



POLI USP

PEF - Engenharia de Estruturas e Geotécnica

PEF 3404

PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

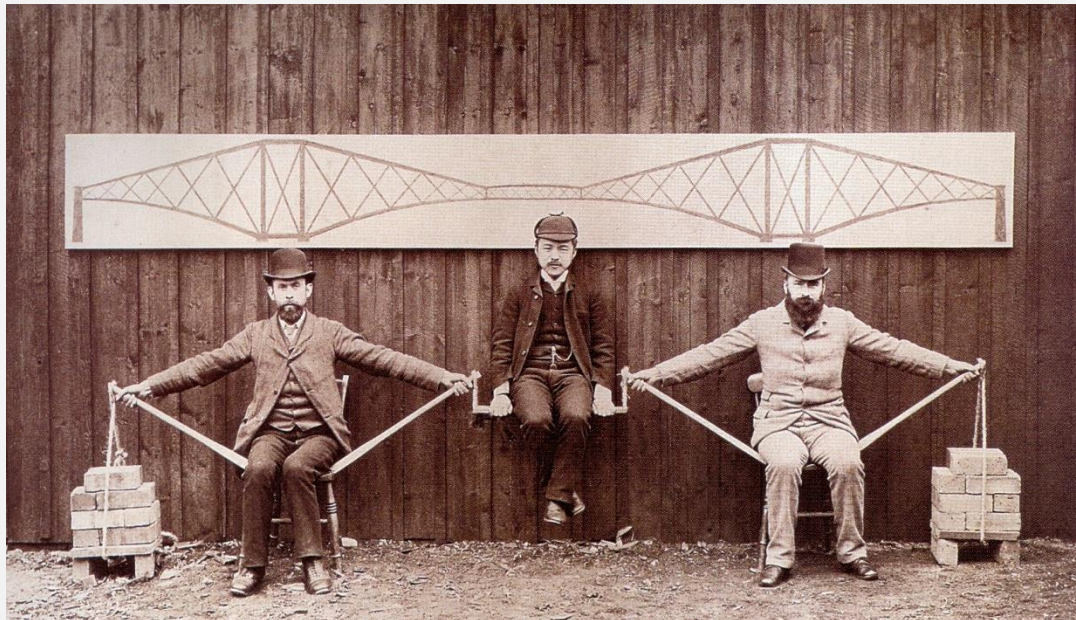
Kalil Skaf

Rui Nobhiro Oyamada

2021

Moodle USP

<https://edisciplinas.usp.br/>



FORTH BRIDGE – Edinburgh - Scotland

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

CONCEITOS DE CONCRETO PROTENDIDO

Protensão com aderência posterior:

- ✓ aderência entre o cabo de protensão e o concreto;
- ✓ $\varepsilon_S = \varepsilon_C$ em qualquer ponto;
- ✓ $\sigma_S = f(\varepsilon_C)$;
- ✓ Bainhas metálicas.

Protensão sem aderência posterior:

- ✓ Não há aderência entre o cabo e o concreto;
- ✓ $\varepsilon_S \neq \varepsilon_C$;
- ✓ $\sigma_S \neq f(\varepsilon_C)$;
- ✓ Proteção com graxa inibidora de corrosão;
- ✓ Bainhas de polietileno ou polipropileno
- ✓ Ancoragem somente nas extremidades

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Protensão com aderência posterior:

- ✓ Melhor distribuição das fissuras, tornando-as mais numerosas e com menor abertura;
- ✓ Aumento da resistência última à flexão, aumentando a segurança contra a ruína;
- ✓ Mais protegidos contra corrosão;
- ⇒ Melhor comportamento estrutural.

Protensão sem aderência posterior:

- ✓ Protegidos de fábrica contra corrosão;
- ✓ Ausência da operação de injeção;
- ✓ Simplicidade de montagem;
- ✓ Mais rápido do ponto de vista executivo;
- ✓ Maior quantidade de armadura passiva para o controle da fissuração;
- ✓ Menor perda por atrito;
- ⇒ Melhores condições construtivas.

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Combinações de Serviço:

Classificadas de acordo com a ordem de grandeza da permanência na estrutura

- ✓ CQP – Quase permanente
Podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade deste período.
- ✓ CF – Freqüente
Se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos.
- ✓ CR – Rara
Podem atuar no máximo algumas vezes durante o período de vida da estrutura (algumas horas).

