

## Teórico

### Verificação de tensões

#### ELS-D

Estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção:

$$\sigma_c \leq 0$$

#### ELS-F

Estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado-limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a resistência do concreto à tração na flexão:

$$\sigma_c \leq \alpha * f_{ctk,inf}$$

Onde:

$$f_{ctk,inf} = 0.7 * 0.3 * f_{ck}^{2/3};$$

$$\alpha = 1.2, \text{ para seções T ou duplo T};$$

$$\alpha = 1.3, \text{ para seções I ou T invertido};$$

$$\alpha = 1.5, \text{ para seções retangulares.}$$

sendo que  $\alpha$  é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta

#### ELU-ATO

Admite-se que a segurança em relação ao estado-limite último no ato de protensão seja verificada no estágio I (concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais), desde que as tensões no concreto esteja entre os seguintes limites:

$$0.7 * f_{ckj} \leq \sigma_c \leq 1.2 * f_{ctm}$$

Onde:

$f_{ckj}$  é a resistência característica à compressão do concreto aos  $j$  dias;

$f_{ctmj} = 0.3 * f_{ck}^{2/3}$ , é a resistência média à tração do concreto aos  $j$  dias.

Quando nas seções transversais existirem tensões de tração, deve haver armadura de tração calculada no estágio II. Para efeitos de cálculo, nessa fase da construção, a força nessa armadura pode ser considerada igual à resultante das tensões de tração no concreto no estágio I. Essa força não pode provocar, na armadura correspondente, acréscimos de tensão superiores a 150 MPa no caso de fios ou barras lisas e a 250 MPa em barras nervuradas.

### Perdas da força de protensão

#### Perdas por atrito

A força na armadura de protensão na seção de abscissa  $x$ , considerando a perda por atrito entre o cabo e a bainha, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$P_{at}(x) = P_i \cdot e^{-(\mu \Sigma \alpha + k \cdot x)}$$

Onde,

$P_i$  é a força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração;

$x$  é a abscissa do ponto onde se calcula  $P_{at}$  medida a partir da ancoragem, dada em metros;

$\sum \alpha$  é a soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa  $x$ , dada em radianos;

$\mu$  é o coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha. Na falta de dados experimentais, pode ser estimado como a seguir (valores em 1/radianos):

$\mu = 0,50$  entre cabo e concreto (sem bainha);

$\mu = 0,30$  entre barras ou fios com mossas ou saliências e bainha metálica;

$\mu = 0,20$  entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica;

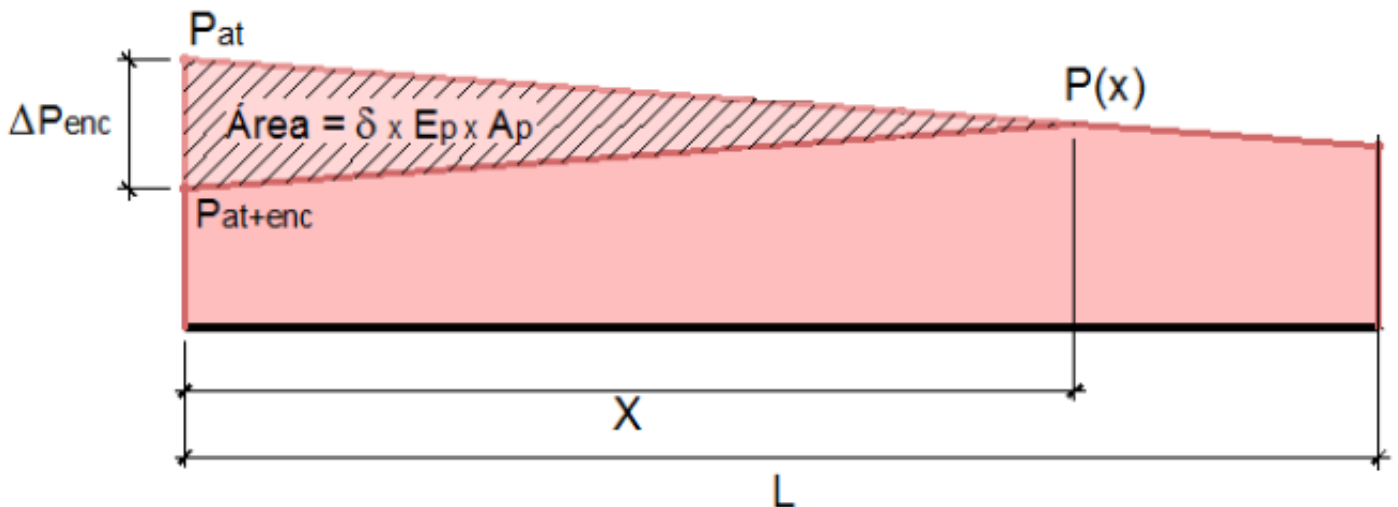
$\mu = 0,10$  entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica lubrificada;

$\mu = 0,05$  entre cordoalha e bainha de polipropileno lubrificada;

$k$  é o coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo. Na falta de dados experimentais, pode ser adotado o valor  $0,01 \mu$  (1/m).

