



**PONTE SOBRE RIO ANDRADA
TRAVESSIA 009**

CURITIBA
2020



ADRIANO MOHR BONATTO
EDDY WILSON DELGADO
MARCELA DOS SANTOS GUIMARÃES

**PONTE SOBRE RIO ANDRADA
TRAVESSIA 009**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Pontes e Grandes estruturas viárias, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Pontes e Grandes estruturas viárias.

Orientador: Prof. Msc. Mauer Egas.

CURITIBA
2020

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores, em especial ao engenheiro civil prof. Mauer Egas pela valiosa colaboração deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal finalidade realizar o pré-dimensionamento da nova estrutura supracitada, garantindo, conforme as normas estruturais vigentes da ABNT, sua eficiência frente às premissas de segurança estrutural (capacidade resistente), desempenho em serviço e a durabilidade da estrutura sob as ações e condições a que lhe são previstas durante a sua vida útil. Atendendo à solicitação do Instituto IDD, executando os serviços técnicos de engenharia necessários à elaboração do projeto estrutural da obra de arte especial PONTE SOBRE O RIO ANDRADA.

Palavras chave: Pré-dimensionamento, ABNT, ponte, Rio Andrada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Traçado (IDD, 2018).....	09
Figura 2. Planta (AUTORES, 2018).....	11
Figura 3. Seção Transversal (AUTORES, 2018).....	11
Figura 4. Seção Longitudinal (AUTORES, 2018).....	12
Figura 5. (Professor Thomaz, 2018).....	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela de Bainhas (PROTENDE, 2019).....	22
---	----

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS.....	6
SUMÁRIO.....	7
1. OBJETIVO	9
2. LOCAÇÃO DA OBRA.....	10
3. DOCUMENTO DE REFERÊNCIA.....	10
4. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA OBRA	9
5. CÁLCULOS REALIZADOS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO	12
5.1 CÁLCULO ALTURA DAS VIGAS PRÉ MOLDADAS.....	12
5.2 CÁLCULO VÃO ENTRE AS VIGAS.....	12
5.3 CÁLCULO DA DIMENSÃO DA VIGAS.....	13
5.4 CÁLCULO DA LAJE.....	13
5.5 CÁLCULO DOS APARELHOS DE APOIO.....	14
5.6 CÁLCULO DAS FUNDAÇÕES.....	14
5.7 CÁLCULO DOS PILARES.....	14
5.8 CÁLCULO DA DISTÂNCIA ENTRE EIXOS DOS PÍLARES.....	14
5.9 CÁLCULO VÃO DAS TRAVESSIAS.....	14
5.10 DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS PERMANENTES.....	17
5.11 CÁLCULO DOS CABOS DE PROTENSÃO.....	22
5.12 PERDAS IMEDIATAS DE PROTENSÃO DEVIDO AO ATRITO ENTRE CABO E BAINHA.....	24
5.13 VERIFICAÇÃO DA TENSÃO NORMAL DE COMPRESSÃO MÁXIMA NO CONCRETO DURANTE A PROTENSÃO.....	37

5.14 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PASSIVAS DE FLEXÃO SUPERIOR.....	39
5.15 ESQUEMA DE CARREGAMENTO PERMANENTE.....	40
5.16 TREM TIPO.....	40
5.17 MOMENTOS DE FLETORES DE CÁLCULO DEVIDO AOS CARREGAMENTOS DE PROTENSÃO.....	46
5.18 MOMENTO FLETOR DE CÁLCULO RESULTANTE.....	47
5.19 TENSÕES RESULTANTES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. OBJETIVO

Atendendo à solicitação do Instituto IDD executou os serviços técnicos de engenharia necessários à elaboração do projeto estrutural da obra de arte especial PONTE SOBRE O RIO ANDRADA como trabalho de conclusão do curso de pós-graduação em Pontes e Grandes estruturas viárias. A obra será concebida para o trem tipo TB-450, exato, com coeficiente de agressividade ambiental CAAII.

Para tanto, foi fornecido pelo Instituto IDD o arquivo eletrônico contendo o perfil do terreno no local e as principais premissas a serem seguidas, que serviu de base e referência para o desenvolvimento do presente trabalho.

O presente trabalho tem como principal finalidade realizar o pré-dimensionamento da nova estrutura supracitada, garantindo, conforme as normas estruturais vigentes da ABNT, sua eficiência frente às premissas de segurança estrutural (capacidade resistente), desempenho em serviço e a durabilidade da estrutura sob as ações e condições a que lhe são previstas durante a sua vida útil.

2. LOCALIZAÇÃO DA OBRA

A obra em questão se encontra sobre o Rio Andrada, travessia 009. Conforme apresentado no desenho abaixo:

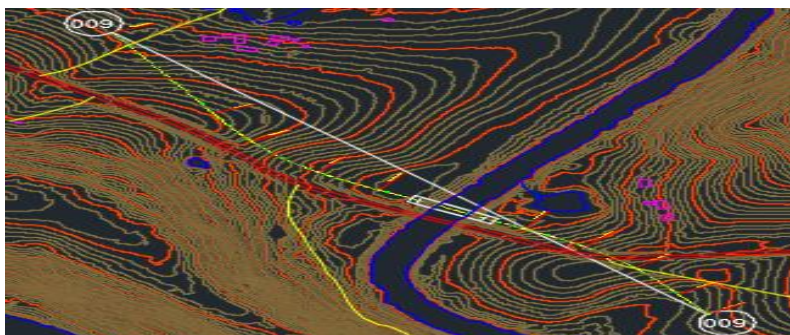


Figura 1. Traçado (IDD, 2018)

3. DOCUMENTO DE REFERÊNCIA

Os documentos de referência fornecidos pela Instituto IDD para realização do trabalho foram:

- Topografia do local
- Critérios para projeto
- Diretriz 9
- 3 vãos de 27,5 m
- Classe 1ª – Pista dupla com 3 faixas
- Gabarito fluvial de 5 m
- Trem tipo exato

Diretrizes básicas:

- Viga pré-moldada em concreto protendido
- Aparelhos de apoio elastômeros fretados
- Uso de pré lajes
- Fundação em estaca raiz

4. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA OBRA

Trata-se de uma obra de arte especial em concreto protendido, composta por vigas pré-moldadas, pré lajes e laje moldadas *in loco*, constituída por três vãos de 27,50 m apoiados em pilares em concreto armado sobre fundação em estaca raiz. Foi considerado vão teórico de 27,50 m para o vão central, sendo o comprimento das vigas com 27,10 m. A extensão total é de 90,30 m (conforme apresentado na figura 2), com traçado retilíneo e declividade nula.

A superestrutura tem seção transversal típica de 16,60m de largura, composta por 3 vias de circulação com 3,60 m, acostamento interno e externo ambos com 2,50 m. Nas laterais defensas com 40 cm de largura, apresentado na figura 3.

A seção é composta por sete vigas pré-moldadas em concreto protendido, pré-lajes entre as mesmas, uma laje com espessura de 20 cm (15 cm sobre pré lajes) e defensas em concreto armado nas duas extremidades.

As vigas se apoiam em aparelhos de apoio em elastômero fretado com dimensões 500 x 700 / 41 mm.

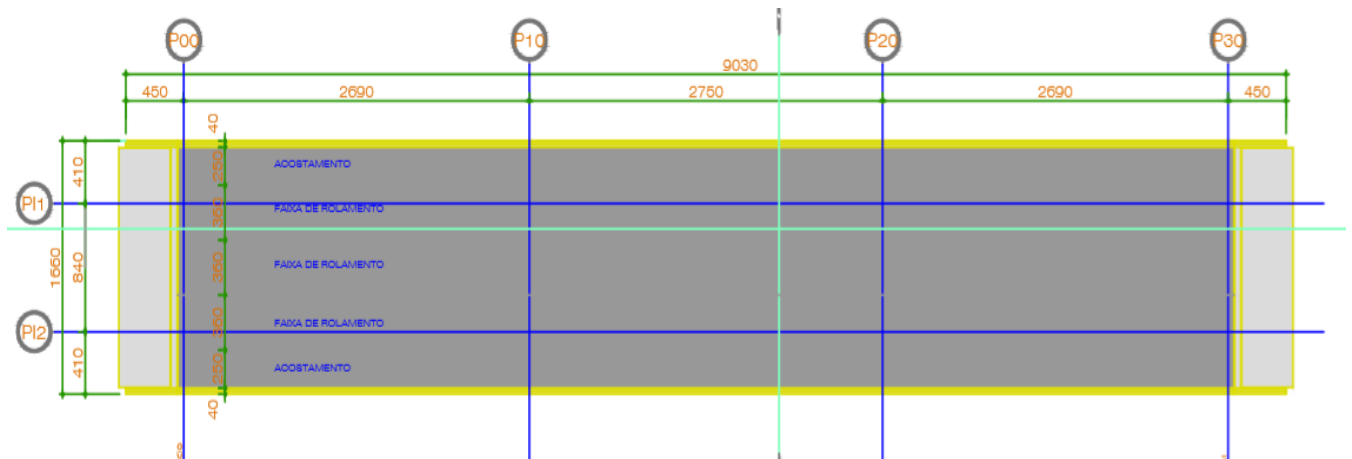


Figura 2. Planta (AUTORES, 2018)

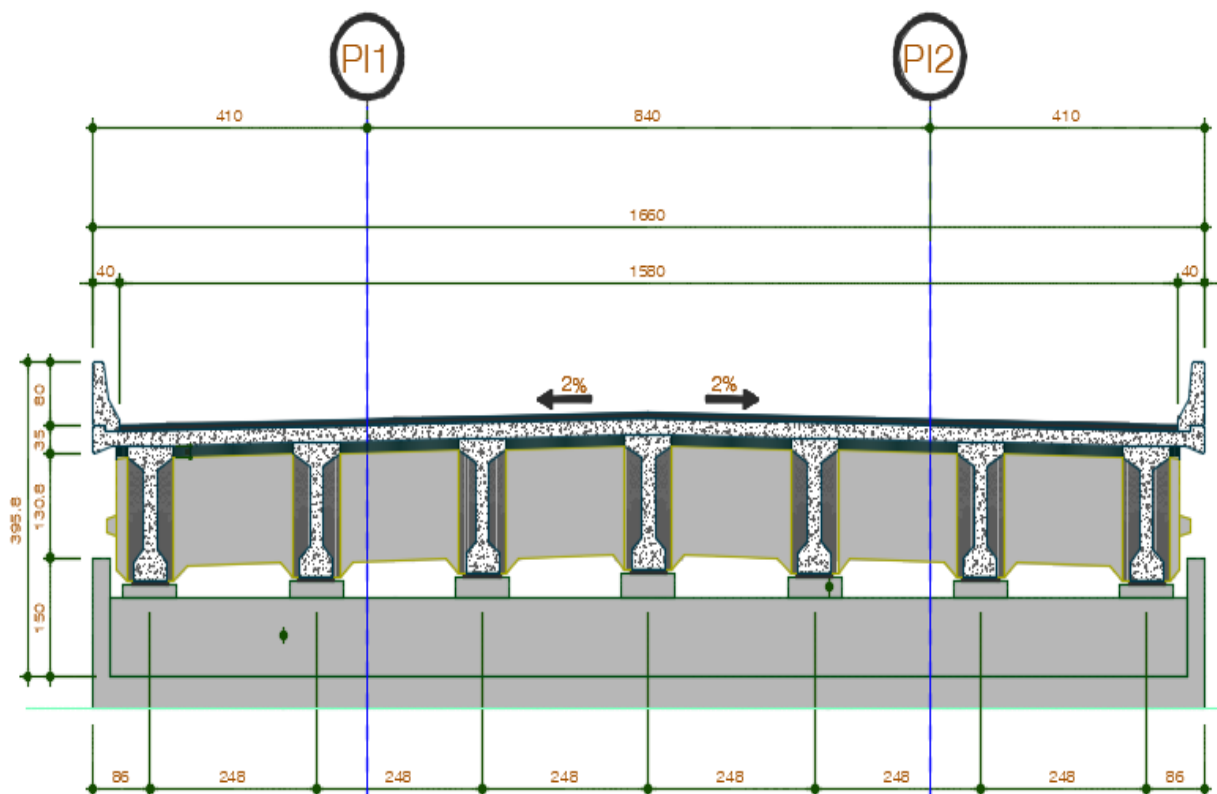


Figura 3. Seção Transversal (AUTORES, 2018)

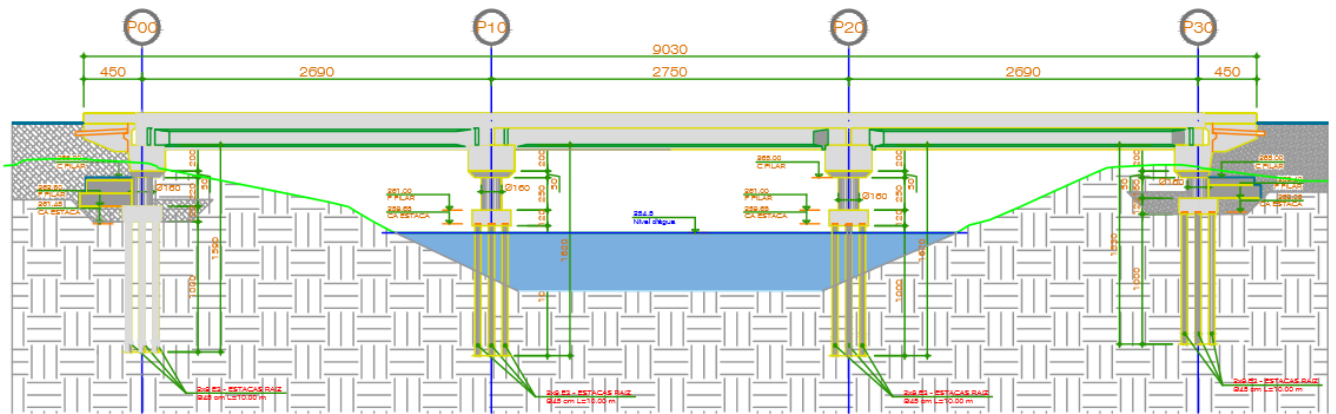


Figura 4. Seção Longitudinal (AUTORES, 2018)

5. CÁLCULOS REALIZADOS PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

O pré-dimensionamento foi realizado tomando como base:

- Material didático e aula referente ao projeto executivo de pontes;
- Notas de aula do Prof. Eduardo C. S. Thomaz sobre pontes em concreto protendido;
- Projeto exemplo.

