combinação 1.....	67
Tabela 7 – Solicitações no arco – combinação 2.....	69
Tabela 8 – Solicitações no arco – combinação 3.....	71
Tabela 9 – Solicitações no arco – combinação 4.....	74
Tabela 10 – Solicitações no arco – combinação 5.....	76
Tabela 11 – Solicitações no arco – combinação 6.....	78
Tabela 12 – Solicitações no arco – combinação 7.....	81
Tabela 13 – Solicitações no arco – combinação 8.....	83
Tabela 14 – Modos de flambagem.....	87
Tabela 15 – Resistência do concreto.....	94
Tabela 16 – Limites no concreto.....	95
Tabela 17 – Propriedades da peça.....	95
Tabela 18 – Limites da força de protensão.....	95
Tabela 19 – Esforços devido a protensão.....	96
Tabela 20 – Verificação do rendimento inicial	97
Tabela 21 – Cálculos das perdas progressivas.....	97
Tabela 22 – Tensão efetiva no aço de protensão.....	98
Tabela 23 – Esforços efetivos da protensão.....	98
Tabela 24 – Dados do dimensionamento da armadura passiva.....	99
Tabela 25 – Dados de cálculo do A_s	101
Tabela 26 – Propriedades do solo.....	108
Tabela 27 – Dimensionamento da parede de contenção.....	109
Tabela 28 – Verificação ao tombamento.....	110
Tabela 29 – Verificação ao deslizamento.....	110
Tabela 30 – Solicitações no engaste do arco.....	111
Tabela 31 – Solicitações para o dimensionamento.....	112
Tabela 32 – Esforço horizontal e características.....	113
Tabela 33 – Dimensionamento do cálice.....	113

Tabela 34 – Solicitações atuantes na estrutura da fundação.....	115
Tabela 35 – Solicitações nas estacas.....	116

LISTA DE SIGLAS

CIA – Coeficiente de Impacto Adicional

CIV – Coeficiente de Impacto Vertical

CNF – Coeficiente do Número de Faixas

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

LISTA DE SÍMBOLOS

P – carga concentrada (kN)

p – carga uniformemente distribuída (kN/m²)

Q – carga concentrada majorada (kN)

q – carga uniformemente distribuída majorada (kN/m²)

L_{iv} – vão da ponte (m)

n – número de faixas

B – largura efetiva (m)

L – comprimento da carga distribuída (m)

H_f – esforço horizontal (kN)

p_a – pressão de água (kN/m²)

V_a – velocidade da água (kN/m)

k – coeficiente dimensional

M_{gk} – momento de peso próprio (kNm)

M_{qk} – momento devido a carga variável (kNm)

M_d – momento de cálculo (kNm)

N – compressão (kN)

T – torsão (kNm)

V – esforço cortante (kN)

E_c – módulo de elasticidade (MPa)

f_{ck} – resistência característica do concreto (MPa)

ν – coeficiente de Poisson

f – flecha (cm)

A_s – área de aço longitudinal (cm²)

A_{sw} – área de aço transversal (cm²)

A_{sl} – área de aço longitudinal de torção (cm²)

A_{90} – área de aço transversal devido a torção (cm²)

A_p – área de aço de protensão (cm²)

d_s – altura útil da armadura passiva (cm)

d_p – altura útil da armadura ativa (cm)

K – matriz de rigidez

λ – autovalores

G – matriz geométrica

P_o – força de protensão (kN)

σ_{cc} – tensão no concreto de compressão (kN/m²)

σ_{ct} – tensão no concreto de tração (kN/m²)

ϕ – coeficiente de fluência

χ – coeficiente de relaxação de aço

γ – peso específico do solo (kN/m²)

c – coesão do solo (kN/m²)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	21
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	21
2.2.1 Objetivo principal	21
2.2.2 Objetivo secundário	21
2.3 PRESSUPOSTOS.....	22
2.4 DELIMITAÇÕES.....	22
2.5 LIMITAÇÕES.....	22
2.6 DELINEAMENTO.....	22
3 PONTES	25
3.1 DEFINIÇÃO.....	25
3.2 HISTÓRICO.....	26
3.3 FUNÇÕES.....	29
3.4 CLASSIFICAÇÃO.....	30
3.5 DADOS PARA UM PROJETO.....	31
3.6 TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS: PONTES EM ARCO.....	32
4 ANÁLISE GLOBAL DA ESTRUTURA	35
4.1 AÇÕES A CONSIDERAR EM PONTES.....	36
4.1.1 Ações permanentes	37
4.1.1.1 Peso próprio dos elementos estruturais.....	37
4.1.1.2 Pavimentação.....	37
4.1.1.3 Empuxos de terra.....	37
4.1.1.4 Forças de protensão.....	38
4.1.1.5 Fluência e retração.....	38
4.1.2 Ações variáveis	39
4.1.2.1 Cargas móveis.....	39
4.1.2.1.1 <i>Carga móvel padrão</i>	39
4.1.2.1.2 <i>Carga nos passeios</i>	41
4.1.2.1.3 <i>Coeficiente de impacto vertical</i>	41
4.1.2.1.4 <i>Coeficiente do número de faixas</i>	41
4.1.2.1.5 <i>Coeficiente de impacto adicional</i>	42
4.1.2.1.6 <i>Frenagem e aceleração</i>	42

4.1.2.2 Cargas de construção.....	42
4.1.2.3 Cargas de vento.....	43
4.1.2.4 Empuxos de terra.....	44
4.1.2.5 Pressões de água em movimento.....	44
4.1.2.6 Efeito dinâmico do movimento das águas.....	45
4.1.2.7 Variação da temperatura.....	45
4.1.3 Ações excepcionais.....	46
4.1.3.1 Meio fio.....	46
4.1.3.2 Guarda corpos.....	46
4.2 LINHAS DE INFLUÊNCIA.....	46
5 MODELAGEM INICIAL.....	49
5.1 CARACTERÍSTICAS LOCAIS.....	49
5.2 PRÉ- DIMENSIONAMENTO.....	49
5.2.1 Lajes da pista.....	50
5.2.2 Arcos.....	51
5.2.3 Vigas transversais.....	55
5.3 MODELAGEM.....	56
6 SOLICITAÇÕES E DIMENSIONAMENTO.....	63
6.1 ARCOS.....	63
6.2 LAJES PROTENDIDAS DA PISTA.....	87
6.3 LAJES DO PASSEIO.....	99
6.4 LAJE CENTRAL.....	101
6.5 VIGAS TRANSVERSAIS.....	104
6.5.1 Vigas externas V1 e V3.....	104
6.5.2 Viga central V2.....	106
6.6 FUNDAÇÃO.....	107
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A.....	120
APÊNDICE B.....	122
APÊNDICE C.....	124
APÊNDICE D.....	126
APÊNDICE E.....	128
APÊNDICE F.....	130
APÊNDICE G.....	132

APÊNDICE H.....	134
APÊNDICE I.....	136
APÊNDICE J.....	138
APÊNDICE K.....	140
APÊNDICE L.....	142

1 INTRODUÇÃO

As pontes são obras bem conhecidas da humanidade. Elas estão presentes em todos os continentes e nas mais diversas realidades. Ao interligarem pontos separados de regiões distintas, as pontes e/ou viadutos contribuem para o desenvolvimento social e econômico das mesmas. Elas possibilitam o comércio de mercadorias, entre cidades separadas por grandes vales ou rios, e facilitam a interação social das diferentes culturas de cada região, promovendo a difusão cultural (LAZZARI, 2008, p. 13).

O projeto de uma ponte tem início com um bom desenho. Leonhardt (1979, p. 20), comenta que o processo de criação das grandes pontes deve iniciar com o aprendizado dos dados característicos do local. A seguir, deve-se, na imaginação, conceber uma geometria inicial, e partir para os desenhos a mão livre. O primeiro esboço é então analisado com calma e caso esteja aceitável visualmente, parte-se para um segundo esboço, um terceiro, agora com maiores detalhes. Estes esboços são deixados à vista de todos para receberem críticas e comentários e com elas ponderar sobre a viabilidade executiva do mesmo.

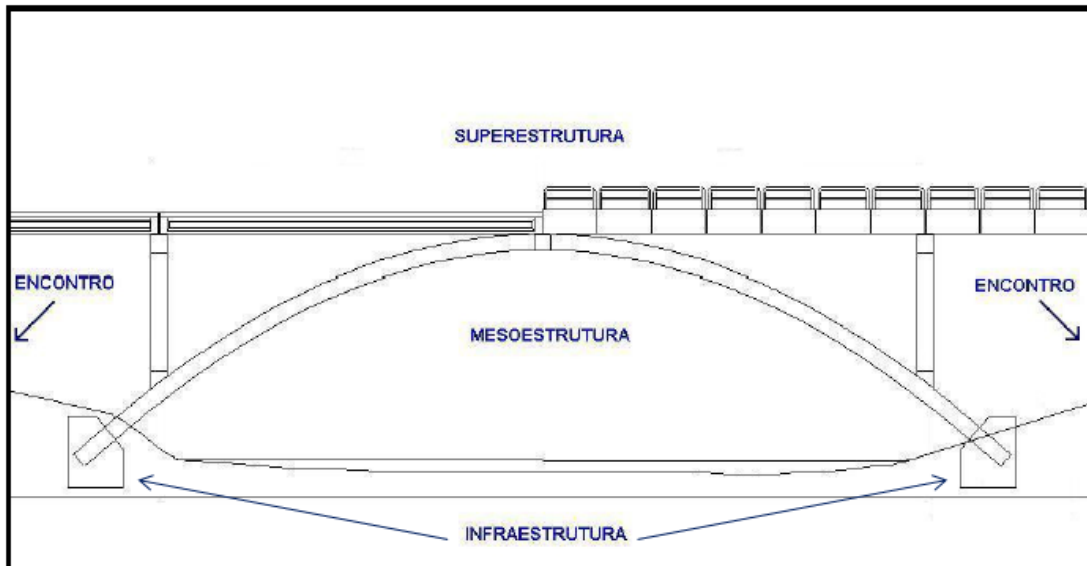
Porém também é necessário ter em mente que, de acordo com Troitsky (2000, p. 29, tradução nossa), “O desenho inicial da estrutura é um problema de engenharia muito complexo. Ele inclui a consideração de outros fatores importantes, tais como, escolha do sistema estrutural da ponte, materiais, dimensões, fundações, estética, paisagem local e o ambiente.”.

Independente da concepção estrutural, as pontes são caracterizadas como obras de arte especiais, pois sua concepção envolve uma fração de arte mesclada com o embasamento técnico, como destaca Troitsky (2000, p. 29). Dentre todas as tipologias estruturais possíveis, as pontes em lajes, arco, esconsas, curvas e em balanços progressivos, são classificadas como pontes especiais, devido a maior dificuldade em elaborar o projeto e exigirem um acompanhamento rigoroso em sua execução (MASON, 1977, p. 262).

Conforme Pfeil (1980, p. 1), as pontes, tendo em vista a funcionalidade estrutural, podem ser divididas em três partes principais: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura. Ainda, como destaca Mattos (2001, p. 18), pode existir uma quarta parte que se refere às obras de encontro, utilizado em algumas estruturas com a finalidade de absorver os empuxos de aterros

de acesso e servindo também como apoio extremo. A figura 1 ilustra estes elementos para o caso de uma ponte em arco com tabuleiro superior.

Figura 1 – Esquema representativo da divisão estrutural de pontes em arco



(fonte: LAZZARI, 2008, p. 16)

A classificação das pontes pode ser feita através da análise de vários critérios, como, quanto à finalidade, ao material utilizado na construção, à concepção estrutural, tempo de vida útil, à fixidez ou mobilidade do estrado, dentre outros (PFEIL, 1980, p. 5). O projeto desenvolvido neste trabalho trata de uma ponte em concreto armado, com arco inferior, rodoviária urbana.

Dentre os diversos modelos estruturais, as pontes em arco são uma das mais antigas tipologias em uso. Estas obras recebem esta denominação pelo fato de a mesoestrutura destas pontes ser constituída por arcos ou abóbodas. Conforme Leonhardt (1979, p. 9), os chineses e os romanos aplicavam esta solução estrutural nas diversas obras realizadas por estes insígnis mestres da construção.

Os materiais utilizados na antiguidade limitavam os vãos destas estruturas. Com a ascensão do concreto armado na execução de pontes, as dimensões destas estruturas foram aumentando. Um exemplo deste avanço é a ponte, em arco inferior de concreto armado, de Sandö, na Suécia, construída entre 1941 e 1945, com um vão livre de 280 m (LEONHARDT, 1979, p. 10). Na figura 2, pode-se observar esta obra.

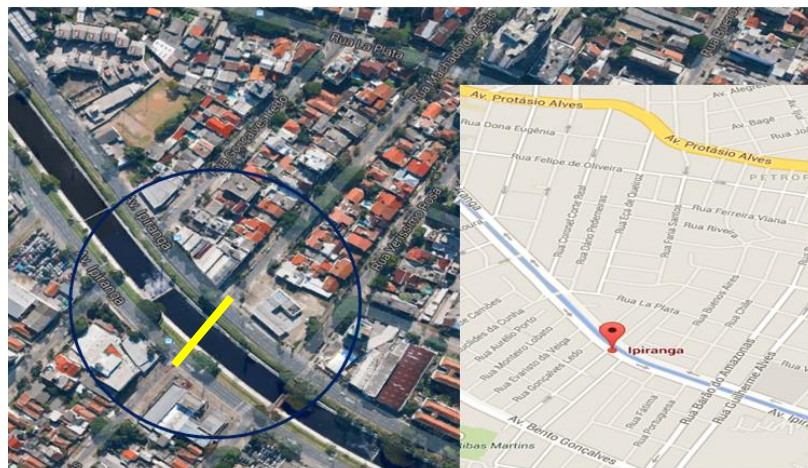
Figura 2 – Ponte de Sando Bron-Suécia



(fonte: CLARO, 2014)

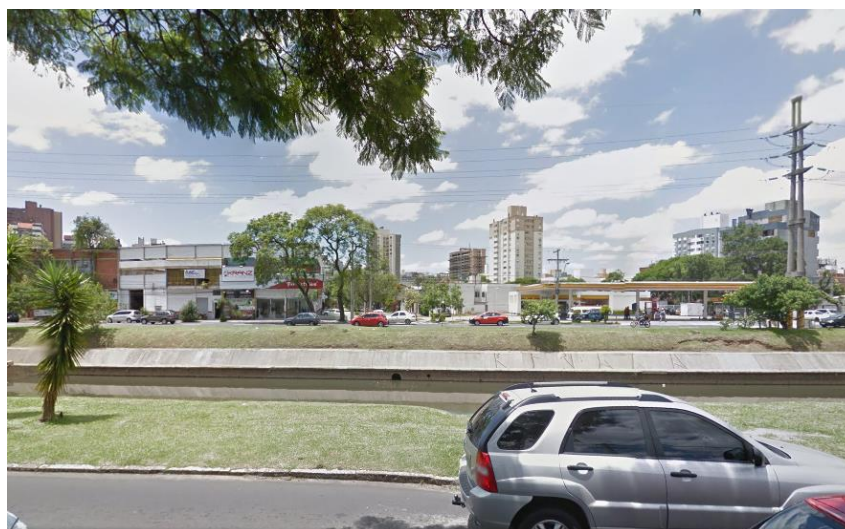
Pontes são estruturas que afetam o meio em que se situam no que tange a questão visual. Frente ao melhor desempenho estrutural dos arcos, para o material concreto, e visando o valor estético da obra de arte especial, neste meio, o modelo de pontes em arco inferior de concreto armado tem grandes vantagens. Considerando a complexidade do dimensionamento e do detalhamento desta estrutura, a na proposta de elaboração de um projeto, apresentou um desafio grande e proveitoso para a solidificação do embasamento teórico adquirido ao longo do curso de graduação em Engenharia Civil. O projeto foi desenvolvido sobre o arroio Dilúvio no cruzamento da avenida Ipiranga e rua Machado de Assis, em Porto Alegre. O local é apresentado nas figuras 3 e 4.

Figura 3 – Cruzamento de interesse



(fonte: GOOGLE MAPS, [2014a])

Figura 4 – Vista frontal da rua Machado de Assis



(fonte: GOOGLE MAPS, [2014b])

Este trabalho foi dividido em 4 capítulos no intuito de sistematizá-lo, para torná-lo claro e direto. O primeiro capítulo apresenta uma breve classificação destas obras, e a sua importância no desenvolvimento da humanidade.

O capítulo 2, traz o método de pesquisa, onde são destacadas as questões que fomentaram o desenvolvimento deste trabalho, como também, os objetivos e as limitações do mesmo.

O capítulo 3 expõe um breve histórico destas obras, suas classificações, limitações, funções e também a tipologia estrutural em arco, tema deste trabalho de conclusão.

O capítulo 4 busca sistematizar as ações que necessitam ser consideradas no desenvolvimento do projeto de uma ponte, assim como, de forma sucinta apresentar como deve ser tratado a carga móvel em uma estrutura.

O capítulo 5, trata basicamente do pré-dimensionamento, onde se fez cálculos iniciais para ter uma ideia de quais seções e propriedades seriam necessárias. E com esses dados criou-se o modelo estrutural tridimensional. Trata também dos critérios adotados para aplicar os carregamentos sobre a estrutura.

O capítulo 6 apresenta as solicitações atuantes nos elementos estruturais, os critérios adotados no dimensionamento estrutural e as situações de cálculo observadas.

Por último no capítulo 7, são feitas algumas considerações finais sobre o trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos itens apresentados a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual seria uma alternativa de projeto para uma ponte sobre o arroio Dilúvio, para as condições de contorno apresentadas no cruzamento da rua Machado de Assis com a avenida Ipiranga em Porto Alegre, Rio Grande do Sul?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados, em principal e secundário, e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a elaboração de um projeto estrutural, dimensionamento e detalhamento, para uma ponte rodoviária em arco inferior de concreto armado situada no cruzamento entre a rua Machado de Assis e avenida Ipiranga em Porto Alegre – RS.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a descrição do método construtivo e respectivos esforços na fase de execução.

2.3 PRESSUPOSTOS

O trabalho tem por pressupostos que, as prescrições normativas apresentadas pelas normas NBR 7187/2003a, NBR 6118/2014, NBR7188/2013, NBR 8681/2003b e NBR 9062/2006, são válidas para a elaboração do projeto de uma ponte rodoviária em arco inferior de concreto armado.

2.4 DELIMITAÇÕES

A delimitação deste trabalho de diplomação é que o espaço geográfico onde a ponte será construída é o cruzamento da rua Machado de Assis com a avenida Ipiranga no município de Porto Alegre no estado o Rio Grande do Sul.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o projeto trata exclusivamente de uma ponte rodoviária urbana, classe TB-450, de concreto armado, com arco inferior e duas faixas de tráfego;
- b) as medidas do vão livre e das cotas do terreno são valores aproximados;
- c) as sondagens utilizadas para o cálculo dos parâmetros do solo não correspondem ao local de interesse;
- d) o gabarito da ponte é limitado pelas legislações vigentes.

2.6 DELINEAMENTO

As diversas etapas de realização do trabalho foram organizadas segundo o diagrama apresentado na figura 5.

Como se pode observar, a pesquisa bibliográfica é essencial para a realização de cada etapa. Ela concede não somente a informação de como fazer, mas sim uma base sólida, para que a sequência do trabalho não fosse comprometida, e fluísse devidamente alicerçada. Sua importância é representada pela conexão da pesquisa bibliográfica com todas as demais etapas no diagrama apresentado.

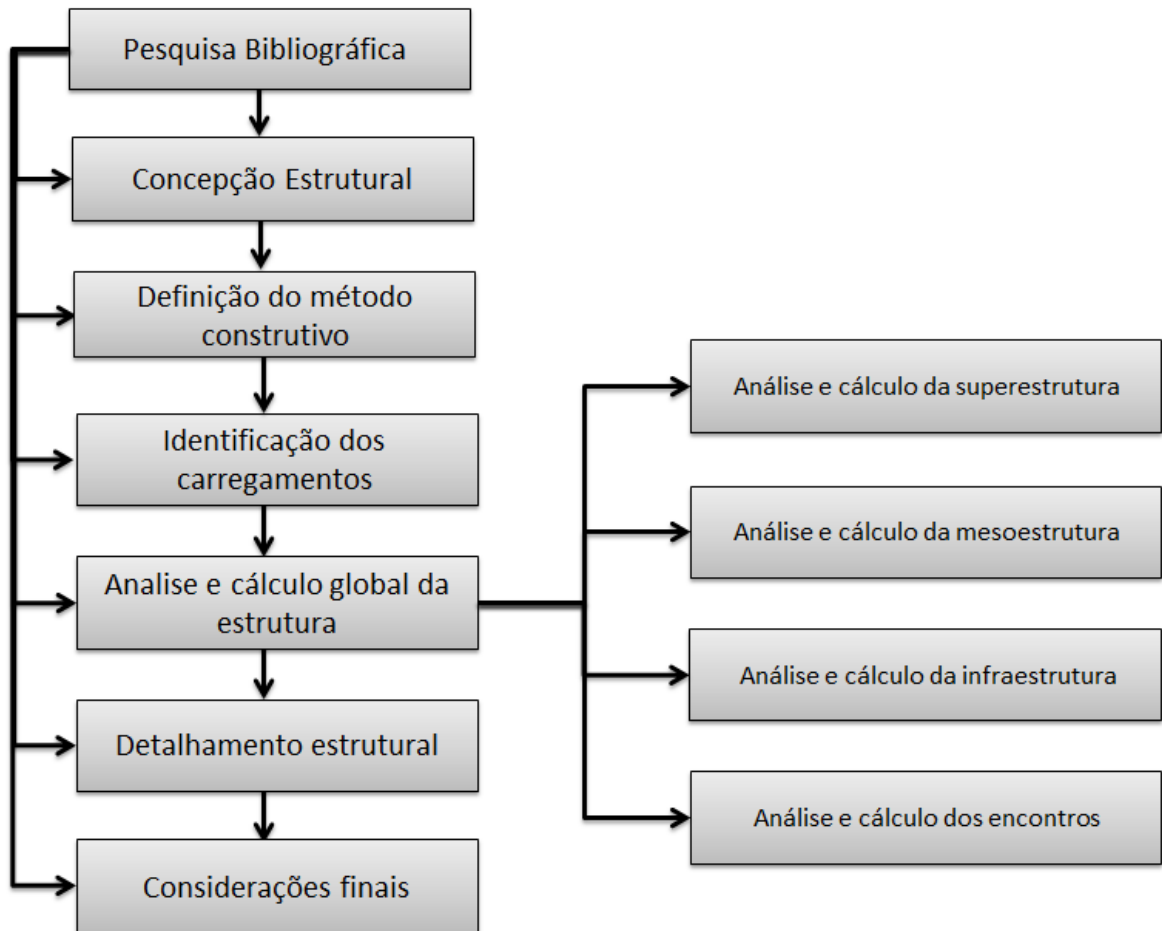
A concepção estrutural é o ponto de partida para qualquer projeto estrutural. Se tratando de obras de arte especiais, a criatividade e a experiência do engenheiro tornam-se fatores importantes neste princípio, conforme Leonhardt (1979, p. 20). Porém, para o caso deste trabalho, a concepção estrutural se deu pelo desafio que uma ponte, em arco inferior de concreto armado, apresenta em seu dimensionamento e detalhamento. A viabilidade econômica não foi um fator considerado e, portanto, não é abordada neste trabalho.

Após a escolha da tipologia estrutural na fase de concepção, se buscou a definição do método construtivo mais adequado para a execução da estrutura. Frente as limitações impostas, pelo fluxo intenso de automóveis na avenida Ipiranga, inviabilizando a implantação de um canteiro de obras no local, a solução definida para a execução das peças foi a pré-fabricação das mesmas, exceto as fundações, e o transporte para local. Esta etapa é fundamental para a sequência do trabalho, pois a identificação dos carregamentos está intimamente ligada ao método construtivo, devido às fases de serviço que as peças serão submetidas, desde o processo de fabricação, transporte, posicionamento e finalização da obra. Para cada fase, que as peças enfrentaram, se estimou as solicitações atuantes sobre as mesmas.

Os carregamentos atuantes sobre a estrutura final foram determinados segundo as recomendações da NBR 7187/2003, sendo estes divididos em permanentes, variáveis e excepcionais. Em seguida se realizou a análise e cálculo global dos elementos estruturais, com a ajuda de ferramentas computacionais. Inicialmente se verificou a superestrutura e mesoestrutura, partindo então, para infraestrutura e os encontros.

Ao concluir a análise e o dimensionamento estrutural, se buscou detalhar os elementos com o objetivo de evitar problemas nas ligações e facilitar a execução da ponte. Ao finalizar o projeto, fizeram-se algumas considerações finais sobre o mesmo.

Figura 5 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

3 PONTES

O presente capítulo destina-se a apresentar uma definição geral do assunto deste trabalho, uma contextualização histórica, as principais funções e classificações destas obras, uma ideia sucinta das informações necessárias para o início de um projeto, assim como, as particularidades apresentadas pela tipologia estrutural em arco.

3.1 DEFINIÇÃO

Pfeil (1980, p. 1) define as pontes como obras destinadas a transpor obstáculos e interligar pontos separados de uma via. Estes obstáculos podem ser rios e braços de mar. Quando estas obras têm por objetivo superar obstáculos, não constituídos por cursos d'água [relevantes], são denominadas viadutos.

Conforme O'Connor (1975, p. 4), “Em geral, o obstáculo transposto por uma ponte terá também uma função a cumprir. Esta pode ser artificial ou natural. [...]. Essas funções devem ser preservadas.”.

Mattos (2001, p. 18), mostra que, “Tecnicamente, as pontes e os viadutos são classificados como Obras de Arte Especiais.”. Essas obras são assim consideradas porque “O planejamento e o desenho de pontes é parte arte e parte compromisso, este é o aspecto mais significativo da engenharia estrutural. É a manifestação da capacidade criativa dos desenhistas [...]”, como destaca Troitsky (2000, p. 29, tradução nossa).

Do ponto de vista funcional, Pfeil (1980, p. 1-2), comenta que:

As pontes, em sua maioria, sob o ponto de vista funcional, podem ser divididas em três partes principais: infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura.

A infraestrutura ou fundação, é a parte da ponte por meio da qual são transmitidos ao terreno de implantação da obra, rocha ou solo, os esforços recebidos da mesoestrutura. Constituem a infraestrutura os blocos, as sapatas, as estacas, os tubulões etc., assim como as peças de ligação de seus diversos elementos entre si, e destes com a mesoestrutura como, por exemplo, os blocos de cabeça de estacas e vigas de enrijecimento desses blocos.

A mesoestrutura, constituída pelos pilares, é o elemento que recebe os esforços da superestrutura e os transmite à infraestrutura, em conjunto com os esforços

recebidos diretamente de outras forças solicitantes da ponte, tais como pressões do vento e da água em movimento.

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

Os encontros, considerados por alguns engenheiros como constituintes da mesoestrutura, e por outros como fazendo parte da infraestrutura, são elementos de características extremamente variáveis, cuja função principal é receber o empuxo dos aterros de acesso e evitar sua transmissão aos demais elementos da ponte. Os encontros, apesar de imprescindíveis em algumas pontes, podem ser dispensados em viadutos e em pontes cujos aterros de acesso não apresentam perigo de erosão pelo curso d'água.

Além destes elementos apresentados, existem ainda estruturas de proteção dos pilares contra choques de embarcações, automóveis, trens, etc. (MASON, 1977, p. 2).

A superestrutura é subdividida, por Mason (1977, p. 2, grifo do autor), “[...] no tabuleiro propriamente dito e no vigamento principal e secundário. Entenderemos por **tabuleiro** a pista de rolamento, submetida diretamente à ação do tráfego [...]”.

A nomenclatura das vigas, que fazem parte da superestrutura, também é distinguida em função da sua participação na estrutura, desta maneira, “As vigas principais [...] são denominadas **longarinas** e as transversais, **transversinas**.” (MASON, 1977, p. 2, grifo do autor).

3.2 HISTÓRICO

A construção de pontes vem caminhando junto com o desenvolvimento da humanidade. Sabe-se que, de acordo com Leonhardt (1979, p. 9), “Desde a antiguidade encontram-se entre os povos primitivos, pontes de madeira ou de cordas, na forma de vigas, vigas escoradas e vigas armadas simples.”.

Sabe-se que, “[...] os humanos sempre tiveram a necessidade de atravessar rapidamente córregos e outros obstáculos naturais. No início, isso era feito por meio de caminhos sobre as pedras e por troncos caídos, que eram apoiados por pedras dentro do córrego [...]”. (FOX, 2000, p. 457, tradução nossa).

Mattos (2001, p. 19) comenta que as primeiras estruturas com certeza enfrentavam limitações quanto à profundidade do rio e o vão que poderiam vencer. Porém com a capacidade de adaptação e evolução da humanidade, “Os humanos logo descobriram que os cipós ligados à copa de uma árvore garantiam a possibilidade de balançar sobre grandes rios. Isso levou a construção das primeiras pontes pênseis [...]”, conforme Fox (2000, p. 457, tradução nossa). Basicamente a humanidade estava adaptando os modelos apresentados pela natureza às suas necessidades e ultrapassando seus limites.

Assim os mais diversos modelos de pontes foram sendo desenvolvidos. E dentre eles as pontes em arco. Sabe-se, de acordo com Fox (2000, p. 457, tradução nossa), que:

Os Sumérios, uma comunidade que vivia no vale do Tigre-Eufrates, cozinhavam tijolos no sol e os utilizavam como seu principal material de construção. [...]. Por volta de 4000 a. C. eles descobriram as vantagens da forma do arco e sua construção e iniciaram a construção de formas de estradas em arco e pequenas pontes em arco utilizando seus tijolos cozinhados no sol.

Leonhardt (1979, p. 9), mostra que:

Os chineses e os romanos construíram abóbodas de pedra, já antes de Cristo. Entre os romanos, a arte da forma (arcos semicirculares de até 30 m de vão) e do trabalho em pedra teve um grande desenvolvimento [...]. Vales inteiros eram vencidos por estes insígnis mestres construtores para conduzir suas canalizações de água [...]. Também os turcos construíram, desde cedo, pontes de pedra de grandes vãos, embora em sua maioria, na forma de arco gótico aliviado. Na idade média as abóbodas começaram a ser mais abatidas (vãos até 50 m).

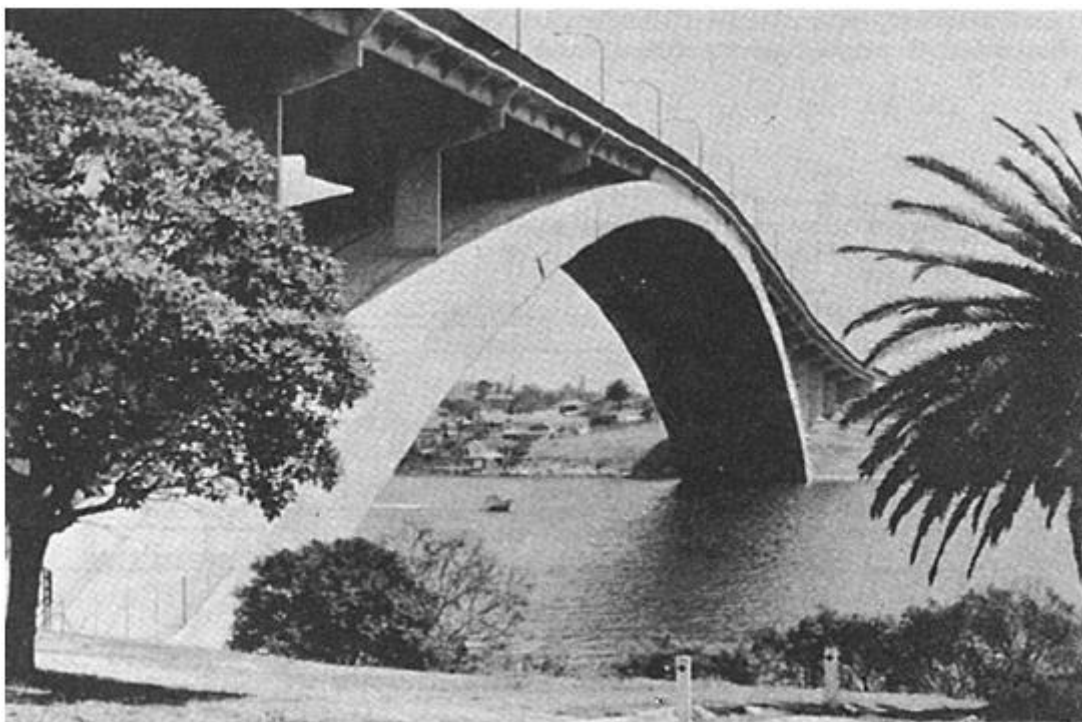
Essas nações perceberam que para estruturas construídas com materiais maciços [pedra, concreto], devido ao peso próprio, a forma do arco é a tipologia estrutural mais apropriada, desde que se tenha uma condição de resistência no terreno da fundação. (LEONHARDT, 1979, p. 30).

Com avanço tecnológico da humanidade, houve a modificação dos materiais empregados na construção de pontes. O ferro é um dos materiais que tiveram e tem sua aplicação na execução destas obras. Sabe-se que, “As pontes em ferro fundido em forma de arco, surgiram no fim do século XVIII.” (LEONHARDT, 1979, p. 9). Conforme relata Fox (2000, p. 457, tradução nossa), “Em 1779, a primeira ponte em ferro fundido foi construída em Coalbrookdale, Inglaterra para transpor o rio Severn. Era um arco semicircular com vão de 43 m.”.

No início do século XX, conforme Leonhardt (1979, p. 9) “[...] começaram a surgir as primeiras pontes com um novo material de construção: o concreto. Executaram-se, de início, arcos triarticulados, nos quais o concreto apenas substituía a pedra como material de construção.”.

Com a ascensão do uso do concreto armado na execução das mais diversas estruturas, os vãos superados pelas pontes em arco tiveram um aumento considerável. Um dos exemplos desse avanço é a ponte Gladesville em Sídney, Austrália, com 304 m de vão, como mostra a figura 6.

Figura 6 – Ponte Gladesville



(fonte: O'CONNOR, 1976, p. 453)

3.3 FUNÇÕES

As principais funções dos elementos constituintes das pontes são apresentadas por Pfeil (1980, p. 8-9),

A função viária da ponte é, por excelência, dar continuidade à estrada na transposição de um obstáculo.

As funções viárias são desempenhadas pelos elementos mais ligados ao usuário, tais como: pista de rolamento, com ou sem acostamento, [...], passeios laterais, guarda-corpo, barreiras de proteção etc.

A função estática consiste em conduzir as cargas da posição onde elas se encontram até o solo. As funções estáticas são representadas pelos principais elementos estruturais da obra a saber: lajes, vigamento (longitudinal ou transversal), vigamento principal, pilares, blocos de transição e fundações.

A função da laje é receber diretamente as cargas dos veículos que circulam no tabuleiro. [...]

O vigamento secundário tem função de servir de apoio às lajes, conduzindo as reações destas ao vigamento principal. [...]

O vigamento principal é que vence os obstáculos que determinam o projeto da obra, transferindo as cargas dos vãos para os apoios sobre os pilares.

Os pilares recebem as cargas verticais e horizontais da superestrutura, transferindo-as para as fundações, que por sua vez as transferem ao terreno. Como a geometria da fundação em geral difere da do pilar, intercala-se um bloco de transição entre esses dois elementos.

Outra função que deve ser abordada é a função estética destas obras. Devido ao porte e seu tempo de vida elevado, essas obras devem buscar uma harmonia com o meio em que se estabelecem. Neste aspecto o arco tem grande vantagem. O'Connor (1976, p. 443), comenta, “Esteticamente, o arco pode ser o tipo de ponte de maior sucesso. Parece que [...] o homem comum considera a forma em arco harmoniosa e expressiva. A forma curva é quase sempre agradável.”. Também Fox (2000, p. 457, tradução nossa), relata que, “Muitas das pontes de alvenaria em arco construídas nos últimos 2000 anos, estão no meio das cidades onde os moradores não só as consideram necessárias para o comércio mas também pela sua bela aparência.”.

Assim o projeto em questão, além de criar uma nova travessia sobre o arroio Dilúvio em Porto Alegre, busca amenizar a intrusão visual gerada com a execução da obra.

3.4 CLASSIFICAÇÃO

De acordo com Mason (1977, p. 3), tem-se que, “A classificação das pontes pode obedecer a vários critérios.”. Dependendo do ponto de vista sob o qual estão sendo consideradas, a classificação das mesmas, pode-se dar de diversas maneiras. (PFEIL, 1980, p. 3). Neste trabalho, as pontes foram consideradas quanto à finalidade, quanto ao material com que são executadas, quanto ao tipo estrutural, quanto ao tempo de utilização, quanto ao sistema construtivo e conforme o desenvolvimento do seu eixo em relação ao eixo do arroio Dilúvio.

Com isso se pode classifica-las, “Quanto à finalidade, as pontes podem ser rodoviárias, ferroviárias e rodoferroviárias. Podemos ter, além disto, pontes destinadas apenas ao tráfego de pedestres, também denominadas passarelas.” (MASON, 1977, p. 3).

Tendo em vista o tipo de material empregado em sua execução, “[...] as pontes podem ser de madeira, de pedra, de concreto armado, normal ou protendido, e metálicas [...]” (PFEIL, 1980, p. 5).

Outro critério de classificação é dado pelo tipo estrutural, “[...] as pontes podem ser em laje [...], em vigas retas, de alma cheia [...], em treliça [...], em quadros rígidos [...], em **arcos** ou abóbodas [...] e pênséis ou suspensas [...]” (PFEIL, 1980, p. 5, grifo nosso). Ainda sobre os sistemas estruturais Mason (1977, p. 3), aponta que “[...] podemos ter pontes isostáticas e hiperestáticas.”.

Quanto ao tempo de utilização, Pfeil (1980, p. 5) comenta que, “Quando as pontes são construídas para serem utilizadas por um período de tempo relativamente curto, chamam-se, naturalmente, provisórias e o material mais empregado em sua construção é a madeira.”.

Quanto ao sistema construtivo, “[...] as pontes em concreto armado e protendido podem ser em escoramento direto, em **vigas** [elementos] **pré-moldados**, em aduelas, em balanços progressivos etc.” (MASON, 1977, p. 3, grifo nosso).

Por fim, em última análise, pode-se classificar as pontes sob o ponto de vista da orientação. Conforme Mason (1977, p. 3):

De acordo com o desenvolvimento do eixo das pontes, podemos ter pontes em eixo retilíneo e pontes em curva.

É possível também classificar as pontes em normais e esconsas. Nas primeiras, o cruzamento do curso de água ou vale, pela obra-de-arte, será normal aos mesmos e, no segundo caso, em ângulos diferentes de 90°.

O projeto em questão neste trabalho, pode ser classificado, devido às condições apresentadas no cruzamento da rua Machado de Assis e avenida Ipiranga em Porto Alegre/RS, como sendo de uma ponte rodoviária urbana de concreto armado, em arco inferior, permanente, construída com elementos pré-fabricados, com eixo retilíneo e esconsa. Conforme Mason (1977, p. 262), dentro das diversas obras de arte especiais, a ponte em questão é uma ponte especial, devido às características apresentadas e a tipologia estrutural adotada.

3.5 DADOS PARA UM PROJETO

Para se dar início ao projeto de uma ponte, tem-se a necessidade de ter em mãos uma grande quantidade de dados referentes a região para à qual a obra de arte será projetada. Leonhardt (1979, p. 19, grifo do autor), cita alguns como:

- a) **planta de situação**, contendo indicações dos obstáculos a serem transpostos, como cursos d'água, estradas, caminhos, ferrovias (e, em vales, as curvas de nível). [...];
- b) **seção longitudinal** ao longo do eixo projetado da ponte, com indicação das exigências quanto a gabaritos e seções de vazão. [...];
- c) **largura da ponte**, com indicação da largura da faixa de tráfego, acostamentos, passeios, [...];
- d) **condições das fundações**, sondagens, [...]. Indicação dos valores característicos das camadas do solo. [...];
- e) **condições locais**, tais como vias de acesso para o transporte de equipamentos, materiais e componentes; [...];
- f) **condições meteorológicas e ambientais**, como cheias, marés, níveis d'água, períodos de seca, temperaturas médias e extremas, [...];
- g) **estética e meio ambiente**: paisagem livre, terreno plano, suavemente ondulado ou montanhoso. Cidades com prédios antigos de pequenas dimensões ou grandes prédios modernos. [...];
- h) **exigências relativas ao meio ambiente**, tais como qualidades relacionadas à beleza: pontes em regiões urbanas, que influenciam a vista da cidade e que frequentemente são vistas de perto [...].

Estes dados fornecem ao projetista estrutural a possibilidade de pensar em como fazer, ao mesmo tempo em que está projetando a estrutura. Assim se consegue alinhar o projeto com a melhor forma de executá-lo. Evita as possibilidades de modificações inesperadas devido à falta de dados suficientes no momento em que se está pensando/elaborando o projeto.

3.6 TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS: PONTES EM ARCO

Na teoria, “Os arcos perfeitos [...] são aqueles que possuem apenas esforço axial atuando no centroide de cada seção do arco.” (FOX, 2000, p. 456, tradução nossa). Estas solicitações são provocadas pelas reações horizontais que atuam nos apoios. (PFEIL, 1980, p. 81).

Com isso se pode diferenciar os arcos das vigas, muito usadas em pontes. Pfeil (1980, p. 82), ainda comenta que, “Estruturalmente, os arcos são mais eficientes que as vigas, uma vez que a solicitação axial de compressão favorece o trabalho do concreto. Com arcos de concreto armado, é possível atingir vãos livres da ordem de 300 m a 500 m, [...]”.

Como apresentado acima, as estruturas em arco foram grandemente usadas pelos povos da antiguidade. Mason (1977, p. 296-297), relata que, “As pontes em arco constituíram no passado a única solução estrutural viável para vencer grandes vãos. [...] eram indicadas especialmente em presença de dificuldades para a implantação de apoios intermediários e escoramentos, [...]”. Na atualidade já existem novos métodos construtivos, que possibilitam a execução de pontes com diferentes soluções estruturais, frente as mais diversas condições de contorno apresentadas, porém, o arco continua sendo uma alternativa.

De uma maneira clássica, “A forma [...] do arco é constituída por uma viga (ou nervura) curva, que vai de encontro a encontro e que fornece as reações de apoio cujas componentes horizontais são essenciais para a ação do arco.” (O’CONNOR, 1976, p. 440). Para a seção transversal dos arcos existem duas soluções possíveis, abóbodas, arcos achatados de grande largura, geralmente com largura igual a da estrutura que este suporta, ou os arcos propriamente ditos (PFEIL, 1980, p. 84). Para o caso de arcos isolados, se faz a análise da necessidade de estruturas de contraventamento interligando os arcos (MASON, 1977, p. 298).

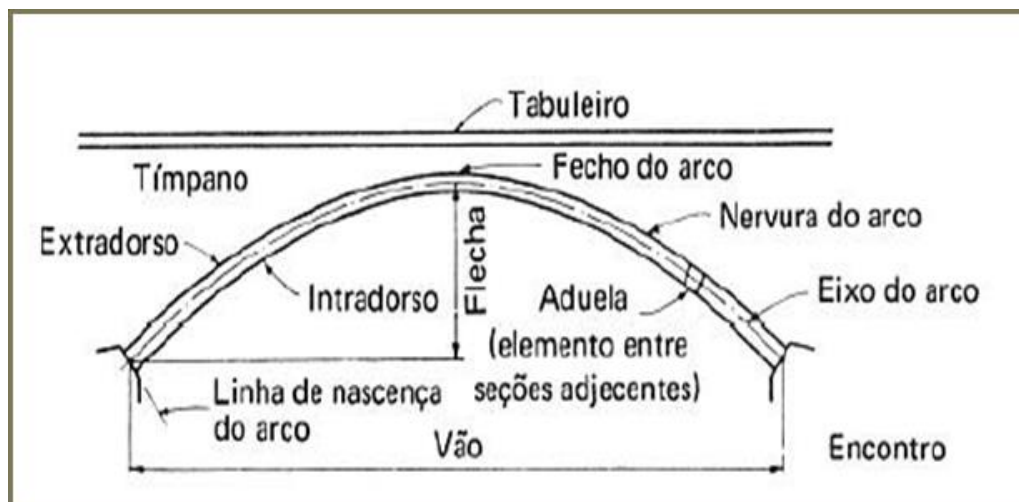
Do ponto de vista da teoria das estruturas, os arcos podem ser isostáticos ou hiperestáticos, sendo que, “Os arcos isostáticos apresentam três rótulas, em geral situadas nas encostas e no

fecho [ponto de encontro dos arcos] [...]”. E para o caso dos arcos hiperestáticos, “[...] podem ser bi-rotulados [...] ou bi-engastados.” (PFEIL, 1980, p. 85).

