



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
Programa de Educação Continuada – PECE.
Curso de Especialização em Gestão de Projetos de Sistemas
Estruturais – Edificações.
**GES-017 – Patologia, Recuperação e Reparo de
Estruturas de Concreto.**

PROCEDIMENTOS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO VIGAS E LAJES

Eng. Douglas Couto
Engenheiro Civil PhD Engenharia



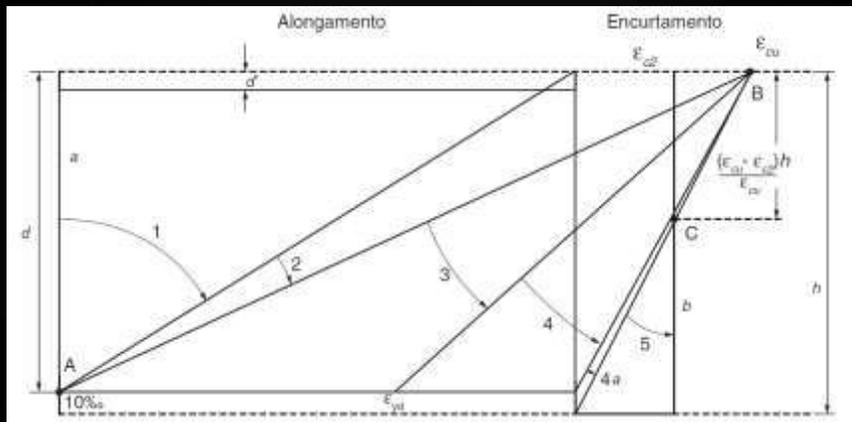
Escola Politécnica

24/06/2015

São Paulo SP

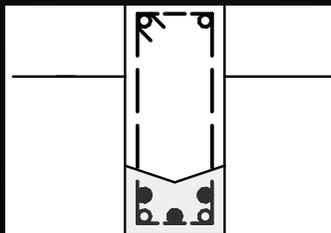
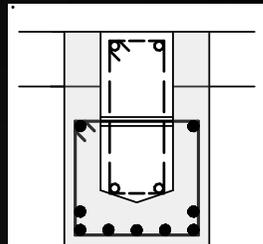
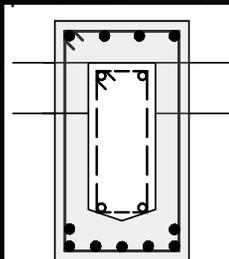
Vigas – Reforço Flexão

PECE-EPUSP



PECE-EPUSP

Tipos comuns em concreto



PECE-EPUSP





Reforço Estrutural - Vigas



PECE-EPUSP







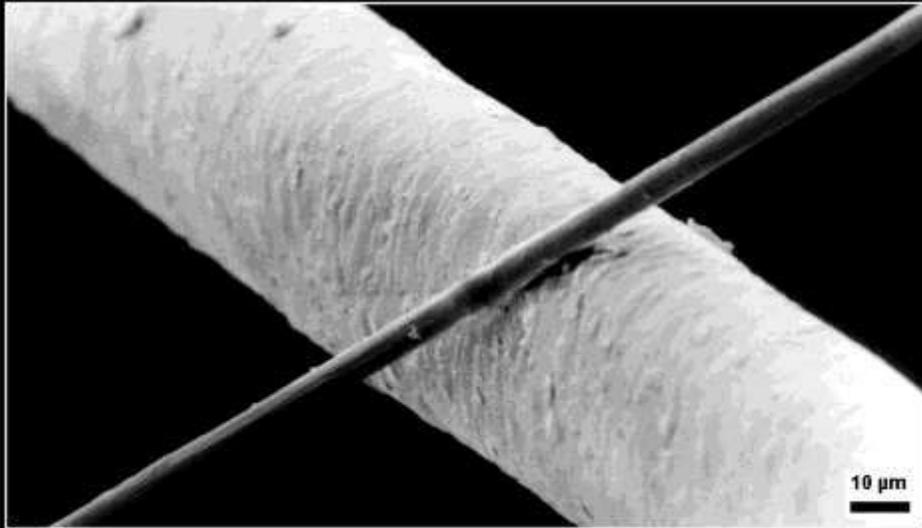








Fibra de Carbono (CF)