5.1 CÁLCULO ALTURA DAS VIGAS PRÉ MOLDADAS

O Prof. Thomaz apresenta a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \text{Altura (média)} &= 0,00025 \times L^2 + 0,02065 \times L + 0,75434 \\ \text{Altura (90\%)} &= \text{Altura (média)} + 0,40\text{m} \end{aligned}$$

Para vão L de 27,5 m temos 1,53 m de média e 1,93 m como valor acima de 90% da referência. Foi adotado como 1,70 m.

5.2 CÁLCULO VÃO ENTRE AS VIGAS

No material do Prof. Thomaz temos as seguintes situações:

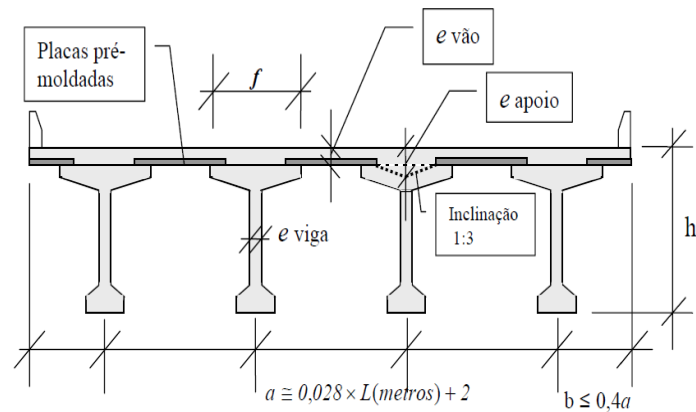


Figura 5. Professor Thomaz

O valor de “a” máximo calculado foi de 2,77 m e de “b” foi de 1,11 m.

Os valores adotados foram de 2,48 m e 0,86 m.

5.3 CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA VIGA

De acordo com o material do Prof. Thomaz a largura da mesa superior da viga tem os limites abaixo para combater a flambagem:

$$\begin{aligned} \circ f &\geq \left(\frac{L(\text{metros})}{100(\text{metros})} \right) \times h \\ \circ f &\geq \frac{L}{30} \end{aligned}$$

Como resultado temos 0,53 cm e 0,92 cm. Visto experiências prévias, material didático da disciplina e projeto exemplo, foi considerado 70 cm.

Para a alma e talão inferior, o material do Prof. Thomaz traz como referência que um deve ser 3 vezes o outro, usando 17 cm e 51 cm como limites inferiores. Foram considerados 20 cm para alma e 50 cm para o talão inferior.

5.4 CÁLCULO DA LAJE

No material do Prof. Thomaz temos as espessuras de laje definidas pelo vão entre vigas, sendo o mínimo de 17 cm para a laje.

A espessura mínima calculada foi de 15 cm, sendo considerado 20 cm, conforme orientação da disciplina.

5.5 CÁLCULO DOS APARELHOS DE APOIO

As dimensões de aparelhos de apoio e berços considerados foram com base em orientação dada em sala de aula e do projeto exemplo. Apoios com 500x700x41 mm e berços com 600x800 de alturas variáveis para criar a inclinação de 2% no tabuleiro.

5.6 CÁLCULO DAS FUNDAÇÕES

As dimensões das fundações foram dadas. Blocos com 3,0x3,0x1,20 m com 9 estacas raiz de diâmetro de 45 cm.

5.7 CÁLCULO DOS PILARES

A diretriz a ser seguida pelos pilares foi uma margem entre 1,20 m e 1,80 m de diâmetro. Foi considerado 1,60 m de diâmetro.

5.8 CÁLCULO DA DISTÂNCIA ENTRE EIXOS DOS PILARES

A diretriz a ser seguida pelos pilares foi de metade da largura total de 16,60. Foi considerado 8,40 m.

5.9 CÁLCULO DAS TRAVESSAS

A relação dada para altura de travessas foi entre vão entre pilares/8 e /10.

O vão entre eixos de pilares é 8,40 m, sendo a altura da travessa entre 0,84 cm e 1,05 cm. Entretanto, com base no projeto exemplo, será considerado como 2 m.

Cálculos:

➤ **Longarinas externas L1 e L7:**

- Área de seção transversal – 0,894 m²
- Altura de centro de gravidade em relação à base – 1,233 m
- Momento de inércia à flexão no eixo y – $I_y = 0,372 \text{ m}^4$

➤ **Longarinas internas L2 a L6:**

- Área de seção transversal – 1,046 m²
- Altura de centro de gravidade em relação à base – 1,316 m
- Momento de inércia à flexão no eixo y – $I_y = 0,414 \text{ m}^4$

➤ **Transversinas de vão:**

- Área de seção transversal – 0,598 m²
- Altura de centro de gravidade em relação à base – 0,902 m
- Momento de inércia à flexão no eixo y – $I_y = 0,179 \text{ m}^4$

➤ **Para todas as longarinas e transversinas:**

Módulo de elasticidade secante do concreto C40

$$E_{ci} = 0,85 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \times \alpha_e$$

$$E_{ci} = 27.094,39 \text{ MPa}$$

➤ **Verificação da aplicabilidade do método:**

$$\lambda = \frac{L_T}{2L} \cdot \sqrt[4]{\frac{L}{L_T} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{nL} (E_{Li} \cdot I_{Li})}{\sum_{j=1}^{nT} (E_{Tj} \cdot I_{Tj})}}$$

- Vão das transversinas (entre eixos das longarinas L1 a L7) – $L_T = 14,88 \text{ m}$

- Vão das longarinas – 26,30 m
- Quantidade de longarinas – $nL = 7$
- Quantidade de transversinas – $nT = 5$

$$\sum_{i=1}^{nL} (E_{Li} \cdot I_{Li}) = 2 \times (27.094,39 \times 0,372) + 5 \times (27.094,39 \times 0,414) \\ = 76.244 \text{ MPa}$$

$$\sum_{j=1}^{nT} (E_{Tj} \cdot I_{Tj}) = 5 \times (27.094,39 \times 0,179) = 24.249 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \frac{14,88}{2 \times 26,30} \cdot \sqrt[4]{\frac{26,30}{14,88} \cdot \frac{76.244}{24.249}} \rightarrow \lambda = 0,434$$

O valor não está dentro do adequado, mas a adição de mais transversinas torna-se menos efetiva quanto mais transversinas já há na ponte. Com a adição de mais duas transversinas e alargamento para 50 cm o valor de λ reduziria para 0,35, mas tal ação foi vista como exagerada.

Determinação da posição do centro elástico

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^{nL} (I_i \times y_i)}{\sum_{i=1}^{nL} I_i}$$

$y_o \rightarrow$ posição do centro elástico no eixo y em relação ao referencial (longarina mais à esquerda)

$y_i \rightarrow$ posição do centro da longarina i no eixo y

$I_i \rightarrow$ momento de inércia da longarina i

Neste caso, devido à simetria do tabuleiro, o centro elástico fica na metade da largura do tabuleiro, no centro da longarina L4.

A posição das longarinas em relação ao centro elástico é então:

$y_1 = - 7,44 \text{ m}$; $y_2 = - 4,96 \text{ m}$; $y_3 = - 2,48 \text{ m}$; $y_4 = 0 \text{ m}$; $y_5 = 2,48 \text{ m}$;

$y_6 = 4,96 \text{ m}$; $y_7 = 7,44 \text{ m}$.

➤ **Equação geral para as linhas de repartição:**

$$q_{i,e} = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^{nL} I_i} \cdot \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^{nL} I_i}{\sum_{i=1}^{nL} (I_i \cdot y_i^2)} \cdot y_i \cdot e \right)$$

Para L1 e L7

Para L1 e L7	
e para q11	-744
q11	0,44103
e para q17	744
q17	-0,1768

Para L2 e L6

Para L2 e L6	
e para q21	-744
q21	0,37647
e para q27	744
q27	-0,0822

Para L3 e L5

Para L3 e L5	
e para q31	-744
q31	0,26181
e para q37	744
q37	0,03248

Para L4

Para L4	
e para q41	-744
q41	0,14715
e para q47	744
q47	0,14715

5.10 DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS PERMANENTES:

As ações permanentes são aquelas que atuam sobre a estrutura durante toda ou boa parte de sua vida útil. São de relativa facilidade de previsão, devendo ser consideradas nos dimensionamentos realizados no ELU e ELS.

Para o cálculo consideramos os seguintes pesos:

- Concreto 2500kg/m³
- CBUQ:2400 KG/M³
- Espessura: 7 cm
- Espessura: 20 cm
- Recapeamento: 2 kn/m²

CARGA PERMANENTE					
g1	Longarinas	A (cm ²)	Peso/m (kN/m)	L (cm)	Peso (kN)
	A centro	5500	13,75	2342	322,025
	A apoio	11900	29,75	184	54,74
g2	Laje	A (cm ²)	Peso/m (kN/m)	L (cm)	Peso (kN)
	L intermediária	4960	12,4	2710	336,04
	L borda	4200	10,5	2710	284,55
g3	Pavimento		Peso/m	L (cm)	Peso (kN)
	L intermediária	1736	4,1664	2710	112,9094
	L borda	1470	3,528	2710	95,6088
g4	Recapeamento		Peso/m (kN/m)	L (cm)	Peso (kN)
	L intermediária		4,96	2710	135,416
	L borda		4,2	2710	113,82

Peso próprio longarinas → 376,76 kN → 37,68 ton

Peso próprio laje → 620,59 kN → 62,05 ton

Peso próprio pavimento → 208,51 kN → 20,85 ton

Peso próprio recapeamento → 248,23 kN → 24,82 ton

➤ **Barreira e pingadeira:**

		A (cm ²)	Peso/m (kN/m)
g'	barreira	2170	5,425
g''	pingadeira	118	0,295
			5,72

$$g = 5,72 \text{ kN} \times 2 = 11,44 \text{ Kn}$$

Quinhões	Esquerda	Direita	g ₅ result (kN)
L1	0,468	-0,203	1,5158
L2	0,397	-0,103	1,68168
L3	0,272	0,022	1,68168
L4	0,147	0,147	1,68168
L5	0,022	0,272	1,68168
L6	-0,103	0,397	1,68168
L7	-0,203	0,468	1,5158
		TOTAL	11,44

➤ **Peso próprio das transversinas:**

Transversinas				Mísula					Total
	A (cm²)	esp (cm)	Peso (kN)	a (cm)	b (cm)	l (cm)	V (cm³)	Peso (kN)	Peso (kN)
L1	23890	30	17,9175	15	15	104,02	11702	0,29	18,21
L2	35890	30	26,9175	15	15	178,05	20031	0,5	27,42
L3	35890	30	26,9175	15	15	178,05	20031	0,5	27,42
L4	35890	30	26,9175	15	15	178,05	20031	0,5	27,42
L5	35890	30	26,9175	15	15	178,05	20031	0,5	27,42
L6	35890	30	26,9175	15	15	178,05	20031	0,5	27,42
L7	23890	30	17,9175	15	15	104,02	11702	0,29	18,21

➤ **Redução da seção da laje pós transversina:**

	e	Largura	A (cm²)	Peso/m (kN/m)
L1	18	210	3780	9,45
L2	18	248	4464	11,16
L3	18	248	4464	11,16
L4	18	248	4464	11,16
L5	18	248	4464	11,16
L6	18	248	4464	11,16
L7	18	210	3780	9,45

	l (cm)	Laje entre longarinas		Pavimentação		Recapeamento		Barreira e pingadeira	
		A (cm²)	Peso (kN)	Peso/m (kN/m)	Peso (kN)	Peso/m (kN/m)	Peso (kN)	Peso/m (kN/m)	Peso (kN)
L1	20	3780	1,89	3,528	0,7056	4,2	0,84	1,5158	0,30316
L2	20	4464	2,232	4,1664	0,83328	4,96	0,992	1,68168	0,336336
L3	20	4464	2,232	4,1664	0,83328	4,96	0,992	1,68168	0,336336
L4	20	4464	2,232	4,1664	0,83328	4,96	0,992	1,68168	0,336336
L5	20	4464	2,232	4,1664	0,83328	4,96	0,992	1,68168	0,336336
L6	20	4464	2,232	4,1664	0,83328	4,96	0,992	1,68168	0,336336
L7	20	3780	1,89	3,528	0,7056	4,2	0,84	1,5158	0,30316

➤ **Esquema de cargas permanentes:**

L1 e L7		
1	33,494	kN/m
2	49,494	kN/m
3	48,444	kN/m
4	18,21	kN
5	3,7388	kN

L2 a L6		
1	36,958	kN/m
2	52,958	kN/m
3	51,718	kN/m
4	27,418	kN
5	4,3936	kN

➤ **Determinação dos carregamentos móveis:**

TB-450 – Exato:

Carga por roda	75	kN
Carga de multidão	5	kN/m ²

Para regiões carregadas pelo veículo:

	Quinhão 1 ^a P	Quinhão 2 ^a P	Quinhão 1 ^o q	Quinhão Final q	L de q
L1 = L7	0,439	0,356	0,336	0	808
L2 = L6	0,375	0,314	0,298	0	967
L3 = L5	0,261	0,23	0,223	0,025	1280
L4	0,147	0,147	0,147	0,147	1280

	Carga de Rodas (kN)	Ômega (m)	Multidão (kN/m)
L1 = L7	59,625	1,35744	6,7872
L2 = L6	51,675	1,44083	7,20415
L3 = L5	36,825	1,5872	7,936
L4	22,05	1,8816	9,408

	Quinhão 1 ^o q	Quinhão Final q	L de q	Ômega (m)	Multidão (kN/m)
L1 = L7	0,46	0	1108	2,5484	12,742
L2 = L6	0,391	0	1267	2,4769	12,384
L3 = L5	0,269	0,025	1580	2,3226	11,613
L4	0,147	0,147	1580	2,3226	11,613

CIV para todas as longarinas

$$CIV = 1 + 1,06 \times \left(\frac{20}{L + 50} \right)$$

L (m)	26,3
CIV	1,277851

$$CNF = 1 - 0,05 \times (n - 2)$$

CNF para todas as longarinas

n° de faixas	3
CNF	0,942

Coeficiente de Impacto Adicional: CIA para os primeiros 5 m de extremidade de cada longarina

CIA	1,25	Sempre, para concreto
------------	------	-----------------------

➤ **Estimativa de protensão:**

Carga fixa:

	q (kN/m)	l (m)	Msk,g (kN.m)
Msk,g	36,95808	26,3	3195,442

Carga móvel: Foi considerada carga de 3 eixos centrados e multidão na peça toda

	P (kN)	q (kN/m)	l (m)	Msk,q (kN.m)
Msk,q	51,67	12,38	26,3	2090,10

Carga total: Considerado 100% da carga permanente + 50% da carga móvel sem coeficiente de impacto.

