



**TÍTULO: DIMENSIONAMENTO DA ZONA D EM VIGA CALHA**

**AUTOR(ES): Buchaim, Roberto**

**ANO:2011**

**PALAVRAS-CHAVE: Viga calha protendida, dimensionamento Zonas D, treliça**

**e-Artigo: 050 – 2011**

## Dimensionamento da zona D em viga calha

### 1. Introdução

O texto a seguir mostra o dimensionamento das zonas D de uma viga calha, pré-moldada e protendida em pré-tração. Com algumas simplificações, chega-se à treliça que se forma nas paredes laterais da calha, por meio da qual é possível obter a armadura correspondente. Esta armadura não deve ser superposta com a de força cortante, valendo dentre as duas a que for preponderante.

### 2. Dados iniciais

A Figura 1 mostra a seção transversal da calha, bem como a seção equivalente para tratamento da flexão simples. O vão da viga é  $l = 18\text{ m}$ , e as cargas são  $g = 2,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ ,  $q = 1,2 \text{ kN/m}$ .

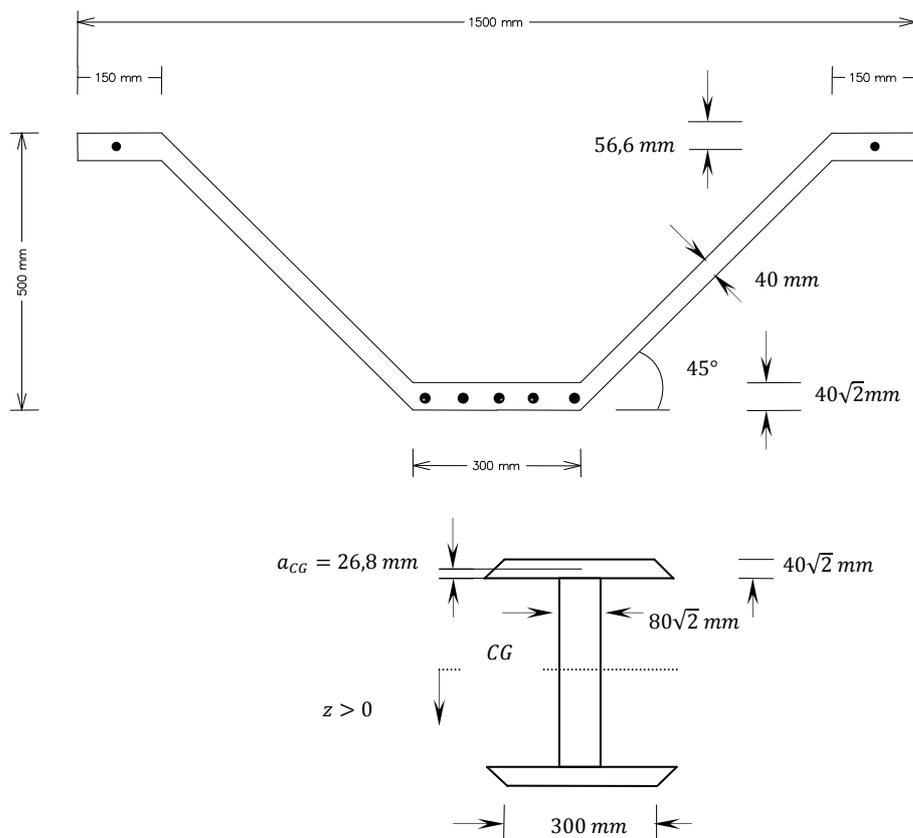


Figura 1: Seção transversal da calha, armadura e seção equivalente à original

Dados:

(1) Concreto:  $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ ,  $f_{ckj} \geq 27 \text{ MPa}$

(2) Aço CP190 RB 9,5 e 11, área  $A_{p1} = 2 \text{ cordoalhas } \varnothing 9,5$ , área =  $2 \times 54,8 = 109,6 \text{ mm}^2$ ,  $A_{p2} = 5 \text{ cordoalhas } \varnothing 11$ , área =  $5 \times 74,2 = 371 \text{ mm}^2$ ,  $d'_1 = d'_2 = 20\sqrt{2} \text{ mm}$ ,  $f_{pyk} = 0,9 \times 1900 = 1710 \text{ MPa}$ ,  $f_{pyd} = \frac{1710}{1,15} = 1487 \text{ MPa}$ . Tensão de protensão na pista:  $\sigma_{pi} = 0,74 f_{ptk} = 1406 \text{ MPa} = 1,406 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$ . Forças de protensão:  $P_{i1} = 1,406 \times 109,6 = 154,1 \text{ kN}$ ,  $P_{i2} = 1,406 \times 371 = 521,6 \text{ kN}$ .

