



**AFOGADOS  
DA INGAZEIRA**  
PREFEITURA



PORTAL DA TRANSPARENCIA  
<http://cloud.it-solucoes.inf.br/transparenciaMunicipal/download/1-20230307102049.pdf>  
assinado por: idUser 97

# PONTE SOBRE O RIO PAJEÚ

PROJETO EXECUTIVO ESTRUTURAL  
RELATÓRIO DO PROJETO



MARÇO / 2022

# PONTE SOBRE O RIO PAJEÚ

## MEMÓRIA DESCRITIVA

### 1. Introdução

O documento aqui apresentado compreende a memória descritiva do projeto executivo da Ponte sobre o Rio Pajeú na área urbana do Município de Afogados da Ingazeira no Estado da Pernambuco.

### 2. Premissas adotadas no projeto

O projeto executivo da obra de arte especial foi desenvolvido com base nos seguintes elementos:

- Estudos topográficos / traçado viário;
- estudos geotécnicos.

### 3. Normas técnicas utilizadas

O projeto foi desenvolvido em conformidade com as normas técnicas relativas ao assunto:

- NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto
- NBR 6122:2019 - Projeto e execução de fundações
- NBR 7187:2003 - Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido
- NBR 7188:2013 - Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre
- NBR 7480:2007 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado
- NBR 7483:2021 - Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido
- NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço
- NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas
- NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais
- CEN-EN 1337-3 – Structural Bearings – Part 3: Elastomeric Bearings



#### 4. Bibliografia

- Menn, C., *Prestressed Concrete Bridges*, Birkhäuser Verlag, Basel, 1986.
- Benaim, R., *The Design of Prestressed Concrete Bridges: Concepts and Principles*, CRC Press, 2007.
- Hambly, E.C., *Bridge Deck Behaviour*, E & FN Spon, London, 1991.
- O'Brien, J.E., Keogh, D.L., *Bridge Deck Analysis*, 2nd ed., CRC Press, London, 2015.
- Surana, C.S., Agrawal, R., *Grillage Analogy in Bridge Deck Analysis*, Narosa, London, 1998.
- Falconi, F. et al., *Fundações – Teoria e Prática*, Oficina de Textos, São Paulo, 2019.
- Velloso, D.A., Lopes, F.R., *Fundações*, Oficina de Textos, São Paulo, 2011.
- Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 5th. ed., McGraw-Hill, 1996.

#### 5. Ações

As ações consideradas no projeto foram as previstas na NBR 7187:

- peso próprio dos elementos estruturais
- sobrecargas permanentes (barreiras e revestimento)
- empuxos de terra
- retração e fluência
- pressão da água nos pilares
- vento
- variação de temperatura
- carga móvel

A carga móvel utilizada no dimensionamento foi aquela correspondente ao trem tipo Classe 450 kN conforme previsto na NBR 7188:2013. A carga móvel prevista no referido trem tipo apresenta a seguinte composição:

- Veículo principal: 450 kN (três eixos com duas rodas de 75 KN cada)
- Carga distribuída na pista: 5 kN/m<sup>2</sup>
- Carga distribuída nos passeios: 3 kN/m<sup>2</sup>
- Coeficiente de impacto vertical:

$$CIV = 1 + 1,06 * \left( \frac{20}{Liv + 50} \right) \text{ para vãos maiores que 10m}$$

$$CIV = 1,35 \text{ para vãos menores que 10m}$$



- Coeficiente de número de faixas:  $CNF = 1 - 0,05 \cdot (n - 2) \geq 0,9$  ( $n$  é o número de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre um tabuleiro transversalmente contínuo).
- Coeficiente de impacto adicional:  $CIA = 1,25$ , aplicado em elementos estruturais situados a uma distância de até 5,00m de extremidades e juntas.

As combinações para os estados limites últimos são dadas pela seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \cdot [ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} ]$$

onde:

$F_{Gi,k}$  : valor característico das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$  : valor característico da ação variável principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$  : valores das demais ações variáveis.

As combinações para os estados limites de serviços determinadas pela seguinte expressão:

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k}$$

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação e redução são aqueles especificados na NBR 8681.

## 6. Processos de cálculo

As atividades de análise estrutural e dimensionamento dos diversos elementos estruturais foram realizados com auxílio de programas de computador. A análise estrutural da superestrutura e pórticos da infraestrutura foi realizada com auxílio do software comercial de elementos finitos. O dimensionamento da protensão das vigas foi realizado com o programa Vepro1 laborado pela Arcus Consultoria e Projetos Ltda. Todas as demais rotinas de determinação de esforços e dimensionamento estão discriminadas na memória de cálculo com as respectivas expressões matemáticas.



## 7. Concepção estrutural

O tabuleiro da ponte projetada possui extensão total de 100,4m com cinco vãos de 20,10 m (Figura 1). A largura total do tabuleiro é de 10,00m, sendo duas pistas de rolamento de 3,50m e passeios de 1,50m. A seção da superestrutura é composta por cinco vigas pré-moldadas em concreto protendido com laje de concreto armado e ligação nos apoios através de transversinas de concreto protendido. Os aterros dos acessos ficarão confinados em encontros de concreto em cada uma das extremidades da ponte. Com relação à agressividade ambiental do local de implantação a estrutura foi adotada a Classe de Agressividade Ambiental II (agressividade moderada).

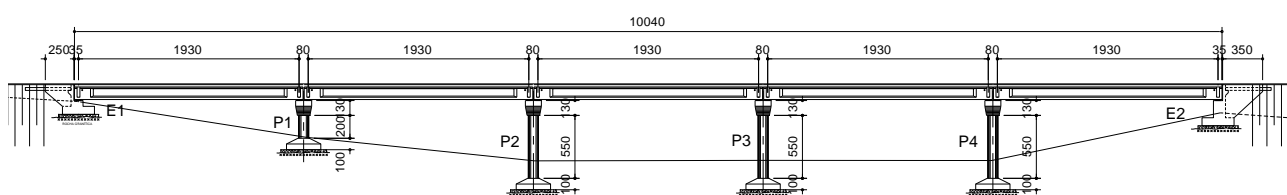


Figura 1 – Elevação da ponte projetada

### 5.1 Superestrutura

A superestrutura é composta por cinco vigas pré-moldadas de concreto protendido moldadas no canteiro de obras (pós-tensionadas). As vigas principais são ligadas nos apoios por transversinas executadas no local também em concreto protendido. O uso de protensão nas transversinas tem como objetivo facilitar a montagem das vigas, evitando esperas em armações grossas de aço CA-25 e resistir aos esforços atuantes nas mesmas durante eventuais operações de macaqueamento da superestrutura para substituição dos aparelhos de apoio. Este tipo de solução é a mais utilizada atualmente neste tipo de obra de arte especial.

As lajes são em concreto armado, compostas por pré-lajes e por uma concretagem complementar feita no local. As pré-lajes funcionam como formas para laje moldada no local e alojam a armadura positiva da laje do tabuleiro. A seção transversal da superestrutura é apresentada na Figura 2.



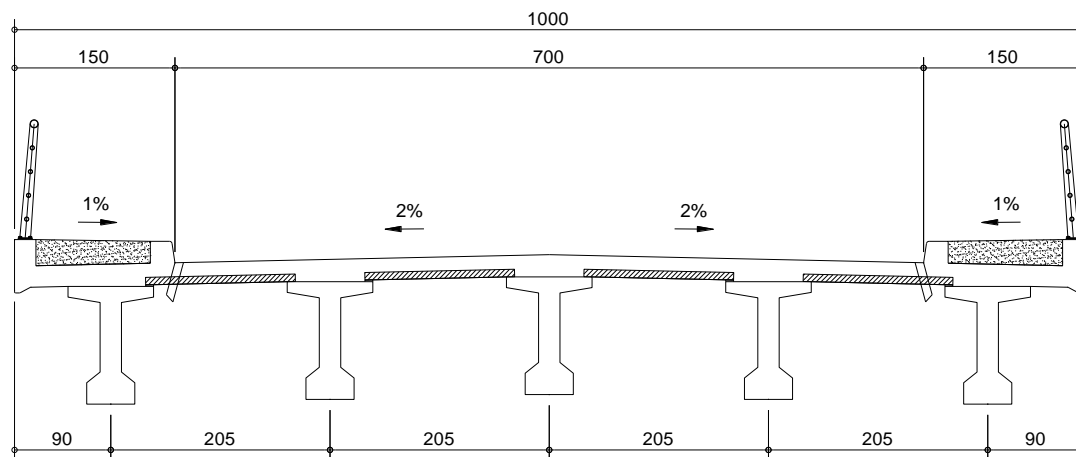


Figura 2 – Seção transversal da superestrutura

Este é o tipo de superestrutura mais utilizado atualmente para obras de arte especiais com vãos pequenos e médios. A utilização de vigas pré-moldadas de concreto para construção de pontes teve início na década de 30 do século passado. Contudo esta técnica teve seu grande desenvolvimento a partir da década de 50 com o avanço da tecnologia da protensão e o desenvolvimento dos sistemas de transporte e montagem das estruturas. A técnica de construção de pontes em vigas pré-moldadas se difundiu rapidamente em função das diversas vantagens que apresenta, dentre as quais podemos destacar:

- melhor controle da execução tanto para as vigas pré-fabricadas como para as pré-moldadas no canteiro de obras;
- otimização obtida na utilização das formas em função do reaproveitamento e do uso de seções padronizadas;
- redução dos prazos de construção com a execução das vigas simultaneamente com a infraestrutura;
- possibilidade da eliminação dos cimbramentos, o que é especialmente vantajoso no caso da obra por se tratar de um rio sujeito a vazões elevadas nos períodos chuvosos.

## Materiais

Os materiais especificados no projeto da superestrutura da obra de arte especial foram:

- Concreto  $f_{ck} = 35$  MPa, relação água/cimento máxima: 0,55
- Aço CP 190 RB (armações ativas – vigas e transversinas)
- Aço CA 50 (armações passivas)
- Juntas expansíveis de elastômero (tipo JEENE JJ5070VV)



## 5.2 Mesoestrutura

A mesoestrutura da obra de arte é constituída por pilares e travessas de concreto armado formando pórticos que serve de apoio para as vigas pré-moldadas. Foram previstos pórticos com dois pilares de seção circular ( $D=0,90m$ ) em cada um dos quatro apoios intermediários. A transmissão dos esforços da superestrutura para a mesoestrutura será feita através de aparelhos de apoio de elastômero fretados (aparelhos de apoio laminados, segundo a norma EN-1337).

### Materiais

Os materiais especificados na mesoestrutura das obras de arte especiais foram:

- Concreto fck = 30 MPa, relação água/cimento máxima: 0,60
- Aço CA 50
- Aparelhos de apoio de elastômero ( $G=0,9$  GPa) fretados com chapas de aço ASTM A36 ( $f_y=250$  MPa).

## 5.2 Infraestrutura

A infraestrutura é composta pelos encontros em concreto armado nas extremidades da ponte e por sapatas de concreto armado nos apoios intermediários. Os encontros têm ao mesmo tempo a função de suportar os esforços verticais e horizontais da superestrutura e fazer a contenção dos aterros dos acessos à ponte. Os encontros são compostos pelos seguintes elementos: paredes, alas, placas de transição e sapatas. As paredes frontais além fazer a contenção dos aterros de acesso funcionam como apoio das vigas da superestrutura.

As sapatas das fundações serão apoiadas na camada de rocha granítica que se encontra superficial ao longo de toda a obra. Para regularização da superfície de assentamento das sapatas foi previsto o preenchimento com concreto fck=20 MPa entre a cota de assentamento da sapata e o horizonte rochoso. A profundidade de rocha em cada apoio deverá ser confirmada durante a construção.

### Materiais

- Concreto fck = 30 MPa, relação água/cimento máxima: 0,60
- Aço CA-50



β



**PREFEITURA MUNICIPAL DE AFOGADOS DA INGAZEIRA**  
**PONTE SOBRE O RIO PAJEÚ**

**MEMÓRIA DE CÁLCULO DA ESTRUTURA**



## MEMÓRIA DE CÁLCULO

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Descrição da Estrutura

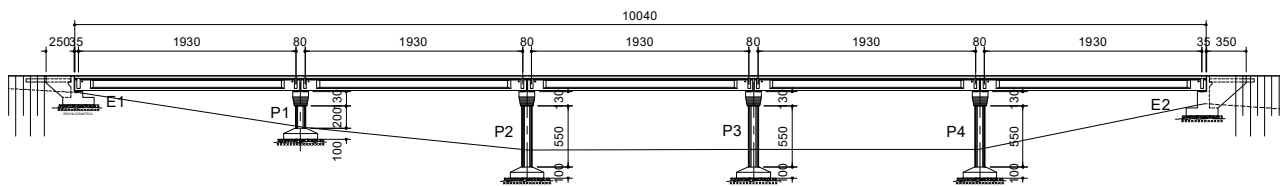
A estrutura projetada consiste em uma ponte de 100,40m de comprimento com cinco vãos de 19,30m. A largura total do tabuleiro é de 10,00m, sendo duas pistas de rolamento de 3,50m e passeios de 1,50m. A seção da superestrutura é composta por cinco vigas pré-moldadas em concreto protendido com laje de concreto armado e ligação nos apoios através de transversinas de concreto protendido.

A infraestrutura é constituída por encontros de concreto armado nas extremidades e nos apoios intermediários por pórticos formados por dois pilares e viga travessa. Os pilares têm seção circular com diâmetro de 0,90m. A transmissão dos esforços da superestrutura para a infraestrutura se dá por intermédio de aparelhos de apoio de neoprene fretado. As fundações são diretas, constituídas por sapatas de concreto armado assentadas diretamente sobre a camada rocha granítica.

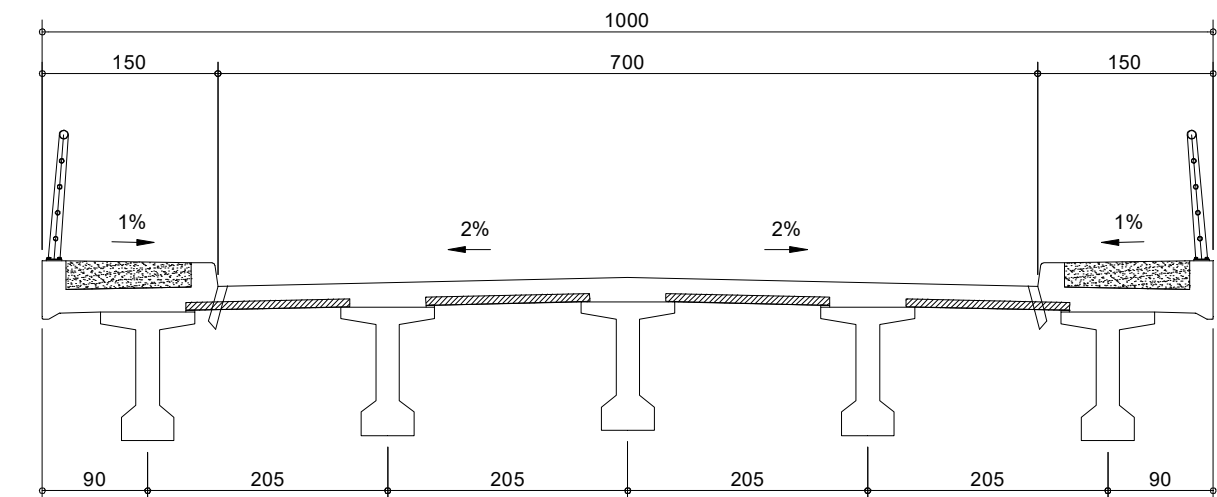
No projeto da obra de arte especial foi considerada a classe de agressividade ambiental moderada (CAA II) conforme a NBR 6118:2014.

Nas figuras a seguir são apresentadas as características geométricas da obra em estudo.

#### Elevação



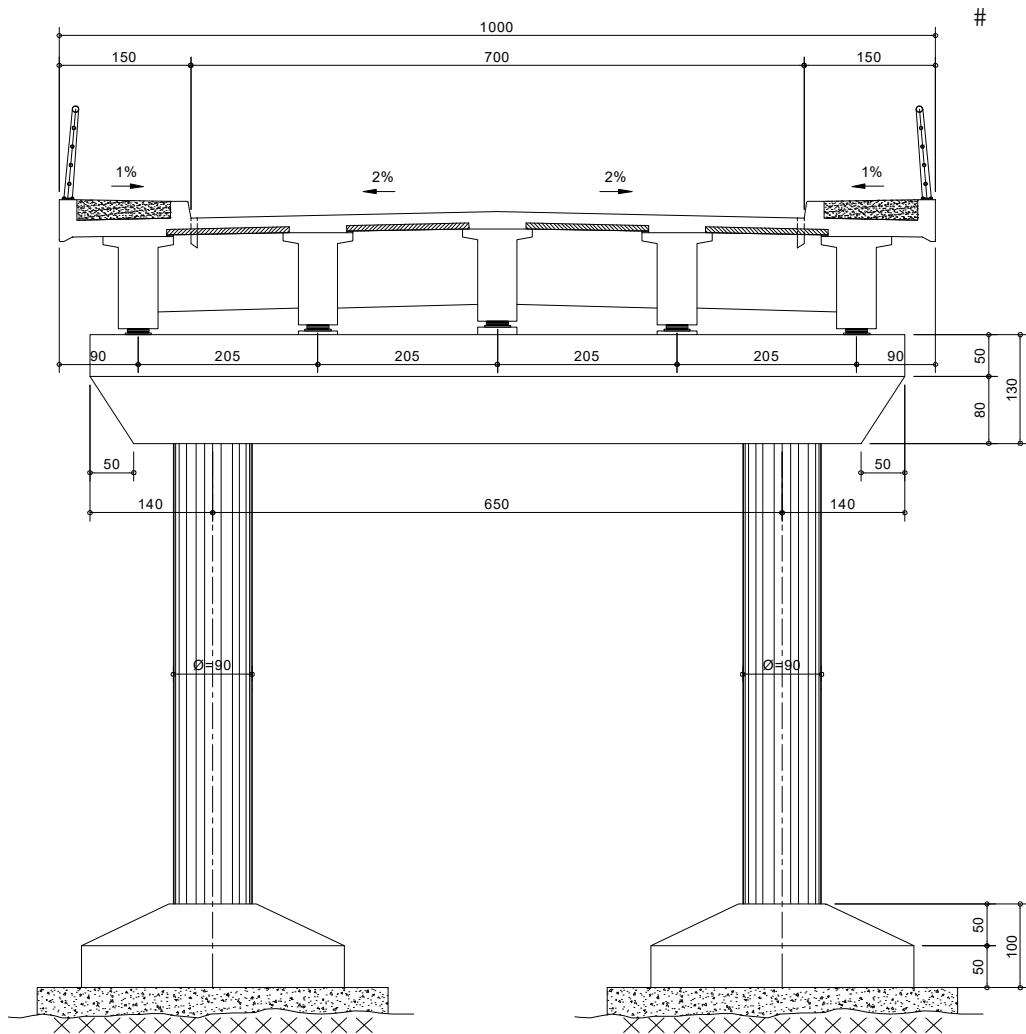
#### Seção transversal



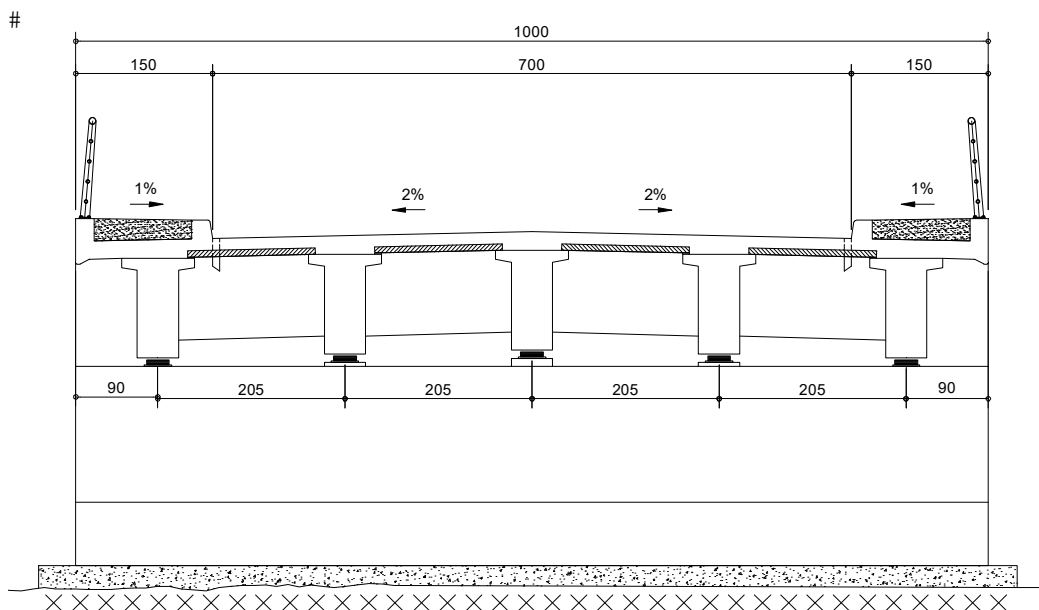
#



Seção transversal - apoios P1 a P4



Seção transversal - apoios E1 e E2



## 2. SUPERESTRUTURA

### 2.1 Materiais

#### Concreto

Resistência característica à compressão:  $f_{ck} := 35\text{MPa}$

Resistência de projeto à compressão:  $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.4}$   $f_{cd} = 25.00 \cdot \text{MPa}$

Módulo de elasticidade secante:  $E_{cs} := 29\text{GPa}$

Peso específico:  $\rho_c := 25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

#### Aço CA-50 (NBR 7480:2007)

Resistência característica:  $f_{yk} := 500\text{MPa}$

Resistência de projeto:  $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15}$   $f_{yd} = 435 \cdot \text{MPa}$

Módulo de elasticidade:  $E_s := 210 \cdot \text{GPa}$

#### Aço CP-190 (NBR 7483:2008)

Resistência característica à ruptura:  $f_{ptk} := 1900 \cdot \text{MPa}$

Limite de escoamento convencional:  $f_{pyk} := 1710 \cdot \text{MPa}$

Módulo de elasticidade:  $E_p := 200 \cdot \text{GPa}$

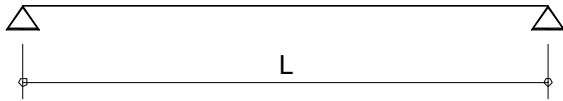


## 2.2 Vigamento principal

### Modelo Estrutural

Para as cargas permanentes  $g_1$  e  $g_2$  foi considerado o modelo estrutural de uma viga bi-apoiada:

#



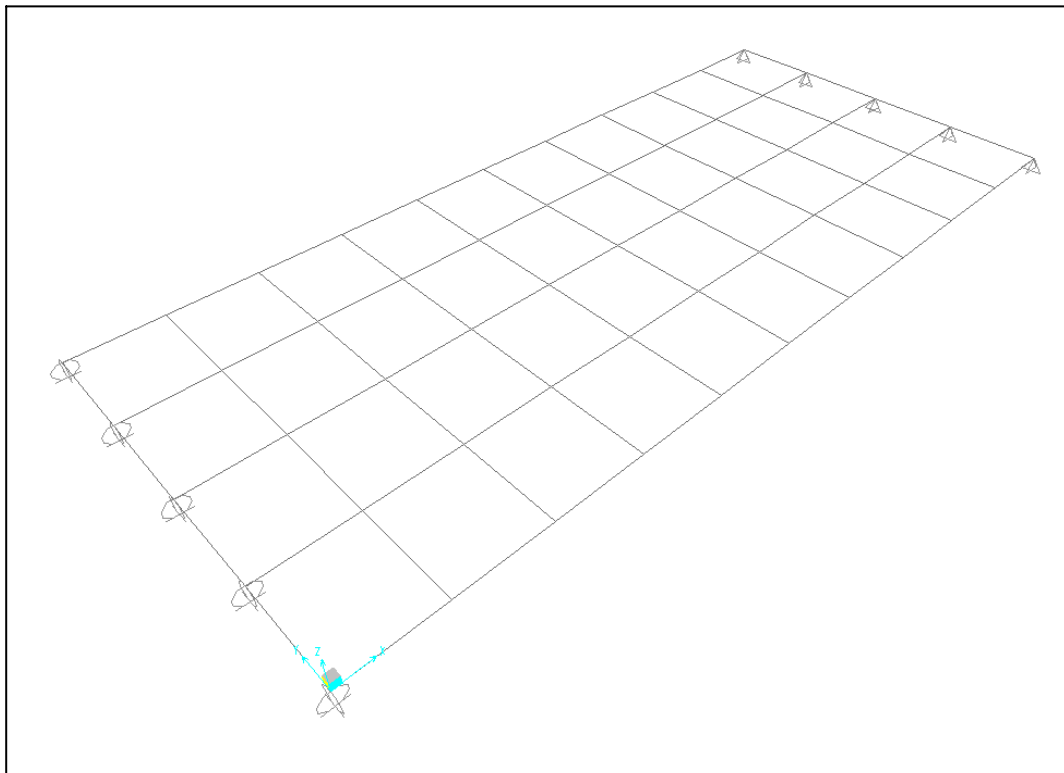
vão teórico das vigas:

$$L_v := 19.30\text{m}$$

O modelo estrutural utilizado para análise da carga permanente  $g_3$  e das cargas móveis consiste em uma grelha com apoios rígidos nas extremidades. A determinação dos esforços solicitantes na estrutura será através de análise elástica linear com o uso de programa de elementos finitos (analogia de grelhas). A análise estrutural foi feita com o auxílio do programa de elementos finitos.



### modelo de grelha

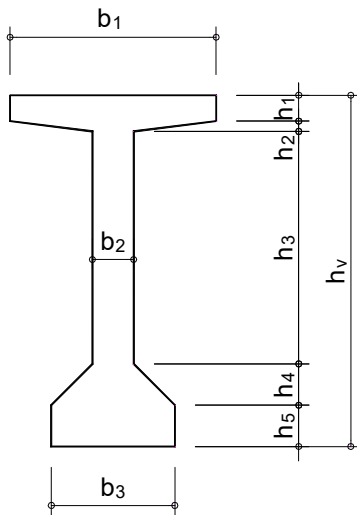


### Referências bibliográficas:

- Hambly, E.C., Bridge Deck Behaviour, E & FN Spon, London, 1991.  
O'Brien, J.E., Keogh, D.L., Bridge Deck Analysis 2nd ed., CRC Press, London, 2015.  
Surana, C.S., Agrawal, R., Grillage Analogy in Bridge Deck Analysis, Narosa, London, 1998

**Características Geométricas**

Viga isolada:



$b_1 := 0.80\text{m}$        $h_1 := 0.10\text{m}$        $h_4 := 0.10\text{m}$

$b_2 := 0.20\text{m}$        $h_2 := 0.05\text{m}$        $h_5 := 0.20\text{m}$

$b_3 := 0.45\text{m}$        $h_3 := 0.65\text{m}$

$h_v := h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$        $h_v = 1.10\text{m}$

Cálculo da área e centróide:

$At_1 := b_1 \cdot h_1$

$At_2 := \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_2$

$At_3 := b_2 \cdot h_3$

$At_4 := \frac{b_2 + b_3}{2} \cdot h_4$

$At_5 := b_3 \cdot h_5$

$yt_1 := \frac{h_1}{2} + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$

$yt_2 := \frac{h_2 \cdot (2b_1 + b_2)}{3 \cdot (b_1 + b_2)} + h_3 + h_4 + h_5$

$yt_3 := \frac{h_3}{2} + h_4 + h_5$

$yt_4 := \frac{h_4 \cdot (2 \cdot b_2 + b_3)}{3 \cdot (b_2 + b_3)} + h_5$

$yt_5 := \frac{h_5}{2}$

área da seção da viga:

$A_v := \sum At$        $A_v = 0.3575 \cdot \text{m}^2$

distância do centróide ao bordo inferior:

$yv_i := \frac{At \cdot yt}{A_v}$        $yv_i = 0.578 \text{ m}$

distância do centróide ao bordo superior:

$yv_s := h_v - yv_i$        $yv_s = 0.522 \text{ m}$



Momento de inércia e módulos resistentes

$$I_{v_1} := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

$$I_{v_2} := h_2^3 \cdot \frac{(b_1^2 + 4 \cdot b_1 \cdot b_2 + b_2^2)}{36 \cdot (b_1 + b_2)}$$

$$I_{v_3} := \frac{b_2 \cdot h_3^3}{12}$$

$$I_{v_4} := h_4^3 \cdot \frac{(b_2^2 + 4 \cdot b_2 \cdot b_3 + b_3^2)}{36 \cdot (b_2 + b_3)}$$

$$I_{v_5} := \frac{b_3 \cdot h_5^3}{12}$$

$$I_v := \sum I_v$$

$$j := 1..5$$

$$dt_j := yv_j - yt_j$$

momento de inércia:

$$I_{vv} := \sum I_v + A \cdot dt^2$$

$$I_v = 0.0513 \cdot m^4$$

módulo resistente superior:

$$W_{v_s} := \frac{I_v}{yv_s}$$

$$W_{v_s} = 0.0983 \cdot m^3$$

módulo resistente inferior:

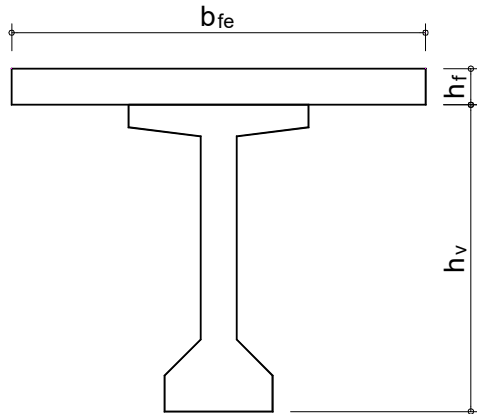
$$W_{v_i} := \frac{I_v}{yv_i}$$

$$W_{v_i} = 0.0888 \cdot m^3$$



## Seções compostas (grelha)

Vigas externas:



$$b_{fe} := 1.925 \text{ m}$$

$$h_f := 0.20 \text{ m}$$

Cálculo da área de centróide:

$$A_{ve} := A_v + b_{fe} \cdot h_f$$

$$A_{ve} = 0.7425 \cdot \text{m}^2$$

$$y_{mesa} := h_v + \frac{h_f}{2}$$

$$y_{mesa} = 1.20 \text{ m}$$

$$y_{ve_i} := \frac{A_v \cdot y_{v_i} + b_{fe} \cdot h_f \cdot y_{mesa}}{A_{ve}}$$

$$y_{ve_i} = 0.901 \text{ m}$$

$$y_{ve_s} := h_v + h_f - y_{ve_i}$$

$$y_{ve_s} = 0.399 \text{ m}$$

$$I_{mesa} := \frac{b_{fe} \cdot h_f^3}{12}$$

Inércia à flexão e módulos resistentes

$$I_{ve} := I_v + A_v \cdot (y_{ve_i} - y_{v_i})^2 + I_{mesa} + b_{fe} \cdot h_f \cdot (y_{mesa} - y_{ve_i})^2$$

$$I_{ve} = 0.1243 \cdot \text{m}^4$$

$$W_{ve_s'} := \frac{I_{ve}}{y_{ve_s}}$$

$$W_{ve_s'} = 0.3112 \cdot \text{m}^3$$

$$W_{ve_s} := \frac{I_{ve}}{(y_{ve_s} - h_f)}$$

$$W_{ve_s} = 0.6233 \cdot \text{m}^3$$

$$W_{ve_i} := \frac{I_{ve}}{y_{ve_i}}$$

$$W_{ve_i} = 0.1380 \cdot \text{m}^3$$



Inércia à torção

seção decomposta em retângulos:

$$br_1 := h_f$$

$$hr_1 := b_{fe}$$

$$br_2 := h_1 + h_2$$

$$hr_2 := \left( b_1 \cdot h_1 + \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_2 \right) \cdot \frac{1}{(h_1 + h_2)}$$

$$br_3 := b_2$$

$$hr_3 := h_3$$

$$br_4 := h_4 + h_5$$

$$hr_4 := \left( b_3 \cdot h_5 + \frac{b_2 + b_3}{2} \cdot h_4 \right) \cdot \frac{1}{(h_4 + h_5)}$$

$$i := 1..4$$

$$Jr_i := hr_i \cdot (br_i)^3 \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \frac{br_i}{hr_i} \cdot \left[ 1 - \frac{(br_i)^4}{12 (hr_i)^4} \right] \right]$$

$$Jr = \begin{pmatrix} 0.00480 \\ 0.00068 \\ 0.00140 \\ 0.00202 \end{pmatrix} \cdot m^4$$

$$J_{ve} := \sum Jr$$

$$J_{ve} = 0.00889 \cdot m^4$$

$$Jr_i := \begin{cases} \frac{hr_i \cdot (br_i)^3}{3} & \text{if } hr_i > 5 \cdot br_i \\ \frac{3 \cdot (hr_i)^3 \cdot (br_i)^3}{10 \cdot [(hr_i)^2 + (br_i)^2]} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Jr = \begin{pmatrix} 0.00513 \\ 0.00068 \\ 0.00143 \\ 0.00215 \end{pmatrix} \cdot m^4$$

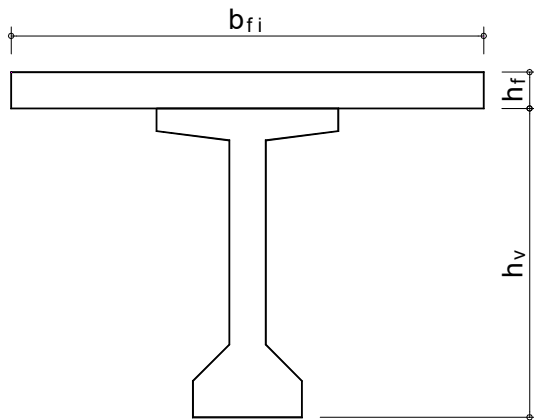
$$J_{ve} := \sum Jr$$

$$J_{ve} = 0.00938 \cdot m^4$$





Vigas internas:



$$b_{fi} := 2.05\text{m}$$

$$h_f = 0.20\text{m}$$

Cálculo da área de centróide:

$$A_{vi} := A_v + b_{fi} \cdot h_f$$

$$A_{vi} = 0.7675 \cdot \text{m}^2$$

$$y_{\text{mesa}} := h_v + \frac{h_f}{2}$$

$$y_{\text{mesa}} = 1.20\text{m}$$

$$y_{vi_i} := \frac{A_v \cdot y_{v_i} + b_{fi} \cdot h_f \cdot y_{\text{mesa}}}{A_{vi}}$$

$$y_{vi_i} = 0.910\text{m}$$

$$y_{vi_s} := h_v + h_f - y_{vi_i}$$

$$y_{vi_s} = 0.390\text{m}$$

$$I_{\text{mesa}} := \frac{b_{fi} \cdot h_f^3}{12}$$

Inércia à flexão e módulos resistentes

$$I_{vi} := I_v + A_v \cdot (y_{vi_i} - y_{v_i})^2 + I_{\text{mesa}} + b_{fi} \cdot h_f \cdot (y_{\text{mesa}} - y_{vi_i})^2$$

$$I_{vi} = 0.1266 \cdot \text{m}^4$$

$$W_{vi_s'} := \frac{I_{vi}}{y_{vi_s}}$$

$$W_{vi_s'} = 0.3248 \cdot \text{m}^3$$

$$W_{vi_s} := \frac{I_{vi}}{(y_{ve_s} - h_f)}$$

$$W_{vi_s} = 0.6345 \cdot \text{m}^3$$

$$W_{vi_i} := \frac{I_{vi}}{y_{vi_i}}$$

$$W_{vi_i} = 0.1390 \cdot \text{m}^3$$



Inércia à torção

seção decomposta em retângulos:

$$br_1 := h_f$$

$$hr_1 := b_{ff}$$

$$br_2 := h_1 + h_2$$

$$hr_2 := \left( b_1 \cdot h_1 + \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_2 \right) \cdot \frac{1}{(h_1 + h_2)}$$

$$br_3 := b_2$$

$$hr_3 := h_3$$

$$br_4 := h_4 + h_5$$

$$hr_4 := \left( b_3 \cdot h_5 + \frac{b_2 + b_3}{2} \cdot h_4 \right) \cdot \frac{1}{(h_4 + h_5)}$$

$$i := 1..4$$

$$J_{r_i} := hr_i \cdot (br_i)^3 \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \frac{br_i}{hr_i} \cdot \left[ 1 - \frac{(br_i)^4}{12 (hr_i)^4} \right] \right]$$

$$J_r = \begin{pmatrix} 0.00513 \\ 0.00068 \\ 0.00140 \\ 0.00202 \end{pmatrix} \cdot m^4$$

$$J_{ve} := \sum J_r$$

$$J_{ve} = 0.00922 \cdot m^4$$

$$J_{r_i} := \begin{cases} \frac{hr_i \cdot (br_i)^3}{3} & \text{if } hr_i > 5 \cdot br_i \\ \frac{3 \cdot (hr_i)^3 \cdot (br_i)^3}{10 \cdot [(hr_i)^2 + (br_i)^2]} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$J_r = \begin{pmatrix} 0.00547 \\ 0.00068 \\ 0.00143 \\ 0.00215 \end{pmatrix} \cdot m^4$$

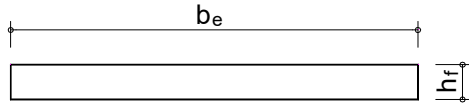
$$J_{ve} := \sum J_r$$

$$J_{ve} = 0.00972 \cdot m^4$$



$$b_e := \frac{L_v}{10}$$

$$b_e = 1.93 \text{ m} \quad h_f = 0.20 \text{ m}$$



$$A_{\text{laje}} := b_e \cdot h_f$$

$$A_{\text{laje}} = 0.3860 \cdot \text{m}^2$$

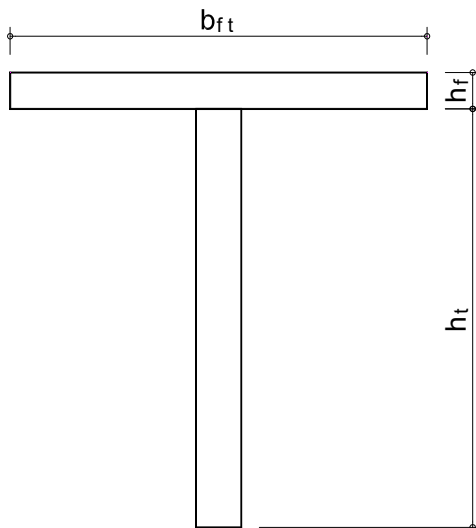
$$I_{\text{laje}} := \frac{b_e \cdot h_f^3}{12}$$

$$I_{\text{laje}} = 0.00129 \cdot \text{m}^4$$

$$J_{\text{laje}} := \frac{b_e \cdot h_f^3}{6}$$

$$J_{\text{laje}} = 0.0026 \cdot \text{m}^4$$

Transversinas e faixas de laje das extremidades:



$$b_{ft} := 0.35 \text{ m} + \frac{L_v}{20}$$

$$b_{ft} = 1.315 \text{ m} \quad h_f = 0.20 \text{ m}$$

$$b_{tr} := 0.25 \text{ m}$$

$$h_{tr} := h_v + h_f - h_5 \quad h_{tr} = 1.10 \text{ m}$$

Cálculo da área de centróide:

$$A_{tr} := b_{ft} \cdot h_f + b_{tr} \cdot h_{tr}$$

$$A_{tr} = 0.5380 \cdot \text{m}^2$$

$$y_{\text{mesa}} := h_{tr} + \frac{h_f}{2}$$

$$y_{\text{mesa}} = 1.20 \text{ m}$$

$$y_{tr_i} := \frac{b_{ft} \cdot h_f \cdot \left( h_{tr} + \frac{h_f}{2} \right) + h_{tr} \cdot b_{tr} \cdot \frac{h_{tr}}{2}}{A_{tr}}$$

$$y_{tr_i} = 0.868 \text{ m}$$

$$y_{tr_s} := h_{tr} + h_f - y_{tr_i}$$

$$y_{tr_s} = 0.432 \text{ m}$$



Inércia à flexão

$$I_{tr} := \frac{b_{ft} \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_{tr} \cdot h_{tr}^3}{12} + b_{ft} \cdot h_f \cdot \left( h_{tr} + \frac{h_f}{2} - y_{tr_1} \right)^2 + b_{tr} \cdot h_{tr} \cdot \left( \frac{h_{tr}}{2} - y_{tr_1} \right)^2$$

$$I_{tr} = 0.0854 \cdot m^4$$

Inércia à torção

seção decomposta em retângulos:

$$br_1 := h_f \qquad hr_1 := b_{ft}$$

$$br_2 := b_{tr} \qquad hr_2 := h_{tr}$$

$$i := 1..2$$

$$J_{rt_i} := hr_i \cdot (br_i)^3 \cdot \left[ \frac{1}{3} - 0.21 \cdot \frac{br_i}{hr_i} \cdot \left[ 1 - \frac{(br_i)^4}{12 (hr_i)^4} \right] \right]$$

$$J_t := \sum J_{rt} \qquad J_t = 0.00808 \cdot m^4$$

$$J_{rt_i} := \begin{cases} \frac{hr_i \cdot (br_i)^3}{3} & \text{if } hr_i > 5 \cdot br_i \\ \frac{3 \cdot (hr_i)^3 \cdot (br_i)^3}{10 \cdot [(hr_i)^2 + (br_i)^2]} & \text{otherwise} \end{cases}$$

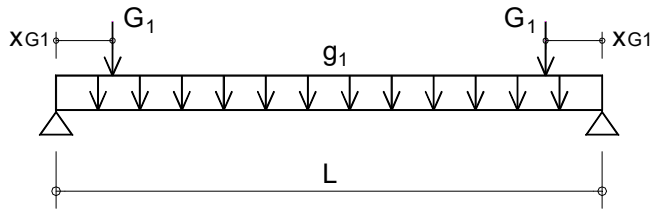
$$J_{rt} := \sum J_{rt} \qquad J_t = 0.00841 \cdot m^4$$



**Carregamentos**

## Cargas Permanentes

a) Peso próprio da viga isolada (g1):



Área da seção corrente:  $A_v = 0.3575 \cdot \text{m}^2$        $g_1 := A_v \cdot \rho_c$        $g_1 = 8.94 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Área da seção no apoio:  $A_a := 0.536 \text{m}^2$

Extensão do trecho com seção engrossada:  $a_e := 1.40 \text{m}$

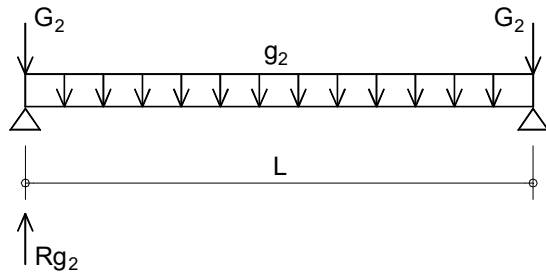
$G_1 := (A_a - A_v) \cdot a_e \cdot \rho_c$        $G_1 = 6.25 \cdot \text{kN}$        $x_{G1} := \frac{a_e}{2}$

Reação de apoio:  $R_{g1} := G_1 + g_1 \cdot \frac{L_v}{2}$        $R_{g1} = 92.49 \cdot \text{kN}$

Rotação no apoio:  $\theta_{g1} := \frac{g_1 \cdot L_v^3}{24 \cdot E_{cs} \cdot I_v}$        $\theta_{g1} = 0.00180$



b) Peso próprio da laje + transversinas ( $g_2$ ):



Dimensões da laje:  $h_f = 0.20 \text{ m}$        $b_{fe} = 1.925 \text{ m}$        $b_{fi} = 2.05 \text{ m}$

Dimensões da transversina de apoio:  $b_{tr} = 0.25 \text{ m}$        $h_{tr} = 1.10 \text{ m}$

Largura das vigas principais na região dos apoios:  $b_{w\_ap} := 0.45 \text{ m}$

V1=V5 :

Laje:  $g_{2e} := h_f \cdot b_{fe} \cdot \rho_c$        $g_{2e} = 9.63 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Transversinas no apoio:  $G_{2e} := b_{tr} \cdot h_{tr} \cdot \left( \frac{b_{fi} - b_{w\_ap}}{2} \right) \cdot \rho_c$        $G_{2e} = 5.50 \cdot \text{kN}$

Reação de apoio:  $R_{g2e} := G_{2e} + \frac{g_{2e} \cdot L_v}{2}$        $R_{g2e} = 98.38 \cdot \text{kN}$

Rotação no apoio:  $\theta_{g2e} := \frac{g_1 \cdot L_v^3}{24 \cdot E_{cs} \cdot I_v}$        $\theta_{g2e} = 0.00180$

V2=V3=V4:

Laje:  $g_{2i} := h_f \cdot b_{fi} \cdot \rho_c$        $g_{2i} = 10.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Transversinas no apoio:  $G_{2i} := b_{tr} \cdot h_{tr} \cdot (b_{fi} - b_{w\_ap}) \cdot \rho_c$        $G_{2i} = 11.00 \cdot \text{kN}$

Reação de apoio:  $R_{g2i} := G_{2i} + \frac{g_{2i} \cdot L_v}{2}$        $R_{g2i} = 109.91 \cdot \text{kN}$

Rotação no apoio:  $\theta_{g2i} := \frac{g_{2i} \cdot (L_v)^3}{24 \cdot E_{cs} \cdot I_v}$        $\theta_{g2i} = 0.00206$



c) Sobrecarga Permanente (g3):

A sobrecarga permanente é constituída pelas cargas do guarda-rodas e pavimento.