Msk (kN.m)		
Msk	Msk,g+0,5 Msk,q	4240,495

Estimativa de protensão considerando excentricidade igual à distância do CG da viga (sem a laje) menos 10 cm.

			ep (m)	P (kN)	P (tf)
Pi	Msk/ep		0,778636	5446,053	544,6053

5.11 CALCULO DOS CABOS DE PROTENSÃO:

Tensão de protensão Limite	
1402	MPa

Área=força/tensão	
3884,488	mm ²

CABOS										
Número de Cordoalha do Cabo	Diâmetro Interno Bainha		Consumo de Calda para Injeção				Seção Nominal de Aço do Cabo		Massa Nominal do Cabo	
	mm		Volume l / m		Peso kg / m		mm ²		kg	
Un.	12,7 mm	15,2 mm	12,7 mm	15,2 mm	12,7 mm	15,2 mm	12,7 mm	15,2 mm	12,7 mm	15,2 mm
2	30	35	0,5	0,7	1,0	1,3	197,4	280,0	1,570	2,204
3	35	40	0,7	0,9	1,3	1,6	296,1	420,0	2,355	3,306
4	40	45	0,9	1,1	1,7	2,0	394,8	560,0	3,140	4,408
5	45	50	1,2	1,3	2,1	2,4	493,5	700,0	3,925	5,510
6	50	60	1,5	2,1	2,6	3,8	592,2	840,0	4,710	6,612
7	55	65	1,8	2,5	3,2	4,5	690,9	980,0	5,495	7,714
8	60	70	2,1	2,8	3,7	5,0	789,6	1.120,0	6,280	8,816
9	65	75	2,4	3,1	4,3	5,5	888,3	1.260,0	7,065	9,918
10	70	80	2,7	3,6	4,9	6,4	987,0	1.400,0	7,850	11,020
11	75	85	3,0	4,1	5,5	7,4	1.085,7	1.540,0	8,635	12,122
12	80	90	3,4	4,7	6,1	8,3	1.184,4	1.680,0	9,420	13,224
15	90	100	4,1	5,5	7,4	10,0	1.480,5	2.100,0	11,775	16,530
16	95	105	4,4	5,9	8,0	10,8	1.579,2	2.240,0	12,560	17,632
18	100	110	5,0	6,6	9,2	12,0	1.776,6	2.520,0	14,130	19,836
19	105	115	5,3	7,0	9,8	12,8	1.875,3	2.660,0	14,915	20,938
20	110	120	5,7	7,6	10,6	13,7	1.974,0	2.800,0	15,700	22,040
21	115	125	6,0	8,1	11,3	14,6	2.072,7	2.940,0	16,485	23,142
22	120	130	6,4	8,6	12,1	15,6	2.171,4	3.080,0	17,270	24,244
24	125	135	6,8	9,1	12,9	16,6	2.368,8	3.360,0	18,840	26,448
25	130	140	7,2	9,6	13,7	17,6	2.467,5	3.500,0	19,625	27,550
27	135	145	7,6	10,1	14,5	18,6	2.664,9	3.780,0	21,195	29,754
30	140	150	8,0	10,6	15,3	19,6	2.961,0	4.200,0	23,550	33,060
31	145	155	8,4	11,1	16,1	20,6	3.059,7	4.340,0	24,335	34,162
37	150	160	8,8	11,6	16,9	21,6	3.651,9	5.180,0	29,045	40,774

Para enfição posterior do cabo, adotar para diâmetro da bainha o diâmetro subsequente.
As dimensões acima são apenas indicativas, em alguns casos devem ser de acordo com os padrões PROTENDE e conforme as condições de execução.

Dimensões sujeitas a modificações

Tabela 1. Tabela de Bainhas (PROTENDE, 2019)

		Diâmetro interno da bainha	
Número de cordoalhas do cabo	Seção total necessária por cabo	12,7 mm	15,2 mm
3	1294,829	3 cabos com 15 cordoalhas	3 cabos com 10 cordoalhas
4	971,1221	4 cabos com 10 cordoalhas	4 cabos com 7 cordoalhas

➤ Cálculo CG seção intermediária:

- A1 = 8510 cm², y1 = 85,1 cm

- $A2 = 60 \text{ cm}^2$, $y2 = 153 \text{ cm}$
- $A3 = 304 \text{ cm}^2$, $y3 = 162,2 \text{ cm}$

A total = 8874 cm.

Cabo C1				
Seção	x (m)	z (m)	ep (m)	alpha (rad)
S1	0,4	1,5	0,65	-0,175
S2	1,95	1,2298	0,348953	-0,166
S3	5,4	0,8877	0,009064	-0,131
S4	9	0,6	-0,27864	-0,073
S5	12,6	0,35	-0,52864	0
S6	16,2	0,25	-0,62864	0
S7	19,8	0,25	-0,62864	0
S8	23,4	0,25	-0,62864	0
S9	27	0,35	-0,52864	0
S10	30,6	0,6	-0,27864	0,073
S11	34,2	0,8877	0,009064	0,131
S12	37,65	1,2298	0,348953	0,166
S13	39,2	1,5	0,65	0,175

Cabo C2				
Seção	x (m)	z (m)	ep (m)	alpha (rad)
S1	0,4	1,1	0,25	-0,175
S2	1,84	0,8647	-0,01615	-0,152
S3	3,62	0,6162	-0,26244	-0,12915
S4	5,4	0,4	-0,47864	-0,1014
S5	8,1	0,15	-0,72864	-0,05545
S6	10,8	0,1	-0,77864	-0,01295
S7	13,55	0,1	-0,77864	0
S8	16,3	0,1	-0,77864	0
S9	19	0,1	-0,77864	0
S10	21,7	0,12	-0,75864	0,0159
S11	23,48	0,1634	-0,71524	0,02705
S12	25,26	0,2163	-0,66455	0,02655
S13	26,7	0,25	-0,6	0,0175

Cabo C3				
Seção	x (m)	z (m)	ep (m)	alpha (rad)
S1	0,4	0,25	-0,6	-0,0175
S2	1,84	0,2163	-0,66455	-0,02655
S3	3,62	0,1634	-0,71524	-0,02705
S4	5,4	0,12	-0,75864	-0,0159
S5	8,1	0,1	-0,77864	0
S6	10,8	0,1	-0,77864	0
S7	13,55	0,1	-0,77864	0
S8	16,3	0,1	-0,77864	0,01295
S9	19	0,15	-0,72864	0,05545
S10	21,7	0,4	-0,47864	0,1014
S11	23,48	0	-0,87864	0,12915
S12	25,26	0,8647	-0,01615	0,152
S13	26,7	1,1	0,25	0,175

➤ **Força limite no ato da protensão:**

De acordo com a NBR 6118:2014, cordoalhas de aço RB (relaxação baixa) devem apresentar tensão máxima de protensão igual a 74% do seu limite de ruptura (f_{ptk} , tabelado em 1900 MPa) ou a 82% do seu limite de escoamento.

Cabos	3
Diâmetro	15,2 mm
Cordoalhas	10
Área	2100 mm ²
Pi max	2944,62 kN
mi atrito	0,2
k	0,002

5.12 PERDAS IMEDIATAS DE PROTENSÃO DEVIDO AO ATRITO ENTRE CABO E BAINHA

$$\Delta P(X) = P_i \times (1 - e^{-g}) \quad g = (\mu \times \Sigma \Delta \alpha) + (k \times X) \quad P(X) = P_i - \Delta P(X)$$

As perdas de protensão devido ao atrito entre cabos e bainhas ocorrem já durante o serviço de protensão. Portanto, este tipo de perda existirá durante todo o tempo de aplicação da carga sobre o elemento de concreto.

Cabo C1							
Seção	x (m)	alpha (rad)	Soma delta alpha	g	Delta P(x) (kN)	P(x) (kN)	%
S1	0	0,175	0	0	0	2944,62	100,00%
S2	1,55	0,166	0,009	0,0049	14,39335	2930,227	99,51%
S3	5	0,131	0,044	0,0188	54,84173	2889,778	98,14%
S4	8,6	0,073	0,102	0,0376	108,6621	2835,958	96,31%
S5	12,2	0	0,175	0,0594	169,8169	2774,803	94,23%
S6	15,8	0	0,175	0,0666	189,7238	2754,896	93,56%
S7	19,4	0	0,175	0,0738	209,4878	2735,132	92,89%
S8	15,8	0	0,175	0,0666	189,7238	2754,896	93,56%
S9	12,2	0	0,175	0,0594	169,8169	2774,803	94,23%
S10	8,6	0,073	0,102	0,0376	108,6621	2835,958	96,31%
S11	5	0,131	0,044	0,0188	54,84173	2889,778	98,14%
S12	1,55	0,166	0,009	0,0049	14,39335	2930,227	99,51%
S13	0	0,175	0	0	0	2944,62	100,00%

Cabo C2							
Seção	x (m)	alpha (rad)	Soma delta alpha	g	Delta P(x) (kN)	P(x) (kN)	%
S1	0	0,175	0	0	0	2944,62	100,00%
S2	1,44	0,152	0,023	0,0075	21,94359	2922,676	99,25%
S3	3,22	0,12915	0,04585	0,0156	45,60862	2899,011	98,45%
S4	5	0,1014	0,0736	0,0247	71,89868	2872,721	97,56%
S5	7,7	0,05545	0,11955	0,0393	113,5074	2831,113	96,15%
S6	10,4	0,01295	0,16205	0,0532	152,5876	2792,032	94,82%
S7	13,15	0	0,175	0,0613	175,0841	2769,536	94,05%
S8	15,9	0	0,175	0,0668	190,2747	2754,345	93,54%
S9	18,6	0	0,175	0,0722	205,1081	2739,512	93,03%
S10	21,3	0,0159	0,1591	0,0744	211,183	2733,437	92,83%
S11	23,08	0,02705	0,14795	0,0758	214,8161	2729,804	92,70%
S12	24,86	0,02655	0,14845	0,0794	224,7889	2719,831	92,37%
S13	26,3	0,0175	0,1575	0,0841	237,5151	2707,105	91,93%

Cabo C3							
Seção	x (m)	alpha (rad)	Soma delta alpha	g	Delta P(x) (kN)	P(x) (kN)	%
S1	26,3	0,0175	0,1575	0,0841	237,5151	2707,105	91,93%
S2	24,86	0,02655	0,14845	0,0794	224,7889	2719,831	92,37%
S3	23,08	0,02705	0,14795	0,0758	214,8161	2729,804	92,70%
S4	21,3	0,0159	0,1591	0,0744	211,183	2733,437	92,83%
S5	18,6	0	0,175	0,0722	205,1081	2739,512	93,03%
S6	15,9	0	0,175	0,0668	190,2747	2754,345	93,54%
S7	13,15	0	0,175	0,0613	175,0841	2769,536	94,05%
S8	10,4	0,01295	0,16205	0,0532	152,5876	2792,032	94,82%
S9	7,7	0,05545	0,11955	0,0393	113,5074	2831,113	96,15%
S10	5	0,1014	0,0736	0,0247	71,89868	2872,721	97,56%
S11	3,22	0,12915	0,04585	0,0156	45,60862	2899,011	98,45%

➤ **Perda devido ao encunhamento:**

delta	6,1 mm	Ag p/ 6mm	1344
Ep	200 Gpa		
Ap	1120 mm ²		

Esta redução no comprimento do cabo é designada de δ , correspondendo a valores determinados pelos fabricantes através de ensaios práticos. É comum adotar-se em projeto valores situados entre 4 e 10 mm. Sendo:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{x}$$

Onde ε é a deformação total perdida pelo cabo e x seu comprimento antes de ocorrida a perda, a redução no comprimento do cabo δ nada mais é do que a somatória do produto entre deformações infinitesimais $\Delta\varepsilon$ e comprimentos infinitesimais dx :

$$\delta = \int_0^x \Delta\varepsilon \, dx \quad \text{mas} \quad \Delta\varepsilon = \frac{\Delta P}{E_p \times A_p} \quad \text{então} \quad \delta = \frac{1}{E_p \times A_p} \int_0^x \Delta P \, dx$$

Sendo ΔP o valor infinitesimal da perda de força de protensão, E_p o módulo de elasticidade do aço de protensão e A_p a área de protensão do cabo. A linha gráfica de forças de protensão após ocorridas as perdas por encunhamento é simétrica à linha após ocorridas apenas as perdas por atrito entre cabo e bainha. Assim:

$$\delta = \frac{A_g}{E_p \times A_p}$$

Onde A_g é a área gráfica contida entre a linha de forças considerando-se apenas as perdas por atrito e a linha de forças que considera tanto as perdas por atrito como por encunhamento, levando-se em conta o espelhamento rebatido entre ambas. Neste contexto, é possível determinar até qual distância a partir da ancoragem ativa se propaga o efeito da perda por encunhamento.