A figura 7 apresenta a nomenclatura dos elementos de uma ponte em arco inferior. Cabe salientar que os termos apresentados são baseados em arcos de alvenaria. O tímpano, espaço entre o arco e o tabuleiro, pode ser preenchido ou vazado. Quando este for vazado, a transmissão de cargas do tabuleiro para o arco se dá por meio de colunas [pilares] dispostas entre os dois elementos (O’CONNOR, 1976, p. 440). As pontes em arco com tímpanos cheios “[...] são apropriados para vãos de 20 a 40 m, [...]”, conforme Leonhardt (1979, p. 33). No caso de tímpanos cheios a distribuição de cargas sobre a nervura é uniforme. Isso favorece o uso de arcos contínuos (O’CONNOR, 1976, p. 441).

O arco pode ter uma forma mais ou menos abatida, isso depende exclusivamente das condições locais apresentadas (MASON, 1977, p. 299). Quando a relação entre a flecha e o vão for muito pequena, o arco tem uma forma extremamente abatida, com isso surgem empuxos elevados nos apoios. Uma solução muito prática para essa situação é juntar o arco com a laje do tabuleiro, comenta Leonhardt (1979, p. 34).

Figura 7 – Nomenclatura de ponte em arco

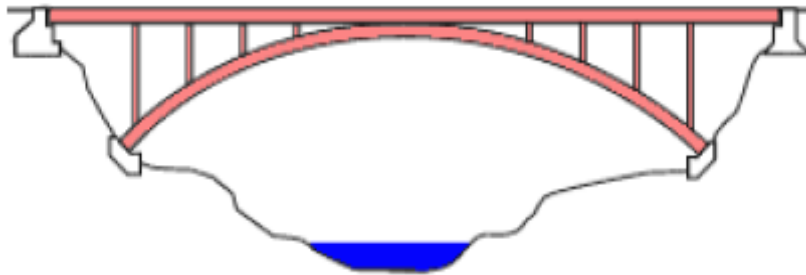


(fonte: O’CONNOR, 1976, p. 440)

Existem três variações de possíveis projetos de pontes em arcos, conforme apresenta Mattos (2001, p. 33), “As estruturas em arco podem ser projetadas com tabuleiro superior [com tímpano vazado ou cheio], [...] ou com tabuleiro inferior, sustentado por tirantes ou pendurais.

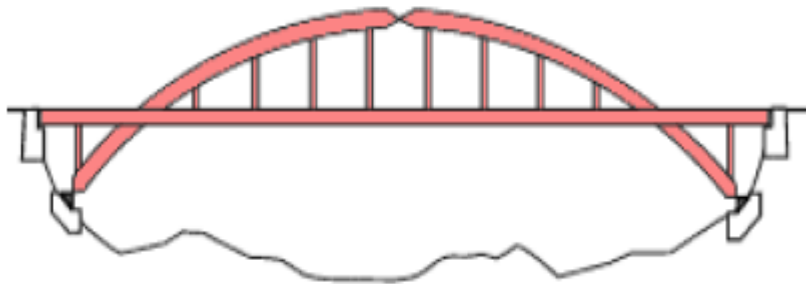
Existe ainda um sistema misto com arco intermediário, sustentado lateralmente por montantes e, no centro, por pendurais [...]. As figuras 8 a 10 apresentam estes três principais tipos.

Figura 8 – Ponte em arco inferior



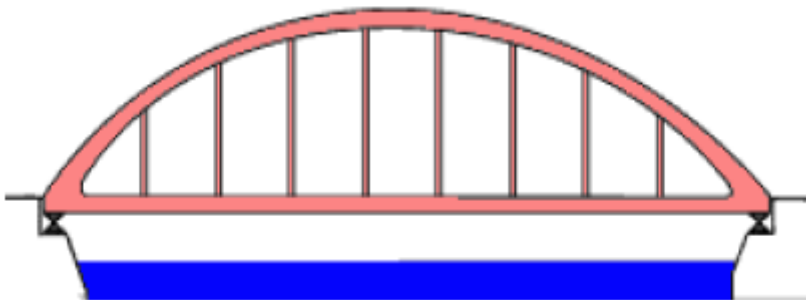
(fonte: MATTOS, 2001, p. 33)

Figura 9 – Ponte com arco intermediário



(fonte: MATTOS, 2001, p. 33)

Figura 10 – Ponte em arco superior



(fonte: MATTOS, 2001, p. 33)

4 ANÁLISE GLOBAL DA ESTRUTURA

Para que se possa dar início à análise da estrutura é importante que a etapa da concepção estrutural esteja vencida, fora os casos onde se tem por objetivo comparar diversas soluções estruturais para as mesmas condições de contorno. Para o caso deste trabalho a tipologia estrutural foi definida pelo autor baseada nos argumentos apresentados no capítulo introdutório.

Após definida e vencida a etapa de concepção estrutural, Mason (1977, p. 12), apresenta uma metodologia de análise para a estrutura:

Logo de início, devemos estudar a interação global da superestrutura com a mesoestrutura e infraestrutura, de modo a fixar a distribuição de esforços. Podemos a seguir, passar ao estudo detalhado de cada parte componente da obra, a começar pela superestrutura. Nesta, de acordo com o tipo de ponte, dimensionamos as lajes do tabuleiro e o sistema estrutural principal, para as ações mais desfavoráveis dos diversos tipos de carregamentos e solicitações. A seguir, ocupamo-nos do cálculo [da mesoestrutura] [...], considerando também as condições mais desfavoráveis às quais possam estar submetidas.

Por último, estudamos as fundações, no que se refere ao seu comportamento estrutural e a interação solo-estrutura.

O dimensionamento das pontes, em concreto armado e protendido é feito para os esforços solicitantes gerados nas combinações de ações (permanentes, variáveis e excepcionais) (MASON, 1977, p. 8). Busca-se dimensionar a estrutura de forma que esta atenda aos limites estabelecidos pelas normas em vigor. Estes limites são definidos pela NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b, p. 2), como estados limites:

- a) últimos (ELU), considerados na fase de projeto, são alguns exemplos: perda de equilíbrio, ruptura ou deformação plástica excessiva, instabilidade por deformação e instabilidade dinâmica;
- b) de serviço (ELS), considerados no período de vida da estrutura, são exemplos: deformações excessivas que afetam a utilização, vibrações excessivas ou desconfortáveis, combinações quase permanentes, combinações frequentes e ainda combinações raras.

A referida norma também informa que, em função do material de construção empregado, estes limites variam e são estabelecidos pelas normas referentes ao material em questão. Para uma ponte de concreto armado, os requisitos do projeto, tendo em vista, o respeito dos limites apresentados e a garantia da durabilidade da obra de arte especial são exigências estabelecidas pela NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 3).

4.1 AÇÕES A CONSIDERAR EM PONTES

Mason (1977, p. 8), comenta que “Os carregamentos e demais esforços atuantes são fixados por normas [...]”. A NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 3), define ações como, “[...] as causas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações nas estruturas.”.

Dentre todos os possíveis carregamentos [ações] que podem atuar nas estruturas, Mason (1977, p. 8-10), apresenta os mais importantes para o caso das pontes:

- a) **carga permanente.** É avaliada com base no peso específico do concreto armado ou protendido, [...], além do peso de outros elementos, tais como pavimentação, guarda-corpos, guarda-rodas, [...];
- b) **carga móvel.** É fixada de acordo com o tipo de ponte e a classe de rodovia ou ferrovia. [...];
- c) **impacto vertical e impacto lateral.** As cargas móveis produzem efeitos dinâmicos diversos, em consequência de sua própria mobilidade, irregularidades da pista, etc.;
- d) **força longitudinal.** A força longitudinal é devida à frenagem e à aceleração dos veículos ou trens sobre as pontes. [...];
- e) **força centrífuga.** Nas pontes em curva, a carga móvel transmite à ponte uma força centrífuga [...];
- f) **vento.** Incide transversalmente sobre a ponte e a carga móvel, sendo o seu efeito avaliado através de pressões por unidade de área, [...];
- g) **efeitos térmicos, atrito nos apoios, empuxos, movimento das fundações, etc.** Deverão ser considerados, em cada caso, de acordo com as condições especiais da obra.

Nos próximos itens, estas ações são melhor detalhadas para o caso da ponte em arco inferior de concreto armado, tema deste trabalho de conclusão.

4.1.1 Ações permanentes

Ações permanentes são definidas pela NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 4), como, “Ações cujas intensidades podem ser consideradas como constantes ao longo da vida útil da construção. Também [...] as que crescem no tempo, tendendo a um valor limite constante.”.

Conforme os elementos estruturais e particularidades da ponte em arco, são consideradas as ações permanentes geradas pelos carregamentos listados a seguir.

4.1.1.1 Peso próprio dos elementos estruturais

Conforme Pfeil (1980, p. 42), “A importância relativa do peso próprio, no total de solicitações, depende do material empregado e do vão livre da ponte. [...]. Nas pontes de concreto [...], a carga de peso próprio é predominante.”.

Os elementos que constituem o peso próprio da ponte, considerados neste projeto, são as lajes, vigas [transversinas], os arcos, guarda-rodas e guarda-corpo. Para o caso de concreto simples, o peso específico é de 24 kN/m³ e no caso de concreto armado ou protendido, 25 kN/m³, conforme as orientações da NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 4).

4.1.1.2 Pavimentação

A NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 4), estabelece que no caso da existência de um revestimento asfáltico sobre a laje de concreto, o valor mínimo indicado para o peso específico é de 24 kN/m³. Conforme os critérios do proprietário da obra, pode-se ou não, considerar uma carga adicional de 2 kN/m², valor este que contabiliza um possível recapeamento.

4.1.1.3 Empuxo de terra

Conforme a NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 4), “O empuxo de terra nas estruturas é determinado de acordo com os princípios da mecânica dos solos, em função de sua natureza (ativo, passivo ou de repouso), das

características do terreno, assim como das inclinações dos taludes e dos paramentos.”. Estes empuxos são absorvidos pelas estruturas de encontro, se evitando assim a transmissão de solicitações à estrutura devido a este carregamento.

4.1.1.4 Forças de protensão

As forças de protensão são geradas pelos cabos protendidos, que serão aplicados na execução da laje da pista e do passeio. As prescrições normativas a serem consideradas estão apresentadas na NBR 6118/2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

4.1.1.5 Fluência e retração

O concreto possui características reológicas. Dentre elas estão a retração e a fluência. Conforme Süssekind (1981, p. 19), “A retração do concreto é uma deformação independente de carregamento (e, portanto, de direção, sendo, pois, uma deformação volumétrica), ocorrendo devido à perda do contato do concreto com o ar, [...] da água que não está quimicamente associada ao mesmo.”.

Segundo Süssekind (1981, p. 30-31), a fluência ou deformação lenta, ocorre nos elementos de concreto [armado ou não]. Ao ser carregada a peça de concreto sofre uma deformação plástica imediata, e isso faz com que a água quimicamente inerte, seja deslocada para regiões onde sua evaporação já tenha ocorrido. Assim, com o passar do tempo, a deformação inicial tende a crescer, até um limite, se mantendo o carregamento inicial.

Esses fenômenos geram ações sobre as estruturas que são classificadas como ações permanentes indiretas, e seu tratamento é apresentado na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 57-58).

4.1.2 Ações variáveis

A NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 5), define ações variáveis como, “Ações de caráter transitório [...]”. Na estrutura em questão, conforme os critérios apresentados pela referida Norma, são abordadas as seguintes cargas:

- a) cargas móveis;
- b) cargas de construção;
- c) cargas de vento;
- d) empuxos de terra provocados por cargas móveis;
- e) a pressão da água em movimento;
- f) efeito dinâmico do movimento das águas;
- g) variação de temperatura.

4.1.2.1 Cargas móveis

Os valores e a forma como se deve tratar, no projeto de uma ponte rodoviária, os carregamentos oriundos desta ação, são estabelecidos pela NBR 7188/2013.

4.1.2.1.1 Carga móvel padrão

Conforme a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 3), tem-se a carga concentrada P , dada em quilonewtons, definida em função do trem tipo e do número de rodas do veículo. Esta carga não sofre majoração, deve ser mantido seu valor característico. Se deve considerar também, a carga uniformemente distribuída p , dada em quilonewtons por metro quadrado. O seu valor também é função do trem tipo considerado para o projeto, e se deve manter o valor característico desta. As duas cargas, P e p , são aplicadas no nível do pavimento da estrutura.

A referida norma estabelece que as cargas P e p , devem ser ponderadas pelos coeficientes de impacto vertical (CIV), do número de faixas (CNF) e de impacto adicional (CIA), originando assim as cargas Q e q . As fórmulas 1 e 2 demonstram como essa ponderação é feita.

$$Q = P \times CIV \times CNF \times CIA \quad (\text{fórmula 1})$$

$$q = p \times CIV \times CNF \times CIA \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

CIV = coeficiente de impacto vertical, amplifica a ação da carga estática, simulando o cálculo dinâmico da carga em movimento e a suspensão dos veículos automotores;

CNF = é o coeficiente do número de faixas, probabilidade da carga móvel ocorrer em função do número de faixas;

CIA = coeficiente de impacto adicional, destinado a majoração da carga móvel característica devido à imperfeições e/ou descontinuidade na pista de rolamento;

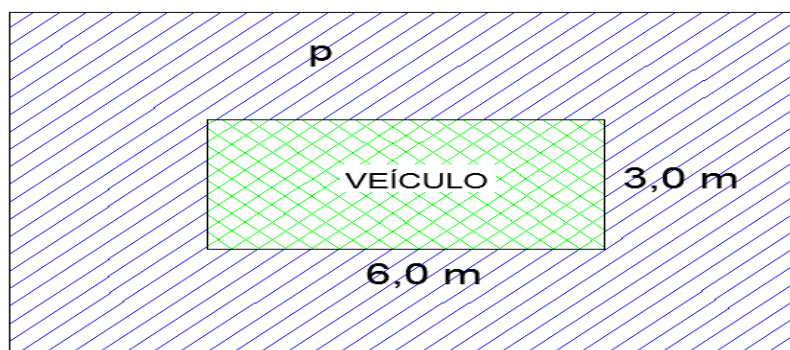
Q = é a carga concentrada, em quilonewtons;

q = é a carga distribuída, em quilonewtons por metro quadrado.

Para o projeto da ponte em arco, assunto deste trabalho, foi considerado, de acordo com os critérios da NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 3), uma rodovia padrão TB-450, onde, “A carga móvel rodoviária padrão TB-450 é definida por um veículo tipo de 450 kN, com seis rodas, $P = 75$ kN, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18 m², circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5$ kN/m², [...]”.

A forma de distribuição da carga sobre a ponte é apresentada na figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática de uma carga móvel



(fonte: elaborada pelo autor)

4.1.2.1.2 Carga nos passeios

Para o dimensionamento e a verificação dos diversos elementos estruturais da ponte, a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 4) estabelece o valor de 3 kN/m², como a carga uniformemente distribuída a ser aplicada, na posição mais desfavorável, concomitante com a carga móvel rodoviária.

Já o elemento estrutural do passeio, conforme a referida norma, deve ser dimensionado para uma carga de 5 kN/m².

4.1.2.1.3 Coeficiente de impacto vertical

O coeficiente de impacto vertical é definido em função do tamanho do vão da ponte. A NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 5), fornece a formulação para se definir este valor.

Quando o vão da ponte for menor que 10 m o valor de CIV = 1,35 é constante.

Caso o vão da ponte esteja entre 10 m e 200 m, o valor de CIV é calculado pela fórmula 3.

$$CIV = 1 + 1,06 \times (20 / (Liv + 50)) \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

Liv = é o vão em metros.

4.1.2.1.4 Coeficiente do número de faixas

Para o cálculo do coeficiente do número de faixas, a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 5) indica o uso da fórmula 4.

$$CNF = 1 - 0,05 \times (n - 2) \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

n = é o número de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas. O valor do coeficiente deve respeitar o limite de $CFN > 0,9$.

4.1.2.1.5 Coeficiente de impacto adicional

De acordo com a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 5), este coeficiente de majoração deve ser aplicado às cargas definidas no item 4.1.2.1.1, na região das juntas estruturais e dos extremos da obra. Para o caso da ponte em concreto armado o valor do coeficiente é $CIA = 1,25$.

4.1.2.1.6 Frenagem e aceleração

Definidas pela NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 6), como sendo uma fração da carga característica dos veículos, aplicada no nível do pavimento, na posição mais desfavorável em conjunto com a respectiva carga. A referida norma fornece a fórmula 5.

$$H_f = 0,25 \times B \times L \times CNF \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$H_f \geq 135$ kN;

B = largura efetiva, expressa em metros (m), da carga distribuída de 5 kN/m²;

L = é o comprimento concomitante, expresso em metros (m), da carga distribuída.

4.1.2.2 Cargas de construção

Sobre esta modalidade de cargas, a NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 6), orienta que, “No projeto e cálculo estrutural devem ser consideradas as ações das cargas passíveis de ocorrer durante o período da construção, [...] aquelas devidas ao peso de equipamentos e estruturas auxiliares de montagem e lançamento de elementos estruturais e seus efeitos [...]”.

As as lajes e os arcos da ponte serão estruturas pré-fabricadas. As seções de concreto de cada elemento e também os carregamentos atuantes, serão diferentes para cada etapa de execução da estrutura. A questão da concretagem dos elementos, transporte e lançamento [içamento], foram consideradas no dimensionamento estrutural de cada um obedecendo às prescrições normativas apresentadas pela NBR 9062/2006.

4.1.2.3 Cargas de vento

A atual norma de pontes, NBR 7187/2003a, orienta que a ação do vento seja calculada de acordo com as prescrições normativas apresentadas na NBR 6123/1988. As informações apresentadas na atual norma de vento especificam os critérios que devem ser adotados para o cálculo da ação do vento sobre edificações. Ela não apresenta informações específicas para o caso de pontes.

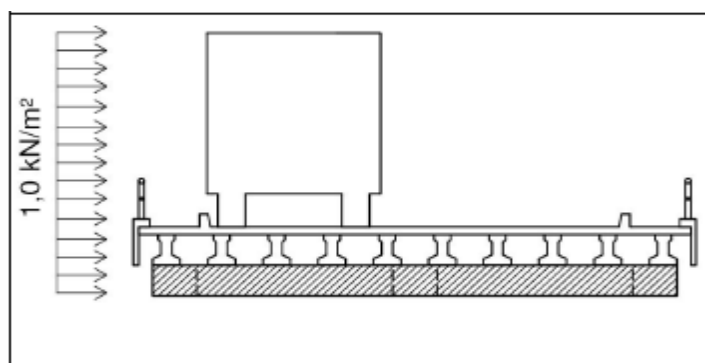
Frente a este fato, a abordagem da ação do vento foi feita segundo as recomendações apresentadas pela antiga norma de pontes, a NB2.

Pfeil (1980, p. 66), mostra que a carga de vento, aplicada horizontalmente em direção normal ao eixo da estrutura, de acordo com cada situação, deve ser:

- a) ponte descarregada, a pressão de vento é de $1,5 \text{ kN/m}^2$;
- b) ponte carregada, a pressão do vento é de 1 kN/m^2 .

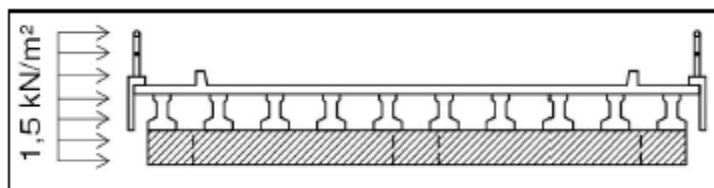
As figuras 12 e 13 ilustram estas duas situações.

Figura 12 – Ação do vento para ponte carregada



(fonte: LAZZARI, 2008, p. 48)

Figura 13 – Ação do vento para ponte descarregada



(fonte: LAZZARI, 2008, p. 48)

4.1.2.4 Empuxos de terra

Os critérios estabelecidos para o cálculo do item 4.1.1.3, são os mesmo à serem adotados nesta etapa. A NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 6), trata da carga móvel no terrapleno, transformando a em uma altura de terra equivalente, ou seja, que tenha o mesmo efeito sobre a estrutura a ser dimensionada.

4.1.2.5 Pressões de água em movimento

Mason (1977, p. 192), comenta que:

Dentre as forças a serem consideradas no dimensionamento dos pilares de pontes e suas fundações, podemos incluir aquelas devidas à pressão da água e correntes sobre os mesmos.

A avaliação destas forças pode ser feita com as fórmulas de Dinâmica dos Fluidos, afetadas de coeficientes experimentais adequados, destinados a levar em conta a forma dos pilares e outros fatores, tais como rugosidade, turbulência e deslocamento da camada limite.

Segundo a NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 7), pode-se estabelecer a pressão atuante através da fórmula 6:

$$p_a = k \times V_a^2 \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

p_a = pressão estática equivalente (kN/m^2)

V_a = velocidade da água (m/s)

k = coeficiente dimensional

O valor de k é 0,34 para elementos com seção transversal circular. No caso de seção transversal retangular, o valor de k é dado em função do ângulo com que a água incide na seção. A tabela 1 apresenta os valores de k em função do ângulo de incidência.

Tabela 1 – Valores de k em função do ângulo de incidência

Ângulo de incidência	k
90°	0,71
45°	0,54
0°	0

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 7)

4.1.2.6 Efeito dinâmico do movimento das águas

De acordo com a NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 7), “O efeito dinâmico das ondas e das águas em movimento deve ser determinado através de métodos baseados na hidrodinâmica.”.

4.1.2.7 Variação de temperatura

Pfeil (1980, p. 72), recomenda supor, “[...] para o cálculo, que as variações de temperatura sejam uniformes na estrutura, salvo quando a desigualdade dessas variações, entre partes diferentes da estrutura, seja muito acentuada.”.

O tratamento dos efeitos da variação de temperatura, uniforme na estrutura, é abordado pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 62-63), da seguinte maneira:

[...] podem ser adotados os seguintes valores:

- a) para elementos estruturais cuja menor dimensão não seja superior a 50 cm, deve ser considerada uma oscilação de temperatura em torno de 10°C e 15°C;

- b) para elementos estruturais maciços ou ocos com os espaços vazios inteiramente fechados, cuja a menor dimensão seja superior a 70 cm, admite-se que essa oscilação seja reduzida respectivamente para 5°C a 10°C.
- c) para elementos estruturais cuja a menor dimensão esteja entre 50 cm e 70 cm admite-se que seja feita uma interpolação linear entre os valores acima indicados.

4.1.3 Ações excepcionais

De acordo com a NBR 7187 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a, p. 7), “São aquelas cuja ocorrência se dá em circunstâncias anormais. Compreendem os choques de objetos móveis, as explosões, os fenômenos naturais pouco frequentes, como ventos ou enchentes catastróficas e sismos, entre outros.”.

4.1.3.1 Meio fio

De acordo com a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 7), o elemento deve ser dimensionado para ação de uma carga concentrada de 100kN, aplicada sobre o mesmo.

4.1.3.2 Guarda corpo

De acordo com a NBR 7188 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 7), para o dimensionamento deste elemento deve-se aplicar uma carga distribuída de 2 kN/m transversalmente ao elemento estrutural.

4.2 LINHAS DE INFLUÊNCIA

As ações variáveis, conforme apresentado acima, são aquelas que podem ou não ocorrer na estrutura. Para fins da análise estática, as ações variáveis têm posição e valor conhecidos na estrutura. O mesmo não ocorre para o caso das cargas móveis, que se deslocam ao longo da estrutura, variando sua posição a cada instante de tempo. A forma de tratar este problema foi através do processo de linhas de influência (SÜSSEKIND, 1977, p. 269-270).

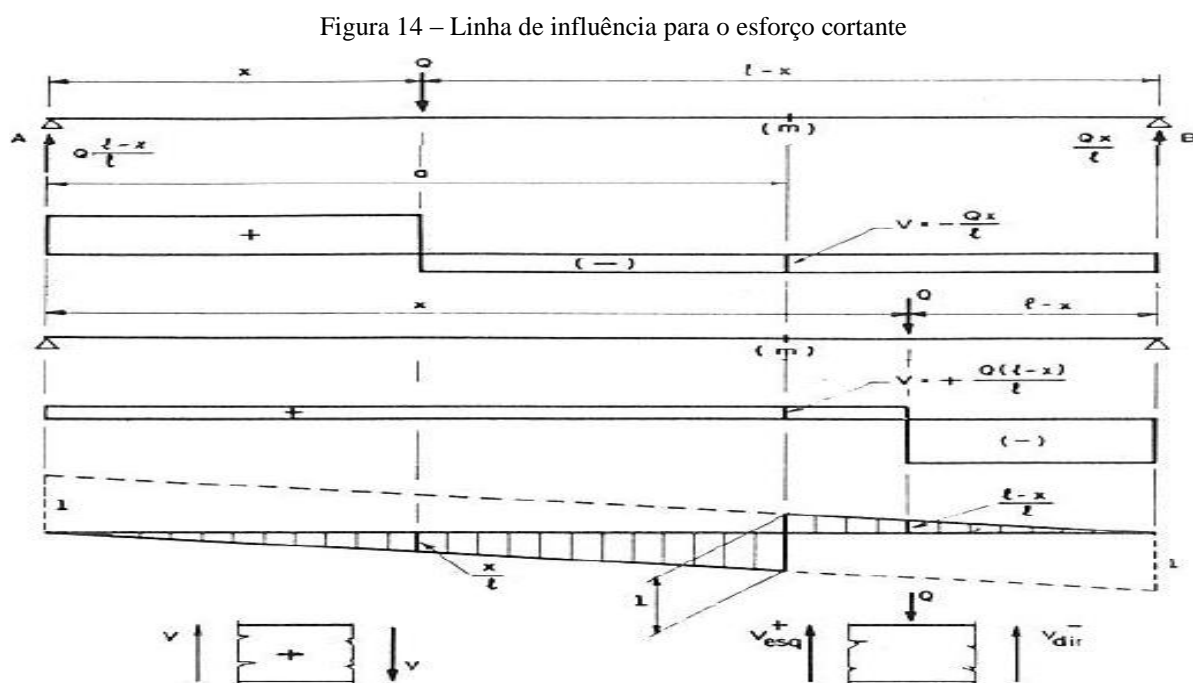
O tratamento deste problema busca a determinação dos esforços máximos e mínimos provocados na estrutura pela ação da mesma, e também, quais as seções sujeitas aos maiores

valores em módulo dos esforços solicitantes e quais os esforços máximos e mínimos atuantes nos apoios e vínculos (CAMPANARI, 1985, p. 521).

No caso das pontes, estas cargas móveis são conhecidas como trem-tipo. Para este trabalho se utilizou um trem tipo TB45 (veículo com peso de 450 kN), conforme citado nos capítulos anteriores.

Para simplificar o traçado da linha de influência, supõe-se que o trem tipo seja constituído por uma única carga concentrada unitária. E após concluído o traçado da linha de influência, se realiza os cálculos necessários levando em conta o trem tipo real (SÜSSEKIND, 1977, p. 272). Com isso, tem-se a definição, conforme Süssekind (1977, p. 272), “Linha de influência de um efeito elástico E em uma dada seção S é a representação gráfica ou analítica do valor deste efeito, naquela seção S, produzido por uma carga concentrada unitária, de cima para baixo, que percorre a estrutura.”.

A figura 14 apresenta a linha de influência do esforço cortante numa seção (m) de uma viga simplesmente apoiada, com uma carga concentrada Q numa posição genérica.



(fonte: PFEIL, 1985, p. 107)

Assim, conhecidos os esforços gerados pelas ações permanentes (permanentes e variáveis não móveis) e pelas variáveis móveis na estrutura, tem-se então, definida a faixa de trabalho desta estrutura ou envoltória para cada solicitação (SÜSSEKIND, 1977, p. 271).

5 MODELAGEM INICIAL

Antes de iniciar a modelagem da estrutura foi necessário definir a geometria da obra como um todo levando em consideração as características locais. Realizou-se também cálculos simples com o objetivo de entender qual é o comportamento da estrutura como um todo e qual a ordem de grandeza das solicitações que podem atuar sobre a mesma.

5.1 CARACTERÍSTICAS LOCAIS

No local da obra a seção transversal apresenta um desnível máximo de 6m com um vão livre de 31m. Entre as margens do arroio dilúvio se tem um vão de 20m, estas características estão apresentadas no apêndice A. Com isso a geometria da estrutura teve seus limites estabelecidos.

A ideia inicial, frente as características apresentadas, foi de projetar uma estrutura com duas pistas de rolamento, cada uma com 3,5m de largura e os passeios externos com 2m de largura cada. Com isso a largura final da estrutura é de 11m, como pode ser observado no apêndice B.

Tendo em vista que o vão livre, entre o apoio externo e centro da estrutura, é de 15,5m se projetou uma parede de encontro a 12,5m, entre eixos, que serve de apoio para a laje da pista e para a laje de transição (porém a laje de transição não será dimensionada). Como a estrutura é simétrica, no outro extremo a mesma solução foi adotada.

Tendo fixado a solução comentada acima, fez-se cálculos preliminares, com o objetivo de estabelecer seções transversais, as propriedades dos materiais que foram empregados, a ordem de grandeza das solicitações atuantes e o desempenho das seções arbitradas.

5.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

A estrutura é constituída basicamente pelas lajes da pista, lajes dos passeios, os arcos, as vigas transversais (transversinas), laje central e os elementos de fundação. Para cada elemento fez-se cálculos com modelos simplificados, onde se buscou as informações citadas acima.

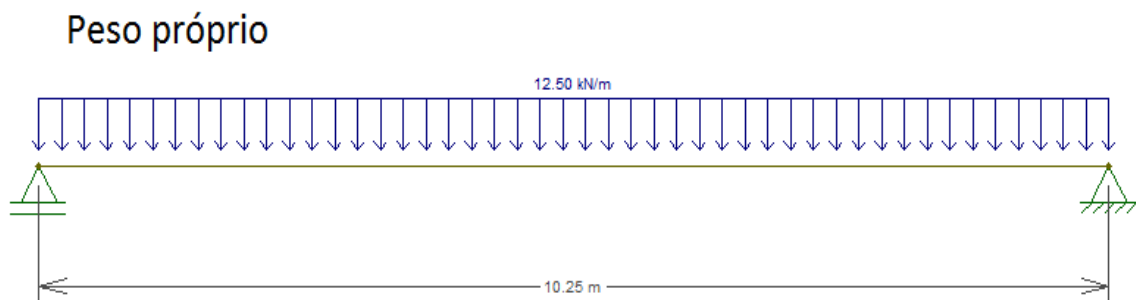
5.2.1 Lajes da pista

Os cálculos foram realizados adotando as seguintes premissas para a laje da pista:

- a) seção inicial de 100x50cm (cada elemento);
- b) cada elemento deve suportar a carga total (permanente + móvel)
- c) contribuição das lajes vizinhas é desconsiderada;
- d) são apoio simples;
- e) dimensionamento no domínio 3.

Assim criou-se um modelo no software FTOOL com o objetivo de demonstrar os carregamentos considerados, as figuras 15 e 16 apresentam estes carregamentos.

Figura 15 – Carregamento permanente



(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores correspondentes a carga móvel e multidão, já estão majorados pelo coeficiente de impacto vertical, que é calculado com a fórmula 3, e tem o valor de $CIV=1,35$.

Os valores de cálculo das solicitações foram estabelecidos considerando-se os coeficientes de majoração respectivos a cada carregamento. Estes valores são apresentados na tabela 2.

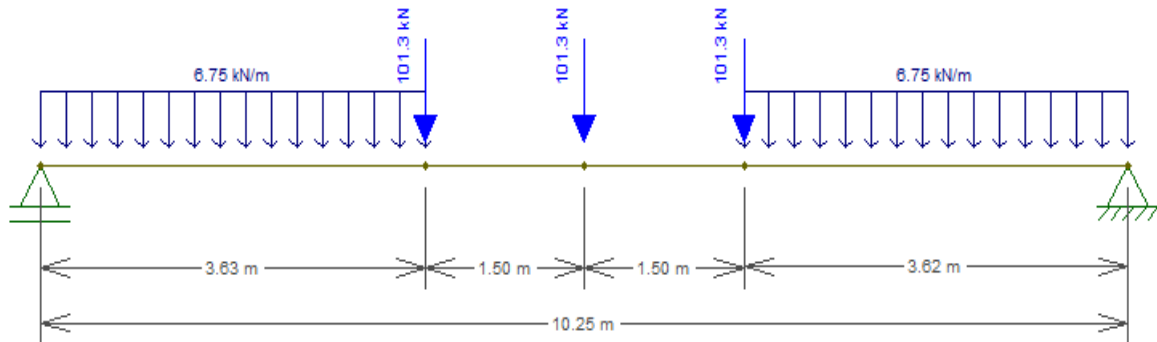
Tabela 2 – Momento de cálculo

	Mgk (kNm)	Mqk (kNm)	Md (kNm)
MAJORAÇÃO	1,35	1,5	1227,12

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Carregamento variável

Carga móvel + multidão



(fonte: elaborado pelo autor)

Com o valor de cálculo do momento se fez o dimensionamento da armadura para uma seção de 100x50cm com $f_{ck}=35\text{MPa}$, submetida a flexão simples. Verificou-se que existe a necessidade de armadura dupla para a seção da laje. Porém ao considerar um $f_{ck}=40\text{MPa}$, usual em elementos pré-fabricados, a armadura fica no domínio 3. Com esses dados e sabendo que a laje tem uma contribuição das demais lajes na absorção do carregamento, se definiu a altura inicial da laje com $h=40\text{cm}$ e $f_{ck}=40\text{MPa}$.

Para o caso das lajes centrais apoiadas nas vigas, se definiu uma espessura de $h=20\text{cm}$.

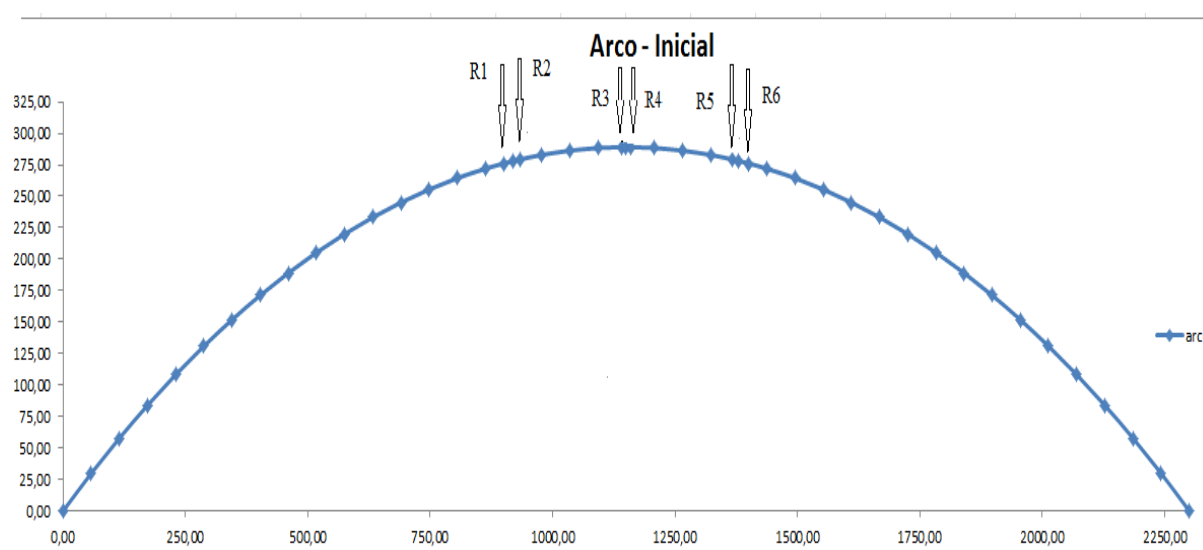
5.2.2 Arcos

Os arcos constituem a mesoestrutura deste projeto. É importante se ter uma ideia da ordem de grandeza das solicitações atuantes neste elemento. Para mensurar estas solicitações se pensou em algumas combinações de carregamentos.

O ponto inicial foi definir a geometria que o arco pode ter, tendo em vista a limitação de cotas. Com as espessuras das lajes definidas e a seção transversal do arroio dilúvio conhecida, definiu-se uma cota inicial para a linha de nascença do arco e uma cota máxima para o mesmo, o que resultou em uma flecha de $f=2,88\text{m}$ e um vão livre inicial de 23m.

As combinações de carregamentos foram realizadas de forma simplificada, sendo que se considerou uma carga distribuída ao longo do arco, que representa seu peso próprio para uma seção de 100x50cm. O efeito do peso próprio das lajes e da carga móvel foi considerado como uma carga concentrada com ponto de aplicação conhecido, a figura 17 apresenta estes casos.

Figura 17 – Arco entradas de cargas



(fonte: elaborado pelo autor)

Este modelo inicial foi lançado no software FTOLL com o objetivo de se mensurar as solicitações atuantes sobre o arco. Se realizou desta forma seis combinações de carregamentos, conforme se pode observar na tabela 3. Lembrando que estes carregamentos tem o objetivo de estudar o efeito da carga móvel sobre o arco. Para o caso de carregamento de peso próprio do arco, fez um modelo em separado.

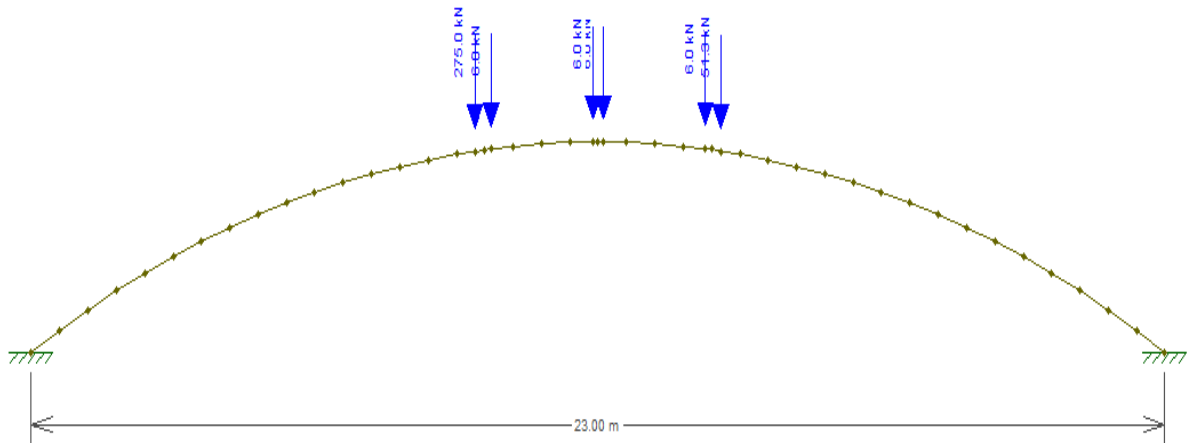
As figuras 18 e 19 apresentam as combinações que geram a maior solicitação no arco, dentre as combinações apresentadas na tabela 3. O arco foi testado como bi-rotulado, porém a solução estrutural adotada no projeto foi o arco bi-engastado.

Tabela 3 – Combinações de cargas arco

R1	R2	R3	R4	R5	R6
máx	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje
p.p. laje	máx	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje
p.p. laje	p.p. laje	máx	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje
p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	máx	p.p. laje	p.p. laje
p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	máx	p.p. laje
p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	p.p. laje	máx

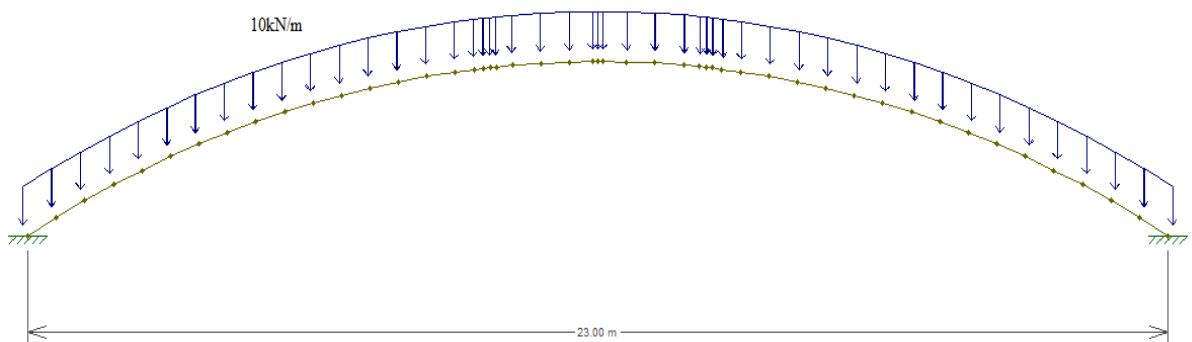
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Combinação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Carregamento peso próprio



(fonte: elaborado pelo autor)

Com estas duas combinações obteve-se as solicitações de momento fletor e esforço normal. Para a verificação da seção inicial do arco de 100x50cm, se majorou as solicitações e com a calculadora de flexão composta do software CAD/TQS, se verificou a armadura necessária para cada trecho do arco. As solicitações finais de cálculo e a área de aço necessária são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Solicitações de cálculo e A_s

Nó	N_g (kN)	N_q (kN)	M_g (kNm)	M_q (kNm)	N_{total} (kN)	M_{total} (kNm)	A_s (cm ²) 100x50
1	-260,00	-620,00	-8,00	53,00	-1268,00	71,50	8,95
7	-250,00	-620,00	-8,20	-76,00	-1255,00	-125,07	8,95
13	-250,00	-617,00	-6,00	-112,00	-1250,50	-176,10	8,95
17	-250,00	-617,00	-3,00	-87,00	-1250,50	-134,55	8,95
21	-250,00	-617,00	0,00	-26,00	-1250,50	-39,00	8,95
23	-250,00	-588,00	2,00	20,00	-1207,00	32,70	8,95
25	-250,00	-588,00	5,00	70,00	-1207,00	111,75	8,95
33	-235,00	-588,00	7,00	330,00	-1187,50	504,45	8,95
43	-235,00	-600,00	8,50	126,00	-1205,50	200,48	8,95
44	-235,00	-600,00	6,50	90,00	-1205,50	143,78	8,95
40	-235,00	-602,00	6,00	-28,00	-1208,50	-36,00	8,95
28	-250,00	-605,00	5,00	-150,00	-1232,50	-220,00	8,95
22	-250,00	-590,00	0,00	-177,00	-1210,00	-265,50	8,95
18	-250,00	-588,00	-3,00	-156,00	-1207,00	-238,05	8,95
10	-250,00	-585,00	-8,50	0,00	-1202,50	-11,48	8,95
2	-260,00	-585,00	-6,00	311,00	-1215,50	458,40	8,95

(fonte: elaborado pelo autor)

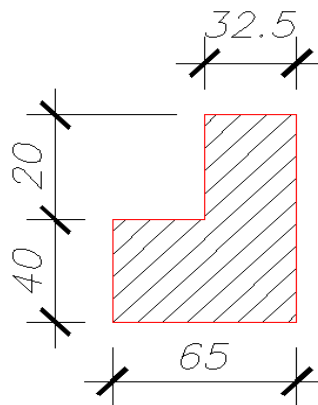
O que se verificou, com estes cálculos preliminares, foi que a seção de 100x50cm não seria necessária frente à ordem de grandeza das solicitações atuantes. Sendo que o dimensionamento mostrou que o arco necessitaria apenas de armadura mínima. Com isso, definiu-se que a seção do arco para a geração do modelo tridimensional seria de 80x40cm e o concreto terá $f_{ck}=40\text{MPa}$.