(3) Comprimentos de transferência:  $l_{bpt} = 70,9 \left\{ \begin{matrix} 9,5 \\ 11 \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 674 \\ 780 \end{matrix} \right\} \text{ mm}$ ,

(4) Comprimento de regularização das tensões normais de protensão:  $l_p = \sqrt{h^2 + (0,6 l_{bpt})^2} = \sqrt{500^2 + (0,6 \times 780)^2} = 685 \cong 700 \text{ mm}$ .

### 3. Dimensionamento

Hipóteses:

- (a) No modelo a seguir adota-se  $l_{bpt} \cong l_p \cong 700 \text{ mm}$ ;
- (b) A treliça que se forma nas paredes da calha é considerada sob ação das forças atuantes na alma, entre os flanges, pois são estas que causam tração na direção paralela à da parede inclinada. Estas forças somam, após a regularização,  $P_{i1} + P_{i2} - R_{cfl1} - R_{cfl2}$ , onde  $R_{cfl1} + R_{cfl2}$  é a soma das forças nos dois flanges.
- (c) Simplifica-se o modelo, considerando a seção T duplamente simétrica da peça com larguras/alturas dos flanges iguais a  $356,6 \text{ mm}$ ,  $40\sqrt{2} \text{ mm}$  e da alma  $80\sqrt{2} \text{ mm}$ ,  $500 - 80\sqrt{2} = 386,8 \text{ mm}$ . As respectivas características geométricas são  $A_0 = 84109,65 \text{ mm}^2$ ,  $I_0 = 253971,76 \times 10^4 \text{ mm}^4$ .
- (d) A força e o momento resultante da aplicação das duas forças de protensão valem:

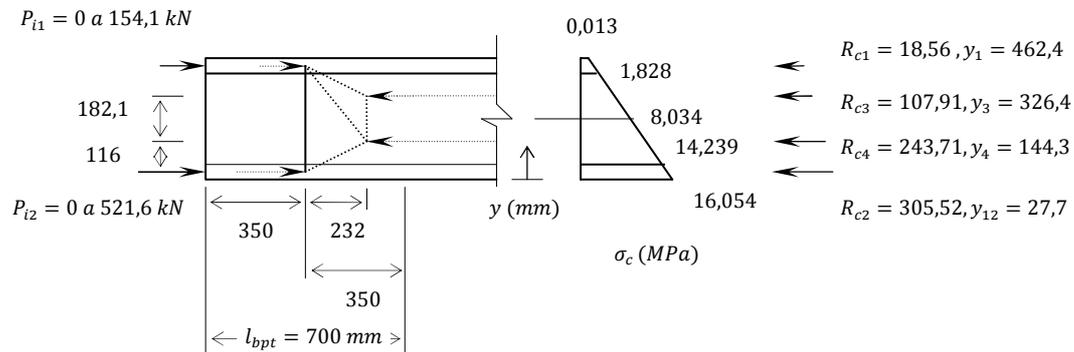
$$P_i = -675,7 \text{ kN}, M_{pi} = -81,48 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

As tensões normais correspondentes, em  $\text{MPa}$ , na zona B são dadas pela equação:

$$\sigma_c = -8,03 - 0,03208z$$

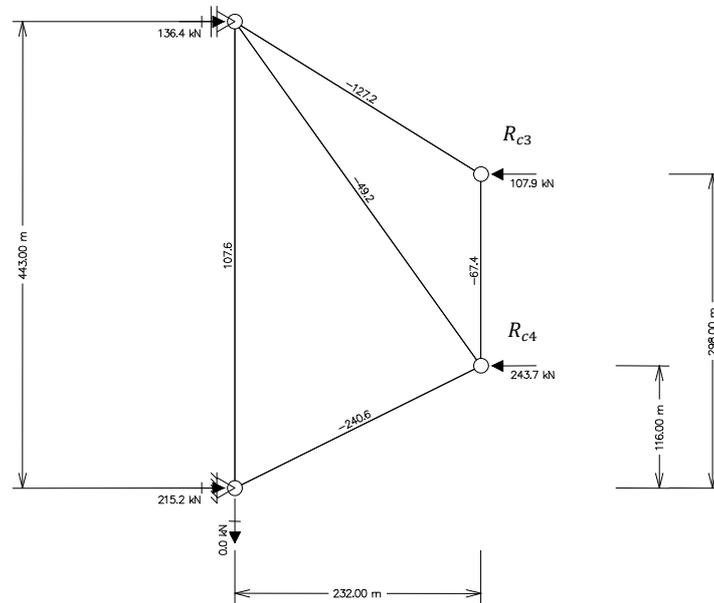
com  $z$  em  $\text{mm}$ , positivo para baixo. Ver a Figura 2, onde as tensões estão indicadas em módulo. A resultante de forças nas áreas parciais,