Cabo C1				
Seção	x (m)	Delta x	Ag até S (kN.m)	Delta até S (mm)
S1	0	0	0	0
S2	1,44	1,44	0,768658825	0,003431513
S3	3,22	1,78	45,18060757	0,201699141
S4	5	1,78	214,8722192	0,959250979
S5	7,7	2,7	558,2830528	2,492335057
S6	10,4	2,7	1055,515926	4,712124668
S7	13,15	2,75	1247,3352	5,568460712
S8	15,9	2,75	1010,717369	4,512131112
S9	18,6	2,7	62,95305336	0,281040417
S10	21,3	2,7	-1015,951849	-4,535499325
S11	23,08	1,78	-1932,121402	-8,625541973
S12	24,86	1,78	-2389,011707	-10,66523084
S13	26,3	1,44	-2416,320447	-10,78714485

✓ Resultado:

Cabo C1					
Seção	x (m)	Delta P(x) (kN)	P(x) (kN)	%	%
S1	0	195,918359	1374,32164	87,52%	87,52%
S2	1,44	194,850778	1374,85543	87,59%	87,56%
S3	3,22	175,789855	1384,38589	88,73%	88,16%
S4	5	134,502359	1405,02964	91,26%	89,48%
S5	7,7	80,4219123	1432,06986	94,68%	91,20%
S6	10,4	25,4790534	1459,54129	98,28%	92,95%
S7	13,15	9,18866924	1467,68649	99,38%	93,47%
S8	15,9	25,4790534	1459,54129	98,28%	92,95%
S9	18,6	80,4219123	1432,06986	94,68%	91,20%
S10	21,3	134,502359	1405,02964	91,26%	89,48%
S11	23,08	175,789855	1384,38589	88,73%	88,16%
S12	24,86	194,850778	1374,85543	87,59%	87,56%
S13	26,3	195,918359	1374,32164	87,52%	87,52%

Cabo C2				
Seção	x (m)	Delta x	Ag até S (kN.m)	Delta até S (mm)
S1	0	0	0	0
S2	1,44	1,44	16,85027051	0,075224422
S3	3,22	1,78	75,65737073	0,337756119
S4	5	1,78	190,8965574	0,852216774
S5	7,7	2,7	472,6861591	2,110206068
S6	10,4	2,7	849,88682	3,794137589
S7	13,15	2,75	1132,401567	5,05536414
S8	15,9	2,75	1367,721572	6,105899875
S9	18,6	2,7	1640,616807	7,324182174
S10	21,3	2,7	1769,873746	7,90122208
S11	23,08	1,78	1855,853462	8,285060098
S12	24,86	1,78	2110,802177	9,423224006
S13	26,3	1,44	2457,989667	10,97316816

✓ Resultado:

Cabo C2					
Seção	x (m)	Delta P(x) (kN)	P(x) (kN)	%	%
S1	0	201,4267261	1368,81327	87,17%	87,17%
S2	1,44	178,0235726	1380,51485	88,58%	87,92%
S3	3,22	152,7844738	1393,1344	90,12%	88,72%
S4	5	124,7457422	1407,15377	91,86%	89,61%
S5	7,7	80,36942699	1429,34192	94,68%	91,03%
S6	10,4	38,68979596	1450,18174	97,40%	92,35%
S7	13,15	14,69703609	1462,17812	99,00%	93,12%
S8	15,9	0	1468,77464	100,00%	93,54%
S9	18,6	0	1460,86463	100,00%	93,03%
S10	21,3	0	1457,62511	100,00%	92,83%
S11	23,08	0	1455,68776	100,00%	92,70%
S12	24,86	0	1450,36968	100,00%	92,37%
S13	26,3	0	1443,58337	100,00%	91,93%

✓ Resultado:

Ag até S5	2291,22451	kN.m
Delta até S5	5,45529645	mm
Ag até S6	1424,3079	kN.m
Delta até S6	3,39120928	mm
Ag até S7	1772,1546	kN.m
Delta até S7	4,2194157	mm

Com perda por atrito e encunhamento				
Cabo C1				
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)
S1	1374,322	-0,175	0,984727	1353,331
S2	1374,855	-0,1877	0,982436	1350,707
S3	1384,386	-0,17505	0,984718	1363,229
S4	1405,03	-0,12625	0,992041	1393,847
S5	1432,07	-0,06465	0,997911	1429,078
S6	1459,541	0	1	1459,541
S7	1467,686	0	1	1467,686
S8	1459,541	0	1	1459,541
S9	1432,07	0,06465	0,997911	1429,078
S10	1405,03	0,12625	0,992041	1393,847
S11	1384,386	0,17505	0,984718	1363,229
S12	1374,855	0,1877	0,982436	1350,707
S13	1374,322	0,175	0,984727	1353,331

Com Perda por atrito e encunhamento				
Cabo C2				
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)
S1	1570,24	-0,175	0,9847265	1546,257
S2	1558,538	-0,152	0,9884702	1540,569
S3	1545,919	-0,12915	0,9916717	1533,044
S4	1531,9	-0,1014	0,9948634	1524,031
S5	1509,711	-0,05545	0,998463	1507,391
S6	1488,872	-0,01295	0,9999161	1488,747
S7	1476,875	0	1	1476,875
S8	1468,775	0	1	1468,775
S9	1460,865	0	1	1460,865
S10	1457,625	0,0159	0,9998736	1457,441
S11	1455,688	0,02705	0,9996342	1455,155
S12	1450,37	0,02655	0,9996476	1449,859
S13	1443,583	0,0175	0,9998469	1443,362

Com perda por atrito apenas				
Cabo C3				
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)
S1	1443,583	-0,0175	0,999847	1443,362
S2	1450,37	-0,02655	0,999648	1449,859
S3	1455,688	-0,02705	0,999634	1455,155
S4	1457,625	-0,0159	0,999874	1457,441
S5	1460,865	0	1	1460,865
S6	1468,775	0	1	1468,775
S7	1476,875	0	1	1476,875
S8	1488,872	0,01295	0,999916	1488,747
S9	1509,711	0,05545	0,998463	1507,391
S10	1531,9	0,1014	0,994863	1524,031
S11	1545,919	0,12915	0,991672	1533,044
S12	1558,538	0,152	0,98847	1540,569
S13	1570,24	0,175	0,984727	1546,257

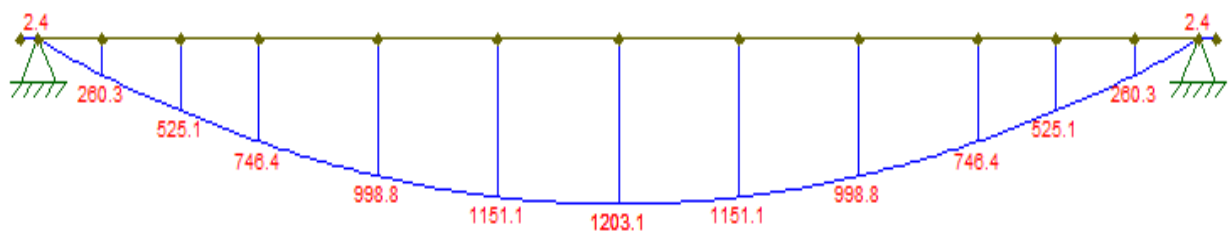
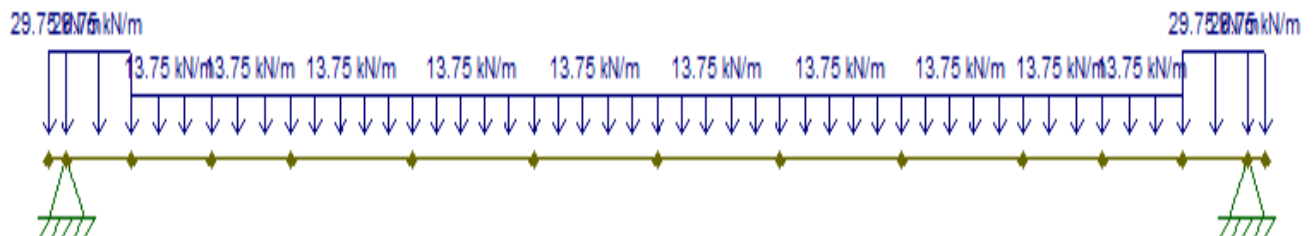
➤ **Perdas imediatas:**

Esta perda decorre da diminuição do comprimento do elemento protendido de acordo com a Lei de Hooke, encurtamento este que ocorre ao mesmo tempo em que a força é aplicada.

Em um elemento de concreto protendido com n cabos, o primeiro cabo tensionado sofre o efeito do encurtamento causado pela protensão dos $n-1$ cabos restantes, a seguir a formula:

$$\Delta\sigma_{p,el} = \frac{E_p}{E_{ci}} \times (\sigma_{c,p} + \sigma_{c,g}) \times \frac{n-1}{2 \times n} \quad \Delta P_{el}(x) = \Delta\sigma_{p,el} \times A_p$$

Para o cálculo das tensões normais, deve-se considerar sempre a componente horizontal das forças de protensão (no caso de cabos inclinados).



$$\sigma_{c,p} = \frac{P(x)}{A} \pm \frac{M_p}{I_y} \times e_p \quad M_p = P(x) \times e_p \quad \sigma_{c,g} = \frac{M_g}{I_y} \times e_p$$

Perdas imediatas								
Seção	Cabo C1		Cabo C2		Cabo C3		Cabo Médio	
	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%
S1	1343,092	85,53%	1368,813	87,17%	1443,583	91,93%	4155,489	88,21%
S2	1333,223	84,91%	1380,515	87,92%	1450,37	92,37%	4164,107	88,40%
S3	1306,093	83,18%	1393,134	88,72%	1455,688	92,70%	4154,915	88,20%
S4	1306,782	83,22%	1407,154	89,61%	1457,625	92,83%	4171,561	88,55%
S5	1307,326	83,26%	1429,342	91,03%	1460,865	93,03%	4197,532	89,11%
S6	1327,87	84,56%	1450,182	92,35%	1468,775	93,54%	4246,826	90,15%
S7	1337,54	85,18%	1462,178	93,12%	1462,178	93,12%	4261,897	90,47%
S8	1327,87	84,56%	1468,775	93,54%	1450,182	92,35%	4246,826	90,15%
S9	1307,326	83,26%	1460,865	93,03%	1429,342	91,03%	4197,532	89,11%
S10	1306,782	83,22%	1457,625	92,83%	1407,154	89,61%	4171,561	88,55%
S11	1306,093	83,18%	1455,688	92,70%	1393,134	88,72%	4154,915	88,20%
S12	1333,223	84,91%	1450,37	92,37%	1380,515	87,92%	4164,107	88,40%
S13	1343,092	85,53%	1443,583	91,93%	1368,813	87,17%	4155,489	88,21%

➤ Perdas Progressivas

São decorrentes da interação entre a retração do concreto, fluência do concreto e relaxação do aço de protensão.

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{[\varepsilon_{cs}(t, t_0) \times E_p] - [\alpha_p \times \sigma_{c,pg} \times \varphi(t, t_0)] - [\sigma_p \times \chi(t, t_0)]}{\chi_p + (\chi_c \times \alpha_p \times \eta \times \rho_p)}$$

Idade fictícia do concreto: Possui o objetivo de mensurar empregado no elemento estrutural, conforme formula:

Idade fictícia do concreto	
Temperatura média (°C)	22
Alpha	1
Delta t T (dias)	10
t (idade fictícia concreto) (dias)	10,67

$$t = \alpha \times \left(\frac{T + 10}{30} \times \Delta t_T \right)$$

Espessura fictícia: Velocidade da perda de água do concreto fresco na seção.

Espessura fictícia	
Umidade relativa (%)	70
gama	1,449328964
Ac seção cheia (cm²)	11900
mi seção cheia (cm)	480
h fic seção cheia (cm)	71,86256114
L seção cheia (cm)	368
Ac seção I (cm²)	5500
mi seção I (cm)	500
h fic seção I (cm)	31,88523721
L seção I (cm)	2342
h fic (m)	0,373138923

$$h_{fic} = \gamma \times \frac{2 \times A_c}{\mu} \quad \gamma = 1 + e^{(0,1 \times U - 7,8)}$$

Coeficiente de fluência do concreto: É a soma de três parcelas: fluência rápida, fluência lenta irreversível e fluência lenta reversível.

$$\varphi_{cca} = 0,8 \times \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} = \frac{9 \times t_0 \times (t_0 + 42)}{[(9 \times t_0) + 40] \times (t_0 + 61)}$$

Onde $f_c(t_0)$ é a resistência do concreto no instante da protensão e $f_c(t_\infty)$ é a resistência do concreto no tempo infinito. A razão entre ambos é chamada de coeficiente de aumento da resistência do concreto no tempo.

$$\varphi_{ccf} = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c} \times [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad \varphi_{1c} = 4,45 - (0,035 \times U) \quad \varphi_{2c} = \frac{0,42 + h_{fic}}{0,20 + h_{fic}}$$

Onde U é a umidade relativa média do ambiente em % e h_{fic} é a espessura fictícia do elemento.