Peso específico do pavimento:  $\rho_{\text{pav}} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Espessura do pavimento:  $h_{\text{pav}} := 0.07\text{m}$

Previsão de recapeamento:  $g_{\text{recap}} := 2.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$g_{\text{pav}} := \rho_{\text{pav}} \cdot h_{\text{pav}} + g_{\text{recap}}$   $g_{\text{pav}} = 3.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

largura do passeio:  $b_{\text{pas}} := 1.50\text{m}$

Passeio:  $g_{3\text{pas}} := \left( \frac{0.27 + 0.29}{2} \cdot 1.50 \right) \text{m}^2 \cdot \rho_c$   $g_{3\text{pas}} = 10.50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

V1 = V5 (vigas externas):

$g_{3\_v1} := g_{3\text{pas}} + g_{\text{pav}} \cdot (b_{\text{fc}} - b_{\text{pas}})$   $g_{3\_v1} = 12.06 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

V2=V3=V4 (vigas internas):

Pavimentação:  $g_{3\_v2} := g_{\text{pav}} \cdot b_{\text{fi}}$   $g_{3\_v2} = 7.54 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



**Reações de apoio e rotações:**

O carregamento g3 atua sobre a estrutura composta (vigas+laje) e os esforços e reações de apoio são obtidos do modelo de grelhas. A seguir estão listados os valores das reações de apoio obtidas a partir do programa de elementos finitos.

**Reações no apoio g3 (kN)**

Apoio	g3
V1	109,350
V2	78,180
V3	75,970
V4	78,180
V5	109,350

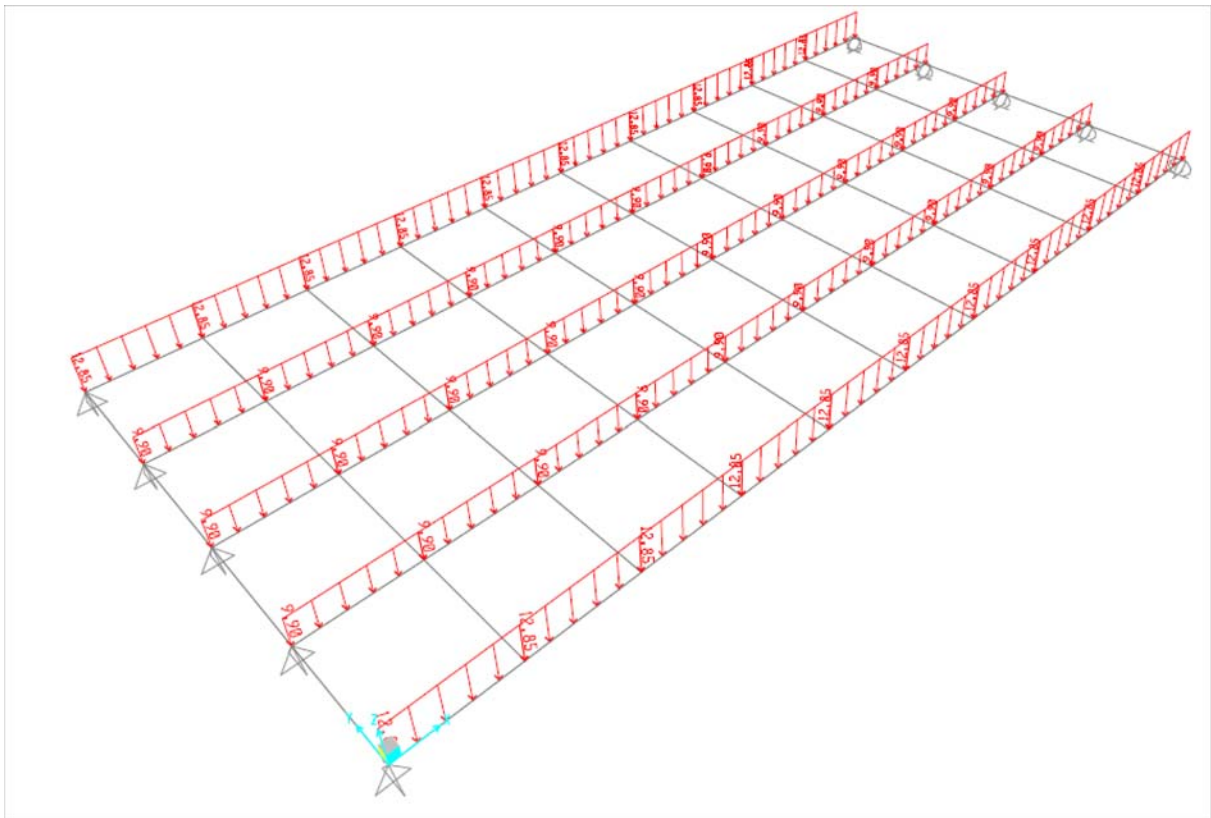
**Rotações no apoio g3 (rad)**

Apoio	g3
V1	0,00085
V2	0,00073
V3	0,00068
V4	0,00073
V5	0,00085

$$R_{g3} := \begin{pmatrix} 109.35 \\ 78.18 \\ 75.97 \\ 78.18 \\ 109.35 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad \theta_{g3} := \begin{pmatrix} 0.00085 \\ 0.00073 \\ 0.00068 \\ 0.00073 \\ 0.00085 \end{pmatrix} \text{ rad}$$



**Carregamento g3**

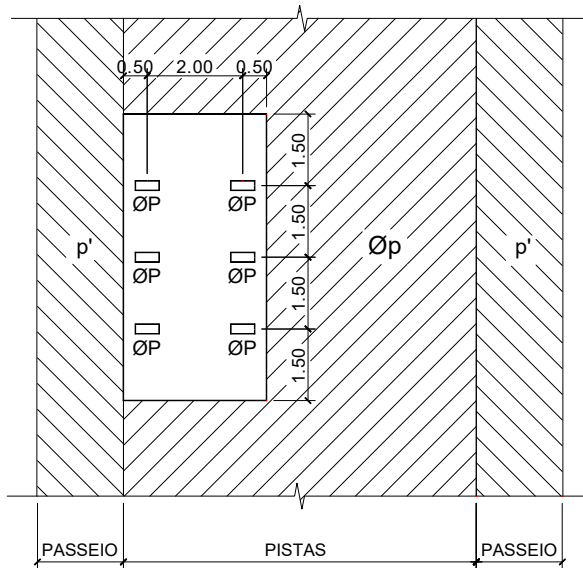




**Carga Móvel (q)**

Nas ações de carga móvel foi considerado o trem-tipo Classe 450 da NBR 7188/2013.

Esquema do trem tipo (em planta):



$$P := 75.00 \text{ kN}$$

$$p := 5.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$p' := 3.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

distância entre rodas:

$$a := 2.00 \text{ m}$$

distância da roda à face lateral do veículo:

$$a_1 := 0.50 \text{ m}$$

distância da roda à face frontal do veículo:

$$a_2 := 1.50 \text{ m}$$

Seção A-A: corte transversal no vão sem o veículo.

Seção B-B: corte transversal no vão com o veículo.

Coefficiente de impacto ( $\phi$ ):

$$L_V = 19.30 \text{ m}$$

$$b_{fi} = 2.05 \text{ m}$$

$$b_{fe} = 1.93 \text{ m}$$

$$L_b := 0.90 \text{ m}$$

$$L_p := 1.50 \text{ m}$$

Para estruturas com vão entre 10,0m e 200,0 m:

$$CIV := 1 + 1.06 \cdot \left( \frac{20 \text{ m}}{L_V + 50 \text{ m}} \right)$$

$$CIV = 1.306$$

$n := 2$   $n$  é igual ao número de faixas de tráfego

$$CNF := 1 - 0.05 \cdot (n - 2)$$

$$CNF = 1.00$$

$$\phi := CIV \cdot CNF$$

$$\phi = 1.306$$

Coefficiente de impacto adicional - CIA (seções até 5m das extremidade e juntas)

$$CIA := 1.25$$



Distribuição das cargas móveis nas vigas principais:

Veículo no bordo da pista

V1:

$$Q_{v1} := \frac{(b_{fi} + L_b - L_p - a_1)}{b_{fi}} \cdot \phi \cdot P \quad Q_{v1} = 45.39 \cdot \text{kN}$$

Na seção A-A (fora do veículo):

$$q_{v1\_a} := L_p \cdot p' \quad q_{v1\_a} = 4.50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Na seção B-B (no veículo):

$$q_{v1\_b} := L_p \cdot p' + \left( \frac{b_{fi}}{2} + L_b - L_p \right) \cdot \phi \cdot p \quad q_{v1\_b} = 7.28 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

V2:

$$Q_{v2} := \frac{2 \cdot b_{fi} - a}{b_{fi}} \cdot \phi \cdot P \quad Q_{v2} = 100.33 \cdot \text{kN}$$

Na seção A-A:

$$q_{v2\_a} := b_{fi} \cdot \phi \cdot p \quad q_{v2\_a} = 13.39 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Na seção B-B:

$$q_{v2\_b} := 0$$

V3:

$$q_{v3} := b_{fi} \cdot \phi \cdot p \quad q_{v3} = 13.39 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

V4:

$$q_{v4} := b_{fi} \cdot \phi \cdot p \quad q_{v4} = 13.39 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

V5:

$$q_{v5} := q_{v1\_b} \quad q_{v5} = 7.28 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Veículo no centro da pista:

V1 = V5:

$$q_{v1\_b} := L_p \cdot p' + \left( \frac{b_{fi}}{2} + L_b - L_p \right) \cdot \phi \cdot p$$

$$q_{v1\_b} = 7.28 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

V2 = V4:

$$Q_{v2} := \frac{a}{2 \cdot b_{fi}} \cdot \phi \cdot P$$

$$Q_{v2} = 47.78 \cdot \text{kN}$$

Seção A - A:

$$q_{v2\_a} := b_{fi} \cdot \phi \cdot p$$

$$q_{v2\_a} = 13.39 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Seção B - B:

$$q_{v2\_b} := \left( \frac{b_{fi}}{2} + b_{fi} - \frac{a}{2} - a_1 \right) \cdot \phi \cdot p$$

$$q_{v2\_b} = 10.28 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

V3:

$$Q_{v3} := 2 \cdot \frac{\left( b_{fi} - \frac{a}{2} \right)}{b_{fi}} \cdot \phi \cdot P$$

$$Q_{v3} = 100.33 \cdot \text{kN}$$

Seção A - A:

$$q_{v3\_a} := b_{fi} \cdot \phi \cdot p$$

$$q_{v3\_a} = 13.39 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Seção B - B:

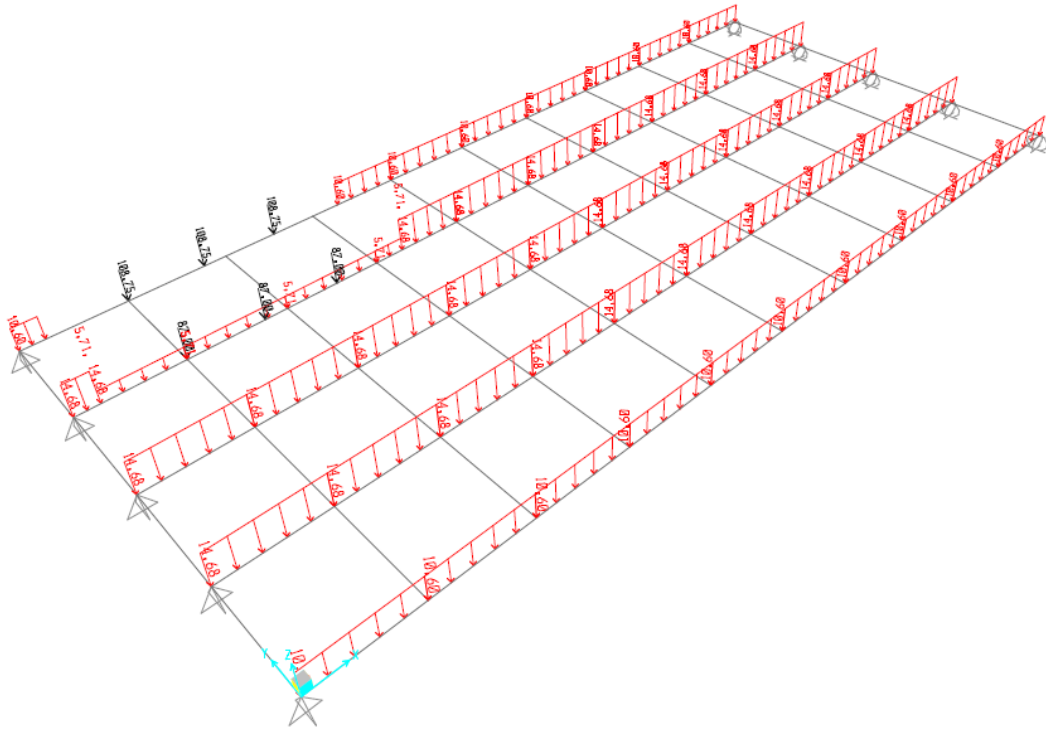
$$q_{v3\_b} := 0$$

$$q_{v3\_b} = 0.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

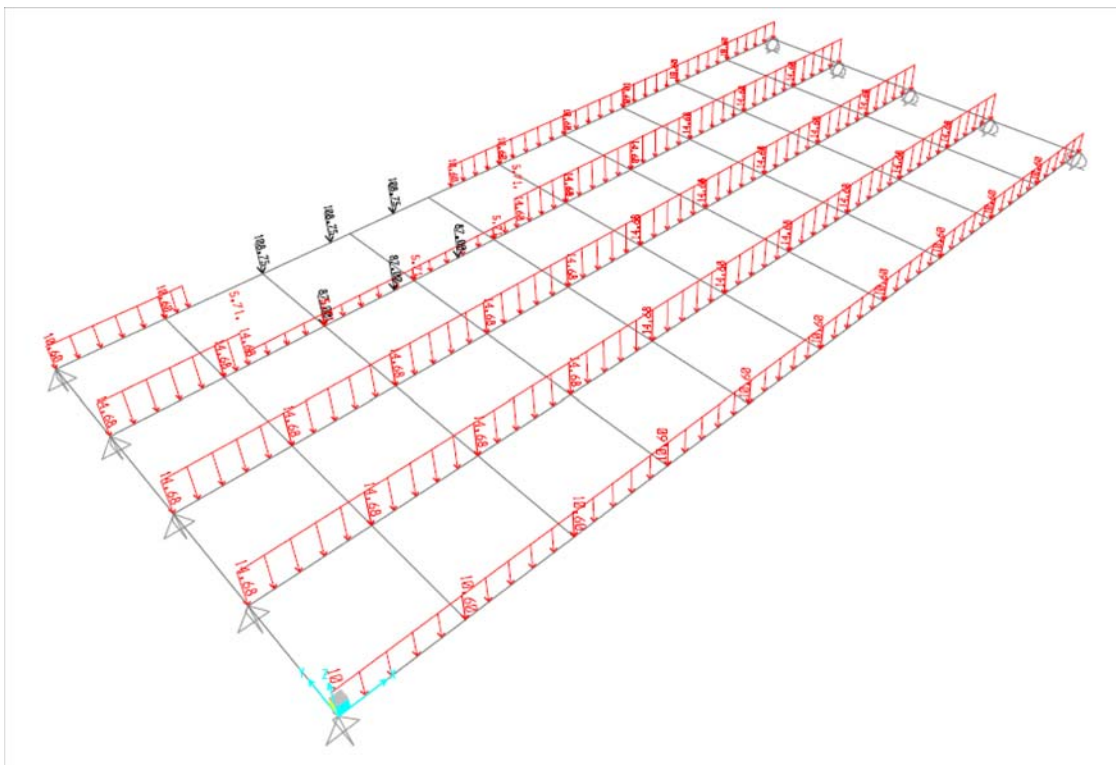


Esquemas dos carregamentos analisados na grelha (carga móvel)

