

ProUni

O ProUni é um software desenvolvido pelos Engs. Augusto Carlos Vasconcelos e Alio Kimura destinado à verificação de peças pré-moldadas protendidas, isto é, elementos pré-fabricados em pistas sob o sistema de pré-tração com aderência inicial.

Alguns exemplos de peças que podem ser verificadas no ProUni são: lajes alveolares, terças de coberturas, vigotas de lajes pré-moldadas, calhas etc.

O ProUni calcula esforços, flechas e tensões para diversas etapas construtivas, que podem ser definidas arbitrariamente pelo usuário. Admite seção composta (pré-moldada + moldada no local) com diferentes resistências e considera perdas progressivas de forma automática (retração, fluência e relaxação).

O uso do ProUni requer experiência no cálculo de peças pré-moldadas protendidas uma vez que nenhum tipo de dimensionamento ou verificação é realizada de forma automática. Porém, ele possui uma interface bastante amigável, o que permite a definição de dados e a avaliação de resultados de forma bastante eficiente.

O ProUni é um software comercializado desde 2000. Em sua versão mais recente (3.0), foram introduzidas diversas melhorias (template para criação de arquivos novos, ajuste automático de carga referente ao peso-próprio, definição de coeficiente para melhor análise em ELS etc.).

Exemplo de Aplicação

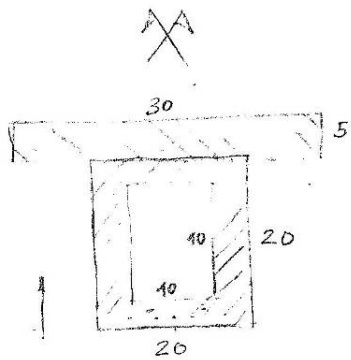
Junto com a instalação do ProUni, é copiado um arquivo que serve como exemplo de aplicação do software. Esse arquivo se chama EXUNI.UNI. Ao carregá-lo no ProUni, basta executar o processamento para visualizar os resultados.

Esse exemplo consiste num elemento pré-moldado hipotético com seção transversal vazada e capa moldada no local. A resolução manual desse exemplo se encontra a seguir:

- a) Definição dos dados do problema
 - b) Cálculo dos dados geométricos
 - c) Cálculo dos cabos resultante
 - d) Cálculo da seção ideal.
 - e) Cálculo dos esforços solicitantes
 - f) Cálculo das tensões
 - g) Cálculo dos deslocamentos
 - h) Verificação do ELU à flexão
- } a cada etapa de carregamento

Teste de Validação 01

a)



$L = 7m$

$E_c \left\{ \begin{array}{l} f_{ck,PRE} = 30 MPa \\ f_{ck,LOC} = 20 MPa \\ f_{cs,PRE} = 25 MPa \end{array} \right\} \gamma_c = 1,4$

CA50 ; $\delta_s = 1,15$

$E_s = 210.000 MPa$

CP190RN

$E_p = 200.000 MPa$

$A_s = 3 \phi 1/2'' ; y_s = 2,0 cm$

$A_{p1} = 4 \phi 5 mm ; y_{p1} = 2,5 cm$

$A_{p2} = 2 \phi 5 mm ; y_{p2} = 17,5 cm$

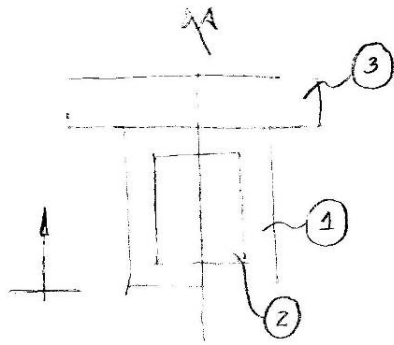
$\sigma_{pi} = 1400 MPa$ / cabo resultante

$q = 2,00 kN/m$

$\phi = 2,0$

- I) Protensão
- II) PP. PRÉ
- III) PP. LOC (4 ancoramentos à L/2)
- IV) Perdas progressivas
- V) Sobrecarga variável

b)



$$A_1 = 400 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 400 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 450 \text{ cm}^2$$

$$Y_{CG1} = 10 \text{ cm}$$

$$Y_{CG2} = 10 \text{ cm}$$

$$Y_{CG3} = 22,5 \text{ cm}$$

$$I_1 = 13.333,33 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = 833,33 \text{ cm}^4$$

$$I_3 = 312,5 \text{ cm}^4$$

Peça Pré

$$Y_{CG} = \frac{400 \times 10 - 400 \times 10}{400 - 400} = \frac{3000}{300} = 10 \text{ cm} \Rightarrow Y_{CG_{PRE}} = 10 \text{ cm}$$

$$A_{PRE} = 300 \text{ cm}^2$$

$$I = 13.333,33 - 833,33 = 12.500 \text{ cm}^4 \Rightarrow I_{PRE} = 12.500$$

Peça Local

$$Y_{CG_{LOC}} = 22,5 \text{ cm}$$

$$A_{LOC} = 150 \text{ cm}^2$$

$$I_{LOC} = 312,5 \text{ cm}^4$$

c) Subo Resultante 1

$$A_{p1} = 0,785 \text{ cm}^2$$

$$y_{p1} = 2,5 \text{ cm}$$

$$\sigma_{pi} = 1400 \text{ MPa} \Rightarrow F_{pi1} = 0,11 \text{ MN} \\ 110 \text{ kN}$$