Coefficiente de fluência do concreto	
$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} =$	0,518741
phi cca	0,385007
Slump (Abatimento)	12
phi 1c	2
multiplicador phi 1c	1,25
phi 2c (h _{fic} em m)	1,383851
A	285,8563
B	797,5793
C	581,1408
D	11068,85
Beta f t0	0,227857
t	10000
Beta f t	0,971999
phi ccf	2,574454
Beta d	0,995029
phi ccd	0,398012
phi (t,t0)	3,357473

Para o cálculo de φ_{1c} , deve ser utilizada a expressão acima caso o concreto apresente abatimento entre 5 e 9 cm e $U \leq 90\%$.

Deve ser adotado $\varphi_{1c} = 0,8$ quando o abatimento for de 5 a 9 cm e $U > 90\%$. Minorar o valor de φ_{1c} em 25% quando o abatimento do concreto estiver entre 0 e 4 cm e majorar em 25% para 10 a 15 cm.

$\beta_f(t)$ e $\beta_f(t_0)$ são os coeficientes de deformação lenta irreversível para as idades t e t₀ respectivamente, devendo ser calculados por:

$$\beta_f(t_0) = \frac{t_0^2 + (A \times t_0) + B}{t_0^2 + (C \times t_0) + D} \quad \beta_f(t) = \frac{t^2 + (A \times t) + B}{t^2 + (C \times t) + D}$$

$$A = (42 \times h_{fic}^3) - (350 \times h_{fic}^2) + (588 \times h_{fic}) + 113$$

$$B = (768 \times h_{fic}^3) - (3060 \times h_{fic}^2) + (3234 \times h_{fic}) - 23$$

$$C = -(200 \times h_{fic}^3) + (13 \times h_{fic}^2) + (1090 \times h_{fic}) + 183$$

$$D = (7579 \times h_{fic}^3) - (31916 \times h_{fic}^2) + (35343 \times h_{fic}) + 1931$$

Coeficiente de retração do concreto: Onde $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ é o coeficiente de retração do concreto entre as idades t_0 e t . U é a umidade relativa média do ambiente em %. ε_{s1} deve ser calculado através da expressão acima caso o abatimento do concreto esteja entre 5 e 9 cm e $U \leq 90\%$. Para qualquer valor de abatimento, caso $U > 90\%$, $\varepsilon_{s1} = 10^{-4}$. O valor de ε_{s1} deve ser minorado em 25% caso o abatimento seja de 0 a 4 cm ou majorado em 25% caso seja de 10 a 15 cm.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s1} \times \varepsilon_{s2} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \varepsilon_{s1} = \left(\frac{U^2}{1590} - \frac{U}{484} - 6,16 \right) \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{0,33 + (2 \times h_{fic})}{0,208 + (3 \times h_{fic})}$$

Coeficiente de retração do concreto	
Epsilon s1	-0,00032
multiplicador Epsilon s1	1,25
Epsilon s2	0,810806
B	44,05352
C	37,54626
D	255,8315
E	68,85514
Beta s(t0)	0,053384
Beta s(t)	1,002349
Epsilon cs (t,t0)	-0,00031

Coeficiente de relaxação do aço de protensão: Consiste na perda de tensão sem que ocorra a redução de comprimento.

σ_p / f_{ptk}	ψ_{1000}				
	Cordoalhas		Fios		Barras
	RN	RB	RN	RB	
0,5	0	0	0	0	0
0,6	0,035	0,013	0,025	0,01	0,015
0,7	0,07	0,025	0,05	0,02	0,04
0,8	0,12	0,035	0,085	0,03	0,07

Na tabela, observasse que as perdas progressivas de protensão devido a relaxação do aço não existem para tensão nos cabos, inferior ou igual a metade da sua resistência.

$$\psi(t, t_0) = 2,5 \times \psi_{1000}$$

Onde $\psi(t, t_0)$ é coeficiente de relaxação do aço de protensão. Para valores intermediários de σ_p / f_{ptk} , cabe interpolação linear.

Acima mostra a diferença entre aço de relaxação normal (Rn) e aço de relaxação baixa (Rb).

Coeficiente de relaxação do aço de protensão	
Força C1 (kN)	1322,024
Área C1 (m²)	0,00112
Tensão P1 (kN/m²)	1180378
Tensão P1 (MPa)	1180,378
Força C2 (kN)	1432,94
Área C2 (m²)	0,00112
Tensão P2 (kN/m²)	1279411
Tensão P2 (MPa)	1279,411
Força C3 (kN)	1432,94
Área C3 (m²)	0,00112
Tensão P3 (kN/m²)	1279411
Tensão P3 (MPa)	1279,411
Tensão P (MPa)	1246,4
f ptk (MPa)	1900
σ_p / f_{ptk}	0,656
Interpolação	0,01972
Tridente 1000	0,01972
Tridente (t,t0)	0,0493

Valores das perdas progressivas de protensão:

$$[\epsilon_{cs}(t, t_0) \times E_p] = -61994,01491$$

$$[\alpha_p \times \sigma_{c,pg} \times \varphi(t, t_0)] = 87.955,88$$

$$[\sigma_p \times \chi(t, t_0)] = 62526,17704$$

$$(\chi_c \times \alpha_p \times \eta \times \rho_p) = 0,057328142$$

$$XP = 1,05055674$$

$$\Delta \sigma_p(t, t_0) = -191785,3334$$

$$\text{delta p} = -805,4984005$$

Valores das perdas progressivas de protensão	
Ep (MPa)	200000
E ci (Mpa)	27094,39
Alpha p	7,381601
X (t,t0)	0,050557
Xp	1,050557
Xc	2,678737

Seção	Mp (kN.m)	Sigma C p (kN/m ²)	Mg (kN.m)	Sigma C g (kN/m ²)	Sigma c,pg (kN/m ²)	Sigma p (kN/m ²)	eta	rô p	delta sigma p (t,t0) (kN/m ²)	Delta p (kN)
S1	330,63 519	3.549, 74	-2,4	-0,77	3.548, 97	1236752 ,56	1,0268 22	0,0028 24	- 191785, 333	- 644,3 99
S2	- 528,47 05	4.956, 27	260,3	- 137,9 6	4.818, 30	1239317 ,63	1,0647 37	0,0037 92	- 215910, 165	- 725,4 58
S3	- 1391,6 87	9.954, 65	525,1	-903,6	9.051, 05	1236581 ,75	1,3279 88	0,0061 09	- 288056, 089	- 967,8 68
S4	- 2136,9 42	13.305 ,96	746,4	- 1.985, 18	11.320 ,77	1241536 ,03	1,7618 49	0,0061 09	- 320829, 596	- 1077, 99
S5	- 2867,0 08	17.883 ,57	998,8	- 3.555, 88	14.327 ,68	1249265 ,51	2,3460 27	0,0061 09	- 360015, 825	- 1209, 65
S6	- 3107,4 58	19.621 ,62	1.151, 10	- 4.392, 22	15.229 ,40	1263936 ,33	2,5412 39	0,0061 09	- 370770, 597	- 1245, 79
S7	- 3117,8 37	19.686 ,16	1.203, 10	- 4.589, 20	15.096 ,96	1268421 ,64	2,5405 1	0,0061 09	- 368543, 668	- 1238, 31
S8	- 3107,4 58	19.621 ,62	1.151, 10	- 4.392, 22	15.229 ,40	1263936 ,33	2,5412 39	0,0061 09	- 370770, 597	- 1245, 79
S9	- 2867,0 08	17.883 ,57	998,8	- 3.555, 88	14.327 ,68	1249265 ,51	2,3460 27	0,0061 09	- 360015, 825	- 1209, 65
S10	- 2136,9 42	13.305 ,96	746,4	- 1.985, 18	11.320 ,77	1241536 ,03	1,7618 49	0,0061 09	- 320829, 596	- 1077, 99
S11	- 1391,6 87	9.954, 65	525,1	-903,6	9.051, 05	1236581 ,75	1,3279 88	0,0061 09	- 288056, 089	- 967,8 68
S12	- 528,47 05	4.956, 27	260,3	- 137,9 6	4.818, 30	1239317 ,63	1,0647 37	0,0037 92	- 215910, 165	- 725,4 58
S13	330,63 519	3.549, 74	-2,4	-0,77	3.548, 97	1236752 ,56	1,0268 22	0,0028 24	- 191785, 333	- 644,3 99

Perdas totais								
Seção	Cabo C1		Cabo C2		Cabo C3		Cabo Médio	
	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%	P(x) (kN)	%
S1	1128,292	71,85%	1154,014	73,49%	1228,784	78,25%	3511,09	74,53%
S2	1091,403	69,51%	1138,695	72,52%	1208,55	76,97%	3438,649	73,00%
S3	983,4697	62,63%	1070,512	68,18%	1133,065	72,16%	3187,046	67,66%
S4	947,453	60,34%	1047,825	66,73%	1098,296	69,94%	3093,574	65,67%
S5	904,1078	57,58%	1026,124	65,35%	1057,647	67,36%	2987,879	63,43%
S6	912,6066	58,12%	1034,919	65,91%	1053,512	67,09%	3001,037	63,71%
S7	924,7716	58,89%	1049,409	66,83%	1049,409	66,83%	3023,59	64,19%
S8	912,6066	58,12%	1053,512	67,09%	1034,919	65,91%	3001,037	63,71%
S9	904,1078	57,58%	1057,647	67,36%	1026,124	65,35%	2987,879	63,43%
S10	947,453	60,34%	1098,296	69,94%	1047,825	66,73%	3093,574	65,67%
S11	983,4697	62,63%	1133,065	72,16%	1070,512	68,18%	3187,046	67,66%
S12	1091,403	69,51%	1208,55	76,97%	1138,695	72,52%	3438,649	73,00%
S13	1128,292	71,85%	1228,784	78,25%	1154,014	73,49%	3511,09	74,53%
Média	989,1875	63,00%	1100,104	70,06%	1100,104	70,06%	3189,395	67,71%

5.13 VERIFICAÇÃO DA TENSÃO NORMAL DE COMPRESSÃO MÁXIMA NO CONCRETO DURANTE A PROTENSÃO (FIBRA SUPERIOR):

Seção	Cabo C1				
	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1343,091958	-0,175	0,984726539	1322,578295	0,65
S2	1333,222694	-0,1877	0,982436013	1309,805988	0,348953
S3	1306,092518	-0,17505	0,984717832	1286,132593	0,009064
S4	1306,782171	-0,12625	0,992041049	1296,381555	-0,27864
S5	1307,325561	-0,06465	0,997910917	1304,594449	-0,52864
S6	1327,869697	0	1	1327,869697	-0,62864
S7	1337,540474	0	1	1337,540474	-0,62864
S8	1327,869697	0	1	1327,869697	-0,62864
S9	1307,325561	0,06465	0,997910917	1304,594449	-0,52864
S10	1306,782171	0,12625	0,992041049	1296,381555	-0,27864
S11	1306,092518	0,17505	0,984717832	1286,132593	0,009064
S12	1333,222694	0,1877	0,982436013	1309,805988	0,348953
S13	1343,091958	0,175	0,984726539	1322,578295	0,65

Cabo C2					
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1368,813	-0,175	0,984726539	1347,906758	0,25
S2	1380,515	-0,152	0,988470224	1364,597824	-0,016146501
S3	1393,134	-0,12915	0,991671725	1381,531993	-0,262436364
S4	1407,154	-0,1014	0,994863423	1399,925813	-0,478636364
S5	1429,342	-0,05545	0,998463043	1427,145086	-0,728636364
S6	1450,182	-0,01295	0,99991615	1450,060141	-0,778636364
S7	1462,178	0	1	1462,178119	-0,778636364
S8	1468,775	0	1	1468,774639	-0,778636364
S9	1460,865	0	1	1460,864632	-0,778636364
S10	1457,625	0,0159	0,999873598	1457,440862	-0,758636364
S11	1455,688	0,02705	0,999634171	1455,155224	-0,715236364
S12	1450,37	0,02655	0,999647569	1449,858523	-0,664546501
S13	1443,583	0,0175	0,999846879	1443,362327	-0,6

Cabo C3					
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1443,58337	-0,0175	0,999847	1443,362	-0,6
S2	1450,369677	-0,02655	0,999648	1449,859	-0,66455
S3	1455,687757	-0,02705	0,999634	1455,155	-0,71524
S4	1457,625109	-0,0159	0,999874	1457,441	-0,75864
S5	1460,864632	0	1	1460,865	-0,77864
S6	1468,774639	0	1	1468,775	-0,77864
S7	1462,178119	0	1	1462,178	-0,77864
S8	1450,181739	0,01295	0,999916	1450,06	-0,77864
S9	1429,341923	0,05545	0,998463	1427,145	-0,72864
S10	1407,153766	0,1014	0,994863	1399,926	-0,47864
S11	1393,1344	0,12915	0,991672	1381,532	-0,26244
S12	1380,514851	0,152	0,98847	1364,598	-0,01615
S13	1368,813274	0,175	0,984727	1347,907	0,25

Gama p	1,2
--------	-----

Seção	Mp (kN.m)	Mpk (kN.m)	Sigma C,p (kN/m²)	Mg (kN.m)	Sigma C g (kN/m²)	Sigma pg (kN/m²)	Limite (kN/m²)
S1	330,6351851	396,7622221	2.280,26	-2,4	7,118141374	2.287,38	33333,33333
S2	-528,4705066	-634,164608	7.140,74	260,3	-1020,332598	6.120,41	33333,33333
S3	-1391,687125	-1670,02455	15.175,53	525,1	-2414,637913	12.760,90	33333,33333
S4	-2136,942079	-2564,330495	19.344,18	746,4	-3432,27145	15.911,90	33333,33333
S5	-2867,008196	-3440,409835	23.443,42	998,8	-4592,916298	18.850,50	33333,33333
S6	-3107,458077	-3728,949692	24.868,61	1151,1	-5293,25786	19.575,35	33333,33333
S7	-3117,836687	-3741,404024	24.953,50	1203,1	-5532,37645	19.421,13	33333,33333
S8	-3107,458077	-3728,949692	24.868,61	1151,1	-5293,25786	19.575,35	33333,33333
S9	-2867,008196	-3440,409835	23.443,42	998,8	-4592,916298	18.850,50	33333,33333
S10	-2136,942079	-2564,330495	19.344,18	746,4	-3432,27145	15.911,90	33333,33333
S11	-1391,687125	-1670,02455	15.175,53	525,1	-2414,637913	12.760,90	33333,33333
S12	-528,4705066	-634,164608	7.140,74	260,3	-1020,332598	6.120,41	33333,33333
S13	330,6351851	396,7622221	2.280,26	-2,4	7,118141374	2.287,38	33333,33333