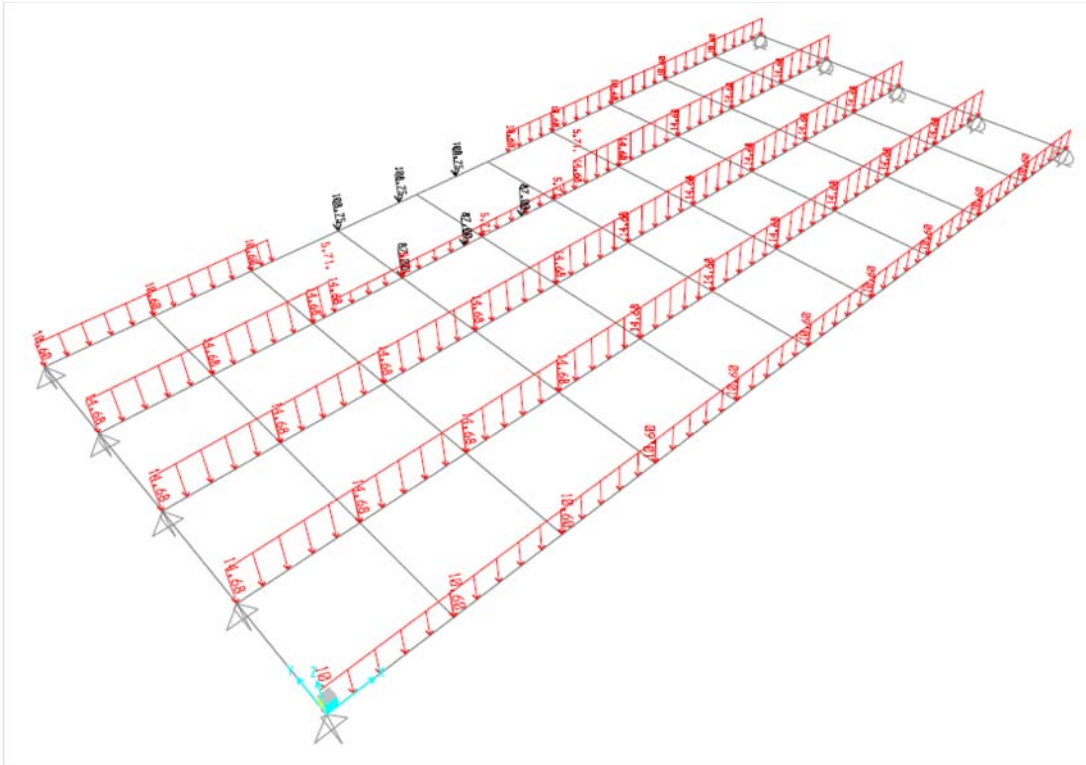
QMx2



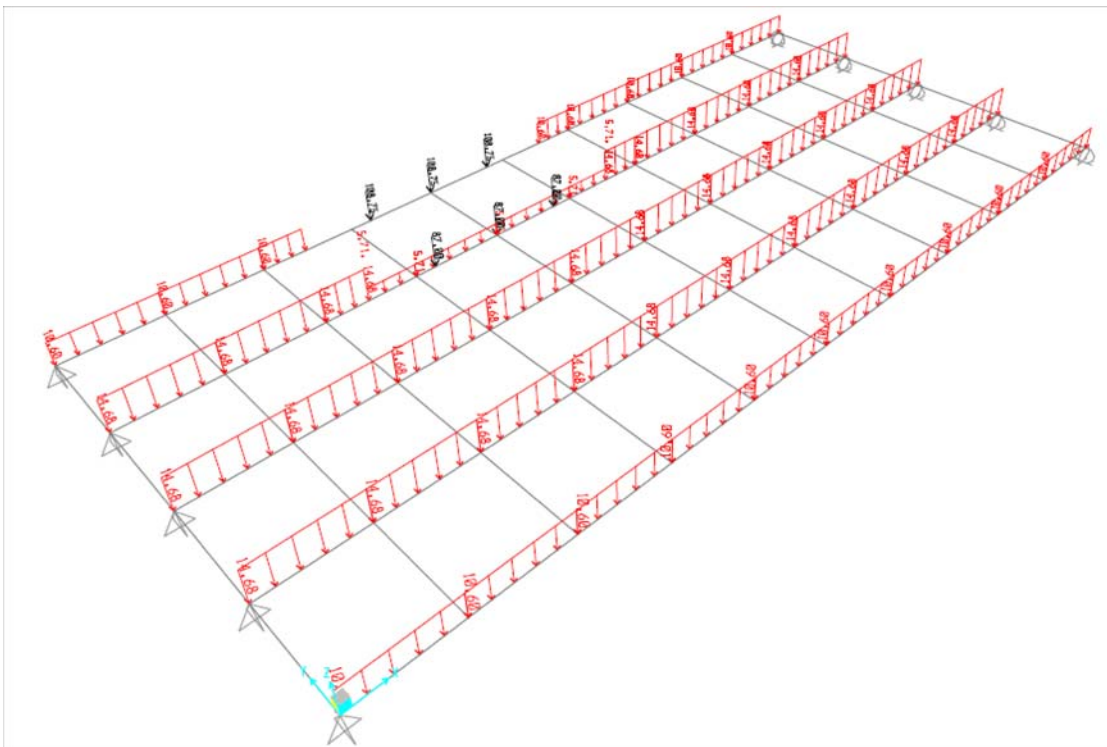
QMx3



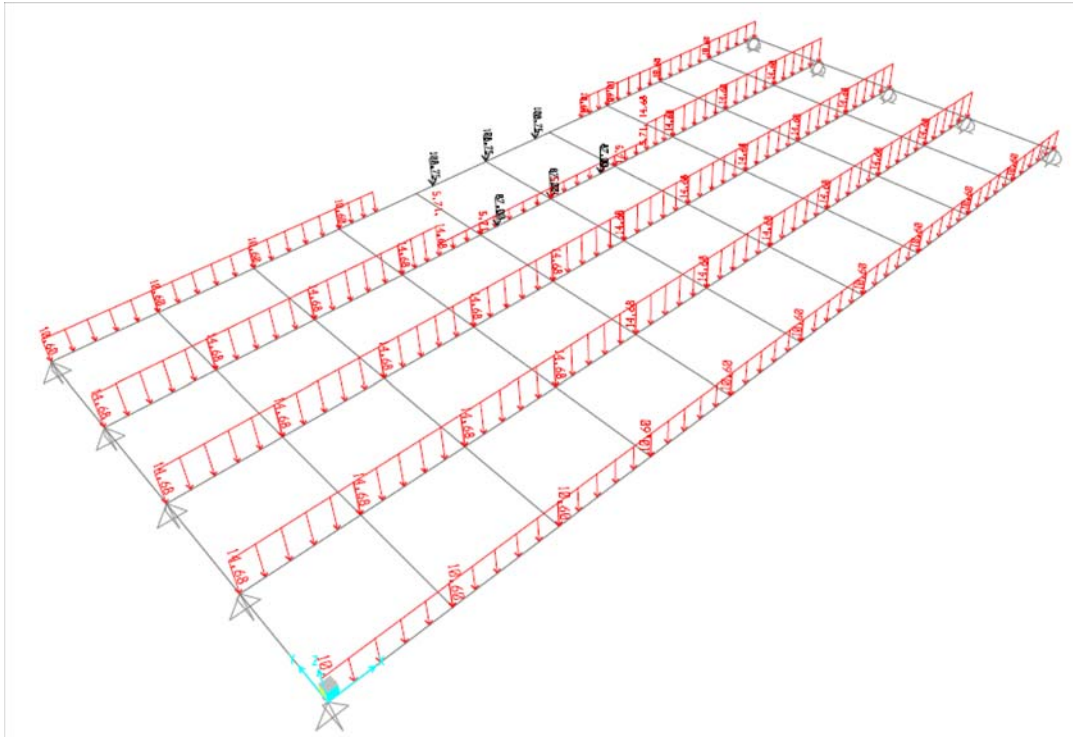
QMx4



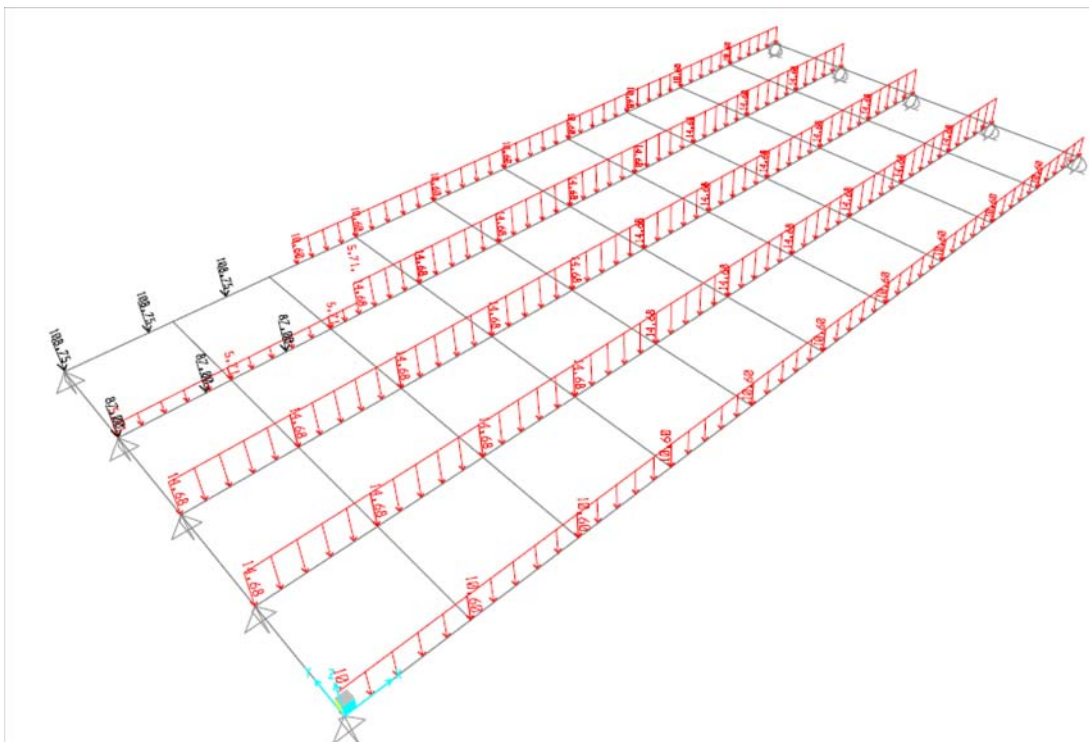
QMx5



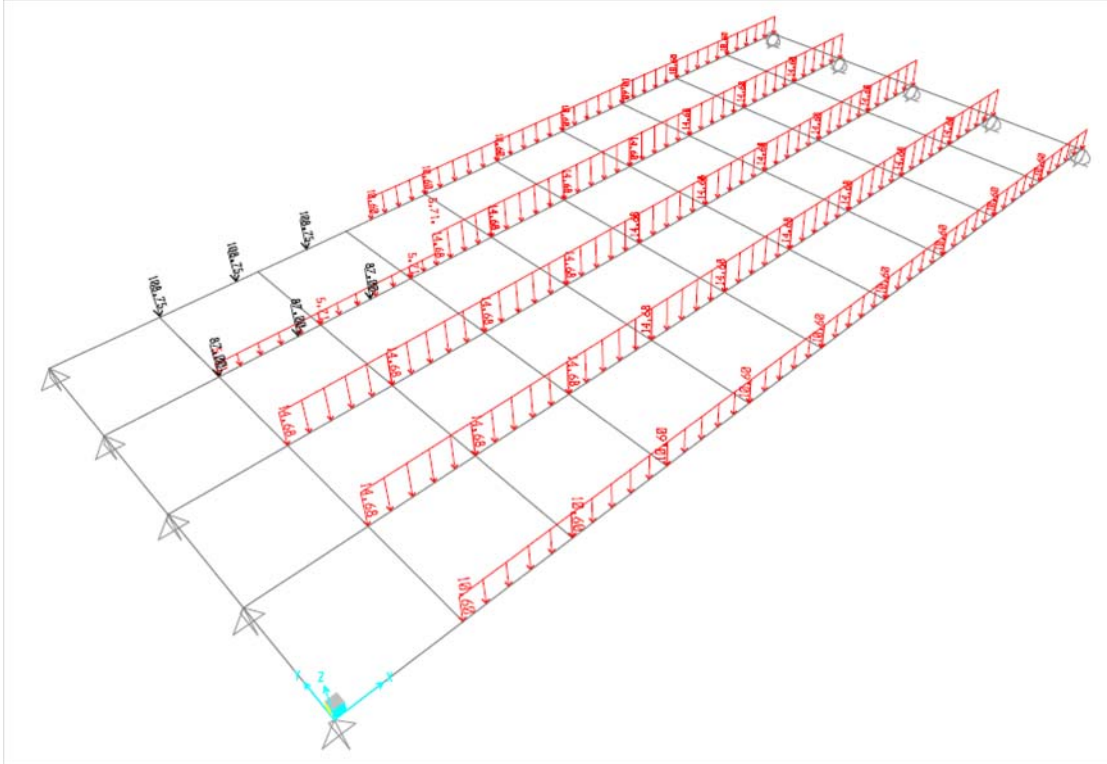
QMx6



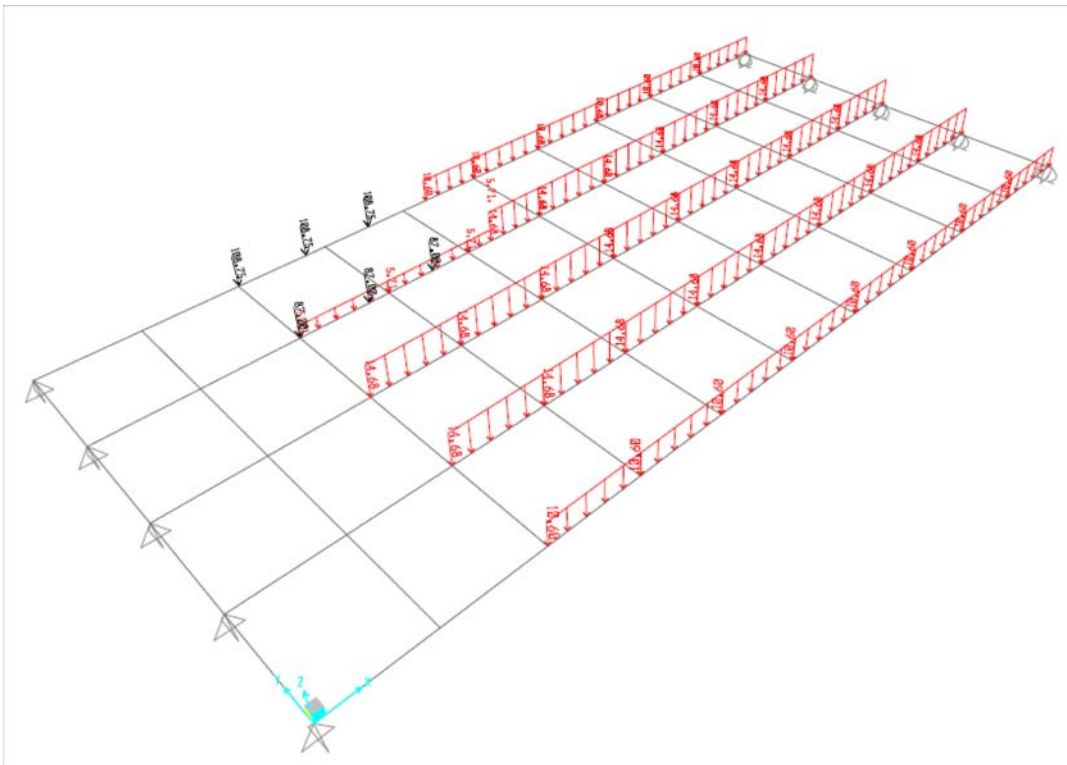
QVx1



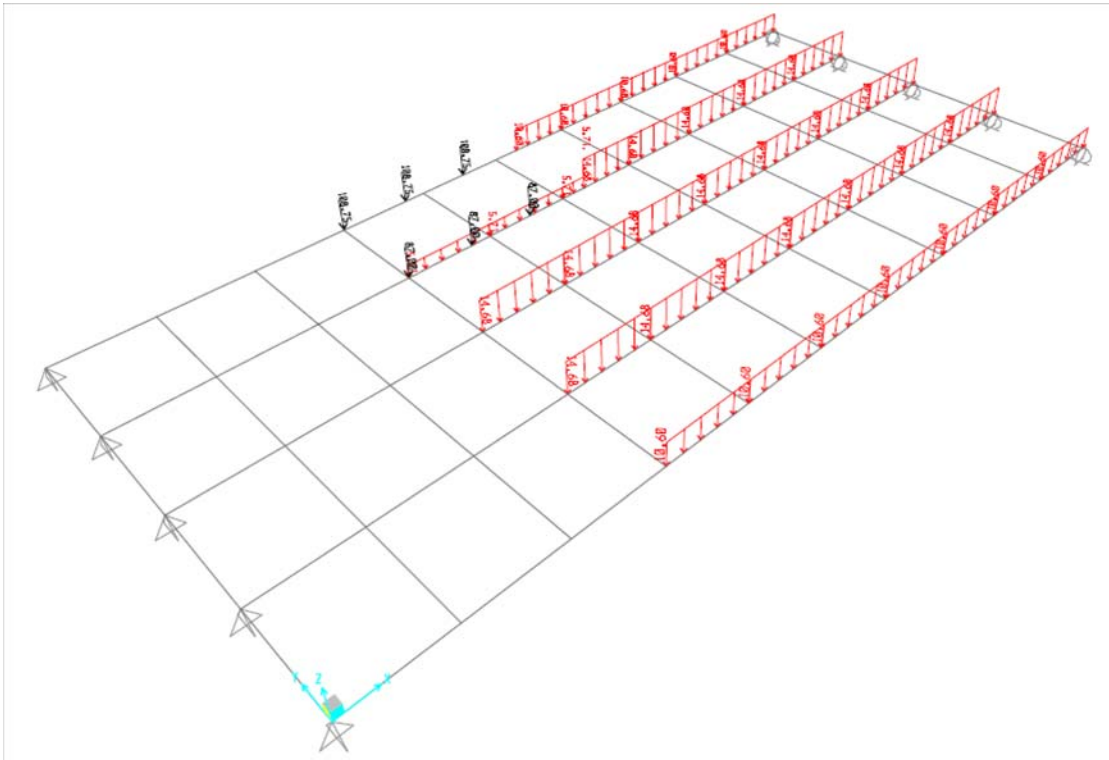
QVx2



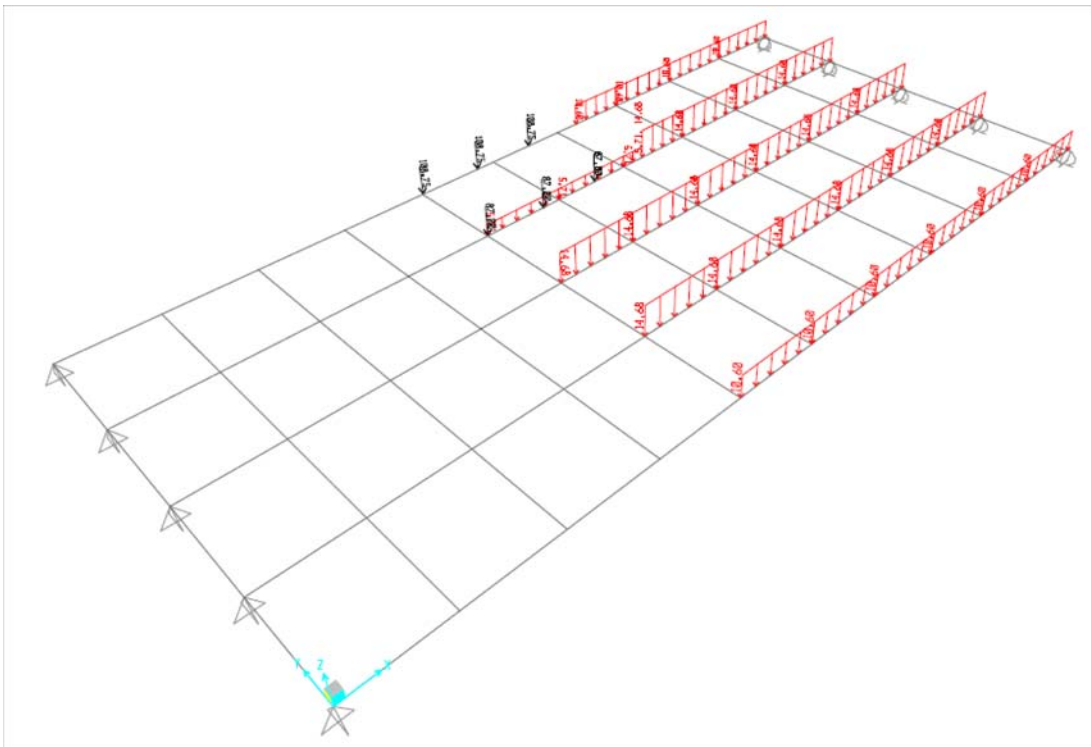
QVx3



QVx4

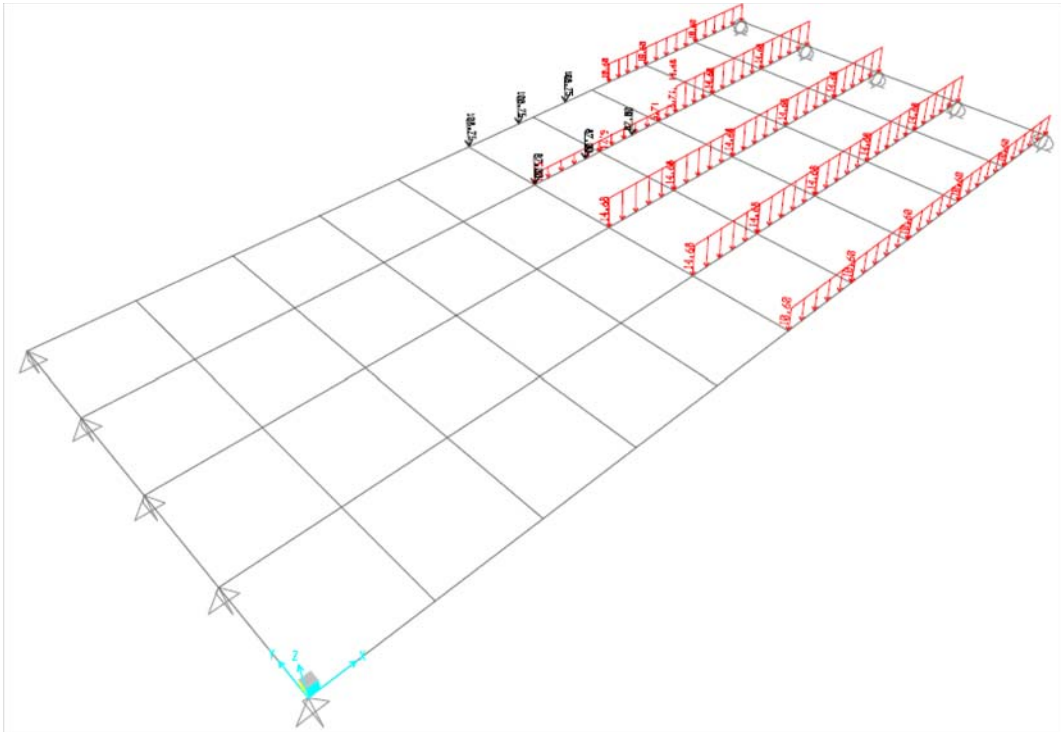


QVx5

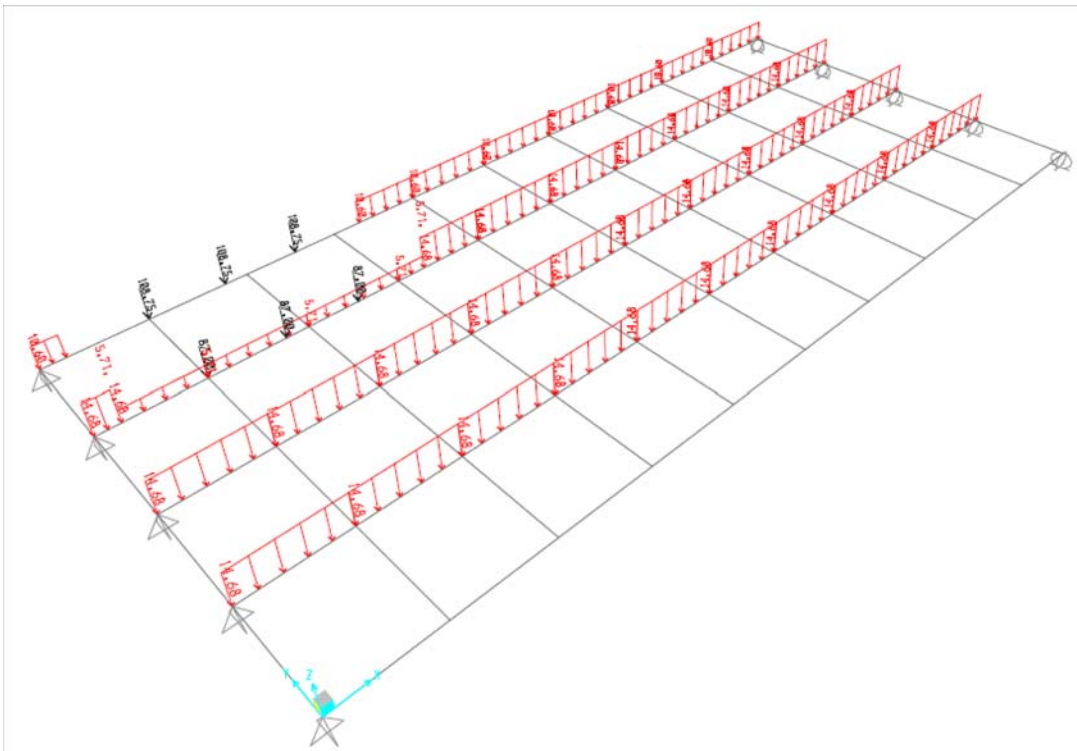




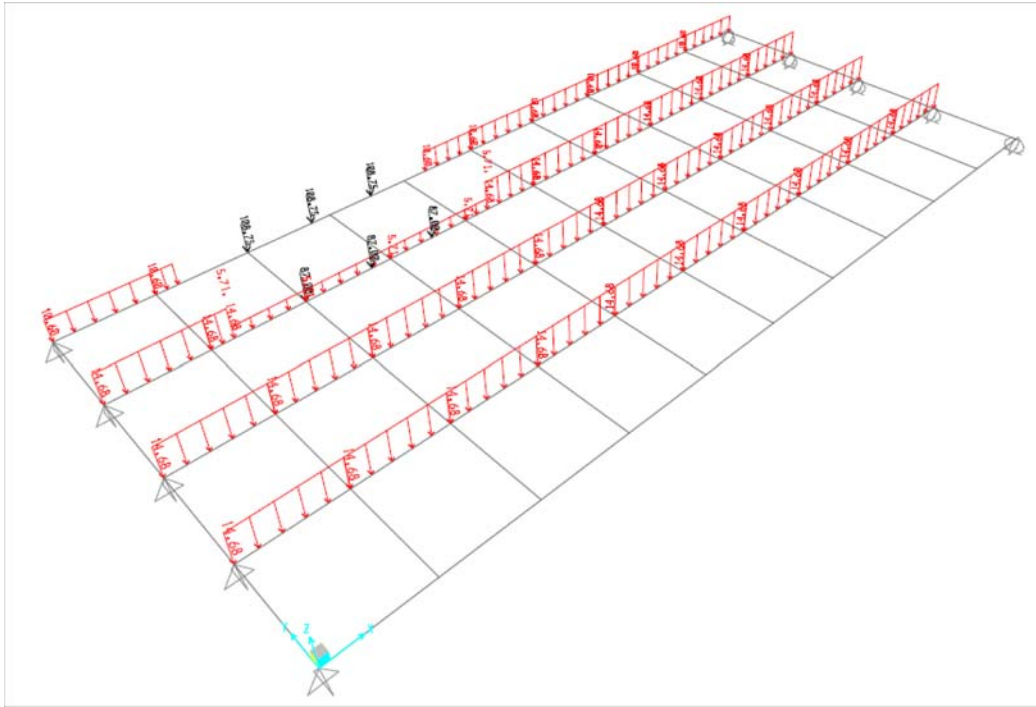
QVx6



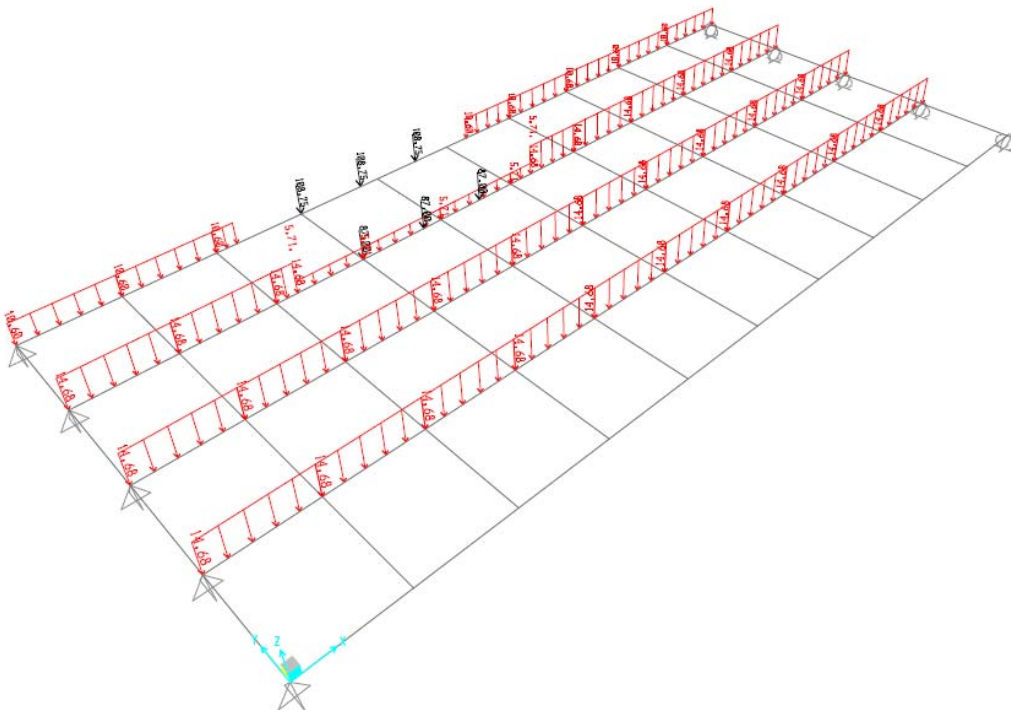
QMx2\_p



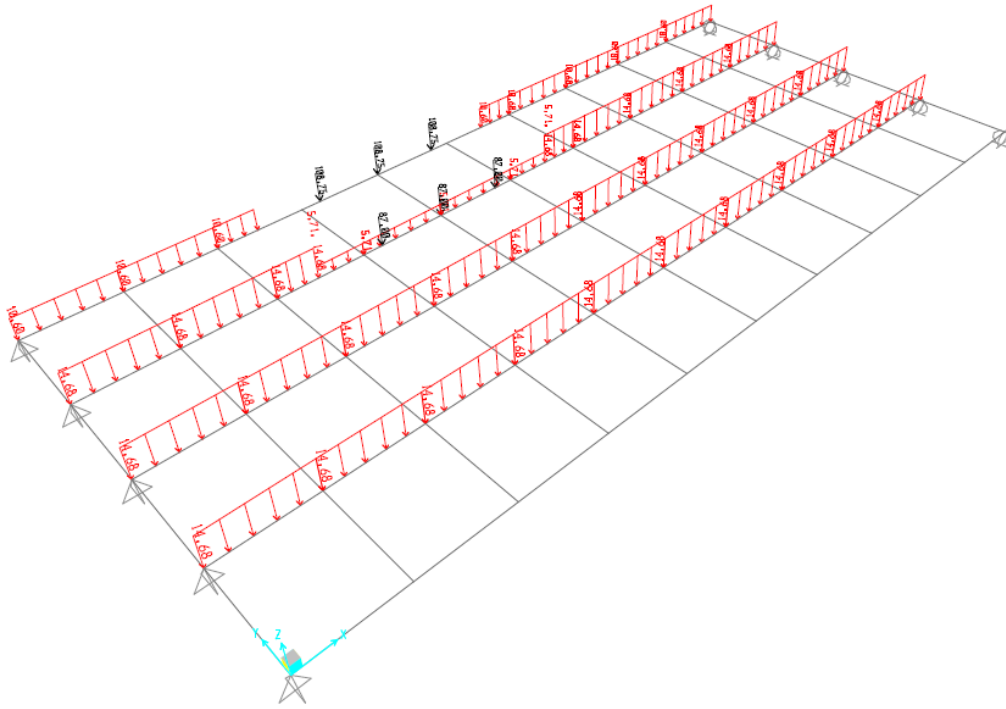
QMx3\_p



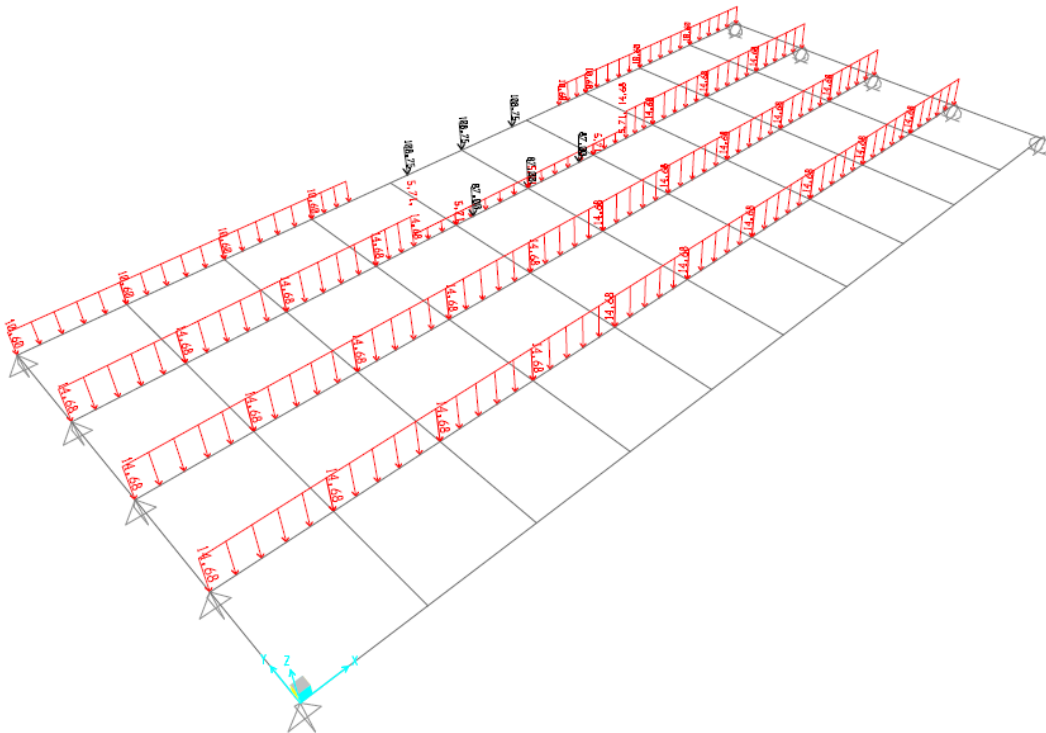
QMx4\_p



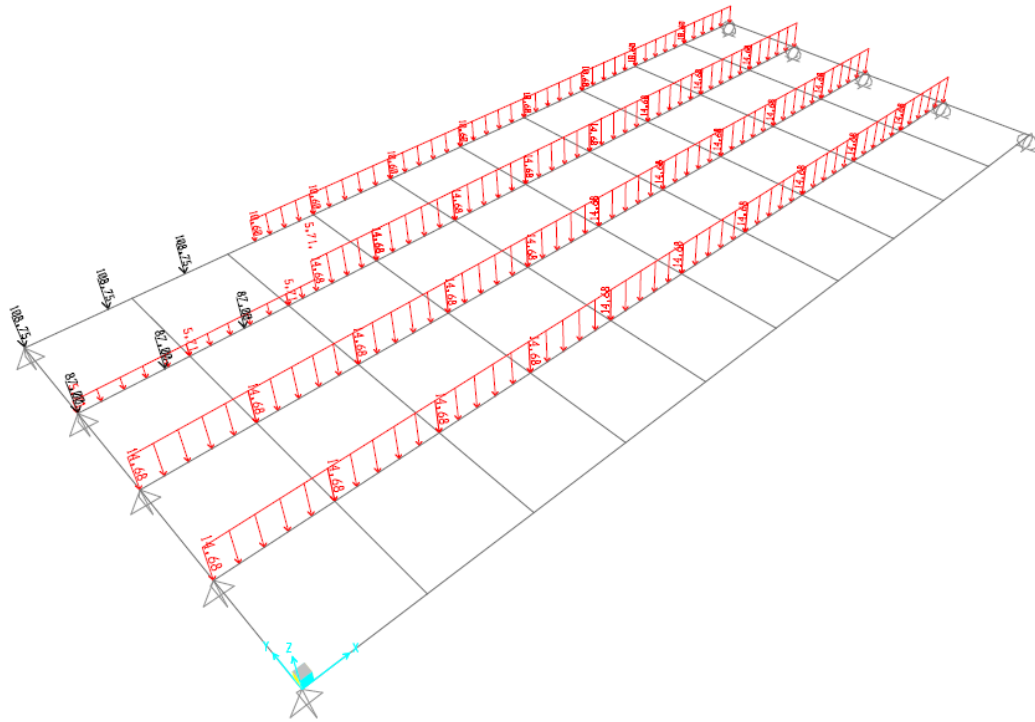
QMx5\_p



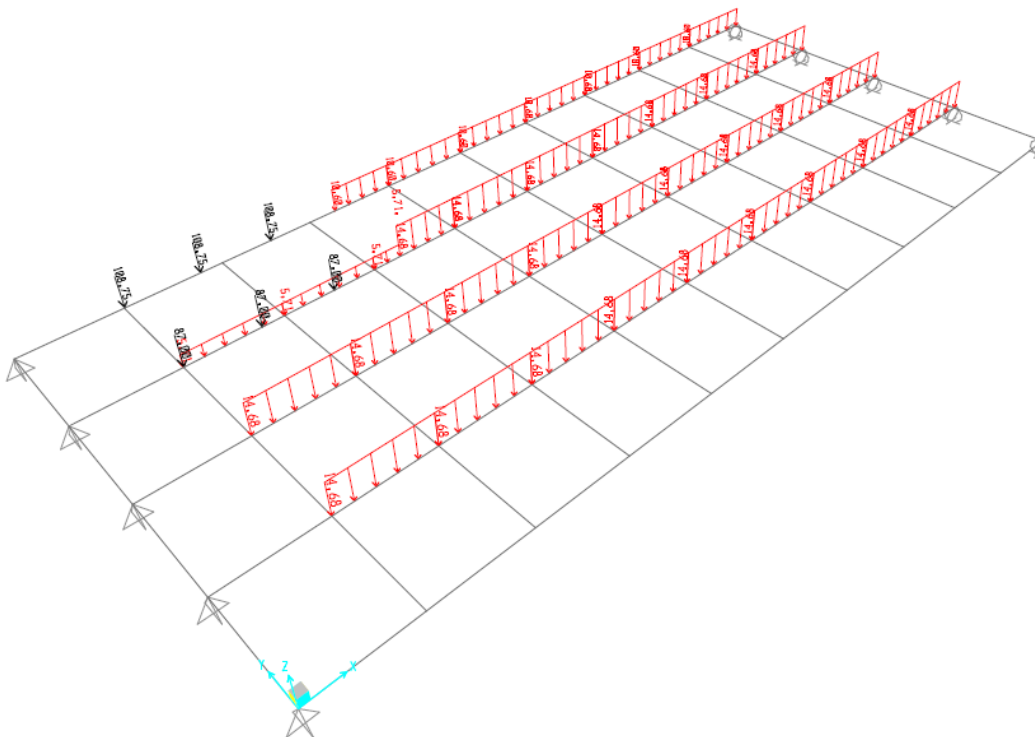
QMx6\_p



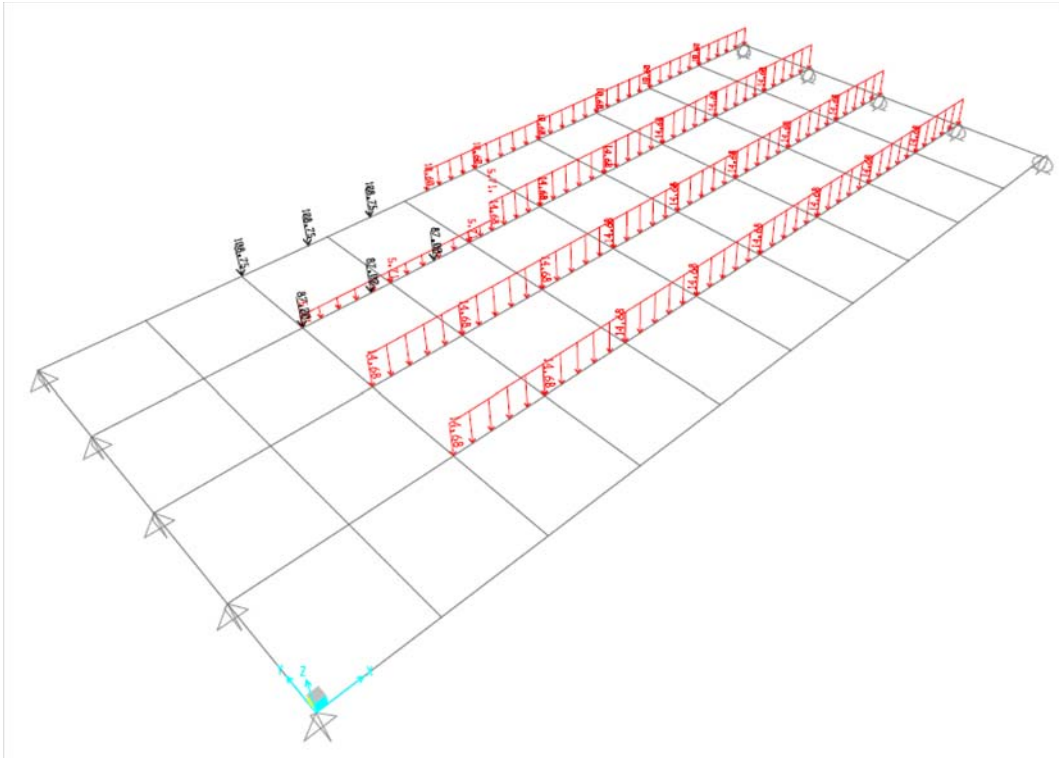
QVx1\_p



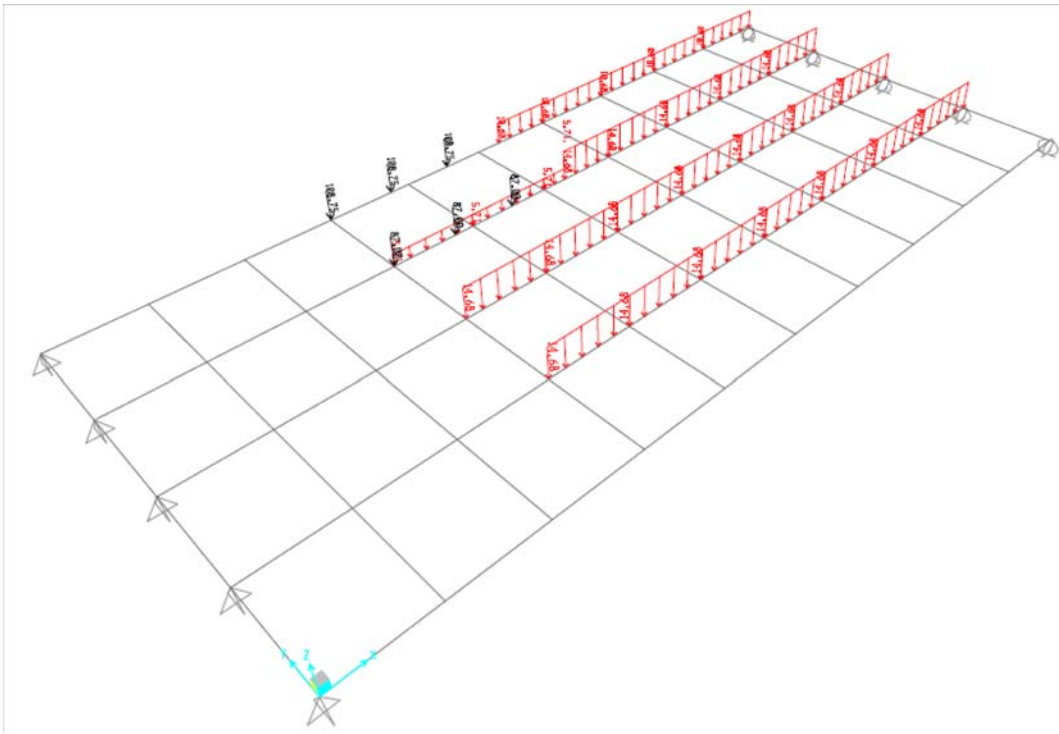
QVx2\_p



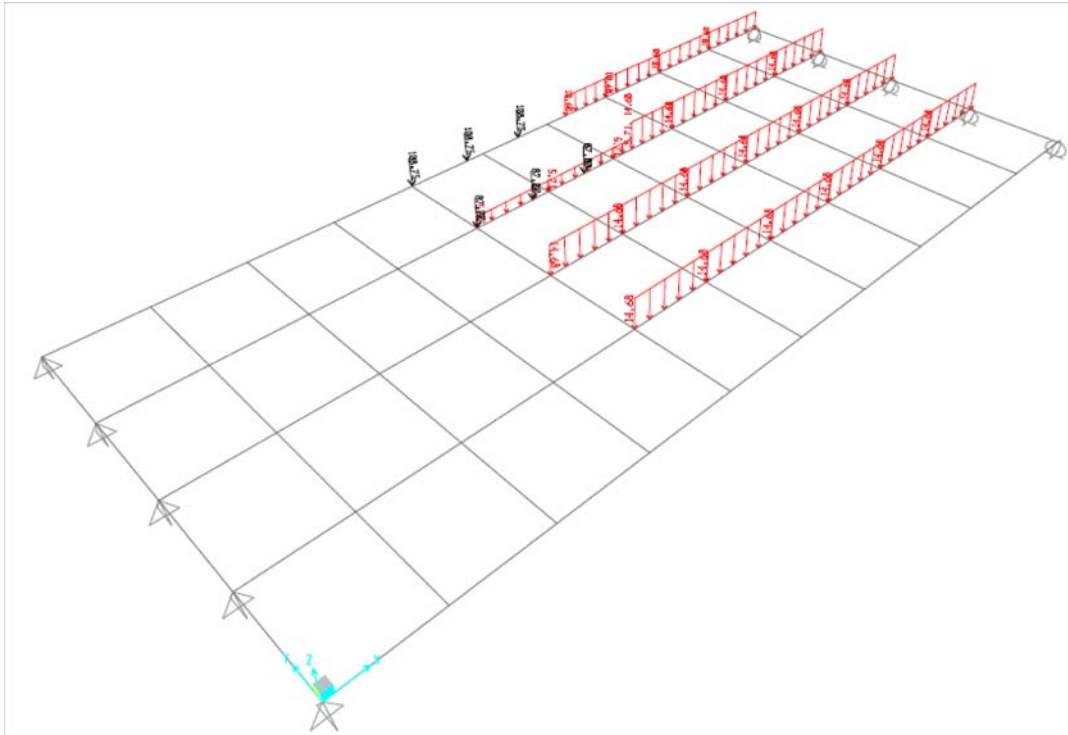
QVx3\_p



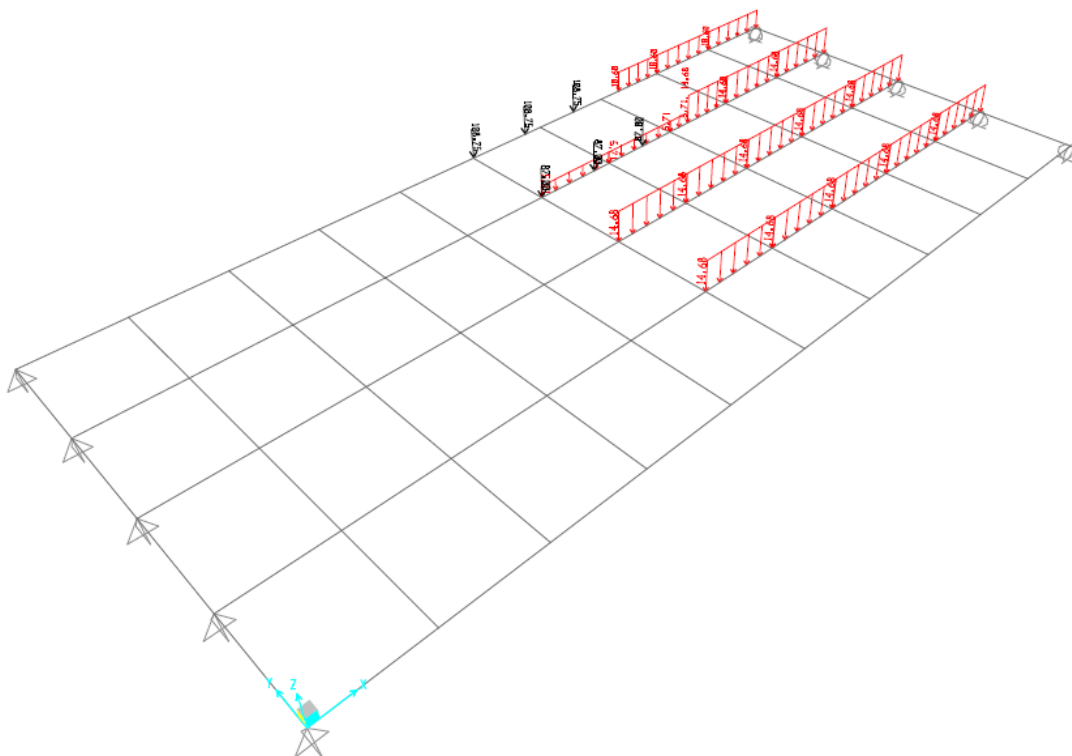
QVx4\_p



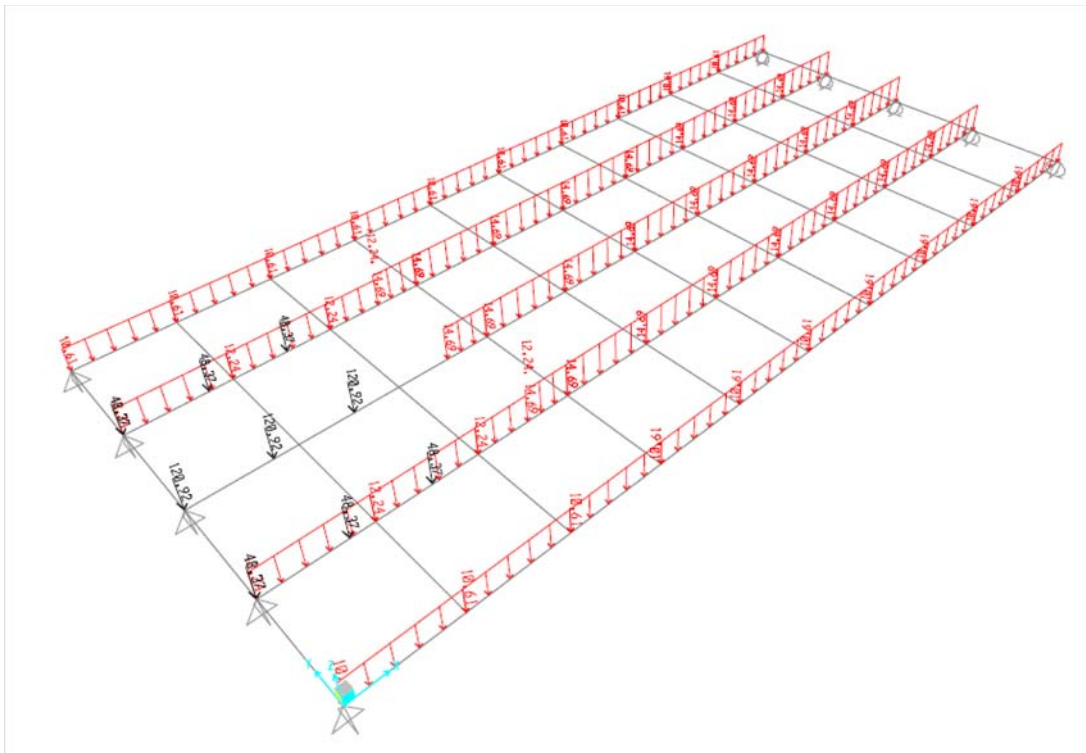
QVx5\_p



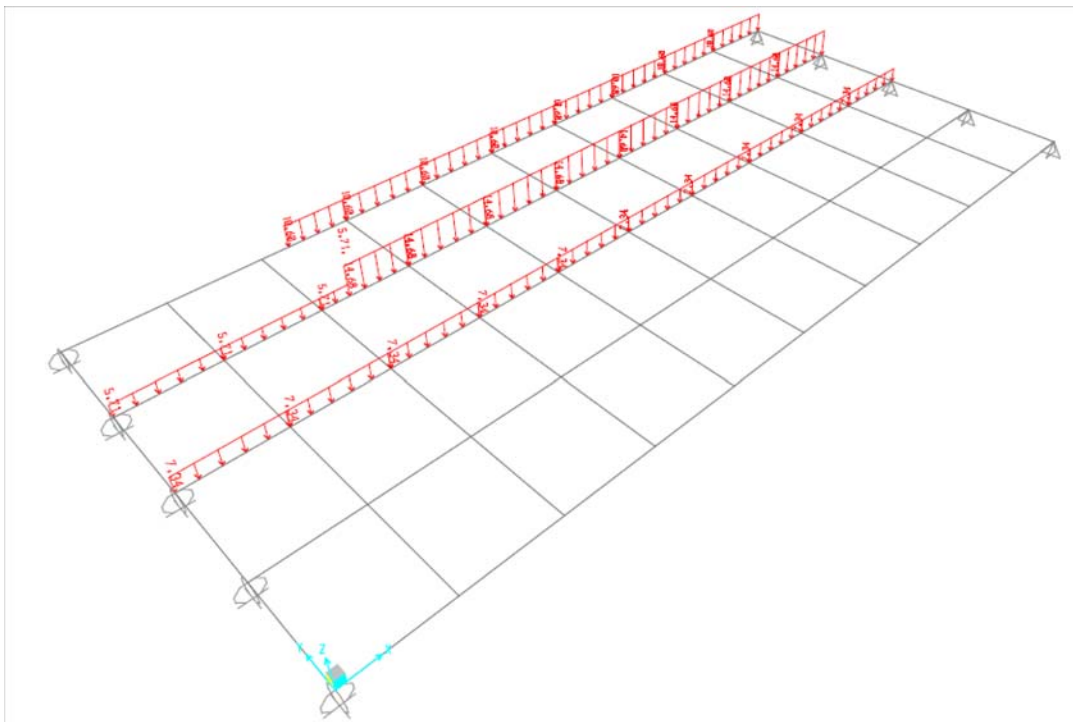
QVx6\_p



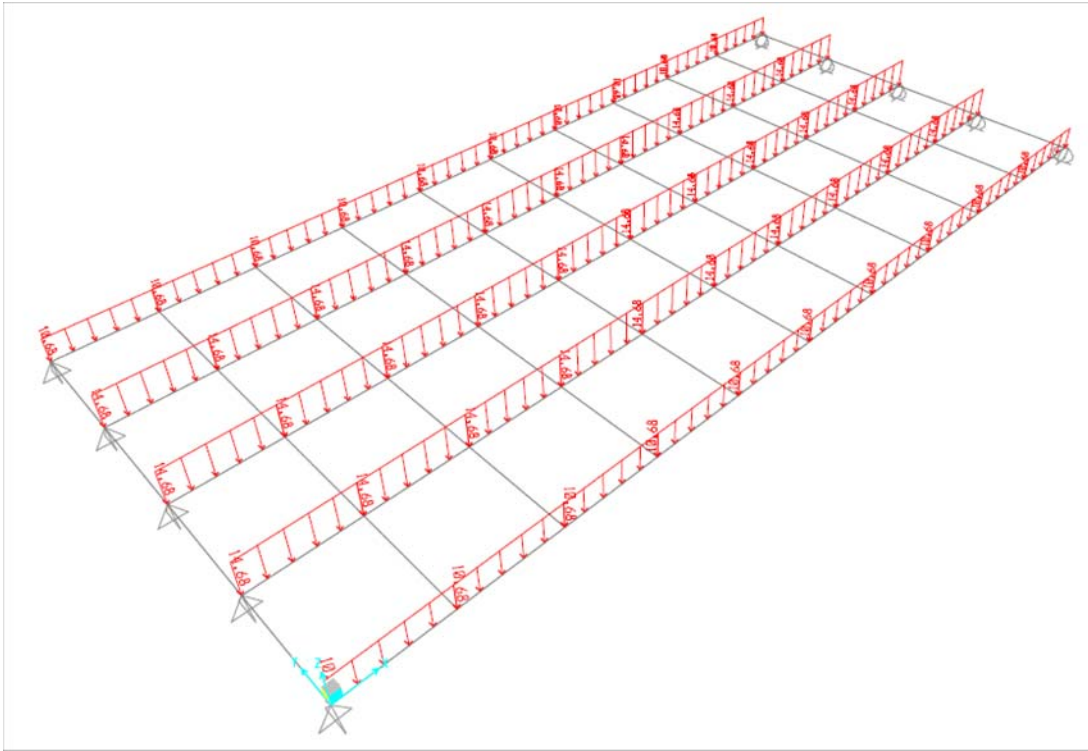
reação de apoio - vão totalmente carregado - veículo principal no eixo



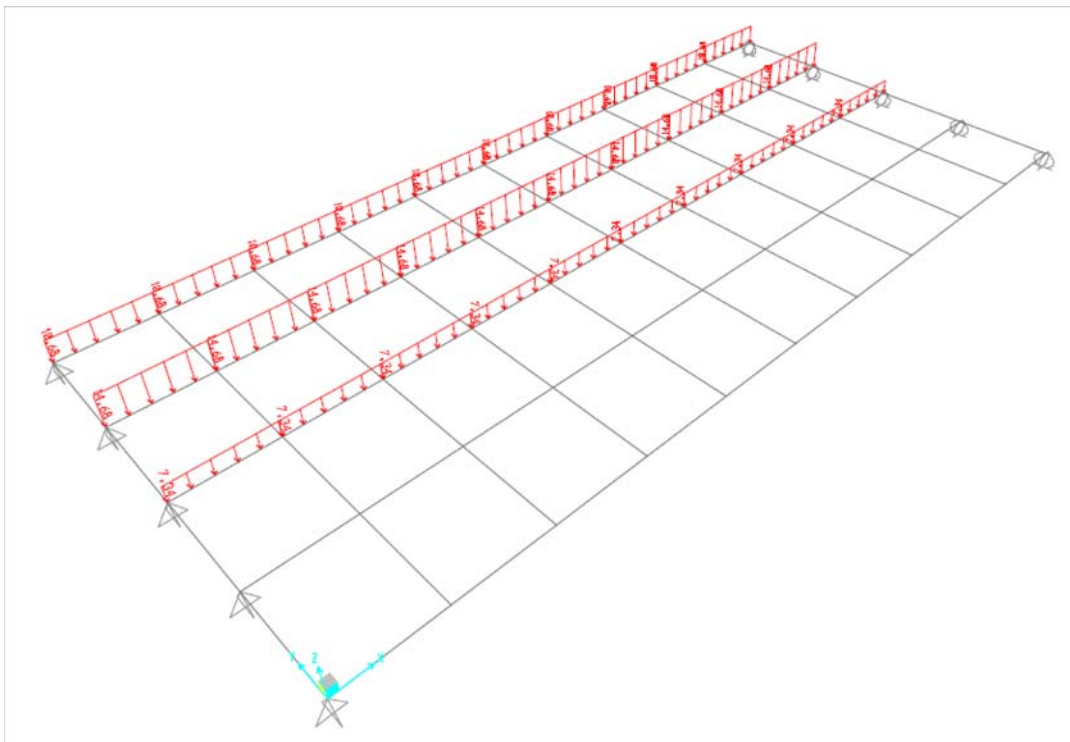
reação de apoio - vão metade carregado



q\_total



q\_metade





**Esforços solicitantes nas vigas principais**

A seguir são listados os momentos fletores atuantes na vigas isoladas e na seção composta (viga + laje) das vigas principais (sistema de grelha).

**Cargas permanentes**

número de divisões da viga :  $n_{div} := 10$

$$x_1 := 0\text{m}$$

$$i := 2..6$$

$$x_i := x_{i-1} + \frac{L_v}{10}$$

$$x = \begin{pmatrix} 0.00 \\ 1.93 \\ 3.86 \\ 5.79 \\ 7.72 \\ 9.65 \end{pmatrix} \text{m}$$

**carregamento g1**

$$i := 1..6$$

$$V_{g1_i} := \left(0.5 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot L_v \cdot g_1$$

$$M_{g1_i} := \frac{x_i}{L_v} \cdot \left(1 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot g_1 \cdot \frac{L_v^2}{2}$$

$$V_{g1} = \begin{pmatrix} 86.25 \\ 69.00 \\ 51.75 \\ 34.50 \\ 17.25 \\ 0.00 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$M_{g1} = \begin{pmatrix} 0.00 \\ 149.81 \\ 266.33 \\ 349.56 \\ 399.50 \\ 416.14 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$



**carregamento g2**

$$i := 1..6$$

**vigas externas**

$$V_{g2e_i} := \left(0.5 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot L_v \cdot g_{2e}$$

$$M_{g2e_i} := \frac{x_i}{L_v} \cdot \left(1 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot g_{2e} \cdot \frac{L_v^2}{2}$$

$$V_{g2e} = \begin{pmatrix} 92.88 \\ 74.31 \\ 55.73 \\ 37.15 \\ 18.58 \\ 0.00 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$M_{g2e} = \begin{pmatrix} 0.00 \\ 161.33 \\ 286.82 \\ 376.45 \\ 430.23 \\ 448.15 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

**vigas internas**

$$V_{g2i_i} := \left(0.5 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot L_v \cdot g_{2i}$$

$$M_{g2i_i} := \frac{x_i}{L_v} \cdot \left(1 - \frac{x_i}{L_v}\right) \cdot g_{2i} \cdot \frac{L_v^2}{2}$$

$$V_{g2i} = \begin{pmatrix} 98.91 \\ 79.13 \\ 59.35 \\ 39.56 \\ 19.78 \\ 0.00 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$M_{g2i} = \begin{pmatrix} 0.00 \\ 171.81 \\ 305.44 \\ 400.89 \\ 458.16 \\ 477.25 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Os esforços do carregamento g3 foram obtidos através do modelo de grelha no programa de elementos finitos e estão apresentados nas tabelas a seguir.

**Carregamento g3**

Os esforços do carregamento g3 foram obtidos através do modelo de grelha no programa de elementos finitos e estão apresentados nas tabelas a seguir.



Momentos fletores (kN*m) - VE					
Seção	Mg1	Mg2	Mg3	Mq_total	Mq_parcial
x1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x2	149,81	161,33	171,11	387,33	390,24
x3	266,33	286,82	305,80	696,62	702,45
x4	349,56	376,45	400,53	918,96	928,05
x5	399,50	430,23	456,88	1055,46	1066,31
x6	416,14	448,15	475,75	1109,09	1120,59

Momentos fletores (kN*m) - VI					
Seção	Mg1	Mg2	Mg3	Mq_total	Mq_parcial
x1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x2	149,81	171,81	149,99	487,09	486,21
x3	266,33	305,44	266,15	817,72	817,60
x4	349,56	400,89	350,18	1033,18	1033,70
x5	399,50	458,16	400,94	1183,82	1184,80
x6	416,14	477,25	417,81	1230,49	1231,70

Cortantes (kN) - VE					
Seção	Vg1	Vg2	Vg3	Vq_total	Vq_parcial
x1	86,25	92,88	104,23	207,60	209,69
x2	69,00	74,31	82,19	140,54	142,38
x3	51,75	55,73	61,26	112,08	113,44
x4	34,50	37,15	41,11	81,28	82,04
x5	17,25	18,58	21,41	51,02	51,23
x6	0,00	0,00	0,00	22,77	22,60

Cortantes (kN) - VI					
Seção	Vg1	Vg2	Vg3	Vq_total	Vq_parcial
x1	86,25	98,91	82,61	327,36	328,01
x2	69,00	79,13	67,00	164,75	169,34
x3	51,75	59,35	50,50	126,61	127,05
x4	34,50	39,56	33,41	93,67	93,97
x5	17,25	19,78	16,02	65,47	65,65
x6	0,00	0,00	0,00	39,90	33,95

$$M_{g3\_1} := 475.75 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{q\_1} := 1120.59 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{g3\_2} := 417.81 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{q\_2} := 1231.70 \text{ kN}\cdot\text{m}$$



**Reações de apoio**

Na tabela a seguir são apresentados os valores das reações de apoio devido aos carregamentos no modelo de viga e no modelo de grelha

**Reações de apoio**

Apoio	g1	g2	g3	qt	qt_eixo	qm	qdt	qdm
V1	92,49	98,38	109,35	200,28	82,39	209,00	79,11	87,93
V2	92,49	109,91	78,18	336,33	245,09	314,11	122,38	99,30
V3	92,49	109,91	75,97	247,50	337,15	190,24	125,17	32,31
V4	92,49	109,91	78,18	132,80	245,09	34,37	122,38	33,10
V5	92,49	98,38	109,35	75,24	82,39	-12,80	79,11	-8,83



caso 1 - ponte totalmente carregada (veículo principal no bordo)

caso 2 - ponte totalmente carregada (veículo principal no eixo)

caso 3 - ponte parcialmente carregada (veículo principal no bordo)

caso 4 - vão totalmente carregado apenas com carga distribuída

caso 5 - vão metade carregado apenas com carga distribuída

**Rotações no apoio  
g3 (rad)**

Apoio	g3
V1	0,00085
V2	0,00073
V3	0,00068
V4	0,00073
V5	0,00085

**Rotações no apoio  
carga móvel (rad)**

Vigas	q_total	q_parcial
V1	0,00178	0,00180
V2	0,00187	0,00187
V3	0,00169	0,00163
V4	0,00128	0,00110
V5	0,00084	0,00046

### 2.2.5 Dimensionamento das Vigas Principais

A seguir é apresentado o dimensionamento à flexão e ao cisalhamento das vigas principais da superestrutura (longarinas) em concreto protendido realizado através de programa de computador específico desenvolvido pela Arcus Consultoria e Projetos Ltda. No cálculo da perdas de protensão são adotados os procedimentos indicados no item 9.6 da NBR-6118/2014.

O dimensionamento ao cisalhamento é realizado conforme o Modelo de Cálculo I da NBR-6118/2014 (item 17.4.2.2) e leva em conta os efeitos favoráveis da protensão.