Subo Resultante 2

$$A_{p2} = 0,393 \text{ cm}^2$$

$$y_{p2} = 17,5 \text{ cm}$$

$$F_{pi2} = 0,055 \text{ MN}$$

$$55 \text{ kN}$$

$$vd) \cdot E_s = 210.000 \text{ MPa}$$

(2)

$$E_p = 200.000 \text{ MPa}$$

$$E_c = \begin{cases} E_{cPRE} = 4760 \sqrt{30} = 26.071,6 \text{ MPa} \\ E_{cj} = 23800 \text{ MPa} \\ E_{cLOC} = 21.287,4 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{pPRE} &= \frac{E_p}{E_{cPRE}} = 7,67 \\ \alpha_{pj} &= \frac{E_p}{E_{cj}} = 8,40 \\ \alpha_{pLOC} &= \frac{E_p}{E_{cLOC}} = 9,40 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \alpha_{sPRE} &= 8,05 \\ \alpha_{sj} &= 8,82 \\ \alpha_{sLOC} &= 9,86 \end{aligned}$$

Seção homogeneizada 1 } PRE (fcj) + Ap + As

$$YCG = (10 \times 300 + 0,785 \times 2,5 \times 7,4 + 0,393 \times 17,5 \times 7,4 + 3,68 \times 2 \times 7,82) / (300 + 0,785 \times 7,4 + 0,393 \times 7,4 + 3,68 \times 7,82)$$

$$YCG = 9,25 \text{ cm}$$

$$A = 337,51 \text{ cm}^2$$

$$I = 12.500 + (10 - 9,25)^2 \times 300 + (9,25 - 2,5)^2 \times 0,785 \times (8,4 - 1) + (9,25 - 17,5)^2 \times 0,393 \times (8,4 - 1) + (9,25 - 2)^2 \times 3,68 \times (8,82 - 1)$$

$$I = 14.644,87 \text{ cm}^4$$

Seção homogeneizada 2

$$YCG = \frac{(10 \cdot 300 + 0,785 \cdot 2,5 \cdot 6,67 + 0,393 \cdot 17,5 \cdot 6,67 + 3,68 \cdot 2 \cdot 7,05)}{(300 + 0,785 \cdot 6,67 + 0,393 \cdot 6,67 + 3,68 \cdot 7,05)}$$

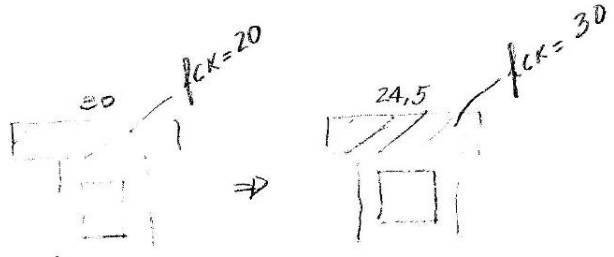
$$YCG = 9,32 \text{ cm}$$

$$A = 333,82 \text{ cm}^2$$

$$I = 12.500 + (10 - 9,32)^2 \cdot 300 + (2,5 - 9,32)^2 \cdot 0,785 \cdot 6,67 + (17,5 - 9,32)^2 \cdot 0,393 \cdot 6,67 + (2 - 9,32)^2 \cdot 3,68 \cdot 7,05 =$$

$$I = 14.448,81 \text{ cm}^4$$

Seção homogeneizada 3



$$YCG = \frac{9,32 \cdot 333,82 + 22,5 \cdot 24,5 \cdot 5}{333,82 + (24,5 \cdot 5)} = 12,86 \text{ cm}$$

$$YCG = 12,86 \text{ cm}$$

$$A = 456,3 \text{ cm}^2$$

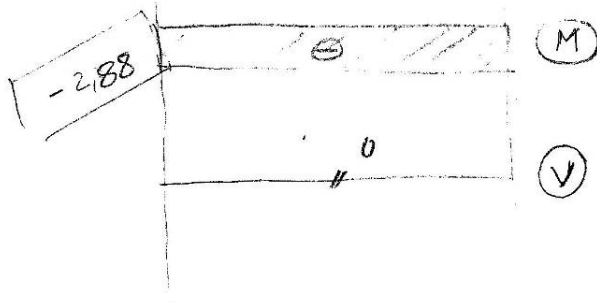
$$I = 14.448,81 + (12,86 - 9,32)^2 \cdot 333,82 + \frac{24,5 \cdot 5^3}{12} + (22,5 - 12,86)^2 \cdot 24,5 \cdot 5$$