5.14 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PASSIVAS DE FLEXÃO SUPERIOR:

Seção	z (m)	Mpk (kN.m)	Sigma C,p (kN/m²)	Mg (kN.m)	Sigma C g (kN/m²)	Sigma pg (kN/m²)
S1	0,85	396,7622221	4633,7686	-2,4	-7,118141374	4.626,65
S2	0,8191535	-634,164608	2343,206709	260,3	948,8702248	3.292,08
S3	0,8213636	-1670,02455	317,1153981	525,1	2257,242995	2.574,36
S4	0,8213636	-2564,330495	-3470,996622	746,4	3208,543461	-262,45
S5	0,8213636	-3440,409835	-7166,344428	998,8	4293,533238	-2.872,81
S6	0,8213636	-3728,949692	-8308,324107	1151,1	4948,22398	-3.360,10
S7	0,8213636	-3741,404024	-8334,239195	1203,1	5171,755946	-3.162,48
S8	0,8213636	-3728,949692	-8308,324107	1151,1	4948,22398	-3.360,10
S9	0,8213636	-3440,409835	-7166,344428	998,8	4293,533238	-2.872,81
S10	0,8213636	-2564,330495	-3470,996622	746,4	3208,543461	-262,45
S11	0,8213636	-1670,02455	317,1153981	525,1	2257,242995	2.574,36
S12	0,8191535	-634,164608	2343,206709	260,3	948,8702248	3.292,08
S13	0,85	396,7622221	4633,7686	-2,4	-7,118141374	4.626,65

f _{yd} (Mpa)	434,7826087
-----------------------	-------------

$$A_{s,sup} = \frac{T}{f_{yd}} \quad f_{yd} = \frac{500}{1,15} \rightarrow f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$$

Seção	AT (m²)	T (kN)	A _{s,sup} (cm²)	Área 1 phi 12,5 mm	Número de barras	Barras adotadas	Área adotada (cm²)
S4	0,0217	2,85	0,07	1,22718463	0,05	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S5	0,1463	210,15	4,83	1,22718463	3,94	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S6	0,1587	266,62	6,13	1,22718463	5	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S7	0,1549	244,93	5,63	1,22718463	4,59	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S8	0,1587	266,62	6,13	1,22718463	5	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S9	0,1463	210,15	4,83	1,22718463	3,94	5 phi 12,5 mm	6,135923152
S10	0,0217	2,85	0,07	1,22718463	0,05	5 phi 12,5 mm	6,135923152

5.15 ESQUEMA DE CARREGAMENTO PERMANENTE:

L1 e L7		L2 a L6	
1	33,4938 kN/m	1	36,95808 kN/m
2	49,4938 kN/m	2	52,95808 kN/m
	48,4438 kN/m	3	51,71808 kN/m
4	18,21005625 kN	4	27,41826563 kN
5	3,73876 kN	5	4,393616 kN

5.16 TREM TIPO:

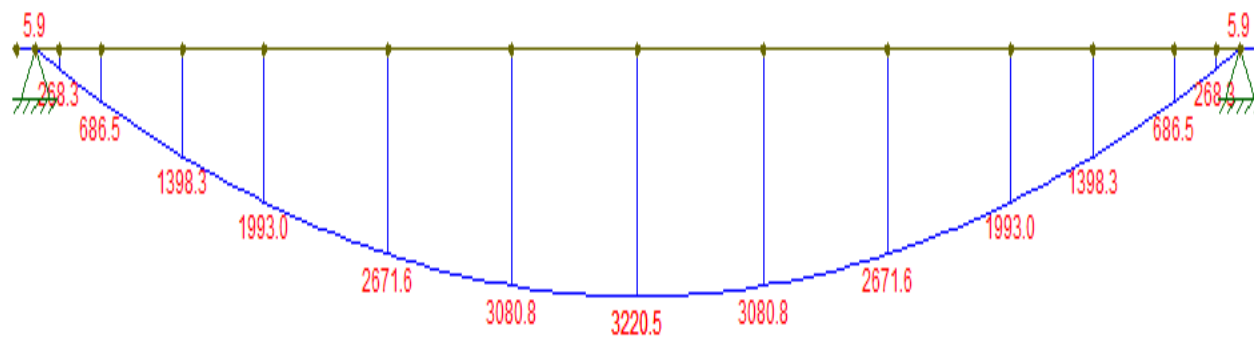
L1 = L7	Carga de Rodas (kN)	Multidão (kN/m)	Multidão (kN/m)
	59,625	6,7872	12,742
L2 = L6	51,675	7,20415	12,384925
L3 = L5	36,825	7,936	11,613
L4	22,05	9,408	11,613

Carga permanente		
Seção	L1 e L7	L2 a L6
	Peso Próprio (kN.m)	Peso Próprio (kN.m)
S1	-5,4	-5,9
S2	620,2	686,5
S3	1265,3	1398,3
S4	1804,2	1993
S5	2419,2	2671,6
S6	2790	3080,8
S7	2916,6	3220,5
S8	2790	3080,8
S9	2419,2	2671,6
S10	1804,2	1993
S11	1265,3	1398,3
S12	620,2	686,5
S13	-5,4	-5,9

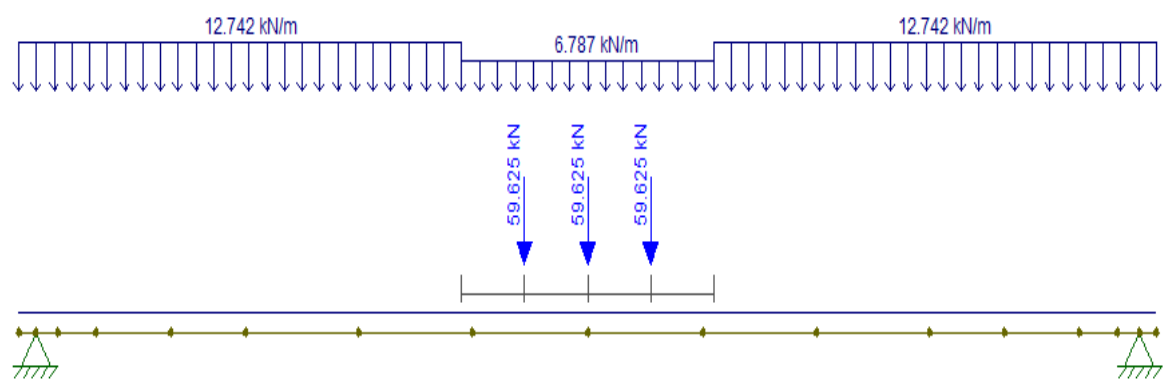
Gama g	1,35
Gama q	1,5
CIV	1,277851
CNF	0,942
CIA	1,25

✓ **Resultado:**

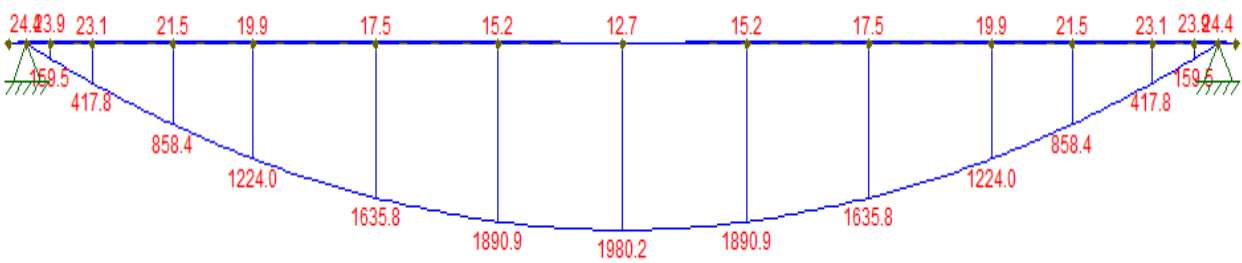
Seção	L1 e L7	L2 a L6
	Mgd (kN.m)	Mgd (kN.m)
S1	-7,29	-7,965
S2	837,27	926,775
S3	1708,155	1887,705
S4	2435,67	2690,55
S5	3265,92	3606,66
S6	3766,5	4159,08
S7	3937,41	4347,675
S8	3766,5	4159,08
S9	3265,92	3606,66
S10	2435,67	2690,55
S11	1708,155	1887,705
S12	837,27	926,775
S13	-7,29	-7,965



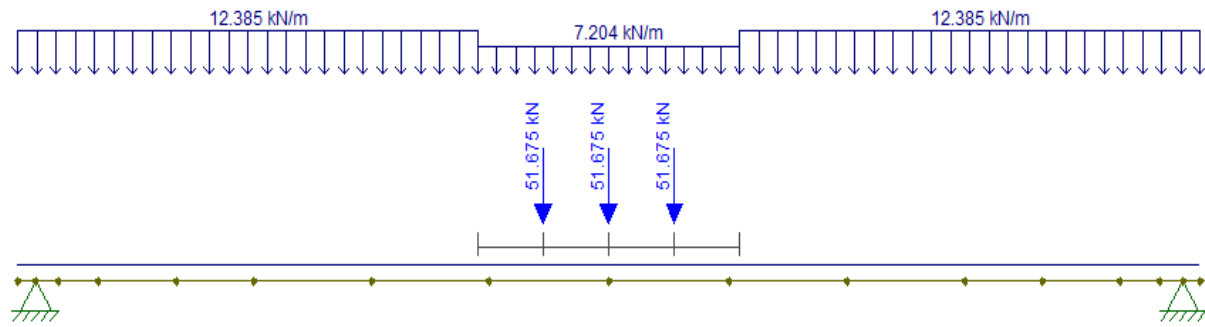
Carga móvel								
Seção	L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5		L4	
	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)
S1	0	24,4	0	21,2	0	15,4	0	9,6
S2	417,8	23,1	386	20,1	325,1	14,6	278	9,1
S3	858,4	21,5	793,5	18,8	669,3	13,6	573,8	8,5
S4	1224	19,9	1131,9	17,4	955,3	12,6	820,1	7,9
S5	1635,8	17,5	1513,2	15,3	1278,4	11,1	1099	7
S6	1890,9	15,2	1749,1	13,2	1477,4	9,7	1269,7	6,2
S7	1980,2	12,7	1831,5	11,1	1546,7	8,1	1328,9	5,3
S8	1890,9	15,2	1749,1	13,2	1477,4	9,7	1269,7	6,2
S9	1635,8	17,5	1513,2	15,3	1278,4	11,1	1099	7
S10	1224	19,9	1131,9	17,4	955,3	12,6	820,1	7,9
S11	858,4	21,5	793,5	18,8	669,3	13,6	573,8	8,5
S12	417,8	23,1	386	20,1	325,1	14,6	278	9,1
S13	0	24,4	0	21,2	0	15,4	0	9,6