5.2.3 Vigas transversais

As vigas transversais têm como objetivo travar transversalmente os três arcos da ponte, o que faz com que elas sejam comprimidas com a ação da carga de vento. Elas também servem de apoio para as lajes pré-fabricadas da pista e para as lajes do passeio. No caso das lajes pré-fabricadas, o apoio é simples e isso introduz nas vigas transversais externas uma torção. Todas as vigas possuem 2m de balanço onde as lajes do passeio e a laje central se apoiam e aplicam nesta viga um momento fletor negativo.

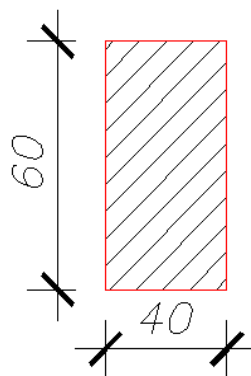
Tendo em vista esse quadro de solicitações que atuam nas vigas, definiu-se de forma conservadora, as seguintes seções iniciais para modelagem apresentadas nas figuras 20 e 21.

Figura 20 – Vigas externas



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Viga central



(fonte: elaborado pelo autor)

Com esses dados e estas etapas vencidas se elaborou o modelo tridimensional no software SAP2000 V.14 (*Structural Analysis Program*), que utiliza elementos finitos para realizar análises estáticas e dinâmicas.

5.3 MODELAGEM

Na etapa anterior se buscou ter uma ideia da ordem de grandeza das solicitações que podem atuar na estrutura. E assim ter dados para um pré-julgamento sobre as seções que podem ser adotadas para cada elemento frente às solicitações atuantes. Para entendimento do comportamento da estrutura como um todo se separou a ponte em modelos simplificados e ao unir as solicitações oriundas de cada modelo, se teve uma ideia do comportamento global.

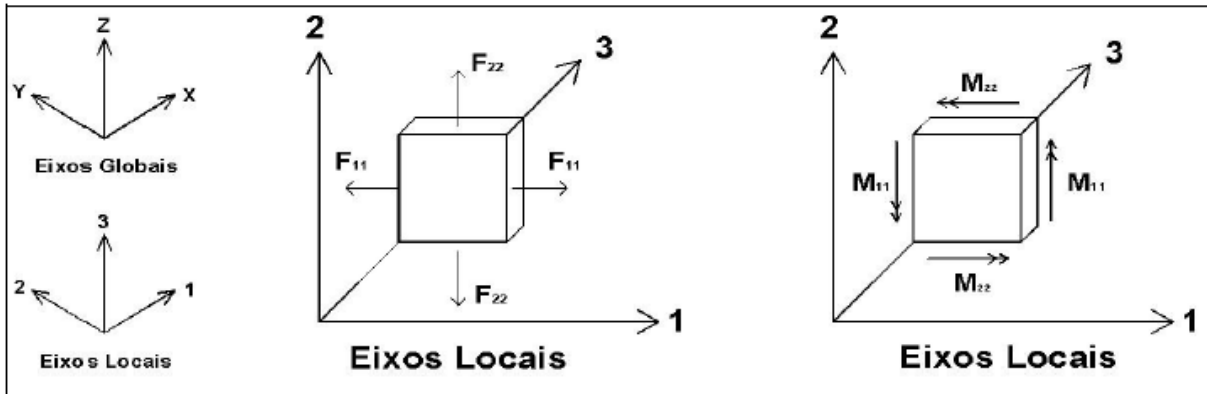
Com o avanço das ferramentas computacionais a modelagem estrutural tem possibilitado uma melhor aproximação do comportamento das estruturas em geral. Porém isso requer que o engenheiro tenha uma base teórica sólida para conseguir julgar os resultados apresentados por estes recursos computacionais e não fazer mau uso destas ferramentas acarretando erros graves a estrutura e seu dimensionamento (MATTOS, 2001, p. 16).

Para o modelo da ponte em arco inferior de concreto armado sobre o arroio Dilúvio, criou-se um sistema de coordenadas através do comando *grid only* do software SAP2000. O sistema de coordenadas do programa é dividido em globais e locais. No caso dos eixos globais a representação é dada por x, y, z. Já o sistema de coordenadas locais utiliza os valores 1, 2 e 3, para a representação dos eixos. O manual do programa fornece com maiores detalhes quais as orientações que estes eixos assumem, pois são dependentes da geração de cada elemento. Tanto no caso de elementos *frame* (barras), como no caso de elementos *shell* (áreas), a convenção dos eixos locais esta associada a regra da mão direita. A figura 22 ilustra a orientação dos eixos para o caso de elementos de área.

Os elementos que foram incluídos na modelagem da ponte em questão são os arcos, as lajes da pista L1 e do passeio LP1, a laje central L2 e as vigas 1 a 3. Todos os elementos foram criados com as mesmas propriedades de material como se pode observar na tabela 5. As vigas e os arcos são elementos *frame*, com as seções correspondentes às citadas anteriormente. As lajes são representadas por elementos *shell*. Os demais elementos como o encontro e as lajes

de transição serão calculados separadamente a partir das solicitações atuantes sobre os mesmos, oriundas do modelo tridimensional.

Figura 22 – Sistema de coordenadas SAP2000



(fonte: LAZZARI, 2008, p. 43)

Tabela 5 – Propriedades dos materiais

fck (MPa)	40
Ec (MPa)	31875
ν	0,2
Dil. Térmica (1/°C)	0,00001

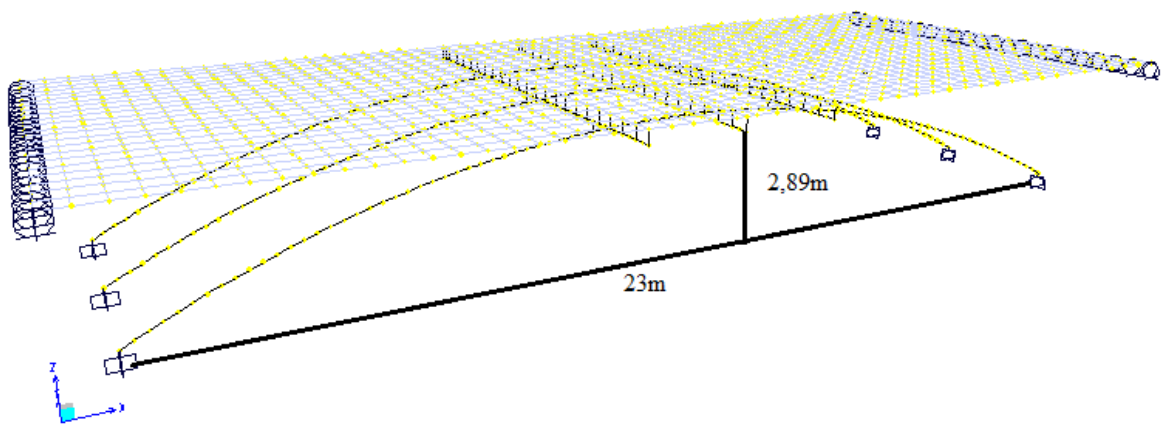
(fonte: elaborado pelo autor)

Para iniciar a modelagem da estrutura em questão foram criados 101 planos no eixo x, variando entre 0 e 25m, com intervalo de 0,25m; 45 planos na direção y, variando de 0 a 11m, com intervalo de 0,25m. E no eixo z, foram criados 51 planos variando entre 0 e 3,50 m. O modelo final possui 691 elementos *frame*, que representam as vigas transversais e os arcos. Foram criados também 3122 elementos *shell* que representam as lajes da pista e do passeio.

A figura 23 e 24 apresentam uma perspectiva do modelo estrutural que possui um vão livre entre extremos dos arcos de 23m e uma flecha de 2,89m. Isso caracteriza um arco extremamente abatido.

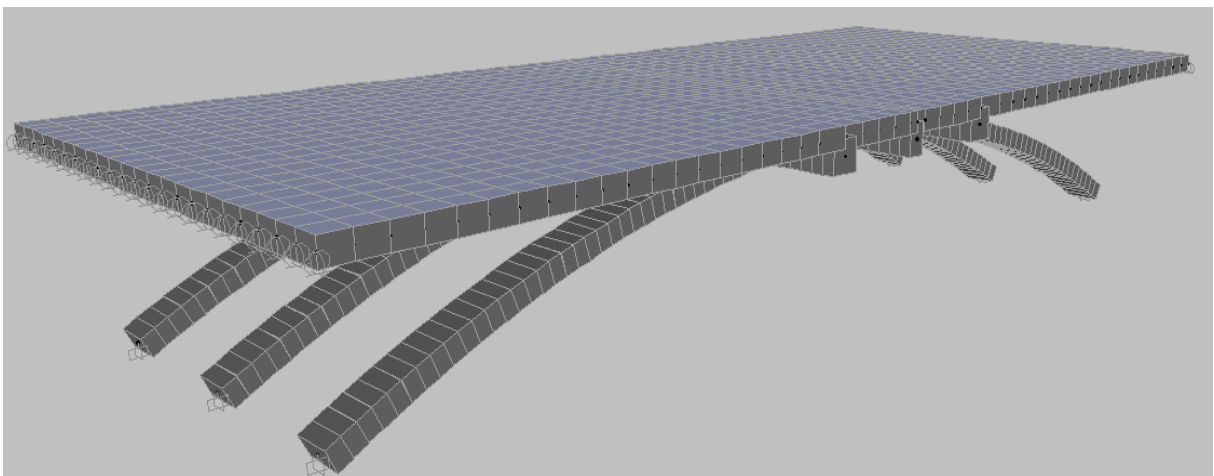
As coordenadas de cada elemento foram definidas com base na planta de montagem apresentada no apêndice C, tendo como ponto 0 para todos os eixos o canto direito inferior da laje LP1. O modelo estrutural tem a base dos arcos engastada, sendo que se restringiu deslocamentos e giros para este elemento. Para o caso das lajes que se apoiam nas vigas externas e no encontro, considerou-se apenas com um apoio simples, com restrição apenas do deslocamento vertical.

Figura 23 – Perspectiva do modelo estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Modelo estrutural



(fonte: elaborado pelo autor)

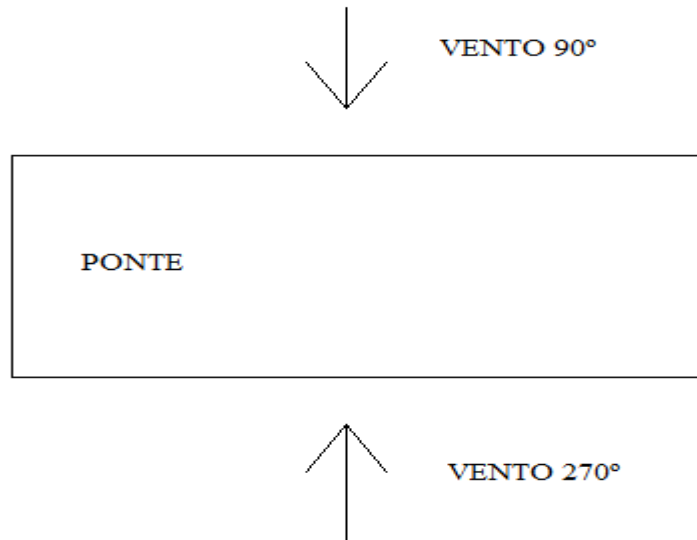
Como as seções de cada elemento foram definidas com base no pré-dimensionamento e com o modelo tridimensional completo, se aplicou os carregamentos citados anteriormente. Para o caso do trem tipo não se fez uso da ferramenta do programa que simula uma carga móvel andando sobre a ponte. Fez considerações de posições mais desfavoráveis para o arco e aplicou-se cargas concentradas fixas, definidas com *live*, já majoradas pelo coeficiente de impacto vertical do arco, que reproduzem o carregamento do trem tipo. Com base nestes critérios criou-se 8 combinações de cargas para o estudo da estrutura tridimensional.

A concepção da carga de vento foi definida no capítulo anterior. Para o caso do modelo tridimensional adotou-se uma carga concentrada aplicada nos nós das lajes que distam de 50cm um do outro. Estas cargas foram calculadas com um critério de área de influência para cada nó e aplicadas apenas na direção perpendicular a ponte, porém nos dois sentidos. O vento 270° representa a situação com a ponte carregada e o vento 90° representa a situação da ponte descarregada. A figura 25 ilustra estas orientações.

Conforme a NBR 7188/2013, a carga de multidão deve ser aplicada em torno da área do veículo tipo. Para simplificação dessa consideração, transformou-se a carga de multidão de uma área de 18m², área equivalente a área do veículo tipo, em uma carga concentrada por roda e subtraiu-se este valor de cada roda. Com isso o veículo tipo ficou com uma carga $P=60\text{kN}$ por roda. Este valor foi majorado pelo $CIV=1,29$ do arco resultando em uma carga $P=77,40\text{kN}$. A carga de multidão majorada pelo coeficiente CIV do arco tem valor de $p=6,45\text{kN/m}^2$, este carregamento foi aplicado a toda a laje da pista concomitante com a carga do trem tipo. A carga aplicada na região dos passeios foi de $q=3,87\text{kN/m}^2$. As coordenadas de aplicação da carga do trem tipo são apresentadas nas figuras 26 a 29.

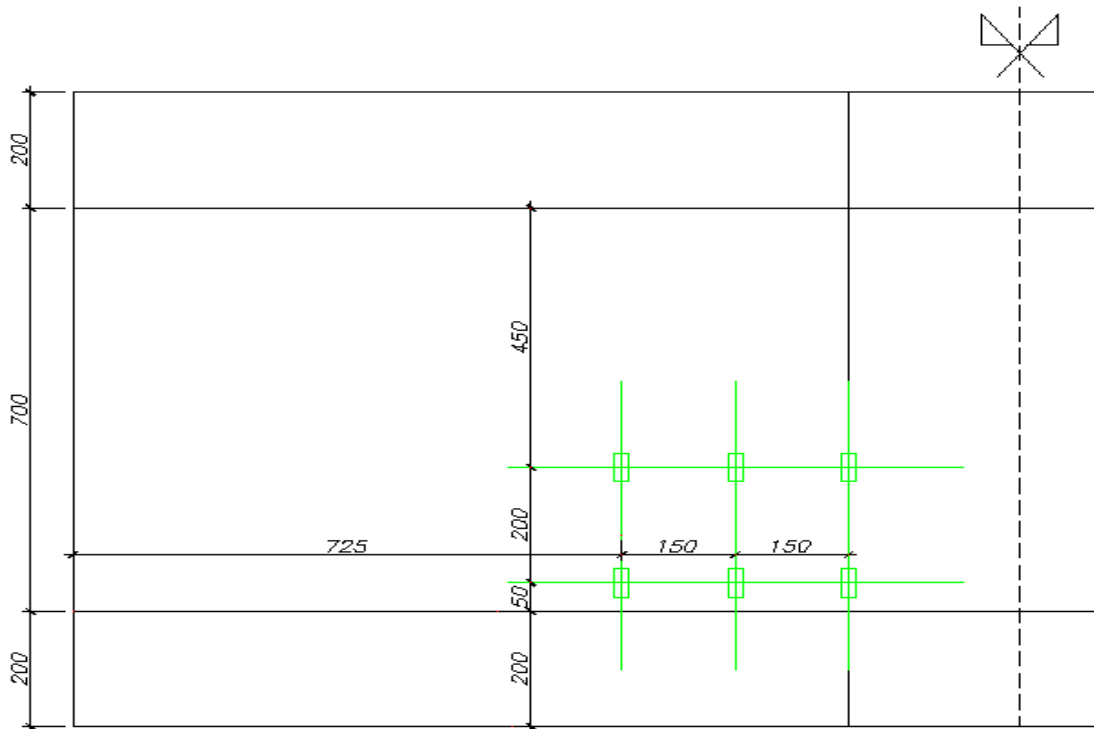
Para as cargas de aceleração e frenagem se utilizou 30% do peso do veículo tipo, que configura o caso de frenagem sendo o mais relevante. Com isso o valor de $H_f=135\text{kN}$ foi aplicado na direção do eixo x ao nível da laje da pista. A recomendação da NBR 7188/2013 é que este valor seja aplicado concomitante com a carga do trem tipo.

Figura 25 – Orientação do vento



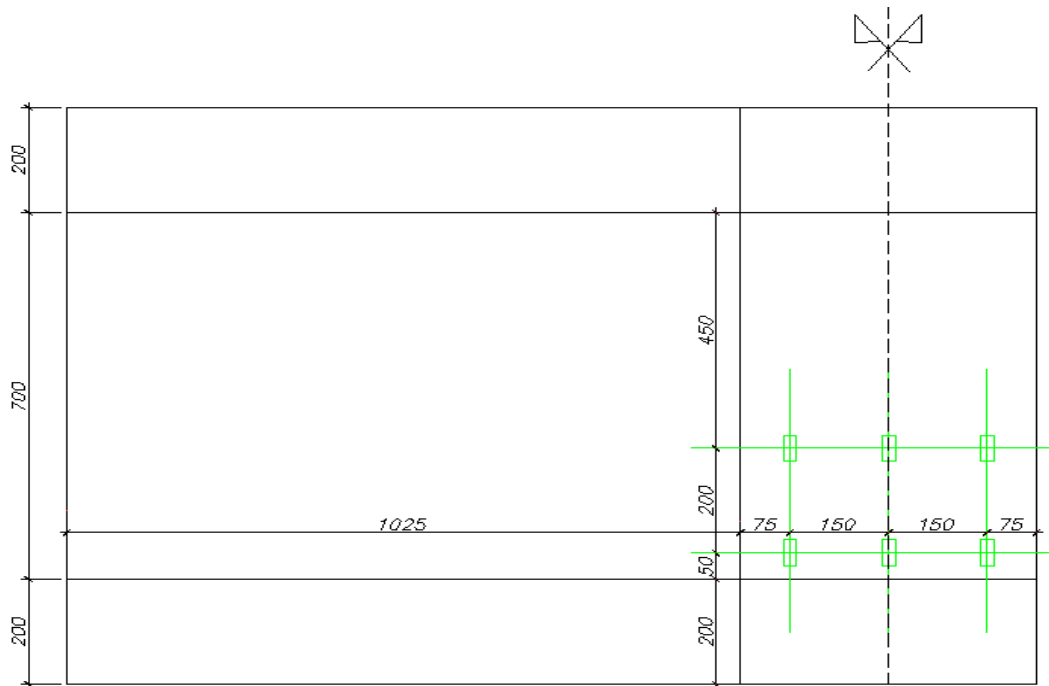
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Trem I



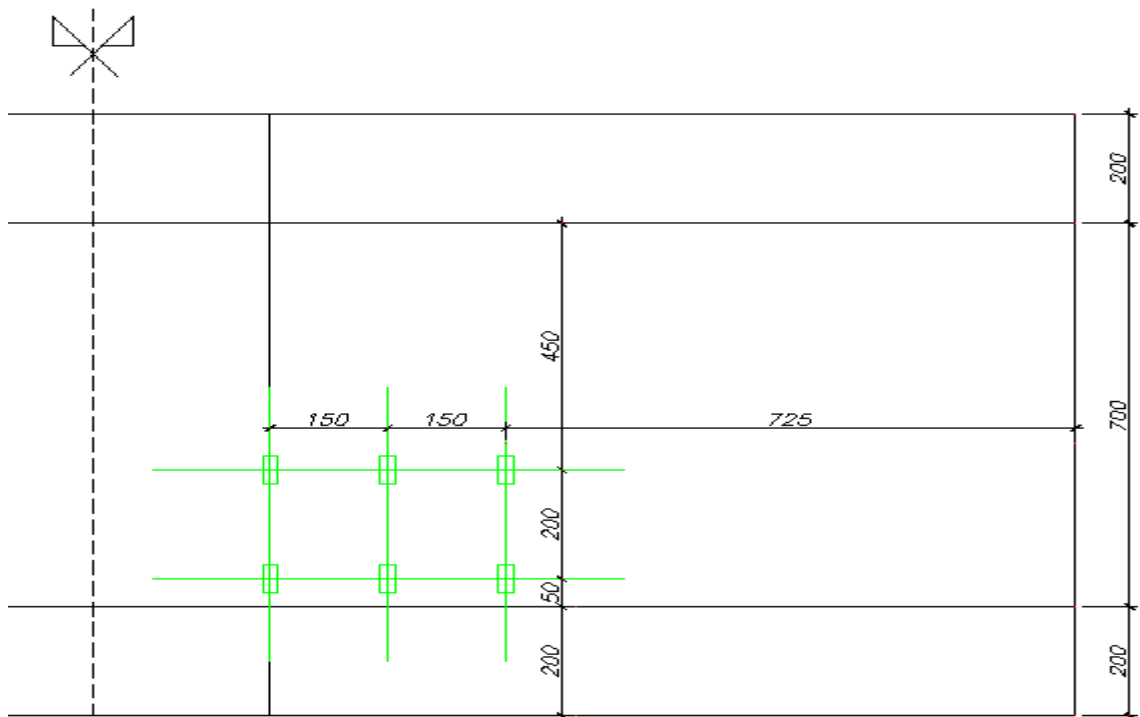
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Trem II



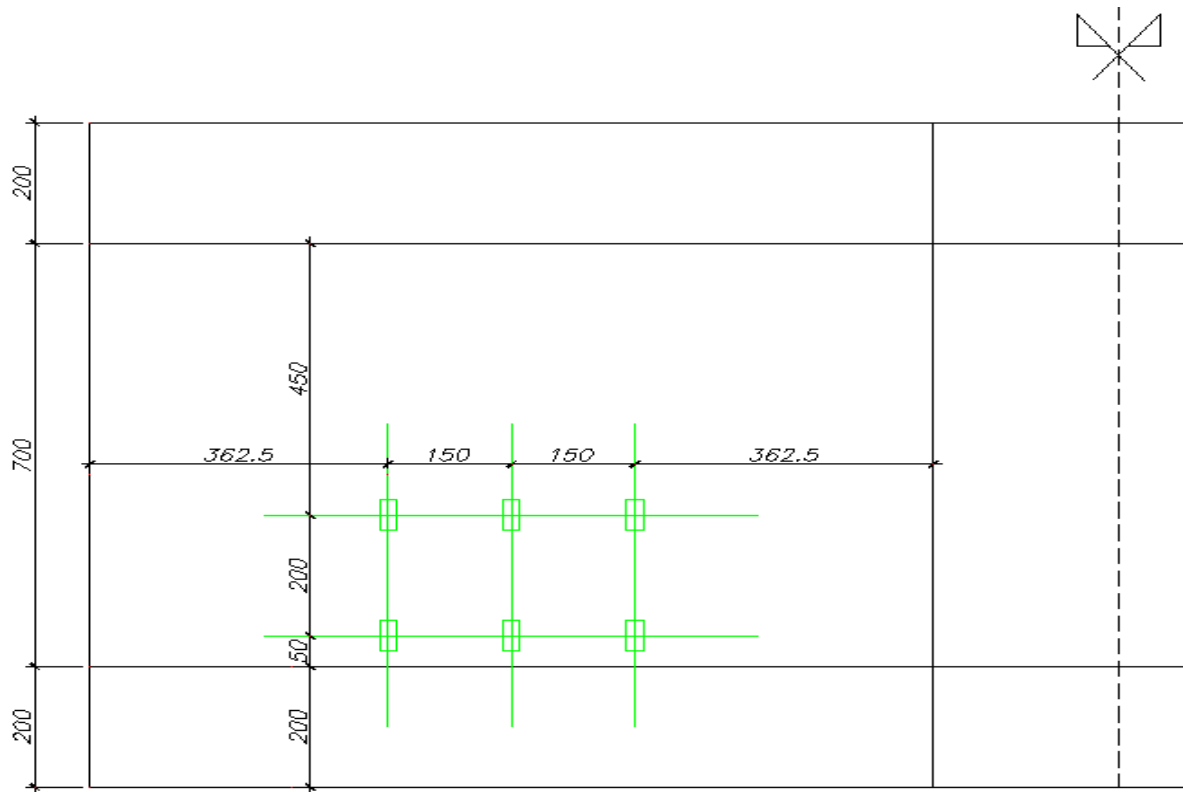
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Trem III



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Trem IV



(fonte: elaborado pelo autor)

Desta forma, tem-se que as 8 combinações são:

- a) comb1 = peso p. + trem I + multidão + passeio + frenagem I + vento 270°;
- b) comb2 = peso p. + trem II + multidão + passeio + frenagem II + vento 270°;
- c) comb3 = peso p. + trem III + multidão + passeio + frenagem III + vento 270°;
- d) comb4 = peso p. + trem IV + multidão + passeio + frenagem IV + vento 270°;
- e) comb5 = peso p. + trem I + multidão + passeio + frenagem I + vento 90°;
- f) comb6 = peso p. + trem II + multidão + passeio + frenagem II + vento 90°;
- g) comb7 = peso p. + trem III + multidão + passeio + frenagem III + vento 90°;
- h) comb8 = peso p. + trem IV + multidão + passeio + frenagem IV + vento 90°.

A análise do modelo tridimensional serve para definir as solicitações atuantes sobre o arco e entender o comportamento da estrutura como um todo. Para o caso das lajes, criou-se modelos separados no SAP2000 e obteve-se deles as solicitações para fim de dimensionamento. No próximo capítulo este assunto é melhor detalhado.

6 SOLICITAÇÕES E DIMENSIONAMENTO

A ponte deste trabalho possui basicamente 3 grupos de elementos estruturais que necessitam ser armados, são eles os arcos, as vigas e as lajes, como pode-se observar no apêndice D. Os critérios adotados, as solicitações atuantes e o dimensionamento de cada grupo são abordados neste capítulo.

6.1 ARCOS

Os arcos estão submetidos à flexo-compressão. O critério adotado no dimensionamento destes elementos foi verificar a ordem de grandeza das solicitações, atuantes nos três arcos, e definir o arco mais carregado como o modelo de cálculo para a armadura. O arco mais solicitado é definido no modelo estrutural pelos elementos frame de número 508 a 599. Este arco tem seu eixo localizado no plano $y=2,25$.

Com as 8 combinações de carregamento, definidas no capítulo anterior, montou-se as planilhas de solicitações atuantes e com o auxílio da calculadora de flexão composta do software CAD/TQS, se fez o dimensionamento da área de aço necessária para cada combinação de momento fletor e esforço normal. A interface da calculadora de flexão composta é apresentada na figura 30.

As solicitações atuantes sobre os arcos são esforço normal de compressão, momento fletor, esforço cortante e uma torção. Os diagramas das solicitações atuantes, oriundas do modelo estrutural para o caso da combinação 1, são apresentados nas figuras 31 a 34.

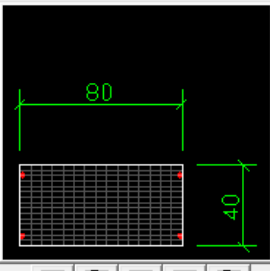
Figura 30 – Calculadora de flexão composta normal

Seção		Aço		Seção equilibrada As total 55.32 cm ² As por bitola 1.84 cm ² Número de iterações 18 Altura da linha neutra 18.80 cm Armadura mínima de 5.31 cm ²
Largura inferior	80 cm	Fyk	5000 kgf/cm ²	
Altura total da seção	40 cm	GamaS	1.15	
Largura superior colaborante	0 cm	Es	2100000 kgf/cm ²	
Altura superior colaborante	0 cm	Cobrimento superior + 1/2 bitola	5 cm	
Trapezoidal - largura superior	0 cm	Cobrimento inferior + 1/2 bitola	5 cm	
Altura de mini-painel inferior	0 cm	Tipo de aço	A	
Concreto		Esforços característicos		
Fck	400 kgf/cm ²	Força normal	211 tf	
Fctk _{sup}	0 kgf/cm ²	Momento X	51 tfm	
GamaC	1.4	GamaF	1.4	
		Posição limite da linha neutra x/d	1	
Verificação		Armadura necessária		
As superior	10 cm ²	Número de bitolas superior	15	
As inferior	10 cm ²	Número de bitolas inferior	15	
		Precisão	0.001	
		Máximo de iterações	50	

Verificação

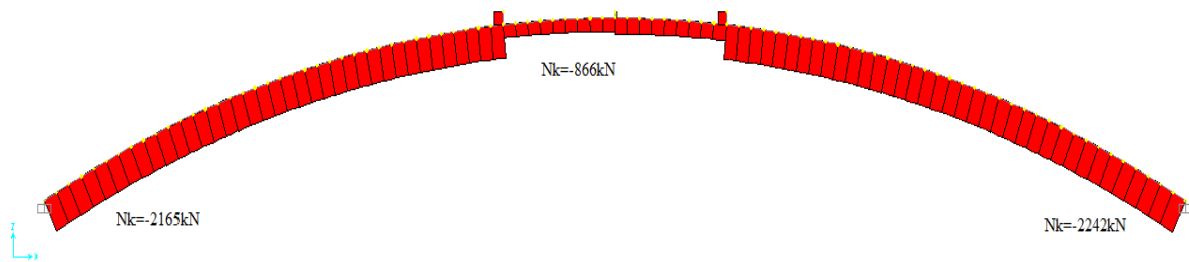
Armadura necessária

Fechar



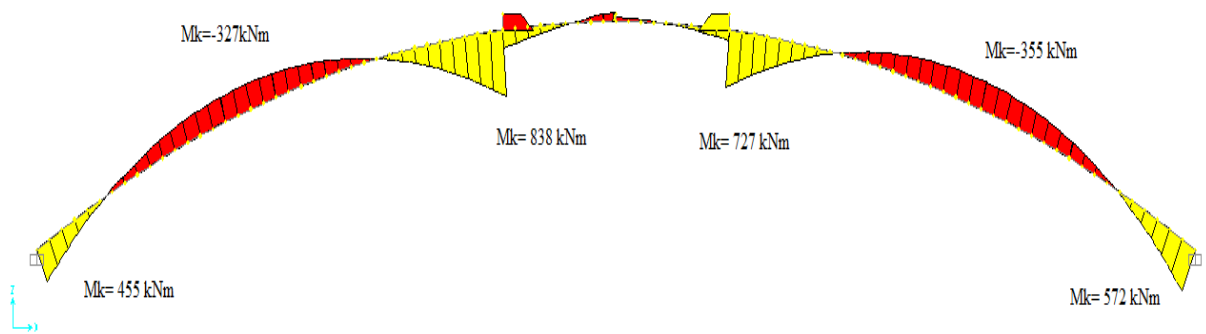
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Compressão combinação 1



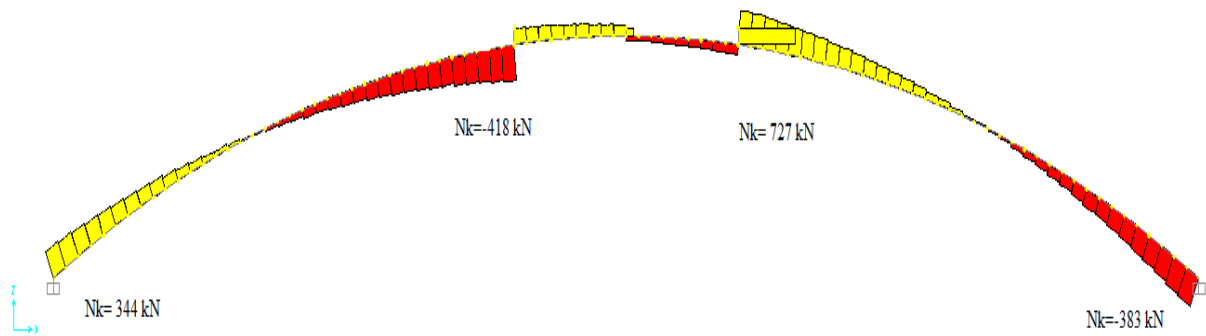
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Momento fletor combinação 1



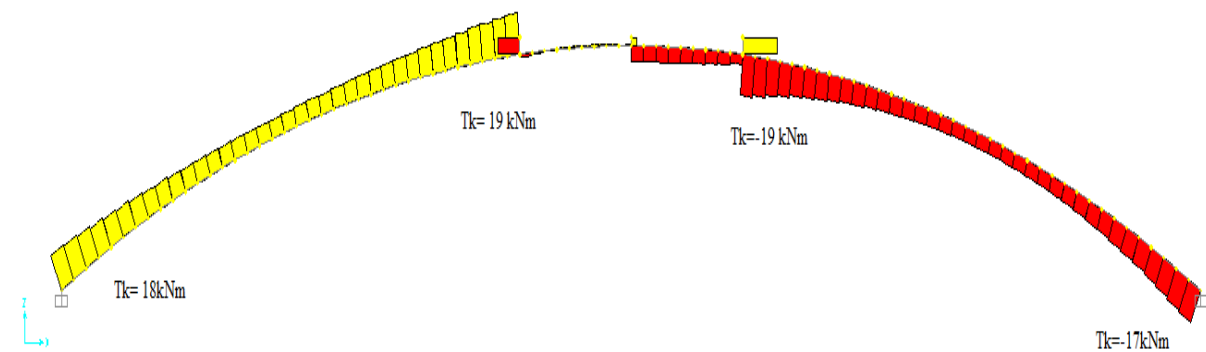
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 – Esforço cortante combinação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Torsão combinação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Como são 8 combinações e a relação entre o esforço de compressão e momento fletor é fundamental para o cálculo da armadura no caso de flexo-compressão, criou-se tabelas com as solicitações atuantes para cada combinação de carga e dimensionou-se a armadura necessária para cada caso. Com relação ao esforço cortante, apenas calculou-se a armadura necessária para o caso de esforço cortante máximo, para um metro de seção, de $V_k=706\text{kN}$. No caso da torsão, também de forma simplificada, considerou-se apenas a armadura necessária para uma torsão máxima de $T_k=40\text{kNm}$. Estas áreas de aço necessárias foram calculadas com a calculadora de armadura transversal – força cortante e torsão combinada do CAD/TQS. A figura 35 apresenta a interface da calculadora.

Assim somou-se a armadura longitudinal, oriunda da torsão, a área de aço necessária para o caso da flexo-compressão. E também para o caso da armadura de cisalhamento somou-se a parcela oriunda da torsão. As solicitações e as áreas de aço finais são apresentadas nas tabelas 6 a 13.

Figura 35 – Calculadora de armadura transversal

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 6 – Solicitações no arco – combinação 1

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A_s	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB1	-2076,30	706,50	32,75	455,36	47,87	54,90
509	421	COMB1	-2076,30	704,24	29,75	357,64	25,50	54,90
510	422	COMB1	-2076,30	701,99	26,81	265,57	9,49	54,90
511	423	COMB1	-2076,30	699,75	23,97	181,25	9,49	54,90
512	424	COMB1	-2076,30	697,53	21,22	104,68	9,49	54,90
513	426	COMB1	-2076,30	-693,12	-15,93	31,44	9,49	54,90
514	426	COMB1	-2076,30	693,12	15,93	-31,44	9,49	54,90
515	427	COMB1	-2076,30	690,93	13,40	-88,90	9,49	54,90
516	428	COMB1	-2076,30	688,75	10,97	-138,61	9,49	54,90
517	429	COMB1	-2076,30	686,58	8,58	-184,70	9,49	54,90
518	430	COMB1	-2076,30	684,43	6,29	-223,03	9,49	54,90
519	431	COMB1	-2076,30	682,28	4,06	-255,67	9,49	54,90
520	432	COMB1	-2076,30	680,14	1,90	-282,62	9,49	54,90
521	433	COMB1	-2076,30	678,01	-0,17	-301,79	12,88	54,90
522	434	COMB1	-2076,30	675,89	-2,19	-317,34	17,25	54,90
523	435	COMB1	-2076,30	673,77	-4,15	-327,20	19,43	54,90
524	436	COMB1	-2076,30	671,67	-6,01	-329,27	19,43	54,90
525	437	COMB1	-2076,30	669,57	-7,83	-327,72	19,43	54,90
526	438	COMB1	-2076,30	667,48	-9,56	-318,39	17,25	54,90
527	439	COMB1	-2076,30	665,39	-11,24	-305,43	12,88	54,90
528	440	COMB1	-2076,30	663,31	-12,85	-286,76	10,68	54,90
529	441	COMB1	-2076,30	661,24	-14,38	-260,30	9,49	54,90
530	442	COMB1	-2076,30	659,17	-15,88	-232,28	9,49	54,90
531	443	COMB1	-2076,30	657,11	-17,29	-196,48	9,49	54,90
532	444	COMB1	-2076,30	655,06	-18,63	-154,96	9,49	54,90
533	445	COMB1	-2076,30	653,01	-19,92	-109,80	9,49	54,90
534	446	COMB1	-2076,30	650,96	-21,15	-58,93	9,49	54,90
535	447	COMB1	-2076,30	648,92	-22,31	-2,33	9,49	54,90
536	448	COMB1	-2076,30	646,88	-23,40	59,98	9,49	54,90
537	449	COMB1	-2076,30	644,85	-24,45	125,94	9,49	54,90
538	450	COMB1	-2076,30	642,82	-25,42	197,62	9,49	54,90
539	451	COMB1	-2076,30	640,79	-26,33	275,01	9,49	54,90
540	452	COMB1	-2076,30	638,77	-27,20	356,06	25,50	54,90
541	453	COMB1	-2076,30	636,75	-27,99	442,83	43,49	54,90
542	454	COMB1	-2076,30	634,74	-28,72	535,32	63,21	54,90
543	455	COMB1	-2076,30	632,72	-29,40	631,47	85,11	54,90
544	457	COMB1	-2076,30	-628,70	30,58	838,85	130,69	54,90
545	457	COMB1	-872,92	-112,04	-6,49	238,48	23,90	54,90
546	458	COMB1	-872,92	-114,05	-5,14	191,01	13,06	54,90
547	459	COMB1	-872,92	-116,05	-3,98	145,66	9,49	54,90

continua

continuação

548	460	COMB1	-872,92	-118,06	-2,94	101,56	9,49	54,90
549	461	COMB1	-872,92	-120,06	-2,09	59,57	9,49	54,90
550	462	COMB1	-872,92	-122,06	-1,36	18,83	9,49	54,90
551	463	COMB1	-872,92	-124,06	-0,81	-19,79	9,49	54,90
552	464	COMB1	-872,92	-126,06	-0,44	-56,29	9,49	54,90
553	465	COMB1	-872,92	-128,06	-0,19	-91,55	9,49	54,90
554	466	COMB1	-1024,39	47,15	7,06	-57,11	9,49	54,90
555	467	COMB1	-1024,39	45,15	7,13	-44,55	9,49	54,90
556	468	COMB1	-1024,39	43,15	7,37	-29,41	9,49	54,90
557	469	COMB1	-1024,39	41,15	7,74	-12,72	9,49	54,90
558	470	COMB1	-1024,39	39,15	8,30	6,53	9,49	54,90
559	471	COMB1	-1024,39	37,15	9,04	28,36	9,49	54,90
560	472	COMB1	-1024,39	35,15	9,91	51,74	9,49	54,90
561	473	COMB1	-1024,39	33,14	10,96	77,69	9,49	54,90
562	474	COMB1	-1024,39	31,14	12,14	105,19	9,49	54,90
563	475	COMB1	-2162,32	-629,89	31,89	727,69	106,06	54,90
564	476	COMB1	-2162,32	-631,90	31,25	624,03	84,16	54,90
565	477	COMB1	-2162,32	-633,91	30,56	524,18	60,24	54,90
566	478	COMB1	-2162,32	-635,92	29,80	430,32	40,57	54,90
567	479	COMB1	-2162,32	-637,94	28,98	340,29	20,86	54,90
568	480	COMB1	-2162,32	-639,96	28,08	256,23	9,49	54,90
569	481	COMB1	-2162,32	-641,98	27,11	178,16	9,49	54,90
570	482	COMB1	-2162,32	-644,01	26,08	103,90	9,49	54,90
571	483	COMB1	-2162,32	-646,04	24,98	35,62	9,49	54,90
572	484	COMB1	-2162,32	-648,07	23,81	-26,67	9,49	54,90
573	485	COMB1	-2162,32	-650,11	22,58	-85,15	9,49	54,90
574	486	COMB1	-2162,32	-652,15	21,27	-137,66	9,49	54,90
575	487	COMB1	-2162,32	-654,20	19,89	-184,19	9,49	54,90
576	488	COMB1	-2162,32	-656,25	18,43	-224,74	9,49	54,90
577	489	COMB1	-2162,32	-658,30	16,92	-261,48	9,49	54,90
578	490	COMB1	-2162,32	-660,36	15,33	-292,25	9,49	54,90
579	491	COMB1	-2162,32	-662,43	13,64	-314,89	16,47	54,90
580	492	COMB1	-2162,32	-664,50	11,93	-335,88	18,67	54,90
581	493	COMB1	-2162,32	-666,58	10,11	-348,74	22,62	54,90
582	494	COMB1	-2162,32	-668,67	8,22	-355,63	25,23	54,90
583	495	COMB1	-2162,32	-670,76	6,27	-358,72	25,23	54,90
584	496	COMB1	-2162,32	-672,86	4,22	-353,69	25,23	54,90
585	497	COMB1	-2162,32	-674,96	2,12	-344,85	22,62	54,90
586	498	COMB1	-2162,32	-677,08	-0,08	-327,90	18,67	54,90
587	499	COMB1	-2162,32	-679,20	-2,36	-304,99	14,28	54,90
588	500	COMB1	-2162,32	-681,33	-4,69	-278,28	9,49	54,90
589	501	COMB1	-2162,32	-683,47	-7,12	-243,46	9,49	54,90
590	502	COMB1	-2162,32	-685,62	-9,63	-202,69	9,49	54,90
591	503	COMB1	-2162,32	-687,77	-12,21	-155,97	9,49	54,90

continua

continuação

592	504	COMB1	-2162,32	-689,94	-14,90	-101,14	9,49	54,90
593	504	COMB2	-2162,32	-689,94	-14,90	-101,14	3,23	54,90
594	506	COMB1	-2162,32	-694,31	-20,48	24,19	9,49	54,90
595	507	COMB1	-2162,32	-696,51	-23,42	99,00	9,49	54,90
596	508	COMB1	-2162,32	-698,72	-26,44	179,75	9,49	54,90
597	509	COMB1	-2162,32	-700,94	-29,54	266,44	9,49	54,90
598	510	COMB1	-2162,32	-703,18	-32,74	361,21	25,23	54,90
599	511	COMB1	-2162,32	-705,43	-36,04	572,80	60,24	54,90

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 7 – Solicitações no arco – combinação 2