$$I = 30.270,94 \text{ cm}^4$$

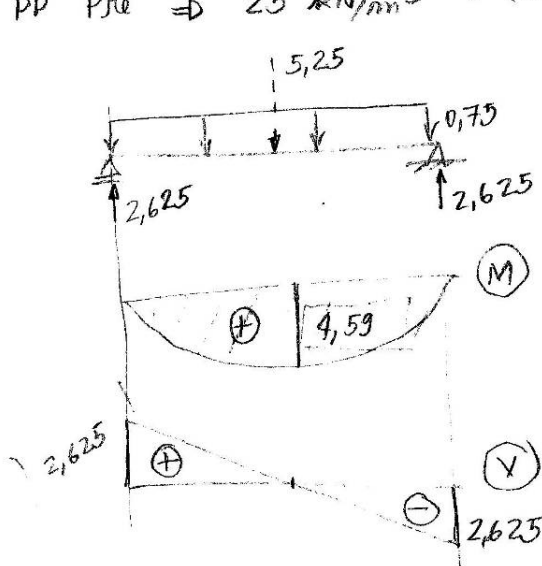
f) ⇒ Protenção

$$M = 110 \times (9,25 - 2,5) \times 10^{-2} - 55 \times (17,5 - 9,25) \times 10^{-2} = 2,88 \text{ kN.m}$$

$$\left(\begin{array}{c} 2,88 \\ \leftarrow \end{array} \right) M \quad M = -2,88 \text{ (3)}$$

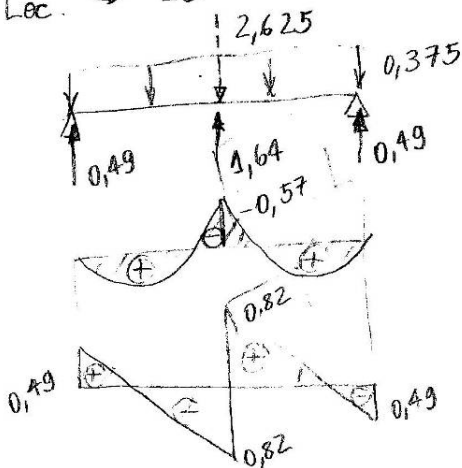


⇒ PP Pré ⇒ $25 \text{ kN/m} \times (300 \times 10^{-4}) = 0,75 \text{ kN/m}$

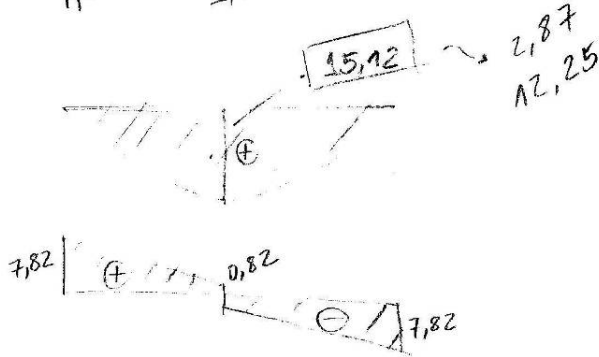
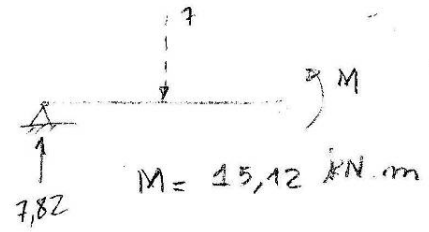
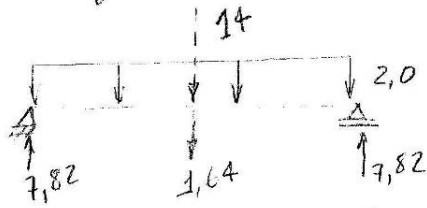


$$M = 2,625 \times 3,5 - 2,625 \times 1,7 = 4,59 \text{ kN.m}$$

⇒ PP Loc ⇒ $25 \times (150 \times 10^{-4}) = 0,375 \text{ kN/m}$



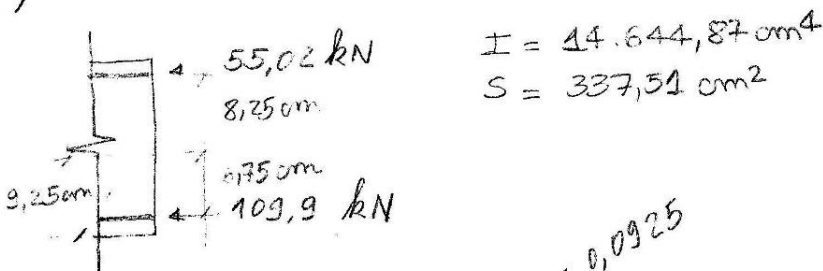
⇒ Sobrecarga variável



Progressão dos esforços a $\frac{L}{2}$

| | | | |
|-----------|---------|---|--------|
| Protensão | - 2,88 | → | - 2,88 |
| + G0 | + 4,59 | → | 1,71 |
| + G2 | - 0,57 | → | 1,14 |
| + Q | + 15,12 | → | 16,26 |

f) - Devido somente a protensão



$$I = 14.644,87 \text{ cm}^4$$

$$S = 337,51 \text{ cm}^2$$

$$J_{PREL} = \frac{-0,1099}{0,033751} - \frac{0,1099 \times 0,0675}{14.644,87 \times 10^{-8}} + \frac{0,05502}{0,033751} + \frac{0,05502 \times 0,0825}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0925$$

$$J_{PREL} = -6,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PRES} = \frac{-0,1099}{0,033751} + \frac{0,1099 \times 0,0675}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,1075 - \frac{0,05502}{0,033751}$$