PECE-EPUSP

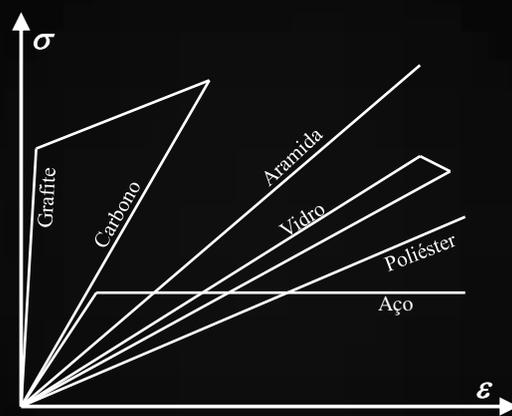
Fibra de Carbono (CF)

- *ACI 440.2R-02* 
- *SIA 166:2004* 
- *DIBt Zulassung Z-36.12-62/-67* 
- *Concrete Society TR n° 55* 
- *CSTB Avis Technique 3/08-577* 
- *CNR-DT 200/2004* 
- *CUR Aanbeveling 91* 

PECE-EPUSP



Fibras – Tensão Deformação



*Diagrama Tensão x Deformação de Fibras
(Machado, 2002)*

PECE-EPUSP

Fibras – Tensão Deformação

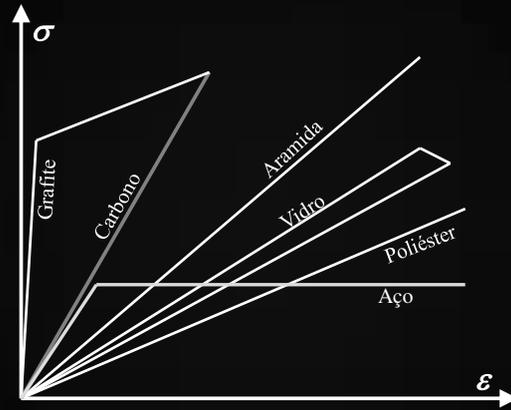


Diagrama Tensão x Deformação de Fibras
(Machado, 2002)

PECE-EPUSP

Fibras – Tensão Deformação

Módulo de Elasticidade

$$E_{cf} = 240\text{GPa}$$

$$E_s = 210\text{GPa}$$

Resistência

$$CF = 3800\text{MPa}$$

$$Aço = 500\text{MPa (CA-50)}$$



PECE-EPUSP

Fibras – Tensão Deformação

Módulo de Elasticidade

$$E_{cf} = 240\text{GPa}$$

$$E_s = 210\text{GPa}$$

Resistência

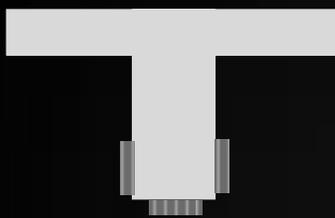
$$CF = 3800\text{MPa}$$

$$Aço = 500\text{MPa (CA-50)}$$

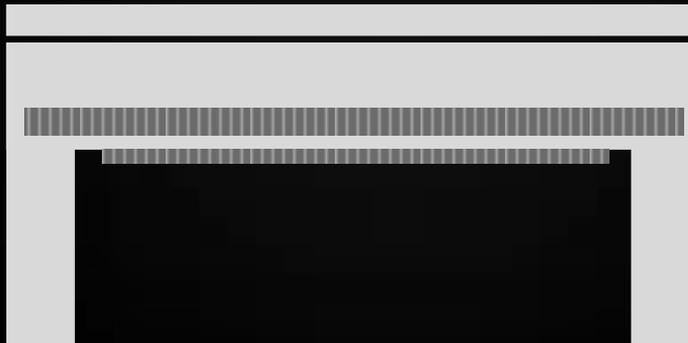


PECE-EPUSP

Reforço de Vigas a flexão



Laminados ou mantas (CF)