Também é apresentado o dimensionamento ao cisalhamento na ligação entre mesa e alma conforme o Anexo E da NBR 7187:2021





## ESTUDO DA PROTENSÃO

CLIENTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE AFOGADOS DA INGAZEIRA  
PROJETO: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (EXTERNA)

AÇO: CP190	RB	TENSÃO MÁXIMA (MPa):	1402,20
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO (MPa):			200000
ÁREA DO CABO (cm <sup>2</sup> ):			12,10
GRUPO DE CABOS:			2
ESCORREGAMENTO DAS ANCORAGENS (mm):			6,0
COEFICIENTE DE ATRITO $\mu$ :			0,20
COEFICIENTE DE DESVIO K (rad/m):			0,002
RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO - fck (MPa):			35
IDADE EM QUE SE APLICA A PROTENSÃO (DIAS):			28
NÚMERO DE SEÇÕES:			11



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES - VIGA ISOLADA

SEÇÃO	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Ws (m <sup>3</sup> )	Wi (m <sup>3</sup> )	ys (m)	yi (m)
0	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
1	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
2	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
3	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
4	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
5	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
6	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
7	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
8	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
9	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
10	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES - VIGA NO CONJUNTO

SEÇÃO	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Ws (m <sup>3</sup> )	Ws' (m <sup>3</sup> )	Wi (m <sup>3</sup> )	ys (m)	yi (m)
0	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
1	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
2	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
3	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
4	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
5	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
6	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
7	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
8	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
9	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901
10	0,7425	0,1243	0,6233	0,3112	0,1380	0,399	0,901





## ESTUDO DA PROTENSÃO

GRUPO DE CABOS >	Nº 01
QUANTIDADE:	1
CABOS: C1	FASE DE PROTENSÃO: 1
TENSÃO INICIAL (MPa):	1402,20
ANCORAGEM ESQUERDA:	ATIVA
ANCORAGEM DIREITA:	PASSIVA

SEÇÃO	ΔX (m)	X (m)	y (m)	α		Δα (rad)	TENSÕES APÓS PERDAS (Mpa)					
				(rad)	(graus)		ATRITO	CRAVAÇÃO	DEF. IMEDIATA	RETRAÇÃO	FLUÊNCIA	RELAXAÇÃO
0	0,000	0,000	0,81	0,113	6,5	0,000	1402,20	1232,83	1232,83	1218,81	1204,78	1129,48
1	1,930	1,930	0,59	0,098	5,6	0,015	1392,51	1246,21	1246,21	1232,19	1218,16	1142,03
2	1,930	3,860	0,43	0,072	4,1	0,041	1380,03	1256,80	1256,80	1242,77	1228,75	1151,95
3	1,930	5,790	0,31	0,052	3,0	0,062	1369,05	1268,88	1268,88	1254,86	1240,84	1163,29
4	1,930	7,720	0,23	0,023	1,3	0,090	1356,03	1278,94	1278,94	1264,92	1250,89	1172,71
5	1,930	9,650	0,22	0,000	0,0	0,113	1344,53	1290,50	1290,50	1276,48	1262,46	1183,55
6	1,930	11,580	0,23	-0,023	-1,3	0,137	1333,12	1302,16	1302,16	1288,14	1274,12	1194,48
7	1,930	13,510	0,31	-0,052	-3,0	0,165	1320,45	1312,56	1312,56	1298,53	1284,51	1204,23
8	1,930	15,440	0,43	-0,072	-4,1	0,186	1309,94	1309,94	1309,94	1295,92	1281,89	1201,78
9	1,930	17,370	0,59	-0,098	-5,6	0,212	1298,20	1298,20	1298,20	1284,18	1270,15	1190,77
10	1,930	19,300	0,81	-0,113	-6,5	0,227	1289,23	1289,23	1289,23	1275,20	1261,18	1182,36

ALONG. ESQ.: 0,130 m  
 ALONG. DIR.: 0,000 m



## ESTUDO DA PROTENSÃO

GRUPO DE CABOS >	Nº 02
QUANTIDADE:	1
CABOS: C2	FASE DE PROTENSÃO: 1
TENSÃO INICIAL (MPa):	1402,20
ANCORAGEM ESQUERDA:	PASSIVA
ANCORAGEM DIREITA:	ATIVA

SEÇÃO	ΔX (m)	X (m)	y (m)	α		Δα (rad)	TENSÕES APÓS PERDAS					
				(rad)	(graus)		ATRITO	CRAVAÇÃO	DEF. IMEDIATA	RETRAÇÃO	FLUÊNCIA	RELAXAÇÃO
0	0,000	0,000	0,43	0,062	3,6	0,000	1316,01	1316,01	1316,01	1301,99	1287,97	1207,47
1	1,930	1,930	0,31	0,057	3,3	0,005	1322,46	1322,46	1322,46	1308,44	1294,42	1213,52
2	1,930	3,860	0,21	0,044	2,5	0,018	1331,01	1323,54	1323,54	1309,52	1295,49	1214,53
3	1,930	5,790	0,14	0,031	1,8	0,031	1339,62	1314,64	1314,64	1300,61	1286,59	1206,18
4	1,930	7,720	0,09	0,016	0,9	0,047	1348,99	1306,49	1306,49	1292,47	1278,45	1198,54
5	1,930	9,650	0,08	0,000	0,0	0,062	1358,42	1298,41	1298,41	1284,39	1270,37	1190,97
6	1,930	11,580	0,09	-0,016	-0,9	0,078	1367,92	1290,40	1290,40	1276,38	1262,36	1183,46
7	1,930	13,510	0,14	-0,031	-1,8	0,093	1377,48	1282,45	1282,45	1268,43	1254,41	1176,01
8	1,930	15,440	0,21	-0,044	-2,5	0,106	1386,39	1273,85	1273,85	1259,83	1245,81	1167,94
9	1,930	17,370	0,31	-0,057	-3,3	0,119	1395,36	1265,30	1265,30	1251,28	1237,26	1159,93
10	1,930	19,300	0,43	-0,062	-3,6	0,124	1402,20	1254,63	1254,63	1240,61	1226,59	1149,93

ALONG. ESQ.: 0,000 m  
 ALONG. DIR.: 0,131 m

## ESTUDO DA PROTENSÃO

SEÇÃO	MOMENTOS DEVIDOS AOS CARREGAMENTOS (KN.m)			
	Mg1	Mg2	Mg3	Mq
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	149,81	161,33	171,11	390,24
2	266,33	286,82	305,80	702,45
3	349,56	376,45	400,53	928,05
4	399,50	430,23	456,88	1066,31
5	416,14	448,15	475,75	1120,59
6	399,50	430,23	456,88	1066,31
7	349,56	376,45	400,53	928,05
8	266,33	286,82	305,80	702,45
9	149,81	161,33	171,11	390,24
10	0,00	0,00	0,00	0,00



## ESTUDO DA PROTENSÃO

SEÇÃO	TENSÕES DEVIDAS AOS CARREGAMENTOS (MPa)					
	g1	g2	g3	q+	0,7 q+	
0	I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S'			0,00	0,00	0,00
1	I	1,69	1,82	1,24	2,83	1,98
	S	-1,52	-1,64	-0,27	-0,63	-0,44
	S'			-0,55	-1,25	-0,88
2	I	3,00	3,23	2,22	5,09	3,56
	S	-2,71	-2,92	-0,49	-1,13	-0,79
	S'			-0,98	-2,26	-1,58
3	I	3,94	4,24	2,90	6,73	4,71
	S	-3,56	-3,83	-0,64	-1,49	-1,04
	S'			-1,29	-2,98	-2,09
4	I	4,50	4,84	3,31	7,73	5,41
	S	-4,06	-4,38	-0,73	-1,71	-1,20
	S'			-1,47	-3,43	-2,40
5	I	4,69	5,05	3,45	8,12	5,68
	S	-4,23	-4,56	-0,76	-1,80	-1,26
	S'			-1,53	-3,60	-2,52
6	I	4,50	4,84	3,31	7,73	5,41
	S	-4,06	-4,38	-0,73	-1,71	-1,20
	S'			-1,47	-3,43	-2,40
7	I	3,94	4,24	2,90	6,73	4,71
	S	-3,56	-3,83	-0,64	-1,49	-1,04
	S'			-1,29	-2,98	-2,09
8	I	3,00	3,23	2,22	5,09	3,56
	S	-2,71	-2,92	-0,49	-1,13	-0,79
	S'			-0,98	-2,26	-1,58
9	I	1,69	1,82	1,24	2,83	1,98
	S	-1,52	-1,64	-0,27	-0,63	-0,44
	S'			-0,55	-1,25	-0,88
10	I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S'			0,00	0,00	0,00



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### ESFORÇOS DA PROTENSÃO COM PERDAS IMEDIATAS - ETAPA 01

SEÇÃO	Np (kN)	Vp (kN)	Mp (kN.m)	TENSÕES (MPa)		
				$\sigma_i$	$\sigma_s$	$\sigma_s'$
0	-3071,43	267,76	110,41	-7,35	-9,71	
1	-3098,25	238,79	-410,75	-13,29	-4,49	
2	-3116,67	180,49	-814,41	-17,89	-0,43	
3	-3123,23	128,87	-1108,20	-21,22	2,54	
4	-3127,76	60,64	-1309,99	-23,50	4,58	
5	-3132,58	0,00	-1341,42	-23,87	4,88	
6	-3136,38	-60,99	-1310,27	-23,53	4,56	
7	-3137,08	-130,40	-1105,31	-21,22	2,47	
8	-3120,74	-182,49	-801,80	-17,76	-0,57	
9	-3091,80	-241,01	-391,46	-13,06	-4,67	
10	-3065,11	-270,88	137,23	-7,03	-9,97	



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### ESFORÇOS DA PROTENSÃO COM PERDAS FINAIS ETAPA 1

SEÇÃO	Np (kN)	Vp (kN)	Mp (kN.m)	TENSÕES (MPa)		
				$\sigma_i$	$\sigma_s$	$\sigma_s'$
0	-2816,10	245,45	100,84	-6,74	-8,90	
1	-2841,18	218,94	-376,94	-12,19	-4,11	
2	-2858,37	165,50	-747,10	-16,41	-0,40	
3	-2864,46	118,18	-1016,48	-19,46	2,33	
4	-2868,66	55,62	-1201,52	-21,55	4,20	
5	-2873,17	0,00	-1230,35	-21,89	4,48	
6	-2876,74	-55,95	-1201,78	-21,58	4,18	
7	-2877,45	-119,61	-1013,77	-19,47	2,26	
8	-2862,18	-167,39	-735,28	-16,29	-0,53	
9	-2835,14	-221,02	-358,85	-11,97	-4,28	
10	-2810,18	-248,38	125,98	-6,44	-9,14	



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES (MPa)

VIGA		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5	FASE 6
0	I	-8,08	-7,35	-7,35	-6,74	-6,74	-6,74
	S	-10,69	-9,71	-9,71	-8,90	-8,90	-8,90
	S'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	I	-12,93	-9,79	-9,79	-7,45	-4,62	-6,03
	S	-6,46	-7,65	-7,65	-7,55	-8,18	-7,87
	S'	0,00	0,00	-0,55	-0,55	-1,80	-1,18
2	I	-16,68	-11,66	-11,66	-7,96	-2,87	-5,42
	S	-3,19	-6,06	-6,06	-6,51	-7,64	-7,08
	S'	0,00	0,00	-0,98	-0,98	-3,24	-2,11
3	I	-19,40	-13,04	-13,04	-8,38	-1,66	-5,02
	S	-0,76	-4,85	-4,85	-5,70	-7,19	-6,44
	S'	0,00	0,00	-1,29	-1,29	-4,27	-2,78
4	I	-21,35	-14,16	-14,16	-8,90	-1,17	-5,04
	S	0,97	-3,86	-3,86	-4,98	-6,69	-5,83
	S'	0,00	0,00	-1,47	-1,47	-4,89	-3,18
5	I	-21,57	-14,14	-14,14	-8,71	-0,59	-4,65
	S	1,14	-3,91	-3,91	-5,08	-6,87	-5,98
	S'	0,00	0,00	-1,53	-1,53	-5,13	-3,33
6	I	-21,38	-14,18	-14,18	-8,93	-1,20	-5,06
	S	0,95	-3,88	-3,88	-4,99	-6,71	-5,85
	S'	0,00	0,00	-1,47	-1,47	-4,89	-3,18
7	I	-19,41	-13,05	-13,05	-8,39	-1,66	-5,02
	S	-0,84	-4,92	-4,92	-5,76	-7,25	-6,51
	S'	0,00	0,00	-1,29	-1,29	-4,27	-2,78
8	I	-16,54	-11,53	-11,53	-7,84	-2,75	-5,30
	S	-3,34	-6,20	-6,20	-6,64	-7,77	-7,21
	S'	0,00	0,00	-0,98	-0,98	-3,24	-2,11
9	I	-12,68	-9,55	-9,55	-7,23	-4,40	-5,81
	S	-6,66	-7,83	-7,83	-7,72	-8,35	-8,03
	S'	0,00	0,00	-0,55	-0,55	-1,80	-1,18
10	I	-7,73	-7,03	-7,03	-6,44	-6,44	-6,44
	S	-10,97	-9,97	-9,97	-9,14	-9,14	-9,14
	S'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

FASE 1 g1 + 1,1p1i  
 FASE 2 g1 + p1i + g2  
 FASE 3 g1 + p1i + g2 + p2i  
 FASE 4 g1 + p1f + g2 + p2f + g3  
 FASE 5 g1 + p1f + g2 + p2f + g3 + q+  
 FASE 6 g1 + p1f + g2 + p2f + g3 + 0,5q+



## CORTANTES NAS VIGAS PRINCIPAIS (kN)

OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (EXTERNA)

Seção	V <sub>g1</sub>	V <sub>g2</sub>	V <sub>g3</sub>	V <sub>q</sub>
0	86,25	92,88	104,23	209,69
1	69,00	74,31	82,19	142,38
2	51,75	55,73	61,26	113,44
3	34,50	37,15	41,11	82,04
4	17,25	18,58	21,41	51,23
5	0,00	0,00	0,00	22,77







## DIMENSIONAMENTO AO CISLHAMENTO - NBR 6118 / 2014

OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (EXTERNA)

$f_{ck} = 35.000 \text{ kN/m}^2$        $f_{yk} = 500.000 \text{ kN/m}^2$

- $V_{d \max} = 1,35V_g + 0,9V_p + 1,5V_{q \max}$       CIA = 1,25
- $V_{d \min} = 1,35V_g + 0,9V_p + 1,0V_{q \min}$
- $V_{sd} = V_{d \max}$
- $V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$        $\alpha_{v2} = (1 - f_{ck} / 250)$
- $V_c = V_{c0} (1 + M_0 / M_{Sd, \max}) \leq 2 V_{c0}$
- $V_{c0} = 0,6 f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$        $f_{ctd} = f_{ctk, \inf} / \gamma_c = 1605 \text{ kN/m}^2$
- $V_{wd} = V_{sd} - V_c \geq 0$
- $A_{sw}/s = V_{wd} / (0,9 \cdot d \cdot f_{yd})$
- $\rho_{w \min} = 0,2 f_{ct, m} / f_{ywk} = 0,128 \%$

Seção	V <sub>g</sub> (kN)	V <sub>q máx</sub> (kN)	V <sub>q mín</sub> (kN)	V <sub>p</sub> (kN)	V <sub>d max</sub> (kN)	V <sub>d min</sub> (kN)	V <sub>sd</sub> (kN)	b <sub>w</sub> (m)	Σφ/2	b <sub>w nom</sub> (m)	d (m)	V <sub>rd2</sub> (kN)	V <sub>sd</sub> / V <sub>Rd2</sub>
S0	283,36	209,69	0,00	-245,45	554,80	161,63	554,80	0,450	0,038	0,412	1,200	2.869,99	0,19
S1	225,50	142,38	0,00	-218,94	374,34	107,38	374,34	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,33
S2	168,74	113,44	0,00	-165,50	249,01	78,85	249,01	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,22
S3	112,76	82,04	0,00	-118,18	168,92	45,86	168,92	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,15
S4	57,24	51,23	0,00	-55,62	104,06	27,22	104,06	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,09
S5	0,00	22,77	0,00	0,00	34,16	0,00	34,16	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,03

Seção	σ <sub>comp</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	W <sub>trac</sub> (m <sup>3</sup> )	M <sub>sd, máx</sub> (kN.m)	M <sub>0</sub> (kN.m)	V <sub>c0</sub> (kN)	V <sub>c</sub> (kN)	V <sub>wd</sub> (kN)	A <sub>sw</sub> /s (cm <sup>2</sup> /m)	V <sub>wd fad max</sub> (kN)	V <sub>wd fad min</sub> (kN)	k <sub>f</sub>	A <sub>sw</sub> ·k <sub>f</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>swmin</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
S0	6.742	0,1380	0,00	837,32	476,10	952,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	5,78
S1	12.192	0,1380	1.382,74	1.514,27	187,21	374,41	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S2	16.409	0,1380	2.213,26	2.037,96	187,21	359,58	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S3	19.459	0,1380	2.912,90	2.416,85	187,21	342,53	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S4	21.555	0,1380	3.336,39	2.677,12	187,21	337,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S5	21.892	0,1380	3.489,94	2.719,00	187,21	333,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57



## DIMENSIONAMENTO AO CISLHAMENTO NA LIGAÇÃO ENTRE A MESA COMPRIMIDA E A ALMA (ANEXO E - NBR 7187:2021)

OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (EXTERNA)

$$\begin{aligned}
 f_{ck} &= 35.000 \text{ kN / m}^2 & f_{cd} &= 25000 \text{ kN / m}^2 \\
 f_{yk} &= 500.000 \text{ kN / m}^2 & f_{yd} &= 434783 \text{ kN / m}^2 \\
 \theta_f &= 45 \text{ graus}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{ctm} &= 0,3 f_{ck}^{2/3} & &= 3210 \text{ kN / m}^2 \\
 f_{ctd} &= f_{ctk,inf} / \gamma_c & &= 1605 \text{ kN / m}^2 \\
 \alpha_{v2} &= (1 - f_{ck} / 250) & &= 0,86
 \end{aligned}$$

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} \cdot h_f \cdot d$$

$$V_{Rd2} = 0,54 \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot h_f \cdot \text{sen}\theta_f \cdot \text{cos}\theta_f$$

$$A_s/s = (V_{fd} / 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}) \cdot \text{tg}\theta_f$$

$$\rho_{sf,min} = 0,2 f_{ctm} / f_{yk} = 0,128\%$$

SEÇÃO	Vsd (kN)	bef (m)	bw (m)	d (m)	hf (m)	η	Vfd (kN)	VRd2 (kN)	Vc0 (kN)	Vcf (kN)	As (cm2/m)	As,min (cm2/m)
1	555	1,925	0,45	1,20	0,20	0,38	213	1161	231	231	0,0	2,6
2	374	1,925	0,20	1,20	0,20	0,45	168	1161	231	231	0,0	2,6
3	249	1,925	0,20	1,20	0,20	0,45	112	1161	231	231	0,0	2,6
4	169	1,925	0,20	1,20	0,20	0,45	76	1161	231	231	0,0	2,6
5	104	1,925	0,20	1,20	0,20	0,45	47	1161	231	231	0,0	2,6
6	34	1,925	0,20	1,20	0,20	0,45	15	1161	231	231	0,0	2,6



## ESTUDO DA PROTENSÃO

CLIENTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE AFOGADOS DA INGAZEIRA  
PROJETO: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (INTERNA)

AÇO: CP190	RB	TENSÃO MÁXIMA (MPa):	1402,20
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO (MPa):			200000
ÁREA DO CABO (cm <sup>2</sup> ):			12,10
GRUPO DE CABOS:			2
ESCORREGAMENTO DAS ANCORAGENS (mm):			6,0
COEFICIENTE DE ATRITO $\mu$ :			0,20
COEFICIENTE DE DESVIO K (rad/m):			0,002
RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO - fck (MPa):			35
IDADE EM QUE SE APLICA A PROTENSÃO (DIAS):			28
NÚMERO DE SEÇÕES:			11



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES - VIGA ISOLADA

SEÇÃO	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Ws (m <sup>3</sup> )	Wi (m <sup>3</sup> )	ys (m)	yi (m)
0	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
1	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
2	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
3	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
4	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
5	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
6	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
7	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
8	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
9	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578
10	0,3575	0,0513	0,0983	0,0888	0,522	0,578



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES - VIGA NO CONJUNTO

SEÇÃO	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	Ws (m <sup>3</sup> )	Ws' (m <sup>3</sup> )	Wi (m <sup>3</sup> )	ys (m)	yi (m)
0	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
1	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
2	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
3	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
4	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
5	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
6	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
7	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
8	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
9	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910
10	0,7675	0,1266	0,6345	0,3248	0,1390	0,390	0,910



## ESTUDO DA PROTENSÃO

GRUPO DE CABOS >	Nº 01
QUANTIDADE:	1
CABOS: C1	FASE DE PROTENSÃO: 1
TENSÃO INICIAL (MPa):	1402,20
ANCORAGEM ESQUERDA:	ATIVA
ANCORAGEM DIREITA:	PASSIVA

SEÇÃO	ΔX (m)	X (m)	y (m)	α		Δα (rad)	TENSÕES APÓS PERDAS (Mpa)					
				(rad)	(graus)		ATRITO	CRAVAÇÃO	DEF. IMEDIATA	RETRAÇÃO	FLUÊNCIA	RELAXAÇÃO
0	0,000	0,000	0,81	0,113	6,5	0,000	1402,20	1232,83	1232,83	1218,81	1204,78	1129,48
1	1,930	1,930	0,59	0,098	5,6	0,015	1392,51	1246,21	1246,21	1232,19	1218,16	1142,03
2	1,930	3,860	0,43	0,072	4,1	0,041	1380,03	1256,80	1256,80	1242,77	1228,75	1151,95
3	1,930	5,790	0,31	0,052	3,0	0,062	1369,05	1268,88	1268,88	1254,86	1240,84	1163,29
4	1,930	7,720	0,23	0,023	1,3	0,090	1356,03	1278,94	1278,94	1264,92	1250,89	1172,71
5	1,930	9,650	0,22	0,000	0,0	0,113	1344,53	1290,50	1290,50	1276,48	1262,46	1183,55
6	1,930	11,580	0,23	-0,023	-1,3	0,137	1333,12	1302,16	1302,16	1288,14	1274,12	1194,48
7	1,930	13,510	0,31	-0,052	-3,0	0,165	1320,45	1312,56	1312,56	1298,53	1284,51	1204,23
8	1,930	15,440	0,43	-0,072	-4,1	0,186	1309,94	1309,94	1309,94	1295,92	1281,89	1201,78
9	1,930	17,370	0,59	-0,098	-5,6	0,212	1298,20	1298,20	1298,20	1284,18	1270,15	1190,77
10	1,930	19,300	0,81	-0,113	-6,5	0,227	1289,23	1289,23	1289,23	1275,20	1261,18	1182,36

ALONG. ESQ.: 0,130 m  
 ALONG. DIR.: 0,000 m



## ESTUDO DA PROTENSÃO

GRUPO DE CABOS >	Nº 02
QUANTIDADE:	1
CABOS: C2	FASE DE PROTENSÃO: 1
TENSÃO INICIAL (MPa):	1402,20
ANCORAGEM ESQUERDA:	PASSIVA
ANCORAGEM DIREITA:	ATIVA

SEÇÃO	ΔX (m)	X (m)	y (m)	α		Δα (rad)	TENSÕES APÓS PERDAS					
				(rad)	(graus)		ATRITO	CRAVAÇÃO	DEF. IMEDIATA	RETRAÇÃO	FLUÊNCIA	RELAXAÇÃO
0	0,000	0,000	0,43	0,062	3,6	0,000	1316,01	1316,01	1316,01	1301,99	1287,97	1207,47
1	1,930	1,930	0,31	0,057	3,3	0,005	1322,46	1322,46	1322,46	1308,44	1294,42	1213,52
2	1,930	3,860	0,21	0,044	2,5	0,018	1331,01	1323,54	1323,54	1309,52	1295,49	1214,53
3	1,930	5,790	0,14	0,031	1,8	0,031	1339,62	1314,64	1314,64	1300,61	1286,59	1206,18
4	1,930	7,720	0,09	0,016	0,9	0,047	1348,99	1306,49	1306,49	1292,47	1278,45	1198,54
5	1,930	9,650	0,08	0,000	0,0	0,062	1358,42	1298,41	1298,41	1284,39	1270,37	1190,97
6	1,930	11,580	0,09	-0,016	-0,9	0,078	1367,92	1290,40	1290,40	1276,38	1262,36	1183,46
7	1,930	13,510	0,14	-0,031	-1,8	0,093	1377,48	1282,45	1282,45	1268,43	1254,41	1176,01
8	1,930	15,440	0,21	-0,044	-2,5	0,106	1386,39	1273,85	1273,85	1259,83	1245,81	1167,94
9	1,930	17,370	0,31	-0,057	-3,3	0,119	1395,36	1265,30	1265,30	1251,28	1237,26	1159,93
10	1,930	19,300	0,43	-0,062	-3,6	0,124	1402,20	1254,63	1254,63	1240,61	1226,59	1149,93

ALONG. ESQ.: 0,000 m  
 ALONG. DIR.: 0,131 m

## ESTUDO DA PROTENSÃO

SEÇÃO	MOMENTOS DEVIDOS AOS CARREGAMENTOS (KN.m)			
	Mg1	Mg2	Mg3	Mq
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	149,81	171,81	149,99	487,09
2	266,33	305,44	266,15	817,72
3	349,56	400,89	350,18	1033,70
4	399,50	458,16	400,94	1184,80
5	416,14	477,25	417,81	1232,70
6	399,50	458,16	400,94	1184,80
7	349,56	400,89	350,18	1033,70
8	266,33	305,44	266,15	817,72
9	149,81	171,81	149,99	487,09
10	0,00	0,00	0,00	0,00





## ESTUDO DA PROTENSÃO

SEÇÃO		TENSÕES DEVIDAS AOS CARREGAMENTOS (MPa)				
		g1	g2	g3	q+	0,7 q+
0	I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S'			0,00	0,00	0,00
1	I	1,69	1,93	1,08	3,50	2,45
	S	-1,52	-1,75	-0,24	-0,77	-0,54
	S'			-0,46	-1,50	-1,05
2	I	3,00	3,44	1,91	5,88	4,12
	S	-2,71	-3,11	-0,42	-1,29	-0,90
	S'			-0,82	-2,52	-1,76
3	I	3,94	4,51	2,52	7,44	5,21
	S	-3,56	-4,08	-0,55	-1,63	-1,14
	S'			-1,08	-3,18	-2,23
4	I	4,50	5,16	2,88	8,52	5,97
	S	-4,06	-4,66	-0,63	-1,87	-1,31
	S'			-1,23	-3,65	-2,55
5	I	4,69	5,37	3,01	8,87	6,21
	S	-4,23	-4,86	-0,66	-1,94	-1,36
	S'			-1,29	-3,80	-2,66
6	I	4,50	5,16	2,88	8,52	5,97
	S	-4,06	-4,66	-0,63	-1,87	-1,31
	S'			-1,23	-3,65	-2,55
7	I	3,94	4,51	2,52	7,44	5,21
	S	-3,56	-4,08	-0,55	-1,63	-1,14
	S'			-1,08	-3,18	-2,23
8	I	3,00	3,44	1,91	5,88	4,12
	S	-2,71	-3,11	-0,42	-1,29	-0,90
	S'			-0,82	-2,52	-1,76
9	I	1,69	1,93	1,08	3,50	2,45
	S	-1,52	-1,75	-0,24	-0,77	-0,54
	S'			-0,46	-1,50	-1,05
10	I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	S'			0,00	0,00	0,00



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### ESFORÇOS DA PROTENSÃO COM PERDAS IMEDIATAS - ETAPA 01

SEÇÃO	Np (kN)	Vp (kN)	Mp (kN.m)	TENSÕES (MPa)		
				$\sigma_i$	$\sigma_s$	$\sigma_s'$
0	-3071,43	267,76	110,41	-7,35	-9,71	
1	-3098,25	238,79	-410,75	-13,29	-4,49	
2	-3116,67	180,49	-814,41	-17,89	-0,43	
3	-3123,23	128,87	-1108,20	-21,22	2,54	
4	-3127,76	60,64	-1309,99	-23,50	4,58	
5	-3132,58	0,00	-1341,42	-23,87	4,88	
6	-3136,38	-60,99	-1310,27	-23,53	4,56	
7	-3137,08	-130,40	-1105,31	-21,22	2,47	
8	-3120,74	-182,49	-801,80	-17,76	-0,57	
9	-3091,80	-241,01	-391,46	-13,06	-4,67	
10	-3065,11	-270,88	137,23	-7,03	-9,97	



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### ESFORÇOS DA PROTENSÃO COM PERDAS FINAIS ETAPA 1

SEÇÃO	Np (kN)	Vp (kN)	Mp (kN.m)	TENSÕES (MPa)		
				$\sigma_i$	$\sigma_s$	$\sigma_s'$
0	-2816,10	245,45	100,84	-6,74	-8,90	
1	-2841,18	218,94	-376,94	-12,19	-4,11	
2	-2858,37	165,50	-747,10	-16,41	-0,40	
3	-2864,46	118,18	-1016,48	-19,46	2,33	
4	-2868,66	55,62	-1201,52	-21,55	4,20	
5	-2873,17	0,00	-1230,35	-21,89	4,48	
6	-2876,74	-55,95	-1201,78	-21,58	4,18	
7	-2877,45	-119,61	-1013,77	-19,47	2,26	
8	-2862,18	-167,39	-735,28	-16,29	-0,53	
9	-2835,14	-221,02	-358,85	-11,97	-4,28	
10	-2810,18	-248,38	125,98	-6,44	-9,14	



## ESTUDO DA PROTENSÃO

### VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES (MPa)

VIGA		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5	FASE 6
0	I	-8,08	-7,35	-7,35	-6,74	-6,74	-6,74
	S	-10,69	-9,71	-9,71	-8,90	-8,90	-8,90
	S'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	I	-12,93	-9,67	-9,67	-7,49	-3,99	-5,74
	S	-6,46	-7,76	-7,76	-7,62	-8,39	-8,00
	S'	0,00	0,00	-0,46	-0,46	-1,96	-1,21
2	I	-16,68	-11,45	-11,45	-8,06	-2,17	-5,11
	S	-3,19	-6,25	-6,25	-6,63	-7,92	-7,28
	S'	0,00	0,00	-0,82	-0,82	-3,34	-2,08
3	I	-19,40	-12,77	-12,77	-8,49	-1,05	-4,77
	S	-0,76	-5,10	-5,10	-5,86	-7,49	-6,67
	S'	0,00	0,00	-1,08	-1,08	-4,26	-2,67
4	I	-21,35	-13,84	-13,84	-9,01	-0,49	-4,75
	S	0,97	-4,15	-4,15	-5,16	-7,03	-6,09
	S'	0,00	0,00	-1,23	-1,23	-4,88	-3,06
5	I	-21,57	-13,81	-13,81	-8,83	0,04	-4,39
	S	1,14	-4,20	-4,20	-5,27	-7,21	-6,24
	S'	0,00	0,00	-1,29	-1,29	-5,08	-3,18
6	I	-21,38	-13,87	-13,87	-9,04	-0,51	-4,78
	S	0,95	-4,17	-4,17	-5,18	-7,05	-6,11
	S'	0,00	0,00	-1,23	-1,23	-4,88	-3,06
7	I	-19,41	-12,77	-12,77	-8,49	-1,06	-4,78
	S	-0,84	-5,17	-5,17	-5,92	-7,55	-6,74
	S'	0,00	0,00	-1,08	-1,08	-4,26	-2,67
8	I	-16,54	-11,32	-11,32	-7,93	-2,05	-4,99
	S	-3,34	-6,39	-6,39	-6,76	-8,05	-7,41
	S'	0,00	0,00	-0,82	-0,82	-3,34	-2,08
9	I	-12,68	-9,43	-9,43	-7,27	-3,77	-5,52
	S	-6,66	-7,94	-7,94	-7,79	-8,56	-8,17
	S'	0,00	0,00	-0,46	-0,46	-1,96	-1,21
10	I	-7,73	-7,03	-7,03	-6,44	-6,44	-6,44
	S	-10,97	-9,97	-9,97	-9,14	-9,14	-9,14
	S'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

FASE 1 g1 + 1,1p1i  
 FASE 2 g1 + p1i + g2  
 FASE 3 g1 + p1i + g2 + p2i  
 FASE 4 g1 + p1f + g2 + p2f + g3  
 FASE 5 g1 + p1f + g2 + p2f + g3 + q+  
 FASE 6 g1 + p1f + g2 + p2f + g3 + 0,5q+



---

**CORTANTES NAS VIGAS PRINCIPAIS (kN)**

---

---

**OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (INTERNA)**

---

<b>Seção</b>	<b>V<sub>g1</sub></b>	<b>V<sub>g2</sub></b>	<b>V<sub>g3</sub></b>	<b>V<sub>q</sub></b>
0	86,25	98,91	82,61	328,01
1	69,00	79,13	67,00	169,34
2	51,75	59,35	50,50	127,05
3	34,50	39,56	33,41	93,97
4	17,25	19,78	16,02	65,65
5	0,00	0,00	0,00	39,90





## DIMENSIONAMENTO AO CISLHAMENTO - NBR 6118 / 2014

OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (INTERNA)

$$\begin{aligned}
 f_{ck} &= 35.000 \quad \text{kN/m}^2 & \bullet V_{d \max} &= 1,35V_g + 0,9V_p + 1,5V_{q \max} & \text{CIA} &= 1,25 \\
 f_{yk} &= 500.000 \quad \text{kN/m}^2 & \bullet V_{d \min} &= 1,35V_g + 0,9V_p + 1,0V_{q \min} \\
 & & \bullet V_{sd} &= V_{d \max} \\
 & & \bullet V_{Rd2} &= 0,27 \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d & \alpha_{v2} &= (1 - f_{ck} / 250) \\
 & & \bullet V_c &= V_{c0} (1 + M_0 / M_{Sd, \max}) \leq 2 V_{c0} \\
 & & \bullet V_{c0} &= 0,6 f_{ctd} \cdot b_w \cdot d & f_{ctd} &= f_{ctk, \inf} / \gamma_c = 1605 \quad \text{kN/m}^2 \\
 & & \bullet V_{wd} &= V_{sd} - V_c \geq 0 \\
 & & \bullet A_{sw}/s &= V_{wd} / (0,9 \cdot d \cdot f_{yd}) \\
 & & \bullet \rho_{w \min} &= 0,2 f_{ct,m} / f_{ywk} = 0,128 \%
 \end{aligned}$$

Seção	V <sub>g</sub> (kN)	V <sub>q máx</sub> (kN)	V <sub>q mín</sub> (kN)	V <sub>p</sub> (kN)	V <sub>d máx</sub> (kN)	V <sub>d mín</sub> (kN)	V <sub>sd</sub> (kN)	b <sub>w</sub> (m)	Σφ/2	b <sub>w nom</sub> (m)	d (m)	V <sub>rd2</sub> (kN)	V <sub>sd</sub> / V <sub>Rd2</sub>
S0	267,77	328,01	0,00	-245,45	755,60	140,58	755,60	0,450	0,038	0,412	1,200	2.869,99	0,26
S1	215,13	169,34	0,00	-218,94	410,90	93,38	410,90	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,36
S2	161,60	127,05	0,00	-165,50	259,78	69,21	259,78	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,23
S3	107,47	93,97	0,00	-118,18	179,67	38,72	179,67	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,16
S4	53,05	65,65	0,00	-55,62	120,04	21,56	120,04	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,11
S5	0,00	39,90	0,00	0,00	59,85	0,00	59,85	0,200	0,038	0,162	1,200	1.128,49	0,05

Seção	σ <sub>comp</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	W <sub>trac</sub> (m <sup>3</sup> )	M <sub>sd, máx</sub> (kN.m)	M <sub>0</sub> (kN.m)	V <sub>c0</sub> (kN)	V <sub>c</sub> (kN)	V <sub>wd</sub> (kN)	A <sub>sw</sub> /s (cm <sup>2</sup> /m)	V <sub>wd fad max</sub> (kN)	V <sub>wd fad min</sub> (kN)	k <sub>f</sub>	A <sub>sw.k<sub>f</sub></sub> (cm <sup>2</sup> /m)	A <sub>swmin</sub> (cm <sup>2</sup> /m)
S0	6.742	0,1390	0,00	843,38	476,10	952,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	5,78
S1	12.192	0,1390	1.549,97	1.525,24	187,21	371,42	39,47	0,84	0,00	0,00	1,00	0,84	2,57
S2	16.409	0,1390	2.357,77	2.052,73	187,21	350,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S3	19.459	0,1390	3.036,40	2.434,37	187,21	337,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S4	21.555	0,1390	3.476,31	2.696,52	187,21	332,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57
S5	21.892	0,1390	3.619,17	2.738,70	187,21	328,87	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,57



## DIMENSIONAMENTO AO CISALHAMENTO NA LIGAÇÃO ENTRE A MESA COMPRIMIDA E A ALMA (ANEXO E - NBR 7187:2021)

OBRA: PONTE RIO PAJEÚ - VIGA PRÉ-MOLDADA DE 20m (INTERNA)

$$\begin{aligned}f_{ck} &= 35.000 \text{ kN / m}^2 & f_{cd} &= 25000 \text{ kN / m}^2 \\f_{yk} &= 500.000 \text{ kN / m}^2 & f_{yd} &= 434783 \text{ kN / m}^2 \\ \theta_f &= 45 \text{ graus}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{ctm} &= 0,3 f_{ck}^{2/3} & = & 3210 \text{ kN / m}^2 \\f_{ctd} &= f_{ctk,inf} / \gamma_c & = & 1605 \text{ kN / m}^2 \\ \alpha_{v2} &= (1 - f_{ck} / 250) & = & 0,86\end{aligned}$$

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} \cdot h_f \cdot d$$

$$V_{Rd2} = 0,54 \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot h_f \cdot \text{sen}\theta_f \cdot \text{cos}\theta_f$$

$$A_s/s = (V_{fd} / 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}) \cdot \text{tg}\theta_f$$

$$\rho_{sf,min} = 0,2 f_{ctm} / f_{yk} = 0,128\%$$

SEÇÃO	Vsd (kN)	bef (m)	bw (m)	d (m)	hf (m)	$\eta$	Vfd (kN)	VRd2 (kN)	Vc0 (kN)	Vcf (kN)	As (cm2/m)	As,min (cm2/m)
1	756	2,050	0,45	1,20	0,20	0,39	295	1161	231	231	1,4	2,6
2	374	2,050	0,20	1,20	0,20	0,45	169	1161	231	231	0,0	2,6
3	249	2,050	0,20	1,20	0,20	0,45	112	1161	231	231	0,0	2,6
4	169	2,050	0,20	1,20	0,20	0,45	76	1161	231	231	0,0	2,6
5	104	2,050	0,20	1,20	0,20	0,45	47	1161	231	231	0,0	2,6
6	34	2,050	0,20	1,20	0,20	0,45	15	1161	231	231	0,0	2,6

**Vigas principais - Verificação à ruptura**

$$f_{ptk} = 1900.00 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{pyk} = 1710.00 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{pyd} := \frac{f_{pyk}}{1.15}$$

$$f_{pyd} = 1486.96 \cdot \text{MPa}$$

número de cabos:

$$n_c := 2$$

área do cabo:

$$A_p := 12.1 \text{cm}^2$$

distância do CG dos cabos ao bordo inferior:

$$y_p := 0.11 \text{m}$$

área da armação passiva da viga:

$$A_{sv} := 10.00 \text{cm}^2$$

distancia do CG da armação passiva ao bordo inferior:

$$y_{sv} := 0.05 \text{m}$$

altura total da viga

$$h_{t\_viga} := h_v + h_f$$

$$h_{t\_viga} = 1.30 \text{m}$$

$$d_p := h_{t\_viga} - y_p$$

$$d_p = 1.19 \text{m}$$

$$d_s := h_{t\_viga} - y_{sv}$$

$$d_s = 1.25 \text{m}$$

$$\sigma_s := f_{yd}$$

$$\sigma_s = 434.78 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{sd} := A_{sv} \cdot \sigma_s$$

$$R_{sd} = 434.78 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma_{pd\_est} := 0.8 \cdot f_{ptk}$$

$$\sigma_{pd\_est} = 1520.00 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{pd} := n_c \cdot A_p \cdot \sigma_{pd\_est}$$

$$R_{pd} = 3678.40 \cdot \text{kN}$$

$$R_{cd} := R_{sd} + R_{pd}$$

$$R_{cd} = 4113.18 \cdot \text{kN}$$

$$y := \frac{R_{cd}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{fe}}$$

$$y = 0.101 \text{m}$$

$$\bar{x} := \begin{cases} y & \text{if } y \leq h_f \\ \frac{R_{cd} - 0.85 \cdot f_{cd} \cdot h_f \cdot (b_{fe} - b_1)}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$y = 0.101 \text{m}$$

$$x := \frac{y}{0.8}$$

$$x = 0.126 \text{m}$$

$$k_x := \frac{x}{d_s}$$

$$k_x = 0.101$$





Cálculo das deformações:

$$\text{Deformação} := \begin{cases} \text{"domínio 2"} & \text{if } k_x < 0.259 \\ \text{"domínio3"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Deformação} = \text{"domínio 2"}$$

$$\epsilon_c := \begin{cases} \left( \frac{x}{d_s - x} \cdot 0.01 \right) & \text{if } k_x < 0.259 \\ 0.0035 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\epsilon_c = 0.00112$$

$$\epsilon_s := \begin{cases} 0.010 & \text{if } k_x < 0.259 \\ \left( \frac{d_s - x}{x} \cdot 0.0035 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\epsilon_s = 0.01000$$

$$\epsilon_{px} := \begin{cases} \frac{d_p - x}{d_s - x} \cdot 0.010 & \text{if } k_x < 0.259 \\ \left( \frac{d_p - x}{x} \cdot 0.0035 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\epsilon_{px} = 0.00947$$

$$\sigma_{p\_inf} := 0.6 \cdot f_{ptk}$$

$$\sigma_{p\_inf} = 1140.00 \cdot \text{MPa}$$

deformação de pré-alongamento:

$$\epsilon_{p0} := \frac{\sigma_{p\_inf}}{E_p}$$

$$\epsilon_{p0} = 0.00570$$

deformação total:

$$\epsilon_p := \epsilon_{p0} + \epsilon_{px}$$

$$\epsilon_p = 0.01517$$

$$\epsilon_{pyd} := \frac{f_{pyd}}{E_p}$$

$$\epsilon_{pyd} = 0.00743$$

$$\epsilon_{uk} := 0.035$$

tensão na armadura de protensão:

$$\sigma_{pd} := \begin{cases} (E_p \cdot \epsilon_p) & \text{if } \epsilon_p < \frac{f_{pyd}}{E_p} \\ \left[ f_{pyd} + \left( \frac{f_{ptk}}{1.15} - f_{pyd} \right) \cdot \left( \frac{\epsilon_p - \epsilon_{pyd}}{\epsilon_{uk} - \epsilon_{pyd}} \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{pd} = 1533.30 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{pd\_est} - \sigma_{pd}}{\sigma_{pd}} = -0.0087$$



braços de alavanca:

$$R_{cd1} := 0.85f_{cd} \cdot (b_{fe} - b_1) \cdot \min(y, h_f) \quad R_{cd1} = 2403.81 \cdot \text{kN}$$

$$R_{cd2} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_1 \cdot y \quad R_{cd2} = 1709.37 \cdot \text{kN}$$

$$z_s := \frac{\left(d_s - \frac{\min(y, h_f)}{2}\right) \cdot R_{cd1} + \left(d_s - \frac{y}{2}\right) \cdot R_{cd2}}{R_{cd}} \quad z_s = 1.20 \text{ m}$$

$$z_p := \frac{\left(d_p - \frac{\min(y, h_f)}{2}\right) \cdot R_{cd1} + \left(d_p - \frac{y}{2}\right) \cdot R_{cd2}}{R_{cd}} \quad z_p = 1.14 \text{ m}$$

Momento resistente de projeto:

$$M_{Rd} := A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot z_s + A_p \cdot n_c \cdot \sigma_{pd} \cdot z_p \quad M_{Rd} = 4750.66 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentos de projeto:

$$\text{viga 1} \quad M_{g\_v1} := M_{g1_6} + M_{g2e_6} + M_{g3\_1} \quad M_{g\_v1} = 1340.04 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{q\_1} = 1120.59 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{d\_v1} := 1.35M_{g\_v1} + 1.5M_{q\_1} \quad M_{d\_v1} = 3489.94 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{viga 2:} \quad M_{g\_v2} := M_{g1_6} + M_{g2i_6} + M_{g3\_2} \quad M_{g\_v2} = 1311.20 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{q\_2} = 1231.70 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{d\_v2} := 1.35M_{g\_v2} + 1.5M_{q\_2} \quad M_{d\_v2} = 3617.68 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_d := \max(M_{d\_v1}, M_{d\_v2}) \quad M_d = 3617.68 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_d}{M_{Rd}} = 0.76 \quad \text{a segurança à ruptura é atendida}$$



**Tensões máximas admissíveis no estado limite último no ato da protensão**

Resistencia característica do concreto no ato da protensão:  $f_{ckj} := 35\text{MPa}$

tensão máxima admissível de tração:

$$f_{ctmj} := \left[ 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ckj}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \text{MPa} \quad f_{ctmj} = 3.21 \cdot \text{MPa} \quad 1.2f_{ctmj} = 3.85 \cdot \text{MPa}$$

tensão máxima de compressão:

$$0.7 \cdot f_{ckj} = 24.50 \cdot \text{MPa}$$

**Tensão máxima para verificação do estado limite de formação de fissuras (ELS-F)**

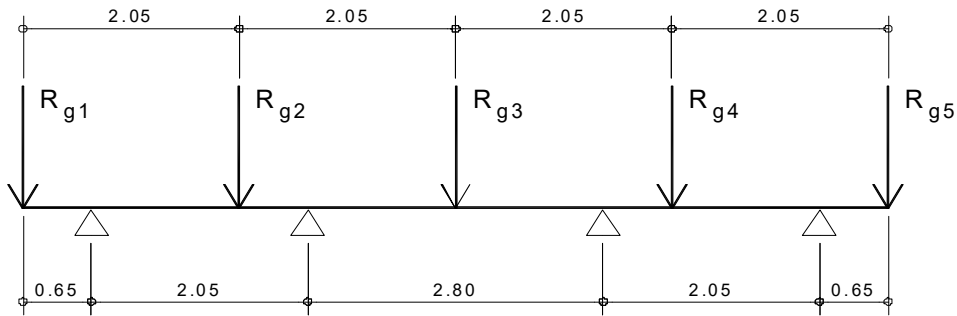
$$f_{ctfj} := \frac{f_{ctmj}}{0.7} \quad f_{ctfj} = 4.59 \cdot \text{MPa}$$



### 2.3 Cálculo das transversinas

As transversinas serão dimensionadas para a situação de maqueamento da superestrutura que é a hipótese de carregamento mais desfavorável.