(4)

$$- \frac{0,05502 \times 0,825}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,1075$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{Loc i} = 0 \\ \sigma_{Loc s} = 0 \end{array} \right.$$

$$\sigma_{PRES} = -2,77$$

$$\sigma_{CAB i} = 1400 + \left\{ - \frac{0,1099}{0,033751} - \frac{0,1099 \times 0,0625}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0675 - \frac{0,05502}{0,033751} + \frac{0,05502 \times 0,0825}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0675 \right\} \times 8,4$$

$$\sigma_{CAB i} = 1400 - 6,21^{8,4} = 1347,84$$

$$\left\{ \sigma_{CAB i} = 1347,84 \text{ MPa} \right.$$

$$\sigma_{CAB s} = 1400 + \left\{ \frac{0,1099}{0,033751} + \frac{0,1099 \times 0,0675}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0825 - \frac{0,05502}{0,033751} - \frac{0,05502 \times 0,0825}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0825 \right\} \times 8,4$$

$$\sigma_{CAB s} = 1400 - 3,26^{8,4} = 1372,62$$

$$\left\{ \sigma_{CAB s} = 1372,62 \text{ MPa} \right.$$

- Devido ao PV da seção pré-moldada ($x = L/2 = 3,5$)

$$\sigma_{PRE i} = \frac{4,59 \times 10^{-3}}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0925 = 2,89$$

$$\left\{ \sigma_{PRE i} = 2,89 \text{ MPa} \right.$$

$$\sigma_{PRES} = \frac{4,59 \times 10^{-3}}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times -0,1075 = -3,37$$

$$\left\{ \sigma_{PRES} = -3,37 \text{ MPa} \right.$$

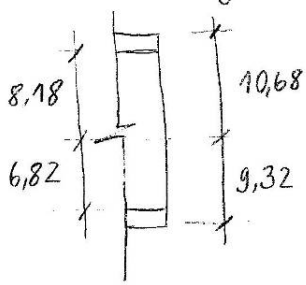
$$\sigma_{CAB i} = \frac{4,59 \times 10^{-3}}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times 0,0675 \times 8,4 = 17,8$$

$$\left\{ \sigma_{CAB i} = 17,8 \text{ MPa} \right.$$

$$\sigma_{CAB s} = \frac{4,59 \times 10^{-3}}{14.644,87 \times 10^{-8}} \times -0,0825 \times 8,4 = -21,72$$

$$\left\{ \sigma_{CAB s} = -21,72 \text{ MPa} \right.$$

- Concretagem local



$$I = 14.448,81 \text{ cm}^4$$

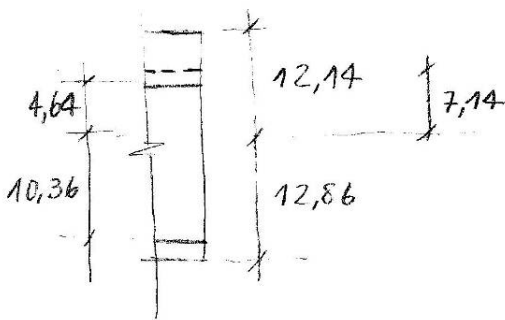
$$\sigma_{PREi} = \frac{-0,57 \times 10^{-3}}{14.448,81 \times 10^{-8}} \times 0,0932 \Rightarrow \sigma_{PREi} = -0,37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PRES} = \frac{-0,57 \times 10^{-3}}{14.448,81 \times 10^{-8}} \times -0,1068 \Rightarrow \sigma_{PRES} = 0,42 \text{ MPa}$$

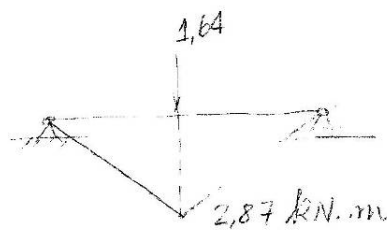
$$\sigma_{CABi} = \frac{-0,57 \times 10^{-3}}{14.448,81 \times 10^{-8}} \times 0,0682 \times 7,67 \Rightarrow \sigma_{CABi} = -2,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CABS} = \frac{-0,57 \times 10^{-3}}{14.448,81 \times 10^{-8}} \times -0,0818 \times 7,67 \Rightarrow \sigma_{CABS} = 2,48 \text{ MPa}$$