## Perdas por encunhamento

O encunhamento das cordoalhas na ancoragem acompanha um recuo do cabo  $\delta$ , este valor de recuo é indicado pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragem. A perda de protensão pode ser obtida graficamente, procurando a distância  $x$  onde terminam as perdas devido ao recuo do cabo de acordo com a expressão da seguinte figura:



Sendo  $E_p$  e  $A_p$  o módulo de elasticidade e área do aço de armadura ativa, respectivamente.

## Perdas por encurtamento elástico

### Pré-Tração

Quando o esforço do cabo é transferido ao concreto, ocorre uma perda de protensão devido ao encurtamento elástico imediato do concreto. Resultando na seguinte perda:

$$\Delta \sigma_{p,ee} = -\alpha_p (\sigma_{cp} + \sigma_{cg})$$

### Pós-Tração

No caso de pós-tração, se todos os cabos forem protendidos de maneira simultânea, não haverá perda de tensão

devido ao encurtamento elástico, já que o mesmo ocorre antes da ancoragem. Caso os cabos não forem protendidos simultaneamente, um determinado cabo ao ser protendido afeta os anteriores. A perda média de protensão por cabo pode ser calculada pela expressão:

$$\Delta\sigma_{p,ee} = -\frac{\alpha_p(\sigma_{cp} + \sigma_{cg})(n-1)}{2n}$$

Sendo:

$\alpha_p = E_p / E_c$ , relação entre os módulos de elasticidades do concreto e da armadura de protensão;

$\sigma_{cp} = Pat+enc/Ac + Pat+enc.ep^2/lc$ , tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à protensão simultânea de n cabos;

$\sigma_{cg} = -Mg0.ep/lc$ , tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão.

## Perdas progressivas

As perdas de protensão, decorrentes da retração e fluência do concreto e da relaxação do aço de protensão, podem ser estimadas através da seguinte expressão:

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{p,s} + \Delta\sigma_{p,c} + \Delta\sigma_{p,r}}{\beta}$$

Onde  $\Delta\sigma_{p,s}$  e  $\Delta\sigma_{p,c}$  são respectivamente as perdas devido à retração e fluência do concreto,  $\Delta\sigma_{p,r}$  é a perda devido à relaxação na armadura de protensão, e  $\beta$  é um coeficiente de redução que considera a interação entre essas perdas. A seguir são apresentadas as expressões para o cálculo destas perdas:

Perdas por retração:

$$\Delta\sigma_{p,s} = \varepsilon_{cs}(t, t_0)E_p$$

Perdas por fluência

$$\Delta\sigma_{p,c} = -\alpha_p\sigma_{c,pog}\varphi(t, t_0)$$

Perdas por relaxação

$$\Delta\sigma_{p,r} = -\sigma_{p0}\chi(t, t_0)$$

Coeficiente de redução:

$$\beta = 1 + \chi(t, t_0) + \alpha_p\rho_p \left[ 1 + \frac{\varphi(t, t_0)}{2} \right] \left( 1 + e_p^2 \frac{A_c}{l_c} \right)$$

Sendo:

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  é a deformação específica de retração (Tabela 8.2 da NBR6118:2014);

$E_p$  é módulo de elasticidade do aço de armadura ativa;

$\alpha_p = E_p / E_{ci28}$ , é a relação entre os módulos de elasticidades do aço de armadura ativa e do concreto aos 28 dias.

$\sigma_{c,pog}$  é a tensão no concreto adjacente ao cabo resultante, provocada pela protensão e pela carga permanente mobilizada no instante  $t_0$ , sendo positiva se for de compressão;

$\chi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência do concreto no instante  $t$  para protensão e carga permanente, aplicadas no instante  $t_0$  (Tabela 8.2 da NBR6118:2014);

$\sigma_{p0}$  é a tensão na armadura ativa correspondente a  $P_0$ ;

$\chi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência do aço, que para o tempo infinito é dado por  $\chi(t^\infty, t_0) \approx 2,5\psi_{1000}$ . Sendo  $\psi_{1000}$  a relaxação da cordoalha após 1000h a 20°C, calculado por interpolação da Tabela 8.4 da NBR6118:2014, considerando o nível da tensão na armadura ativa  $\sigma_{p0} = P_0/A_p$ ;

$\rho_p = A_p / A_c$ , é a taxa geométrica da armadura de protensão;

$e_p$  é a excentricidade do cabo resultante em relação ao baricentro da seção do concreto;

$A_p$  é a área da seção transversal do cabo resultante;

$A_c$  é a área da seção transversal do concreto;

$I_c$  é o momento central de inércia na seção do concreto.

O processo acima descrito é aplicável quando são satisfeitas as condições seguintes:

a) a concretagem do elemento estrutural, bem como a protensão, são executadas, cada uma delas, em fases suficientemente próximas para que se desprezem os efeitos recíprocos de uma fase sobre a outra;

b) os cabos possuem entre si afastamentos suficientemente pequenos em relação à altura da seção do elemento estrutural, de modo que seus efeitos possam ser supostos equivalentes ao de um único cabo, com seção transversal de área igual à soma das áreas das seções dos cabos componentes, situado na posição da resultante dos esforços neles atuantes (cabo resultante).