#### Esquema de cálculo



#### Materiais:

Concreto:

Resistência característica à compressão:

$$f_{ctk} := 35 \text{ MPa}$$

Resistência de cálculo à compressão:

$$f_{cd} = 25.00 \cdot \text{MPa}$$

Peso específico:

$$\rho_c = 25.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Aços:

CA-50

Resistência característica ao escoamento:

$$f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$$

Resistência de cálculo ao escoamento:

$$f_{yd} = 435 \cdot \text{MPa}$$

CP-190

Tensão convencional de escoamento:

$$f_{pyk} = 1710 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{pyd} = 1487 \cdot \text{MPa}$$

Tensão característica de ruptura:

$$f_{ptk} = 1900 \cdot \text{MPa}$$

área dos cabos:

$$A_{cp} := 6.05 \text{ cm}^2$$

Módulo de elasticidade:

$$E_p = 200 \cdot \text{GPa}$$



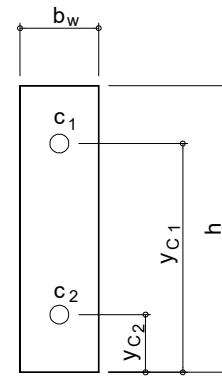
Geometria da transversina:

$$b_{wt} := 0.25\text{m}$$

$$h_t := 0.90\text{m}$$

$$A_t := b_{wt} \cdot h_t = 0.23 \cdot \text{m}^2$$

$$W_t := \frac{b_{wt} \cdot h_t^2}{6} = 0.0338 \cdot \text{m}^3$$



Força de protensão inicial:

$$P_i := 850\text{kN}$$

Força de protensão após as perdas:

$$P_f := 0.85P_i$$

Carregamentos:

Peso próprio:

$$g_t := b_{wt} \cdot h_t \cdot \rho_c$$

$$g_t = 5.63 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Viga V1=V5

$$R_{g.v1} := R_{g1} + R_{g2e} + R_{g3_1}$$

$$R_{g.v1} = 300.23 \cdot \text{kN}$$

Viga V2=V4

$$R_{g.v2} := R_{g1} + R_{g2i} + R_{g3_2}$$

$$R_{g.v2} = 280.59 \cdot \text{kN}$$

Viga V3

$$R_{g.v3} := R_{g1} + R_{g2i} + R_{g3_3}$$

$$R_{g.v3} = 278.38 \cdot \text{kN}$$

**Protensão:**

excentricidades dos cabos:

$$y_{c1} := 0.67\text{m}$$

$$e_{c1} := \frac{h_t}{2} - y_{c1}$$

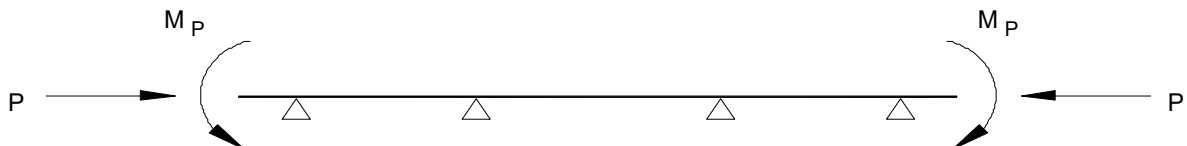
$$e_{c1} = -0.22\text{m}$$

$$y_{c2} := 0.075\text{m}$$

$$e_{c2} := \frac{h_t}{2} - y_{c2}$$

$$e_{c2} = 0.38\text{m}$$

Esforços referentes à aplicação da protensão:



$$P_f = 722.50 \cdot \text{kN}$$

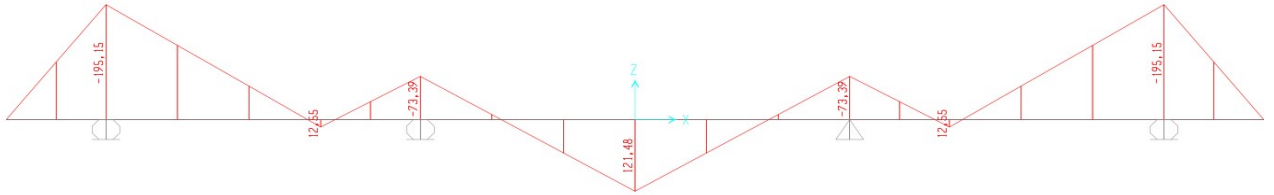
$$M_p := -P_f \cdot (e_{c1} + e_{c2})$$

$$M_p = -112.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

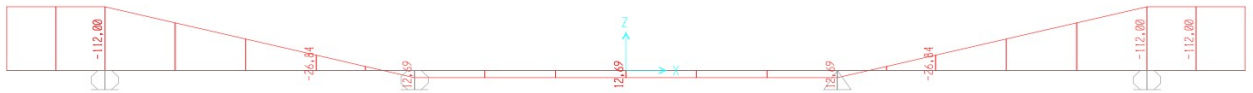


Diagramas de esforços no macaqueamento

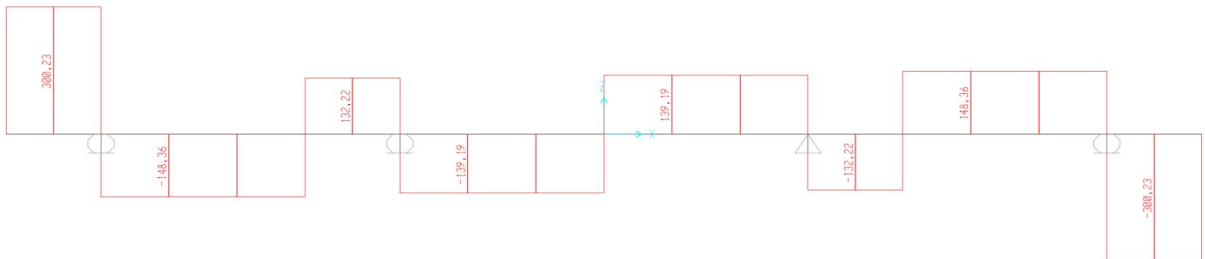
momentos fletores - cargas permanentes



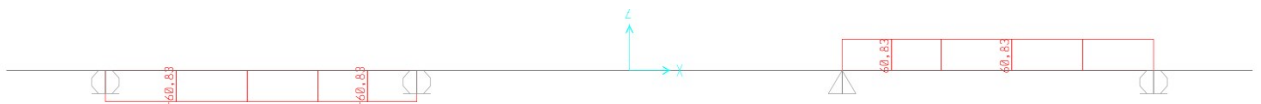
momentos fletores - protensão



esforços cortantes - cargas permanentes



esforços cortantes - protensão



Esforços máximos para cargas (obtidos do programa de análise estrutural):

$$M_{t,neg} := -235 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (\text{trecho do balanço})$$

$$M_{t,pos} := 147 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (\text{vãos internos})$$

$$V_t := 318 \text{ kN}$$

Esforços devido à protensão nas mesmas seções:

$$M_{tp\_bal} := -113 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (\text{trecho do balanço})$$

$$M_{tp\_v} := 16 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (\text{vãos internos})$$

Tensões devido aos momentos fletores devido às cargas na situação de macaqueamento:

a) momento negativo máximo:

$$\sigma_{neg,s} := \frac{-M_{t,neg}}{W_t} \quad \sigma_{neg,s} = 6.96 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{neg,i} := \frac{M_{t,neg}}{W_t} \quad \sigma_{neg,i} = -6.96 \cdot \text{MPa}$$

b) momento positivo máximo:

$$\sigma_{pos,s} := \frac{-M_{t,pos}}{W_t} \quad \sigma_{pos,s} = -4.36 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{pos,i} := \frac{M_{t,pos}}{W_t} \quad \sigma_{pos,i} = 4.36 \cdot \text{MPa}$$

Tensões nos bordos da transversina devido à protensão:

trecho do balanço

$$\sigma_{p1s} := \frac{-2 \cdot P_f}{A_t} - \frac{M_{tp\_bal}}{W_t} \quad \sigma_{p1s} = -3.07 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{p1i} := \frac{-2 \cdot P_f}{A_t} + \frac{M_{tp\_bal}}{W_t} \quad \sigma_{p1i} = -9.77 \cdot \text{MPa}$$



vãos internos

$$\sigma_{p2s} := \frac{-2 \cdot P_f}{A_t} - \frac{M_{tp\_v}}{W_t} \quad \sigma_{p2s} = -6.90 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{p2i} := \frac{-2 \cdot P_f}{A_t} + \frac{M_{tp\_v}}{W_t} \quad \sigma_{p2i} = -5.95 \cdot \text{MPa}$$

Tensões resultantes:

a) momento negativo máximo:

$$\sigma_{t.neg.s} := \sigma_{p1s} + \sigma_{neg.s} \quad \sigma_{t.neg.s} = 3.89 \cdot \text{MPa} \quad \text{tração}$$

$$\sigma_{t.neg.i} := \sigma_{p1i} + \sigma_{neg.i} \quad \sigma_{t.neg.i} = -16.73 \cdot \text{MPa} \quad \text{compressão}$$

b) momento positivo máximo:

$$\sigma_{t.pos.s} := \sigma_{p2s} + \sigma_{pos.s} \quad \sigma_{t.pos.s} = -11.25 \cdot \text{MPa} \quad \text{compressão}$$

$$\sigma_{t.pos.i} := \sigma_{p2i} + \sigma_{pos.i} \quad \sigma_{t.pos.i} = -1.59 \cdot \text{MPa} \quad \text{compressão}$$

Tensão máxima para verificação do estado limite de formação de fissuras (ELS-F)

$$f_{ctm} := \left[ 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \text{MPa} \quad f_{ctm} = 3.21 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctf} := \frac{f_{ctm}}{0.7} \quad f_{ctf} = 4.59 \cdot \text{MPa}$$

Tensão de compressão máxima admissível:

$$0.7 \cdot f_{ck} = 24.50 \cdot \text{MPa}$$

na situação de macaqueamento as tensões de tração estão abaixo do limite de formação de fissuras e as tensões de compressão estão abaixo da tensão máxima admissível.





**Verificação à ruptura**

$$\sigma_{pd\_est} := 0.8f_{ptk} \quad \sigma_{pd\_est} = 1520 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{pd} := A_p \cdot \sigma_{pd\_est} \quad R_{pd} = 919.60 \cdot \text{kN} \quad R_{cd} := R_{pd}$$

$$y := \frac{R_{cd}}{0.85f_{cd} \cdot b_{wt}} \quad y = 0.17 \text{ m}$$

$$x := \frac{y}{0.8} \quad x = 0.22 \text{ m}$$

armação positiva:  $d_i := h_t - y_{c2} \quad d_i = 0.83 \text{ m} \quad k_{xi} := \frac{x}{d_i} = 0.26 \quad (\text{domínio 2})$

armação negativa:  $d_s := y_{c1} \quad d_s = 0.67 \text{ m} \quad k_{xs} := \frac{x}{d_s} = 0.32 \quad (\text{domínio 3})$

deformações:

armação positiva:

$$\epsilon_{pxi} := \begin{cases} \frac{d_i - x}{h_t - 0.05\text{m} - x} \cdot 0.010 & \text{if } k_{xi} < 0.259 \\ \left( \frac{d_i - x}{x} \cdot 0.0035 \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \epsilon_{pxi} = 0.00984$$

armação negativa:

$$\epsilon_{pxs} := \begin{cases} \frac{d_s - x}{h_t - 0.05\text{m} - x} \cdot 0.010 & \text{if } k_{xi} < 0.259 \\ \left( \frac{d_s - x}{x} \cdot 0.0035 \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \epsilon_{pxs} = 0.00734$$



deformação devido ao pré-alongamento:

$$\sigma_{p\_inf} := 0.6 \cdot f_{ptk} \quad \sigma_{p\_inf} = 1140 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{p0} := \frac{\sigma_{p\_inf}}{E_p} \quad \epsilon_{p0} = 0.00570$$

deformação total:

armação positiva:  $\epsilon_{pi} := \epsilon_{p0} + \epsilon_{pxi} \quad \epsilon_{pi} = 0.01554$

armação positiva:  $\epsilon_{ps} := \epsilon_{p0} + \epsilon_{pxs} \quad \epsilon_{ps} = 0.01304$

$$\epsilon_{uk} := 0.035 \quad \epsilon_{pyd} := \frac{f_{pyd}}{E_p} = 0.00743$$

tensão na armadura de protensão:

armação positiva:

$$\sigma_{pdi} := \begin{cases} (E_p \cdot \epsilon_{pi}) & \text{if } \epsilon_{pi} < \frac{f_{pyd}}{E_p} \\ \left[ f_{pyd} + \left( \frac{f_{ptk}}{1.15} - f_{pyd} \right) \cdot (\epsilon_{pi} - \epsilon_{pyd}) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{pdi} = 1536 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{pd\_est} - \sigma_{pdi}}{\sigma_{pdi}} = -0.0101$$

armação negativa:

$$\sigma_{pds} := \begin{cases} (E_p \cdot \epsilon_{ps}) & \text{if } \epsilon_{ps} < \frac{f_{pyd}}{E_p} \\ \left[ f_{pyd} + \left( \frac{f_{ptk}}{1.15} - f_{pyd} \right) \cdot (\epsilon_{ps} - \epsilon_{pyd}) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{pds} = 1521 \cdot \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{pd\_est} - \sigma_{pds}}{\sigma_{pds}} = -0.0004$$



braços de alavanca:

armação positiva:

$$z_{pi} := h_t - \frac{y}{2} - y_{c2} \quad z_{pi} = 0.74 \text{ m}$$

armação negativa

$$z_{ps} := y_{c1} - \frac{y}{2} \quad z_{ps} = 0.58 \text{ m}$$

Momentos resistentes de projeto:

armação positiva:  $M_{Rd\_pos} := A_p \cdot \sigma_{pdi} \cdot z_{pi} \quad M_{Rd\_pos} = 686.03 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

armação negativa:  $M_{Rd\_neg} := A_p \cdot \sigma_{pds} \cdot z_{ps} \quad M_{Rd\_neg} = 536.73 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Segurança a ruptura:

armação positiva:  $M_{d\_pos} := 1.35 \cdot M_{t,pos} + M_{tp\_v} \quad M_{d\_pos} = 214.45 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

armação negativa:  $M_{d\_neg} := 1.35 \cdot M_{t,neg} + M_{tp\_bal} \quad M_{d\_neg} = -430.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

$$\frac{M_{d\_pos}}{M_{Rd\_pos}} = 0.31 \quad \frac{-M_{d\_neg}}{M_{Rd\_neg}} = 0.80 \quad (\text{a segurança à ruptura é atendida})$$



**Dimensionamento ao cisalhamento**

$$V_d := 1.35V_t \quad V_d = 429.3 \cdot \text{kN}$$

verificação das biela comprimida:

$$\alpha_{v2} := \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{MPa}} \right) \quad \alpha_{v2} = 0.86$$

$$V_{Rd2} := 0.27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_{wt} \cdot d_i \quad V_{Rd2} = 1197.28 \cdot \text{kN}$$

$$\text{compressão\_bielas} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } \max(V_d) \leq V_{Rd2} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{compressão\_bielas} = \text{"atende"}$$

armação de cisalhamento:

$$f_{ctkinf} := 0.7 \cdot f_{ctm} \quad f_{ctd} := \frac{f_{ctkinf}}{1.4} \quad f_{ctd} = 1.60 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{c0} := 0.6 \cdot f_{ctd} \cdot b_{wt} \cdot d_i \quad V_{c0} = 198.62 \cdot \text{kN}$$

$$V_c := V_{c0} \quad (\text{desprezado o efeito da protensão a favor da segurança})$$

$$V_{sw} := V_d - V_c \quad V_{sw} = 230.68 \cdot \text{kN}$$

$$\rho_{wmin} := 0.2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad A_{swmin} := \rho_{wmin} \cdot b_{wt} \quad A_{swmin} = 3.21 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{sw} := \begin{cases} 0 & \text{if } V_{sw} \leq 0 \\ \frac{|V_{sw}|}{(0.9 \cdot d_i \cdot f_{yd})} & \text{otherwise} \end{cases} \quad A_{sw} = 7.15 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$



**Cálculo dos alongamentos:**

comprimento do cabo:

$$L_{cb} := 8.65\text{m}$$

força de protensão aplicada:

$$P_i = 850.00 \cdot \text{kN}$$

desvio angular total:

$$\alpha_c := 1.1\text{deg}$$

coeficiente de atrito cabo/bainha:

$$\mu_b := 0.20$$

coeficiente de desvios construtivos:

$$k := 0.002 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

força de protensão inicial média ao longo do cabo:

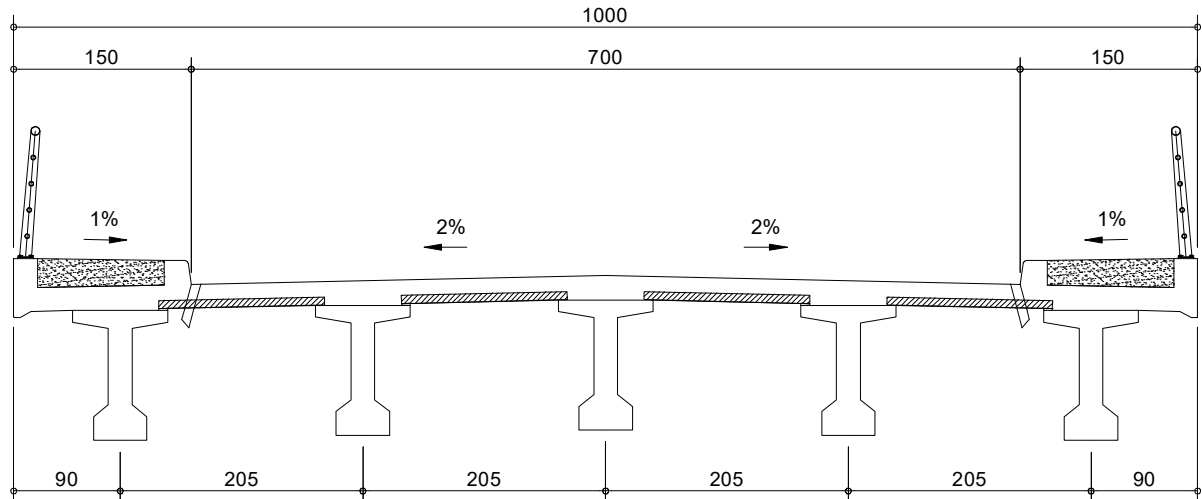
$$x_m := \frac{L_{cb}}{2} \quad P_m := \left[ P_i + P_i \cdot e^{-\left(\mu_b \cdot \alpha_c + k \cdot x_m\right)} \right] \cdot \frac{1}{2} \quad P_m = 845 \cdot \text{kN}$$

alongamento:

$$\Delta L := \frac{P_m}{A_p \cdot E_p} \cdot L_{cb} \quad \Delta L = 60 \cdot \text{mm} \quad (\text{protensão apenas em uma extremidade})$$



## 2.4 Cálculo da laje



## Dados da laje

Vão teórico da laje	$L_x := 2.05 \cdot \text{m}$		
Espessura da pré-laje	$h_{pr} := 0.07 \cdot \text{m}$		
Vão teórico da pré-laje	$L_1 := L_x - b_1 + h_{pr}$	$L_1 = 1.32 \text{ m}$	
Espessura média da laje	$h_1 := 0.20 \cdot \text{m}$		
Cobrimento	$c := 0.025 \cdot \text{m}$		
Espessura do pavimento	$h_{pav} = 0.07 \text{ m}$		
Peso específico do asfalto	$\rho_{pav} = 24.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$		
Concreto estrutural	$f_{ck} = 35 \cdot \text{MPa}$	$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.4}$	$f_{cd} = 25.0 \cdot \text{MPa}$
Peso específico do concreto	$\rho_c = 25.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$		
Aço CA-50	$f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$	$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15}$	$f_{yd} = 434.78 \cdot \text{MPa}$
Módulo de elasticidade do aço	$E_s = 210000 \cdot \text{MPa}$		
Conformação superficial do aço	$\eta_1 := 2.25$		



**Lajes centrais**

## a) Cargas Permanentes

- Cargas atuantes na pré-laje

Peso próprio da pré-laje:  $g_1 := h_{pr} \cdot \rho_c$        $g_1 = 1.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$$M_{xmg1} := g_1 \cdot \frac{L_1^2}{8} \quad M_{xmg1} = 0.38 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Peso do concreto fresco da laje moldada no local:  $g_2 := (h_1 - h_{pr}) \cdot \rho_c$        $g_2 = 3.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$$M_{xmg2} := g_2 \cdot \frac{L_1^2}{8} \quad M_{xmg2} = 0.71 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

- Cargas atuantes na seção composta

Pavimentação  $g_3 := h_{pav} \cdot \rho_{pav}$        $g_3 = 1.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

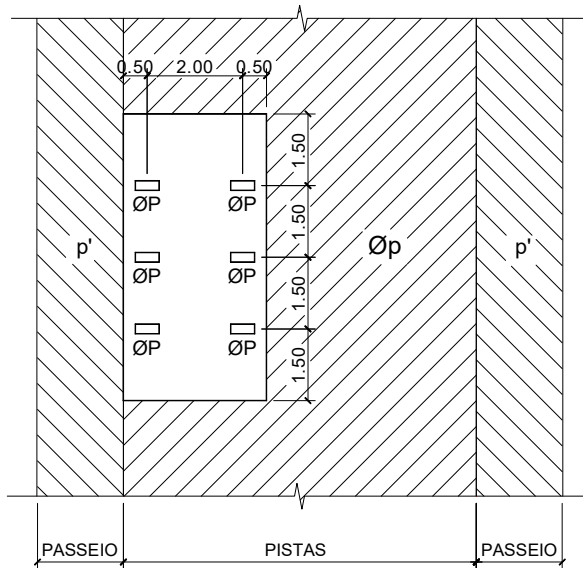
$$M_{xmg3} := 0.0417 \cdot g_3 \cdot L_x^2 \quad M_{xmg3} = 0.29 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{xeg3} := -0.0833 \cdot g_3 \cdot L_x^2 \quad M_{xeg3} = -0.59 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ymg3} := 0.0069 \cdot g_3 \cdot L_x^2 \quad M_{ymg3} = 0.05 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$



b) Carga Móvel: Trem tipo Classe 450 kN (NBR 7188/2013)



Carga concentrada por roda:

$$P = 75.00 \cdot \text{kN}$$

Carga uniformemente distribuída na pista:

$$p = 5.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Carga uniformemente distribuída nos passeios:

$$p' = 3.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Distância entre eixos:

$$a_2 = 1.50 \text{ m}$$

Distância entre rodas:

$$a = 2.00 \text{ m}$$

Coefficiente de impacto vertical:

$$\phi_1 := 1.35 \quad (\text{vão menor que } 10\text{m})$$

Peso da roda com impacto:

$$\phi_1 \cdot P = 101.25 \cdot \text{kN}$$

Carga uniformemente distribuída com impacto:

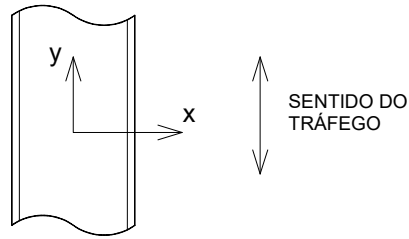
$$\phi_1 \cdot p = 6.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Os momentos fletores devidos à carga móvel serão determinados com o auxílio das tabelas de Hubert Rüsç (Berechnungstafeln für Rechtwinklige Fahrbahnplatten von Straßenbrücken):

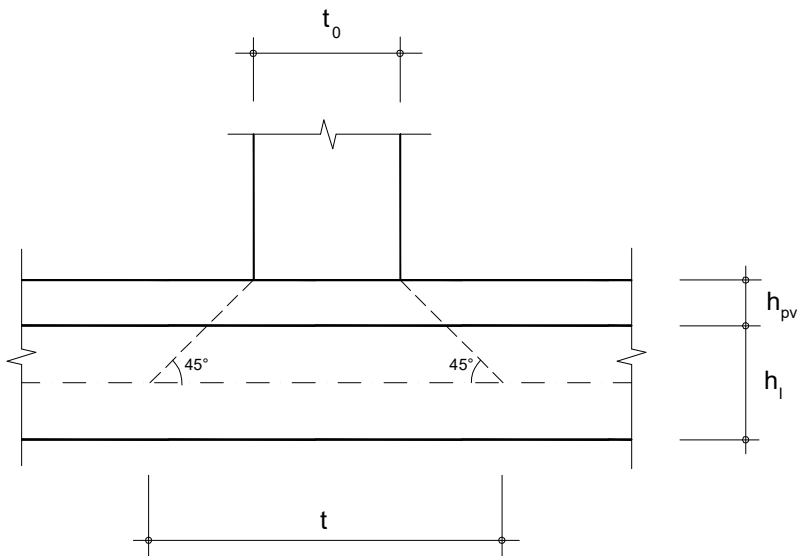




Modelo Estrutural (tabela 27B)



Determinação dos parâmetros de entrada nas tabelas:



Projeção da roda no pavimento:

$$t_{L0} := 0.20 \cdot m$$

$$t_{T0} := 0.50 \cdot m$$

Projeção média no pavimento:

$$t_0 := (t_{L0} \cdot t_{T0})^{0.5}$$

$$t_0 = 0.32 \text{ m}$$

Projeção da roda no eixo médio da laje:  
(propagação a 45°)

$$t := t_0 + 2 \cdot h_{pav} + h_1$$

$$t = 0.66 \text{ m}$$

Parâmetros de entrada:

$$\frac{t}{a} = 0.33$$

$$\frac{L_x}{a} = 1.03$$



Momentos fletores devidos à carga móvel:

$$M_{xmq} := 0.130 \cdot \phi_1 \cdot P + 0.013 \cdot \phi_1 \cdot p \cdot m^2$$

$$M_{xmq} = 13.25 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ymq} := 0.083 \cdot \phi_1 \cdot P + 0.015 \cdot \phi_1 \cdot p \cdot m^2$$

$$M_{ymq} = 8.51 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{xeq} := -0.263 \cdot \phi_1 \cdot P - 0.298 \phi_1 \cdot p \cdot m^2$$

$$M_{xeq} = -28.64 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$



### Dimensionamento à flexão simples

- $M_{xm}$

$$d := h_1 - c - 0.005 \cdot m \quad d = 0.170 \text{ m}$$

$$M_{xmd} := 1.35 \cdot (M_{xmg1} + M_{xmg2} + M_{xmg3}) + 1.5 \cdot M_{xmq} \quad M_{xmd} = 21.74 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$K_{md} := \frac{M_{xmd}}{1.00 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad K_{md} = 0.030 \quad k_z := 0.98$$

$$A_{s1} := \frac{M_{xmd} \cdot m}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad A_{s1} = 3.00 \cdot \text{cm}^2 \quad A_{s1a} := 12.8 \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{adotado})$$

- $M_{xe}$

$$d_e := d + \frac{b_1}{6} \quad d_e = 0.30 \text{ m}$$

$$M_{xed} := 1.35 \cdot M_{xeg3} + 1.5 \cdot M_{xeq} \quad M_{xed} = -43.75 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$K_{md} := \frac{|M_{xed}|}{1.00 \cdot d_e^2 \cdot f_{cd}} \quad K_{md} = 0.019 \quad k_z := 0.98$$

$$A_{s2} := \frac{|M_{xed}| \cdot m}{k_z \cdot d_e \cdot f_{yd}} \quad A_{s2} = 3.39 \cdot \text{cm}^2 \quad A_{s2a} := 8.00 \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{adotado})$$

- $M_{ym}$

$$d_y := h_1 - h_{pr} - 0.005 \cdot m$$

$$d_y = 0.125 \text{ m}$$

$$M_{ymd} := 1.35 \cdot M_{ymg3} + 1.5 \cdot M_{ymq}$$

$$M_{ymd} = 12.82 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$K_{md} := \frac{M_{ymd}}{1.00 \cdot d_y^2 \cdot f_{cd}}$$

$$K_{md} = 0.033$$

$$k_z := 0.97$$

$$A_{s3} := \frac{M_{ymd}}{k_z \cdot d_y \cdot f_{yd}} \cdot m$$

$$A_{s3} = 2.43 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{s3a} := 8.00 \cdot \text{cm}^2$$

(adotado)



### Dimensionamento ao cisalhamento

$$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left[ \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctkinf} := 0.7 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctkinf}}{1.4}$$

$$\tau_{Rd} := 0.25 f_{ctd}$$

$$k := 1.6 - \frac{d}{\text{m}}$$

$$k = 1.43$$

$$\tau_{Rd} = 0.40 \cdot \text{MPa}$$

$$\rho_1 := \frac{A_{s2a}}{d \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_1 = 0.0047$$

$$V_{Rd1} := \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot d$$

$$V_{Rd1} = 135.41 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Carga permanente

Largura da mesa superior da viga:

$$b_{fv} := b_1$$

$$b_{fv} = 0.80 \text{ m}$$

Não são consideradas as cargas que estejam a uma distância menor que 1,2h da mesa.

$$V_g := \frac{(L_x - b_{fv} - 2 \cdot 1.2 \cdot h_1)}{2} \cdot (g_1 + g_2 + g_3)$$

$$V_g = 2.57 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Carga móvel

$$x_1 := \frac{b_{fv}}{2} + 1.2 \cdot h_1 + \frac{t_{T0}}{2}$$

$$x_1 = 0.89 \text{ m}$$

$$x_2 := x_1 + a$$

$$x_2 = 2.89 \text{ m}$$

$$V_q := \frac{\phi_1 \cdot P}{2 \cdot x_1} \cdot \left( \frac{L_x - x_1}{L_x} + \frac{L_x - x_2}{L_x} \right)$$

$$V_q = 8.88 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

(propagação em 45°)

$$V_{sd} := 1.35 \cdot V_g + 1.5 \cdot V_q$$

$$V_{sd} = 16.79 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{cisalhamento} := \begin{cases} \text{"não é necessária armação "} & \text{if } V_{sd} \leq V_{Rd1} \\ \text{"necessita armação "} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{cisalhamento} = \text{"não é necessária armação "}$$



#### Verificação das tensões de serviço

- $M_{xm}$

$$\sigma_{xmg1} := \frac{M_{xmg1} \cdot m}{0.87 \cdot \frac{h_{pr}}{2} \cdot A_{s1a}}$$

$$\sigma_{xmg1} = 9.8 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xmg2} := \frac{M_{xmg2} \cdot m}{0.87 \cdot \frac{h_{pr}}{2} \cdot A_{s1a}}$$

$$\sigma_{xmg2} = 18.2 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xmg3} := \frac{M_{xmg3} \cdot m}{0.87 \cdot d \cdot A_{s1a}}$$

$$\sigma_{xmg3} = 1.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xm q} := \frac{0.8 M_{xm q} \cdot m}{0.87 \cdot d \cdot A_{s1a}}$$

$$\sigma_{xm q} = 56 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xm} := \sigma_{xmg1} + \sigma_{xmg2} + \sigma_{xmg3} + \sigma_{xm q}$$

$$\sigma_{xm} = 85 \cdot \text{MPa}$$

•  $M_{xe}$ 

$$\sigma_{xeg3} := \frac{-M_{xeg3} \cdot m}{0.87 \cdot d_e \cdot A_{s2a} \cdot l}$$

$$\sigma_{xeg3} = 2.8 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xeq} := \frac{-0.8M_{xeq} \cdot m}{0.87 \cdot d_e \cdot A_{s2a}}$$

$$\sigma_{xeq} = 108.5 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{xe} := \sigma_{xeg3} + \sigma_{xeq}$$

$$\sigma_{xe} = 111.3 \cdot \text{MPa}$$

•  $M_{ym}$ 

$$\sigma_{ymg3} := \frac{M_{ymg3} \cdot m}{0.87 \cdot d_y \cdot A_{s3a}}$$

$$\sigma_{ymg3} = 0.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{ymq} := \frac{0.8M_{ymq} \cdot m}{0.87 \cdot d_y \cdot A_{s2a} \cdot l}$$

$$\sigma_{ymq} = 78.2 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{ym} := \sigma_{ymg3} + \sigma_{ymq}$$

$$\sigma_{ym} = 78.8 \cdot \text{MPa}$$

Verificação da fadiga na armadura

Variações de tensões devidas à carga móvel:  
(combinação frequente)

$$M_{xm} \quad \sigma_{xm} = 56 \cdot \text{MPa}$$

$$M_{xe} \quad \sigma_{xe} = 109 \cdot \text{MPa}$$

$$M_{ym} \quad \sigma_{ym} = 78 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta f_{sm\acute{a}x} := \max(\sigma_{xm}, \sigma_{xe}, \sigma_{ym})$$

$$\Delta f_{sm\acute{a}x} = 109 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta f_{sdfad} := 190 \cdot \text{MPa} \quad (\text{para } 2 \times 10^6 \text{ ciclos})$$

$$\text{fadiga} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } \Delta f_{sm\acute{a}x} \leq \Delta f_{sdfad} \\ \text{"n\~{a}o atende"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{fadiga} = \text{"atende"}$$



Verificação da fissuração

$$w_{k\text{máx}} := 0.3 \cdot \text{mm}$$

- $M_{xm}$

$$\phi := 8 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{sv} := \sigma_{xm}$$

$$\rho_r := \frac{A_{s1a}}{\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi\right) \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_r = 0.01438$$

$$w_{k1} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot 3 \cdot \frac{\sigma_s}{f_{ctm}}$$

$$w_{k1} = 0.01 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k2} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{4}{\rho_r} + 45\right)$$

$$w_{k2} = 0.04 \cdot \text{mm}$$

$$w_k := \min(w_{k1}, w_{k2})$$

$$w_k = 0.01 \cdot \text{mm}$$

$$\text{fissuração} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } w_k \leq w_{k\text{máx}} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{fissuração} = \text{"atende"}$$

- $M_{xe}$

$$\phi := 10 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{sv} := \sigma_{xe}$$

$$\rho_r := \frac{A_{s2a}}{\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi\right) \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_r = 0.00762$$

$$w_{k1} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot 3 \cdot \frac{\sigma_s}{f_{ctm}}$$

$$w_{k1} = 0.02 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k2} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{4}{\rho_r} + 45\right)$$

$$w_{k2} = 0.11 \cdot \text{mm}$$

$$w_k := \min(w_{k1}, w_{k2})$$

$$w_k = 0.02 \cdot \text{mm}$$

$$\text{fissuração} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } w_k \leq w_{k\text{máx}} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{fissuração} = \text{"atende"}$$



- $M_{ym}$

$$\phi := 10 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{sv} := \sigma_{ym}$$

$$\rho_r := \frac{A_s 3a}{\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi\right) \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_r = 0.00762$$

$$w_{k1} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot 3 \cdot \frac{\sigma_s}{f_{ctm}}$$

$$w_{k1} = 0.01 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k2} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{4}{\rho_r} + 45\right)$$

$$w_{k2} = 0.08 \cdot \text{mm}$$

$$w_{ka} := \min(w_{k1}, w_{k2})$$

$$w_k = 0.01 \cdot \text{mm}$$

$$\text{fissuração} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } w_k \leq w_{k\text{máx}} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{fissuração} = \text{"atende"}$$

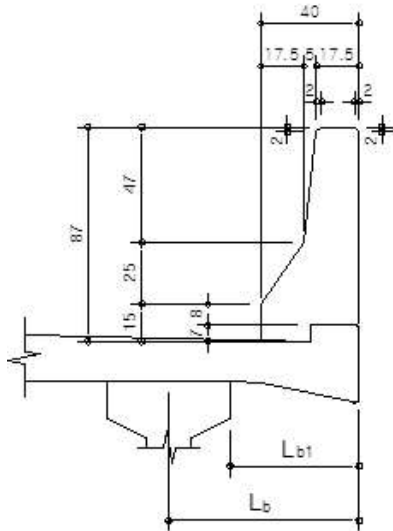


**2.5 Cálculo da laje do balanço:**

No dimensionamento da laje do balanço, a favor da segurança, foi considerada a hipótese da remoção dos passeios para alargamento das pista de rolamento

- Centro de gravidade do guarda-rodas

Considerando o guarda-rodas dividido em retângulos e triângulos:



$$L_{b1} := 0.90\text{m}$$

$$L_{b1} := L_b - \frac{b_1}{2}$$

$$L_{b1} = 0.50\text{m}$$

$$A_1 := 0.175\text{m} \cdot 0.47\text{m} \quad A_1 = 0.082\text{-m}^2$$

$$x_{1w} := \frac{0.175}{2}\text{m}$$

$$x_1 = 0.0875\text{m}$$

$$A_2 := \frac{0.05\text{m} \cdot 0.47\text{m}}{2} \quad A_2 = 0.012\text{-m}^2$$

$$x_{2w} := 0.175\text{m} + \frac{0.05}{3}\text{m}$$

$$x_2 = 0.1917\text{m}$$

$$A_3 := 0.225\text{m} \cdot 0.25\text{m} \quad A_3 = 0.056\text{-m}^2$$

$$x_3 := \frac{0.225}{2}\text{m}$$

$$x_3 = 0.1125\text{m}$$

$$A_4 := \frac{0.175\text{m} \cdot 0.25\text{m}}{2} \quad A_4 = 0.022\text{-m}^2$$

$$x_4 := 0.225\text{m} + \frac{0.175}{3}\text{m}$$

$$x_4 = 0.2833\text{m}$$

$$A_5 := 0.15\text{m} \cdot 0.40\text{m} \quad A_5 = 0.060\text{-m}^2$$

$$x_5 := \frac{0.40}{2}\text{m}$$

$$x_5 = 0.20\text{m}$$

$$x_{gr} := L_{b1} - \left( \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4 + A_5 \cdot x_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5} \right)$$

$$x_{gr} = 0.35\text{m}$$

$$P_{gr} := (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \cdot \rho_c$$

$$P_{gr} = 5.80 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Momento fletor devidos às cargas permanentes:

$$M_{bg} := h_1 \cdot \rho_c \cdot \frac{L_{b1}^2}{2} + P_{gr} \cdot x_{gr} + h_{pav} \cdot \rho_{pav} \cdot \frac{L_{b1}^2}{2}$$

$$M_{bg} = 2.89 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

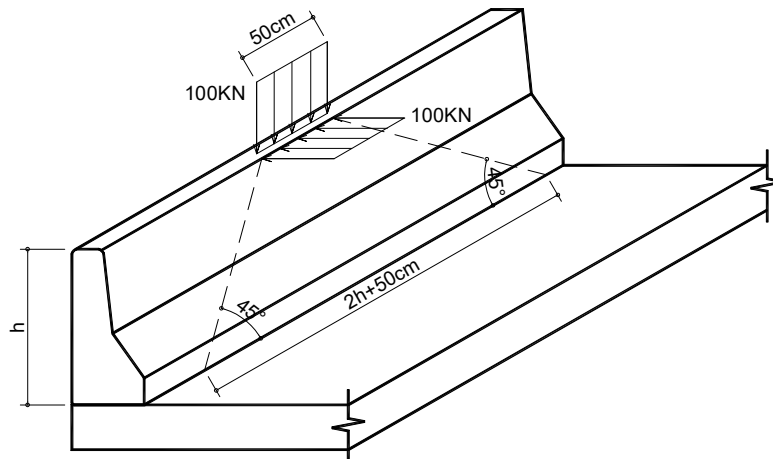




Carga móvel

A hipótese mais desfavorável é o ação de uma força horizontal no guarda-rodas devido ao impacto de um veículo:

$h_{gr} := 0.87m$



Consideraremos uma força horizontal de 100kN e uma força vertical de 100kN aplicado em uma extensão de 50cm (peso de uma roda) no topo do guarda-rodas.