- Retirada do sacramento



$$I = 30.270,94 \text{ cm}^4$$



$$\sigma_{PREi} = \frac{2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,1286 = 1,22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PREi} = 1,22 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PRES} = \frac{-2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,0714 = -0,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PRES} = -0,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CABi} = \frac{+2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,1036 \times 7,67 = 7,53$$

$$\sigma_{CABi} = 7,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CABS} = \frac{2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times -0,0444 \times 7,67 = -3,37$$

$$\sigma_{CABS} = -3,37 \text{ MPa}$$

Retirada de
sacramento

$$\sigma_{Loc_i} = \frac{-2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-6}} \times 0,0714 \times 0,82 = -0,55 \Rightarrow \boxed{\sigma_{Loc_i} = -0,55 \text{ MPa}} \text{ (5)}$$

$$\sigma_{Loc_s} = \frac{2,87 \times 10^{-3}}{30.270,94 \times 10^{-6}} \times -0,1214 \times 0,82 = -0,94 \Rightarrow \boxed{\sigma_{Loc_s} = -0,94 \text{ MPa}}$$

$$\alpha_c = \frac{4760 \sqrt{20}}{4760 \sqrt{30}} = 0,82$$

- Perdas Progressivas

. Cabo Inferior (Perda de Tensão)

$$\sigma_{p0} = 1347,8 \text{ MPa}$$

$$\alpha_p = \frac{200.000}{5600 \sqrt{25}} = 7,14$$

$$\psi = 2,0$$

$$\sigma_{c, \text{pog}} = -6,21 + 2,11 - 0,27 + 0,98 = -3,39 \text{ MPa} \quad (\text{COMPRESSÃO, } \oplus \text{ na fórmula})$$

$$\frac{\Delta \sigma_{p_i}}{\sigma_{p_0}} = \left\{ 18,1 + \frac{7,14}{47} \times 2^{1,57} \times (3 + 3,39) \right\} = 20,98 \%$$

$$\Delta \sigma_{p_{oi}} = 20,98 \times 10^{-2} \times 1347,8 = 282,8 \text{ MPa}$$

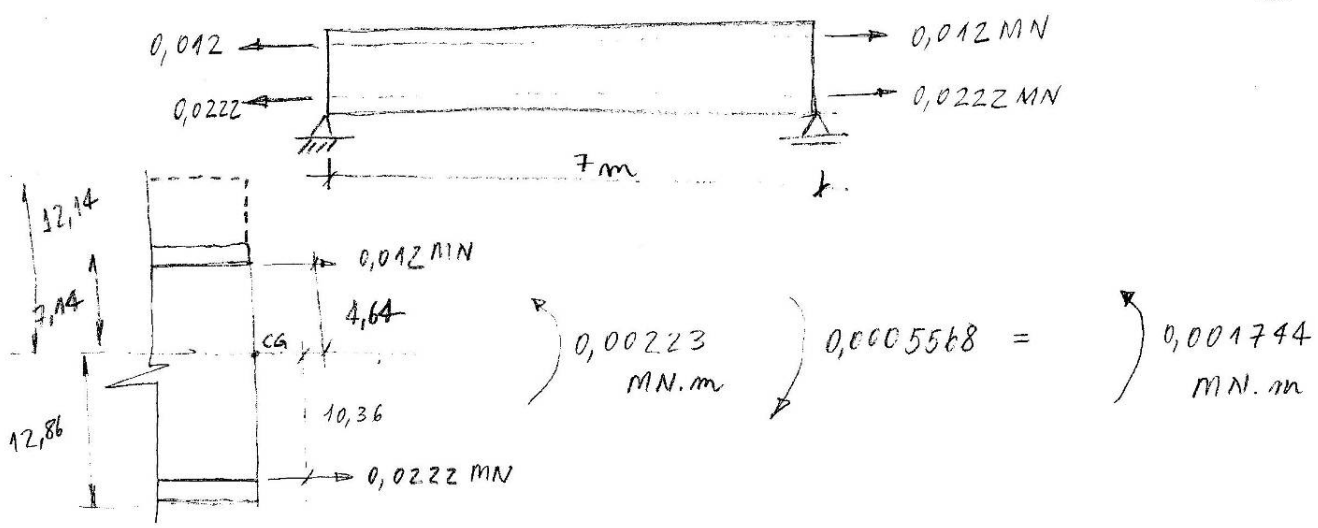
. Cabo Superior

$$\sigma_{p_0} = 1372,6 \text{ MPa} ; \alpha_p = 7,14 ; \psi = 2$$

$$\sigma_{c, \text{pog}} = -3,26 - 2,59 + 0,33 - 0,44 = -5,96$$

$$\frac{\Delta \sigma_{p_s}}{\sigma_{p_0}} = \left\{ 18,1 + \frac{7,14}{47} \times 2^{1,57} \times (3 + 5,96) \right\} = 22,14 \%$$

$$\Delta \sigma_{p_s} = 303,96 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{PRE_i} = \frac{0,0222}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,1286 = 1,49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{PRE_s} = \frac{0,0222 + 0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times (-0,0714) = 0,34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{LOC_i} = \left\{ \frac{0,0222 + 0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times (-0,0714) \right\} \times \frac{2187,4}{26071,6} = 0,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{LOC_s} = \left\{ \frac{0,0222 \times 0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times (-0,1214) \right\} \times \frac{2187,4}{26071,6} = 0,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CAB_i} = -282,8 + \left\{ \frac{0,0222 + 0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times (0,1036) \right\} \times \frac{200.000}{26071,6} = -272,5 \text{ MPa}$$