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A_s	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB2	-2117,70	707,13	34,42	509,56	58,58	57,65
509	421	COMB2	-2117,70	704,87	31,33	406,53	36,65	57,65
510	422	COMB2	-2117,70	702,62	28,32	309,28	14,76	57,65
511	423	COMB2	-2117,70	700,39	25,40	219,94	9,49	57,65
512	424	COMB2	-2117,70	698,16	22,57	138,52	9,49	57,65
513	425	COMB2	-2117,70	695,95	19,82	62,90	9,49	57,65
514	426	COMB2	-2117,70	693,75	17,13	-6,93	9,49	57,65
515	427	COMB2	-2117,70	691,56	14,54	-68,83	9,49	57,65
516	428	COMB2	-2117,70	689,39	12,04	-122,80	9,49	57,65
517	429	COMB2	-2117,70	687,22	9,58	-173,09	9,49	57,65
518	430	COMB2	-2117,70	685,06	7,22	-215,44	9,49	57,65
519	431	COMB2	-2117,70	682,91	4,93	-251,98	9,49	57,65
520	432	COMB2	-2117,70	680,77	2,71	-282,70	10,39	57,65
521	433	COMB2	-2117,70	678,65	0,59	-305,48	14,76	57,65
522	434	COMB2	-2117,70	676,52	-1,49	-324,56	19,12	57,65
523	435	COMB2	-2117,70	674,41	-3,50	-337,82	21,31	57,65
524	436	COMB2	-2117,70	672,30	-5,42	-343,13	23,50	57,65
525	437	COMB2	-2117,70	670,20	-7,28	-344,74	23,50	57,65
526	438	COMB2	-2117,70	668,11	-9,06	-338,39	21,31	57,65
527	439	COMB2	-2117,70	666,03	-10,79	-328,34	19,12	57,65
528	440	COMB2	-2117,70	663,95	-12,45	-312,45	16,95	57,65
529	441	COMB2	-2117,70	661,88	-14,01	-288,60	10,39	57,65
530	442	COMB2	-2117,70	659,81	-15,55	-263,16	9,49	57,65
531	443	COMB2	-2117,70	657,75	-17,00	-229,77	9,49	57,65
532	444	COMB2	-2117,70	655,69	-18,38	-190,53	9,49	57,65
533	445	COMB2	-2117,70	653,64	-19,71	-147,57	9,49	57,65

continua

continuação

534	446	COMB2	-2117,70	651,60	-20,97	-98,77	9,49	57,65
535	447	COMB2	-2117,70	649,55	-22,17	-44,13	9,49	57,65
536	448	COMB2	-2117,70	647,52	-23,29	16,35	9,49	57,65
537	449	COMB2	-2117,70	645,48	-24,36	80,56	9,49	57,65
538	450	COMB2	-2117,70	643,45	-25,37	150,62	9,49	57,65
539	451	COMB2	-2117,70	641,43	-26,30	226,52	9,49	57,65
540	452	COMB2	-2117,70	639,41	-27,19	306,15	14,76	57,65
541	453	COMB2	-2117,70	637,39	-28,01	391,63	32,27	57,65
542	454	COMB2	-2117,70	635,37	-28,75	482,96	54,16	57,65
543	455	COMB2	-2117,70	633,36	-29,45	578,02	73,83	57,65
544	457	COMB2	-2117,70	-629,33	30,67	783,57	119,82	57,65
545	457	COMB2	-864,85	-25,96	-7,61	142,14	9,49	57,65
546	458	COMB2	-864,85	-27,97	-6,24	116,37	9,49	57,65
547	459	COMB2	-864,85	-29,97	-5,06	92,70	9,49	57,65
548	460	COMB2	-864,85	-31,98	-4,00	70,25	9,49	57,65
549	461	COMB2	-864,85	-33,98	-3,12	49,90	9,49	57,65
550	462	COMB2	-864,85	-35,98	-2,38	30,78	9,49	57,65
551	463	COMB2	-864,85	-37,98	-1,81	13,75	9,49	57,65
552	464	COMB2	-864,85	-39,98	-1,44	-1,19	9,49	57,65
553	465	COMB2	-864,85	-41,98	-1,19	-14,89	9,49	57,65
554	466	COMB2	-905,36	28,44	1,46	-10,15	9,49	57,65
555	467	COMB2	-905,36	26,44	1,53	-2,38	9,49	57,65
556	468	COMB2	-905,36	24,44	1,79	7,60	9,49	57,65
557	469	COMB2	-905,36	22,44	2,19	18,89	9,49	57,65
558	470	COMB2	-905,36	20,43	2,78	32,39	9,49	57,65
559	471	COMB2	-905,36	18,43	3,57	48,12	9,49	57,65
560	472	COMB2	-905,36	16,43	4,49	65,15	9,49	57,65
561	473	COMB2	-905,36	14,42	5,61	84,40	9,49	57,65
562	474	COMB2	-905,36	12,42	6,86	104,95	9,49	57,65
563	475	COMB2	-2244,62	-665,25	32,12	813,38	123,44	57,65
564	476	COMB2	-2244,62	-667,26	31,50	702,93	99,23	57,65
565	477	COMB2	-2244,62	-669,27	30,83	596,47	77,26	57,65
566	478	COMB2	-2244,62	-671,28	30,08	496,24	55,26	57,65
567	479	COMB2	-2244,62	-673,30	29,29	400,00	25,19	57,65
568	480	COMB2	-2244,62	-675,32	28,42	309,99	9,49	57,65
569	481	COMB2	-2244,62	-677,34	27,48	226,20	9,49	57,65
570	482	COMB2	-2244,62	-679,37	26,48	146,40	9,49	57,65
571	483	COMB2	-2244,62	-681,39	25,42	72,82	9,49	57,65
572	484	COMB2	-2244,62	-683,43	24,28	5,47	9,49	57,65
573	485	COMB2	-2244,62	-685,46	23,09	-57,90	9,49	57,65
574	486	COMB2	-2244,62	-687,51	21,82	-115,04	9,49	57,65
575	487	COMB2	-2244,62	-689,55	20,48	-165,97	9,49	57,65
576	488	COMB2	-2244,62	-691,60	19,07	-210,67	9,49	57,65
577	489	COMB2	-2244,62	-693,66	17,60	-251,39	9,49	57,65

continua

continuação

578	490	COMB2	-2244,62	-695,72	16,07	-285,90	9,49	57,65
579	491	COMB2	-2244,62	-697,79	14,43	-311,94	9,49	57,65
580	492	COMB2	-2244,62	-699,86	12,77	-336,26	12,10	57,65
581	493	COMB2	-2244,62	-701,94	11,01	-352,11	14,28	57,65
582	494	COMB2	-2244,62	-704,02	9,17	-361,76	18,65	57,65
583	495	COMB2	-2244,62	-706,11	7,28	-367,43	18,65	57,65
584	496	COMB2	-2244,62	-708,21	5,30	-364,65	18,65	57,65
585	497	COMB2	-2244,62	-710,32	3,27	-357,91	16,48	57,65
586	498	COMB2	-2244,62	-712,43	1,13	-342,71	9,94	57,65
587	499	COMB2	-2244,62	-714,56	-1,07	-321,32	9,94	57,65
588	500	COMB2	-2244,62	-716,68	-3,33	-295,96	9,49	57,65
589	501	COMB2	-2244,62	-718,82	-5,69	-262,16	9,49	57,65
590	502	COMB2	-2244,62	-720,97	-8,12	-222,16	9,49	57,65
591	503	COMB2	-2244,62	-723,13	-10,63	-175,97	9,49	57,65
592	504	COMB2	-2244,62	-725,30	-13,23	-121,33	9,49	57,65
593	505	COMB2	-2244,62	-727,47	-15,88	-62,76	9,49	57,65
594	506	COMB2	-2244,62	-729,66	-18,64	4,26	9,49	57,65
595	507	COMB2	-2244,62	-731,86	-21,49	79,70	9,49	57,65
596	508	COMB2	-2244,62	-734,08	-24,42	161,32	9,49	57,65
597	509	COMB2	-2244,62	-736,30	-27,42	249,12	9,49	57,65
598	510	COMB2	-2244,62	-738,53	-30,52	345,35	14,28	57,65
599	512	COMB2	-2244,62	743,05	36,99	560,80	60,08	57,65

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 8 – Solicitações no arco – combinação 3

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A _s	A _{sw}
Texto	Texot	Texot	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB3	-2169,37	709,92	39,33	574,68	63,42	53,90
509	421	COMB3	-2169,37	707,66	35,95	465,52	41,61	53,90
510	422	COMB3	-2169,37	705,41	32,65	362,30	19,82	53,90
511	423	COMB3	-2169,37	703,17	29,45	267,21	9,49	53,90
512	424	COMB3	-2169,37	700,95	26,36	180,23	9,49	53,90
513	425	COMB3	-2169,37	698,74	23,34	99,20	9,49	53,90
514	426	COMB3	-2169,37	696,54	20,40	24,14	9,49	53,90
515	427	COMB3	-2169,37	694,35	17,56	-42,80	9,49	53,90
516	428	COMB3	-2169,37	692,18	14,82	-101,61	9,49	53,90
517	429	COMB3	-2169,37	690,01	12,14	-156,62	9,49	53,90
518	430	COMB3	-2169,37	687,85	9,55	-203,50	9,49	53,90
519	431	COMB3	-2169,37	685,70	7,05	-244,40	9,49	53,90

continua

continuação

520	432	COMB3	-2169,37	683,56	4,62	-279,34	9,49	53,90
521	433	COMB3	-2169,37	681,43	2,29	-306,12	9,49	53,90
522	434	COMB3	-2169,37	679,31	0,01	-329,11	11,03	53,90
523	435	COMB3	-2169,37	677,20	-2,19	-346,11	13,20	53,90
524	436	COMB3	-2169,37	675,09	-4,29	-354,96	15,41	53,90
525	437	COMB3	-2169,37	672,99	-6,33	-360,00	17,63	53,90
526	438	COMB3	-2169,37	670,90	-8,28	-356,89	17,63	53,90
527	439	COMB3	-2169,37	668,81	-10,17	-349,96	15,41	53,90
528	440	COMB3	-2169,37	666,74	-11,99	-337,04	13,20	53,90
529	441	COMB3	-2169,37	664,67	-13,70	-315,96	9,49	53,90
530	442	COMB3	-2169,37	662,60	-15,39	-293,23	9,49	53,90
531	443	COMB3	-2169,37	660,54	-16,97	-262,34	9,49	53,90
532	444	COMB3	-2169,37	658,48	-18,48	-225,46	9,49	53,90
533	445	COMB3	-2169,37	656,43	-19,94	-184,75	9,49	53,90
534	446	COMB3	-2169,37	654,38	-21,32	-138,04	9,49	53,90
535	447	COMB3	-2169,37	652,34	-22,63	-85,34	9,49	53,90
536	448	COMB3	-2169,37	650,31	-23,86	-26,64	9,49	53,90
537	449	COMB3	-2169,37	648,27	-25,03	35,89	9,49	53,90
538	450	COMB3	-2169,37	646,24	-26,13	104,42	9,49	53,90
539	451	COMB3	-2169,37	644,22	-27,16	178,96	9,49	53,90
540	452	COMB3	-2169,37	642,19	-28,13	257,32	9,49	53,90
541	453	COMB3	-2169,37	640,18	-29,02	341,69	13,20	53,90
542	454	COMB3	-2169,37	638,16	-29,84	432,06	32,89	53,90
543	455	COMB3	-2169,37	636,14	-30,61	526,27	54,71	53,90
544	457	COMB3	-2169,37	-632,12	31,94	730,53	98,30	53,90
545	457	COMB3	-1021,36	-26,90	-13,36	133,15	9,49	53,90
546	458	COMB3	-1021,36	-28,90	-12,01	103,71	9,49	53,90
547	459	COMB3	-1021,36	-30,91	-10,85	76,83	9,49	53,90
548	460	COMB3	-1021,36	-32,91	-9,80	51,49	9,49	53,90
549	461	COMB3	-1021,36	-34,92	-8,94	28,71	9,49	53,90
550	462	COMB3	-1021,36	-36,92	-8,21	7,47	9,49	53,90
551	463	COMB3	-1021,36	-38,92	-7,65	-11,20	9,49	53,90
552	464	COMB3	-1021,36	-40,92	-7,28	-27,31	9,49	53,90
553	465	COMB3	-1021,36	-42,92	-7,04	-41,88	9,49	53,90
554	466	COMB3	-872,56	126,92	0,61	-120,36	9,49	53,90
555	467	COMB3	-872,56	124,92	0,68	-88,01	9,49	53,90
556	468	COMB3	-872,56	122,92	0,92	-53,54	9,49	53,90
557	469	COMB3	-872,56	120,92	1,28	-17,82	9,49	53,90
558	470	COMB3	-872,56	118,92	1,83	20,01	9,49	53,90
559	471	COMB3	-872,56	116,92	2,55	59,96	9,49	53,90
560	472	COMB3	-872,56	114,92	3,40	101,16	9,49	53,90
561	473	COMB3	-872,56	112,91	4,43	144,47	9,49	53,90
562	474	COMB3	-872,56	110,90	5,58	189,02	9,49	53,90
563	475	COMB3	-2082,51	-630,48	30,39	840,28	123,46	53,90

continua

continuação

564	476	COMB3	-2082,51	-632,49	29,82	734,47	101,65	53,90
565	477	COMB3	-2082,51	-634,50	29,21	632,32	77,69	53,90
566	478	COMB3	-2082,51	-636,52	28,53	535,92	58,05	53,90
567	479	COMB3	-2082,51	-638,54	27,81	443,18	36,26	53,90
568	480	COMB3	-2082,51	-640,56	27,01	356,18	18,79	53,90
569	481	COMB3	-2082,51	-642,58	26,15	274,92	9,49	53,90
570	482	COMB3	-2082,51	-644,60	25,25	197,32	9,49	53,90
571	483	COMB3	-2082,51	-646,63	24,28	125,47	9,49	53,90
572	484	COMB3	-2082,51	-648,67	23,24	59,35	9,49	53,90
573	485	COMB3	-2082,51	-650,70	22,15	-3,11	9,49	53,90
574	486	COMB3	-2082,51	-652,74	21,00	-59,83	9,49	53,90
575	487	COMB3	-2082,51	-654,79	19,77	-110,82	9,49	53,90
576	488	COMB3	-2082,51	-656,84	18,48	-156,07	9,49	53,90
577	489	COMB3	-2082,51	-658,90	17,15	-197,67	9,49	53,90
578	490	COMB3	-2082,51	-660,96	15,75	-233,53	9,49	53,90
579	491	COMB3	-2082,51	-663,03	14,25	-261,59	9,49	53,90
580	492	COMB3	-2082,51	-665,10	12,74	-288,07	9,49	53,90
581	493	COMB3	-2082,51	-667,18	11,13	-306,75	9,49	53,90
582	494	COMB3	-2082,51	-669,26	9,46	-319,70	10,09	53,90
583	495	COMB3	-2082,51	-671,35	7,74	-329,00	12,27	53,90
584	496	COMB3	-2082,51	-673,45	5,93	-330,50	12,27	53,90
585	497	COMB3	-2082,51	-675,56	4,07	-328,36	12,27	53,90
586	498	COMB3	-2082,51	-677,67	2,13	-318,42	10,09	53,90
587	499	COMB3	-2082,51	-679,79	0,11	-302,76	9,49	53,90
588	500	COMB3	-2082,51	-681,92	-1,94	-283,47	9,49	53,90
589	501	COMB3	-2082,51	-684,06	-4,09	-256,38	9,49	53,90
590	502	COMB3	-2082,51	-686,21	-6,31	-223,57	9,49	53,90
591	503	COMB3	-2082,51	-688,37	-8,60	-185,06	9,49	53,90
592	504	COMB3	-2082,51	-690,54	-10,97	-138,76	9,49	53,90
593	505	COMB3	-2082,51	-692,71	-13,39	-88,84	9,49	53,90
594	506	COMB3	-2082,51	-694,90	-15,90	-31,13	9,49	53,90
595	507	COMB3	-2082,51	-697,10	-18,51	34,36	9,49	53,90
596	508	COMB3	-2082,51	-699,31	-21,18	105,54	9,49	53,90
597	509	COMB3	-2082,51	-701,54	-23,91	182,42	9,49	53,90
598	510	COMB3	-2082,51	-703,77	-26,74	267,07	9,49	53,90
599	511	COMB3	-2082,51	-706,02	-29,66	457,60	40,61	53,90

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Solicitações no arco – combinação 4

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB4	1742,50	589,37	41,07	408,36	41,19	43,77
509	421	COMB4	1742,50	587,11	37,96	325,41	21,56	43,77
510	422	COMB4	1742,50	584,86	34,92	247,12	9,49	43,77
511	423	COMB4	1742,50	582,62	31,98	175,24	9,49	43,77
512	424	COMB4	1742,50	580,40	29,13	109,78	9,49	43,77
513	425	COMB4	1742,50	578,19	26,35	48,98	9,49	43,77
514	426	COMB4	1742,50	575,98	23,64	-7,13	9,49	43,77
515	427	COMB4	1742,50	573,80	21,03	-56,83	9,49	43,77
516	428	COMB4	1742,50	571,62	18,51	-100,10	9,49	43,77
517	429	COMB4	1742,50	569,45	16,04	-140,43	9,49	43,77
518	430	COMB4	1742,50	567,29	13,66	-174,33	9,49	43,77
519	431	COMB4	1742,50	565,15	11,35	-203,54	9,49	43,77
520	432	COMB4	1742,50	563,01	9,11	-228,06	9,49	43,77
521	433	COMB4	1742,50	560,88	6,97	-246,14	9,49	43,77
522	434	COMB4	1742,50	558,76	4,87	-261,27	9,49	43,77
523	435	COMB4	1742,50	556,64	2,85	-271,70	12,81	43,77
524	436	COMB4	1742,50	554,54	0,92	-275,69	12,81	43,77
525	437	COMB4	1742,50	552,44	-0,97	-276,71	12,81	43,77
526	438	COMB4	1742,50	550,35	-2,76	-271,30	12,81	43,77
527	439	COMB4	1742,50	548,26	-4,50	-262,92	10,61	43,77
528	440	COMB4	1742,50	546,18	-6,17	-249,83	9,49	43,77
529	441	COMB4	1742,50	544,11	-7,75	-230,29	9,49	43,77
530	442	COMB4	1742,50	542,04	-9,31	-209,53	9,49	43,77
531	443	COMB4	1742,50	539,98	-10,77	-182,31	9,49	43,77
532	444	COMB4	1742,50	537,93	-12,16	-150,38	9,49	43,77
533	445	COMB4	1742,50	535,87	-13,50	-115,48	9,49	43,77
534	446	COMB4	1742,50	533,83	-14,77	-75,86	9,49	43,77
535	447	COMB4	1742,50	531,79	-15,97	-31,52	9,49	43,77
536	448	COMB4	1742,50	529,75	-17,10	17,53	9,49	43,77
537	449	COMB4	1742,50	527,72	-18,18	69,56	9,49	43,77
538	450	COMB4	1742,50	525,69	-19,20	126,30	9,49	43,77
539	451	COMB4	1742,50	523,66	-20,14	187,77	9,49	43,77
540	452	COMB4	1742,50	521,64	-21,03	252,22	9,49	43,77
541	453	COMB4	1742,50	519,62	-21,86	321,39	9,49	43,77
542	454	COMB4	1742,50	517,60	-22,61	395,28	39,00	43,77
543	455	COMB4	1742,50	515,59	-23,32	472,16	54,26	43,77
544	456	COMB4	1742,50	513,58	-23,95	553,75	73,89	43,77
545	457	COMB4	796,40	-59,65	-7,77	638,50	112,76	43,77
546	458	COMB4	796,40	-61,66	-6,48	125,21	9,49	43,77
547	459	COMB4	796,40	-63,67	-5,36	94,41	9,49	43,77

continua

continuação

548	460	COMB4	796,40	-65,67	-4,36	64,71	9,49	43,77
549	461	COMB4	796,40	-67,68	-3,54	36,89	9,49	43,77
550	462	COMB4	796,40	-69,68	-2,84	10,16	9,49	43,77
551	463	COMB4	796,40	-71,68	-2,31	-14,68	9,49	43,77
552	464	COMB4	796,40	-73,68	-1,95	-37,62	9,49	43,77
553	465	COMB4	796,40	-75,68	-1,72	-59,48	9,49	43,77
554	466	COMB4	820,80	68,11	2,37	-69,55	9,49	43,77
555	467	COMB4	820,80	66,11	2,43	-51,95	9,49	43,77
556	468	COMB4	820,80	64,11	2,68	-32,39	9,49	43,77
557	469	COMB4	820,80	62,11	3,05	-11,69	9,49	43,77
558	470	COMB4	820,80	60,11	3,60	10,98	9,49	43,77
559	471	COMB4	820,80	58,11	4,34	35,60	9,49	43,77
560	472	COMB4	820,80	56,11	5,21	61,37	9,49	43,77
561	473	COMB4	820,80	54,10	6,26	89,10	9,49	43,77
562	474	COMB4	820,80	52,10	7,43	117,97	9,49	43,77
563	475	COMB4	1824,31	-534,97	25,87	659,03	43,60	43,77
564	476	COMB4	1824,31	-536,98	25,24	570,64	94,42	43,77
565	477	COMB4	1824,31	-538,99	24,57	485,40	57,46	43,77
566	478	COMB4	1824,31	-541,01	23,82	405,13	40,02	43,77
567	479	COMB4	1824,31	-543,02	23,02	328,00	22,58	43,77
568	480	COMB4	1824,31	-545,04	22,15	255,85	9,49	43,77
569	481	COMB4	1824,31	-547,07	21,20	188,66	9,49	43,77
570	482	COMB4	1824,31	-549,09	20,20	124,61	9,49	43,77
571	483	COMB4	1824,31	-551,12	19,13	65,53	9,49	43,77
572	485	COMB4	-1824,31	555,19	-16,78	39,56	9,49	43,77
573	485	COMB4	1824,31	-555,19	16,78	-39,56	9,49	43,77
574	486	COMB4	1824,31	-557,23	15,51	-85,58	9,49	43,77
575	487	COMB4	1824,31	-559,28	14,16	-126,63	9,49	43,77
576	488	COMB4	1824,31	-561,33	12,73	-162,72	9,49	43,77
577	489	COMB4	1824,31	-563,38	11,26	-195,67	9,49	43,77
578	490	COMB4	1824,31	-565,45	9,71	-223,67	9,49	43,77
579	491	COMB4	1824,31	-567,51	8,07	-244,88	9,49	43,77
580	492	COMB4	1824,31	-569,58	6,39	-264,79	9,49	43,77
581	493	COMB4	1824,31	-571,66	4,62	-277,92	9,49	43,77
582	494	COMB4	1824,31	-573,75	2,77	-286,10	13,85	43,77
583	495	COMB4	1824,31	-575,84	0,88	-291,15	16,03	43,77
584	496	COMB4	1824,31	-577,94	-1,12	-289,43	13,85	43,77
585	497	COMB4	1824,31	-580,04	-3,17	-284,58	13,85	43,77
586	498	COMB4	1824,31	-582,16	-5,32	-272,97	11,67	43,77
587	499	COMB4	1824,31	-584,28	-7,54	-256,41	9,49	43,77
588	500	COMB4	1824,31	-586,41	-9,81	-236,73	9,49	43,77
589	501	COMB4	1824,31	-588,55	-12,18	-210,29	9,49	43,77
590	502	COMB4	1824,31	-590,70	-14,63	-178,91	9,49	43,77
591	503	COMB4	1824,31	-592,86	-17,15	-142,60	9,49	43,77

continua

continuação

592	504	COMB4	1824,31	-595,02	-19,77	-99,53	9,49	43,77
593	505	COMB4	1824,31	-597,20	-22,44	-53,36	9,49	43,77
594	506	COMB4	1824,31	-599,39	-25,22	-0,44	9,49	43,77
595	507	COMB4	1824,31	-601,59	-28,09	59,24	9,49	43,77
596	508	COMB4	1824,31	-603,80	-31,03	123,83	9,49	43,77
597	509	COMB4	1824,31	-606,02	-34,05	193,35	9,49	43,77
598	510	COMB4	1824,31	-608,26	-37,17	269,60	9,49	43,77
599	511	COMB4	1824,31	-610,51	-40,39	440,50	47,07	43,77

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 – Solicitações no arco – combinação 5

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A_s	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB5	-2119,12	719,91	-49,04	467,11	49,79	55,46
509	421	COMB5	-2119,12	717,65	-46,95	367,08	27,89	55,46
510	422	COMB5	-2119,12	715,40	-44,91	272,84	9,49	55,46
511	423	COMB5	-2119,12	713,16	-42,93	186,52	9,49	55,46
512	424	COMB5	-2119,12	710,94	-41,02	108,12	9,49	55,46
513	425	COMB5	-2119,12	708,73	-39,15	35,53	9,49	55,46
514	426	COMB5	-2119,12	706,53	-37,33	-31,26	9,49	55,46
515	427	COMB5	-2119,12	704,34	-35,57	-90,13	9,49	55,46
516	428	COMB5	-2119,12	702,16	-33,88	-141,06	9,49	55,46
517	429	COMB5	-2119,12	699,99	-32,22	-188,30	9,49	55,46
518	430	COMB5	-2119,12	697,84	-30,62	-227,60	9,49	55,46
519	431	COMB5	-2119,12	695,69	-29,07	-261,08	9,49	55,46
520	432	COMB5	-2119,12	693,55	-27,57	-288,74	10,39	55,46
521	433	COMB5	-2119,12	691,42	-26,13	-308,46	14,76	55,46
522	434	COMB5	-2119,12	689,30	-24,72	-324,47	16,95	55,46
523	435	COMB5	-2119,12	687,18	-23,36	-334,66	21,31	55,46
524	436	COMB5	-2119,12	685,08	-22,06	-336,89	21,31	55,46
525	437	COMB5	-2119,12	682,98	-20,80	-335,42	21,31	55,46
526	438	COMB5	-2119,12	680,89	-19,59	-325,99	19,12	55,46
527	439	COMB5	-2119,12	678,80	-18,42	-312,84	16,95	55,46
528	440	COMB5	-2119,12	676,72	-17,30	-293,86	12,59	55,46
529	441	COMB5	-2119,12	674,65	-16,24	-266,91	9,49	55,46
530	442	COMB5	-2119,12	672,58	-15,19	-238,37	9,49	55,46
531	443	COMB5	-2119,12	670,52	-14,21	-201,87	9,49	55,46
532	444	COMB5	-2119,12	668,47	-13,28	-159,52	9,49	55,46
533	445	COMB5	-2119,12	666,42	-12,38	-113,45	9,49	55,46

continua

continuação

534	446	COMB5	-2119,12	664,37	-11,52	-61,54	9,49	55,46
535	447	COMB5	-2119,12	662,33	-10,72	-3,77	9,49	55,46
536	448	COMB5	-2119,12	660,29	-9,96	59,84	9,49	55,46
537	449	COMB5	-2119,12	658,26	-9,23	127,18	9,49	55,46
538	450	COMB5	-2119,12	656,23	-8,55	200,37	9,49	55,46
539	451	COMB5	-2119,12	654,21	-7,92	279,41	9,49	55,46
540	452	COMB5	-2119,12	652,18	-7,32	362,18	25,70	55,46
541	453	COMB5	-2119,12	650,16	-6,76	450,80	47,60	55,46
542	454	COMB5	-2119,12	648,15	-6,26	545,28	65,14	55,46
543	455	COMB5	-2119,12	646,13	-5,78	643,49	89,23	55,46
544	457	COMB5	-2119,12	-642,11	4,96	855,36	135,05	55,46
545	457	COMB5	-885,09	-112,62	9,73	241,48	23,59	55,46
546	458	COMB5	-885,09	-114,63	9,47	193,60	14,93	55,46
547	459	COMB5	-885,09	-116,64	9,25	147,87	9,49	55,46
548	460	COMB5	-885,09	-118,64	9,05	103,42	9,49	55,46
549	461	COMB5	-885,09	-120,64	8,89	61,12	9,49	55,46
550	462	COMB5	-885,09	-122,65	8,75	20,08	9,49	55,46
551	463	COMB5	-885,09	-124,65	8,64	-18,79	9,49	55,46
552	464	COMB5	-885,09	-126,65	8,57	-55,51	9,49	55,46
553	465	COMB5	-885,09	-128,65	8,53	-90,97	9,49	55,46
554	466	COMB5	885,09	130,65	-8,51	-124,26	9,49	55,46
555	467	COMB5	-1036,38	45,80	-1,61	-44,02	9,49	55,46
556	468	COMB5	-1036,38	43,80	-1,65	-28,67	9,49	55,46
557	469	COMB5	-1036,38	41,80	-1,72	-11,75	9,49	55,46
558	470	COMB5	-1036,38	39,80	-1,82	7,77	9,49	55,46
559	471	COMB5	-1036,38	37,79	-1,95	29,91	9,49	55,46
560	472	COMB5	-1036,38	35,79	-2,10	53,61	9,49	55,46
561	473	COMB5	-1036,38	33,79	-2,29	79,93	9,49	55,46
562	474	COMB5	-1036,38	31,78	-2,50	107,82	9,49	55,46
563	475	COMB5	-2204,51	-643,11	6,25	743,97	110,44	55,46
564	476	COMB5	-2204,51	-645,12	6,58	638,05	86,24	55,46
565	477	COMB5	-2204,51	-647,13	6,93	536,04	64,11	55,46
566	478	COMB5	-2204,51	-649,14	7,31	440,14	42,18	55,46
567	479	COMB5	-2204,51	-651,16	7,73	348,15	22,62	55,46
568	480	COMB5	-2204,51	-653,18	8,18	262,27	9,49	55,46
569	481	COMB5	-2204,51	-655,20	8,68	182,49	9,49	55,46
570	482	COMB5	-2204,51	-657,23	9,20	106,62	9,49	55,46
571	483	COMB5	-2204,51	-659,26	9,75	36,85	9,49	55,46
572	484	COMB5	-2204,51	-661,29	10,35	-26,81	9,49	55,46
573	485	COMB5	-2204,51	-663,33	10,97	-86,57	9,49	55,46
574	486	COMB5	-2204,51	-665,37	11,64	-140,23	9,49	55,46
575	487	COMB5	-2204,51	-667,41	12,34	-187,78	9,49	55,46
576	488	COMB5	-2204,51	-669,47	13,08	-229,24	9,49	55,46
577	489	COMB5	-2204,51	-671,52	13,84	-266,79	9,49	55,46

continua

continuação

578	490	COMB5	-2204,51	-673,58	14,65	-298,25	11,67	55,46
579	491	COMB5	-2204,51	-675,65	15,50	-321,41	16,08	55,46
580	492	COMB5	-2204,51	-677,72	16,37	-342,88	22,62	55,46
581	493	COMB5	-2204,51	-679,80	17,29	-356,05	24,79	55,46
582	494	COMB5	-2204,51	-681,89	18,25	-363,12	26,96	55,46
583	495	COMB5	-2204,51	-683,98	19,24	-366,31	26,96	55,46
584	496	COMB5	-2204,51	-686,08	20,28	-361,21	26,96	55,46
585	497	COMB5	-2204,51	-688,18	21,34	-352,22	24,78	55,46
586	498	COMB5	-2204,51	-690,30	22,46	-334,94	20,43	55,46
587	499	COMB5	-2204,51	-692,42	23,61	-311,58	16,08	55,46
588	500	COMB5	-2204,51	-694,55	24,79	-284,34	9,49	55,46
589	501	COMB5	-2204,51	-696,69	26,03	-248,81	9,49	55,46
590	502	COMB5	-2204,51	-698,83	27,30	-207,21	9,49	55,46
591	503	COMB5	-2204,51	-700,99	28,61	-159,54	9,49	55,46
592	504	COMB5	-2204,51	-703,16	29,97	-103,58	9,49	55,46
593	505	COMB5	-2204,51	-705,34	31,36	-43,76	9,49	55,46
594	506	COMB5	-2204,51	-707,52	32,80	24,33	9,49	55,46
595	507	COMB5	-2204,51	-709,73	34,29	100,69	9,49	55,46
596	508	COMB5	-2204,51	-711,94	35,82	183,12	9,49	55,46
597	509	COMB5	-2204,51	-714,16	37,39	271,60	9,49	55,46
598	510	COMB5	-2204,51	-716,40	39,02	368,35	26,96	55,46
599	511	COMB5	-2204,51	-718,65	40,69	584,40	75,10	55,46

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Solicitações no arco – combinação 6

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A _s	A _{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB6	-2160,52	720,55	-47,37	521,31	62,43	55,23
509	421	COMB6	-2160,52	718,28	-45,36	415,97	38,38	55,23
510	422	COMB6	-2160,52	716,03	-43,40	316,55	16,47	55,23
511	423	COMB6	-2160,52	713,80	-41,50	225,22	9,49	55,23
512	424	COMB6	-2160,52	711,58	-39,67	141,97	9,49	55,23
513	425	COMB6	-2160,52	709,36	-37,87	64,64	9,49	55,23
514	426	COMB6	-2160,52	707,16	-36,13	-6,75	9,49	55,23
515	427	COMB6	-2160,52	704,97	-34,44	-70,05	9,49	55,23
516	428	COMB6	-2160,52	702,80	-32,81	-125,26	9,49	55,23
517	429	COMB6	-2160,52	700,63	-31,22	-176,69	9,49	55,23
518	430	COMB6	-2160,52	698,47	-29,69	-220,01	9,49	55,23
519	431	COMB6	-2160,52	696,32	-28,20	-257,39	9,49	55,23
520	432	COMB6	-2160,52	694,18	-26,75	-288,83	9,91	55,23

continua

continuação

521	433	COMB6	-2160,52	692,06	-25,37	-312,16	16,47	55,23
522	434	COMB6	-2160,52	689,93	-24,02	-331,69	20,86	55,23
523	435	COMB6	-2160,52	687,82	-22,71	-345,28	23,06	55,23
524	436	COMB6	-2160,52	685,71	-21,47	-350,75	25,23	55,23
525	437	COMB6	-2160,52	683,61	-20,25	-352,43	25,23	55,23
526	438	COMB6	-2160,52	681,52	-19,10	-345,99	23,06	55,23
527	439	COMB6	-2160,52	679,44	-17,97	-335,75	20,86	55,23
528	440	COMB6	-2160,52	677,36	-16,89	-319,54	16,47	55,23
529	441	COMB6	-2160,52	675,29	-15,88	-295,22	12,09	55,23
530	442	COMB6	-2160,52	673,22	-14,87	-269,25	9,49	55,23
531	443	COMB6	-2160,52	671,16	-13,93	-235,15	9,49	55,23
532	444	COMB6	-2160,52	669,10	-13,03	-195,09	9,49	55,23
533	445	COMB6	-2160,52	667,05	-12,17	-151,22	9,49	55,23
534	446	COMB6	-2160,52	665,01	-11,35	-101,38	9,49	55,23
535	447	COMB6	-2160,52	662,97	-10,57	-45,57	9,49	55,23
536	448	COMB6	-2160,52	660,93	-9,84	16,21	9,49	55,23
537	449	COMB6	-2160,52	658,90	-9,15	81,80	9,49	55,23
538	450	COMB6	-2160,52	656,87	-8,49	153,37	9,49	55,23
539	451	COMB6	-2160,52	654,84	-7,88	230,91	9,49	55,23
540	452	COMB6	-2160,52	652,82	-7,31	312,27	16,47	55,23
541	453	COMB6	-2160,52	650,80	-6,78	399,60	34,01	55,23
542	454	COMB6	-2160,52	648,78	-6,29	492,91	55,89	55,23
543	455	COMB6	-2160,52	646,77	-5,83	590,04	77,64	55,23
544	457	COMB6	-2160,52	-642,75	5,04	800,07	121,62	55,23
545	457	COMB6	-877,02	-26,54	8,60	145,14	9,49	55,23
546	458	COMB6	-877,02	-28,55	8,38	118,96	9,49	55,23
547	459	COMB6	-877,02	-30,55	8,18	94,91	9,49	55,23
548	460	COMB6	-877,02	-32,56	8,00	72,11	9,49	55,23
549	461	COMB6	-877,02	-34,56	7,85	51,44	9,49	55,23
550	462	COMB6	-877,02	-36,57	7,73	32,03	9,49	55,23
551	463	COMB6	-877,02	-38,57	7,63	14,74	9,49	55,23
552	464	COMB6	-877,02	-40,57	7,57	-0,41	9,49	55,23
553	465	COMB6	-877,02	-42,57	7,53	-14,31	9,49	55,23
554	466	COMB6	-917,35	29,08	-7,19	-9,79	9,49	55,23
555	467	COMB6	-917,35	27,08	-7,20	-1,86	9,49	55,23
556	468	COMB6	-917,35	25,08	-7,23	8,33	9,49	55,23
557	469	COMB6	-917,35	23,08	-7,27	19,86	9,49	55,23
558	470	COMB6	-917,35	21,08	-7,34	33,63	9,49	55,23
559	471	COMB6	-917,35	19,08	-7,42	49,66	9,49	55,23
560	472	COMB6	-917,35	17,07	-7,52	67,02	9,49	55,23
561	473	COMB6	-917,35	15,07	-7,64	86,63	9,49	55,23
562	474	COMB6	-917,35	13,06	-7,78	107,58	9,49	55,23
563	475	COMB6	-2286,81	-678,46	6,47	829,66	127,58	55,23
564	476	COMB6	-2286,81	-680,47	6,82	716,96	103,42	55,23

continua

continuação

565	477	COMB6	-2286,81	-682,49	7,19	608,33	79,20	55,23
566	478	COMB6	-2286,81	-684,50	7,60	506,06	57,23	55,23
567	479	COMB6	-2286,81	-686,52	8,04	407,87	35,24	55,23
568	480	COMB6	-2286,81	-688,54	8,52	316,02	15,44	55,23
569	481	COMB6	-2286,81	-690,56	9,05	230,53	9,49	55,23
570	482	COMB6	-2286,81	-692,58	9,60	149,11	9,49	55,23
571	483	COMB6	-2286,81	-694,61	10,19	74,05	9,49	55,23
572	484	COMB6	-2286,81	-696,65	10,82	5,33	9,49	55,23
573	485	COMB6	-2286,81	-698,68	11,48	-59,32	9,49	55,23
574	486	COMB6	-2286,81	-700,73	12,19	-117,61	9,49	55,23
575	487	COMB6	-2286,81	-702,77	12,93	-169,56	9,49	55,23
576	488	COMB6	-2286,81	-704,82	13,71	-215,16	9,49	55,23
577	489	COMB6	-2286,81	-706,88	14,53	-256,70	9,49	55,23
578	490	COMB6	-2286,81	-708,94	15,38	-291,90	11,05	55,23
579	491	COMB6	-2286,81	-711,01	16,29	-318,46	15,44	55,23
580	492	COMB6	-2286,81	-713,08	17,21	-343,26	22,04	55,23
581	493	COMB6	-2286,81	-715,16	18,19	-359,42	24,24	55,23
582	494	COMB6	-2286,81	-717,24	19,21	-369,25	26,44	55,23
583	495	COMB6	-2286,81	-719,33	20,25	-375,02	28,64	55,23
584	496	COMB6	-2286,81	-721,43	21,36	-372,17	28,64	55,23
585	497	COMB6	-2286,81	-723,54	22,48	-365,27	28,64	55,23
586	498	COMB6	-2286,81	-725,65	23,67	-349,76	22,04	55,23
587	499	COMB6	-2286,81	-727,78	24,89	-327,91	17,64	55,23
588	500	COMB6	-2286,81	-729,90	26,15	-302,02	13,25	55,23
589	501	COMB6	-2286,81	-732,04	27,45	-267,51	9,49	55,23
590	502	COMB6	-2286,81	-734,19	28,80	-226,69	9,49	55,23
591	503	COMB6	-2286,81	-736,35	30,19	-179,53	9,49	55,23
592	504	COMB6	-2286,81	-738,52	31,64	-123,78	9,49	55,23
593	505	COMB6	-2286,81	-740,69	33,11	-63,99	9,49	55,23
594	506	COMB6	-2286,81	-742,88	34,64	4,40	9,49	55,23
595	507	COMB6	-2286,81	-745,08	36,22	81,39	9,49	55,23
596	508	COMB6	-2286,81	-747,29	37,85	164,69	9,49	55,23
597	509	COMB6	-2286,81	-749,52	39,52	254,29	9,49	55,23
598	510	COMB6	-2286,81	-751,75	41,24	352,48	24,24	55,23
599	511	COMB6	-2286,81	-754,00	43,01	572,34	70,41	55,23

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Solicitações no arco – combinação 7

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A_s	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB7	-2212,19	723,33	-42,46	586,42	75,19	55,23
509	421	COMB7	-2212,19	721,07	-40,74	474,96	50,86	55,23
510	422	COMB7	-2212,19	718,82	-39,07	369,58	26,80	55,23
511	423	COMB7	-2212,19	716,59	-37,45	272,48	9,49	55,23
512	424	COMB7	-2212,19	714,36	-35,88	183,67	9,49	55,23
513	425	COMB7	-2212,19	712,15	-34,35	100,95	9,49	55,23
514	426	COMB7	-2212,19	709,95	-32,86	24,31	9,49	55,23
515	427	COMB7	-2212,19	707,76	-31,42	-44,03	9,49	55,23
516	428	COMB7	-2212,19	705,59	-30,03	-104,07	9,49	55,23
517	429	COMB7	-2212,19	703,42	-28,67	-160,22	9,49	55,23
518	430	COMB7	-2212,19	701,26	-27,36	-208,07	9,49	55,23
519	431	COMB7	-2212,19	699,11	-26,08	-249,82	9,49	55,23
520	432	COMB7	-2212,19	696,97	-24,85	-285,47	9,49	55,23
521	433	COMB7	-2212,19	694,85	-23,67	-312,80	15,93	55,23
522	434	COMB7	-2212,19	692,72	-22,52	-336,24	20,28	55,23
523	435	COMB7	-2212,19	690,61	-21,40	-353,57	24,64	55,23
524	436	COMB7	-2212,19	688,50	-20,34	-362,58	26,80	55,23
525	437	COMB7	-2212,19	686,40	-19,30	-367,69	26,80	55,23
526	438	COMB7	-2212,19	684,31	-18,31	-364,48	26,80	55,23
527	439	COMB7	-2212,19	682,23	-17,35	-357,37	24,64	55,23
528	440	COMB7	-2212,19	680,15	-16,43	-344,14	22,45	55,23
529	441	COMB7	-2212,19	678,08	-15,56	-322,58	18,10	55,23
530	442	COMB7	-2212,19	676,01	-14,71	-299,32	11,50	55,23
531	443	COMB7	-2212,19	673,95	-13,90	-267,73	9,49	55,23
532	444	COMB7	-2212,19	671,89	-13,14	-230,02	9,49	55,23
533	445	COMB7	-2212,19	669,84	-12,40	-188,40	9,49	55,23
534	446	COMB7	-2212,19	667,80	-11,70	-140,65	9,49	55,23
535	447	COMB7	-2212,19	665,75	-11,04	-86,78	9,49	55,23
536	448	COMB7	-2212,19	663,72	-10,41	-26,78	9,49	55,23
537	449	COMB7	-2212,19	661,68	-9,82	37,13	9,49	55,23
538	450	COMB7	-2212,19	659,65	-9,26	107,17	9,49	55,23
539	451	COMB7	-2212,19	657,63	-8,74	183,35	9,49	55,23
540	452	COMB7	-2212,19	655,61	-8,25	263,44	9,49	55,23
541	453	COMB7	-2212,19	653,59	-7,79	349,66	22,45	55,23
542	454	COMB7	-2212,19	651,57	-7,38	442,01	44,26	55,23
543	455	COMB7	-2212,19	649,56	-6,99	538,29	64,20	55,23
544	457	COMB7	-2212,19	-645,53	6,31	747,03	110,37	55,23
545	457	COMB7	-1033,54	-27,48	2,85	136,16	9,49	55,23
546	458	COMB7	-1033,54	-29,49	2,60	106,30	9,49	55,23
547	459	COMB7	-1033,54	-31,49	2,39	79,04	9,49	55,23

continua

continuação

548	460	COMB7	-1033,54	-33,50	2,19	53,34	9,49	55,23
549	461	COMB7	-1033,54	-35,50	2,03	30,25	9,49	55,23
550	462	COMB7	-1033,54	-37,50	1,90	8,72	9,49	55,23
551	463	COMB7	-1033,54	-39,51	1,79	-10,21	9,49	55,23
552	464	COMB7	-1033,54	-41,51	1,73	-26,53	9,49	55,23
553	465	COMB7	-1033,54	-43,51	1,68	-41,29	9,49	55,23
554	466	COMB7	-884,54	127,57	-8,04	-120,01	9,49	55,23
555	467	COMB7	-884,54	125,57	-8,06	-87,48	9,49	55,23
556	468	COMB7	-884,54	123,57	-8,11	-52,80	9,49	55,23
557	469	COMB7	-884,54	121,57	-8,18	-16,85	9,49	55,23
558	470	COMB7	-884,54	119,57	-8,29	21,25	9,49	55,23
559	471	COMB7	-884,54	117,56	-8,44	61,51	9,49	55,23
560	472	COMB7	-884,54	115,56	-8,61	103,03	9,49	55,23
561	473	COMB7	-884,54	113,56	-8,82	146,71	9,49	55,23
562	474	COMB7	-884,54	111,55	-9,06	191,65	9,49	55,23
563	475	COMB7	-2124,70	-643,70	4,74	856,55	134,84	55,23
564	476	COMB7	-2124,70	-645,71	5,14	748,49	110,95	55,23
565	477	COMB7	-2124,70	-647,72	5,57	644,18	89,13	55,23
566	478	COMB7	-2124,70	-649,74	6,05	545,74	67,23	55,23
567	479	COMB7	-2124,70	-651,75	6,56	451,04	47,52	55,23
568	480	COMB7	-2124,70	-653,77	7,12	362,21	27,79	55,23
569	481	COMB7	-2124,70	-655,80	7,72	279,26	9,49	55,23
570	482	COMB7	-2124,70	-657,82	8,36	200,04	9,49	55,23
571	483	COMB7	-2124,70	-659,85	9,05	126,69	9,49	55,23
572	484	COMB7	-2124,70	-661,89	9,78	59,21	9,49	55,23
573	485	COMB7	-2124,70	-663,92	10,55	-4,53	9,49	55,23
574	486	COMB7	-2124,70	-665,96	11,36	-62,40	9,49	55,23
575	487	COMB7	-2124,70	-668,01	12,22	-114,42	9,49	55,23
576	488	COMB7	-2124,70	-670,06	13,13	-160,57	9,49	55,23
577	489	COMB7	-2124,70	-672,12	14,07	-202,98	9,49	55,23
578	490	COMB7	-2124,70	-674,18	15,06	-239,54	9,49	55,23
579	491	COMB7	-2124,70	-676,24	16,11	-268,11	9,49	55,23
580	492	COMB7	-2124,70	-678,32	17,18	-295,07	12,49	55,23
581	493	COMB7	-2124,70	-680,39	18,31	-314,06	16,84	55,23
582	494	COMB7	-2124,70	-682,48	19,50	-327,19	19,03	55,23
583	495	COMB7	-2124,70	-684,57	20,71	-336,59	21,23	55,23
584	496	COMB7	-2124,70	-686,67	21,98	-338,02	21,23	55,23
585	497	COMB7	-2124,70	-688,78	23,29	-335,73	21,23	55,23
586	498	COMB7	-2124,70	-690,89	24,66	-325,46	19,03	55,23
587	499	COMB7	-2124,70	-693,01	26,08	-309,35	14,67	55,23
588	500	COMB7	-2124,70	-695,14	27,53	-289,52	10,29	55,23
589	501	COMB7	-2124,70	-697,28	29,05	-261,73	9,49	55,23
590	502	COMB7	-2124,70	-699,43	30,61	-228,10	9,49	55,23
591	503	COMB7	-2124,70	-701,59	32,22	-188,63	9,49	55,23

continua

continuação

592	504	COMB7	-2124,70	-703,76	33,90	-141,20	9,49	55,23
593	505	COMB7	-2124,70	-705,93	35,60	-90,07	9,49	55,23
594	506	COMB7	-2124,70	-708,12	37,37	-30,99	9,49	55,23
595	507	COMB7	-2124,70	-710,32	39,21	36,05	9,49	55,23
596	508	COMB7	-2124,70	-712,53	41,09	108,91	9,49	55,23
597	509	COMB7	-2124,70	-714,75	43,02	187,58	9,49	55,23
598	510	COMB7	-2124,70	-716,99	45,01	274,20	9,49	55,23
599	511	COMB7	-2124,70	-719,24	47,07	469,13	49,90	55,23