Supondo um espraimento de 45°, o momento na extremidade da laje será:

Força horizontal  $H_{imp} := 100kN$

Força vertical  $V_{imp} := 100kN$

$$M_{bq} := \frac{H_{imp} \cdot h_{gr} + V_{imp} \cdot x_{gr}}{50cm + 2 \cdot h_{gr} + 2 \cdot L_b} \quad M_{bq} = 30.29 \cdot \frac{kN \cdot m}{m}$$

Momento de projeto:  $M_{bd} := 1.35M_{bg} + 1.5M_{bq} \quad M_{bd} = 49.33 \cdot kN \cdot \frac{m}{m}$

Dimensionamento à flexão simples:

Momento de projeto:  $M_{bd} := 1.35M_{bg} + 1.5M_{bq} \quad M_{bd} = 49.33 \cdot kN \cdot \frac{m}{m}$

$d := h_1 - c - 0.005 \cdot m \quad d = 0.170 m$

$k_{md} := \frac{M_{bd}}{1.00 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad k_{md} = 0.068 \quad k_{zv} := 0.95$

$A_{sb} := \frac{M_{bd} \cdot m}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad A_{sb} = 7.03 \cdot cm^2$



### 3. INFRAESTRUTURA

#### 3.1 Materiais

##### Concreto

Resistência característica à compressão:

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

Resistência de projeto à compressão:

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.4} \quad f_{cd} = 21.43 \cdot \text{MPa}$$

Resistência à tração

$$f_{ctm} := \left[ 0.3 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \text{MPa} \quad f_{ctm} = 2.90 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctkinf} := 0.7 \cdot f_{ctm} \quad f_{ctkinf} = 2.03 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctkinf}}{1.4} \quad f_{ctd} = 1.45 \cdot \text{MPa}$$

Módulo de elasticidade secante:

$$E_{cs} := 27 \text{ GPa}$$

Peso específico:

$$\rho_c = 25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

##### Aço CA-50

Resistência característica:  $f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$

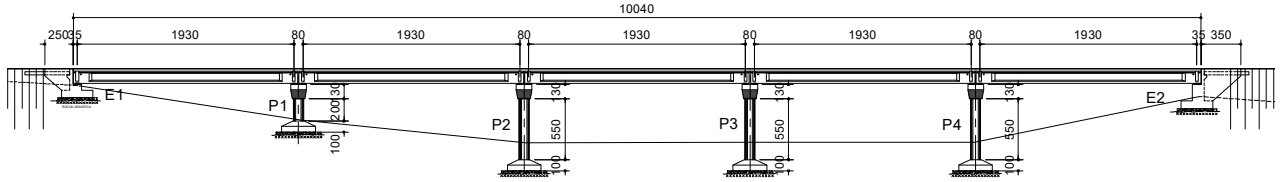
Resistência de projeto:  $f_{yd} = 435 \cdot \text{MPa}$

Módulo de elasticidade:  $E_s = 210000 \cdot \text{MPa}$

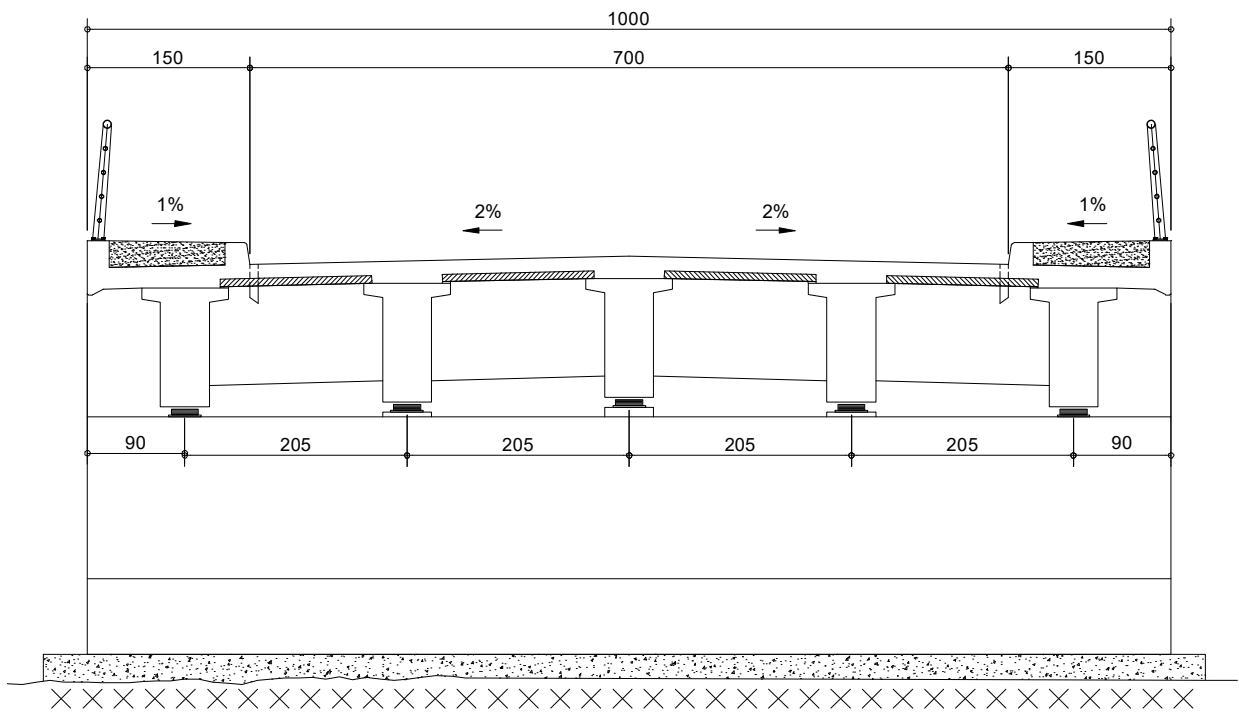


3.2 Geometria

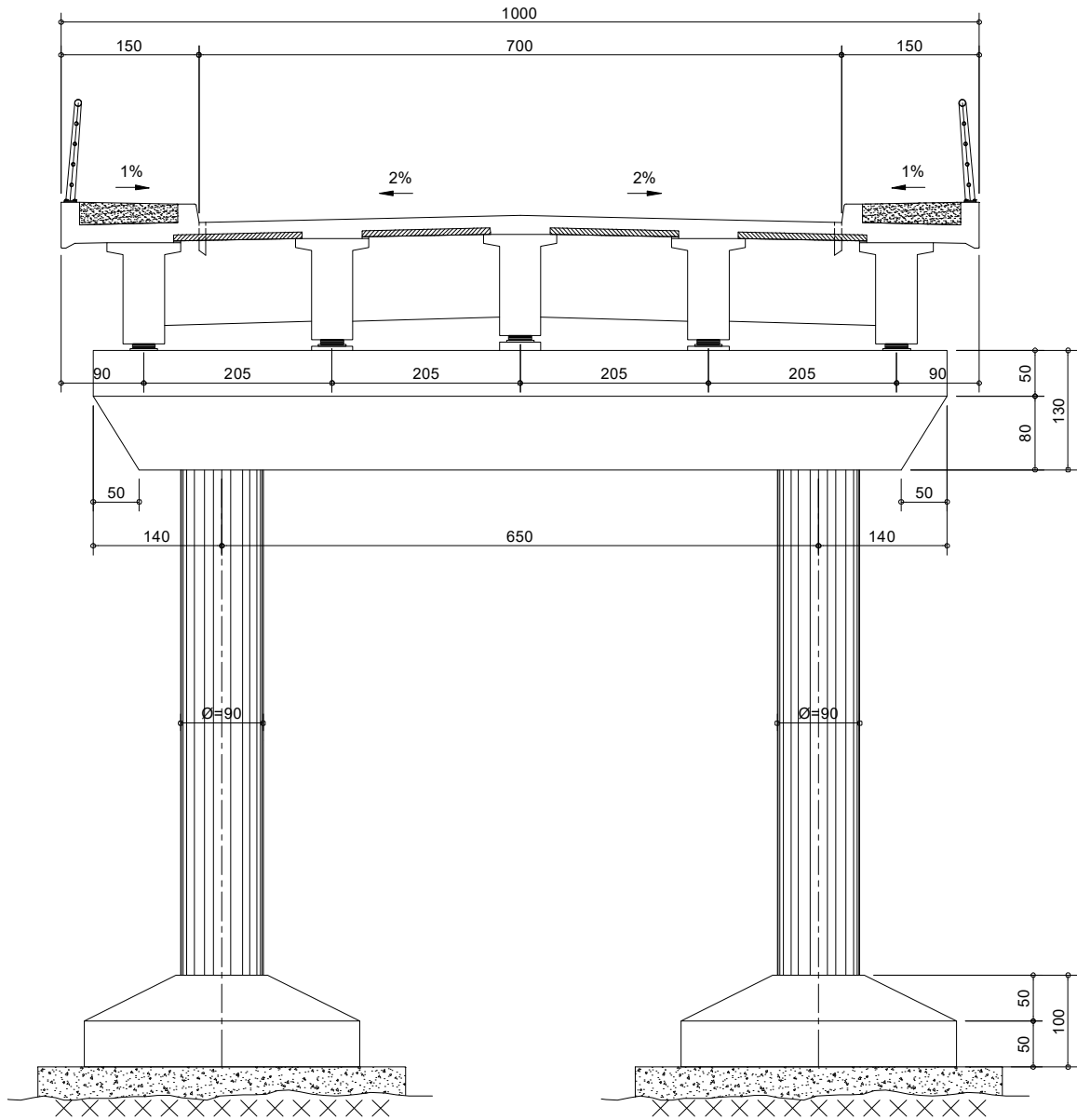
Elevação



Seção transversal nos encontros



Seção transversal nos apoios intermediários



### 3.3 Esforços atuantes

#### Esforços verticais

##### cargas permanentes

$$R_{v1\_g} := \begin{pmatrix} R_{g1} + R_{g2e} + R_{g3_1} \\ R_{g1} + R_{g2i} + R_{g3_2} \\ R_{g1} + R_{g2i} + R_{g3_3} \\ R_{g1} + R_{g2i} + R_{g3_4} \\ R_{g1} + R_{g2e} + R_{g3_5} \end{pmatrix} \quad R_{v1\_g} = \begin{pmatrix} 300.23 \\ 280.59 \\ 278.38 \\ 280.59 \\ 300.23 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$



##### cargas móveis (programa de análise estrutural)

carregamento 1 - ponte totalmente carregada (veículo principal no bordo)

$$R_{v1\_qt} := \begin{pmatrix} 200.28 \\ 336.33 \\ 247.50 \\ 132.80 \\ 75.24 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

carregamento 2 - ponte totalmente carregada (veículo principal no eixo)

$$R_{v1\_qt\_eixo} := \begin{pmatrix} 82.39 \\ 245.09 \\ 337.15 \\ 245.09 \\ 82.39 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

carregamento 3 - ponte metade carregada (veículo principal no bordo)

$$R_{v1\_qp} := \begin{pmatrix} 209.00 \\ 314.11 \\ 190.24 \\ 34.37 \\ -12.80 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

carregamento 4 - vão totalmente carregado apenas com carga distribuída

$$R_{v1\_qdt} := \begin{pmatrix} 79.11 \\ 122.38 \\ 125.17 \\ 122.38 \\ 79.11 \end{pmatrix} \text{ kN}$$



carregamento 5 - vão metade carregada apenas com carga distribuída

$$R_{v1\_qdp} := \begin{pmatrix} 87.93 \\ 99.30 \\ 32.31 \\ 33.10 \\ -8.83 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$E1 = E2$$

cargas permanentes

$$R_{E\_g} := R_{v1\_g} \quad R_{E\_g} = \begin{pmatrix} 300.23 \\ 280.59 \\ 278.38 \\ 280.59 \\ 300.23 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{E\_g} = 1440.00 \cdot \text{kN}$$

cargas móveis (programa de análise estrutural)

Hipótese 1: Ponte totalmente carregada (veículo principal no bordo)

$$R_{E\_qt} := R_{v1\_qt} \quad R_{E\_qt} = \begin{pmatrix} 200.28 \\ 336.33 \\ 247.50 \\ 132.80 \\ 75.24 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{E\_qt} = 992.15 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 2: Ponte totalmente carregada (veículo principal no eixo)

$$R_{E\_qt\_eixo} := R_{v1\_qt\_eixo} \quad R_{E\_qt\_eixo} = \begin{pmatrix} 82.39 \\ 245.09 \\ 337.15 \\ 245.09 \\ 82.39 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{E\_qt\_eixo} = 992.11 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 3: Ponte metade carregada (veículo principal no bordo)

$$R_{E\_qp} := R_{v1\_qp} \quad R_{E\_qp} = \begin{pmatrix} 209.00 \\ 314.11 \\ 190.24 \\ 34.37 \\ -12.80 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{E\_qp} = 734.92 \cdot \text{kN}$$



**Apoios P1 a P4**

vão entre os aparelhos de apoio (laje de continuidade)

$$L_{ct} := 0.80\text{m}$$

cargas permanentes

$$R_{P1\_g} := 2R_{v1\_g} \quad R_{P1\_g} = \begin{pmatrix} 600.45 \\ 561.17 \\ 556.75 \\ 561.17 \\ 600.45 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_g} = 2880.00 \cdot \text{kN}$$

cargas móveis (programa de análise estrutural)

Hipótese 1: Ponte totalmente carregada com carga móvel em dois vãos adjacentes  
(veículo principal no bordo)

$$R_{P1\_qt} := R_{v1\_qt} + R_{v1\_qdt}$$

$$R_{P1\_qt} = \begin{pmatrix} 279.39 \\ 458.71 \\ 372.67 \\ 255.18 \\ 154.35 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_qt} = 1520.30 \cdot \text{kN}$$

momento longitudinal:

$$ML_{P1\_qt} := \left( \sum R_{v1\_qt} - \sum R_{v1\_qdt} \right) \cdot \frac{L_{ct}}{2} \quad ML_{P1\_qt} = 185.60 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



Hipótese 2: Ponte totalmente carregada com carga móvel em dois vãos adjacentes  
(veículo principal no eixo)

$$R_{P1\_qt\_eixo} := R_{v1\_qt\_eixo} + R_{v1\_qdt}$$

$$R_{P1\_qt\_eixo} = \begin{pmatrix} 161.50 \\ 367.47 \\ 462.32 \\ 367.47 \\ 161.50 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_qt\_eixo} = 1520.26 \cdot \text{kN}$$



momento longitudinal:

$$ML_{P1\_qt\_eixo} := \left( \sum R_{v1\_qt\_eixo} - \sum R_{v1\_qdt} \right) \cdot \frac{L_{ct}}{2} \quad ML_{P1\_qt\_eixo} = 185.58 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Hipótese 3: Ponte metade carregada com carga móvel em dois vãos adjacentes  
(momento transversal máximo)

$$R_{P1\_qp} := R_{v1\_qp} + R_{v1\_qdp}$$

$$R_{P1\_qp} = \begin{pmatrix} 296.93 \\ 413.41 \\ 222.55 \\ 67.47 \\ -21.63 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_qp} = 978.73 \cdot \text{kN}$$

momento longitudinal:

$$ML_{P1\_qp} := \left( \sum R_{v1\_qp} - \sum R_{v1\_qdp} \right) \cdot \frac{L_{ct}}{2} \quad ML_{P1\_qp} = 196.44 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Hipótese 4 - Ponte totalmente carregada com carga móvel em um vão  
(momento longitudinal máximo)

$$R_{P1\_qt\_1v} := R_{v1\_qt}$$

$$R_{P1\_qt\_1v} = \begin{pmatrix} 200.28 \\ 336.33 \\ 247.50 \\ 132.80 \\ 75.24 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_qt\_1v} = 992.15 \cdot \text{kN}$$

momento longitudinal:

$$ML_{P1\_qt\_1v} := \left( \sum R_{v1\_qt} \right) \cdot \frac{L_{ct}}{2} \quad ML_{P1\_qt\_1v} = 396.86 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



**Esforços Horizontais**

Esforços transversais

a) Vento

Ponte descarregada:

$$pv_d := 1.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{pressão do vento})$$

$$Hv_d := h_v + h_l + 0.24\text{m} + 0.5 \cdot 1.10\text{m}$$

$$Hv_d = 2.09 \text{ m}$$

$$fv_d := pv_d \cdot Hv_d$$

$$fv_d = 3.13 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**E1=E2**

$$FvdE := fv_d \cdot \frac{(L_v + 0.80\text{m})}{2} \quad FvdE = 31.51 \cdot \text{kN}$$

**P1 a P4**

$$FvdP := fv_d \cdot (L_v + 0.80\text{m}) \quad FvdP = 63.01 \cdot \text{kN}$$

Ponte Carregada:

$$pv_c := 1.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (\text{pressão do vento})$$

$$Hv_c := h_v + h_l + h_{pav} + 2.00\text{m}$$

$$Hv_c = 3.37 \text{ m}$$

$$fv_c := pv_c \cdot Hv_c$$

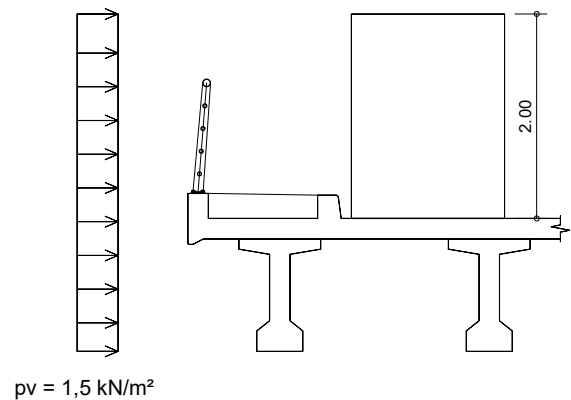
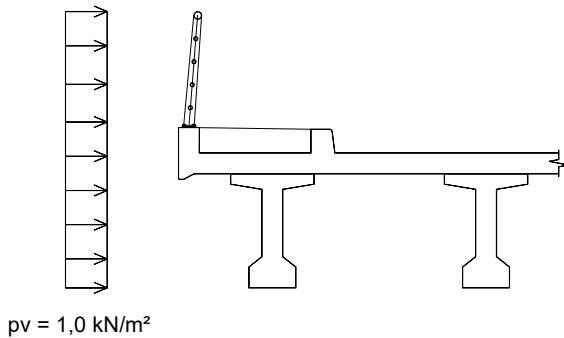
$$fv_c = 3.37 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**E1=E2**

$$FvcE := fv_c \cdot \frac{(L_v + 0.80\text{m})}{2} \quad FvcE = 33.87 \cdot \text{kN}$$

**P1 a P4**

$$FvcP := fv_c \cdot (L_v + 0.80\text{m}) \quad FvcP = 67.74 \cdot \text{kN}$$



## b) Pressão da água nos pilares

velocidade da água:	$v_a := 3.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	
diâmetro do pilar:	$D_p := 0.90\text{m}$	
coeficiente de forma	$k := 0.34$	
pressão da água:	$p_a := k \cdot v_a^2 \cdot \frac{\text{s}^2 \cdot \text{kN}}{\text{m}^4}$	$p_a = 3.06 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
carga distribuída ao longo do pilar:	$f_a := p_a \cdot D_p$	$f_a = 2.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

## Esforços longitudinais

## a) Frenagem ou aceleração

largura da pista de rolamento:	$L_{\text{rol}} := 7.00\text{m}$	
comprimento total da ponte:	$L_{\text{total}} := 100.4\text{m}$	
$H_{f1} := 135\text{kN}$		
ou		
$H_{f2} := L_{\text{rol}} \cdot L_{\text{total}} \cdot 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$H_{f2} = 175.70 \cdot \text{kN}$	
$H_f := \max(H_{f1}, H_{f2})$	$H_f = 175.70 \cdot \text{kN}$	

## b) Variação de temperatura

$\Delta T := -15 \cdot \text{K}$	$\alpha := 10^{-5} \frac{1}{\text{K}}$
----------------------------------	--

## c) Retração

$$\varepsilon_r := -0.0002$$

## d) Protensão e deformação lenta

os efeitos da protensão e deformação lenta serão considerados apenas nos encontros, uma vez que estes efeitos são auto-equilibrados nos apoios dos pilares

$$\varepsilon_{\text{ppa}} := -0.0004$$



**Cálculo das rigidezes longitudinais**

Número de apoios da superestrutura (encontros + pilares):

$$n_{ap} := 6$$

Ângulo de esconsidade da obra:

$$\theta := 0 \text{deg}$$

**3.5.1 Rigidezes dos encontros E1 e E2**

Em função da rigidez elevada dos encontros, estas podem ser consideradas infinitas em relação às demais rigidezes para efeito do cálculo da distribuição dos esforços horizontais da obra de arte especial

 $i := 1..2$ 

$$K_{enc_i} := 1000000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad K_{enc} = \begin{pmatrix} 1000000 \\ 1000000 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**3.5.2 Rigidezes dos pilares (apoios P1 a P4):**

$$D_p = 0.90 \text{ m} \quad I_p := \frac{\pi \cdot D_p^4}{64} \quad I_p = 0.03221 \cdot \text{m}^4$$

Alturas dos pilares:

$$H_{pil} := \begin{pmatrix} 2.00 \\ 5.50 \\ 5.50 \\ 5.50 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Número de pilares por apoio:

$$n_p := 2$$

Determinação das rigidezes dos pilares

 $i := 1..4$ 

$$K_{p_i} := \frac{3 \cdot E_{cs} \cdot I_p}{(H_{pil_i})^3} \cdot n_p \quad K_p = \begin{pmatrix} 652176 \\ 31359 \\ 31359 \\ 31359 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Resumo das rigidezes dos encontros e pilares:

$$K_{t1} := K_{enc1} \quad K_{t_{nap}} := K_{enc2}$$

$$i := 2..nap - 1$$

$$K_{ti} := K_{p_{i-1}}$$

$$K_t = \begin{pmatrix} 1000000 \\ 652176 \\ 31359 \\ 31359 \\ 31359 \\ 1000000 \end{pmatrix} \cdot \frac{kN}{m}$$

Neoprenes:

Módulo de elasticidade transversal:

$$G_n := 0.9MPa$$

Dimensões em planta:	tipo 1	$a_{n1} := 0.25m$	$b_{n1} := 0.30m$	$h_{n1} := 0.048m$	$A_{n1} := a_{n1} \cdot b_{n1}$
	tipo 2	$a_{n2} := 0.25m$	$b_{n2} := 0.30m$	$h_{n2} := 0.040m$	$A_{n2} := a_{n2} \cdot b_{n2}$

rigidezes unitárias dos aparelhos de apoio de neoprene

$$k_{n1} := \frac{G_n \cdot A_{n1}}{h_{n1}} \quad k_{n1} = 1406 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$k_{n2} := \frac{G_n \cdot A_{n2}}{h_{n2}} \quad k_{n2} = 1688 \cdot \frac{kN}{m}$$

Rigidezes dos conjuntos dos aparelhos de apoio:

$$E1 - E2 \quad K_{n1} := 5 \cdot k_{n1} \quad K_{n1} = 7031 \cdot \frac{kN}{m} \quad K_{n_{nap}} := K_{n1}$$

$$P1 a P4 \quad i := 2..nap - 1 \quad K_{ni} := 10 \cdot k_{n2} \quad K_n = \begin{pmatrix} 7031 \\ 16875 \\ 16875 \\ 16875 \\ 16875 \\ 7031 \end{pmatrix} \cdot \frac{kN}{m}$$

Rigidez do conjunto (encontros+neoprenes ou pilares + neoprenes):

$$i := 1..nap$$

$$K_i := \frac{1}{\frac{1}{K_{ti}} + \frac{1}{K_{ni}}}$$

$$K = \begin{pmatrix} 6982 \\ 16449 \\ 10971 \\ 10971 \\ 10971 \\ 6982 \end{pmatrix} \cdot \frac{kN}{m}$$



Coeficientes de distribuição dos esforços longitudinais:

$$\text{somaK} := \sum_{i=1}^{\text{nap}} K_i$$

$$\text{somaK} = 63327 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\mu_{d_i} := \frac{K_i}{\text{somaK}}$$

$$\mu_{d_i} = \begin{pmatrix} 0.110 \\ 0.260 \\ 0.173 \\ 0.173 \\ 0.173 \\ 0.110 \end{pmatrix}$$

**Distribuição das ações horizontais longitudinais**

a) Frenagem

$$Ff_i := H_f \cdot \mu_{d_i}$$

$$Ff = \begin{pmatrix} 19.37 \\ 45.64 \\ 30.44 \\ 30.44 \\ 30.44 \\ 19.37 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

b) Temperatura

Centro de elasticidade longitudinal do neoprene:

$$x_{ct} := \begin{pmatrix} 0 \\ 19.70 \\ 39.80 \\ 59.90 \\ 80.00 \\ 99.70 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$x_{ct} := \frac{\sum_i (x_i \cdot K_i)}{\sum K}$$

$$x_{ct} = 47.24 \text{m}$$

Deslocamento horizontal:

$$\delta t_i := (x_{ct} - x_i) \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

$$\delta t = \begin{pmatrix} -0.007 \\ -0.004 \\ -0.001 \\ 0.002 \\ 0.005 \\ 0.008 \end{pmatrix} \cdot \text{m}$$

Força horizontal no conjunto:

$$Ft_i := |\delta t_i \cdot K_i|$$

$$Ft = \begin{pmatrix} 49.48 \\ 67.96 \\ 12.25 \\ 20.83 \\ 53.91 \\ 54.94 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$



## c) Retração

Deslocamento horizontal:

$$\delta r_i := (x_{ct} - x_i) \cdot \epsilon_r$$

$$\delta r = \begin{pmatrix} -0.0094 \\ -0.0055 \\ -0.0015 \\ 0.0025 \\ 0.0066 \\ 0.0105 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Força horizontal no conjunto:

$$Fr_i := |\delta r_i \cdot K_i|$$

$$Fr = \begin{pmatrix} 65.97 \\ 90.61 \\ 16.33 \\ 27.78 \\ 71.88 \\ 73.25 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

## d) Protensão + deformação lenta

$$\delta p_1 := \epsilon_p \cdot \frac{L_v}{2}$$

$$\delta p_{nap} := \delta p_1$$

Deslocamento horizontal:

$$\delta p = \begin{pmatrix} -0.0039 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.0039 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Força horizontal no conjunto:

$$Fp_i := |\delta p_i \cdot K_i|$$

$$Fp = \begin{pmatrix} 26.95 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 26.95 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$





**Momentos longitudinais na infraestrutura****Momentos longitudinais na base dos pilares**

Alturas totais entre o aparelho de apoio e a base dos pilares ou paredes dos encontros:

encontros

alturas das paredes:

$$h_{\text{par}} := \begin{pmatrix} 0.50 \\ 1.50 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$H_{\text{tot}_1} := h_{\text{par}_1} + h_{n1}$$

$$H_{\text{tot}_{\text{nap}}} := h_{\text{par}_2} + h_{n1}$$

pilares

alturas das travessas

$$H_{\text{trav}} := 1.30 \text{m}$$

$$i := 2.. \text{nap} - 1$$

$$H_{\text{tot}_i} := h_{n2} + H_{\text{trav}} + H_{\text{pil}_{i-1}}$$

$$H_{\text{tot}} = \begin{pmatrix} 0.548 \\ 3.340 \\ 6.840 \\ 6.840 \\ 6.840 \\ 1.548 \end{pmatrix} \text{m}$$

Momentos fletores (por apoio):

**a) Frenagem/Aceleração**

$$i := 1.. \text{nap}$$

$$Mf_i := Ff_i \cdot H_{\text{tot}_i}$$

$$Mf = \begin{pmatrix} 10.62 \\ 152.43 \\ 208.21 \\ 208.21 \\ 208.21 \\ 29.99 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**b) Temperatura**

$$i := 1.. \text{nap}$$

$$Mt_i := Ft_i \cdot H_{\text{tot}_i}$$

$$Mt = \begin{pmatrix} 27.11 \\ 226.98 \\ 83.77 \\ 142.49 \\ 368.74 \\ 85.05 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



c) Retração

$$i := 1..nap$$

$$Mr_i := Fr_i \cdot H_{tot_i}$$

$$Mr = \begin{pmatrix} 36.15 \\ 302.63 \\ 111.69 \\ 189.98 \\ 491.65 \\ 113.40 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

d) Protensão + deformação lenta

$$i := 1..nap$$

$$Mp_i := Fp_i \cdot H_{tot_i}$$

$$Mp = \begin{pmatrix} 14.77 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 41.72 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**Momentos longitudinais na base das sapatas devido aos esforços horizontais longitudinais**

altura das sapatas

$$h_{sap} := \begin{pmatrix} 0.70 \\ 1.00 \\ 1.00 \\ 1.00 \\ 1.00 \\ 0.70 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$i := 1..nap$$

distância entre os aparelhos de apoio e a base dos blocos:

$$H_{n_b_i} := H_{tot_i} + h_{sap_i}$$

$$H_{n_b} = \begin{pmatrix} 1.25 \\ 4.34 \\ 7.84 \\ 7.84 \\ 7.84 \\ 2.25 \end{pmatrix} \text{m}$$



Frenagem/ aceleração (por apoio)

$$Mf\_sap_i := Ff_i \cdot H_{n\_b_i}$$

$$Mf\_sap = \begin{pmatrix} 24.18 \\ 198.07 \\ 238.64 \\ 238.64 \\ 238.64 \\ 43.55 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Temperatura (por apoio)

$$Mt\_sap_i := Ft_i \cdot H_{n\_b_i}$$

$$Mt\_sap = \begin{pmatrix} 61.75 \\ 294.93 \\ 96.02 \\ 163.32 \\ 422.65 \\ 123.51 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Retração (por apoio)

$$Mr\_sap_i := Fr_i \cdot H_{n\_b_i}$$

$$Mr\_sap = \begin{pmatrix} 82.33 \\ 393.24 \\ 128.02 \\ 217.76 \\ 563.53 \\ 164.68 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Protensão + deformação lenta (por apoio)

$$Mp\_sap_i := Fp_i \cdot H_{n\_b_i}$$

$$Mp\_sap = \begin{pmatrix} 33.64 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 60.59 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



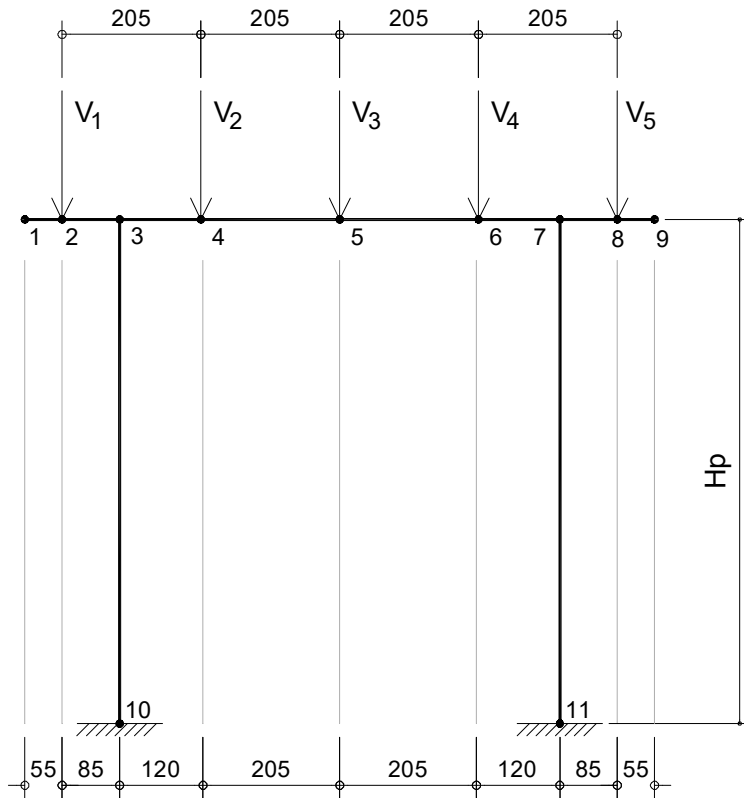
3.4 Dimensionamento dos pórticos dos apoios P1, P2, P3 e P4

Geometria

Pilar P4  $ap := 5$  (mais desfavorável)

$D_p = 0.90\text{ m}$   $H_p := H_{pil_{ap-1}} + \frac{H_{trav}}{2}$   $H_p = 6.15\text{ m}$

Travessa:  $H_{trav} = 1.30\text{ m}$   $b_{travs} := 1.40\text{ m}$   $b_{travi} := 1.10\text{ m}$



Carregamentos

Cargas verticais da superestrutura:

Cargas permanentes (vigas 1 a 5):

$$R_{P1\_g} = \begin{pmatrix} 600.45 \\ 561.17 \\ 556.75 \\ 561.17 \\ 600.45 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad \sum R_{P1\_g} = 2880.00 \cdot \text{kN}$$



Cargas móveis (vigas 1 a 5):

Hipótese 1: Reação máxima - ponte totalmente carregada com veículo tipo no bordo

$$R_{P1\_qt} = \begin{pmatrix} 279.39 \\ 458.71 \\ 372.67 \\ 255.18 \\ 154.35 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad M_{L_{P1\_qt}} = 185.60 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \sum R_{P1\_qt} = 1520.30 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 2: Reação máxima - ponte totalmente carregada com veículo tipo no eixo

$$R_{P1\_qt\_eixo} = \begin{pmatrix} 161.50 \\ 367.47 \\ 462.32 \\ 367.47 \\ 161.50 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad M_{L_{P1\_qt\_eixo}} = 185.58 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \sum R_{P1\_qt\_eixo} = 1520.26 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 3: Momento transversal máximo - metade da ponte carregada com veículo tipo no bordo

$$R_{P1\_qp} = \begin{pmatrix} 296.93 \\ 413.41 \\ 222.55 \\ 67.47 \\ -21.63 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad M_{L_{P1\_qp}} = 196.44 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \sum R_{P1\_qp} = 978.73 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 4 - Ponte totalmente carregada com carga móvel em um vão (momento longitudinal máximo)

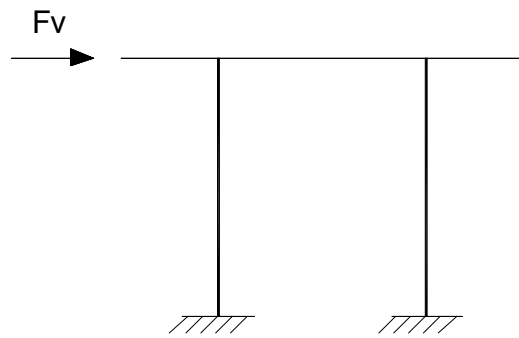
$$R_{P1\_qt\_1v} = \begin{pmatrix} 200.28 \\ 336.33 \\ 247.50 \\ 132.80 \\ 75.24 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad M_{L_{P1\_qt\_1v}} = 396.86 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \sum R_{P1\_qt\_1v} = 992.15 \cdot \text{kN}$$



Vento na superestrutura:

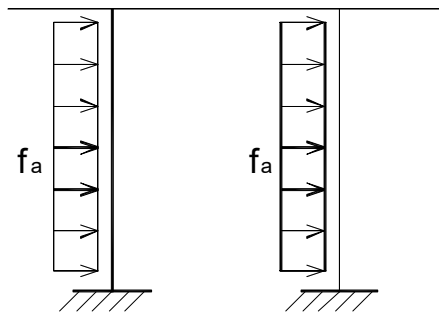
$$F_{vdP} = 63.01 \cdot \text{kN}$$

$$F_{vcP} = 67.74 \cdot \text{kN}$$



pressão da água nos pilares

$$f_a = 2.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Os esforços solicitantes no pórtico e as reações de apoio foram obtidos através de programa de computador de elementos finitos, sendo os resultados apresentados a seguir.



**Resumo das reações de apoio do pórtico (obtidas do programa de análise estrutural)**

- Cargas permanentes

$$N_g := \begin{pmatrix} 1735.41 \\ 1735.41 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_g := \begin{pmatrix} 31.80 \\ 31.80 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$MT_g := \begin{pmatrix} 63.70 \\ 63.70 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Carga móvel:  $N_{Q\_Nmax}$ 

$$N_{Q1} := \begin{pmatrix} 902.67 \\ 618.12 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_{Q1} := \begin{pmatrix} 24.84 \\ 24.84 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$MT_{Q1} := \begin{pmatrix} 51.83 \\ 47.69 \end{pmatrix} \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Carga móvel:  $N_{Q\_max\_eixo}$ 

$$N_{Q2} := \begin{pmatrix} 760.13 \\ 760.13 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$HT_{Q2} := \begin{pmatrix} 31.74 \\ 31.74 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$MT_{Q2} := \begin{pmatrix} 63.58 \\ 63.58 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Carga móvel:  $M_{Tmax}$ 

$$N_{Q3} := \begin{pmatrix} 797.65 \\ 181.08 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_{Q3} := \begin{pmatrix} 15.88 \\ 15.88 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$MT_{Q3} := \begin{pmatrix} 37.50 \\ 26.10 \end{pmatrix} \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Carga móvel:  $M_{Lmax}$ 

$$N_{Q4} := \begin{pmatrix} 638.50 \\ 353.65 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_{Q4} := \begin{pmatrix} 16.64 \\ 16.64 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$MT_{Q4} := \begin{pmatrix} 35.40 \\ 31.27 \end{pmatrix} \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Vento

$$N_v := \begin{pmatrix} 30.00 \\ -30.00 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_v := \begin{pmatrix} 32.63 \\ 32.80 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$MT_v := \begin{pmatrix} 103.42 \\ 103.97 \end{pmatrix} \text{kN} \cdot \text{m}$$

- Pressão da água

$$N_a := \begin{pmatrix} 5.75 \\ -5.75 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$HT_a := \begin{pmatrix} 18.82 \\ 18.82 \end{pmatrix} \text{kN}$$

$$MT_a := \begin{pmatrix} 39.17 \\ 39.17 \end{pmatrix} \text{kN} \cdot \text{m}$$



**Dimensionamento dos pilares**

O dimensionamento será feito para o apoio P4 que é o mais desfavorável

ap = 5

Esforços de projeto na base dos pilares

Combinação 1 (normal máxima no pilar)

Ação variável básica: carga móvel

Ações variáveis concomitantes:

- vento
- pressão da água nos pilares

$$\psi_0 := 0.6$$

$$N_{d1} := 1.35 \cdot N_{g1} + 1.5 \cdot N_{Q3_1} + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot N_{v1} + 1.5 \psi_0 N_{a1}$$

$$N_{d1} = 3569.65 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Ld1} := \frac{1.50 \cdot M_{f_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot M_{r_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot \psi_0 \cdot M_{t_{ap}}}{n_p} + \frac{1.5 \cdot M_{L_{P1\_qp}}}{n_p}$$

$$M_{Ld1} = 731.23 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

$$M_{Td1} := 1.35 \cdot M_{T_{g1}} + 1.5 \cdot M_{T_{Q3_1}} + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot M_{T_{v1}} + 1.5 \psi_0 \cdot M_{T_{a1}}$$

$$M_{Td1} = 264.37 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d1} := \sqrt{(M_{Ld1})^2 + (M_{Td1})^2}$$

$$M_{1d1} = 777.55 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$





Combinação 2 (momento fletor máximo no pilar)

Ação variável básica: carga móvel

Ações variáveis concomitantes:

- vento

$$N_{d_2} := 1.35 \cdot N_{g_1} + 1.5 \cdot N_{Q4_1} + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot N_{v_1} + 1.5 \cdot \psi_0 \cdot N_{a_1} \quad N_{d_2} = 3330.93 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Ld_2} := \frac{1.50 \cdot M_{f_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot M_{r_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot \psi_0 \cdot M_{t_{ap}}}{n_p} + \frac{1.5 \cdot M_{LP1\_qt\_1v}}{n_p} \quad M_{Ld_2} = 881.54 \cdot \text{m} \cdot \text{kN}$$

$$M_{Td_2} := 1.35 \cdot M_{T_{g_1}} + 1.5 \cdot M_{T_{Q4_1}} + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot M_{T_{v_1}} + 1.5 \cdot \psi_0 \cdot M_{T_{a_1}} \quad M_{Td_2} = 261.22 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d_2} := \sqrt{(M_{Ld_2})^2 + (M_{Td_2})^2} \quad M_{1d_2} = 919.43 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Combinação 3 (normal mínima no pilar)

Ação variável básica: vento em ponte descarregada

Ações variáveis concomitantes:

- carga móvel em vão não adjacente (efeito de frenagem)
- pressão da água nos pilares

$$N_{d_3} := 1.0 N_{g_1} + 1.4 N_{v_2} + 1.5 \cdot \psi_0 \cdot N_{a_2} \quad N_{d_3} = 1688.23 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Ld_3} := \frac{1.50 \psi_0 \cdot M_{f_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot M_{r_{ap}}}{n_p} + \frac{1.2 \cdot \psi_0 \cdot M_{t_{ap}}}{n_p} \quad M_{Ld_3} = 521.43 \cdot \text{m} \cdot \text{kN}$$

$$M_{Td_3} := M_{T_{g_2}} + 1.4 M_{T_{v_2}} + 1.5 \cdot \psi_0 \cdot M_{T_{a_2}} \quad M_{Td_3} = 244.51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1d_3} := \sqrt{(M_{Ld_3})^2 + (M_{Td_3})^2} \quad M_{1d_3} = 575.91 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**Dimensionamento dos pilares à flexão-compressão**

$$f_{ck} = 30.00 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{cd} = 21.43 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{yd} = 434.78 \cdot \text{MPa}$$

diâmetro do pilar:

$$D_p = 0.90 \text{ m}$$

altura do pilar:

$$H_{pil_{ap-1}} = 5.50 \text{ m}$$

Para a consideração dos efeitos de segunda ordem foi adotado o método do pilar padrão com curvatura aproximada conforme a NBR 6118:2014

A seguir é apresentada a verificação dos pilares com a armadura adotada através do programa P-Calc

**Armação:** 25 $\phi$ 20 mm ( $A_s = 78.54 \text{ cm}^2$ )

**Propriedade seção bruta de concreto:**

$$\text{Área: } A_c = 6362 \text{ cm}^2$$

$$\text{Centro de gravidade: } x_{cg} = 45 \text{ cm}$$

$$y_{cg} = 45 \text{ cm}$$

$$\text{Inércia em relação ao cg: } I_x = 3220623 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 3220623 \text{ cm}^4$$

**Taxa de armadura:**  $\rho_s = 1.23 \%$

**Materiais:** Concreto  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

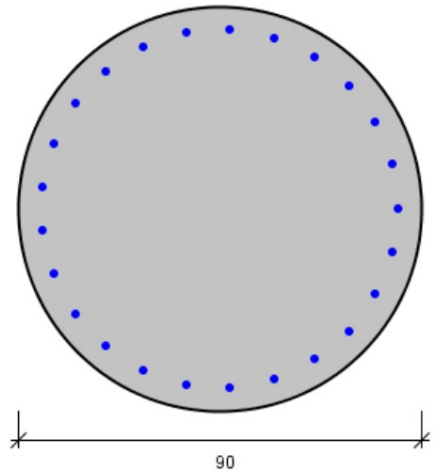
$$\text{Aço } f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