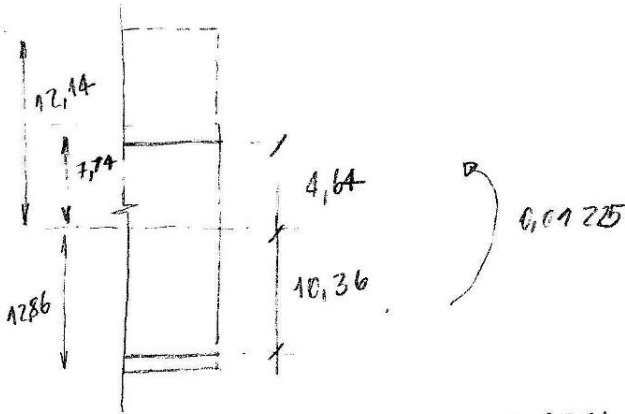
$$\sigma_{CAB_s} = -303,96 + \left\{ \frac{0,0222 + 0,012}{456,3 \times 10^{-4}} + \frac{0,001744}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times (-0,0464) \right\} \times \frac{200.000}{26071,6} = -300,27 \text{ MPa}$$

- Sobrecarga acidental ($q = 2 \text{ kN/m}$)

(5.2)

$$L M_{(L/2)} = 12,25 \text{ kN.m}$$

$$= 0,01225 \text{ MN.m}$$



$$\sigma_{PREi} = \frac{0,01225}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,1286 = \boxed{5,20 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{PRES} = 40,47 \times -0,0714 = \boxed{-2,9 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{LOCi} = 40,47 \times -0,0714 \times \frac{E_{CLOC}}{E_{CPRE}} = -2,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{LCCs} = 40,47 \times -0,1214 \times \frac{E_{CLOC}}{E_{CPRE}} = \boxed{-4,0 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{CABi} = 40,47 \times 0,1036 \times \frac{E_p}{E_{CPRE}} = \boxed{32,2 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{CABS} = 40,47 \times -0,0464 \times \frac{E_p}{E_{CPRE}} = \boxed{-14,4 \text{ MPa}}$$

Tensões (1/2) acumuladas

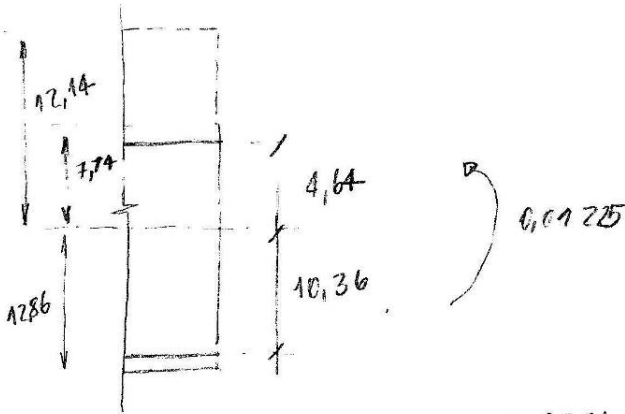
| | PREi | | PRES | | LOCi | | LCCs | | CABi | | CABS | |
|------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|---------|---------|---------|--------|
| Protensão | -6,71 | -6,7 | -2,77 | -2,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13478,4 | 13478 | 13726,2 | 13726 |
| G0 | 2,89 | -3,8 | -3,37 | -6,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1718 | 13656,6 | -21,72 | 1350,8 |
| G2 | -0,37 | -4,2 | 0,42 | -5,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2,06 | 1363,5 | 2,48 | 1353,3 |
| Atin. Esc. | 1,22 | -3,0 | -0,68 | -6,4 | -0,55 | -0,6 | -0,94 | -0,9 | 753 | 1371,0 | -3,37 | 1350,0 |
| Perdas | 1,49 | -1,5 | 0,34 | -6,1 | 0,28 | -0,3 | 0,04 | -0,9 | -272,5 | 1098,6 | -300,3 | 1049,7 |
| Q | 5,20 | 3,7 | -2,9 | -8,9 | -2,4 | -2,6 | -4,0 | -4,9 | 32,2 | 1130,7 | -14,4 | 1035,3 |

- Sobrecarga acidental ($q = 2 \text{ kN/m}$)