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

$$CQP \rightarrow F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} * F_{qj,k}$$

$$CF \rightarrow F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + \psi_1 * F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} * F_{qj,k}$$

$$CR \rightarrow F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_1 * F_{qj,k}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Graus de Protensão:

	Combinação	Exigência	Classe de Agressividade
Protensão Completa	CF	ELS - D	Pré-tração; III e IV (forte e muito forte)
	CR	ELS - F	
Potensão Limitada	CQP	ELS - D	Pré-tração; II Pós-tração; III e IV
	CF	ELS - F	
Protensão Parcial	CQP	ELS - F	Pré-tração; I Pós-tração; I e II (fraca e média)
	CF	ELS - W ($W_K < 0,2 \text{ mm}$)	

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)} Respingos de maré	Elevado

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade **média** relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Estados Limites de Serviço (ELS): durabilidade , aparência e conforto

a) Estado limite de formação de fissuras ELS – F

A tensão de tração máxima na seção transversal é igual a $f_{ct} = 1,2 \cdot f_{ctk}$
onde

$$f_{ctk} = f_{ctk,inf}$$

$$f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,70 f_{ctm}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,30 f_{ctm}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

- b) Estado limite de abertura de fissuras (ELS – W)
As fissuras se apresentam com aberturas iguais ao máximo especificado ($W_k \leq 0,2$ mm).

- c) Estado limite de descompressão (ELS – D)
Em um ou mais pontos de seção transversal, a tensão normal é nula.

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Tensão devido à protensão:

$$\sigma_p(y) = \frac{P}{A_C} + \frac{M_p * y}{I_C}$$

Tensão devido a um carregamento externo:

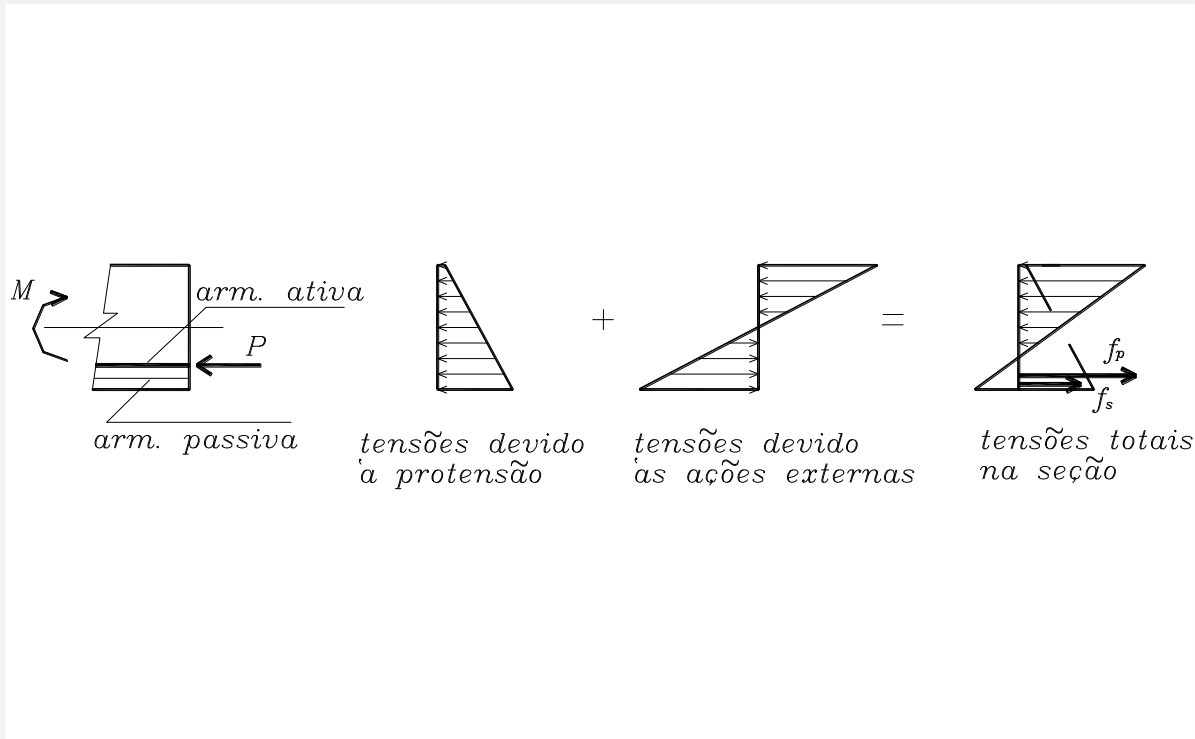
$$\sigma_m(y) = \frac{M * y}{I_C}$$

Somando-se ambas as partes temos:

$$\sigma(y) = \frac{P}{A_C} + \frac{M_p * y}{I_C} + \frac{M * y}{I_C}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão



$$\sigma(y) = \frac{P}{A_c} + \frac{M_p * y}{I_c} + \frac{M * y}{I_c}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Descompressão

$$M_{descompr} = \left[\frac{P}{A_C} + \frac{M_p * \frac{h}{2}}{I_C} \right] * \frac{I_C}{\frac{h}{2}}$$

Formação de Fissuras

$$M_{crítico} = \left[\frac{P}{A_C} + \frac{M_p * \frac{h}{2}}{I_C} + f_{ct} \right] * \frac{I_C}{\frac{h}{2}}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Perdas Imediatas de Protensão:

- Perda por atrito

$$\Delta P(x) = P_o \left[1 - e^{-\left(\mu \sum \alpha + kx\right)} \right]$$

$\mu = 0,2$ entre cordoalhas e bainhas metálicas;

$\mu = 0,05$ entre cordoalhas e bainhas de polipropileno lubrificado;

$K = 0,01 \mu$ (1/m)

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Perdas Imediatas de Protensão:

- Perda por acomodação das cunhas de ancoragem
Reco $\delta = 0$ a 6 mm
- Perda por encurtamento elástico do concreto

$$\Delta\sigma_p = \frac{\Delta P}{A_p} = \frac{\alpha_p (\sigma_{cy} + \sigma_{cp}) \cdot (n-1)}{2n}$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_C}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Perdas Progressivas de Protensão:

- Perda por retração do concreto

$$\text{Função: } \left\{ \begin{array}{ll} \text{Temperatura ambiente} & t_i \\ \text{Umidade relativa} & U \\ \text{Espessura fictícia} & h_{\text{fict}} \end{array} \right.$$

$$\varepsilon_{CS}(t, t_0) = \varepsilon_{CS\infty} [\beta_S(t) - \beta_S(t_0)]$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Perdas Progressivas de Protensão:

$$\varepsilon_{CC}(t, t_0) = \frac{\sigma_c \phi(t, t_0)}{E_{C28}}$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_a + \phi_f + \phi_d$$

ϕ_a = coeficiente de fluência rápida;

ϕ_f = coeficiente de fluência lenta irreversível;

ϕ_d = coeficiente de fluência lenta reversível.

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre

Protensão

Perdas Progressivas de Protensão:

- Perda por relaxação do aço de protensão

$$\varepsilon_{\rho,t} = \varepsilon_{\rho i} * \chi(t, t_0)$$

$$\varepsilon_{\rho i} = \frac{\sigma_{\rho i}}{E_{\rho}}$$

$$\chi(t, t_0) = -\ln[1 - \psi(t, t_0)]$$

$$\Psi(t, t_0) = \Psi_{1000} \left(\frac{t - t_0}{1000} \right)^{0,15}$$

PEF 3404 – PONTES E GRANDES ESTRUTURAS

Aspectos Básicos sobre Protensão

Perdas Progressivas de Protensão:

Expressão aproximada para perda progressiva

$$\Delta\varepsilon_c = \varepsilon_{cs} + \varepsilon_{cc}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{\sigma_{pi}}{E_p} \chi(t, t_0) + \frac{\Delta\sigma_p}{E_p}$$

$$\Delta\varepsilon_c = \Delta\varepsilon_p$$

$$\Delta\sigma_p = E_p \varepsilon_{cs} + \frac{E_p}{E_c} (\sigma_g + \sigma_{cp}) \phi - \sigma_{pi} \chi$$