**Tipo de vinculação:** Pilar em Balanço

**Comprimento:**  $L = 550 \text{ cm}$

**Índice de Esbeltez:**  $\lambda_x = 49$

$$\lambda_y = 49$$



## PONTE RIO PAJEÚ - PILARES: Resultados da combinação nº 1

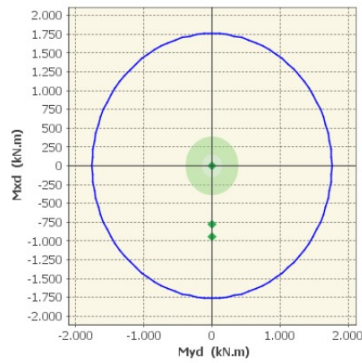


Figura: Diagrama de interação (Comb. 1)

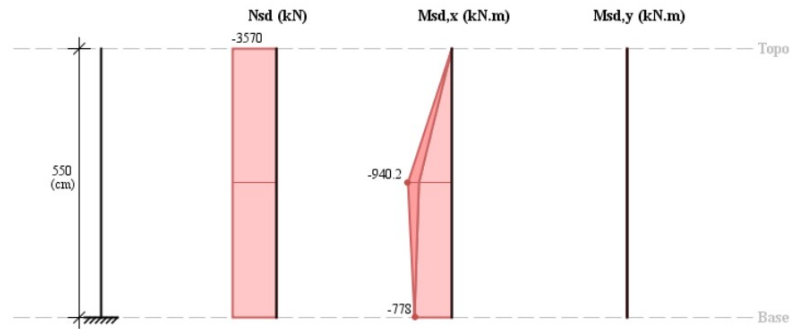


Figura: Esforços solicitantes de cálculo (Comb. 1)

### Determinação dos efeitos locais de 2ª Ordem (Método pilar-padrão com curvatura aproximada)

#### Momentos em torno do eixo x:

O momento total em torno da direção x é calculado pela expressão:

$$M_{d,tot,y} = \alpha_b M_{id,A} + N_{sd} \frac{\ell_e^2}{10} \frac{1}{r} = 940,2 \text{ kN.m}$$

Com:

$$\alpha_b = 0,80 + 0,20 M_c / M_A = 0,80 + 0,20 (-389) / -778 = 0,9, \alpha_b \geq 0,85;$$

$$M_{id,A} = -778 \text{ kN.m e } N_{sd} = 3570 \text{ kN};$$

$$\ell_e = 11 \text{ m};$$

$$1/r = 0,005 / [h_y (v + 0,5)] = 0,005 / [0,9 (0,26188 + 0,5)] = 0,00729 \text{ 1/m} \leq 0,005 / h_y = 0,00556 \text{ 1/m};$$

$$v = N_{sd} / (A_c f_{cd}) = 3570 / (0,63617 \times 30000 / 1,4) = 0,26188.$$



## PONTE RIO PAJEÚ - PILARES: Resultados da combinação nº 2 (F.S. mínimo)

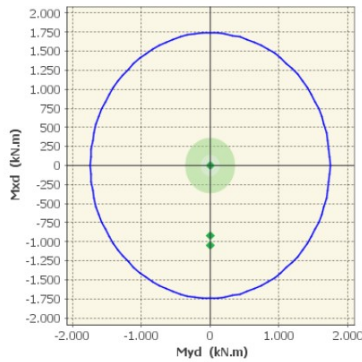


Figura: Diagrama de interação (Comb. 2)

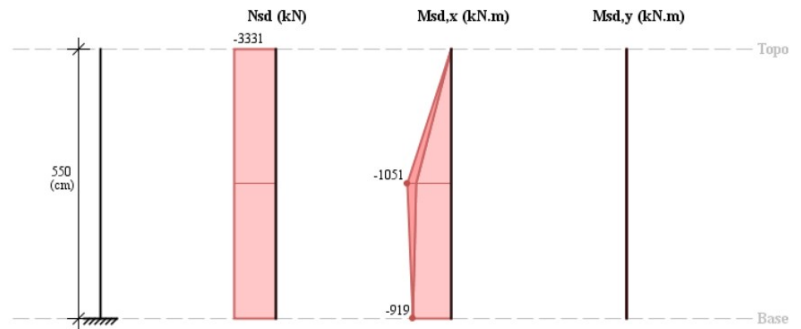


Figura: Esforços solicitantes de cálculo (Comb. 2)

### Determinação dos efeitos locais de 2ª Ordem (Método pilar-padrão com curvatura aproximada)

#### Momentos em torno do eixo x:

O momento total em torno da direção x é calculado pela expressão:

$$M_{d,tot,y} = \alpha_b M_{1d,A} + N_{sd} \frac{\ell_e^2}{10} \frac{1}{r} = 1051 \text{ kN.m}$$

Com:

$$\alpha_b = 0.80 + 0.20 M_C / M_A = 0.80 + 0.20 (-459.5) / -919 = 0.9, \alpha_b \geq 0.85;$$

$$M_{1d,A} = -919 \text{ kN.m e } N_{sd} = 3331 \text{ kN};$$

$$\ell_e = 11 \text{ m};$$

$$1/r = 0.005 / [h_y (v + 0.5)] = 0.005 / [0.9 (0.24435 + 0.5)] = 0.00746 \text{ 1/m} \leq 0.005 / h_y = 0.00556 \text{ 1/m};$$

$$v = N_{sd} / (A_c f_{cd}) = 3331 / (0.63617 \times 30000 / 1.4) = 0.24435.$$



## PONTE RIO PAJEÚ - PILARES: Resultados da combinação nº 3

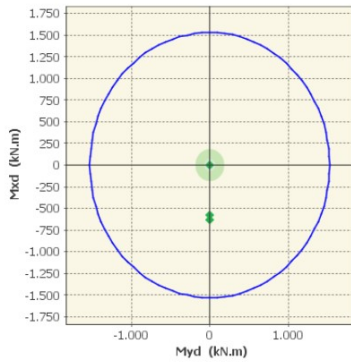


Figura: Diagrama de interação (Comb. 3)

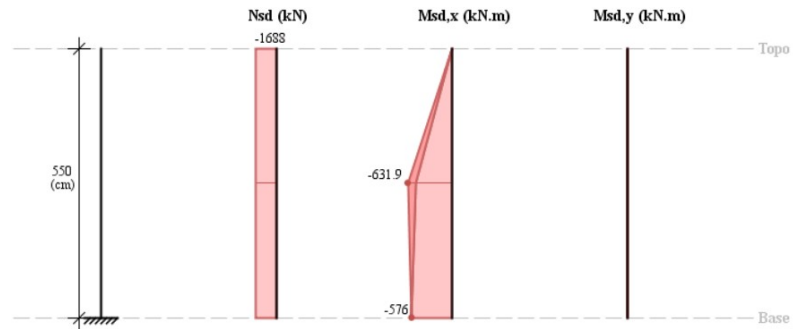


Figura: Esforços solicitantes de cálculo (Comb. 3)

### Determinação dos efeitos locais de 2ª Ordem (Método pilar-padrão com curvatura aproximada)

#### Momentos em torno do eixo x:

O momento total em torno da direção x é calculado pela expressão:

$$M_{d,tot,y} = \alpha_b M_{1d,A} + N_{sd} \frac{\ell_e^2}{10} \frac{1}{r} = 631,9 \text{ kN.m}$$

Com:

$$\alpha_b = 0,80 + 0,20 M_c / M_A = 0,80 + 0,20 (-288) / -576 = 0,9, \alpha_b \geq 0,85;$$

$$M_{1d,A} = -576 \text{ kN.m e } N_{sd} = 1688 \text{ kN};$$

$$\ell_e = 11 \text{ m};$$

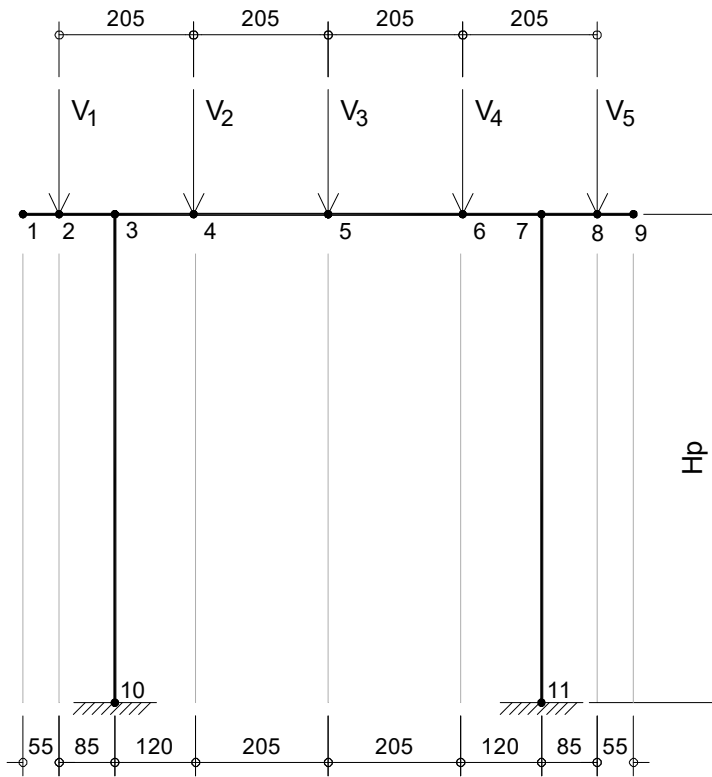
$$1 / r = 0,005 / [h_y (v + 0,5)] = 0,005 / [0,9 (0,12382 + 0,5)] = 0,00891 \text{ 1/m} \leq 0,005 / h_y = 0,00556 \text{ 1/m};$$

$$v = N_{sd} / (A_c f_{cd}) = 1688 / (0,63617 \times 30000 / 1,4) = 0,12382.$$



Cálculo das travessas

ap = 5



<http://cloud.it-solucoes.inf.br/transparenciaMunicipal/download/1-20230307102049.pdf>  
 PORTAL DA TRANSPARENCIA  
 assinado por: idUser: 97

Dimensionamento à flexão simples

$$H_{trav} = 1.30 \text{ m}$$

$$d_{trav} := H_{trav} - 6\text{cm}$$

$$d_{trav} = 1.240 \text{ m}$$

$$b_{trav} := \begin{pmatrix} b_{travi} \\ b_{travs} \\ b_{travs} \end{pmatrix}$$

$$b_{trav} = \begin{pmatrix} 1.10 \\ 1.40 \\ 1.40 \end{pmatrix} \text{ m}$$

Momentos fletores na travessa nas seções 3,4 e 5:

$$Mg_{trav} := \begin{pmatrix} -683.92 \\ 458.67 \\ 1118.63 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m} \quad Mq_{trav} := \begin{pmatrix} -338.44 \\ 449.44 \\ 923.31 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m} \quad Mv_{trav} := \begin{pmatrix} -97.27 \\ 61.26 \\ 0.00 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m} \quad Ma_{trav} := \begin{pmatrix} -18.70 \\ 11.79 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Momentos de projeto:

$$i := 1..3$$

$$Md_{trav_i} := 1.4 \cdot Mg_{trav_i} + 1.5 \cdot Mq_{trav_i} + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot Mv_{trav_i} + 1.5 \cdot \psi_0 \cdot Ma_{trav_i}$$

$$Md_{trav} = \begin{pmatrix} -1563.68 \\ 1378.37 \\ 2951.05 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Armadura de flexão:

$$KMD_i := \frac{|Md_{trav_i}|}{b_{trav_i} \cdot d_{trav} \cdot f_{cd}}$$

$$KMD = \begin{pmatrix} 0.053 \\ 0.037 \\ 0.079 \end{pmatrix} \text{ m}$$

$$KZ := \begin{pmatrix} 0.95 \\ 0.98 \\ 0.95 \end{pmatrix}$$

$$AS_i := \frac{|Md_{trav_i}|}{KZ_i \cdot d_{trav} \cdot f_{yd}}$$

$$AS = \begin{pmatrix} 30.53 \\ 26.09 \\ 57.62 \end{pmatrix} \cdot \text{cm}^2$$

$$b_{travm} := \frac{0.50 \text{ m} \cdot b_{travs} + 0.8 \text{ m} \cdot \left( \frac{b_{travs} + b_{travi}}{2} \right)}{H_{trav}}$$

$$b_{travm} = 1.31 \text{ m}$$

$$AS_{\min} := \frac{0.15}{100} \cdot H_{trav} \cdot b_{travm}$$

$$AS_{\min} = 25.50 \cdot \text{cm}^2$$

Dimensionamento ao cisalhamento

Esforços cortantes nas seções 3Esq, 3Dir e 4Dir :

$$V_{g\_trav} := \begin{pmatrix} 659.94 \\ 977.66 \\ 365.50 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{q\_trav} := \begin{pmatrix} 296.93 \\ 623.28 \\ 231.16 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{v\_trav} := \begin{pmatrix} 0.00 \\ 30.00 \\ 30.00 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{a\_trav} := \begin{pmatrix} 0.00 \\ 5.75 \\ 5.75 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

Esforços cortantes de projeto:

$$i := 1..3$$

$$V_{d\_trav}_i := 1.35 \cdot V_{g\_trav}_i + 1.5 \cdot V_{q\_trav}_i + 1.4 \cdot \psi_0 \cdot V_{v\_trav}_i + 1.5 \psi_0 \cdot V_{a\_trav}_i$$

$$V_{d\_trav} = \begin{pmatrix} 1336.31 \\ 2285.14 \\ 870.54 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

- verificação das bielas comprimidas:

$$\alpha_{v2} := \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \quad \alpha_{v2} = 0.88$$

$$V_{Rd2} := 0.27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_{travm} \cdot d_{trav} \quad V_{Rd2} = 8255.95 \cdot \text{kN}$$

$$\text{compressão bielas} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } \max(V_{d\_trav}) \leq V_{Rd2} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{compressão\_bielas} = \text{"atende"}$$

$$\frac{V_{d\_trav}}{V_{Rd2}} = \begin{pmatrix} 0.16 \\ 0.28 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$





- armação de cisalhamento:

$$V_{c0} := 0.6 \cdot f_{ctd} \cdot b_{travm} \cdot d_{trav}$$

$$V_{c0} = 1409.02 \cdot \text{kN}$$

$$V_{c0} := V_{c0}$$

$$V_{sw1} := V_{d\_trav\_i} - V_c \quad V_{sw} = \begin{pmatrix} -72.71 \\ 876.12 \\ -538.48 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$\rho_{swmin} := 0.2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$$

$$A_{swmin} := \rho_{swmin} \cdot b_{travm}$$

$$A_{swmin} = 15.15 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

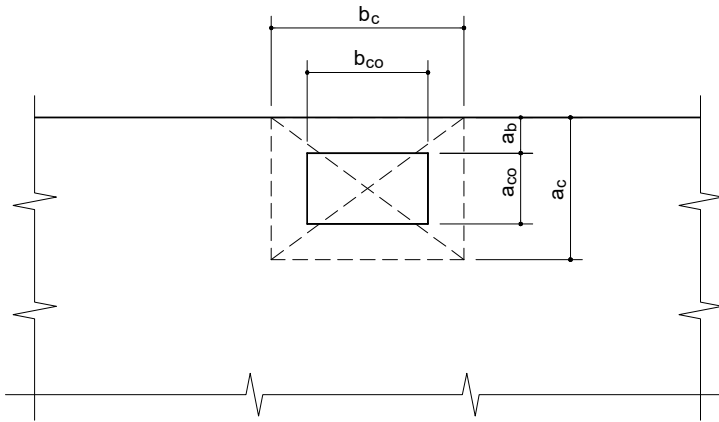
$$A_{sw1} := \frac{V_{sw}}{(0.9 \cdot d_{trav} \cdot f_{yd})}$$

$$A_{sw1} := \begin{cases} A_{sw1_i} & \text{if } A_{sw1_i} > A_{swmin} \\ A_{swmin} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{sw} = \begin{pmatrix} 15.15 \\ 18.06 \\ 15.15 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$



Dimensionamento das fretagens dos aparelhos de apoio



Reação máxima de projeto dos aparelhos de apoio:

$$i := 1..3$$

$$R_{d\_ap_i} := \max \left[ \begin{array}{l} \left( 1.35 \cdot R_{v1\_g_i} \dots \right) \\ \left( + R_{v1\_qt_i} \right) \end{array} \right], \left( 1.35 \cdot R_{v1\_g_i} \dots \right), \left( 1.35 \cdot R_{v1\_g_i} \dots \right) \left( + R_{v1\_qp_i} \right)$$

$$R_{d\_ap} = \begin{pmatrix} 614.30 \\ 715.12 \\ 712.96 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

$$R_d := \max(R_{d\_ap})$$

$$R_d = 715.12 \cdot \text{kN}$$

área de contato dos aparelhos:

$$a_{c0} := a_{n2}$$

$$b_{c0} := b_{n2}$$

$$a_{c0} = 0.25 \text{ m}$$

$$b_{c0} = 0.30 \text{ m}$$

afastamento do aparelho ao bordo da travessa:

$$a_b := 0.175 \text{ m}$$

$$a_{c1} := a_{c0} + 2 \cdot a_b$$

$$a_{c1} = 0.60 \text{ m}$$

esforço de fendilhamento:

$$F_d := 0.30 \cdot R_d \cdot \left( 1 - \frac{a_{c0}}{a_{c1}} \right)$$

$$F_d = 125.15 \cdot \text{kN}$$

dimensionamento da armadura:

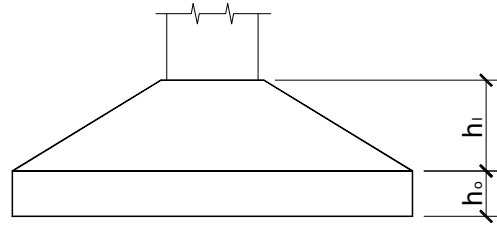
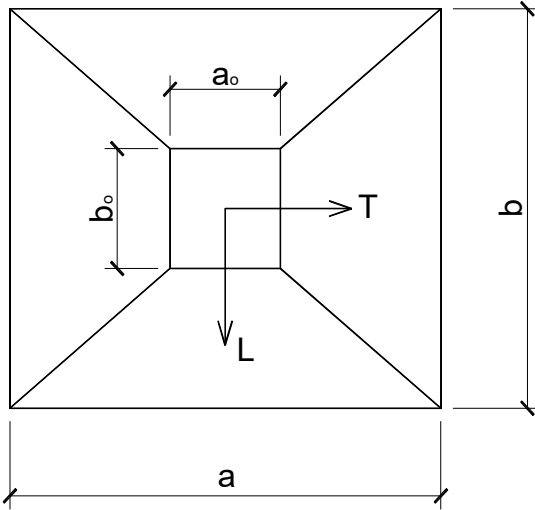
$$A_{s\_fret} := \frac{F_d}{f_{yd}}$$

$$A_{s\_fret} = 2.88 \cdot \text{cm}^2$$



3.5 Dimensionamento das fundações dos apoios P1-P2-P3-P4

Geometria das sapatas



altura total da sapata:

$$h_{sap} := h_{sap\_ap}$$

$$h_{sap} = 1.00 \text{ m}$$

$$a_0 := 1.00 \text{ m}$$

$$a := 3.00 \text{ m}$$

$$h_0 := 0.50 \text{ m}$$

$$b_0 := 1.00 \text{ m}$$

$$b := 3.00 \text{ m}$$

$$h_1 := h_{sap} - h_0$$

$$h_1 = 0.50 \text{ m}$$

ângulo de inclinação:

$$\beta_{sap} := \text{atan} \left[ \frac{2 \cdot h_1}{\min[(a - a_0), (b - b_0)]} \right]$$

$$\beta_{sap} = 26.57 \cdot \text{deg}$$

verificação da rigidez da sapata (critério da NBR 6118:2014):

$$\text{classificação\_da\_sapata} := \begin{cases} \text{"flexível"} & \text{if } h_{sap} \leq \begin{cases} \frac{b - b_0}{3} \\ \frac{a_1 - \frac{a_0}{2}}{1.5} \end{cases} \\ \text{"rígida"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{classificação\_da\_sapata} = \text{"rígida"}$$

$$A_0 := a_0 \cdot b_0$$

$$A_0 = 1.00 \cdot \text{m}^2$$

$$A := a \cdot b$$

$$A = 9.00 \cdot \text{m}^2$$

$$W_L := \frac{a^2 \cdot b}{6}$$

$$W_L = 4.50 \cdot \text{m}^3$$

$$W_T := \frac{a \cdot b^2}{6}$$

$$W_T = 4.50 \cdot \text{m}^3$$

Peso próprio:

$$P_{sap} := \left[ A \cdot h_0 + \frac{1}{3} \cdot h_1 \cdot \left[ A_0 + A + (A \cdot A_0)^{0.5} \right] \right] \cdot \rho_c$$

$$P_{sap} = 166.67 \cdot \text{kN}$$



a) Hipótese 1: carga vertical máxima

$$N_{P1\_1} := N_{g1} + N_{Q1\_1} + N_{V1} + N_{a1} + P_{sap}$$

$$N_{P1\_1} = 2840.5 \cdot \text{kN}$$

$$HL_{P1\_1} := \left( Ff_{ap} + Ft_{ap} + Fr_{ap} + Fp_{ap} \right) \frac{1}{n_p}$$

$$HL_{P1\_1} = 78.11 \cdot \text{kN}$$

$$ML_{P1\_1} := \left( Mf_{sap_{ap}} + Mt_{sap_{ap}} + Mr_{sap_{ap}} + Mp_{sap_{ap}} + ML_{P1\_qp} \right) \cdot \frac{1}{n_p}$$

$$ML_{P1\_1} = 710.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HT_{P1\_1} := HT_{g1} + HT_{Q1\_1} + HT_{V1} + HT_{a1}$$

$$HT_{P1\_1} = 108.09 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{P1\_1} := MT_{g1} + MT_{Q1\_1} + MT_{V1} + MT_{a1} + HT_{P1\_1} \cdot h_{sap_{ap}}$$

$$MT_{P1\_1} = 366.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tensões na base da sapata:

$$\sigma_{1\_1} := \frac{N_{P1\_1}}{A} + \frac{ML_{P1\_1}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_1}}{W_T}$$

$$\sigma_{1\_1} = 554.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{1\_1} = 555 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{2\_1} := \frac{N_{P1\_1}}{A} + \frac{ML_{P1\_1}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_1}}{W_T}$$

$$\sigma_{2\_1} = 392.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{2\_1} = 392 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{3\_1} := \frac{N_{P1\_1}}{A} - \frac{ML_{P1\_1}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_1}}{W_T}$$

$$\sigma_{3\_1} = 239.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{3\_1} = 239 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{4\_1} := \frac{N_{P1\_1}}{A} - \frac{ML_{P1\_1}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_1}}{W_T}$$

$$\sigma_{4\_1} = 76.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{4\_1} = 76 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{med1\_1} := \frac{N_{P1\_1}}{A}$$

$$\sigma_{med1\_1} = 316 \cdot \text{kPa}$$

Esforço horizontal por sapata:

$$H_{sp1\_1} := \left( HL_{P1\_1}^2 + HT_{P1\_1}^2 \right)^{0.5}$$

$$H_{sp1\_1} = 133.36 \cdot \text{kN}$$



b) Hipótese 2: momento fletor máximo

$$N_{P1\_2} := N_{g1} + N_{Q4_1} + N_{V1} + N_{a1} + P_{sap}$$

$$N_{P1\_2} = 2576.3 \cdot \text{kN}$$

$$HL_{P1\_2} := (Ff_{ap} + Ft_{ap} + Fr_{ap} + Fp_{ap}) \cdot \frac{1}{n_p}$$

$$HL_{P1\_2} = 78.11 \cdot \text{kN}$$

$$ML_{P1\_2} := (Mf_{sap_{ap}} + Mt_{sap_{ap}} + Mr_{sap_{ap}} + Mp_{sap_{ap}} + ML_{P1\_qt\_1v}) \cdot \frac{1}{n_p}$$

$$ML_{P1\_2} = 810.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HT_{P1\_2} := HT_{g1} + HT_{Q4_1} + HT_{V1} + HT_{a1}$$

$$HT_{P1\_2} = 99.89 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{P1\_2} := MT_{g1} + MT_{Q4_1} + MT_{V1} + MT_{a1} + HT_{P1\_1} \cdot h_{sap_{ap}}$$

$$MT_{P1\_2} = 349.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tensões na base da sapata:

$$\sigma_{1\_2} := \frac{N_{P1\_2}}{A} + \frac{ML_{P1\_2}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_2}}{W_T}$$

$$\sigma_{1\_2} = 544.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{1\_2} = 544 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{2\_2} := \frac{N_{P1\_2}}{A} + \frac{ML_{P1\_2}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_2}}{W_T}$$

$$\sigma_{2\_2} = 388.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{2\_2} = 389 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{3\_2} := \frac{N_{P1\_2}}{A} - \frac{ML_{P1\_2}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_2}}{W_T}$$

$$\sigma_{3\_2} = 183.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{3\_2} = 184 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{4\_2} := \frac{N_{P1\_2}}{A} - \frac{ML_{P1\_2}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_2}}{W_T}$$

$$\sigma_{4\_2} = 28.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{4\_2} = 28 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{med1\_2} := \frac{N_{P1\_2}}{A}$$

$$\sigma_{med1\_2} = 286 \cdot \text{kPa}$$

Esforço horizontal por sapata:

$$H_{sp1\_2} := \left( HL_{P1\_2}^2 + HT_{P1\_2}^2 \right)^{0.5}$$

$$H_{sp1\_2} = 126.81 \cdot \text{kN}$$



c) Hipótese 3: reação vertical mínima

$$N_{P1\_3} := N_{g2} + N_{v2} + N_{a1} + P_{sap}$$

$$N_{P1\_3} = 1877.83 \cdot \text{kN}$$

$$HL_{P1\_3} := (Ff_{ap} + Ft_{ap} + Fr_{ap} + Fp_{ap}) \cdot \frac{1}{n_p}$$

$$HL_{P1\_3} = 78.11 \cdot \text{kN}$$

$$ML_{P1\_3} := (Mf_{sap_{ap}} + Mt_{sap_{ap}} + Mr_{sap_{ap}} + Mp_{sap_{ap}}) \cdot \frac{1}{n_p}$$

$$ML_{P1\_3} = 612.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HT_{P1\_3} := HT_{g2} + HT_{v2} + HT_{a2}$$

$$HT_{P1\_3} = 83.42 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{P1\_3} := MT_{g2} + MT_{v2} + MT_{a2}$$

$$MT_{P1\_3} = 206.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tensões na base da sapata:

$$\sigma_{1\_3} := \frac{N_{P1\_3}}{A} + \frac{ML_{P1\_3}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_3}}{W_T}$$

$$\sigma_{1\_3} = 390.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{1\_3} = 391 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{2\_3} := \frac{N_{P1\_3}}{A} + \frac{ML_{P1\_3}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_3}}{W_T}$$

$$\sigma_{2\_3} = 298.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{2\_3} = 299 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{3\_3} := \frac{N_{P1\_3}}{A} - \frac{ML_{P1\_3}}{W_L} + \frac{MT_{P1\_3}}{W_T}$$

$$\sigma_{3\_3} = 118.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{3\_3} = 119 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{4\_3} := \frac{N_{P1\_3}}{A} - \frac{ML_{P1\_3}}{W_L} - \frac{MT_{P1\_3}}{W_T}$$

$$\sigma_{4\_3} = 26.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{4\_3} = 27 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{med1\_3} := \frac{N_{P1\_3}}{A}$$

$$\sigma_{med1\_3} = 209 \cdot \text{kPa}$$

Esforço horizontal por sapata:

$$H_{sp1\_3} := \left( HL_{P1\_3}^2 + HT_{P1\_3}^2 \right)^{0.5}$$

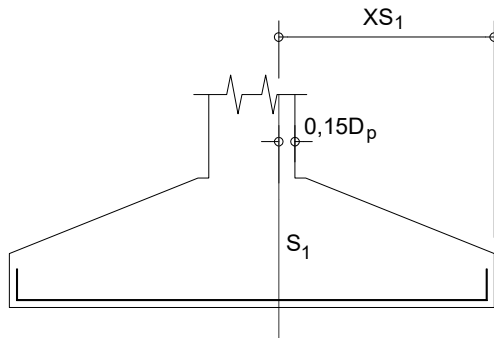
$$H_{sp1\_3} = 114.28 \cdot \text{kN}$$



**Dimensionamento das sapatas**

direção longitudinal

$$D_p = 0.90 \text{ m}$$



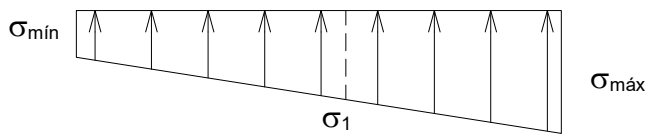
$$a = 3.00 \text{ m}$$

$$b = 3.00 \text{ m}$$

$$d_{sap} := h_{sap} - 6 \text{ cm}$$

$$d_{sap} = 0.94 \text{ m}$$

$$x_{s1} := \frac{b - b_0}{2} + 0.05 \text{ m} + 0.15 \cdot D_p \quad x_{s1} = 1.19 \text{ m}$$



tensões na base, conforme diagrama da figura acima:

$$\sigma_{max} := \frac{\sigma_{1\_1} + \sigma_{2\_1}}{2} \quad \sigma_{max} = 473.53 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{min} := \frac{\sigma_{3\_1} + \sigma_{4\_1}}{2} \quad \sigma_{min} = 157.69 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{s1} := \sigma_{max} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{a} \cdot x_{s1} \quad \sigma_{s1} = 348.77 \cdot \text{kPa}$$

momento fletor na seção S1:

$$M_{s1} := b \cdot \left[ \sigma_{s1} \cdot \frac{x_{s1}^2}{2} + (\sigma_{max} - \sigma_{s1}) \cdot \frac{x_{s1}}{3} \right] \quad M_{s1} = 909.82 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

adotando  $z = 0.85d$

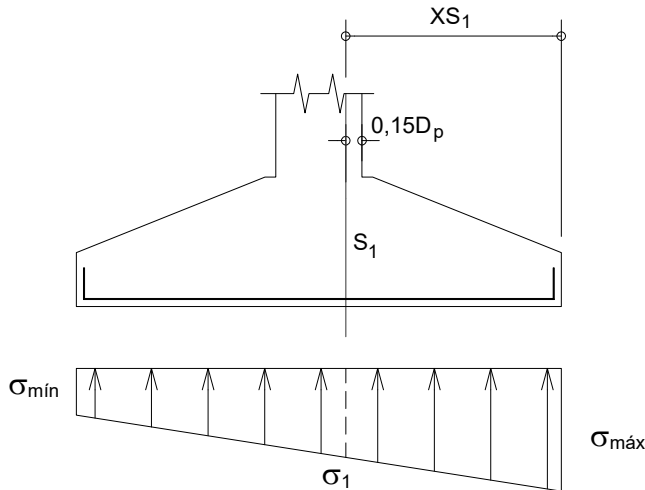
$$A_{sl_{sap}} := \frac{1.4 M_{s1}}{0.85 d_{sap} \cdot f_{yd}} \quad A_{sl_{sap}} = 36.67 \cdot \text{cm}^2$$



direção transversal

$$d_{sap} = 0.94 \text{ m}$$

$$x_{s1} = 1.19 \text{ m}$$



tensões na base, conforme diagrama da figura acima:

$$\sigma_{max} := \frac{\sigma_{1-1} + \sigma_{3-1}}{2} \quad \sigma_{max} = 396.99 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{min} := \frac{\sigma_{2-1} + \sigma_{4-1}}{2} \quad \sigma_{min} = 234.23 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{s1} := \sigma_{max} - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{b} \cdot x_{s1} \quad \sigma_{s1} = 332.70 \cdot \text{kPa}$$

momento fletor na seção S1:

$$M_{s1} := a \cdot \left[ \sigma_{s1} \cdot \frac{x_{s1}^2}{2} + (\sigma_{max} - \sigma_{s1}) \cdot \frac{x_{s1}^2}{3} \right] \quad M_{s1} = 791.06 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

adotando  $z = 0.85d$

$$A_{st_{sap}} := \frac{1.4M_{s1}}{0.85d_{sap} \cdot f_{yd}} \quad A_{st_{sap}} = 31.88 \cdot \text{cm}^2$$





## 3.6 Cálculo dos Encontros

- Materiais

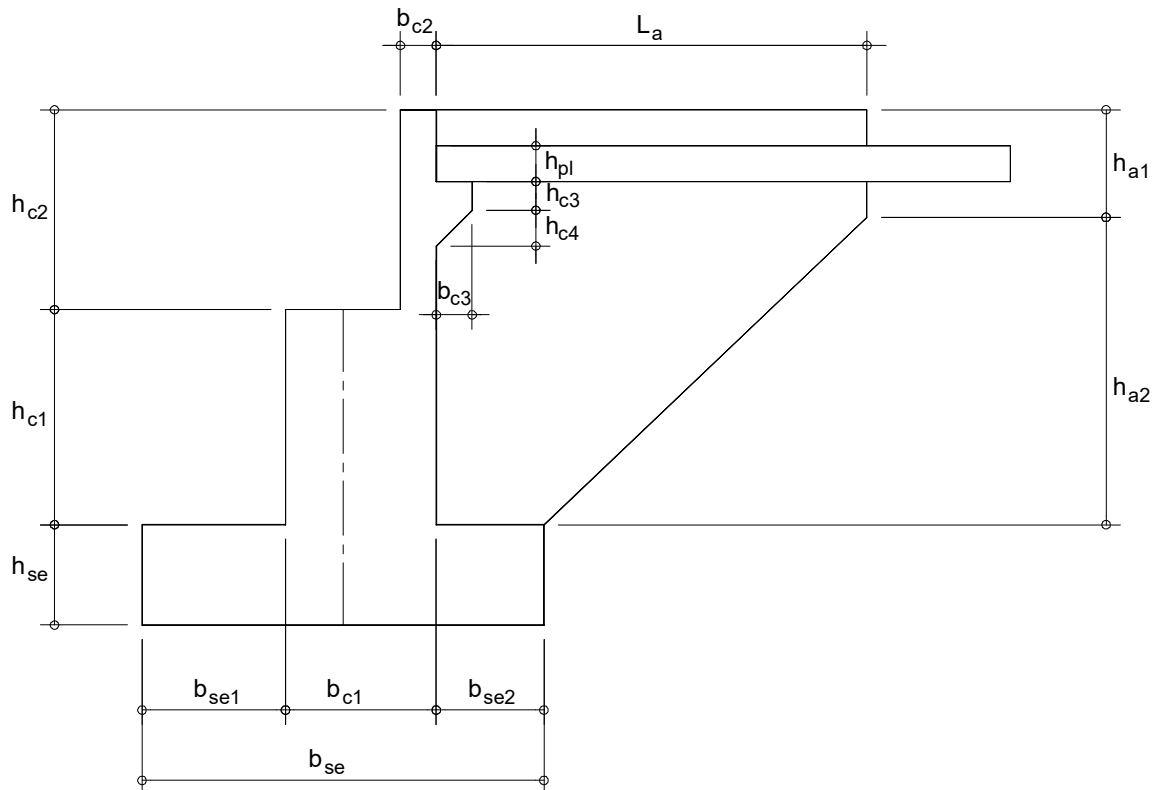
Solo:  $\rho_s := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$   $k_a := 0.33$

Concreto:  $f_{ck} = 30.00 \cdot \text{MPa}$   $f_{cd} = 21.43 \cdot \text{MPa}$   $\rho_c = 25.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Aço:  $f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$   $f_{yd} = 434.78 \cdot \text{MPa}$



## Geometria



**Dados**

O dimensionamento será feito para o encontro E2 por ser mais desfavorável

$$ap := 6$$

- Geometria:

Sapata:

$$L_{enc} := 10.0\text{m}$$

$$b_{se} := 2.80\text{m}$$

$$b_{se1} := 1.00\text{m}$$

$$b_{se2} := b_{se} - b_{se1} - b_{c1}$$

$$b_{se2} = 0.75\text{ m}$$

$$h_{se} := h_{sap1}$$

$$h_{se} = 0.70\text{ m}$$

Cortinas:

$$b_{c1} := 1.05\text{m}$$

$$b_{c2} := 0.25\text{m}$$

$$h_{c1} := \max(h_{par})$$

$$h_{c1} = 1.50\text{ m}$$

$$h_{c2} := 1.45\text{m}$$

$$exc2 := 0.10\text{m}$$

$$b_{c3} := 0.25\text{m}$$

$$h_{c3} := 0.20\text{m}$$

$$h_{c4} := 0.25\text{m}$$

Alas:

$$L_a := 3.50\text{m}$$

$$h_{a1} := 0.60\text{m}$$

$$b_a := 0.25\text{m}$$

$$h_{a2} := h_{c1} + h_{c2} - h_{a1}$$

$$h_{a2} = 2.35\text{ m}$$

Placa de transição:

$$L_{pl} := 9.00\text{m}$$

$$b_{pl} := 4.00\text{m}$$

$$h_{pl} := 0.25\text{m}$$

$$h_{base} := 0.25\text{m}$$

área da sapata:

$$A_{se} := L_{enc} \cdot b_{se}$$

$$A_{se} = 28.00 \cdot \text{m}^2$$

módulo resistente longitudinal:

$$W_{Lse} := \frac{L_{enc} \cdot b_{se}^2}{6}$$

$$W_{Lse} = 13.07 \cdot \text{m}^3$$

módulo resistente transversal:

$$W_{Tse} := \frac{L_{enc}^2 \cdot b_{se}}{6}$$

$$W_{Tse} = 46.67 \cdot \text{m}^3$$



**Cargas verticais atuantes no encontro:**

$$P_1 := b_{se} \cdot h_{se} \cdot L_{enc} \cdot \rho_c \quad P_1 = 490.00 \cdot \text{kN}$$

$$P_2 := L_{enc} \cdot b_{c1} \cdot h_{c1} \cdot \rho_c \quad P_2 = 393.75 \cdot \text{kN}$$

$$P_3 := L_{enc} \cdot b_{c2} \cdot h_{c2} \cdot \rho_c \quad P_3 = 90.63 \cdot \text{kN}$$

$$P_4 := \left( h_{c3} + \frac{h_{c4}}{2} \right) \cdot b_{c3} \cdot L_{pl} \cdot \rho_c \quad P_4 = 18.28 \cdot \text{kN}$$

$$P_5 := \frac{L_{pl} \cdot b_{pl}}{2} \cdot (h_{pl} \cdot \rho_c + h_{base} \cdot \rho_s) \quad P_5 = 193.50 \cdot \text{kN}$$

$$P_6 := b_{se2} \cdot (h_{c1} + h_{c2}) \cdot 2 \cdot b_a \cdot \rho_c \quad P_6 = 27.66 \cdot \text{kN}$$

$$P_7 := (L_a - b_{se2}) \cdot \frac{(h_{a2} + 2h_{a1})}{2} \cdot 2 \cdot b_a \cdot \rho_c \quad P_7 = 61.02 \cdot \text{kN}$$

$$P_{aterro} := b_{se2} \cdot (L_{enc} - 2 \cdot b_a) \cdot (h_{c1} + h_{c2} - h_{pl} - h_{base}) \cdot \rho_s \quad P_{aterro} = 314.21 \cdot \text{kN}$$

$$P_T := P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_{aterro} \quad P_T = 1589.04 \cdot \text{kN}$$

**Braços de alavanca em relação ao ponto A:**

$$x_{1w} := \frac{b_{se}}{2} \quad x_1 = 1.40 \text{ m}$$

$$x_{2w} := b_{se1} + \frac{b_{c1}}{2} \quad x_2 = 1.525 \text{ m}$$

$$x_{3w} := b_{se1} + b_{c1} - \frac{b_{c2}}{2} \quad x_3 = 1.925 \text{ m}$$

$$x_{4w} := b_{se1} + b_{c1} + \frac{b_{c3}}{3} \cdot \frac{2 \cdot h_{c3} + h_{c4} + h_{c3}}{2h_{c3} + h_{c4}} \quad x_4 = 2.16 \text{ m}$$

$$x_{5w} := b_{se1} + b_{c1} + \frac{b_{c3}}{2} \quad x_5 = 2.17 \text{ m}$$

$$x_6 := b_{se} - \frac{b_{se2}}{2} \quad x_6 = 2.42 \text{ m}$$

$$x_7 := b_{se} + \frac{(L_a - b_{se2})}{3} \cdot \frac{h_{a2} + 3h_{a1}}{2 \cdot h_{a1} + h_{a2}} \quad x_7 = 3.87 \text{ m}$$

$$x_{at} := x_6 \quad x_{at} = 2.42 \text{ m}$$



**Momentos devido às cargas verticais do encontro:**

$$M_1 := P_1 \cdot x_1 \qquad M_1 = 686.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_2 := P_2 \cdot x_2 \qquad M_2 = 600.47 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_3 := P_3 \cdot x_3 \qquad M_3 = 174.45 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_4 := P_4 \cdot x_4 \qquad M_4 = 39.47 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_5 := P_5 \cdot x_5 \qquad M_5 = 420.86 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_6 := P_6 \cdot x_6 \qquad M_6 = 67.07 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_7 := P_7 \cdot x_7 \qquad M_7 = 236.23 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{at} := P_{aterro} \cdot x_{at} \qquad M_{at} = 761.97 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ev\_A} := M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_{at} \qquad M_{Ev\_A} = 2986.51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**Momento no centro de gravidade da sapata:**

$$M_{Ev} := M_{Ev\_A} - P_T \cdot \frac{b_{se}}{2} \qquad M_{Ev} = 761.86 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



**Esforços horizontais devido às pressões laterais**

a) Devido ao empuxo de terra

altura total (paredes + sapata):  $h_{tot} := h_{se} + h_{c1} + h_{c2}$   $h_{tot} = 3.65 \text{ m}$

$$e_s := k_a \cdot h_{tot} \cdot \rho_s \qquad e_s = 21.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$E_t := e_s \cdot \frac{h_{tot}}{2} \cdot L_{enc} \qquad E_t = 395.68 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Et} := E_t \cdot \frac{h_{tot}}{3} \qquad M_{Et} = 481.41 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

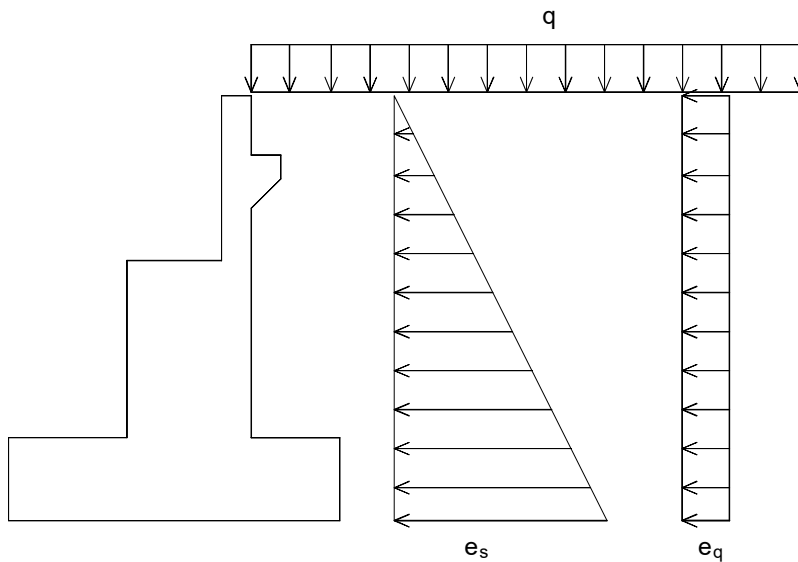
b) Devido ao empuxo de sobrecarga de carga móvel sobre o aterro:

$$q_a := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$e_q := k_a \cdot q_a \qquad e_q = 3.30 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$E_q := e_q \cdot h_{tot} \cdot L_{enc} \qquad E_q = 120.45 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Eq} := E_q \cdot \frac{h_{tot}}{2} \qquad M_{Eq} = 219.82 \text{ m} \cdot \text{kN}$$