(5.2)

$$L M_{(L/2)} = 12,25 \text{ kN.m}$$

$$= 0,01225 \text{ MN.m}$$



$$\sigma_{PREi} = \frac{0,01225}{30.270,94 \times 10^{-8}} \times 0,1286 = \boxed{5,20 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{PRES} = 40,47 \times -0,0714 = \boxed{-2,9 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{LOCi} = 40,47 \times -0,0714 \times \frac{E_{CLOC}}{E_{CPRE}} = -2,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{LCCs} = 40,47 \times -0,1214 \times \frac{E_{CLOC}}{E_{CPRE}} = -4,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{CABi} = 40,47 \times 0,1036 \times \frac{E_p}{E_{CPRE}} = \boxed{32,2 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{CABS} = 40,47 \times -0,0464 \times \frac{E_p}{E_{CPRE}} = \boxed{-14,4 \text{ MPa}}$$

Tensões (1/2) acumuladas

| | PREi | | PRES | | LOCi | | LCCs | | CABi | | CABS | |
|------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|---------|---------|---------|--------|
| Protensão | -6,71 | -6,7 | -2,77 | -2,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13478,4 | 13478 | 13726,2 | 13726 |
| G0 | 2,89 | -3,8 | -3,37 | -6,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1718 | 13656,6 | -21,72 | 1350,8 |
| G2 | -0,37 | -4,2 | 0,42 | -5,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2,06 | 1363,5 | 2,48 | 1353,3 |
| Atin. Esc. | 1,22 | -3,0 | -0,68 | -6,4 | -0,55 | -0,6 | -0,94 | -0,9 | 753 | 1371,0 | -3,37 | 1350,0 |
| Perdas | 1,49 | -1,5 | 0,34 | -6,1 | 0,28 | -0,3 | 0,04 | -0,9 | -272,5 | 1098,6 | -300,3 | 1049,7 |
| Q | 5,20 | 3,7 | -2,9 | -8,9 | -2,4 | -2,6 | -4,0 | -4,9 | 32,2 | 1130,7 | -14,4 | 1035,3 |

- ELU ($\gamma_g = 1,3$; $\gamma_q = 1,4$) \overline{m} acumula o isostática (7)

$$M_{sd} = -\cancel{2,88 \times 1,3} + 4,59 \times 1,3 - 0,57 \times 1,3 + 2,87 \times 1,3 + 12,25 \times 1,4$$

(L/2)

$$(x=3,5m) \quad \boxed{M_{sd} = 26,11 \text{ kN.m}}$$

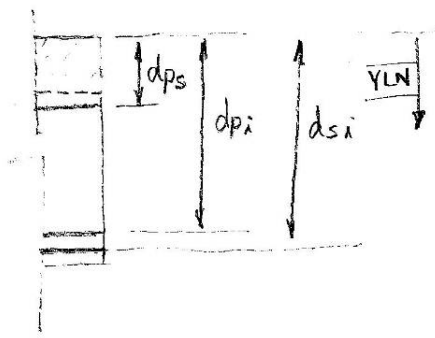
[MRU]

$$\sigma_{p_{i,c}} = 1400 - 272,5 = 1127,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p_{s,c}} = 1400 - 300,27 = 1099,73 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{p_{i,c}} = 1127,5 / 200.000 = 0,005638 = 5,64\%$$

$$\epsilon_{p_{s,c}} = 1099,73 / 200.000 = 0,005499 = 5,50\%$$



$$d_{pi} = 22,5 \text{ cm}$$

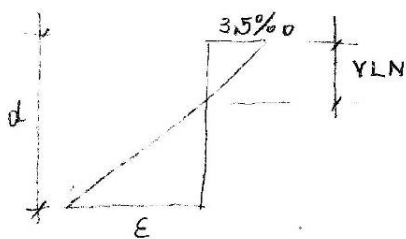
$$d_{ps} = 7,5 \text{ cm}$$

$$d_{si} = 23 \text{ cm}$$

$$\left. \begin{array}{l} y_2 = 5,96 \text{ cm} \\ y_3 = 14,45 \text{ cm} \end{array} \right\} y_2 < y_{LN} < y_3$$

Domínio III

$$Y_{LN \text{ EQUILIBRIO}} = 11,23 \text{ cm}$$



$$3,5\% \text{ --- } Y_{LN}$$

$$\epsilon \text{ --- } d - Y_{LN}$$

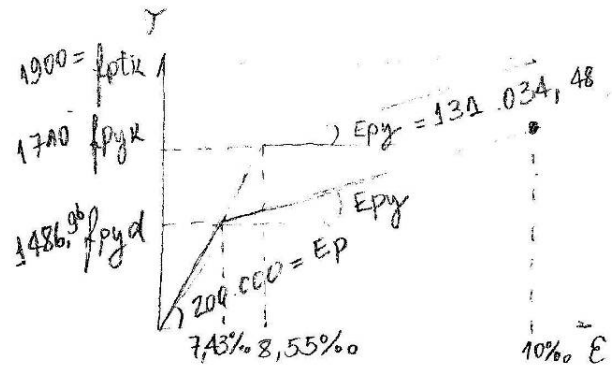
$$\epsilon = \frac{0,0035 \times (d - 11,23)}{11,23}$$