sendo linear a distribuição das tensões e constantes as respectivas larguras, posiciona-se no CG de um trapézio de altura  $\Delta h = 193,4 \text{ mm}$ , e tensões superior e inferior iguais a  $\sigma_{cksup}, \sigma_{ckinf} > \sigma_{cksup}$ , onde  $k$  refere-se à seção parcial em consideração, e as tensões são tomadas em módulo. A posição do CG em relação à base do trapézio é dada pela expressão:  $\Delta y_k = \frac{\Delta h}{3} \frac{2\sigma_{cksup} + \sigma_{ckinf}}{\sigma_{cksup} + \sigma_{ckinf}}$ . Ver na Figura 17 as forças das áreas parciais e as distâncias  $y_k$  do CG à base da calha. As forças aí indicadas estão em equilíbrio com as forças de protensão, como tem de ser.



(a) Treliça da zona D, geometria e forças

(b) Tensões normais na zona B, forças nas áreas parciais e respectivas posições



(b) Forças na treliça da zona D.

Figura 2: Zona D nas paredes inclinadas da calha, modelo de treliça.

A treliça da figura 2 mostra as reações de apoio *resultantes da análise*, iguais às respectivas forças nos flanges, ou seja,  $P_{i1} - R_{c1} = 154,1 - 18,56 \cong 136,4 \text{ kN}$  e  $P_{i2} - R_{c2} = 521,6 - 305,52 \cong 215,2 \text{ kN}$ .

A treliça indicada é, na realidade, a síntese de uma sucessão de treliças que se formam no comprimento de transferência, onde as forças de protensão são introduzidas pouco a pouco por aderência. Por consequência, a tração  $R_{st} = 107,6 \text{ kN}$  deve ser distribuída em  $l_{bpt} = 0,70 \text{ m}$ , prolongando-se a armadura transversal um pouco além, para compensar eventual imprecisão na geometria do modelo.

No que segue, são feitas duas verificações, a primeira no ELU, com tensão na armadura de protensão  $0,95f_{ptk}$  (valor indicado por Marti e Rogowski em [3]) e resistência da armadura transversal  $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ . A segunda, no ELS logo após a introdução da protensão, com tensão de protensão  $0,74f_{ptk}$ , e tensão na armadura transversal igual a  $\sigma_{sd} = 250 \text{ MPa}$ . Assim, tem-se a área de armadura necessária nas *duas paredes*:

$$a_{st,ELU} = \gamma_p \frac{R_{st}}{l_{bpt} f_{yd}} = \left( \frac{0,95}{0,74} \right) \frac{107,6}{0,7 \times 0,435} = 454 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$a_{st,ELS} = \frac{R_{st}}{l_{bpt} \sigma_{sd}} = \frac{107,6}{0,7 \times 0,25} = 615 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Logo, em cada parede inclinada da calha deve-se ter

$$a_{st,ELS}/\text{parede} = \frac{615}{2} = 308 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Este valor cobre a armadura transversal mínima,  $\left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{min} = 0,2b_w \frac{f_{ctm}}{f_{yw}} = 0,2 \times 80\sqrt{2} \frac{3,51}{500} = 0,159 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 159 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ , ou  $80 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  por parede, calculada para força cortante, e *ambas não devem ser somadas*. Logo, pode-se adotar  $\frac{a_{st,ELS}}{\text{parede}} \geq 308 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$  nos primeiros  $1,20 \text{ m}$  das extremidades. A folga dada neste comprimento prevê também liberação brusca, por acidente, ao invés da liberação gradual adotada anteriormente.

#### 4. Referências bibliográficas

[1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE. **Practical design of structural concrete**: FIP recommendations. London: SETO, 1999.

[2] RAMIREZ, JULIO A. **Strut-Tie Design of Pretensioned Concrete Members.** ACI Structural Journal. September-October, 1994.

[3] ROGOWSKY, D., M., MARTI, P. **Detailing for Post-tensioning.** VSL Report Series, Bern, Switzerland, 1991.