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Solicitações no arco – combinação 8

Elemento	Nó	Caso	Nk	Vk	Tk	Mk	A_s	A_{sw}
Texto	Texto	Texto	KN	KN	KNm	KNm	cm ²	cm ² /m
508	420	COMB8	-1785,32	602,78	-40,71	420,10	42,63	45,23
509	421	COMB8	-1785,32	600,52	-38,73	334,85	23,00	45,23
510	422	COMB8	-1785,32	598,27	-36,80	254,39	9,49	45,23
511	423	COMB8	-1785,32	596,03	-34,92	180,51	9,49	45,23
512	424	COMB8	-1785,32	593,81	-33,11	113,22	9,49	45,23
513	425	COMB8	-1785,32	591,60	-31,34	50,73	9,49	45,23
514	426	COMB8	-1785,32	589,40	-29,61	-44,50	9,49	45,23
515	427	COMB8	-1785,32	587,21	-27,95	-58,06	9,49	45,23
516	428	COMB8	-1785,32	585,03	-26,34	-102,56	9,49	45,23
517	429	COMB8	-1785,32	582,86	-24,77	-144,03	9,49	45,23
518	430	COMB8	-1785,32	580,71	-23,25	-178,90	9,49	45,23
519	431	COMB8	-1785,32	578,56	-21,78	-208,95	9,49	45,23
520	432	COMB8	-1785,32	576,42	-20,36	-234,19	9,49	45,23
521	433	COMB8	-1785,32	574,29	-18,99	-252,81	9,49	45,23
522	434	COMB8	-1785,32	572,17	-17,66	-268,40	10,07	45,23
523	435	COMB8	-1785,32	570,05	-16,37	-279,16	12,26	45,23
524	436	COMB8	-1785,32	567,95	-15,14	-283,31	14,43	45,23
525	437	COMB8	-1785,32	565,85	-13,94	-284,41	14,43	45,23
526	438	COMB8	-1785,32	563,76	-12,79	-278,89	12,26	45,23
527	439	COMB8	-1785,32	561,67	-11,68	-270,33	12,26	45,23
528	440	COMB8	-1785,32	559,59	-10,62	-256,93	9,49	45,23
529	441	COMB8	-1785,32	557,52	-9,61	-236,90	9,49	45,23
530	442	COMB8	-1785,32	555,45	-8,62	-215,61	9,49	45,23
531	443	COMB8	-1785,32	553,39	-7,69	-187,70	9,49	45,23
532	444	COMB8	-1785,32	551,34	-6,81	-154,94	9,49	45,23
533	445	COMB8	-1785,32	549,29	-5,95	-119,13	9,49	45,23
534	446	COMB8	-1785,32	547,24	-5,14	-78,47	9,49	45,23

continua

continuação

535	447	COMB8	-1785,32	545,20	-4,38	-32,97	9,49	45,23
536	448	COMB8	-1785,32	543,16	-3,66	17,38	9,49	45,23
537	449	COMB8	-1785,32	541,13	-2,97	70,80	9,49	45,23
538	450	COMB8	-1785,32	539,10	-2,32	129,06	9,49	45,23
539	451	COMB8	-1785,32	537,07	-1,72	192,16	9,49	45,23
540	452	COMB8	-1785,32	535,05	-1,15	258,34	9,49	45,23
541	453	COMB8	-1785,32	533,03	-0,63	329,36	23,15	45,23
542	454	COMB8	-1785,32	531,01	-0,15	405,24	40,60	45,23
543	455	COMB8	-1785,32	529,00	0,30	484,18	49,32	45,23
544	457	COMB8	-1785,32	-524,98	-1,08	654,84	95,11	45,23
545	457	COMB8	-808,58	-60,24	8,45	160,90	9,49	45,23
546	458	COMB8	-808,58	-62,25	8,14	127,80	9,49	45,23
547	459	COMB8	-808,58	-64,25	7,87	96,62	9,49	45,23
548	460	COMB8	-808,58	-66,26	7,63	66,56	9,49	45,23
549	461	COMB8	-808,58	-68,26	7,44	38,43	9,49	45,23
550	462	COMB8	-808,58	-70,26	7,27	11,41	9,49	45,23
551	463	COMB8	-808,58	-72,26	7,14	-13,68	9,49	45,23
552	464	COMB8	-808,58	-74,26	7,06	-36,85	9,49	45,23
553	465	COMB8	-808,58	-76,26	7,00	-58,90	9,49	45,23
554	466	COMB8	-832,79	68,76	-6,29	-79,20	9,49	45,23
555	467	COMB8	-832,79	66,76	-6,30	-51,43	9,49	45,23
556	468	COMB8	-832,79	64,76	-6,34	-31,66	9,49	45,23
557	469	COMB8	-832,79	62,76	-6,41	-10,72	9,49	45,23
558	470	COMB8	-832,79	60,76	-6,51	12,22	9,49	45,23
559	471	COMB8	-832,79	58,76	-6,65	37,15	9,49	45,23
560	472	COMB8	-832,79	56,75	-6,80	63,25	9,49	45,23
561	473	COMB8	-832,79	54,75	-6,99	91,34	9,49	45,23
562	474	COMB8	-832,79	52,74	-7,21	120,60	9,49	45,23
563	475	COMB8	-1866,50	-548,19	0,22	675,30	95,95	45,23
564	476	COMB8	-1866,50	-550,20	0,56	584,66	95,95	45,23
565	477	COMB8	-1866,50	-552,21	0,93	497,26	58,69	45,23
566	478	COMB8	-1866,50	-554,23	1,34	414,95	39,44	45,23
567	479	COMB8	-1866,50	-556,24	1,77	335,87	24,14	45,23
568	480	COMB8	-1866,50	-558,26	2,25	261,88	9,49	45,23
569	481	COMB8	-1866,50	-560,29	2,77	192,99	9,49	45,23
570	482	COMB8	-1866,50	-562,31	3,31	127,33	9,49	45,23
571	483	COMB8	-1866,50	-564,34	3,90	66,76	9,49	45,23
572	484	COMB8	-1866,50	-566,37	4,52	11,28	9,49	45,23
573	485	COMB8	-1866,50	-568,41	5,18	-40,98	9,49	45,23
574	486	COMB8	-1866,50	-570,45	5,87	-88,15	9,49	45,23
575	487	COMB8	-1866,50	-572,50	6,61	-130,22	9,49	45,23
576	488	COMB8	-1866,50	-574,55	7,38	-167,21	9,49	45,23
577	489	COMB8	-1866,50	-576,60	8,18	-200,98	9,49	45,23
578	490	COMB8	-1866,50	-578,66	9,03	-229,67	9,49	45,23

continua

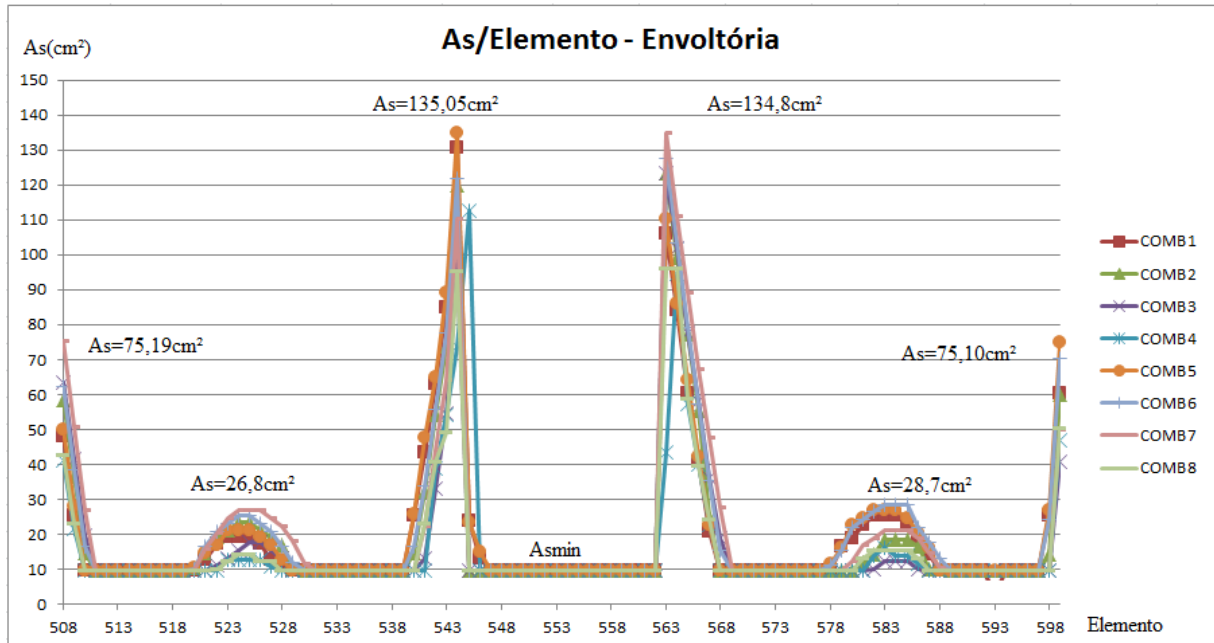
continuação

579	491	COMB8	-1866,50	-580,73	9,93	-251,41	9,49	45,23
580	492	COMB8	-1866,50	-582,80	10,84	-271,79	9,49	45,23
581	493	COMB8	-1866,50	-584,88	11,80	-285,23	13,28	45,23
582	494	COMB8	-1866,50	-586,97	12,81	-293,59	15,46	45,23
583	495	COMB8	-1866,50	-589,06	13,84	-298,74	15,46	45,23
584	496	COMB8	-1866,50	-591,16	14,93	-296,95	15,46	45,23
585	497	COMB8	-1866,50	-593,26	16,05	-291,95	15,46	45,23
586	498	COMB8	-1866,50	-595,38	17,22	-280,01	13,28	45,23
587	499	COMB8	-1866,50	-597,50	18,43	-263,00	9,49	45,23
588	500	COMB8	-1866,50	-599,63	19,67	-242,79	9,49	45,23
589	501	COMB8	-1866,50	-601,77	20,96	-215,64	9,49	45,23
590	502	COMB8	-1866,50	-603,92	22,29	-183,44	9,49	45,23
591	503	COMB8	-1866,50	-606,07	23,67	-146,17	9,49	45,23
592	504	COMB8	-1866,50	-608,24	25,10	-101,98	9,49	45,23
593	505	COMB8	-1866,50	-610,42	26,55	-54,59	9,49	45,23
594	506	COMB8	-1866,50	-612,61	28,06	-0,29	9,49	45,23
595	507	COMB8	-1866,50	-614,81	29,63	60,93	9,49	45,23
596	508	COMB8	-1866,50	-617,02	31,23	127,20	9,49	45,23
597	509	COMB8	-1866,50	-619,24	32,88	198,51	9,49	45,23
598	510	COMB8	-1866,50	-621,48	34,58	276,74	9,49	45,23
599	511	COMB8	-1866,50	-623,73	36,34	452,03	50,27	45,23

(fonte: elaborado pelo autor)

Desta maneira obteve-se a área de aço necessária para cada solicitação, lembrando que os valores indicados são característicos pois a calculadora do CAD/TQS solicita os valores sem majoração para o caso do cálculo da flexão composta. Com a área de aço para cada elemento do arco criou-se uma envoltória de A_s (cm²) por elemento para facilitar a identificação da maior área em cada elemento. A figura 36 ilustra esta situação.

Figura 36 – Envoltória de área de aço por elemento



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 36 traz o arco inteiro, porém o arco é executado em duas etapas. Com isso, meio arco é armado pelas maiores áreas de aço necessárias. O centro do arco para todas as combinações manteve apenas a armadura mínima, existem alguns pontos onde a taxa de armadura ultrapassou o limite permitido por norma, porém é um caso pontual e não se fez um novo cálculo com uma dimensão diferente.

Ainda foi realizado uma verificação do efeito de flambagem para os arcos. Para esta análise o SAP2000 soluciona um problema de autovalores e autovetores onde cada auto vetor corresponde a um modo de flexão da estrutura. A fórmula que caracteriza o problema é dada pela fórmula 7.

$$K - \lambda G(r) \psi = 0 \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

K = matriz de rigidez;

λ = matriz diagonal que representa autovalores;

$G(r)$ = matriz geométrica;

Ψ = representa autovetores (modos de flambagem).

Os modos de flambagem são apresentados na tabela 14. Solicitou-se ao SAP2000 que apresentasse 10 modos para o conjunto de combinações estudadas. Pode-se observar que o pior caso localiza-se no primeiro modo que indica que se for aplicado uma carga superior a 1,89 vezes a carga considerada no cálculo, ocorre flambagem na estrutura.

O detalhamento do arco esta apresentado no apêndice I.

Tabela 14 – Modos de flambagem

Caso de Flambagem	Modos	Fator
Flambagem	1	1,89
Flambagem	2	2,20
Flambagem	3	2,28
Flambagem	4	2,45
Flambagem	5	2,96
Flambagem	6	3,42
Flambagem	7	4,50
Flambagem	8	4,70
Flambagem	9	4,84
Flambagem	10	5,14

(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 LAJES PROTENDIDAS DA PISTA

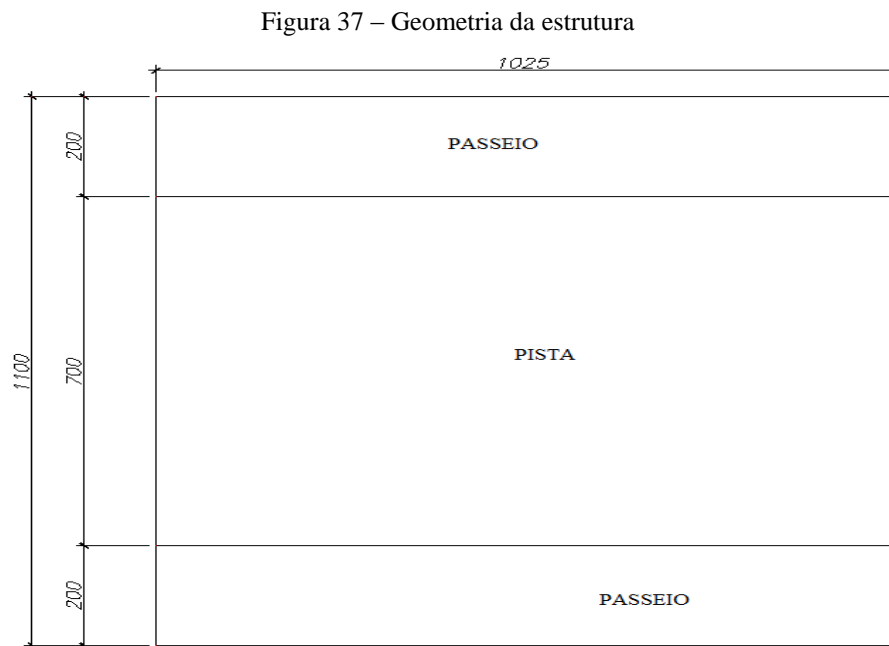
Para o dimensionamento das lajes da pista, criou-se um modelo em separado no SAP2000, sendo que este se trata de uma laje bi apoiada. As propriedades dos materiais são semelhantes às propriedades definidas para o modelo completo.

O modelo da laje foi gerado a partir de uma malha mais refinada que a malha utilizada na modelagem de toda a estrutura da ponte. Isso por que, quanto mais refinada for a malha no SAP2000, mais adequados são os resultados apresentados. Para este modelo se lançou 42 planos no eixo x e 45 planos no eixo y, sendo que os elementos da malha ficaram com 25x25cm.

No modelo foram lançados também as lajes do passeio, para que se possa estudar qual a ordem de grandeza das solicitações que surgem nestas lajes, devido o carregamento das lajes

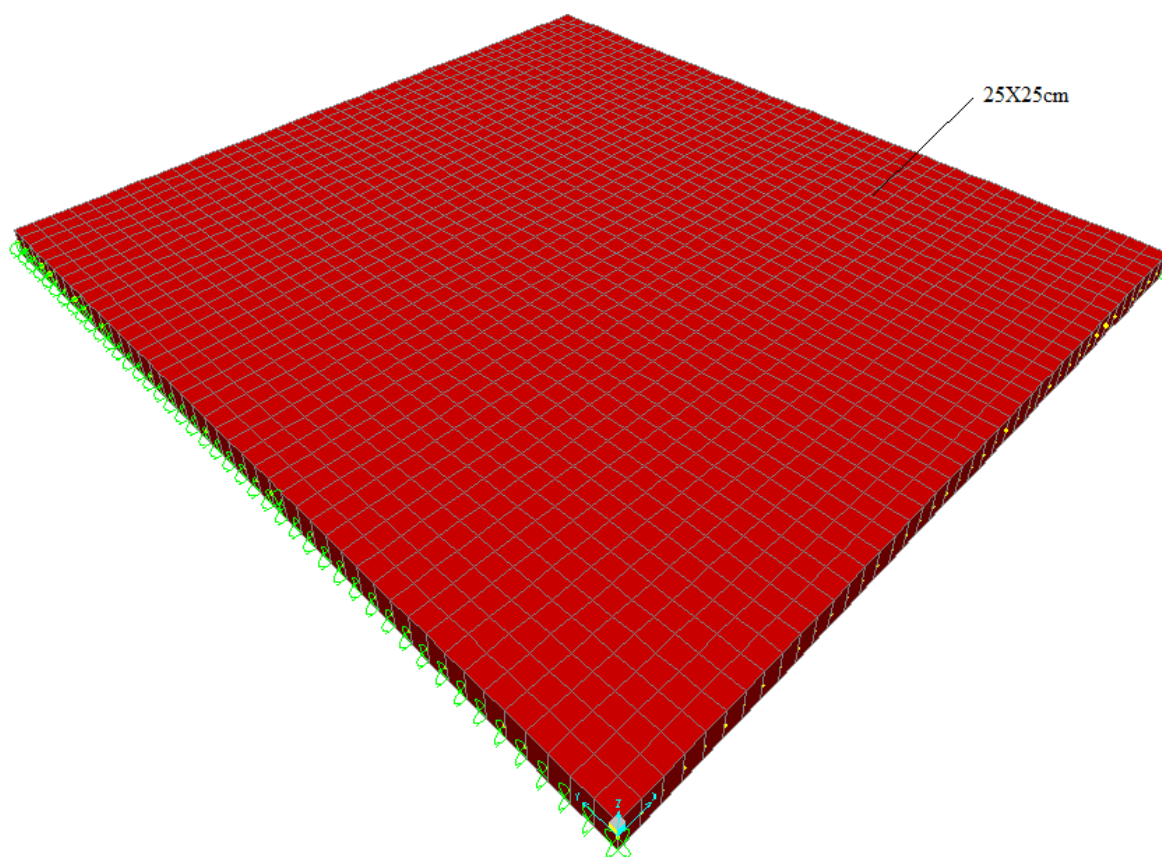
da pista. As lajes do passeio e os critérios adotados no seu dimensionamento são apresentados em um tópico especial.

As lajes da pista são pré-fabricadas com altura de $h=32\text{cm}$ e uma capa de concreto de 8cm aplicada *in loco*. Na figura 37 e 38, pode-se observar a geometria da estrutura lançado e uma perspectiva da mesma dada pelo SAP2000.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 38 – Estrutura lançada



(fonte: elaborado pelo autor)

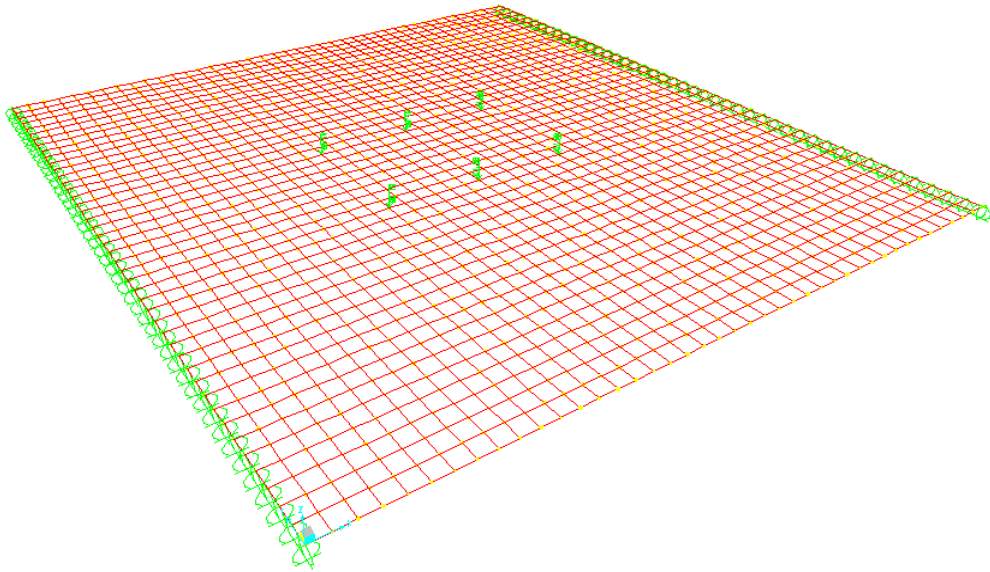
Como o vão livre da estrutura é de 10,25m o coeficiente de impacto vertical $CIV=1,35$, é maior que o coeficiente aplicado aos carregamentos móveis estudados no modelo completo. Isso mostra que estruturas com vão menores são mais afetadas pelos efeitos dinâmicos das cargas móveis em ponte. Com este coeficiente majorou-se as cargas móveis e obteve-se então que o peso em cada roda do trem tipo é de $P=81$ kN, a carga de multidão $p=6,75$ kN/m² e a carga do passeio $q=4,05$ kN/m².

Os critérios de simplificação da aplicação da carga do trem tipo e de multidão são os mesmos apresentados anteriormente. O trem tipo foi analisado em quatro posições diferentes, consideradas as mais desfavoráveis para a estrutura. Estas posições são apresentadas nas figuras 39 a 42.

Com estas posições definidas e os carregamentos citados acima, fez-se 4 combinações de carga para a análise da estrutura, são elas:

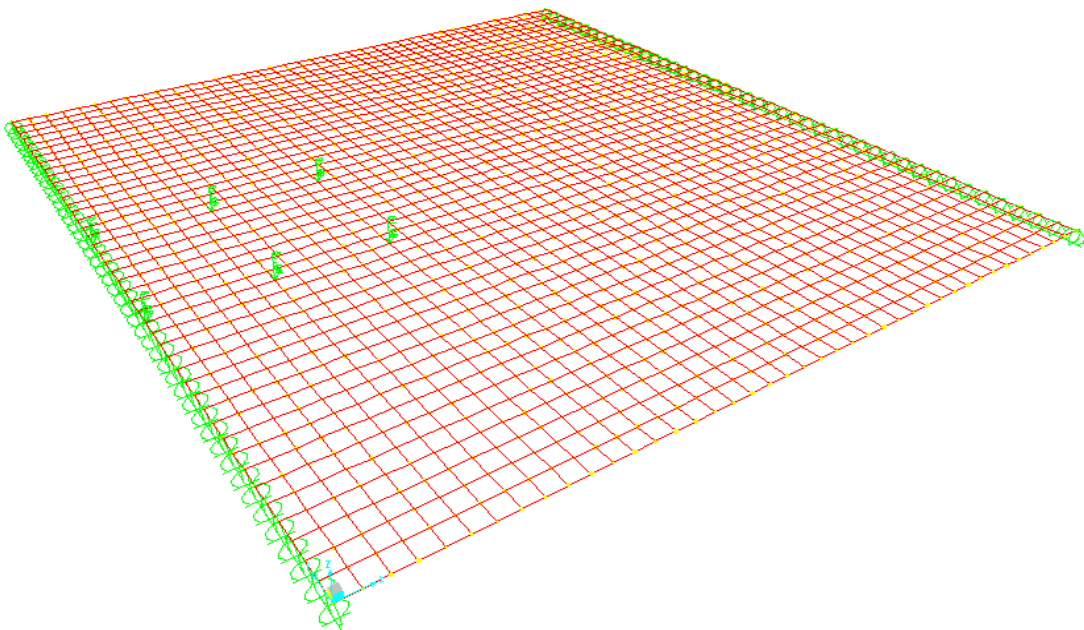
- a) Comb.1 = peso p. + trem I + multidão + passeio;
- b) Comb.2 = peso p. + trem II + multidão + passeio;
- c) Comb.3 = peso p. + trem III + multidão + passeio;
- d) Comb.4 = peso p. + trem IV + multidão + passeio.

Figura 39 – Trem tipo I



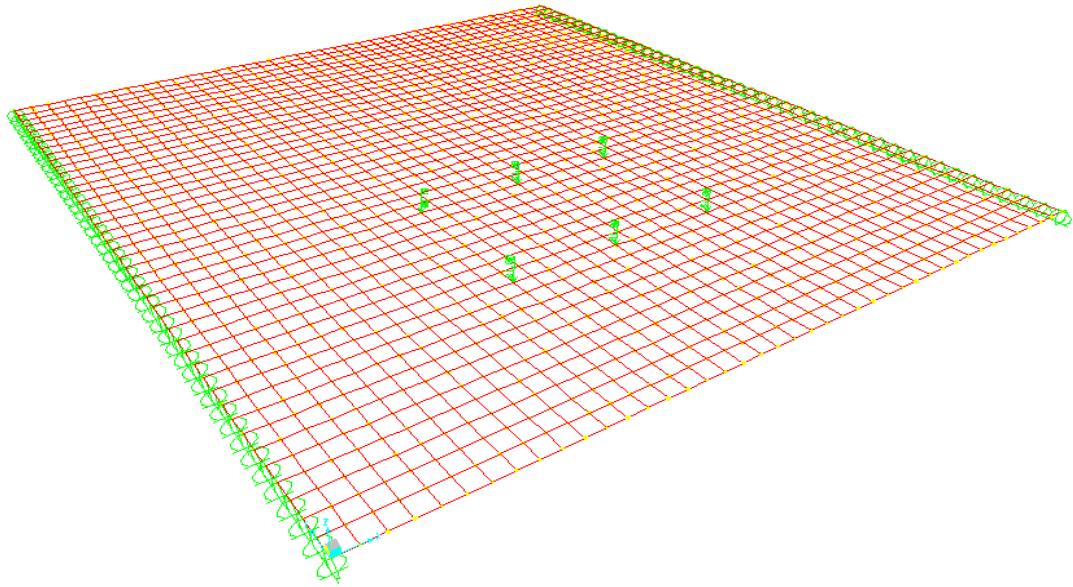
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Trem tipo II



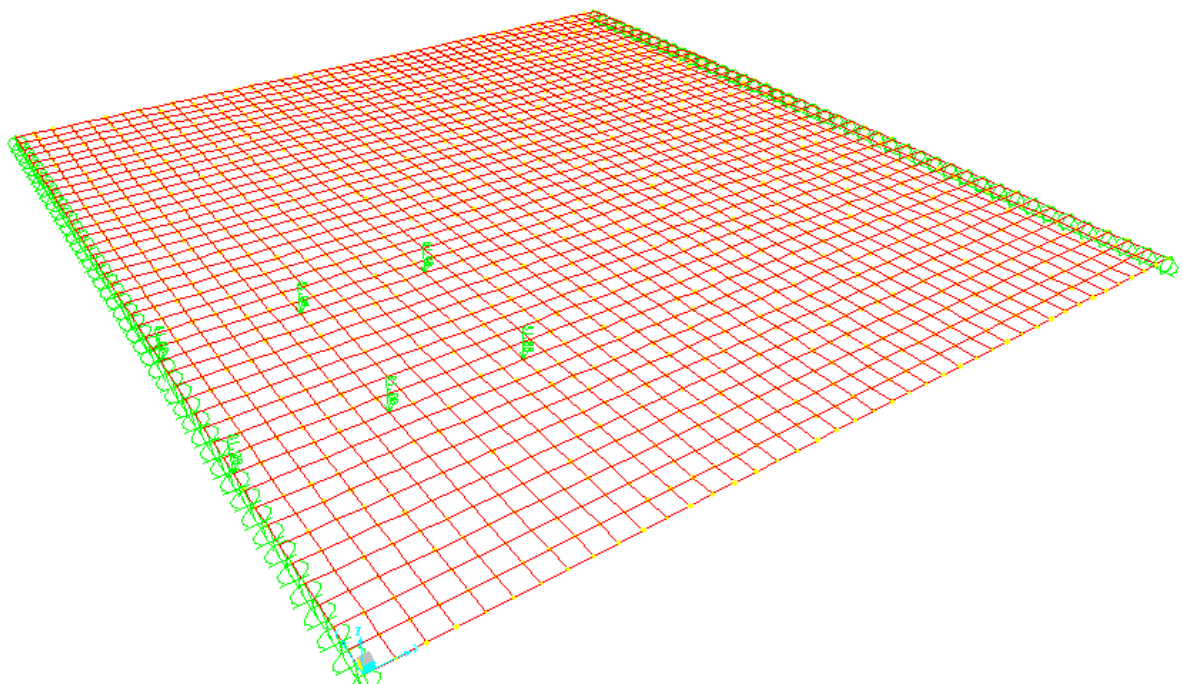
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 – Trem tipo III



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Trem tipo IV

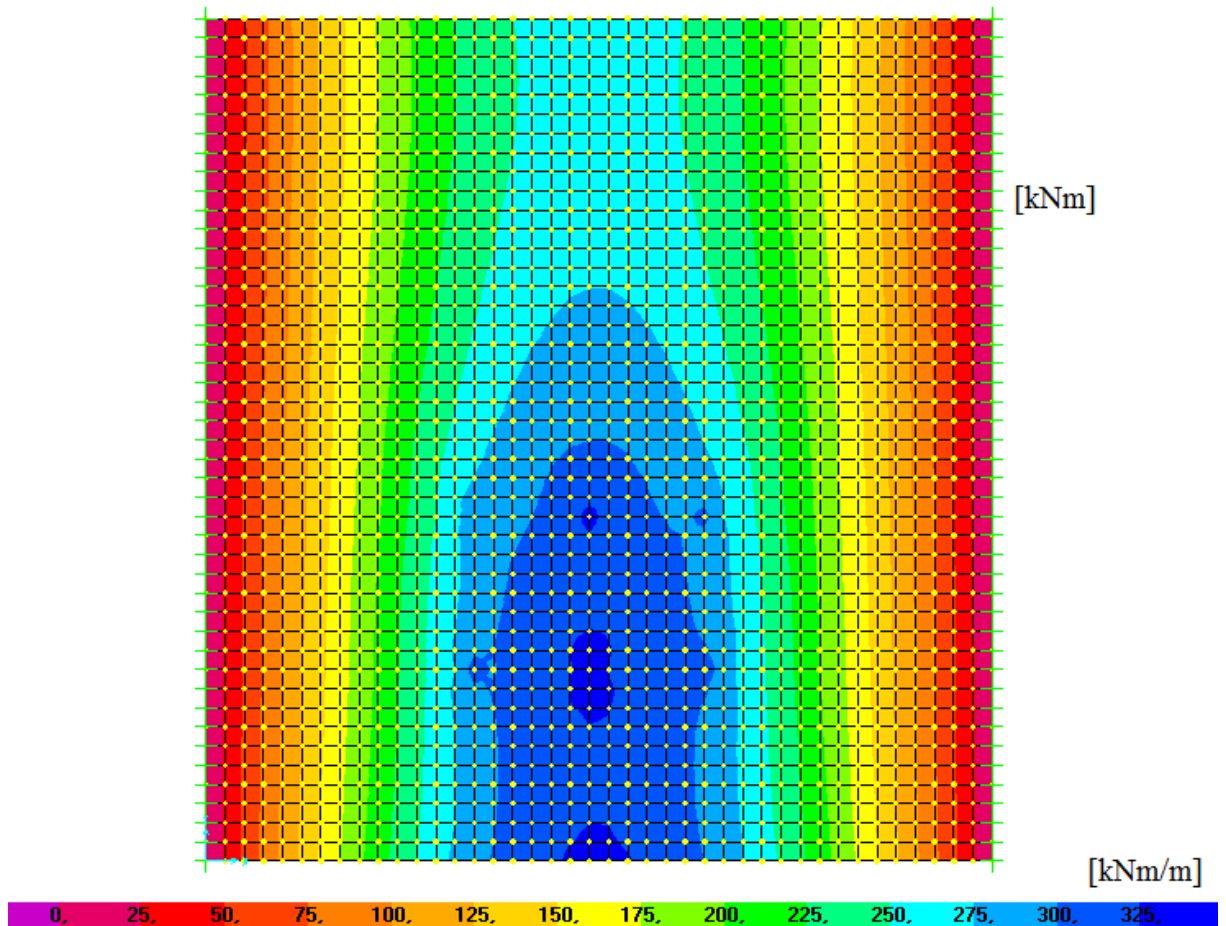


(fonte: elaborado pelo autor)

Após completa a análise das combinações citadas acima, se utilizou a ferramenta do SAP2000, *draw section cut*, que permite ao usuário desenhar uma seção de corte entre coordenadas específicas e obter a resultante da ação num ponto de interesse. A combinação 3,

foi a que mais solicitou a estrutura em questão de flexão, a distribuição dos momentos solicitantes sobre a estrutura pode ser observada na figura 43, que apresenta uma vista do plano x-y. Tem-se assim um pico de momento da ordem de 325kNm/m.

Figura 43 – Momento fletor – combinação 3

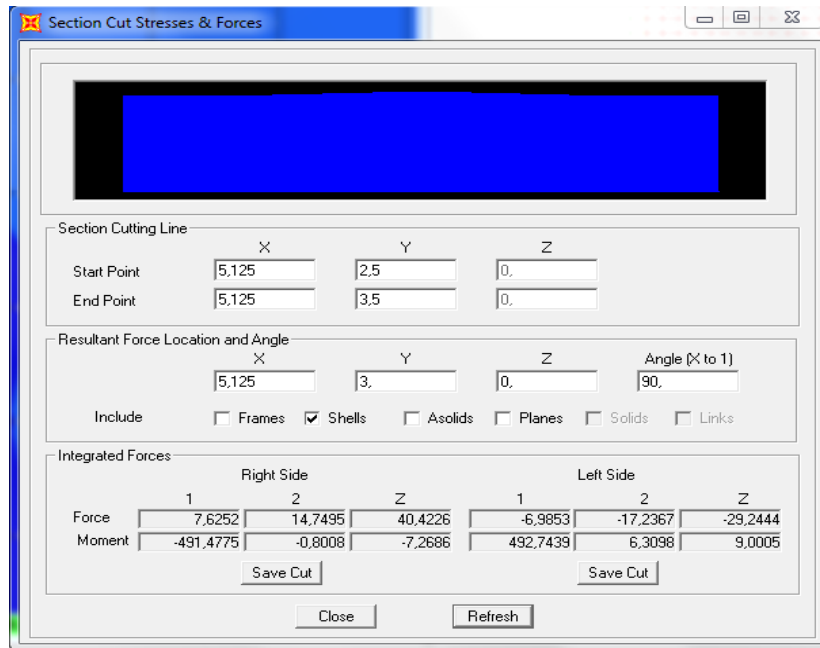


(fonte: elaborado pelo autor)

Para se obter o diagrama de momento fletor longitudinal a partir desta distribuição acima, fez dois cortes transversais. O objetivo dos cortes é fornecer a resultante de momentos que atua sobre um elemento de um metro de largura, já que as lajes serão fabricadas com seção de um metro. Adotou-se como critério fazer um corte na seção mais carregada, isso a favor da segurança e de forma conservadora. Os cortes e a resultante da solicitação são apresentados nas figuras 44 e 45.

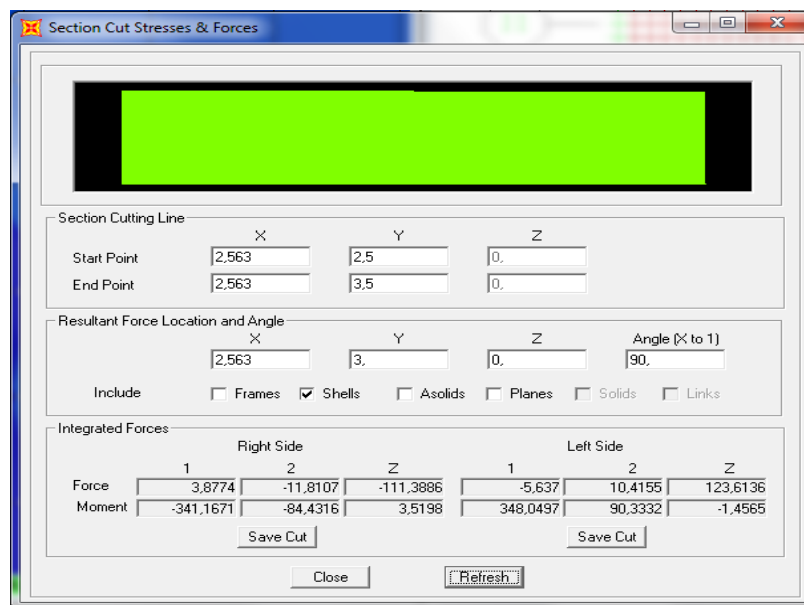
No caso do esforço cortante máximo, tem-se que para um metro de seção a ordem de grandeza é de 215kN. A combinação que gera maior esforço cortante é a combinação 4. A distribuição do esforço cortante na estrutura pode ser observada na figura 46.

Figura 44 – Corte no centro do vão – combinação 3



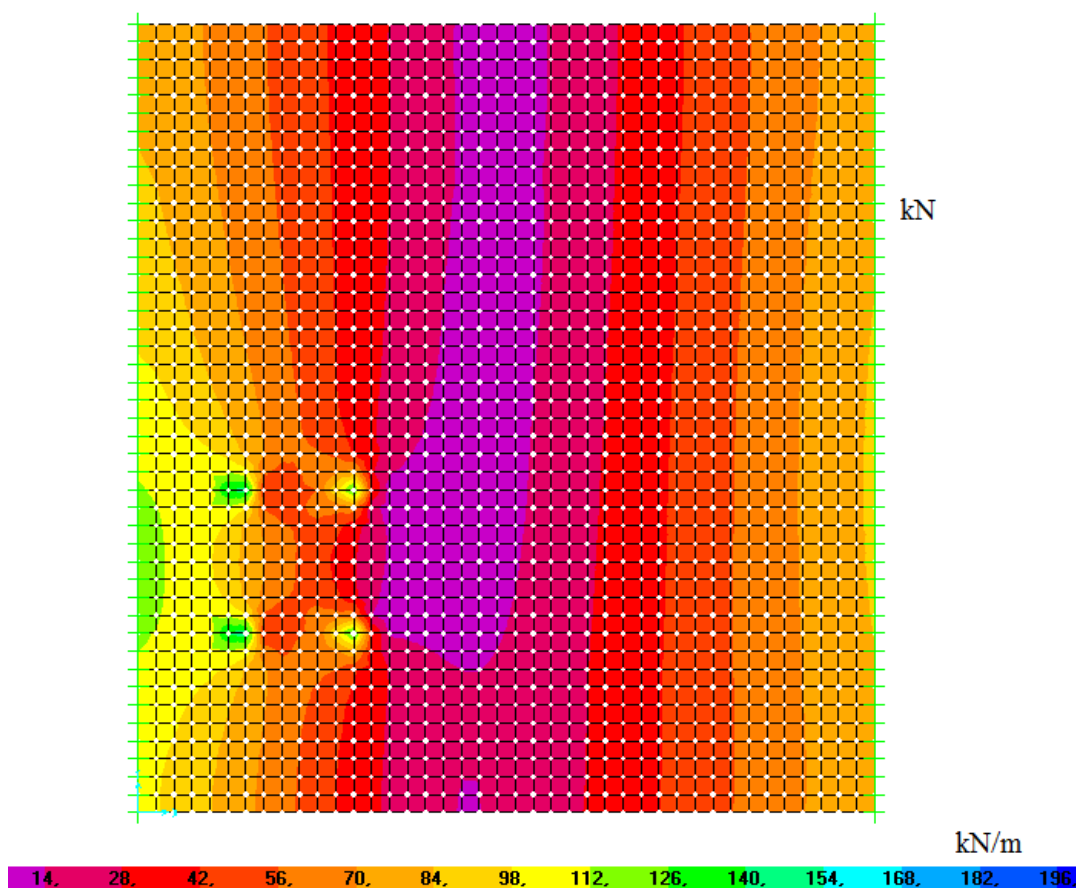
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Corte no quarto de vão – combinação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 46 – Esforço cortante máximo – combinação 4



(fonte: elaborado pelo autor)

Assim com as solicitações características definidas iniciou-se o dimensionamento da armadura ativa e passiva para as lajes. No caso da protensão se optou por pré-tensão aderente. As cordoalhas são protendidas antes da concretagem da laje e liberadas após o concreto adquirir uma resistência mínima, definida como sendo 80% do f_{ck} neste projeto. Pode-se observar estes limites na tabela 15.