$$\Delta \epsilon_{pi} = 3,51\% \text{ (alongamento)}$$

$$\Delta \epsilon_{ps} = -1,16\% \text{ (encurtamento)}$$

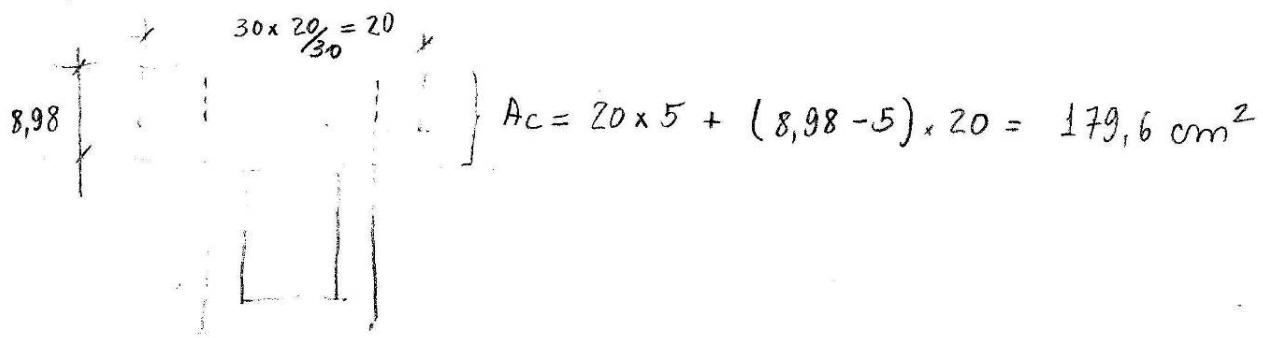
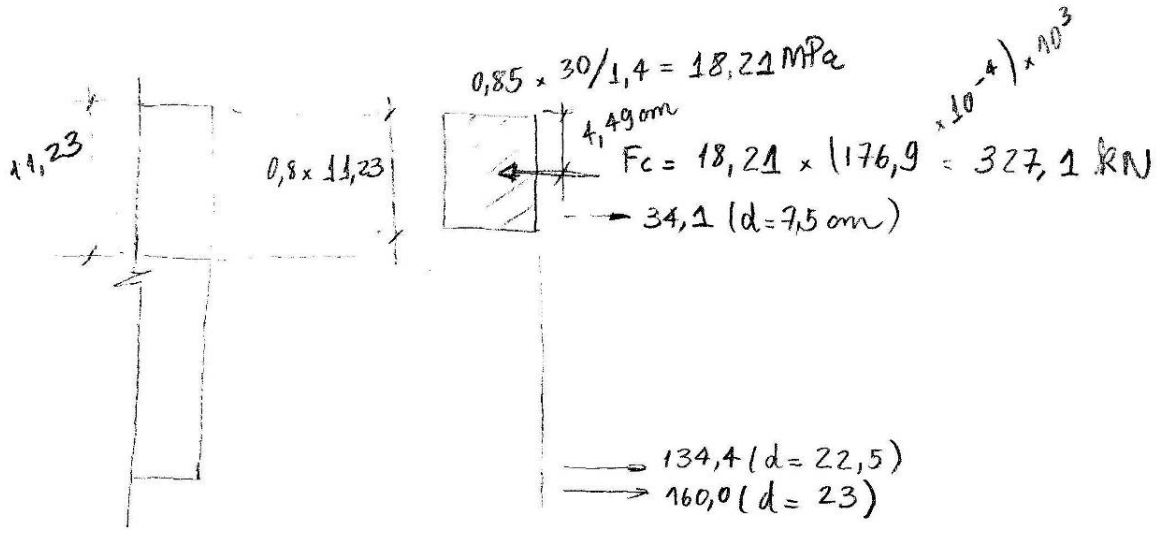
$$\epsilon_{si} = 3,67\% \text{ (alongamento)}$$

$$\left. \begin{array}{l} - + \epsilon_{pi} = 5,64\% = 9,15\% \\ - + \epsilon_{ps} = 5,5\% = 4,34\% \end{array} \right\} \text{deformação nos cabos}$$



$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\sigma}_{pi} &= 1712,34 \text{ MPa} \\ \sigma_{ps} &= 868,00 \text{ MPa} \\ \sigma_{si} &= 434,78 \text{ MPa} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_{pi} &= 134,4 \text{ kN (TRAÇÃO)} \\ F_{ps} &= 34,1 \text{ kN (")} \\ F_{si} &= 160,0 \text{ kN (")} \end{aligned} \right.$$



$$MRU = 327,1 \times (0,1123 - 0,0449) + 134,4 (0,225 - 0,1123) + 160,0 (0,23 - 0,1123) - 34,1 (0,1123 - 0,075)$$

$$MRU = 54,8 \text{ kN.m (54,33 kN.m)}$$

Pequena diferença