

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:

 $\sigma c \leq 0$

FLS-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 * fctk.inf
```

Onde:

```
fctk,inf = 0.7 * 0.3 * fck^2/3;

\alpha = 1.2, para seções T ou duplo T;

\alpha = 1.3, para seções I ou T invertido;

\alpha = 1.5, para seções retangulares.
```

sendo que α 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 estádio I (concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais), desde que as tensões no conreto esteja entre os seguintes limites:

```
0.7 * fckj \le \sigma c \le 1.2 * fctm
```

Onde:

fckj é a resistência característica à compressão do concreto aos j dias;

fctmj = 0.3 * fck^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 estádio 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 estádio 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:

```
Pat (x) = Pi.e-(\mu\Sigma\alpha+k.x)
```

Onde,

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

x é a abscissa do ponto onde se calcula Pat medida a partir da ancoragem, dada em metros;

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

 μ 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):

 μ = 0,50 entre cabo e concreto (sem bainha);

 μ = 0,30 entre barras ou fios com mossas ou saliências e bainha metálica;

 μ = 0,20 entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica;

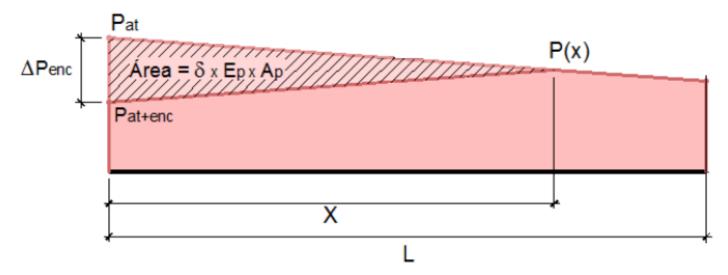
 μ = 0,10 entre fios lisos ou cordoalhas e bainha metálica lubrificada;

 μ = 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 δ , 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 Ep e Ap 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:

αp = Ep / Ec, relação entre os módulos de elasticidades do concreto e da armadura de protensão;

σcp = Pat+enc/Ac + Pat+enc.ep²/Ic, tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à protensão simultânea de n cabos;

σcg= - Mg0.ep/Ic, 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 β 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:

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

Sendo:

εcs (t,t0) é a deformação específica de retração (Tabela 8.2 da NBR6118:2014);

Ep é módulo de elasticidade do aço de armadura ativa;

αp = Ep / Eci28, é a realação entre os módulos de elasticidades do aço de amradura ativa e do concreto aos 28 dias.

σc,pog é a tensão no concreto adjacente ao cabo resultante, provocada pela protensão e pela carga permanente mobilizada no instante t0, sendo positiva se for de compressão;

(t,t0) é o coeficiente de fluência do concreto no instante t para protensão e carga permanente, aplicadas no instante t0 (Tabela 8.2 da NBR6118:2014);

σcp0 é a tensão na armadura ativa correspondente a P0;

 $\chi(t,t0)$ é o coeficiente de fluência do aço, que para o tempo infinito é dado por $\chi(t\infty,t0) \cong 2,5\psi1000$. Sendo $\psi1000$ 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 $\sigma p0 = P0/Ap$;

ρρ = Ap / Ac, é a taxa geométrica da armadura de protensão;

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

Ap é a área da seção transversal do cabo resultante;

Ac é a área da seção transversal do concreto;

Ic 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).