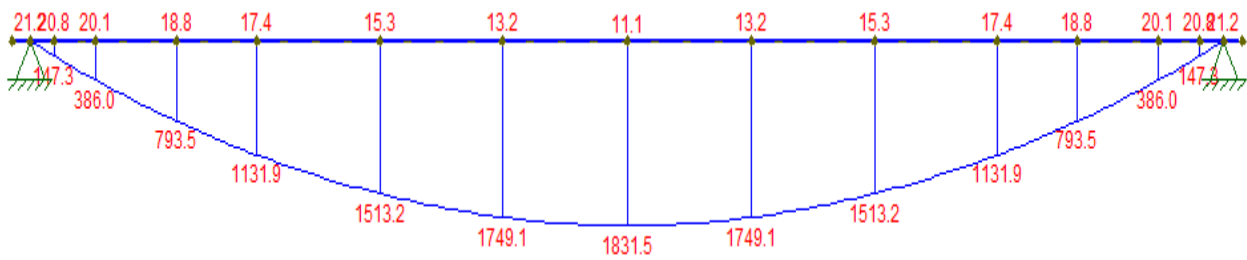
L1 E L7



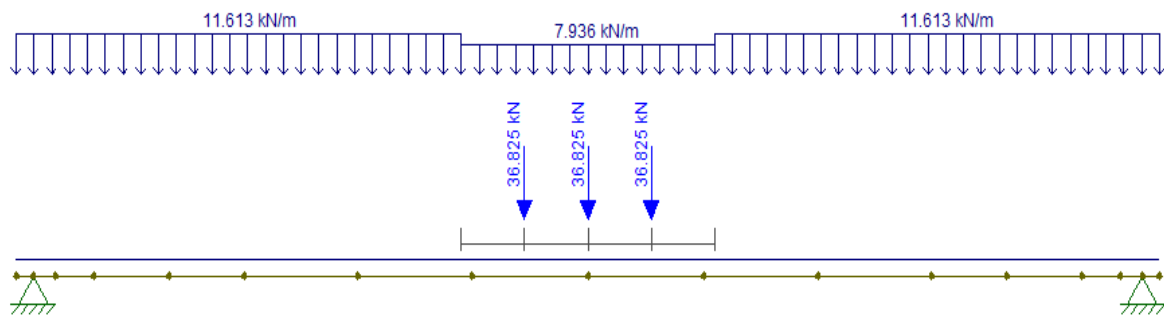
L1 E L7



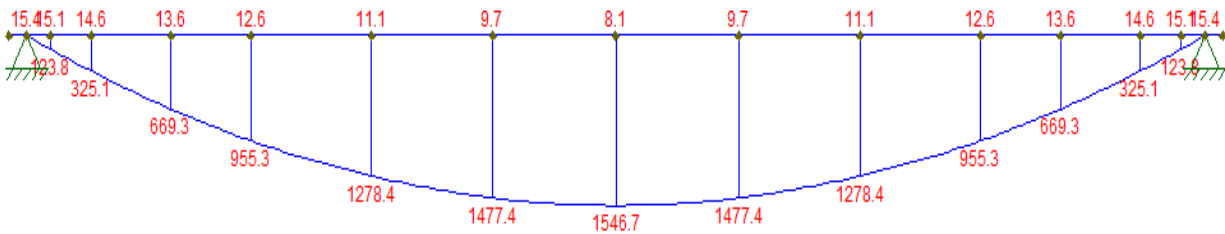
L2 E L6



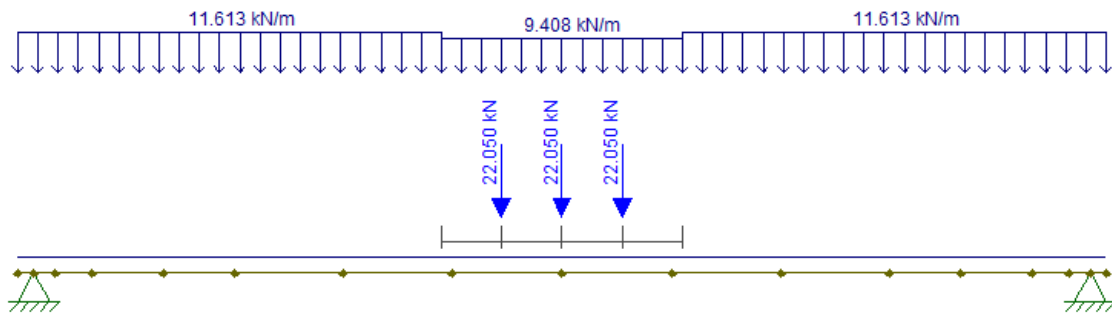
L2 E L6



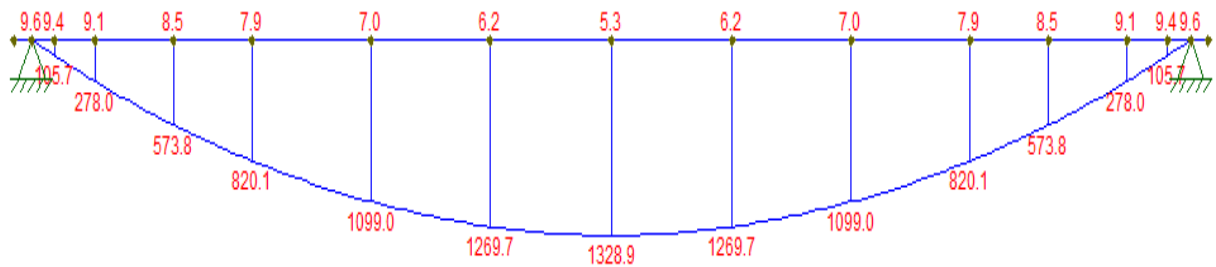
L3 E L5



L3 E L5



L4



Seção	L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5		L4	
	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)	Mqd + (kN.m)	Mqd - (kN.m)
S1	0	55,07088794	0	47,84847641	0	34,7578555	0	21,6672346
S2	942,9761058	52,13678326	871,2033912	45,36577244	733,7518717	32,95225262	627,447002	20,5387328
S3	1937,411894	48,52557749	1790,93236	42,43166776	1510,612512	30,69524902	1295,068668	19,18453064
S4	2762,572412	44,91437172	2554,70238	39,27186271	2156,115543	28,43824541	1850,968656	17,83032847
S5	2953,605197	31,59805046	2732,238283	27,62572412	2308,282726	20,04219201	1984,357569	12,63922018
S6	3414,214492	27,44516383	3158,180003	23,83395806	2667,5977	17,51434797	2292,573981	11,19473788
S7	3575,45483	22,93115662	3306,961681	20,04219201	2792,72598	14,62538336	2399,465672	9,569695282
S8	3414,214492	27,44516383	3158,180003	23,83395806	2667,5977	17,51434797	2292,573981	11,19473788
S9	2953,605197	31,59805046	2732,238283	27,62572412	2308,282726	20,04219201	1984,357569	12,63922018
S10	2762,572412	44,91437172	2554,70238	39,27186271	2156,115543	28,43824541	1850,968656	17,83032847
S11	1937,411	48,52557	1790,932	42,43166	1510,612	30,69524	1295,068	19,18453

	894	749	36	776	512	902	668	064
S12	942,9761 058	52,13678 326	871,2033 912	45,36577 244	733,7518 717	32,95225 262	627,4470 02	20,53873 28
S13	0	55,07088 794	0	47,84847 641	0	34,75785 55	0	21,66723 46

5.17 MOMENTOS DE FLETORES DE CÁLCULO DEVIDO AOS CARREGAMENTOS DE PROTENSÃO

SITUAÇÃO A:

Gama p	0,9
--------	-----

SITUAÇÃO B: Perdas Totais

Seção	Cabo C1			
	P(x) (kN)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1128,292384	0,984726539	1111,059455	0,65
S2	1091,403309	0,982436013	1072,233915	0,348953499
S3	983,4696984	0,984717832	968,4401495	0,009063636
S4	947,4530234	0,992041049	939,9122909	-0,278636364
S5	904,1078378	0,997910917	902,2190811	-0,528636364
S6	912,6066288	1	912,6066288	-0,628636364
S7	924,7715659	1	924,7715659	-0,628636364
S8	912,6066288	1	912,6066288	-0,628636364
S9	904,1078378	0,997910917	902,2190811	-0,528636364
S10	947,4530234	0,992041049	939,9122909	-0,278636364
S11	983,4696984	0,984717832	968,4401495	0,009063636
S12	1091,403309	0,982436013	1072,233915	0,348953499
S13	1128,292384	0,984726539	1111,059455	0,65

Seção	Cabo C2			
	P(x) (kN)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1154,0137	0,984726539	1136,387917	0,25
S2	1138,695465	0,988470224	1125,566562	-0,016146501
S3	1070,51158	0,991671725	1061,596065	-0,262436364
S4	1047,824618	0,994863423	1042,442387	-0,478636364
S5	1026,1242	0,998463043	1024,547091	-0,728636364
S6	1034,91867	0,99991615	1034,831892	-0,778636364
S7	1049,409211	1	1049,409211	-0,778636364
S8	1053,51157	1	1053,51157	-0,778636364
S9	1057,646908	1	1057,646908	-0,778636364

S10	1098,295962	0,999873598	1098,157135	-0,758636364
S11	1133,064937	0,999634171	1132,650429	-0,715236364
S12	1208,550292	0,999647569	1208,124362	-0,664546501
S13	1228,783797	0,999846879	1228,595644	-0,6

Seção	Cabo C3					
	P(x) (kN)	cos alpha	Px(x) (kN)	ep (m)	Px(x) (kN)	ep (m)
S1	1228,784	0,999847	1228,596	-0,6	3476,043	0,077424
S2	1208,55	0,999648	1208,124	-0,66455	3405,925	-0,1312
S3	1133,065	0,999634	1132,65	-0,71524	3162,687	-0,34146
S4	1098,296	0,999874	1098,157	-0,75864	3080,512	-0,51743
S5	1057,647	1	1057,647	-0,77864	2984,413	-0,68589
S6	1053,512	1	1053,512	-0,77864	3000,95	-0,73302
S7	1049,409	1	1049,409	-0,77864	3023,59	-0,73276
S8	1034,919	0,999916	1034,832	-0,77864	3000,95	-0,73302
S9	1026,124	0,998463	1024,547	-0,72864	2984,413	-0,68589
S10	1047,825	0,994863	1042,442	-0,47864	3080,512	-0,51743
S11	1070,512	0,991672	1061,596	-0,26244	3162,687	-0,34146
S12	1138,695	0,98847	1125,567	-0,01615	3405,925	-0,1312
S13	1154,014	0,984727	1136,388	0,25	3476,043	0,077424

Mpd+ (kN.m)	Mpd- (kN.m)
217,9938731	0
0	361,9638927
0	874,7486424
0	1291,096674
0	1658,062243
0	1781,803876
0	1794,604716
0	1781,803876
0	1658,062243
0	1291,096674
0	874,7486424
0	361,9638927
217,9938731	0

5.18 MOMENTO FLETOR DE CÁLCULO RESULTANTE:

SITUAÇÃO A:

Seção	L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5		L4	
	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)
S1	290,2816665	0	289,6066665	0	289,6066665	0	289,6066665	0
S2	1304,62265	0	1322,354935	0	1184,903416	0	1078,598546	0
S3	2393,048481	0	2426,118947	0	2145,7991	0	1930,255255	0
S4	3274,994541	0	3322,004509	0	2923,417672	0	2618,270785	0
S5	3639,21782	0	3758,590907	0	3334,63535	0	3010,710192	0
S6	4384,002223	0	4520,547734	0	4029,965431	0	3654,941712	0
S7	4706,811812	0	4848,583663	0	4334,347962	0	3941,087654	0
S8	4384,002223	0	4520,547734	0	4029,965431	0	3654,941712	0
S9	3639,21782	0	3758,590907	0	3334,63535	0	3010,710192	0
S10	3274,994541	0	3322,004509	0	2923,417672	0	2618,270785	0
S11	2393,048481	0	2426,118947	0	2145,7991	0	1930,255255	0
S12	1304,62265	0	1322,354935	0	1184,903416	0	1078,598546	0
S13	290,2816665	0	289,6066665	0	289,6066665	0	289,6066665	0

SITUAÇÃO B:

Seção	L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5		L4	
	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)	Md+ (kN.m)	Md- (kN.m)
S1	210,7038731	0	210,0288731	0	210,0288731	0	210,0288731	0
S2	1418,282213	0	1436,014499	0	1298,562979	0	1192,258109	0
S3	2770,818251	0	2803,888718	0	2523,56887	0	2308,025026	0
S4	3907,145737	0	3954,155705	0	3555,568869	0	3250,421981	0
S5	4561,462954	0	4680,83604	0	4256,880483	0	3932,955326	0
S6	5398,910616	0	5535,456127	0	5044,873823	0	4669,850105	0
S7	5718,260113	0	5860,031964	0	5345,796263	0	4952,535955	0
S8	5398,910616	0	5535,456127	0	5044,873823	0	4669,850105	0
S9	4561,462954	0	4680,83604	0	4256,880483	0	3932,955326	0
S10	3907,145737	0	3954,155705	0	3555,568869	0	3250,421981	0
S11	2770,818251	0	2803,888718	0	2523,56887	0	2308,025026	0
S12	1418,282213	0	1436,014499	0	1298,562979	0	1192,258109	0
S13	210,7038731	0	210,0288731	0	210,0288731	0	210,0288731	0

5.19 TENSÕES RESULTANTES:

Seções com laje:

	L1 e L7				L2 a L6			
	A (m²)	I (m4)	z cg (m)	y sup (m)	A (m²)	I (m4)	z cg (m)	y sup (m)
S1 e S13	1,5340	0,5286	1,0630	0,8370	1,6860	0,6042	1,1295	0,7705
S2 e S12	1,2300	0,4352	1,1379	0,7621	1,3820	0,4950	1,2107	0,6893

S3 a S11	0,8940	0,3719	1,2332	0,6668	1,0460	0,4141	1,3155	0,5845
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5
z ln (m)	AT (m²)	z ln (m)	AT (m²)	z ln (m)
0		0		0
0,019368409		0,093584918		0
0,516519074	0,200803815	0,642741755	0,226048	0,55485
0,705581446	0,238616289	0,820496218	0,261599	0,753001
0,753942251	0,24828845	0,873905542	0,272281	0,817758
0,830222761	0,263544552	0,943605913	0,286221	0,89833
0,856515353	0,268803071	0,967528657	0,291006	0,92624
0,830222761	0,263544552	0,943605913	0,286221	0,89833
0,753942251	0,24828845	0,873905542	0,272281	0,817758
0,705581446	0,238616289	0,820496218	0,261599	0,753001
0,516519074	0,200803815	0,642741755	0,226048	0,55485
0,019368409		0,093584918		0
0		0		0

SITUAÇÃO B:

Seção	L1 e L7		L2 e L6	
	Sigma c,inf (kN/m²)	Sigma c,sup (kN/m²)	Sigma c,inf (kN/m²)	Sigma c,sup (kN/m²)
S1	1615,646707	2373,0329	1462,91238	2123,386065
S2	-1216,158377	4975,687755	-1294,219759	4217,57104
S3	-6004,273578	8152,425828	-6185,770749	6678,438361
S4	-9855,1246	10107,31347	-9910,487112	8231,133676
S5	-12121,62031	11183,8635	-12301,59152	9174,030264
S6	-14881,995	12702,18692	-15002,20339	10394,40551
S7	-15918,18372	13297,62266	-16013,79185	10871,96724
S8	-14881,995	12702,18692	-15002,20339	10394,40551
S9	-12121,62031	11183,8635	-12301,59152	9174,030264
S10	-9855,1246	10107,31347	-9910,487112	8231,133676
S11	-6004,273578	8152,425828	-6185,770749	6678,438361
S12	-1216,158377	4975,687755	-1294,219759	4217,57104
S13	1615,646707	2373,0329	1462,91238	2123,386065