Tabela 15 – Resistência do concreto

f_{ckj} (MPa)	f_{ck} (MPa)
32	40

(fonte: elaborado pelo autor)

Os limites de tensão adotados no cálculo dos limites da força de protensão são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Limites de tensão no concreto

t=to		t=t inf	
σ_{cc} (kN/cm ²)	σ_{ct} (kN/cm ²)	σ_{cc} (kN/cm ²)	σ_{ct} (kN/cm ²)
2,24	0,36	2,00	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

As propriedades geométricas da seção são apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades da peça

t=to		t=t inf	
Ac (cm ²)	W (cm ³)	Ac (cm ²)	W (cm ³)
3200,00	17066,70	4000,00	26666,70

(fonte: elaborado pelo autor)

A força de protensão foi definida baseada nas seguintes premissas:

- o rendimento da força de protensão no tempo inicial é de 95%;
- o rendimento da força de protensão no tempo final é de 85%;
- os limites da força de protensão são calculados no ELS.

Como a carga permanente corresponde a menos que 60% da carga total, definiu-se que a protensão irá absorver 60% da carga total. O momento devido à carga permanente é igual a $M_g = 125$ kNm e o momento devido à carga total é igual a $M = 392$ kNm. Com isso fez-se os cálculos e definiu-se os limites da força de protensão que estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Limites da força de protensão

Po max (kN)	Po min (kN)
4004,00	1977,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, usando uma cordoalha de diâmetro 12.7mm, com força de protensão inicial de $P_o = 150$ kN, deve-se de ter 14 cordoalhas, o que corresponde a uma área de aço de protensão de $A_p=13.81\text{cm}^2$. Com esse número de cordoalhas fez-se um cálculo rápido para a verificação das perdas iniciais e finais, definindo assim uma força de protensão efetiva e um momento de protensão efetivo com os valores apresentados na tabela 19.

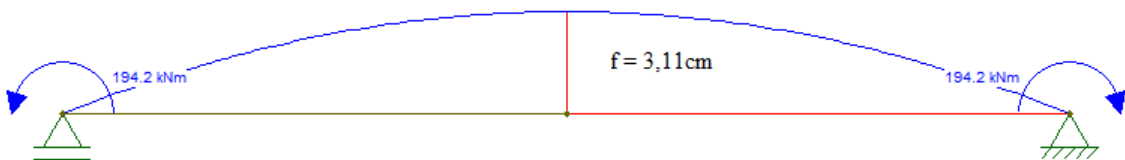
Tabela 19 – Esforços devido a protensão

N_p (kN)	M_p (kNm)
1618,40	194,20

(fonte: elaborado pelo autor)

Porém como a peça está submetida apenas ao peso próprio no ato da protensão, uma verificação da flecha devida aos esforços de protensão se faz necessária. Criou-se um modelo simplificado no FTOOL, e se aplicou o momento de protensão para definir a flecha inicial. A figura 47 apresenta este modelo.

Figura 47 – Flecha devido a protensão



(fonte: elaborado pelo autor)

A flecha que surge no ato de protensão é menor que o limite estabelecido pelo NBR9062/2006, porém é possível que esta flecha chegue a dobrar o seu valor até o momento da montagem final da estrutura, ultrapassando assim o limite máximo estabelecido pela norma citada. Com isso se reduziu a armadura de protensão a 10 cordoalhas de 12.7mm, o que implica em uma área de protensão $A_p = 9,87 \text{ cm}^2$.

A verificação do rendimento inicial da força de protensão é apresentada na tabela 20.

Tabela 20 – Verificação do rendimento inicial

σ_{po} (kN/cm ²)	K_{po}	σ_p (kN/cm ²)	%
150,00	0,04	146,20	96

(fonte: elaborado pelo autor)

Com isso a hipótese do rendimento inicial de 95% foi uma boa aproximação. Com o valor da tensão no aço de protensão, após as perdas iniciais, fez-se o cálculo das perdas progressivas. Os dados definidos para este projeto e utilizados no cálculo das perdas progressivas são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Cálculo das perdas progressivas

t_o (dias)	15
t_{inf} (dias)	10000
f_{ckj} (MPa)	32
f_{ck} (MPa)	40
$\varphi(t, t_o)$	3,03
$\chi(t, t_o)$	0,073
$\epsilon_{cs}(t, t_o)$	-0,00039
$\Delta\sigma_p$ (kN/cm ²)	-26,70

(fonte: elaborado pelo autor)

O coeficiente de fluência e a retração no concreto foram calculados conforme o Anexo A da NBR 6118/2014. Já o coeficiente de fluência do aço de protensão CP-190RB, foi calculado pela fórmula 8.

$$\chi_{(t,t_o)} = - \ln (1 - \psi_{(t,t_o)}) \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

χ = coeficiente de fluência do aço;

$\Psi_{(t,t_0)}$ = coeficiente de relaxação.

Assim mensuradas as perdas progressivas tem-se a tensão efetiva no aço de protensão. A soma das perdas iniciais e progressivas fica em torno dos 21% do valor da tensão inicial. A tabela 22 apresenta a tensão efetiva no aço de protensão.

Tabela 22 – Tensão efetiva no aço de protensão

σ_p (kN/cm ²)	119,50
-------------------------------------	--------

(fonte: elaborado pelo autor)

Os esforços efetivos que irão atuar sobre a peça são dados pela tabela 23.

Tabela 23 – Esforços efetivos da protensão

N_p (kN)	M_p (kNm)
1179,00	141,50

(fonte: elaborado pelo autor)

Novamente a verificação da flecha foi realizada chegando a um valor de $f = 2,2$ cm. Como o limite para um vão de 10,25m é de $f_{adm} = 3,41$ cm, pode-se considerar que a peça está adequada até sua montagem final. Existem outras formas de contornar este limite, uma delas seria a protensão por etapas, sendo que parte das cordoalhas seria protendida mais tarde, porém estas soluções não são abordadas neste trabalho. O critério adotado para contornar tal situação foi diminuir o aço de protensão e aumentar a armadura passiva.

A armadura passiva foi dimensionada para o estágio 3, onde se considera a seção fissurada e válida a hipótese das seções planas. Para a o momento total de cálculo e com uma área de aço de protensão de $A_p = 9,87$ cm² se realizou os cálculos considerando a peça trabalhando no domínio 3, armadura simples. O resumo do cálculo da armadura passiva é apresentado na tabela 24.

Tabela 24 – Dados do dimensionamento da armadura passiva

Md (kNm)	Ap (cm ²)	fpyd (kN/cm ²)	ds (cm)	dp (cm)	bw (cm)	x (cm)	As (cm ²)
688,80	9,87	140,00	35	32	100	12,5	24,22

(fonte: elaborado pelo autor)

A altura da linha neutra esta dentro do limite dos domínios 2 e 3, estabelecidos pelo NBR 6118/2007. As deformações foram verificadas e tanto o aço ativo quanto o passivo escoaram o que possibilita o uso da tensão de escoamento para ambos os aços.

Os módulos pré-fabricados pesam 8200 kg e com isso necessitam 4 alças padrão de içamento, cada uma delas suporta 2200 kg e estão dispostas a 50cm do extremo da peça. As verificações que foram feitas para o transporte da peça, e içamento, tem como modelo estrutural a peça apoiada em dois pontos e a ação do peso próprio. Segundo a NBR9062/2006, deve-se majorar a carga com coeficientes fornecidos para cada caso específico. Realizando-se os cálculos verificou-se que a armadura mínima, $A_{smin}=5,73\text{cm}^2$, para o momento fletor negativo atuante nos apoios é suficiente.

A verificação ao esforço cortante, para o valor máximo de $V_k = 215 \text{ kN}$, solicita para um metro de laje um $A_{sw} = 14,04\text{cm}^2$. E para o caso da verificação da armadura de fretagem, com $N=1500 \text{ kN}$, tem se que a área necessária foi de $A_{sfret} 12,07\text{cm}^2$.

As bitolas utilizadas, a solução adotada para cada armadura necessária, os detalhes de encontro das lajes são apresentadas no apêndice E.

6.3 LAJES DO PASSEIO

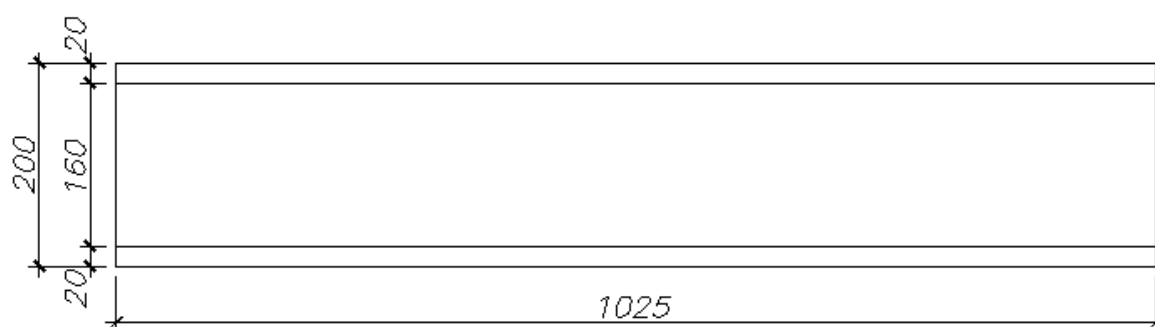
O passeio teve uma solução diferenciada das demais lajes, adotada devido a sua geometria tubular, como se pode observar no apêndice C. Este foi dividido em duas partes uma inferior e uma superior. No passeio inferior tem-se uma laje pré-fabricada protendida e no passeio superior tem-se uma laje bi apoiada moldada *in loco*.

Segundo os critérios da NRB 7188/2013, a carga que deve ser utilizada no dimensionamento do passeio é dada por $q=5\text{kN/m}^2$ mais o peso próprio. Porém o que comandou o dimensionamento da laje inferior do passeio foi a solicitação oriunda da carga do trem tipo

atuando sobre a pista. Como os carregamentos são da mesma ordem de grandeza na pista e no passeio, como se pode ver na figura 43, a armadura adotada para a laje pré-fabricada do passeio é mesma adotada para as lajes da pista, porém com esperas que servirão para solidarizar o passeio superior e inferior. O passeio inferior esta detalhado no apêndice F.

O passeio superior apresenta espessura de 18cm e é apoiado em duas vigas laterais de 20x70cm. Sua geometria é apresentada na figura 48.

Figura 48 – Passeio superior



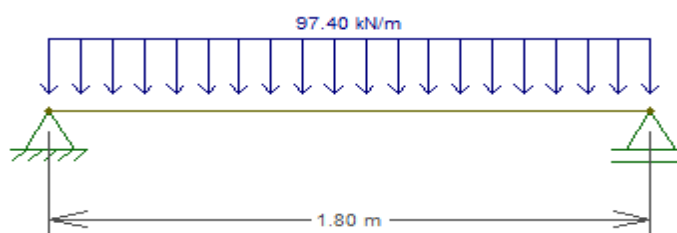
(fonte: elaborado pelo autor)

Esta estrutura configura uma laje que é armada em uma direção. Os carregamentos considerados no dimensionamento desta laje são:

- a) peso próprio = 4,5 kN/m²
- b) carregamento da NBR 7188 = 5,00 kN/m²

A carga total por metro quadrado é de 9,5 kN/m². A figura 49 apresenta o modelo de cálculo da armadura principal.

Figura 49 – Modelo de cálculo As principal



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 25 apresenta o resumo dos dados para o cálculo da armadura principal e a armadura de distribuição que neste caso é a metade da armadura mínima. As propriedades do concreto são as mesmas para toda a obra.

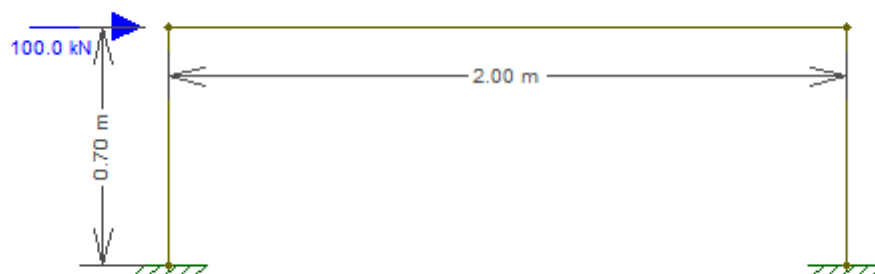
Tabela 25 – Dados de cálculo do As

Md (kNm)	d (cm)	bw (cm)	x (cm)	As (cm ²)	As dist (cm ²)
39,40	16	100	1,31	5,85	1,43

(fonte: elaborado pelo autor)

Uma das funções das vigas de apoio da laje do passeio é servir de guarda rodas. Para o caso de pontes a NBR 7188/2013, orienta que se dimensione o elemento para uma carga excepcional de 100 kN aplicada no topo do elemento, tema este abordado no capítulo 4. O modelo resistente para este caso e dado pela figura 50.

Figura 50 – Modelo de cálculo guarda rodas



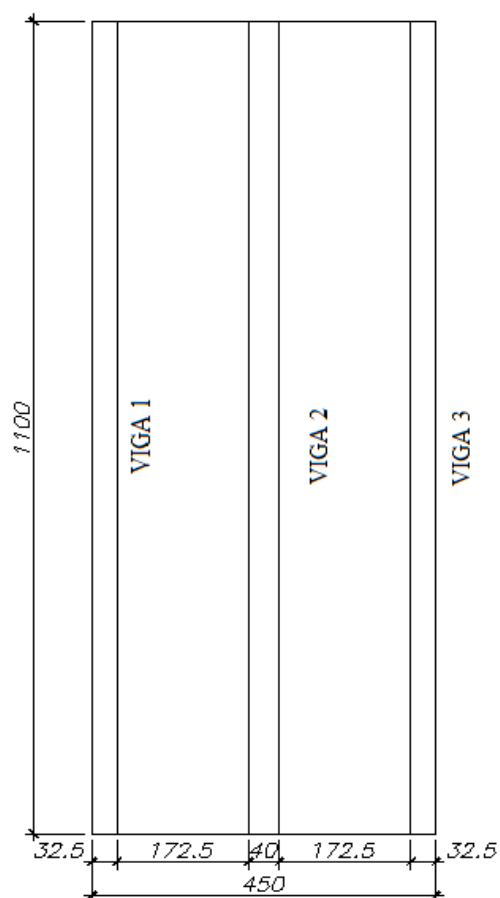
(fonte: elaborado pelo autor)

Com esse modelo, verificou-se que armadura transversal fica igual a 6,07cm²/m. O detalhamento destes elementos encontra-se no apêndice G.

6.4 LAJE CENTRAL

A laje central será moldada *in loco*, e terá uma espessura de $h = 20$ cm. Ela será apoiada nas vigas transversais, tendo assim um vão entre vigas 1,70m, e configurando uma laje armada em uma direção. A geometria da laje é apresentada na figura 51.

Figura 51 – Geometria da laje central



(fonte: elaborado pelo autor)

O coeficiente de impacto vertical para a laje central é $CIV=1,39$. A carga móvel majorada pelo coeficiente é $P = 83,4$ kN, $p = 6,95$ kN/m² e $q = 4,17$ kN/m². A análise dos carregamentos sobre a laje foi realizada com um modelo feito no SAP2000. As propriedades dos materiais são as mesmas.

Para realizar se montou 4 combinações de cargas, sendo que a carga do trem tipo foi abordada com os mesmos critérios citados anteriormente. As combinações são:

- a) peso p. + trem I (centro-extremo esq.) + multidão + passeio;
- b) peso p. + trem II (centro) + multidão + passeio;
- c) peso p. + trem III (centro-extremo dir.) + multidão + passeio;
- d) peso p. + trem IV ($x=1,00$ e $y=2,50$, primeira roda) + mult. + pas.

Assim para estas combinações chegou-se a um momento máximo positivo de $M = 34$ kNm (comb.2) e um momento máximo negativo no apoio de $M = -36$ kNm (comb. 3). A distribuição de momentos é apresentada nas figuras 52 e 53. No caso de apoio central a laje

estará solidarizada a viga 2. Isso faz com que para o cálculo da armadura, frente à solicitação negativa – tração nas fibras superiores se tenha uma altura útil de $d = 76$ cm. Assim a armadura negativa é dada pela armadura mínima de $A_{smin} = 13,60$ cm²/m. E no caso da armadura de tração para o momento positivo, tem-se que o $A_s = 6,65$ cm²/m e A_s dist = 1,79cm²/m. O detalhamento da laje central é apresentado no apêndice H.

Figura 52 – Momentos combinação 2

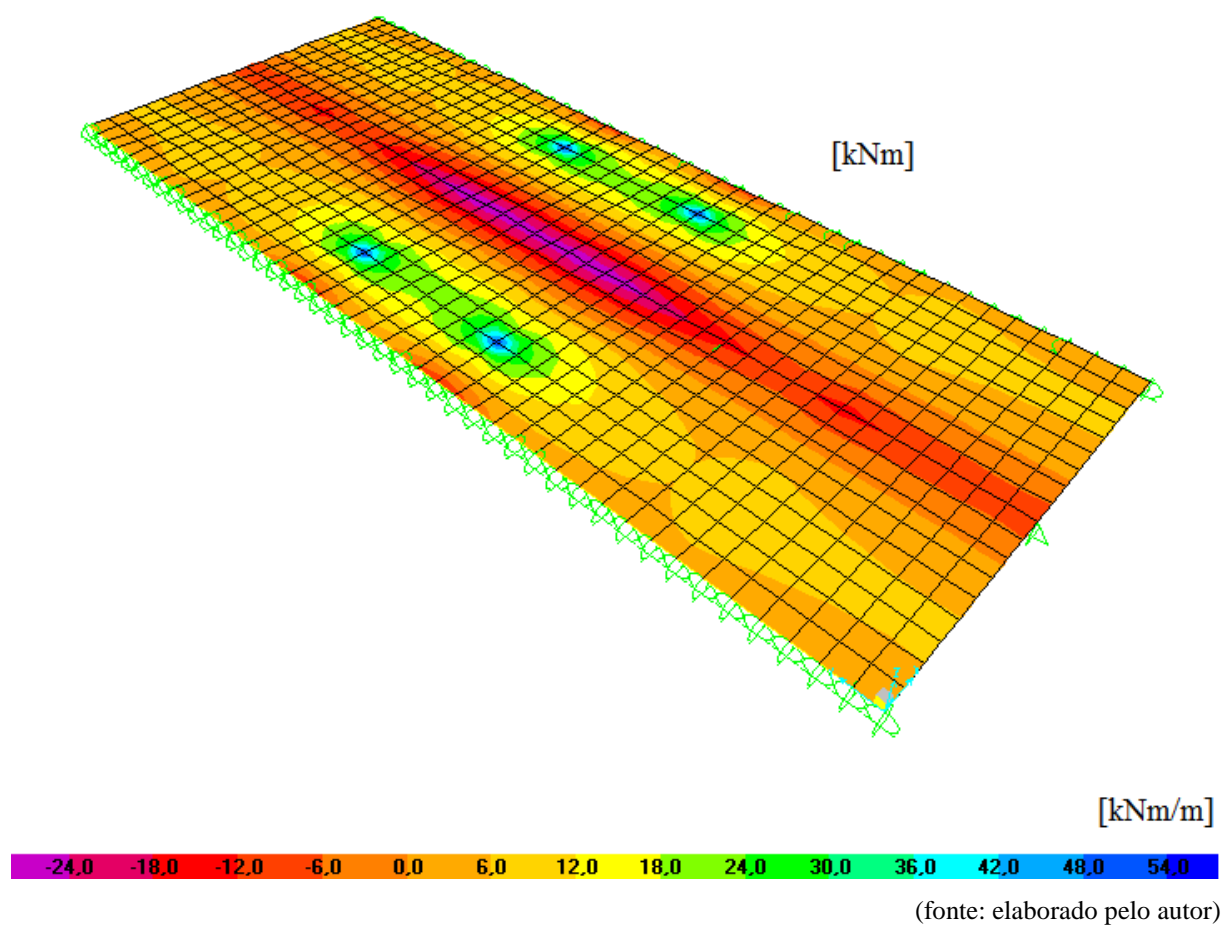
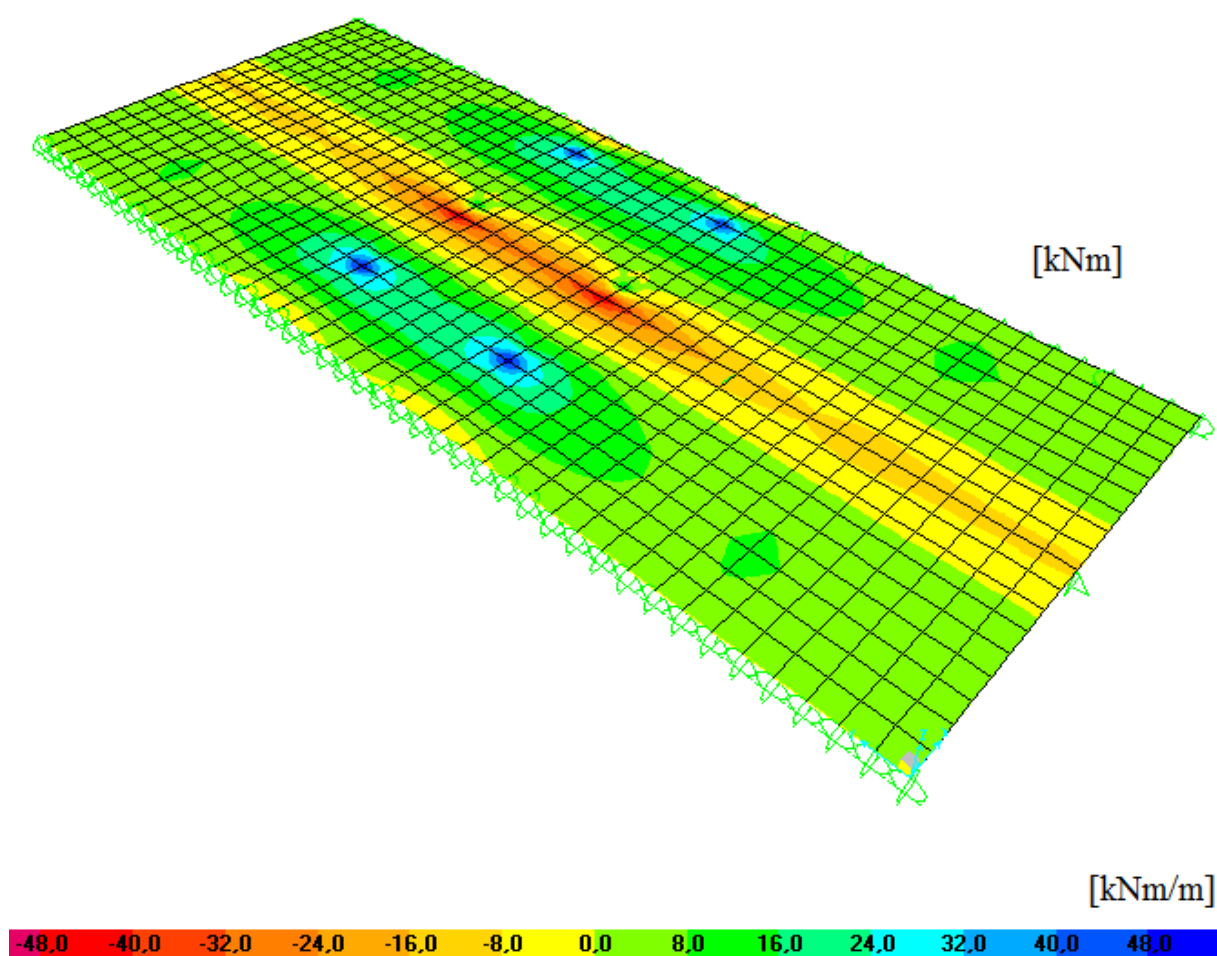


Figura 53 – Momentos combinação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

6.5 VIGAS TRANSVERSAIS

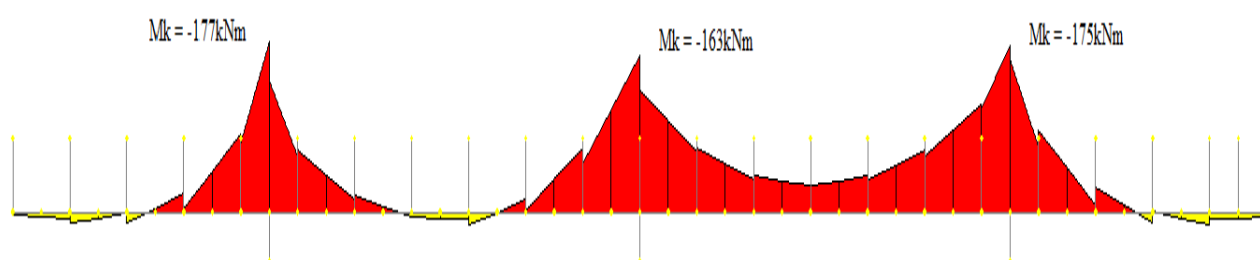
A concepção das vigas transversais foi dada com o objetivo de diminuir os vãos livres das lajes pré-fabricadas e também melhorar a rigidez transversal da estrutura, pontos estes que já forem comentados na etapa do pré-dimensionamento. Criou-se três vigas, como se pode observar no apêndice D.

6.5.1 Vigas externas V1 e V3

Os carregamentos considerados no dimensionamento das vigas são oriundos das 8 combinações realizadas para analisar o modelo tridimensional, assunto apresentado acima.

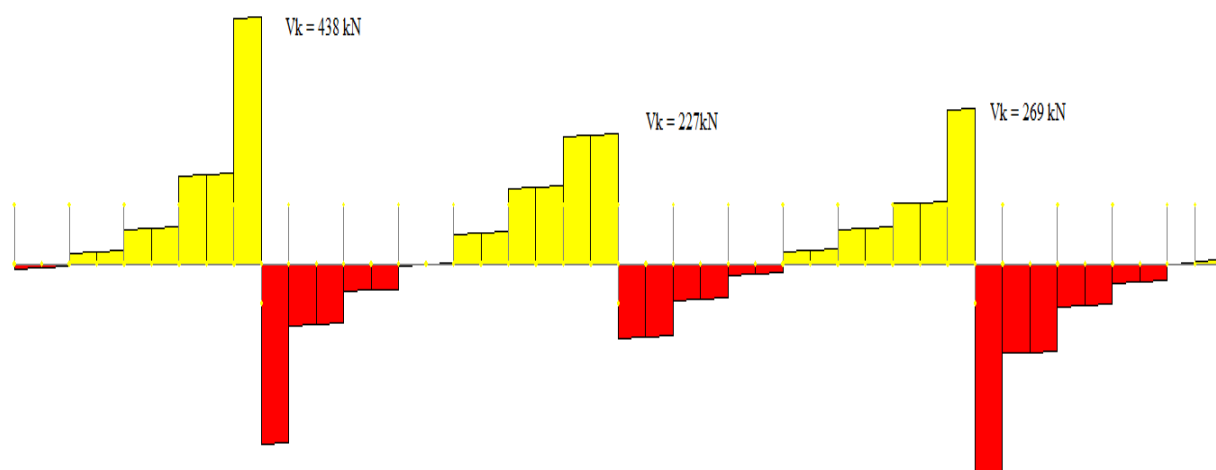
Para o caso das vigas externas, as maiores solicitações de momento fletor surgem com a combinação 1 e a combinação 3 é responsável pelo maior esforço cortante. As figuras 54 e 55 apresentam os diagramas de momento fletor e esforço cortante.

Figura 54 – Momento fletor combinação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 55 – Esforço cortante combinação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

A seção das vigas externas é apresentada na figura 20, para o dimensionamento da armadura longitudinal e transversal, considerou-se uma seção retangular com base de 32,5cm e altura de 81cm, essa altura vem da soma dos 20cm da laje que será ligada a viga pela armadura transversal. Assim a área de aço longitudinal é $A_s = 15,62 \text{ cm}^2$. A armadura transversal

necessária é dada por $A_{sw} = 12,11\text{cm}^2$ para um metro de viga e a armadura mínima $A_{sw\ min} = 4,56\text{cm}^2$.

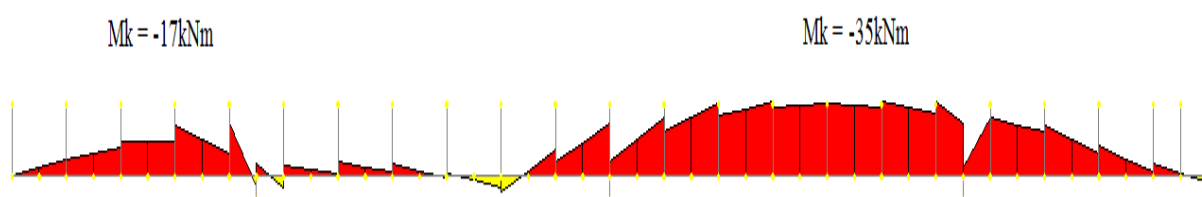
Estas vigas servirão de apoio para a laje pré-fabricada. Com isso criou-se um dente *gerber* na viga. Este apoio é um console curto e foi dimensionado para uma reação de 120kN. Como a reação entra no console com uma excentricidade em relação ao eixo geométrico da viga ocorre uma torção da ordem de $T = 19\text{kNm}$. Isso gera um acréscimo de armadura longitudinal e transversal, já definidas. O acréscimo na armadura transversal é de $A_{sl} = 2,40\text{cm}^2$ e $A_{90} = 2,38\text{cm}^2/\text{m}$.

O detalhamento das vigas transversais e suas armaduras são apresentados no apêndice J.

6.5.2 Viga central V2

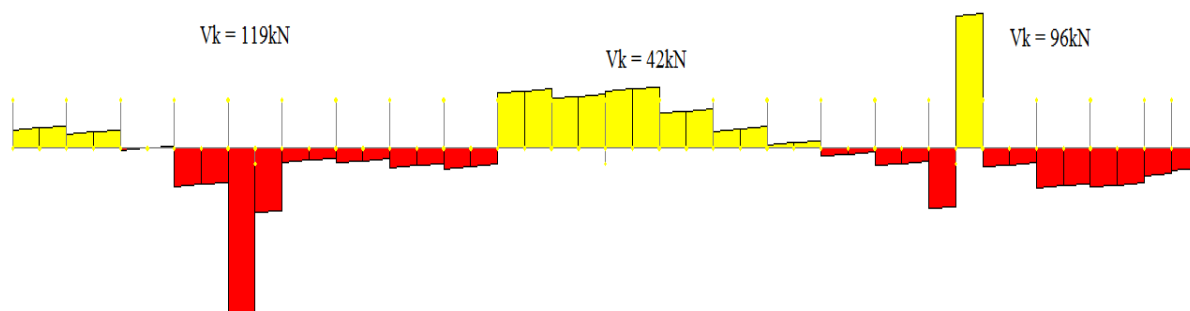
No caso da viga central não se tem a necessidade de apoiar a laje em um dente *gerber*. Sendo que seu dimensionamento será dado apenas à flexão e esforço cortante. No caso desta viga a combinação que gera as maiores solicitações é a combinação 2, apresentadas nas figuras 56 e 57.

Figura 56 – Momento fletor combinação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 57 – Esforço cortante combinação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

Com a seção da viga V1 sendo de 40cm de base e 80cm de altura, já que a armadura transversal da viga irá entrar na laje, fez-se os cálculos das áreas de aço necessárias frente as solicitações atuantes.

A armadura longitudinal para flexão é dada pela armadura mínima, já que a peça tem grande capacidade resistente. A área de aço mínima é $A_{smin} = 5,73\text{cm}^2$. Com relação ao esforço cortante a armadura necessária é dada por $A_{sw}=5,61\text{cm}^2$.

Com estas grandezas detalhou-se a armadura necessária e as seções da viga central no apêndice K.

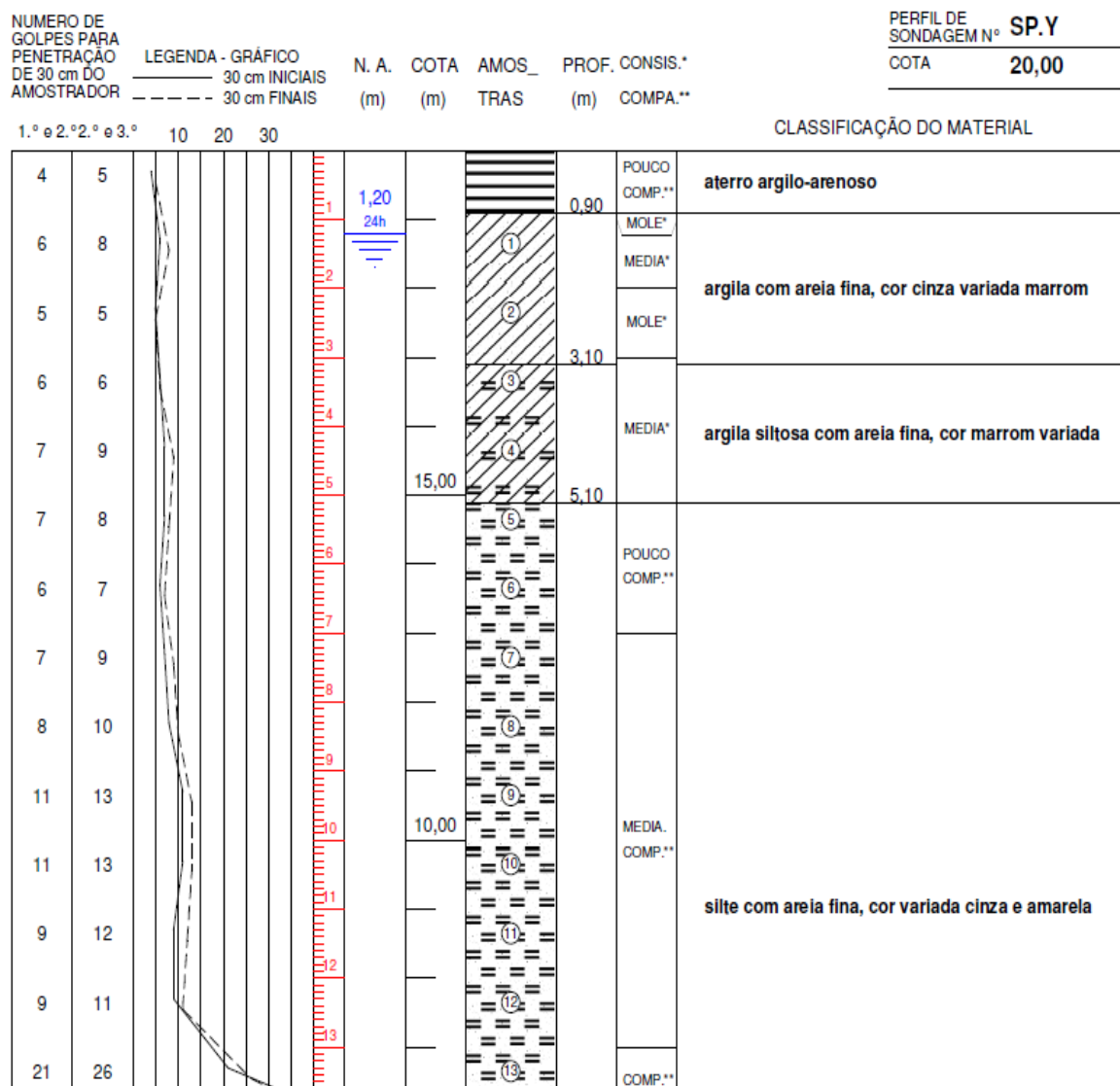
6.6 FUNDAÇÃO

A fundação como um todo será constituída por uma parede de contenção, engastada num bloco estrutural, e este apoiado sobre estacas verticais e inclinadas. As estacas inclinadas foram projetadas com o objetivo de absorver a solicitação horizontal gerada na base do arco.

No dimensionamento desta estrutura como um todo, considerou-se para fins de cálculo, a região em torno de um arco apenas, o que fornece um bloco de 4,5m de comprimento. Este modelo pode ser visto abaixo..

As características do solo, bem como suas propriedades, foram definidas a partir da sondagem obtida e apresentada na figura 58. As propriedades do solo são apresentadas pela tabela 26. É importante ressaltar que o nível d'água é alto. Nos cálculos ele foi considerado na superfície e não se previu um sistema de drenagem.

Figura 58 – Sondagem



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 26 – Propriedades do solo

γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	E _s (kN/m ²)	ϕ (°)
15,00	20	4000	29

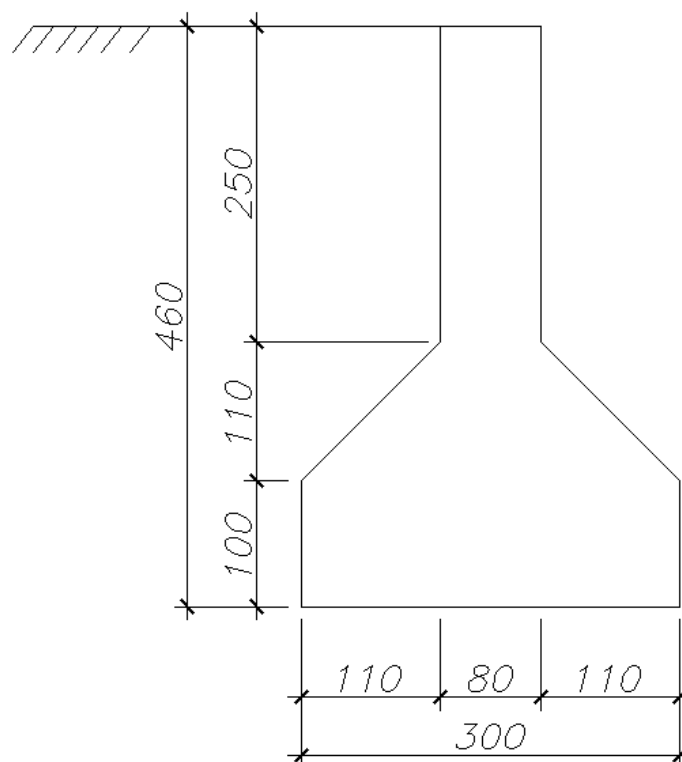
(fonte: elaborado pelo autor)

A geometria da estrutura do encontro é apresentada na figura 59.

A parede de contenção com 80 cm de largura foi dimensionada para flexão que ocorrerá devido ao empuxo ativo do solo (não se considerou a coesão do solo no cálculo da tensão

horizontal efetiva), a pressão hidrostática e uma sobrecarga distribuída de 25 kN/m, atuando na superfície. Os dados para o dimensionamento estão apresentados na tabela 27.

Figura 59 – Seção transversal do encontro



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 27 – Dimensionamento da parede de contenção

Md (kNm)	d (cm)	fck (MPa)	bw (cm)	x (cm)	As (cm ²)	As dist (cm ²)
708,00	76	30	100	1,31	22,3	6,8

(fonte: elaborado pelo autor)

Esta armadura de flexão será disposta no lado em que o solo é contido. Na outra face adotou-se armadura mínima, tendo em vista que a parede jamais irá em direção ao solo. A armadura mínima utilizada é de $A_s=13,60 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Se realizou também as verificações quanto ao tombamento da estrutura e o deslizamento. O que se precisa ter em mente é que estas verificações se fazem necessárias para uma fase curta

da obra. Trata-se do período de montagem da estrutura de contenção. Pois ao executarem-se os arcos e as lajes, estes elementos garantirão a estabilidade da estrutura de contenção.

Na verificação do tombamento se calculou o empuxo ativo considerando a coesão do solo, uma carga distribuída de 25 kN/m, atuando na superfície e a pressão hidrostática. Na contribuição da estabilidade da contenção se considerou o peso próprio da estrutura. O resumo dos dados para a verificação são apresentados na tabela 28.

Tabela 28 – Verificação ao tombamento

Mat (kNm)	Mres (kNm)	Fator Segurança
190,00	265,50	1,42

(fonte: elaborado pelo autor)

O fator de segurança mínimo para considerar a estrutura estável é de $F_t = 2,00$. Porém neste cálculo não se considerou o peso do solo sobre o pé da estrutura e o peso das estacas. Esse elementos são suficientes para fazer com que o fator de segurança esteja acima de 2,00. Porém como esta fase de projeto é temporária se considerou o fator menor que 2,00 como adequado.

Na verificação do deslizamento considerou-se o peso de três estacas com 10 metros de comprimento e de 50 cm de diâmetro. Fez se o cálculo do peso do solo sobre o pé da estrutura de contenção e somou-se ao peso próprio da estrutura. Outro parâmetro adotado foi a consideração da coesão do solo. A tabela 29 apresenta o resumo dos dados da verificação.

Tabela 29 – Verificação ao deslizamento

Tres (kN)	Rh (kN)	Fator Segurança
124,00	220,00	1,78

(fonte: elaborado pelo autor)

Neste caso o fator de segurança deve ser maior que 1,50. Novamente, por se tratar de uma fase temporária, sabe-se que este fator irá aumentar assim que a laje e os arcos forem executados, porém, já nesta fase, o fator já esta maior do que o mínimo exigido.

O arco será engastado na estrutura de encontro, através de um cálice com 1,30 m de embutimento. Devido à geometria do elemento, este cálice pode ser dimensionado com uma viga em balanço. As solicitações atuantes, no engaste do arco com a fundação, para todas as combinações, são apresentadas na tabela 30.

Tabela 30 – Solicitações no engaste do arco

REAÇÕES NAS FUNDAÇÕES				
Nó	Caso	Hk	Vk	My
Texto	Texto	KN	KN	KN-m
420	COMB1	2076,30	706,50	455,36
512	COMB1	-2162,32	707,69	-572,86
513	COMB1	1906,19	650,07	420,21
605	COMB1	-1939,73	639,56	-505,05
1	COMB1	1882,51	639,75	424,53
93	COMB1	-1897,94	629,76	-481,50
420	COMB2	2117,70	707,13	509,56
512	COMB2	-2244,62	743,05	-560,80
513	COMB2	1921,26	644,79	458,77
605	COMB2	-2010,94	669,68	-496,68
1	COMB2	1874,19	630,39	445,40
93	COMB2	-1927,73	644,87	-469,37
420	COMB3	2169,37	709,92	574,68
512	COMB3	-2082,51	708,28	-457,59
513	COMB3	1943,95	640,90	506,10
605	COMB3	-1912,02	651,78	-422,23
1	COMB3	1899,46	630,26	481,81
93	COMB3	-1883,25	639,87	-425,10
420	COMB4	1742,50	589,37	408,36
512	COMB4	-1824,31	612,77	-440,49
513	COMB4	1687,84	571,36	396,65
605	COMB4	-1732,50	583,83	-415,29
1	COMB4	1801,14	606,92	428,09
93	COMB4	-1809,66	608,89	-433,09
420	COMB5	2119,12	719,91	467,11
512	COMB5	-2204,51	720,91	-584,40
513	COMB5	1906,17	650,06	420,21
605	COMB5	-1939,70	639,55	-505,05

continua

continuação

1	COMB5	1839,69	626,34	412,77
93	COMB5	-1855,77	616,54	-469,98
420	COMB6	2160,52	720,55	521,31
512	COMB6	-2286,81	756,26	-572,34
513	COMB6	1921,24	644,78	458,76
605	COMB6	-2010,91	669,67	-496,68
1	COMB6	1831,37	616,98	433,64
93	COMB6	-1885,55	631,66	-457,85
420	COMB7	2212,19	723,33	586,42
512	COMB7	-2124,70	721,50	-469,13
513	COMB7	1943,94	640,90	506,09
605	COMB7	-1911,99	651,77	-422,22
1	COMB7	1856,64	616,85	470,05
93	COMB7	-1841,08	626,65	-413,57
420	COMB8	1785,32	602,78	420,10
512	COMB8	-1866,50	625,99	-452,03
513	COMB8	1687,82	571,35	396,65
605	COMB8	-1732,47	583,82	-415,28
1	COMB8	1758,32	593,51	416,34
93	COMB8	-1767,49	595,68	-421,57

(fonte: elaborado pelo autor)

As maiores solicitações ocorrem no nó 420, para a combinação 7. Com estes valores se dimensionou o elemento cálice. A tabela 31 apresenta as solicitações utilizadas.