**Segurança ao tombamento na fase de construção**

$$F_{St} := \frac{M_{Ev\_A}}{M_{Et} + M_{Eq}} \qquad F_{St} = 4.26$$

(encontro com aterro e empuxo de carga móvel sem a superestrutura)



**Carregamentos da superestrutura nos encontros**Reações verticais:

Cargas permanentes:  $N_{E_g} := \sum R_{E_g}$   $N_{E_g} = 1440.00 \cdot \text{kN}$

Carga móvel (ponte totalmente carregada):  $N_{E_{qNmax}} := \sum R_{E_{qt}}$   $N_{E_{qNmax}} = 992.15 \cdot \text{kN}$

Carga móvel (ponte parcialmente carregada):  $N_{E_{qMTmax}} := \sum R_{E_{qp}}$   $N_{E_{qMTmax}} = 734.92 \cdot \text{kN}$

Momentos transversais:

a) devido à excentricidade das cargas móveis:

Distância transversal das vigas ao centro do encontro:

$$d_{v_t} := \begin{pmatrix} 4.10 \\ 2.05 \\ 0.00 \\ -2.05 \\ -4.10 \end{pmatrix} \text{ m}$$

$$MT_{Nmax} := \sum_{i=1}^5 (R_{E_{qt_i}} \cdot d_{v_t_i})$$

$$MT_{Nmax} = 929.90 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$MT_{max} := \sum_{i=1}^5 (R_{E_{qp_i}} \cdot d_{v_t_i})$$

$$MT_{max} = 1482.85 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

b) devido ao vento na superestrutura:

Ponte carregada:  $MT_{vento_c} := F_{vcE} \cdot (h_{c1} + h_{se})$   $MT_{vento_c} = 74.51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Ponte descarregada:  $MT_{vento_d} := F_{vdE} \cdot (h_{c1} + h_{se})$   $MT_{vento_d} = 69.31 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Momentos longitudinais

(calculados anteriormente)

frenagem:  $M_{f_1} = 10.62 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

temperatura:  $M_{t_1} = 27.11 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

retração:  $M_{r_1} = 36.15 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

protensão e deformação lenta:  $M_{p_1} = 14.77 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$



**Esforços atuantes na base do sapata do encontro (serviço):**

$$\frac{ap}{ww} := 6$$

Hipótese 1 - Reação vertical máxima de carga móvel:

$$N_{E1} := N_{E_g} + N_{E_q} N_{max} + P_T$$

$$N_{E1} = 4021.19 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{E1} := MT_{N_{max}} + MT_{vento_c}$$

$$MT_{E1} = 1004.41 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$ML_{E1} := M_{f_{ap}} + M_{t_{ap}} + M_{r_{ap}} + M_{p_{ap}} + M_{Et} + M_{Eq} - M_{Ev}$$

$$ML_{E1} = 209.53 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HL_{E1} := E_t + E_q + F_{f_{ap}} + F_{t_{ap}} + F_{r_{ap}} + F_{p_{ap}}$$

$$HL_{E1} = 690.65 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 2 - Momento transversal máximo de carga móvel:

$$N_{E2} := N_{E_g} + N_{E_q} MT_{max} + P_T$$

$$N_{E2} = 3763.96 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{E2} := MT_{max} + MT_{vento_c}$$

$$MT_{E2} = 1557.36 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$ML_{E2} := M_{f_{ap}} + M_{t_{ap}} + M_{r_{ap}} + M_{p_{ap}} + M_{Et} + M_{Eq} - M_{Ev}$$

$$ML_{E2} = 209.53 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HL_{E2} := E_t + E_q + F_{f_{ap}} + F_{t_{ap}} + F_{r_{ap}} + F_{p_{ap}}$$

$$HL_{E2} = 690.65 \cdot \text{kN}$$

Hipótese 3 - Superestrutura sem carga móvel:

$$N_{E3} := N_{E_g} + P_T$$

$$N_{E3} = 3029.04 \cdot \text{kN}$$

$$MT_{E3} := MT_{vento_d}$$

$$MT_{E3} = 69.31 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$ML_{E3} := M_{t_{ap}} + M_{r_{ap}} + M_{p_{ap}} + M_{Et} + M_{Eq} - M_{Ev}$$

$$ML_{E3} = 179.54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$HL_{E3} := E_t + E_q + F_{t_{ap}} + F_{r_{ap}} + F_{p_{ap}}$$

$$HL_{E3} = 671.27 \cdot \text{kN}$$



**Tensões na base da sapata:**Hipótese 1 - Reação vertical máxima:

$$\sigma_{11} := \frac{N_{E1}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E1}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E1}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{11} = 181.17 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{11'} := \frac{N_{E1}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E1}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E1}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{11'} = 138.13 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{12} := \frac{N_{E1}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E1}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E1}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{12} = 149.10 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{12'} := \frac{N_{E1}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E1}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E1}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{12'} = 106.06 \cdot \text{kPa}$$

Hipótese 2 - Momento transversal máximo:

$$\sigma_{21} := \frac{N_{E2}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E2}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E2}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{21} = 183.83 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{21'} := \frac{N_{E2}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E2}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E2}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{21'} = 117.09 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{22} := \frac{N_{E2}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E2}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E2}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{22} = 151.76 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{22'} := \frac{N_{E2}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E2}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E2}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{22'} = 85.02 \cdot \text{kPa}$$

Hipótese 3 - Reação vertical mínima:

$$\sigma_{31} := \frac{N_{E3}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E3}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E3}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{31} = 123.41 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{31'} := \frac{N_{E3}}{A_{se}} + \frac{M_{L_{E3}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E3}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{31'} = 120.44 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{32} := \frac{N_{E3}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E3}}}{W_{L_{se}}} + \frac{M_{T_{E3}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{32} = 95.93 \cdot \text{kPa}$$

$$\sigma_{32'} := \frac{N_{E3}}{A_{se}} - \frac{M_{L_{E3}}}{W_{L_{se}}} - \frac{M_{T_{E3}}}{W_{T_{se}}} \quad \sigma_{32'} = 92.95 \cdot \text{kPa}$$





## Dimensionamento da sapata do encontro

$$f_{ck} = 30 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{cd} = 21.43 \cdot \text{MPa}$$

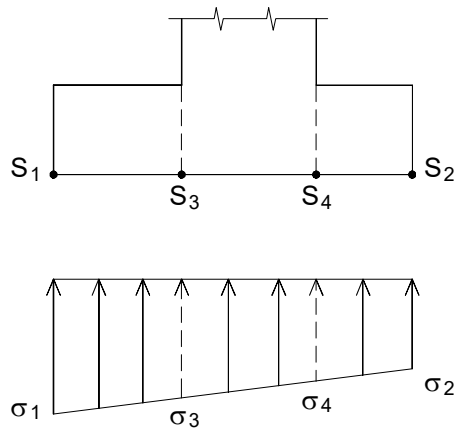
$$f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{yd} = 435 \cdot \text{MPa}$$

$$d_{se} := h_{se} - 5 \text{ cm}$$

$$d_{se} = 0.65 \text{ m}$$

a) aba externa



hipótese de reação vertical máxima

$$x_{s3} := b_{se1}$$

$$x_{s3} = 1.00 \text{ m}$$

$$\sigma_{1a} := \sigma_{11} \quad \sigma_{1a} = 181.17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{2a} := \sigma_{12} \quad \sigma_{2a} = 149.10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{3a} := \sigma_{1a} - \frac{\sigma_{1a} - \sigma_{2a}}{b_{se}} \cdot x_{s3}$$

$$\sigma_{3a} = 169.72 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

momento fletor na seção S5:

$$M_{s3} := \sigma_{3a} \cdot \frac{x_{s3}^2}{2} + (\sigma_{1a} - \sigma_{3a}) \cdot \frac{x_{s3}}{3}$$

$$M_{s3} = 88.68 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

adotando  $z = 0.85d$ 

$$A_{se3} := \frac{1.4M_{s3}}{0.85d_{se} \cdot f_{yd}} \quad A_{se3} = 5.17 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

armação mínima

$$A_{se\_min} := \frac{0.15}{100} \cdot h_{se}$$

$$A_{se\_min} = 10.50 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$



b) aba interna

hipótese de reação vertical mínima

$$h_{\text{aterro}} := h_{c1} + h_{c2}$$

$$p_{s1} := h_{\text{aterro}} \cdot \rho_s \quad p_{s1} = 53.10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$x_{s4} := b_{se} - b_{se2} \quad x_{s4} = 2.05 \text{ m}$$

$$\sigma_{1b} := \sigma_{31}, \quad \sigma_{1b} = 120.44 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{2b} := \sigma_{32}, \quad \sigma_{2b} = 92.95 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{4b} := \sigma_{1b} - \frac{\sigma_{1b} - \sigma_{2b}}{b_{se}} \cdot x_{s4}$$

$$\sigma_{4b} = 100.32 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M_{s4} := \frac{-(p_{s1} + h_{se} \cdot \rho_c) \cdot b_{se2}^2}{2} + \frac{\sigma_{2b} \cdot b_{se2}^2}{2} + (\sigma_{4b} - \sigma_{2b}) \cdot \frac{b_{se2}^2}{6}$$

$$M_{s4} = 6.98 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

(armação mínima)



**Dimensionamento das paredes do encontro**

$$f_{ck} = 30 \cdot \text{MPa} \quad f_{cd} = 21.4 \cdot \text{MPa} \quad f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa} \quad f_{yd} = 434.8 \cdot \text{MPa}$$

**Parede superior**

$$h_{cor1} := b_{c2} \quad h_{cor1} = 0.25 \text{ m} \quad d_{cor1} := h_{cor1} - c - 0.5 \text{ cm} \quad d_{cor1} = 0.220 \text{ m} \quad b_{cor1} := 1.00 \text{ m}$$

$$M_{t1} := k_a \cdot \rho_s \cdot \frac{h_{c2}^3}{6} \quad M_{t1} = 3.02 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{q1} := k_a \cdot q_a \cdot \frac{h_{c2}^2}{2} \quad M_{q1} = 3.47 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{1d} := 1.35 \cdot M_{t1} + 1.50 \cdot M_{q1} \quad M_{1d} = 9.3 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$k_{md} := \frac{M_{1d}}{b_{cor1} \cdot d_{cor1}^2 \cdot f_{cd}} \cdot \text{m} \quad k_{md} = 0.009 \quad k_z := 0.99 \quad A_s := \frac{M_{1d}}{k_z \cdot d_{cor1} \cdot f_{yd}} \quad A_s = 0.98 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{smin} := \frac{0.15}{100} \cdot h_{cor1} \quad A_{smin} = 3.75 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

**Parede frontal principal**

Seção S1 - base da parede principal

$$h := b_{c1} \quad h = 1.05 \text{ m} \quad c_n := 30 \text{ mm}$$

$$\Delta d := c_n + 2 \text{ cm} \quad \Delta d = 0.05 \text{ m} \quad d_{pf} := h - \Delta d \quad d_{pf} = 1.00 \text{ m}$$

**Cargas da superestrutura**

$$N_{E_g} = 1440.00 \text{ kN}$$

$$N_{E_qNmax} = 992.15 \text{ kN}$$

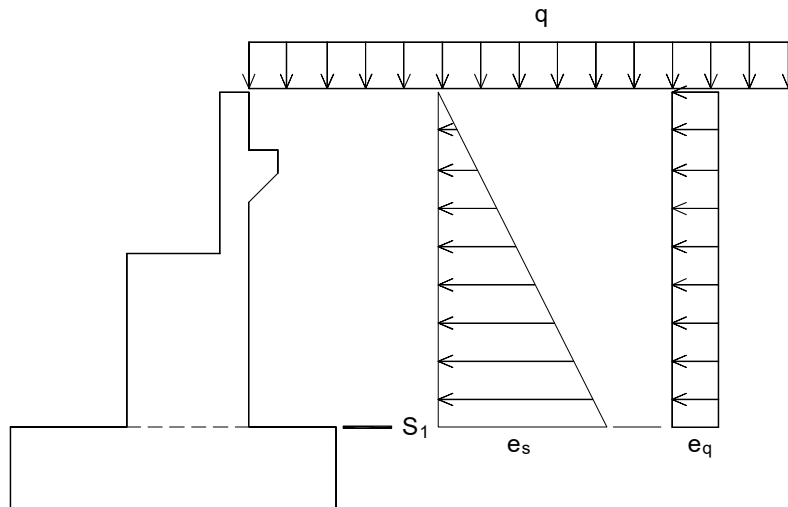
excentricidade das cargas verticais em relação à parede:  $exc_1 := 0.125 \text{ m}$ 

$$M_{E_g} := N_{E_g} \cdot exc_1 \quad M_{E_g} = 180.00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{E_qNmax} := N_{E_qNmax} \cdot exc_1 \quad M_{E_qNmax} = 124.02 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



empuxos horizontais



$$e_{s1} := \rho_s \cdot k_a \cdot (h_{c1} + h_{c2})$$

$$e_{s1} = 17.52 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$e_q = 3.30 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M_{s1} := \frac{e_{s1} \cdot (h_{c1} + h_{c2})^2}{6} \cdot L_{\text{enc}}$$

$$M_{s1} = 254.16 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{q1} := \frac{e_q \cdot (h_{c1} + h_{c2})^2}{2} \cdot L_{\text{enc}}$$

$$M_{q1} = 143.59 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{1d} := 1.35 \cdot (N_{E_g} + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6) + 1.5 \cdot N_{E_q \text{Nmax}}$$

$$N_{1d} = 4409.37 \text{ kN}$$

$$M_{1d} := 1.35 \cdot (M_{E_q \text{Nmax}} + M_{s1}) + 1.2 \cdot (M_{t_{ap}} + M_{r_{ap}} + M_{p_{ap}}) + 1.5 \cdot (M_{f_{ap}} + M_{q1})$$

$$M_{1d} = 1059.10 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

dimensionamento à flexão composta

$$M_{1ed} := M_{1d} + N_{1d} \cdot \left( \frac{h}{2} - \Delta d \right)$$

$$M_{1ed} = 3153.56 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$k_{md1} := \frac{M_{1ed}}{L_{\text{enc}} \cdot d_{\text{pf}}^2 \cdot f_{cd}} \quad k_{md1} = 0.015 \quad k_{z1} := 0.99$$

$$A_{s1} := \left( \frac{M_{1ed}}{k_{z1} \cdot d_{\text{pf}}} - N_{1d} \right) \cdot \frac{1}{f_{yd}}$$

$$A_{s1} = -28.15 \cdot \text{cm}^2$$

não é necessária armação

$$A_{s\_min} := \frac{0.15}{100} \cdot h \cdot L_{\text{enc}}$$

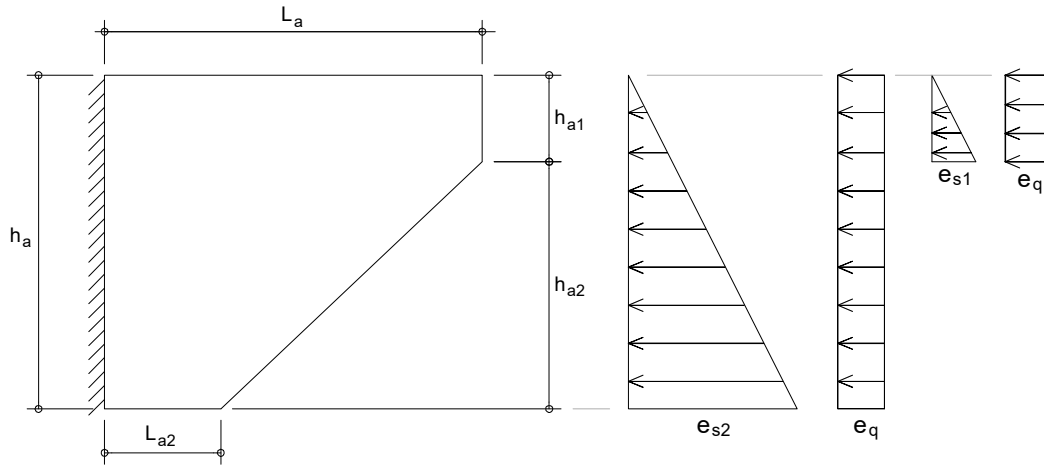
$$A_{s\_min} = 157.50 \cdot \text{cm}^2$$

$$\frac{A_{s\_min}}{L_{\text{enc}}} = 15.75 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$



Dimensionamento das alas

Esquema estrutural



empuxos atuantes na ala

Geometria:

$L_a = 3.50 \text{ m}$

$L_{a2} := b_{se2}$

$b_a = 0.25 \text{ m}$

$h_{a1} = 0.60 \text{ m}$

$h_{a2} = 2.35 \text{ m}$

$h_a := h_{a1} + h_{a2}$

$h_a = 2.95 \text{ m}$

Parâmetros adotados

peso específico do solo:

$\rho_s = 18.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

coeficiente de empuxo ativo:

$k_a = 0.33$

pressão devido à sobrecarga:

$q := 5.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$



**Esforços horizontais:**

Esforços devido aos empuxos laterais:

$$p_{s1} := k_a \cdot \rho_s \cdot h_{a1} \quad p_{s1} = 3.56 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$p_{s2} := k_a \cdot \rho_s \cdot h_a \quad p_{s2} = 17.52 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$p_q := k_a \cdot q \quad p_q = 1.65 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$x_c := \frac{L_{a2} \cdot h_a \cdot \frac{L_{a2}}{2} + \frac{(h_a + h_{a1})}{2} \cdot (L_a - L_{a2}) \cdot \left[ L_{a2} + \frac{(L_a - L_{a2})}{3} \cdot \frac{h_a + 2 \cdot h_{a1}}{h_a + h_{a1}} \right]}{L_{a2} \cdot h_a + \frac{(h_a + h_{a1})}{2} \cdot (L_a - L_{a2})} \quad x_c = 1.37 \text{ m}$$

esforços horizontais

$$H_s := \frac{p_{s2}}{2} \cdot h_a \cdot L_{a2} + \frac{p_{s2} + p_{s1}}{4} \cdot \frac{(h_a + h_{a1})}{2} \cdot (L_a - L_{a2}) \quad H_s = 45.12 \cdot \text{kN}$$

$$H_q := p_q \cdot h_a \cdot L_{a2} + p_q \cdot \frac{(h_a + h_{a1})}{2} \cdot (L_a - L_{a2}) \quad H_q = 11.70 \cdot \text{kN}$$

momentos fletores na seção do engaste:

$$M_{s1} := H_s \cdot x_c \quad M_{s1} = 61.83 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{q1} := H_q \cdot x_c \quad M_{q1} = 16.04 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

momento fletor de projeto:

$$M_{d1} := 1.35 \cdot M_{s1} + 1.5 \cdot M_{q1} \quad M_{d1} = 107.53 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



## Dimensionamento à flexão simples

cobrimento nominal:

$$c_n := 3.0 \text{ cm}$$

$$d := b_a - c_n - 0.5 \text{ cm}$$

$$d = 0.215 \text{ m}$$

$$b := h_{a2}$$

$$k_{md} := \frac{M_{d1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

$$k_{md} = 0.046$$

$$k_z := 0.98$$

$$A_s := \frac{M_{d1}}{k_z \cdot d \cdot f_{yd} \cdot h_a}$$

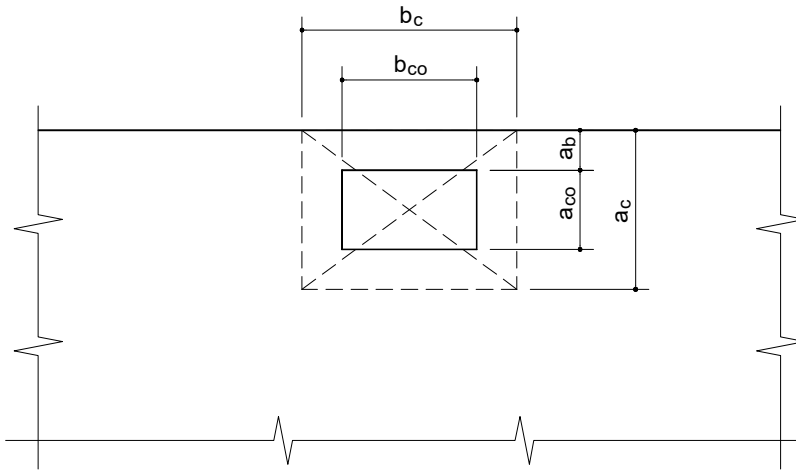
$$A_s = 3.98 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{smin\_ala} := \frac{0.15}{100} \cdot b_a$$

$$A_{smin\_ala} = 3.75 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$



## Dimensionamento das fretagens dos aparelhos de apoio



Reação máxima de projeto dos aparelhos de apoio:

$$P_d := \max\left[\left(1.35 R_{E\_g2} + 1.5 \cdot R_{E\_qp2}\right), \left(1.35 \cdot R_{E\_g2} + 1.5 \cdot R_{E\_qt2}\right)\right]$$

$$P_d = 883.29 \cdot \text{kN}$$

área de contato dos aparelhos:

$$a_{c0} := a_{n1}$$

$$a_{c0} = 0.25 \text{ m}$$

$$b_{c0} := b_{n1}$$

$$b_{c0} = 0.30 \text{ m}$$

afastamento do aparelho ao bordo do apoio:

$$a_{bv} := 0.225 \text{ m}$$

$$a_{c1} := a_{c0} + 2 \cdot a_b$$

$$a_{c1} = 0.70 \text{ m}$$

esforço de fendilhamento:

$$F_{d1} := 0.30 \cdot P_d \cdot \left(1 - \frac{a_{c0}}{a_{c1}}\right)$$

$$F_d = 170.35 \cdot \text{kN}$$

dimensionamento da armadura:

$$A_{s\_fret} := \frac{F_d}{f_{yd}}$$

$$A_{s\_fret} = 3.92 \cdot \text{cm}^2$$

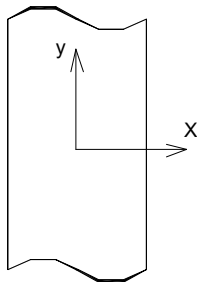
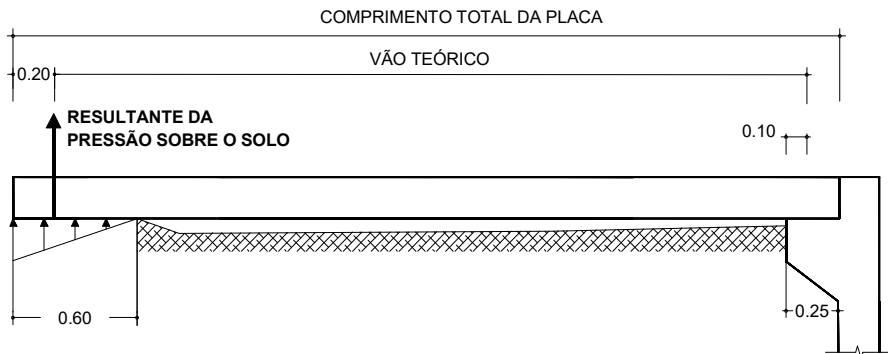




### 3.7 Dimensionamento das placas de transição

#### Modelo Estrutural

A seguir é apresentado o modelo estrutural adotado no dimensionamento da placa de transição conforme recomendação do SETRA;



SENTIDO DO TRÁFEGO

(Tabela nº 1 de Rüsçh)

Vão teórico da placa:  $L_{xp} := 3.70\text{m}$

Espessura da placa:  $h_p := 0.25\text{m}$



Carregamentos

## a) Cargas Permanentes

$$\text{Peso Próprio:} \quad g_{1p} := h_p \cdot \rho_c \quad g_{1p} = 6.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Pavimentação:} \quad h_{pp} := 0.07\text{m} \quad g_{2p} := h_{pp} \cdot \rho_{pav} \quad g_{2p} = 1.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Aterro:} \quad h_{at} := 0.20\text{m} \quad \gamma_{at} := 19 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad g_{3p} := h_{at} \cdot \gamma_{at} \quad g_{3p} = 3.80 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$g_p := g_{1p} + g_{2p} + g_{3p} \quad g_p = 11.73 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M := k \cdot g_p \cdot L_{xp}^2$$

Com os coeficientes "k" obtidos da tabela 1 de Rüsçh, obtemos:

$$M_{xmp} := 0.125 \cdot g_p \cdot L_{xp}^2 \quad M_{xmp} = 20.07 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ymp} := 0.0208 \cdot g_p \cdot L_{xp}^2 \quad M_{ymp} = 3.34 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

## b) Cargas Móveis

Trem-tipo Classe 450

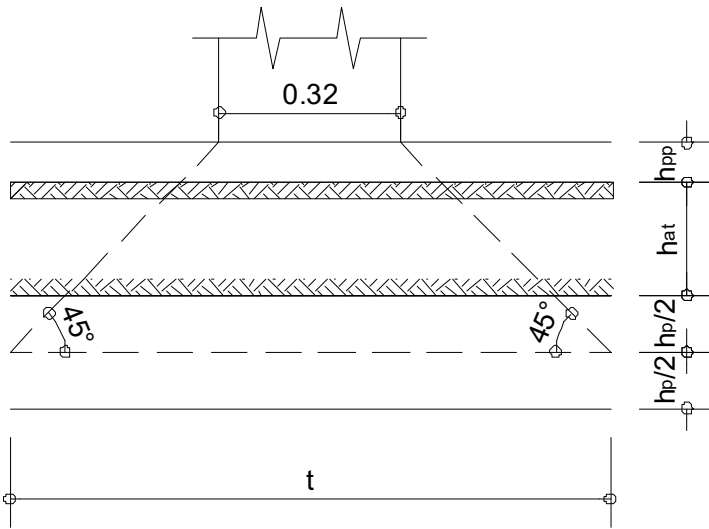
$$\text{Coeficiente de impacto vertical:} \quad \Phi_1 := 1.35$$

$$P \cdot \Phi_1 = 101.25 \cdot \text{kN}$$

$$p \cdot \Phi_1 = 6.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



Projeção da roda no eixo da laje:



Parâmetros de entrada na tabela 1A de Rüschi:

Projeção da roda no pavimento:

$$t_{L0} := 0.20 \cdot m$$

$$t_{T0} := 0.50 \cdot m$$

Projeção média no pavimento:

$$t_0 := (t_{L0} \cdot t_{T0})^{0.5}$$

$$t_0 = 0.32 \cdot m$$

Projeção da roda no eixo médio da laje (propagação a 45°):

$$t := t_0 + 2 \cdot h_{pp} + 2 \cdot h_{at} + h_p \quad t = 1.11 \cdot m$$

Parâmetros de entrada:

$$\frac{t}{a} = 0.37$$

$$\frac{L_{xp}}{a} = 1.23$$

Momentos fletores devidos à carga móvel:

$$M_{xmq} := 0.387 \cdot \Phi_1 \cdot P + 0.850 \cdot \Phi_1 \cdot p \cdot m^2$$

$$M_{xmq} = 44.92 \cdot kN \cdot \frac{m}{m}$$

$$M_{ymq} := 0.18 \cdot \Phi_1 \cdot P + 0.160 \cdot \Phi_1 \cdot p \cdot m^2$$

$$M_{ymq} = 19.30 \cdot kN \cdot \frac{m}{m}$$

Dimensionamento à flexão:

$$c := 3.5 \text{ cm}$$

$$d := h_p - c - 1 \text{ cm}$$

$$d = 0.205 \text{ m}$$

- $M_{xm}$

$$M_{xmd} := 1.35 \cdot M_{xmp} + 1.5 \cdot M_{xm q}$$

$$M_{xmd} = 94.48 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$K_{md} := \frac{M_{xmd}}{1 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad K_{md} = 0.105$$

$$k_z := 0.94$$

$$A_{s1} := \frac{M_{xmd} \cdot m}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad A_{s1} = 11.28 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{s1a} := 16.00 \text{ cm}^2$$

- $M_{ym}$

$$M_{ymd} := 1.35 \cdot M_{ymp} + 1.5 \cdot M_{ym q}$$

$$M_{ymd} = 33.47 \cdot \text{kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$K_{md} := \frac{M_{ymd}}{1 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad K_{md} = 0.037$$

$$k_z := 0.97$$

$$A_{s2} := \frac{M_{ymd} \cdot m}{k_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad A_{s2} = 3.87 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{s2a} := 8.33 \text{ cm}^2$$



Verificação da fadiga na armadura

Variações de tensões devidas à carga móvel:  
(combinação frequente)

$$\sigma_{xm\dot{q}} := \frac{0.8M_{xm\dot{q}} \cdot m}{0.87 \cdot d \cdot A_{s1a}}$$

$$\sigma_{ym\dot{q}} := \frac{0.8M_{ym\dot{q}} \cdot m}{0.87 \cdot d \cdot A_{s2a}}$$

$$\sigma_{xm\dot{q}} = 126 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{ym\dot{q}} = 103.95 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta f_{sm\dot{a}x} := \max(\sigma_{xm\dot{q}}, \sigma_{ym\dot{q}})$$

$$\Delta f_{sm\dot{a}x} = 126 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta f_{sdfad} := 190 \cdot \text{MPa} \quad (\text{para } 2 \times 10^6 \text{ ciclos})$$

$$fadiga := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } \Delta f_{sm\dot{a}x} \leq \Delta f_{sdfad} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad fadiga = \text{"atende"}$$

Verificação da fissuração

$$w_{km\dot{a}x} := 0.2 \cdot \text{mm}$$

- $M_{xm}$

$$\phi := 12.5 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{sv} := \sigma_{xm\dot{q}}$$

$$\rho_r := \frac{A_{s1a}}{\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi\right) \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_r = 0.01185$$

$$w_{k1} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot 3 \cdot \frac{\sigma_s}{f_{ctm}}$$

$$w_{k1} = 0.03 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k2} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{4}{\rho_r} + 45\right)$$

$$w_{k2} = 0.10 \cdot \text{mm}$$

$$w_k := \min(w_{k1}, w_{k2})$$

$$w_k = 0.03 \cdot \text{mm}$$

$$fissuração := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } w_k \leq w_{km\dot{a}x} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad fissuração = \text{"atende"}$$



- $M_{ym}$

$$\phi := 10 \cdot \text{mm}$$

$$\sigma_{sv} := \sigma_{ymq}$$

$$\rho_r := \frac{A_{s2a}}{\left(c + \frac{\phi}{2} + 7.5 \cdot \phi\right) \cdot 1 \cdot \text{m}}$$

$$\rho_r = 0.00724$$

$$w_{k1} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot 3 \cdot \frac{\sigma_s}{f_{ctm}}$$

$$w_{k1} = 0.02 \cdot \text{mm}$$

$$w_{k2} := \frac{\phi}{12.5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{4}{\rho_r} + 45\right)$$

$$w_{k2} = 0.11 \cdot \text{mm}$$

$$w_k := \min(w_{k1}, w_{k2})$$

$$w_k = 0.02 \cdot \text{mm}$$

$$\text{fissuração} := \begin{cases} \text{"atende"} & \text{if } w_k \leq w_{k\text{máx}} \\ \text{"não atende"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{fissuração} = \text{"atende"}$$



## 3.8 Dimensionamento dos aparelhos de apoio

## Encontros E1 e E2

$$n_{\text{ap}} := 5$$

número de aparelhos por linha de apoio:

$$n_{\text{apar}} := 5$$

$$n := 6$$

(número de camadas de neoprene)

deslocamento devido às ações de longa duração:

$$\delta_{H1} := \left| \delta_{t_{\text{ap}}} + \delta_{r_{\text{ap}}} + \delta_{p_{\text{ap}}} \right| \quad \delta_{H1} = 0.011 \text{ m}$$

dimensões do aparelho em planta:

$$a_n := a_{n1} \quad b_n := b_{n1}$$

$$a_n = 0.25 \text{ m} \quad b_n = 0.30 \text{ m}$$

$$N_q := \max(R_{E_{qt2}}, R_{E_{qt\_eixo3}}, R_{E_{qp2}})$$

$$N_q = 337.15 \cdot \text{kN}$$

$$N_g := R_{E_{g2}}$$

$$N_g = 280.59 \cdot \text{kN}$$

espessura de cada camada de neoprene:

$$h_c := 0.008 \text{ m}$$

espessura total de borracha:

$$h_n := n \cdot h_c \quad h_n = 0.048 \text{ m}$$

módulo de deformação transversal do neoprene

$$G_n = 0.90 \cdot \text{MPa}$$

área do aparelho de apoio:

$$A_n := a_n \cdot b_n$$

$$A_n = 0.0750 \cdot \text{m}^2$$

esforço horizontal devido às ações de longa duração:

$$H_1 := \left| \delta_{H1} \cdot \frac{G_n \cdot A_n}{h_n} \right| \quad H_1 = 16.12 \cdot \text{kN}$$

esforço horizontal devido à carga de curta duração:

$$H_2 := \frac{F_{f1}}{n_{\text{apar}}} \quad H_2 = 3.87 \cdot \text{kN}$$

rotação devido à carga móvel:

$$\theta_q := 0.00187 \text{ rad}$$

rotação devido às cargas permanentes:

$$\text{protensão:} \quad F_p := -2800 \text{ kN} \quad e_p := 0.43 \text{ m} \quad q_p := \frac{8 \cdot F_p \cdot e_p}{L_v^2} \quad q_p = -25.86 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\theta_p := \frac{q_p \cdot L_v^3}{24 \cdot E_{cs} \cdot I_v} \quad \theta_p = -0.00559 \quad \theta_g := \theta_{g1} + \theta_{g2e} + \theta_{g31} + \theta_p \quad \theta_g = -0.00114$$



**Limite de deformação por compressão (afundamento)**

$$A_{n'} := (a_n - \delta_{H1}) \cdot b_n \quad A_{n'} = 0.0716 \cdot m^2$$

$$N := N_g + N_q \quad N = 617.74 \cdot kN$$

$$\sigma'_m := \frac{N}{A_{n'}} \quad \sigma'_m = 8.63 \cdot MPa$$

$$B := \frac{a_n \cdot b_n}{2 \cdot h_c \cdot (a_n + b_n)} \quad B = 8.52 \quad (\text{fator de forma})$$

$$\Delta h := n \cdot \frac{\sigma'_m \cdot h_c}{4 \cdot G_n \cdot B^2 + 3 \cdot \sigma'_m} \quad \Delta h = 0.001 \text{ m} \quad \frac{\Delta h}{h_n} = 0.030$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \frac{\Delta h}{h_n} < 0.15 \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

**Limite de deformação por cisalhamento**

deslocamento horizontal provocado por ações acidentais de curta duração:

$$\delta_{H2} := \frac{H_2}{2 \cdot G_n \cdot A_n} \cdot h_n$$

deslocamento total:

$$\delta_H := \delta_{H1} + \delta_{H2}$$

$$\delta_H = 0.013 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_H}{h_n} = 0.27$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \frac{\delta_H}{h_n} < 0.7 \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

**Limite de tensão por cisalhamento**

$$\tau_N := \frac{1.5 \cdot (N_g + 1.5 \cdot N_q)}{B \cdot a_n \cdot b_n} \quad \tau_N = 1.85 \cdot MPa$$

$$\tau_H := \frac{H_1 + 0.5 \cdot H_2}{a_n \cdot b_n} \quad \tau_H = 0.24 \cdot MPa$$

$$\tau_\theta := \frac{G_n \cdot a_n^2}{2 \cdot h_c \cdot h_n} \cdot (\tan(\theta_g) + 1.5 \cdot \tan(\theta_q)) \quad \tau_\theta = 0.12 \cdot MPa$$

$$\tau := \tau_N + \tau_H + \tau_\theta$$

$$\tau = 2.21 \cdot MPa$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \tau_N + \tau_H + \tau_\theta < 5 \cdot G_n \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$



**Segurança contra o deslizamento**

a) Sem carga móvel

$$\mu_1 := 0.1 + \frac{0.6\text{MPa}}{\left(\frac{N_g}{A_n}\right)} \quad \mu_1 = 0.26038$$

$$F_{a1} := \mu_1 \cdot N_g$$

$$F_{a1} = 73.06 \cdot \text{kN}$$

$$H_1 = 16.12 \cdot \text{kN}$$

"atende" if  $H_1 < F_{a1}$  = "atende"  
 "não atende" otherwise



b) Com carga móvel

$$\mu_2 := 0.1 + \frac{0.6\text{MPa}}{\frac{(N_g + N_q)}{A_n}} \quad \mu_2 = 0.17$$

$$F_{a2} := \mu_2 \cdot (N_g + N_q)$$

$$F_{a2} = 106.77 \cdot \text{kN}$$

$$H_2 = 3.87 \cdot \text{kN}$$

"atende" if  $H_2 < F_{a2}$  = "atende"  
 "não atende" otherwise

**Apoio P1 a P4** (mais desfavorável P4)

$$n_{\text{apar}} := 5$$

número de aparelhos por linha de apoio:

$$n_{\text{apar}} := 10$$

$n := 5$  (número de camadas de neoprene)

deslocamento devido às ações de longa duração:

$$\delta_{H1} := \left| \delta_{t_{\text{ap}}} + \delta_{r_{\text{ap}}} + \delta_{p_{\text{ap}}} \right| \quad \delta_{H1} = 0.011 \text{ m}$$

dimensões do aparelho em planta:

$$\begin{aligned} a_n &:= a_{n2} & b_n &:= b_{n2} \\ a_n &= 0.25 \text{ m} & b_n &= 0.30 \text{ m} \end{aligned}$$

$$N_q := \max(R_{v1\_qt2}, R_{v1\_qt\_eixo3}, R_{v1\_qp2})$$

$$N_q = 337.15 \cdot \text{kN}$$

$$N_g := R_{v1\_g2}$$

$$N_g = 280.59 \cdot \text{kN}$$

espessura de cada camada de neoprene:

$$h_n := 0.008 \text{ m}$$

espessura total de borracha:

$$h_n := n \cdot h_c \quad h_n = 0.040 \text{ m}$$

módulo de deformação transversal do neoprene

$$G_n = 0.90 \cdot \text{MPa}$$

área do aparelho de apoio:

$$A_n := a_n \cdot b_n$$

$$A_n = 0.0750 \cdot \text{m}^2$$

esforço horizontal devido às ações de longa duração:

$$H_1 := \left| \delta_{H1} \cdot \frac{G_n \cdot A_n}{h_n} \right| \quad H_1 = 19.35 \cdot \text{kN}$$

esforço horizontal devido à carga de curta duração:

$$H_2 := \frac{F_{f_{\text{ap}}}}{2n_{\text{apar}}} \quad H_2 = 1.52 \cdot \text{kN}$$

rotação devido à carga móvel:

$$\theta_{mq} := 0.00187$$

rotação devido às cargas permanentes:

$$\text{protensão: } F_{mp} := -2800 \text{ kN} \quad e_{mp} := 0.43 \text{ m} \quad q_p := \frac{8 \cdot F_p \cdot e_p}{L_v^2} \quad q_p = -25.86 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\theta_{mp} := \frac{q_p \cdot L_v^3}{24 \cdot E_{cs} \cdot I_v} \quad \theta_p = -0.00559 \quad \theta_g := \theta_{g1} + \theta_{g2e} + \theta_{g3_1} + \theta_p \quad \theta_g = -0.00114$$



**Limite de deformação por compressão (afundamento)**

$$A_n := (a_n - \delta_{H1}) \cdot b_n \quad A_n = 0.0716 \cdot m^2$$

$$N := N_g + N_q \quad N = 617.74 \cdot kN$$

$$\sigma'_m := \frac{N}{A_n} \quad \sigma'_m = 8.63 \cdot MPa$$

$$B := \frac{a_n \cdot b_n}{2 \cdot h_c \cdot (a_n + b_n)} \quad B = 8.52 \quad (\text{fator de forma})$$

$$\Delta h := n \cdot \frac{\sigma'_m \cdot h_c}{4 \cdot G_n \cdot B^2 + 3 \cdot \sigma'_m} \quad \Delta h = 0.00120 \text{ m} \quad \frac{\Delta h}{h_n} = 0.030$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \frac{\Delta h}{h_n} < 0.15 \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

**Limite de deformação por cisalhamento**

deslocamento horizontal provocado por ações acidentais de curta duração:

$$\delta_{H2} := \frac{H_2}{2 \cdot G_n \cdot A_n} \cdot h_n$$

$$\delta_H := \delta_{H1} + \delta_{H2} \quad \delta_H = 0.012 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_H}{h_n} = 0.30$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \frac{\delta_H}{h_n} < 0.7 \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$

**Limite de tensão por cisalhamento**

$$\tau_N := \frac{1.5 \cdot (N_g + 1.5 \cdot N_q)}{B \cdot a_n \cdot b_n} \quad \tau_N = 1.85 \cdot MPa$$

$$\tau_H := \frac{H_1 + 0.5 \cdot H_2}{a_n \cdot b_n} \quad \tau_H = 0.27 \cdot MPa$$

$$\tau_\theta := \frac{G_n \cdot a_n^2}{2 \cdot h_c \cdot h_n} \cdot (\tan(\theta_g) + 1.5 \cdot \tan(\theta_q)) \quad \tau_\theta = 0.15 \cdot MPa$$

$$\tau := \tau_N + \tau_H + \tau_\theta \quad \tau = 2.26 \cdot MPa \quad \left| \begin{array}{l} \text{"atende"} \quad \text{if } \tau_N + \tau_H + \tau_\theta < 5 \cdot G_n \quad = \text{"atende"} \\ \text{"não atende"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$$



**Segurança contra o deslizamento**

a) Sem carga móvel

$$\mu_1 := 0.1 + \frac{0.6 \text{MPa}}{\left(\frac{N_g}{A_n}\right)} \quad \mu_1 = 0.26038$$

$$F_{a1} := \mu_1 \cdot N_g \quad F_{a1} = 73.06 \cdot \text{kN} \quad H_1 = 19.35 \cdot \text{kN}$$

"atende" if  $H_1 < F_{a1}$  = "atende"  
 "não atende" otherwise

b) Com carga móvel

$$\mu_2 := 0.1 + \frac{0.6 \text{MPa}}{\left(\frac{N_g + N_q}{A_n}\right)} \quad \mu_2 = 0.17$$

$$F_{a2} := \mu_2 \cdot (N_g + N_q) \quad F_{a2} = 106.77 \cdot \text{kN} \quad H_2 = 1.52 \cdot \text{kN}$$

"atende" if  $H_2 < F_{a2}$  = "atende"  
 "não atende" otherwise