Seção	L3 e L5		L4	
	Sigma c,inf (kN/m²)	Sigma c,sup (kN/m²)	Sigma c,inf (kN/m²)	Sigma c,sup (kN/m²)
S1	1462,91238	2123,386065	1462,91238	2123,386065
S2	-958,0354461	4026,181278	-698,03083	3878,160625
S3	-5295,28885	6282,81603	-4610,57853	5978,613674
S4	-8644,310757	7668,59822	-7674,9617	7237,936874
S5	-10954,82727	8575,691305	-9925,82597	8118,527723
S6	-13443,78837	9702,034573	-12252,4641	9172,754327
S7	-14380,23794	10146,21369	-13130,9822	9591,195691
S8	-13443,78837	9702,034573	-12252,4641	9172,754327
S9	-10954,82727	8575,691305	-9925,82597	8118,527723
S10	-8644,310757	7668,59822	-7674,9617	7237,936874
S11	-5295,28885	6282,81603	-4610,57853	5978,613674
S12	-958,0354461	4026,181278	-698,03083	3878,160625
S13	1462,91238	2123,386065	1462,91238	2123,386065

L1 e L7		L2 e L6		L3 e L5
z ln (m)	AT (m²)	z ln (m)	AT (m²)	z ln (m)
0		0		0
0,373184486	0,172136897	0,446137677	0,186728	0,365206
0,805846015	0,258669203	0,913617333	0,280223	0,868972
0,937998489	0,285099698	1,037940641	0,305088	1,006822
0,988225723	0,295145145	1,08835144	0,31517	1,065726
1,025072651	0,30251453	1,122361909	0,321972	1,103577
1,035211853	0,304542371	1,131684786	0,323837	1,113999
1,025072651	0,30251453	1,122361909	0,321972	1,103577
0,988225723	0,295145145	1,08835144	0,31517	1,065726
0,937998489	0,285099698	1,037940641	0,305088	1,006822
0,805846015	0,258669203	0,913617333	0,280223	0,868972
0,373184486	0,172136897	0,446137677	0,186728	0,365206
0		0		0

SEM PERDA

Cabo C1				
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)

S1	1570,24	-0,175	0,984726539	1546,257
S2	1570,24	-0,1877	0,982436013	1542,660325
S3	1570,24	-0,17505	0,984717832	1546,243329
S4	1570,24	-0,12625	0,992041049	1557,742536
S5	1570,24	-0,06465	0,997910917	1566,959638
S6	1570,24	0	1	1570,24
S7	1570,24	0	1	1570,24
S8	1570,24	0	1	1570,24
S9	1570,24	0,06465	0,997910917	1566,959638
S10	1570,24	0,12625	0,992041049	1557,742536
S11	1570,24	0,17505	0,984717832	1546,243329
S12	1570,24	0,1877	0,982436013	1542,660325
S13	1570,24	0,175	0,984726539	1546,257

Cabo C2				
Seção	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)
S1	1570,24	-0,175	0,984726539	1522,640304
S2	1570,24	-0,152	0,988470224	1524,873797
S3	1570,24	-0,12915	0,991671725	1533,365789
S4	1570,24	-0,1014	0,994863423	1549,741073
S5	1570,24	-0,05545	0,998463043	1564,551287
S6	1570,24	-0,01295	0,99991615	1570,108335
S7	1570,24	0	1	1570,24
S8	1570,24	0	1	1570,24
S9	1570,24	0	1	1566,959638
S10	1570,24	0,0159	0,999873598	1557,545634
S11	1570,24	0,02705	0,999634171	1545,677668
S12	1570,24	0,02655	0,999647569	1542,116644
S13	1570,24	0,0175	0,999846879	1546,020236

Seção	Cabo C3				Cabo médio
	P(x) (kN)	alpha (rad)	cos alpha	Px(x) (kN)	Px(x) (kN)
S1	1570,24	-0,0175	0,999846879	1522,407156	4591,304461
S2	1570,24	-0,02655	0,999647569	1524,336385	4591,870507
S3	1570,24	-0,02705	0,999634171	1532,804839	4612,413956
S4	1570,24	-0,0159	0,999873598	1549,545182	4657,02879
S5	1570,24	0	1	1564,551287	4696,062212
S6	1570,24	0	1	1570,108335	4710,456671
S7	1570,24	0	1	1570,24	4710,72
S8	1570,24	0,01295	0,99991615	1570,108335	4710,588335

S9	1570,24	0,05545	0,998463043	1564,551287	4698,470563
S10	1570,24	0,1014	0,994863423	1549,545182	4664,833352
S11	1570,24	0,12915	0,991671725	1532,804839	4624,725836
S12	1570,24	0,152	0,988470224	1524,336385	4609,113354
S13	1570,24	0,175	0,984726539	1522,407156	4614,684392

Sigma p (Mpa)	1486,96
---------------	---------

SITUAÇÃO A:

L2 e L6							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,226048351	425,5873084	0	425,5873084	9,788508094	5 phi de 20 mm	14,25114785
S4	0,261599244	860,8986101	503,2805601	357,61805	8,225215149	5 phi de 20 mm	14,25114785
S5	0,272281108	1079,806116	503,4580456	576,3480707	13,25600563	5 phi de 20 mm	14,25114785
S6	0,286221183	1474,083912	463,7521934	1010,331719	23,23762953	9 phi de 20 mm	25,65206613
S7	0,291005731	1648,234479	448,8232883	1199,411191	27,58645739	10 phi de 20 mm	28,5022957
S8	0,286221183	1474,083912	463,8838582	1010,200054	23,23460124	9 phi de 20 mm	25,65206613
S9	0,272281108	1079,806116	505,8663957	573,9397205	13,20061357	5 phi de 20 mm	14,25114785
S10	0,261599244	860,8986101	511,0851216	349,8134885	8,045710235	5 phi de 20 mm	14,25114785
S11	0,226048351	425,5873084	0	425,5873084	9,788508094	5 phi de 20 mm	14,25114785
S12	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

Seção	L2 e L6						
	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25115
S2	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25115
S3	0,226048	425,5873	0	425,5873	9,788508	5 phi de 20 mm	14,25115
S4	0,261599	860,8986	503,2806	357,6181	8,225215	5 phi de 20 mm	14,25115
S5	0,272281	1079,806	503,458	576,3481	13,25601	5 phi de 20 mm	14,25115
S6	0,286221	1474,084	463,7522	1010,332	23,23763	9 phi de 20 mm	25,65207
S7	0,291006	1648,234	448,8233	1199,411	27,58646	10 phi de 20 mm	28,5023
S8	0,286221	1474,084	463,8839	1010,2	23,2346	9 phi de 20 mm	25,65207
S9	0,272281	1079,806	505,8664	573,9397	13,20061	5 phi de 20 mm	14,25115
S10	0,261599	860,8986	511,0851	349,8135	8,04571	5 phi de 20 mm	14,25115
S11	0,226048	425,5873	0	425,5873	9,788508	5 phi de 20 mm	14,25115
S12	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25115

S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25115
-----	---	---	---	---	---	----------------	----------

L3 e L5							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,20847006	299,67278	0	299,67278	6,89247394	5 phi de 20 mm	14,25114785
S4	0,248100243	659,4053317	503,2805601	156,1247715	3,590869745	5 phi de 20 mm	14,25114785
S5	0,261051609	859,4849419	503,4580456	356,0268963	8,188618615	5 phi de 20 mm	14,25114785
S6	0,277165918	1211,478118	463,7521934	747,7259245	17,19769626	7 phi de 20 mm	19,95160699
S7	0,282748089	1370,521693	448,8232883	921,698405	21,19906331	8 phi de 20 mm	22,80183656
S8	0,277165918	1211,478118	463,8838582	747,5942598	17,19466798	7 phi de 20 mm	19,95160699
S9	0,261051609	859,4849419	505,8663957	353,6185461	8,133226561	5 phi de 20 mm	14,25114785
S10	0,248100243	659,4053317	511,0851216	148,32021	3,411364831	5 phi de 20 mm	14,25114785
S11	0,20847006	299,67278	0	299,67278	6,89247394	5 phi de 20 mm	14,25114785
S12	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

L4							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,191481531	209,6973189	0	209,6973189	4,823038334	5 phi de 20 mm	14,25114785
S4	0,234988112	510,6629197	503,2805601	7,382359558	0,16979427	5 phi de 20 mm	14,25114785
S5	0,250340343	695,4189544	503,4580456	191,9609088	4,415100903	5 phi de 20 mm	14,25114785
S6	0,268604246	1014,058108	463,7521934	550,3059149	12,65703604	5 phi de 20 mm	14,25114785
S7	0,274978952	1161,104021	448,8232883	712,2807329	16,38245686	6 phi de 20 mm	17,10137742
S8	0,268604246	1014,058108	463,8838582	550,1742502	12,65400775	5 phi de 20 mm	14,25114785
S9	0,250340343	695,4189544	505,8663957	189,5525586	4,359708849	5 phi de 20 mm	14,25114785
S10	0,234988112	510,6629197	511,0851216	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S11	0,191481531	209,6973189	0	209,6973189	4,823038334	5 phi de 20 mm	14,25114785
S12	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

SITUAÇÃO B:

L1 e L7							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0,172136897	104,6728648	0	104,6728648	2,407475891	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,258669203	776,5603304	0	776,5603304	17,8608876	7 phi de 20 mm	19,95160699
S4	0,285099698	1404,846523	1576,516978	0	0	7 phi de 20 mm	19,95160699
S5	0,295145145	1788,818689	1711,649133	77,1695568	1,774899806	7 phi de 20 mm	19,95160699
S6	0,30251453	2251,009863	1709,506579	541,5032832	12,45457551	7 phi de 20 mm	19,95160699
S7	0,304542371	2423,880703	1687,130012	736,7506907	16,94526589	9 phi de 20 mm	25,65206613
S8	0,30251453	2251,009863	1709,638244	541,3716184	12,45154722	7 phi de 20 mm	19,95160699
S9	0,295145145	1788,818689	1714,057483	74,76120661	1,719507752	7 phi de 20 mm	19,95160699
S10	0,285099698	1404,846523	1584,321539	0	0	7 phi de 20 mm	19,95160699
S11	0,258669203	776,5603304	0	776,5603304	17,8608876	7 phi de 20 mm	19,95160699
S12	0,172136897	104,6728648	0	104,6728648	2,407475891	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

L2 e L6							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0,186727535	120,8332329	0	120,8332329	2,779164357	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,280223467	866,6990616	0	866,6990616	19,93407842	7 phi de 20 mm	19,95160699
S4	0,305088128	1511,785981	1576,516978	0	0	7 phi de 20 mm	19,95160699
S5	0,315170288	1938,548072	1711,649133	226,898939	5,218675596	7 phi de 20 mm	19,95160699
S6	0,321972382	2415,147578	1709,506579	705,6409986	16,22974297	7 phi de 20 mm	19,95160699
S7	0,323836957	2592,928812	1687,130012	905,7987998	20,8333724	8 phi de 20 mm	22,80183656
S8	0,321972382	2415,147578	1709,638244	705,5093339	16,22671468	7 phi de 20 mm	19,95160699
S9	0,315170288	1938,548072	1714,057483	224,4905888	5,163283542	7 phi de 20 mm	19,95160699
S10	0,305088128	1511,785981	1584,321539	0	0	7 phi de 20 mm	19,95160699

S11	0,280223467	866,6990616	0	866,6990616	19,93407842	7 phi de 20 mm	19,95160699
S12	0,186727535	120,8332329	0	120,8332329	2,779164357	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

L3 e L5							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0,17054126	81,69228604	0	81,69228604	1,878922579	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,271294398	718,2910994	0	718,2910994	16,52069529	6 phi de 20 mm	17,10137742
S4	0,298864336	1291,738098	1576,516978	0	0	6 phi de 20 mm	17,10137742
S5	0,310645101	1701,531715	1711,649133	0	0	6 phi de 20 mm	17,10137742
S6	0,3182154	2139,01025	1709,506579	429,5036702	9,878584413	6 phi de 20 mm	17,10137742
S7	0,320299877	2302,994225	1687,130012	615,8642125	14,16487689	6 phi de 20 mm	17,10137742
S8	0,3182154	2139,01025	1709,638244	429,3720054	9,875556124	6 phi de 20 mm	17,10137742
S9	0,310645101	1701,531715	1714,057483	0	0	6 phi de 20 mm	17,10137742
S10	0,298864336	1291,738098	1584,321539	0	0	6 phi de 20 mm	17,10137742
S11	0,271294398	718,2910994	0	718,2910994	16,52069529	6 phi de 20 mm	17,10137742
S12	0,17054126	81,69228604	0	81,69228604	1,878922579	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

L4							
Seção	AT (m²)	T (kN)	Ta (kN)	Tp (kN)	As inf (cm²)	Barras	cm²
S1	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S2	0,155463422	54,25913063	0	54,25913063	1,247960005	5 phi de 20 mm	14,25114785
S3	0,262953588	606,1840837	0	606,1840837	13,94223393	5 phi de 20 mm	14,25114785
S4	0,29306798	1124,64276	1576,516978	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S5	0,306530145	1521,282437	1711,649133	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S6	0,314811034	1928,605446	1709,506579	219,0988662	5,039273923	5 phi de 20 mm	14,25114785
S7	0,31709925	2081,912302	1687,130012	394,7822897	9,079992664	5 phi de 20 mm	14,25114785
S8	0,314811034	1928,605446	1709,638244	218,9672015	5,036245634	5 phi de 20 mm	14,25114785
S9	0,306530145	1521,282437	1714,057483	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S10	0,29306798	1124,64276	1584,321539	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785
S11	0,262953588	606,1840837	0	606,1840837	13,94223393	5 phi de 20 mm	14,25114785
S12	0,155463422	54,25913063	0	54,25913063	1,247960005	5 phi de 20 mm	14,25114785
S13	0	0	0	0	0	5 phi de 20 mm	14,25114785

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

PROTENDE. Sistemas e Metodos. Disponível em: <https://www.protende.com.br/>. Acesso em 08/05/2019.

Notas de aula do Prof. Eduardo C. S. Thomaz sobre pontes em concreto protendido

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR-6118, 2014

DNIT, Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais, 1996;

DNIT, Normas para Projeto de Estradas de Rodagem, 1973;

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR-7188, 2013;