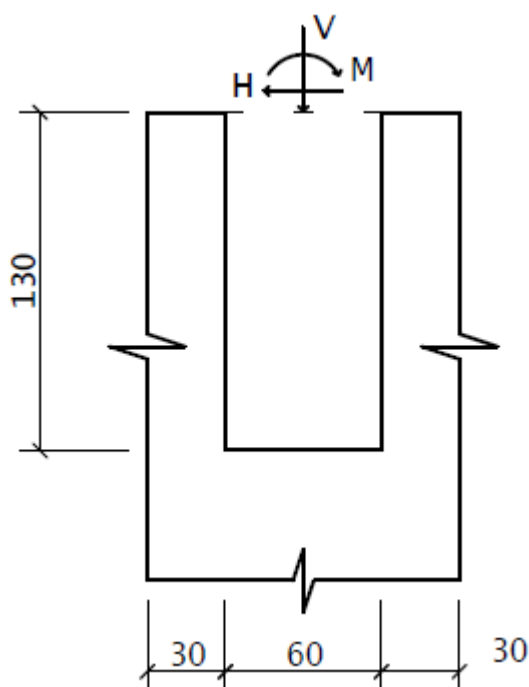
Tabela 31 – Solicitações para o dimensionamento

V (kN)	H (kN)	M (kNm)
2212,19	723,00	586,42

(fonte: elaborado pelo autor)

O modelo de cálculo do cálice é apresentado na figura 60. Este cálice encontra-se embutido no bloco de fundação. E suas paredes apresentadas são para fins de cálculo e alojamento da armadura necessária para absorção destas solicitações. É possível se considerar paredes mais espessas, mas para este projeto definiu-se uma espessura de 30cm como e se dimensionou a armadura.

Figura 60 – Cálice do arco



(fonte: elaborado pelo autor)

O esforço horizontal, definido conforme as recomendações da NBR 9062 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 17), para o caso de ação conjunta de momento fletor e esforço horizontal, bem como as características geométricas, são dados pela tabela 32.

Tabela 32 – Esforço horizontal e características

Hd (kN)	d (cm)	f_{ck} (Mpa)	l (cm)
1576,00	105	30	110

(fonte: elaborado pelo autor)

Com estas características e propriedades, definiu-se o momento atuante e a área de aço necessária para o mesmo. A tabela 33 apresenta o resumo do dimensionamento do cálice.

Tabela 33 – Dimensionamento do cálice

M (kNm)	A_s (cm ²)	A_{sw} (cm ²)
1733,6	55,6	25,36

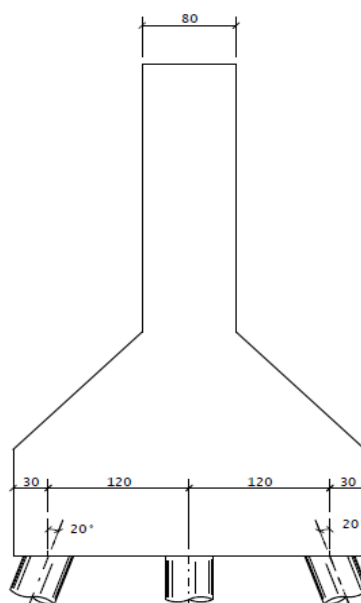
(fonte: elaborado pelo autor)

A última verificação realizada no fundo do cálice foi para o caso de punção. Considerando carga concentrada entrando direto até o fundo do cálice, temos que para o perímetro do arco de 40 x 80 cm, não há problema de punção.

No caso do dimensionamento do bloco de fundação sobre estacas, é necessário que se tenha o conhecimento da disposição das estacas no bloco. Neste projeto apenas se indicou uma disposição para as estacas e mensurou-se a solicitação atuante em cada uma delas, porém o dimensionamento das mesmas não foi contemplado.

O bloco de fundação irá se apoiar em 12 estacas pré-fabricadas com diâmetro de 40 cm. Onde tem-se 4 estacas inclinadas de 20° e 8 estacas verticais, com se pode ver na figura 61.

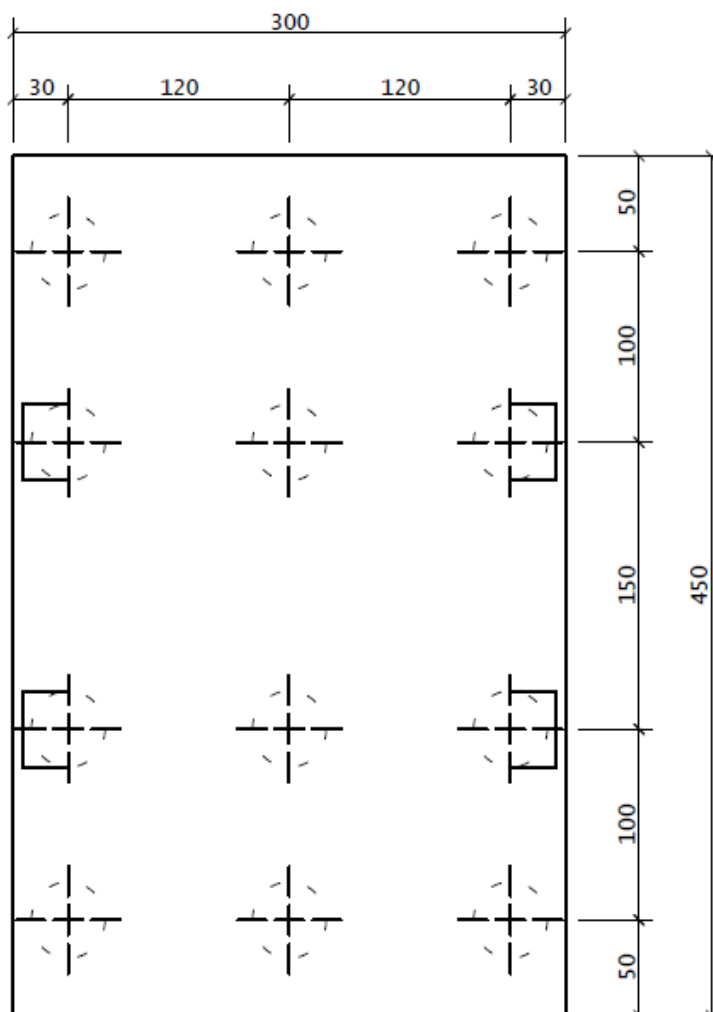
Figura 61 – Bloco sobre estacas



(fonte: elaborado pelo autor)

O método adotado para o dimensionamento do bloco foi calculá-lo para um arco, o que gera um bloco de 4,5m de comprimento por 3,0 m de largura. Como se pode ver na figura 62. Contabilizando-se as reações das lajes que entram sobre o encontro, as solicitações do arco e o peso próprio do encontro e levando-se todas as solicitações para o ponto de encontro da projeção dos eixos das estacas, as solicitações de cálculo geradas com isso são dadas pela tabela 34.

Figura 62 – Planta baixa do trecho de cálculo



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 34 – Solicitações atuantes na estrutura da fundação

V (kN)	H (kN)	M (kNm)
3354,00	723,00	1715,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Com isso se mensurou a solicitação atuante em cada estaca. A tabela 35 apresenta a força de compressão atuante nas estacas verticais e inclinadas. Isso para a linha de estacas que é comprimida, porém com estas solicitações as existirá tração nas estacas da outra face. Novamente o dimensionamento das estacas não será contemplado neste projeto.

Tabela 35 – Solicitação nas estacas

N (kN)	N (kN)
Verticais	Inclinadas
1290,00	790,00

(fonte: elaborado pelo autor)

A armadura do bloco foi dimensionada pelo método das bielas e tirantes. Considerou-se as reações nas estacas iguais a $R_e = 1290$ kN. Com isso surge no fundo do bloco uma tração igual a $T_d = 1890$ kN. A armadura necessária para tal solicitação é de $A_s = 41,5$ cm². Na outra direção a armadura é de distribuição, $A_{s\ dist} = 22,5$ cm². Temos ainda a armadura de pele que é dada por $A_{s\ pele} = 6,75$ cm².

O detalhamento das armaduras e as bitolas adotadas são apresentadas no apêndice L.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto desenvolvido neste trabalho de diplomação do curso de Engenharia Civil teve como um dos objetivos consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, assim como, ajudar o aluno a identificar as limitações atuais do mesmo.

As diversas etapas envolvidas no desenvolvimento do projeto de uma ponte em arco inferior, desde concepção estrutural a detalhamento final, requerem um conhecimento teórico sólido e uma experiência razoável na engenharia estrutural, para que possam ser vencidas com maior êxito. Este trabalho possibilitou ao estudante ser confrontado, com a necessidade de tomada de decisões e entender qual o resultado dessas decisões sobre a estrutura.

O uso de programas tanto na elaboração do modelo e análise global, como no dimensionamento e detalhamento, mostraram ao estudante a necessidade de se familiarizar com estas ferramentas e também a suma importância de ter uma base teórica sólida para que os resultados sejam interpretados e aplicados de forma correta.

A mescla de estruturas pré-fabricadas com trechos moldados no local torna o projeto mais complexo devido às diferentes etapas as quais cada elemento estará sujeito. Na análise destes quadros o aluno pôde compreender o quão fundamental é saber como a estrutura será executada, para então realizar o correto dimensionamento de cada elemento.

Os objetivos propostos no início deste trabalho foram alcançados conforme as etapas propostas foram sendo concluídas. Frente à ordem de grandeza das solicitações atuantes na estrutura em questão e tendo em vista as características de contorno do local do projeto, os resultados obtidos são considerados adequados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto e execução de pontes de concreto armado e de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2003a.
- _____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas - procedimento. Rio de Janeiro, 2003b.
- _____. **NBR 7188**: carga móvel em ponte rodoviária e passarela. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- CAMPANARI, F. A. **Teoria das estruturas**. Rio de Janeiro. Guanabara Dois S.A., 1985. v. 2.
- CLARO, A. **Caleidoscópio**. [Florianópolis]: UFSC, 2014. Ilustração de Tecnologia de Edificações I. Disponível em <http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2003-1/pontes/Fotos.htm>. Acesso em: 11 jun.2014.
- FOX, G. F. Arch Bridges. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. (Ed.). **The Bridge Engineering Handbook**. Boca Raton, Washington, D. C. CRC Press LLC, 2000, p. 456-466.
- GOOGLE MAPS. **Rua Machado de Assis, Porto Alegre, Rio Grande do Sul**. [S. l.: 2014a]. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/place/Rua+Machado+de+Assis/@-30.0526694,51.1929759,19z/data=!4m2!3m1!1s0x95197816ce8c7d9f:0xd6374c2bfeebd260>>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- _____. street view. **Rua Machado de Assis, Porto Alegre, Rio Grande do Sul**. [S. l.: 2014b]. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-30.053258,-51.193362,3a,50.4y,49.73h,82.5t/data=!3m4!1e1!3m2!1sb4zdxIxelxoeQ4oA4Ozzag!2e0>>. Acesso em: 2 jun. 2014.
- LAZZARI, P. M. **Estudo de projeto estrutural de ponte rodoviária em arco inferior em concreto armado no município de Saudades/SC**. 2008, 118 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- LEONHARDT, F. **Construções de concreto**: princípios básicos da construção de pontes de concreto. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. v. 6.
- MASON, J. **Pontes em concreto armado e protendido**: princípios do projeto e cálculos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- MATTOS, T. S. **Programa para análise de superestrutura de pontes de concreto armado e protendido**. 2001. 156 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- O'CONNOR, C. **Pontes**: superestruturas. São Paulo: Editora da USP, 1975.
- _____. **Pontes**: superestruturas. São Paulo: Editora da USP, 1976.

PFEIL, W. **Pontes em concreto armado**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.

_____. **Pontes em concreto armado**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985. v. 1.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural: estruturas isostáticas**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1977. v. 1.

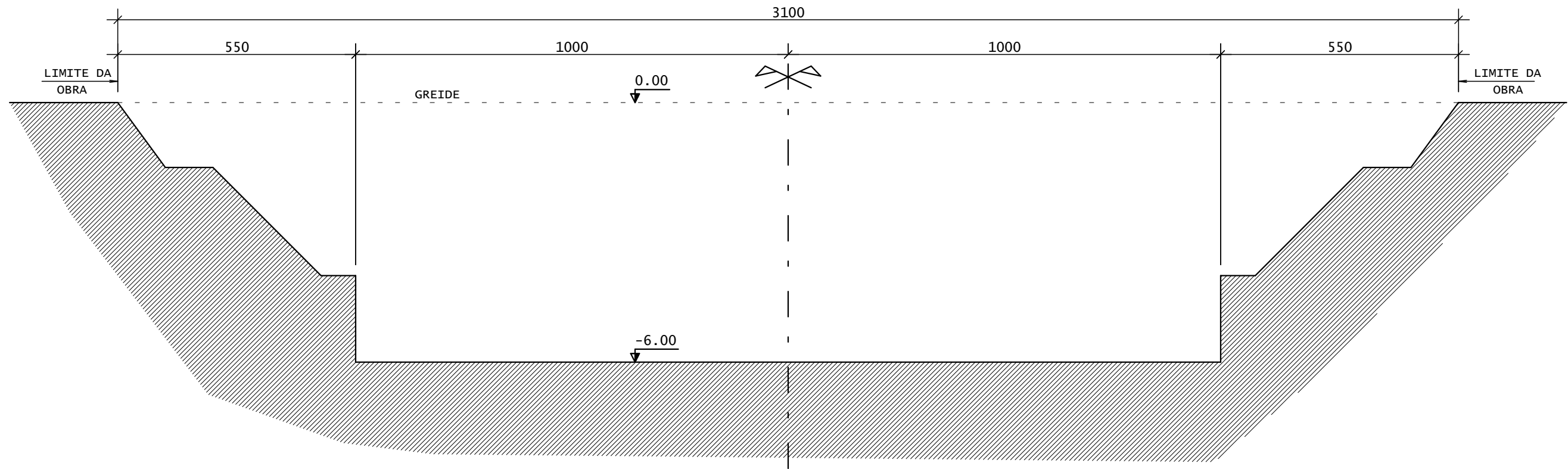
_____. **Curso de concreto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1981. v. 1.

TROITSKY, M. S. Fundamentals: Conceptual Bridge Design. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. (Ed.). **The Bridge Engineering Handbook**. Boca Raton, Washington, D. C. CRC Press LLC, 2000, p. 28-47.

APÊNDICE A – Seção transversal

SEÇÃO TRANSVERSAL

ESC. 1:100

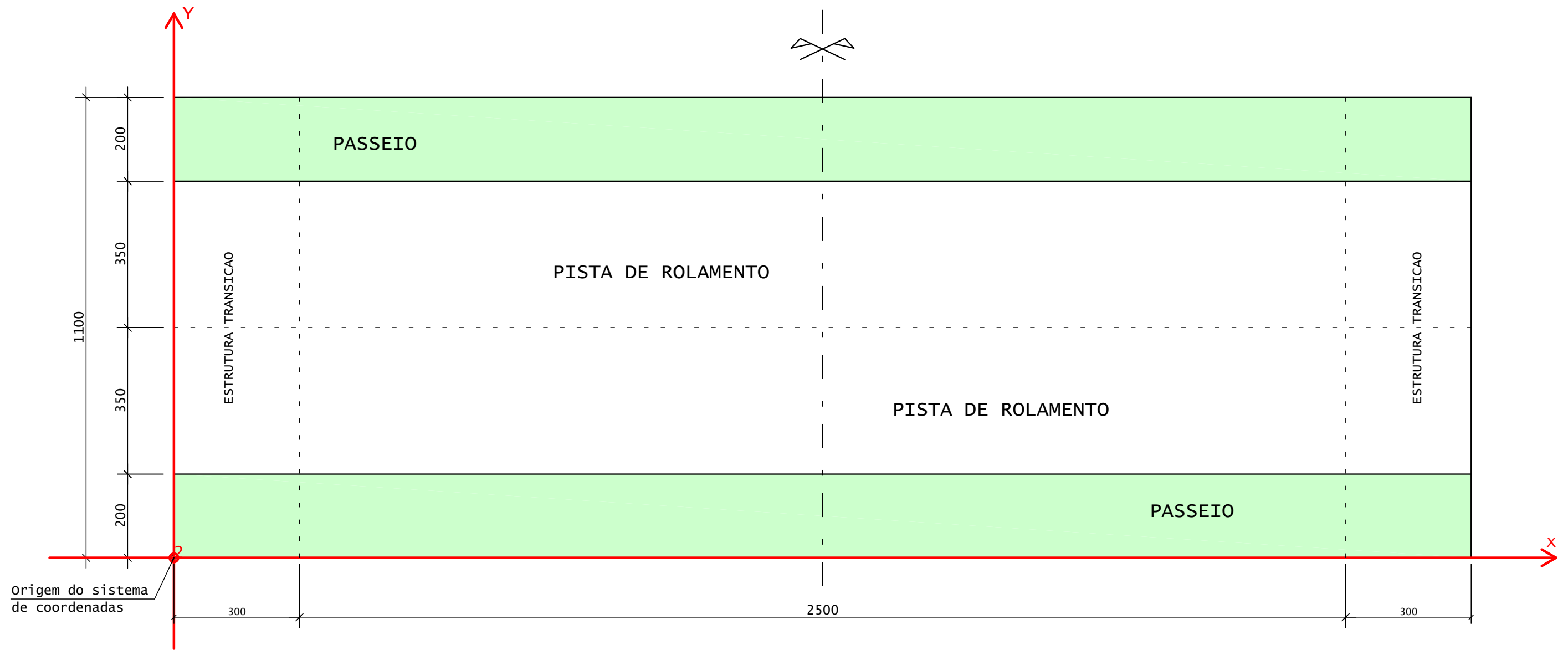


- NOTAS:
- 1 - AS UNIDADES DE MEDIDAS NAO INDICADAS ESTÃO EM CENTÍMETROS
 - 2 - AS COTAS ESTAO EM METROS

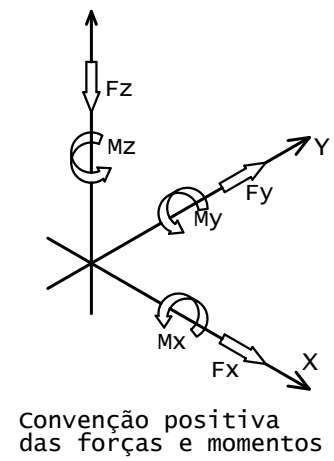
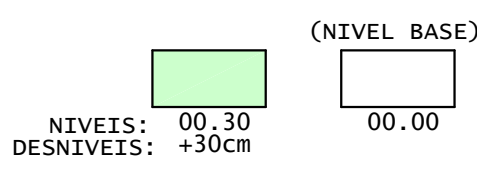
DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto		
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO- SECAO TRANSVERSAL		
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE A	0-0 1/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
1/100	---	DEZ/2014

APÊNDICE B – Planta baixa

PLANTA BAIXA
ESC. 1:100



NÍVEIS



- NOTAS:
- 1 - AS UNIDADES DE MEDIDAS NAO INDICADAS ESTAO EM CENTÍMETROS
 - 2 - AS COTAS ESTAO EM METROS

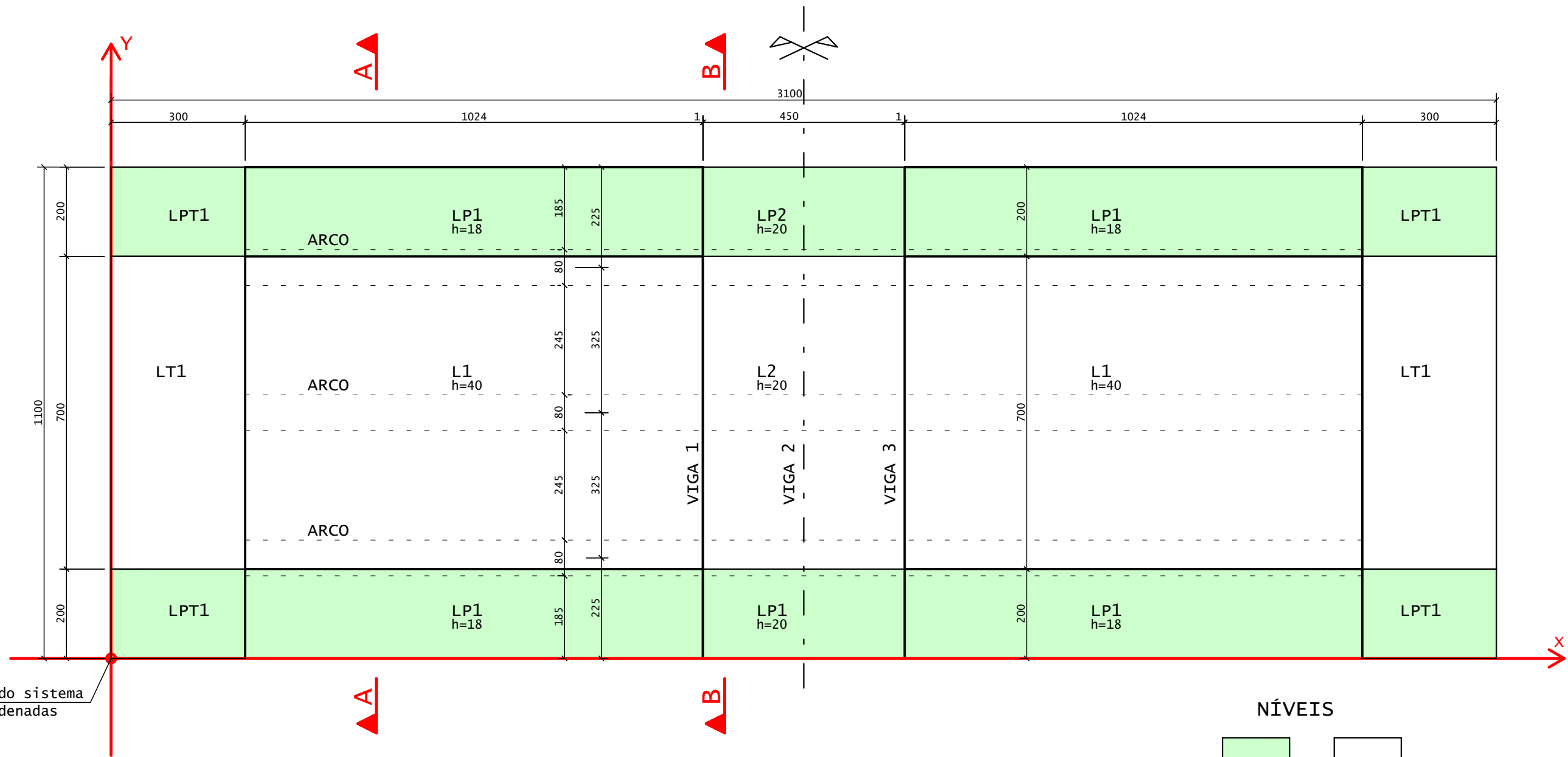


DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO- PLANTA BAIXA		
Cliente UFRGS	Numero APENDICE B	DESENHO 0-02/0
Identificacao CRISTIANO HOSS	Desenho CRISTIANO	
Escala 1/100	fck 40 MPA	Data DEZ/2014

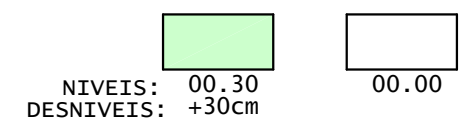
SLAB SERVICO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\Cristiano Hoss\Desktop\Ufrgs - Semestres\11 Semestre\TCC-II\Versao Final\Plantas\2_Forma.PLT 07/12/2014 22:41:29

APÊNDICE C – Planta de montagem

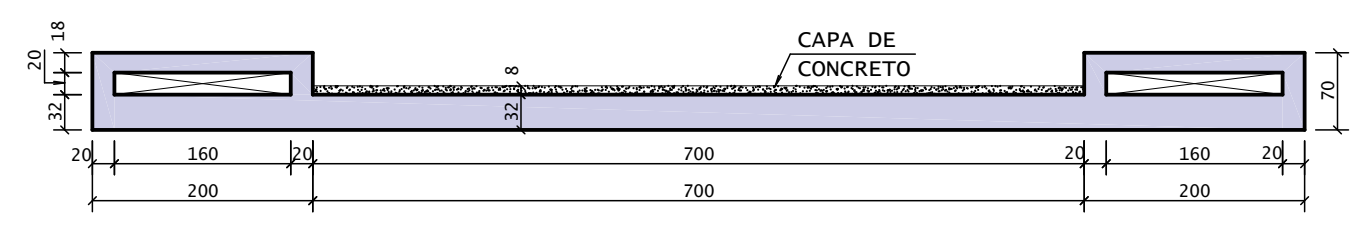
SLAB SERVIÇO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\Cristiano Hoss\Desktop\Ufrgs - Semestres\II semestre\TCC-II\Versão Final\Plantas\3_Planta Montagem.PLT 07/12/2014 22:41:14



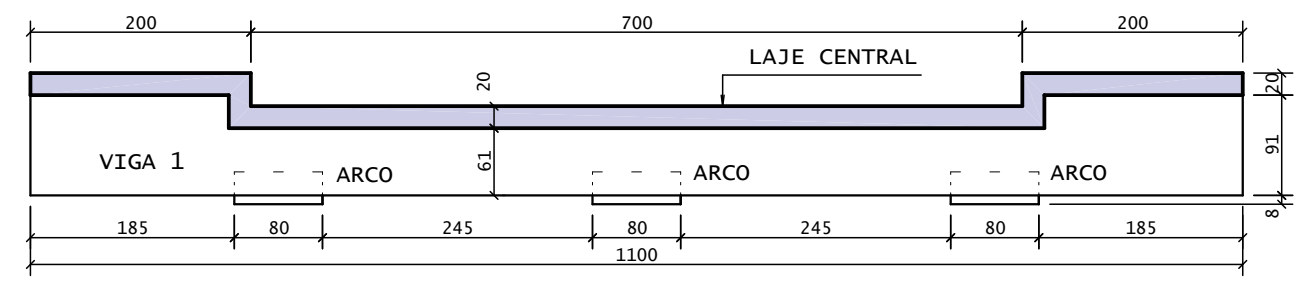
NÍVEIS



CORTE A-A
ESC. 1/75



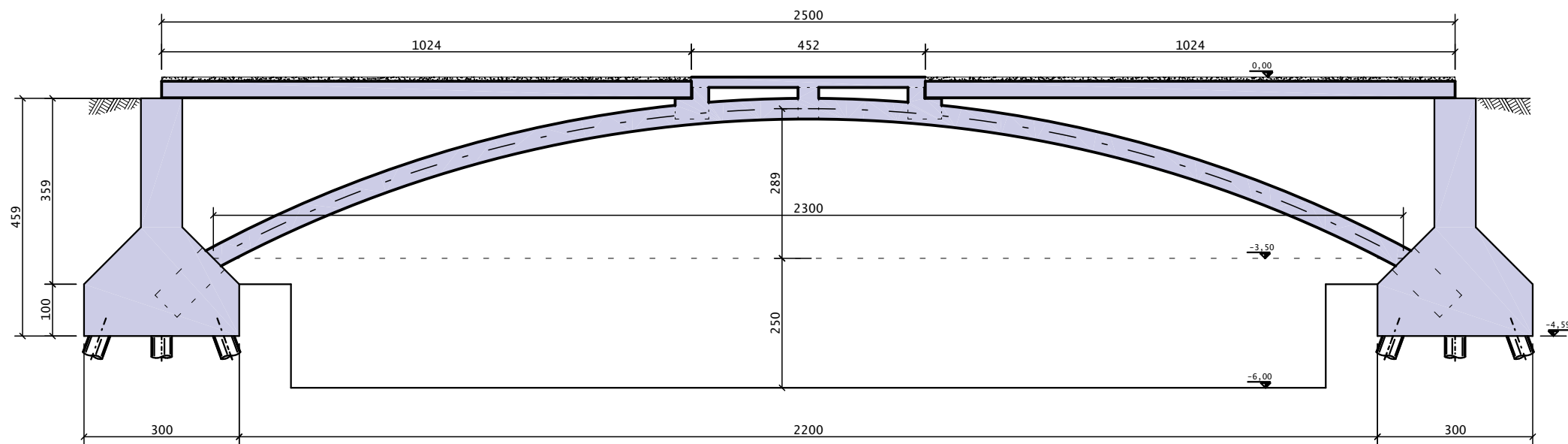
CORTE B-B
ESC. 1/75



DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto		
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO- PLANTA DE MONTAGEM		
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE C	0-03/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
1/100	40 MPa	DEZ/2014

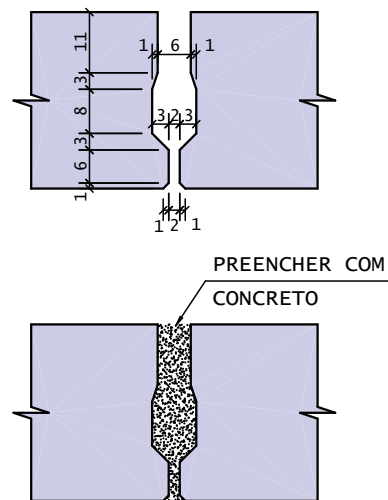
APÊNDICE D – Seção transversal da estrutura

SECAO TRANSVERSAL



DETALHE DE LIGACAO TRANSVERSAL DAS LAJES

ESC. 1/12.5



NOTAS:

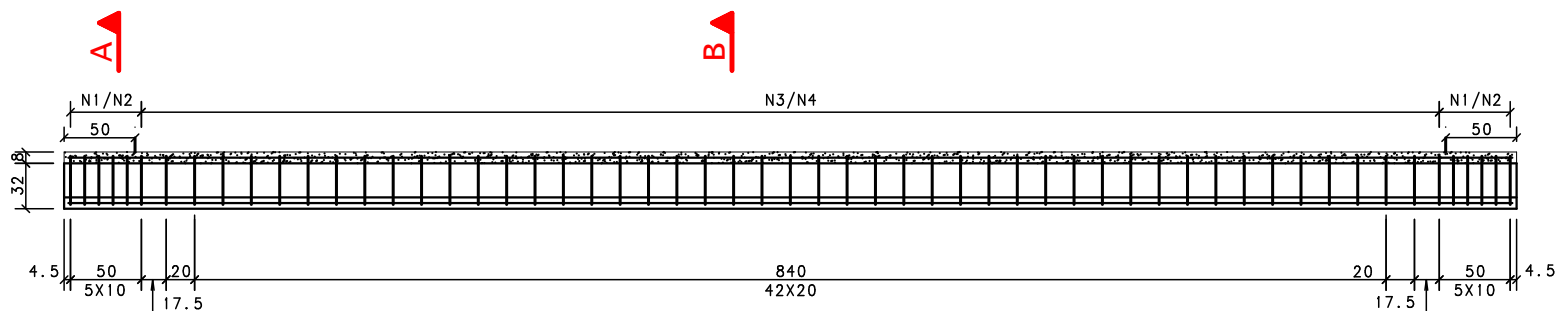
- 1 - AS UNIDADES DE MEDIDAS NAO INDICADAS ESTAO EM CENTÍMETROS
- 2 - AS COTAS ESTAO EM METROS

DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto		
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-SECAO TRANSVERSAL DA ESTRUTURA		
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE D	0-04/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
1/100	40 MPa	DEZ/2014

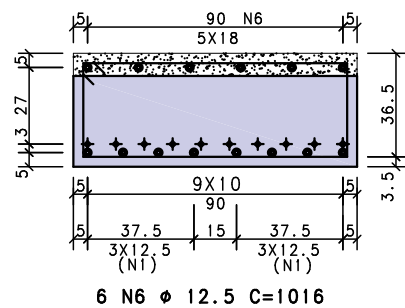
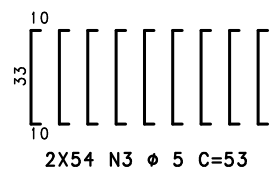
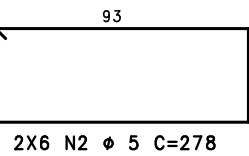
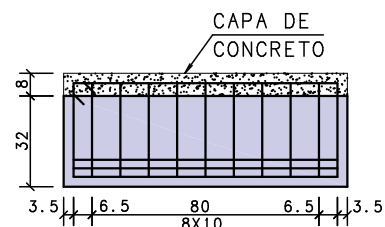
APÊNDICE E – Laje da pista protendida

LAJE PRE-MOLDADA PISTA

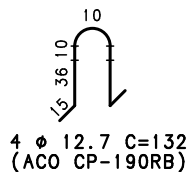
ESC.: 1/50
 Vol.: 4.09m³
 Peso: 8200kg
 Taxa und: 104.55kg/m³



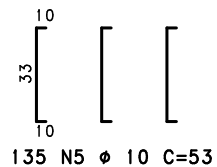
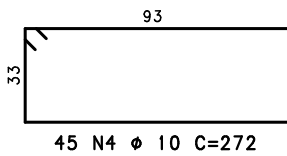
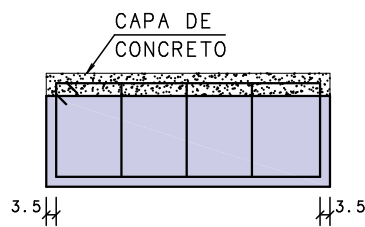
CORTE A-A
ESC.: 1/25



ALCAS DE ICAMENTO

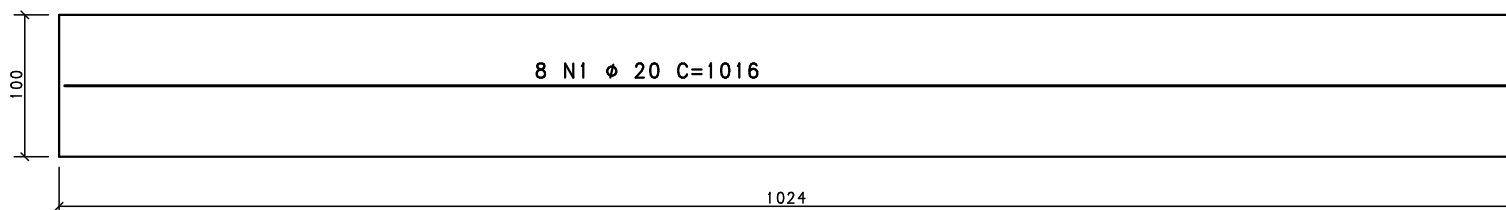


CORTE B-B
ESC.: 1/25



ARMADURA PASSIVA-PLANTA BAIXA

ESC.: 1/50



NOTAS:

- TODOS OS CABOS SAO DE 12.7 mm (1/2") CP 190 RB, TRECHO RETO;
- A FORÇA DE PROTENSAO A SER APLICADA EM CADA CABO E DE 150kN;
- A PROTENSAO DOS CABOS SO PODERA OCORRER APOS O CONCRETO APRESENTAR fckj >= 32 Mpa;

PROTENSAO: AÇO CP190 RB 12.7 - 12.7

CABO	φ	Q	COMPRIMENTO		ANCORAGENS			ALONG (cm)	
			UNITARIO	TOTAL	A	P	I	INI	FIN
C1	1 φ 12.7	10	10.64m	106.40m	--	--	--	7.0	-----

RESUMO DE PROTENSAO (Quantitativo total)

φ	COMPR.	CABO			ANCORAGENS		
		COMPR.	PESO		A	P	I
			kg/m	kg			
140 φ 12.7	1489.60	.886	1319.80	1372.60	--	--	--

AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
LAJE PRE-MOLDADA PISTA (X14)					
50A	1	20	112	1016	113792
60B	2	5	168	278	46704
60B	3	5	1512	53	80136
50A	4	10	630	272	171360
50A	5	10	1890	53	100170
50A	6	12.5	84	1016	85344

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
60B	5	1268	195
50A	10	2715	1674
50A	12.5	853	822
50A	20	1138	2806
Peso Total		60B =	195 kg
Peso Total		50A =	5303 kg

DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

Obra/Assunto

PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-LAJE DA PISTA PROTENDIDA - ARMADURAS

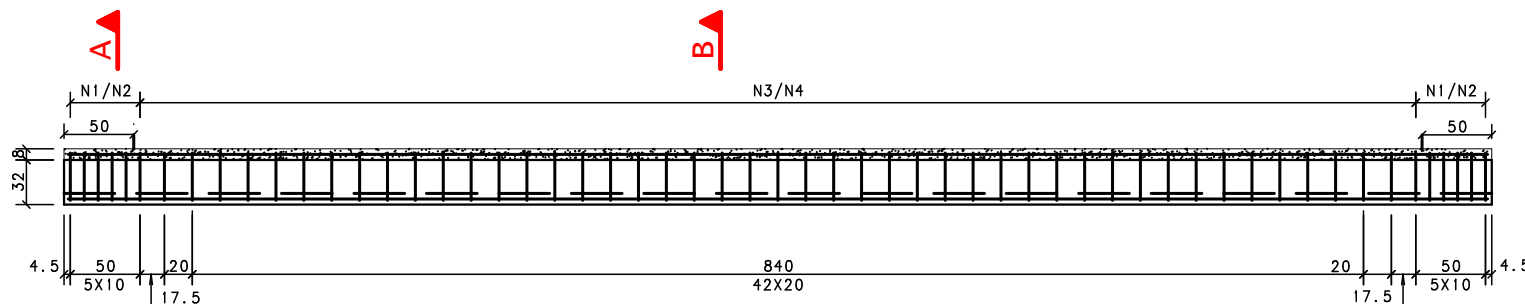
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE E	0-05/0
Identificacao	Desenho	CRISTIANO HOSS
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

APÊNDICE F – Laje inferior do passeio

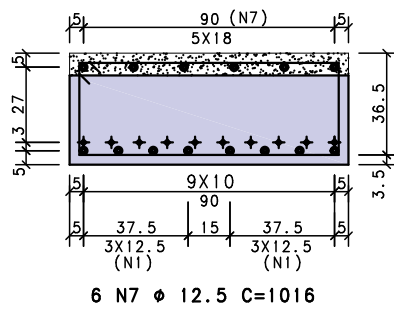
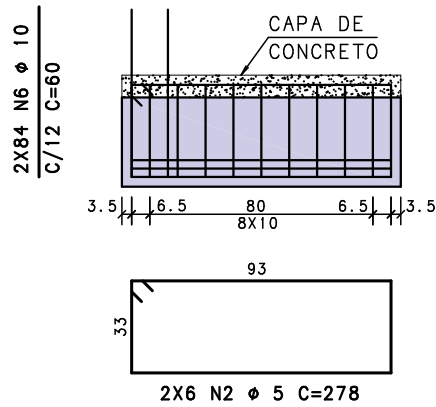
SLAB SERVIÇO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\CRISTIANO HOSS\Desktop\UFRGS - Semestres\I Semestre\TCC-II\Versão Final\Plantas\6_Laje do Passeio Inferior.PLT 07/12/2014 22:43:44

LAJE INFERIOR DO PASSEIO

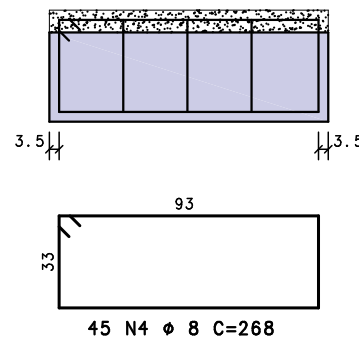
ESC.: 1/50
 Vol.: 4.09m³
 Peso: 8200kg
 Taxa und: 109.12Kg/m³



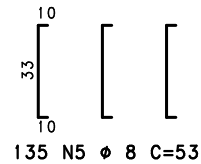
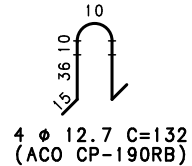
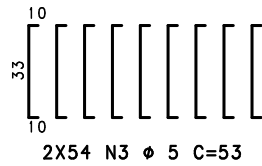
CORTE A-A
ESC.: 1/25



CORTE B-B
ESC.: 1/25

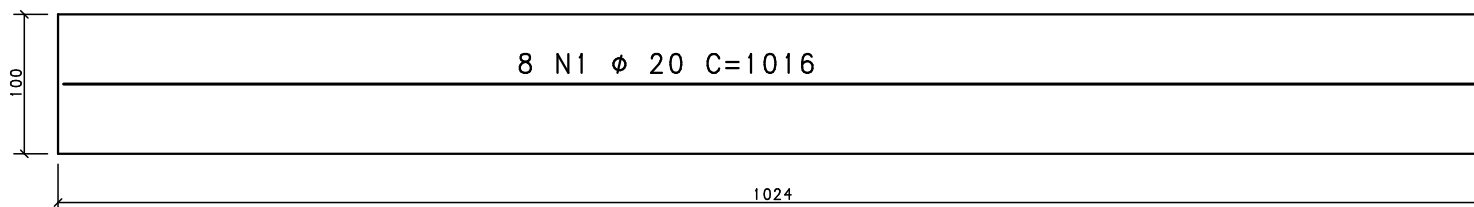


ALCAS DE ICAMENTO



ARMADURA PASSIVA-PLANTA BAIXA

ESC.: 1/50



NOTAS:

- TODOS OS CABOS SAO DE 12.7 mm (1/2") CP 190 RB, TRECHO RETO;
- A FORÇA DE PROTENSAO A SER APLICADA EM CADA CABO E DE 150KN;
- A PROTENSAO DOS CABOS SO PODERA OCORRER APOS O CONCRETO APRESENTAR $f_{ckj} \geq 32$ Mpa;

PROTENSAO: AÇO CP190 RB 12.7 - 12.7

CABO	φ	Q	COMPRIMENTO		ANCORAGENS			ALONG (cm)	
			UNITARIO	TOTAL	A	P	I	INI	FIN
CI	1 φ 12.7	10	10.64m	106.40m	--	--	--	7.0	----

RESUMO DE PROTENSAO
(Quantitativo total)

φ	COMPR.	PESO			ANCORAGENS		
		kg/m	kg	kg+4%	A	P	I
140 φ 12.7	1489.60	.886	1319.80	1372.60	--	--	--

AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
LAJE INFERIOR DO PASSEIO (X4)					
50A	1	20	32	1016	32512
60B	2	5	48	278	13344
60B	3	5	432	53	22896
50A	4	8	180	268	48240
50A	5	8	540	53	28620
50A	6	10	672	60	40320
50A	7	12.5	24	1016	24384

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
60B	5	362	56
50A	8	769	303
50A	10	403	249
50A	12.5	244	235
50A	20	325	802
Peso Total		60B =	56 kg
Peso Total		50A =	1589 kg

DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

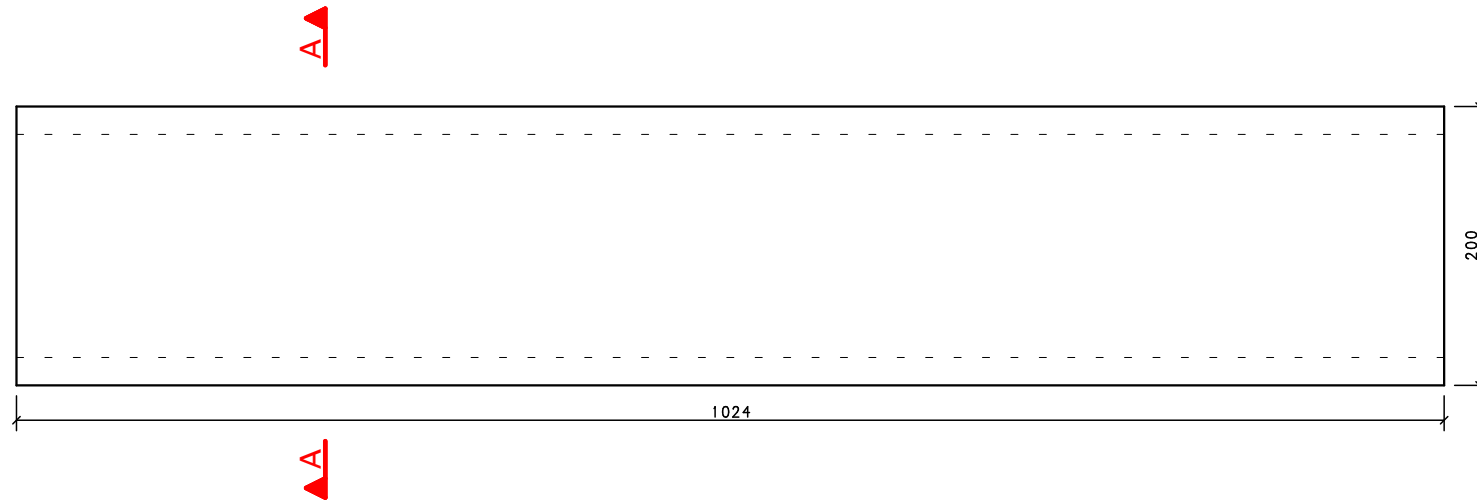
Obra/Assunto

**PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-
LAJE INFERIOR DO PASSEIO - ARMADURAS**

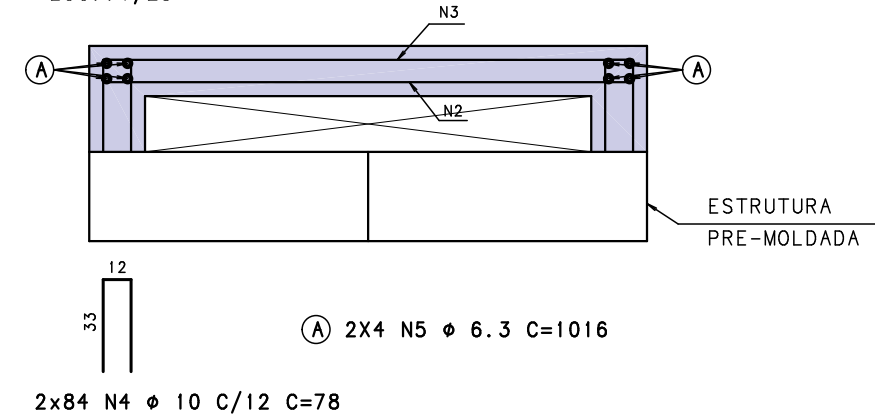
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE F	0-06/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

APÊNDICE G – Laje superior do passeio

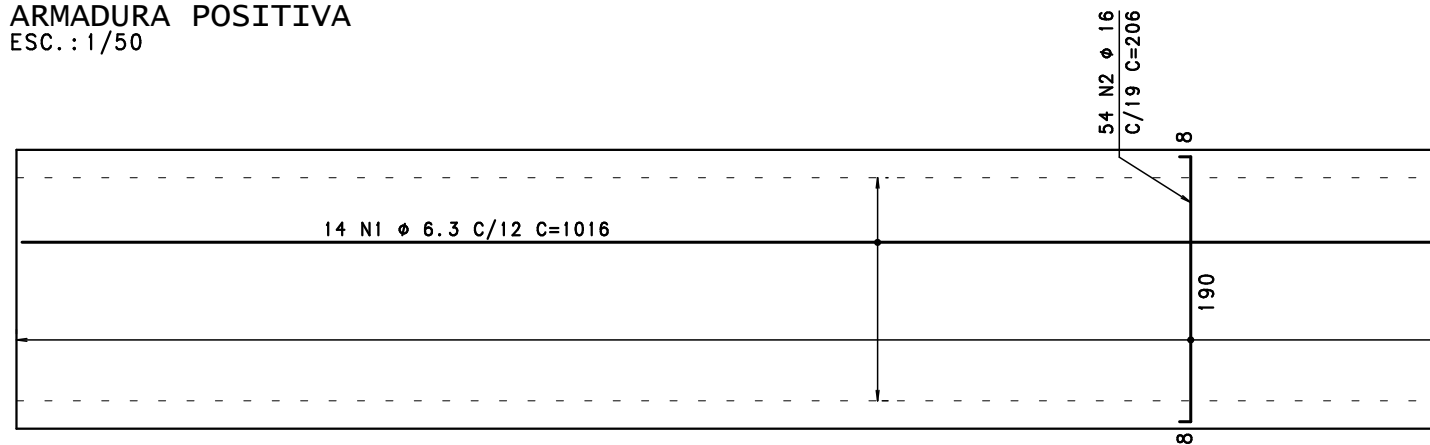
LAJE SUPERIOR DO PASSEIO
ESC.: 1/50



CORTE A-A
ESC.: 1/25



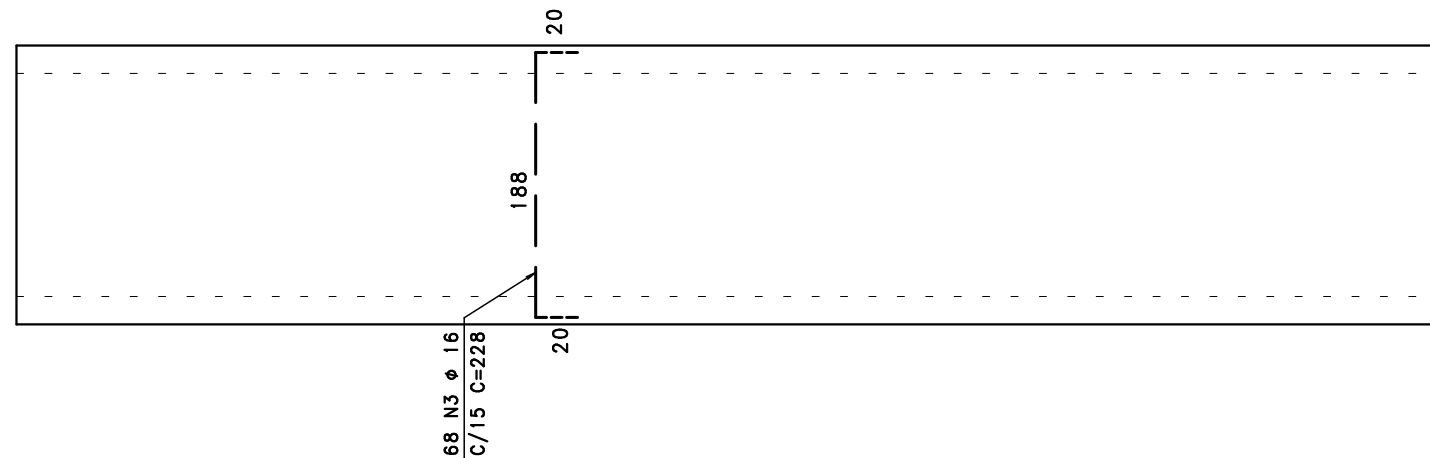
ARMADURA POSITIVA
ESC.: 1/50



AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
LAJE SUPERIOR DO PASSEIO (X4)					
50A	1	6.3	56	1016	56896
50A	2	16	216	206	44496
50A	3	16	272	228	62016
50A	4	10	672	78	52416
50A	5	6.3	32	1016	32512

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	894	219
50A	10	524	323
50A	16	1065	1681
Peso Total		50A =	2223 kg

ARMADURA NEGATIVA
ESC.: 1/50



DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

Obra/Assunto

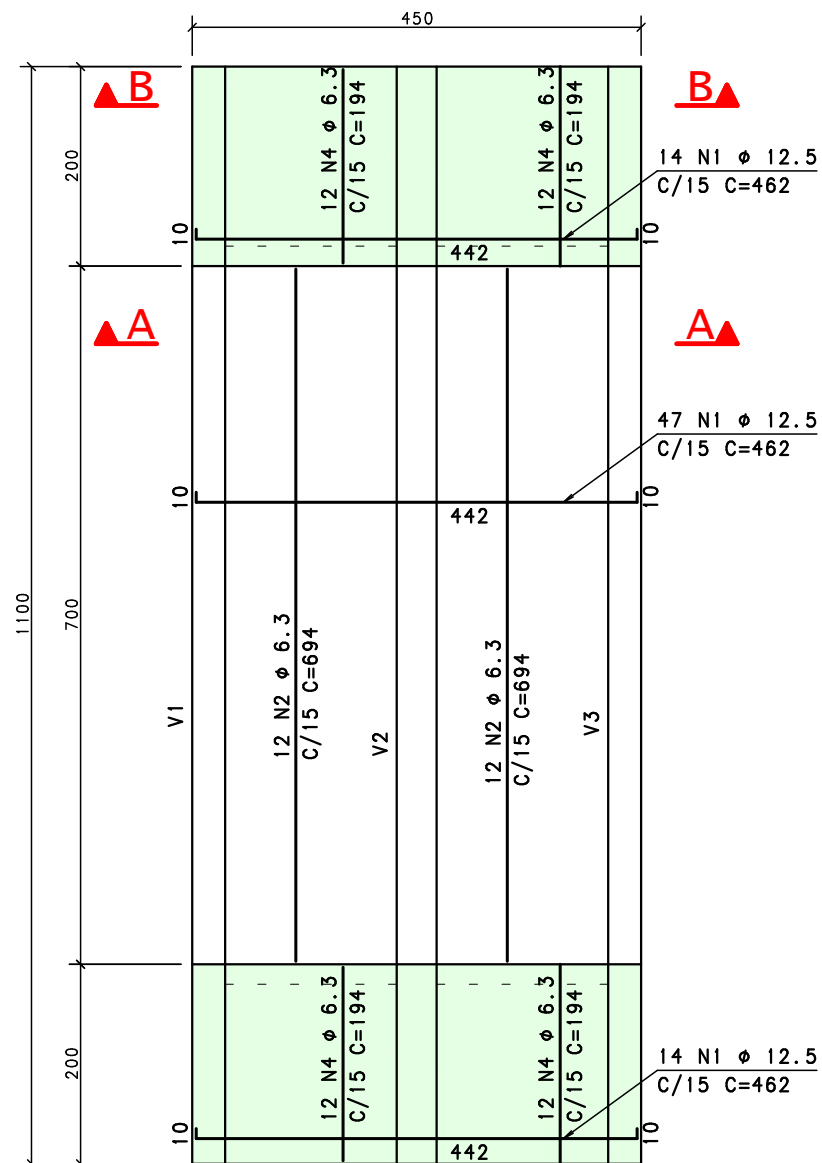
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-
LAJE SUPERIOR DO PASSEIO - ARMADURAS

Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE G	0-07/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

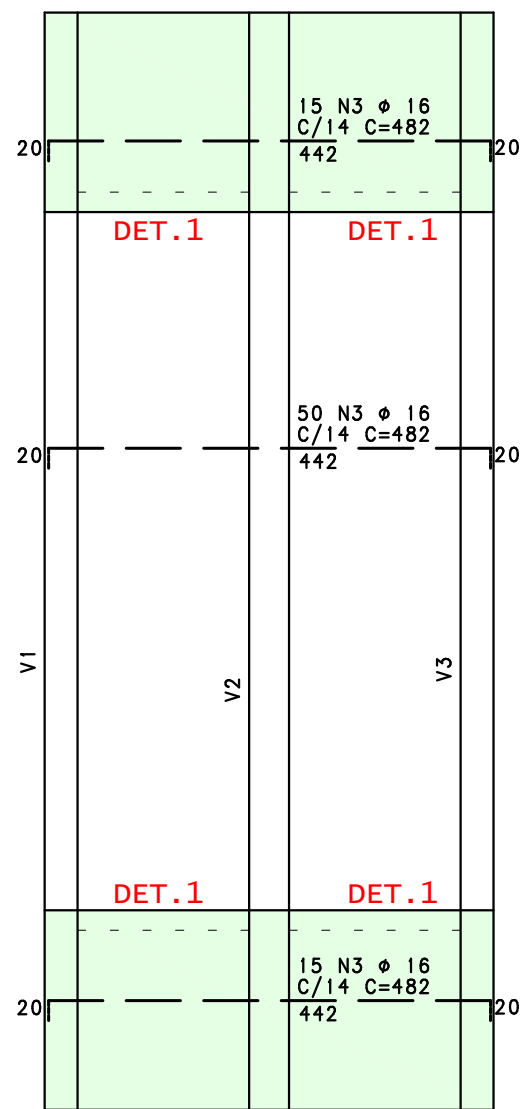
APÊNDICE H – Laje central

SLAB SERVICO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\Cristiano Hoss\Desktop\Final\Plantas\8_Laje Central.PLT 07/12/2014 22:42:11

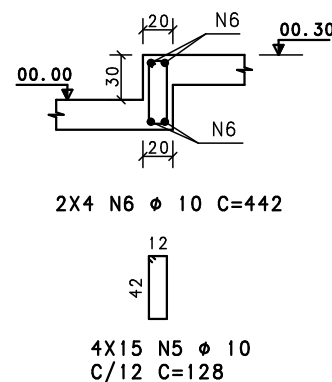
ARMADURA POSITIVA ESC.: 1/75



ARMADURA NEGATIVA ESC.: 1/75



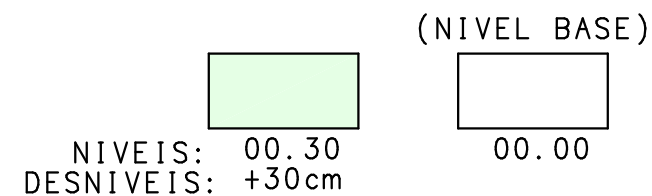
DETALHE 1 ESC.: 1/50



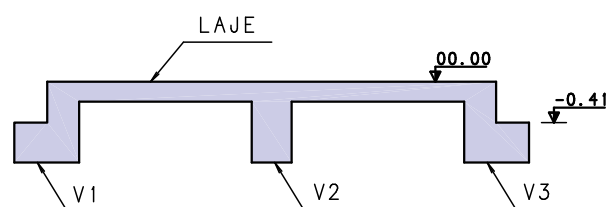
AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
50A	1	12.5	75	462	34650
50A	2	6.3	24	694	16656
50A	3	16	80	482	38560
50A	4	6.3	48	194	9312
50A	5	10	60	128	7680
50A	6	10	8	442	3536

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	260	64
50A	10	112	69
50A	12.5	347	334
50A	16	386	609
Peso Total		50A =	1075 kg

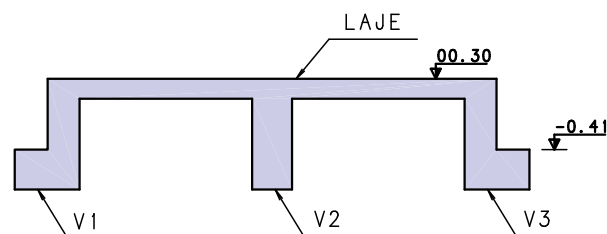
NÍVEIS



CORTE A-A ESC.: 1/75



CORTE B-B ESC.: 1/75



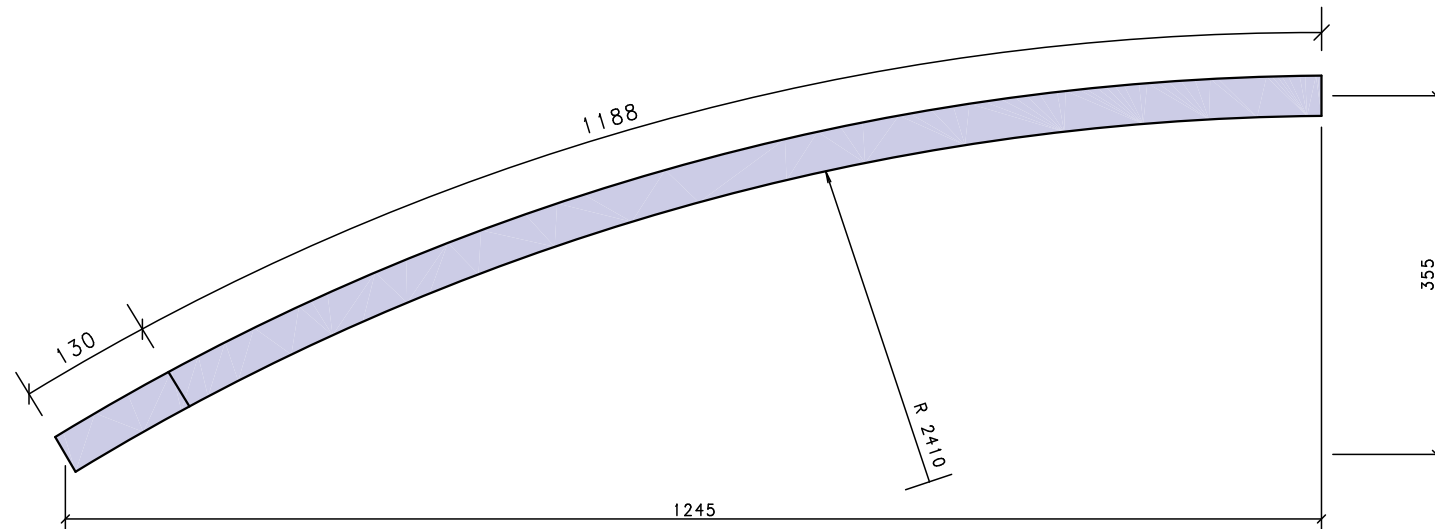
DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO- LAJE CENTRAL - ARMADURAS		
Cliente UFRGS	Numero APENDICE H	DESENHO 0-08/0
Identificacao CRISTIANO HOSS	Desenho CRISTIANO	
Escala INDICADA	fck 40 MPA	Data DEZ/2014

APÊNDICE I – Arco pré-fabricado

SLAB SERVICO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\CRISTIANO HOSS\Desktop\Ufrgs - Semestres\11 Semestre\TCC-II\Versao Final\Plantas\9_Arco\PLT_07/12/2014_22:40:33

ARCO PRE-MOLDADO - GEOMETRIA (6X)

ESC.: 1/75
 Volume=4,22 m3
 Taxa=227 kg/m3



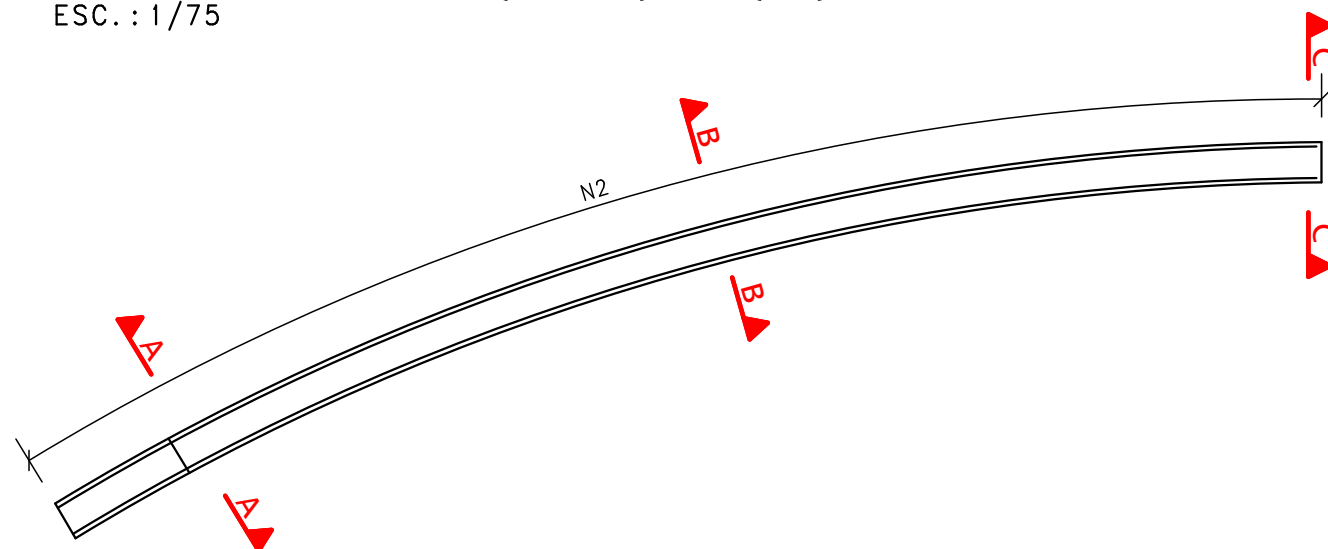
AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
50A	1	20	144	450	64800
50A	2	12.5	780	195	152100
50A	3	20	60	550	33000
50A	4	20	168	450	75600

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	12.5	1521	1465
50A	20	1734	4276
Peso Total		50A =	5742 kg

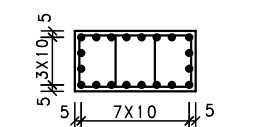
OBS: QUANTITATIVO TOTAL

ARCO PRE-MOLDADO (40X80) - (6X)

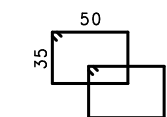
ESC.: 1/75



CORTE A-A
ESC.: 1/50

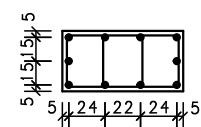


• 24 N1 ϕ 20 C=450

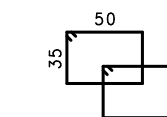


2X65 N2 ϕ 12.5 C/8 C=195

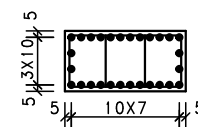
CORTE B-B
ESC.: 1/50



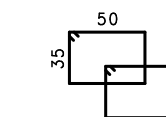
• 10 N3 ϕ 20 C=550



CORTE C-C
ESC.: 1/50



• 28 N4 ϕ 20 C=450



DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

Obra/Assunto

PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-
ARCO PRE-FABRICADO - ARMADURAS

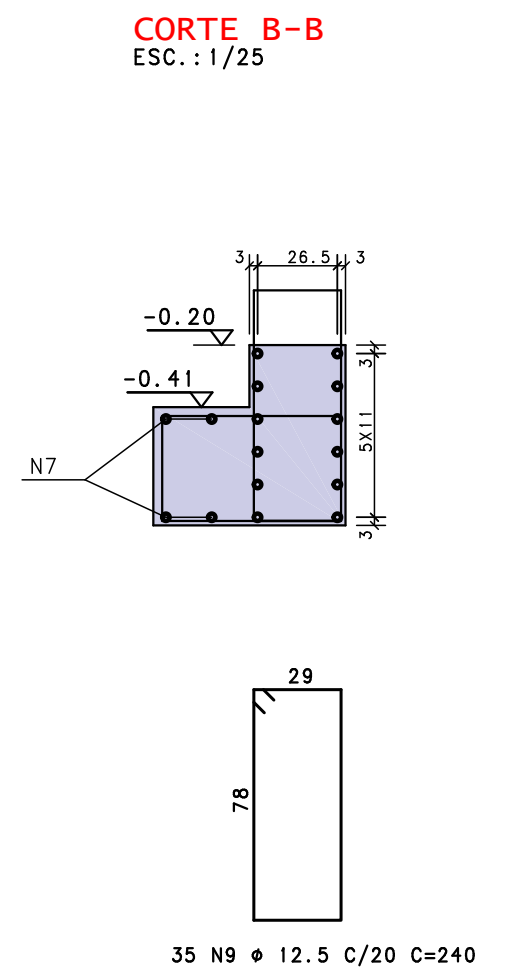
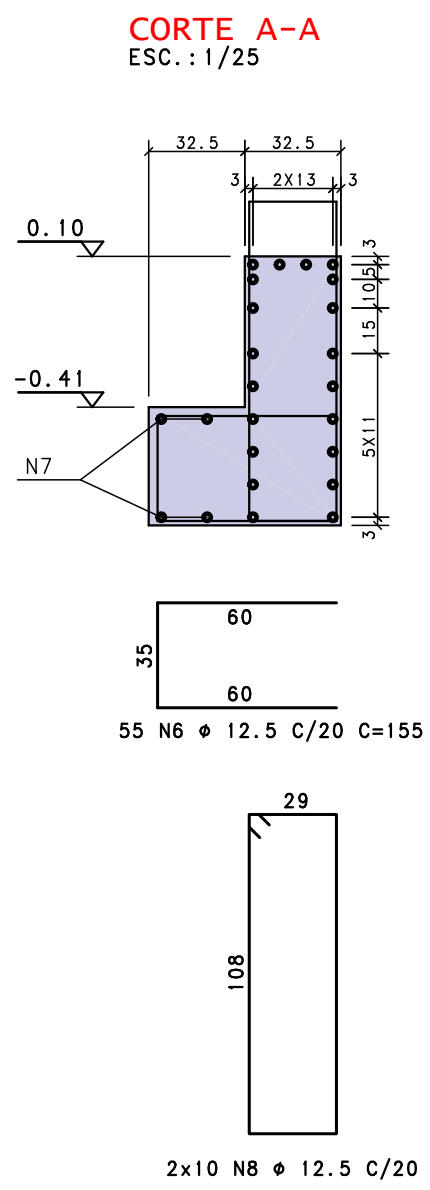
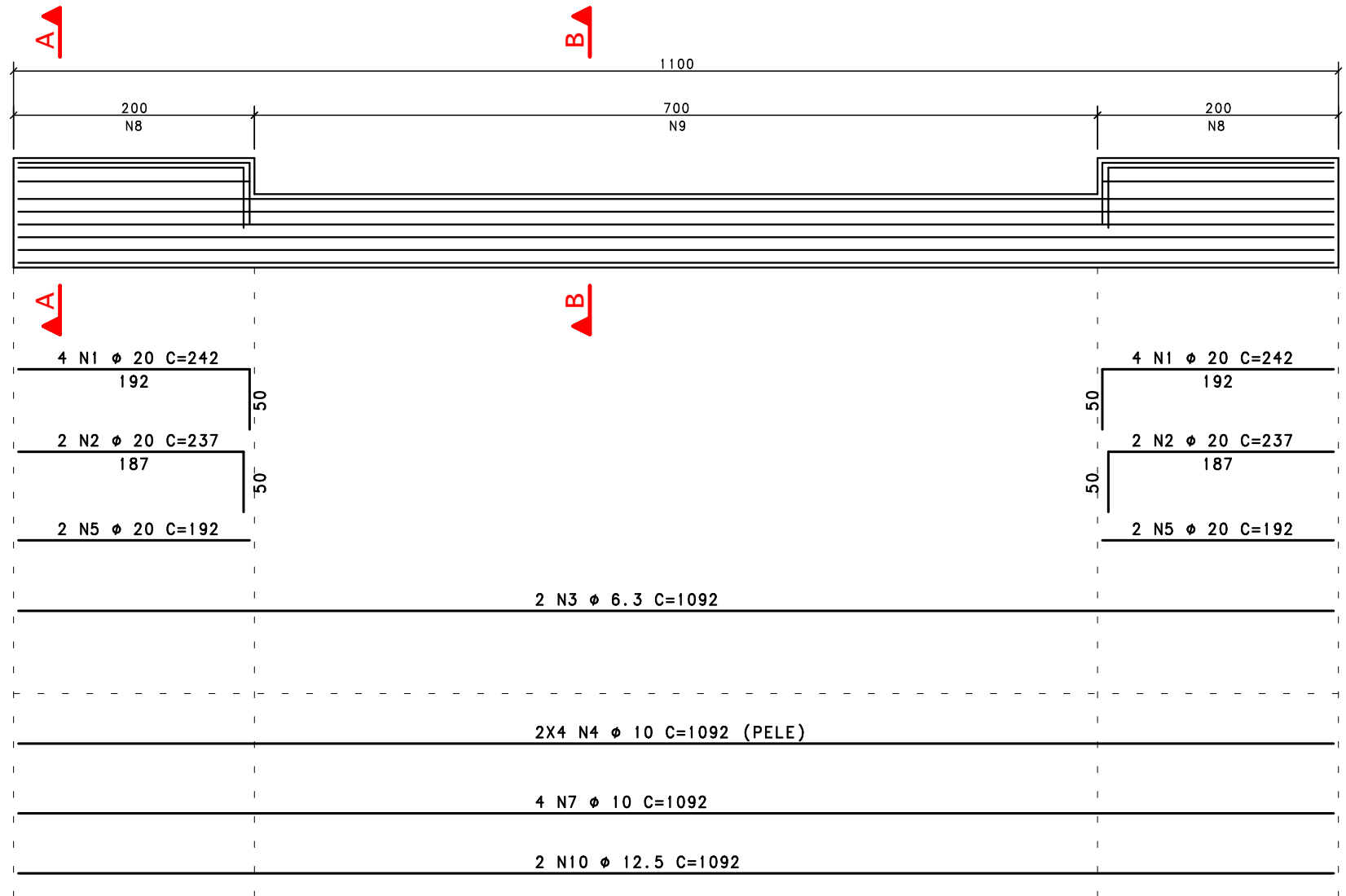
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE I	0-09/0

Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	

Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

APÊNDICE J – Vigas V1=V3

V1=V3
 ESC.: 1/50
 Vol.: 4.00m³
 Taxa und: 104.5 kg/m³



AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
V1=V3 (X2)					
50A	1	20	16	242	3872
50A	2	20	8	237	1896
50A	3	6.3	4	1092	4368
50A	4	10	16	1092	17472
50A	5	20	8	192	1536
50A	6	12.5	110	155	17050
50A	7	10	8	1092	8736
50A	8	12.5	40	300	12000
50A	9	12.5	70	240	16800
50A	10	12.5	4	1092	4368

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	44	11
50A	10	262	162
50A	12.5	502	484
50A	20	73	180
Peso Total		50A =	836 kg

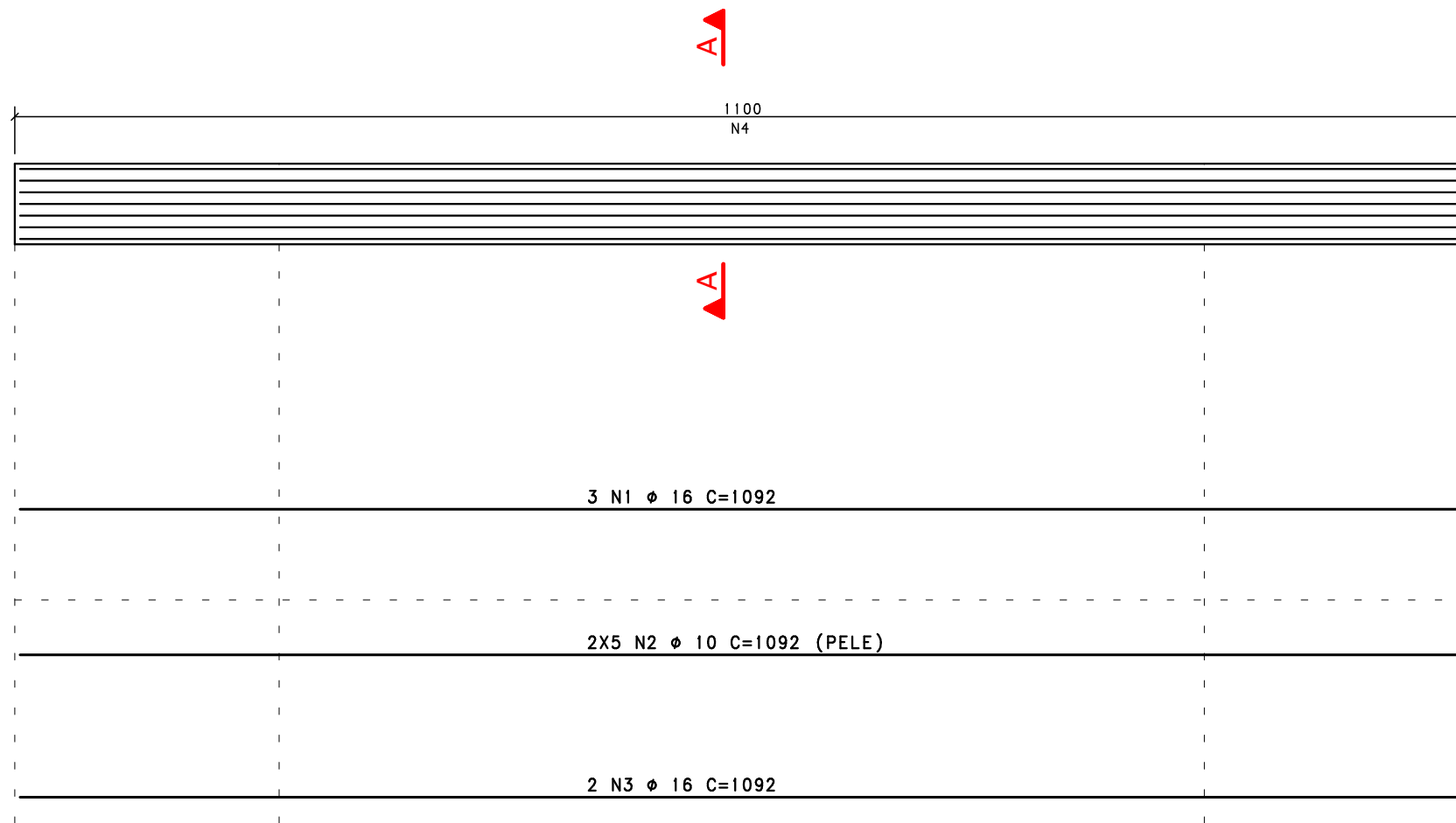
DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO
Obra/Assunto		
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-VIGAS V1=V3 - ARMADURAS		
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE J	0-10/0
Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	
Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

SLAB SERVICO DE ENGENHARIA LTDA PL C:\Users\Cristiano Hoss\Desktop\Ufrgs - Semestres\II Semestre\TCC-II\Versao Final\Plantas\I0_Vigas V1 e V3.PLT 07/12/2014 22:40:5

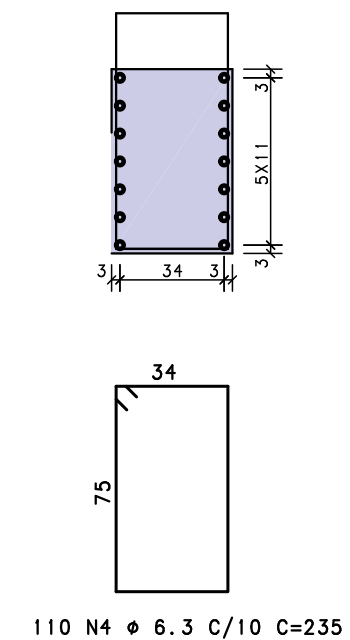
APÊNDICE K – Viga V2

V2

ESC.: 1/50
 Vol.: 2.70m³
 Taxa: 80 kg/m³



CORTE A-A
 ESC.: 1/25



AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)	
V2						
50A	1	16	3	1092	3276	
50A	2	10	10	1092	10920	
50A	3	16	2	1092	2184	
50A	4	6.3	110	235	25850	

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	6.3	259	63
50A	10	109	67
50A	16	55	86
Peso Total		50A =	217 kg

DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

Obra/Assunto
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO-VIGA V2 - ARMADURAS

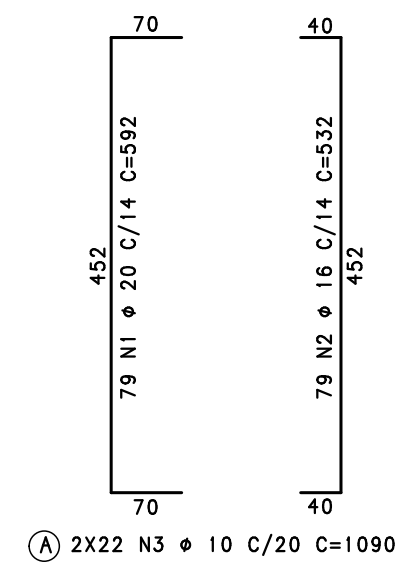
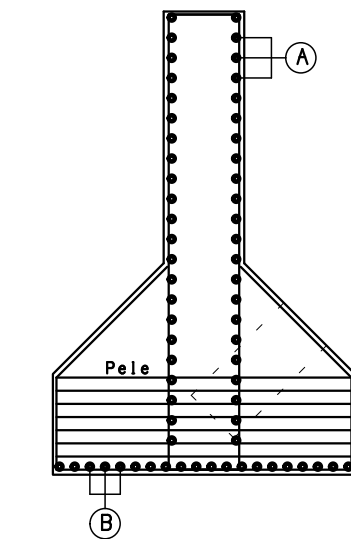
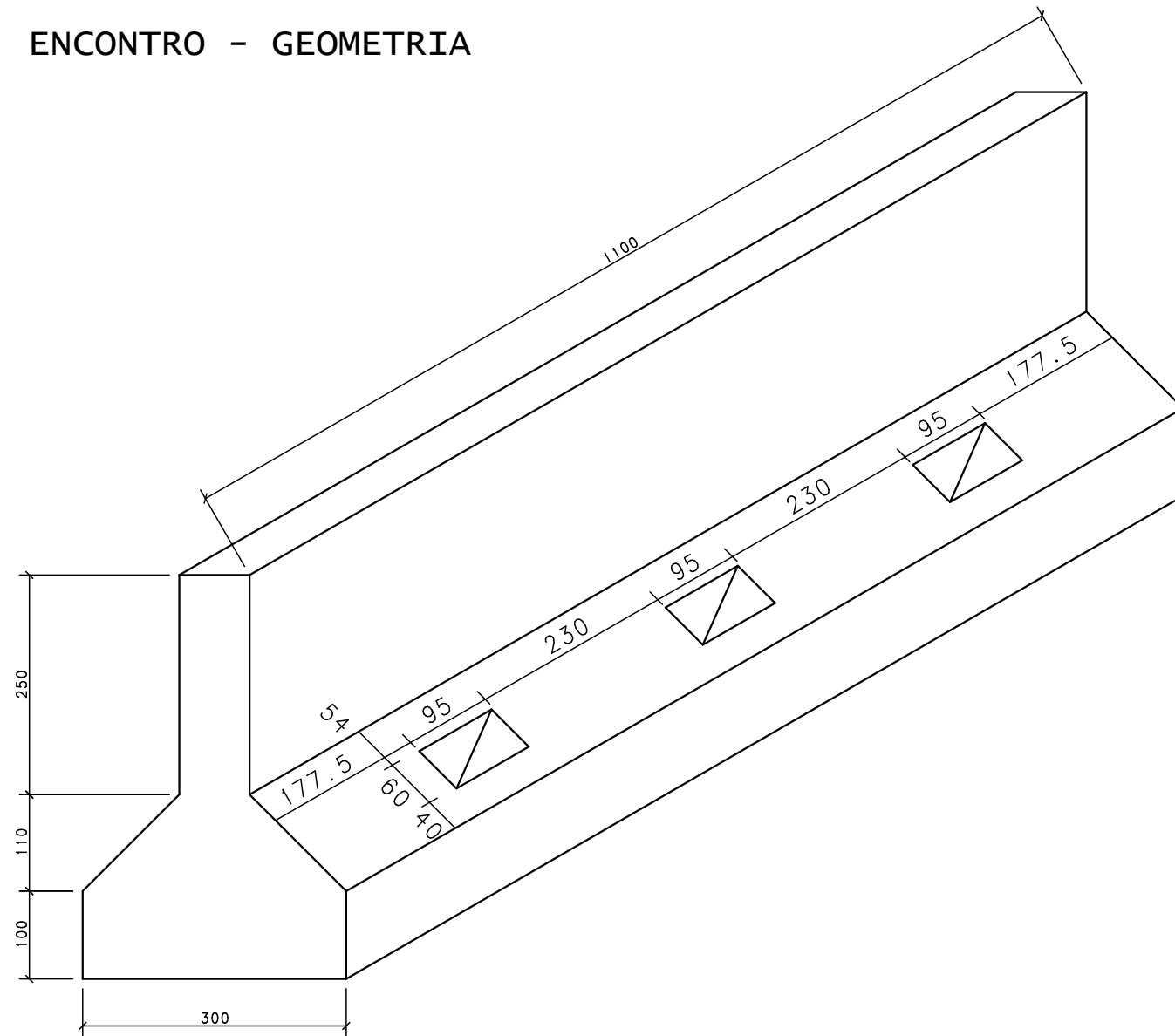
Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE K	0-11/0

Identificacao	Desenho
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO

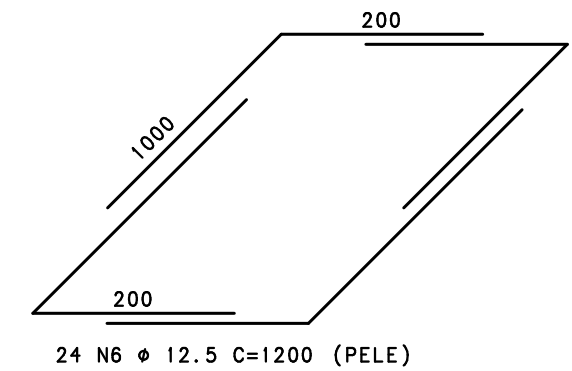
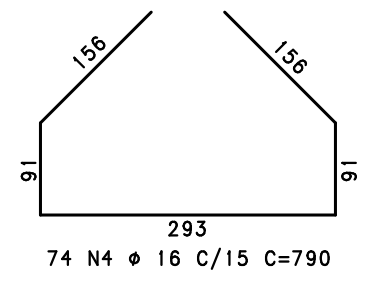
Escala	fck	Data
INDICADA	40 MPA	DEZ/2014

APÊNDICE L – Encontro e fundação

ENCONTRO - GEOMETRIA

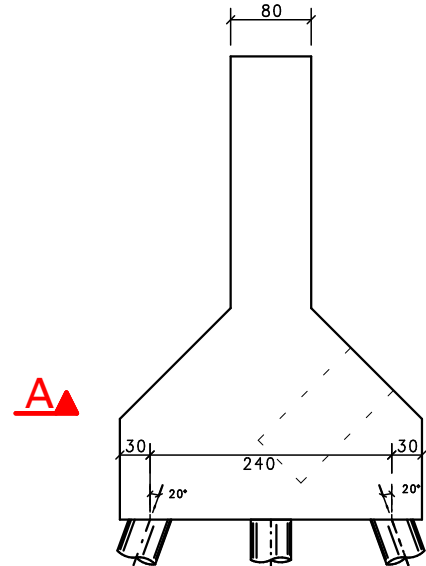
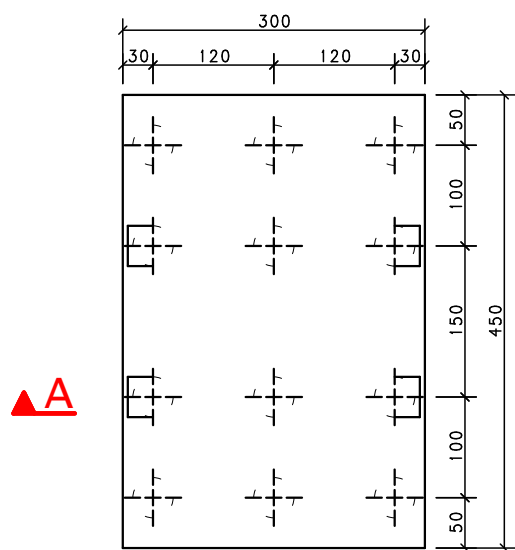


ⓑ 20 N5 φ 12.5 C/15 C=1090



MODELO DE CALCULO - GEOMETRIA

CORTE A-A



AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO	
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)
50A	1	20	79	592	46768
50A	2	16	79	532	42028
50A	3	10	44	1090	47960
50A	4	16	74	790	58460
50A	5	12.5	20	1090	21800
50A	6	12.5	24	1200	28800

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50A	10	480	296
50A	12.5	506	487
50A	16	1005	1586
50A	20	468	1153
Peso Total		50A =	3523 kg

DEZ/2014	EMISSAO INICIAL	CH
DATA	MODIFICACAO	VISTO

Obra/Assunto
PONTE EM ARCO INFERIOR EM CONCRETO ARMADO- ENCONTRO E FUNDACAO - ARMADURAS

Cliente	Numero	DESENHO
UFRGS	APENDICE L	0-12/0

Identificacao	Desenho	
CRISTIANO HOSS	CRISTIANO	

Escala	fck	Data
1:75	40 MPA	DEZ/2014