PECE-EPUSP

Mantas CF

Dados técnicos (unidirecional)	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²
Módulo elástico [kN/mm ²]	240	240	240
Resistência à tracção [N/mm ²]	3800	3800	3800
Gramagem da fibra [g/m ²] (direcção principal)	200	300	400
Gramagem por unidade de área de manta [g/m ²]	230	330	430
Densidade [g/cm ³]	1.7	1.7	1.7
Extensão de rotura [%]	1.55	1.55	1.55
Espessura para o cálculo (Gramagem da fibra/densidade) [mm]	0.117	0.176	0.234
Secção transversal teórica de cálculo por 1000 mm largura [mm ²]	117	176	234
Factor de redução para cálculo (Laminação manual/UD)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)
Força de tracção última 1000 mm de largura [kN]	$117 \times 3800 = 370.6$ 1.2	$176 \times 3800 = 557.3$ 1.2	$234 \times 3800 = 744.0$ 1.2
Força de tracção para 1000 mm largura a 0.6% e para o cálculo [kN]	149	211	282

Fonte: S&P Reinforcement

PECE-EPUSP

Laminados CF

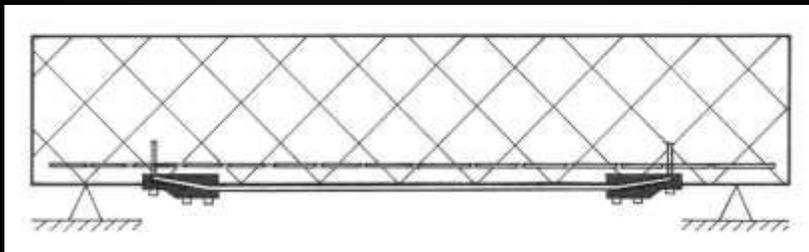
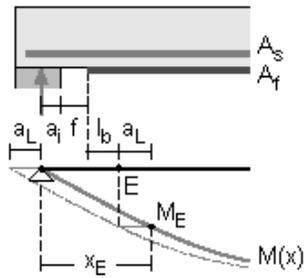
Laminados aplicados superficialmente:

Tipo de Laminado	Secção transversal	Força de tracção a 0.6 % de extensão	Força de tracção a 0.8 % de extensão
150/2000 Resistência à tracção = 2000 N/mm ² Módulo de elasticidade 165000 N/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1000 N/mm²	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1300 N/mm²
50 / 1.2	60	60.0 kN	78.0 kN
50 / 1.4	70	70.0 kN	91.0 kN
60 / 1.4	84	84.0 kN	109.2 kN
80 / 1.2	96	96.0 kN	124.8 kN
80 / 1.4	112	112.0 kN	145.6 kN
90 / 1.4	126	126.0 kN	163.8 kN
100 / 1.2	120	120.0 kN	156.0 kN
100 / 1.4	140	140.0 kN	182.0 kN
120 / 1.2	144	144.0 kN	187.2 kN
120 / 1.4	168	168.0 kN	218.4 kN
200/2000 Resistência à tracção = 2500 N/mm ² Módulo de elasticidade 210000 N/mm ²	[mm ²]	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1250 N/mm²	Resistência à tracção teórica para o cálculo: 1650 N/mm²
50 / 1.4	70	87.5 kN	115.5 kN
60 / 1.4	84	105.0 kN	138.6 kN
80 / 1.4	112	151.0 kN	194.8 kN
90 / 1.4	126	170.1 kN	207.9 kN
100 / 1.4	140	189.0 kN	231.0 kN
120 / 1.4	168	226.8 kN	277.2 kN

Créditos: S&P Reinforcement

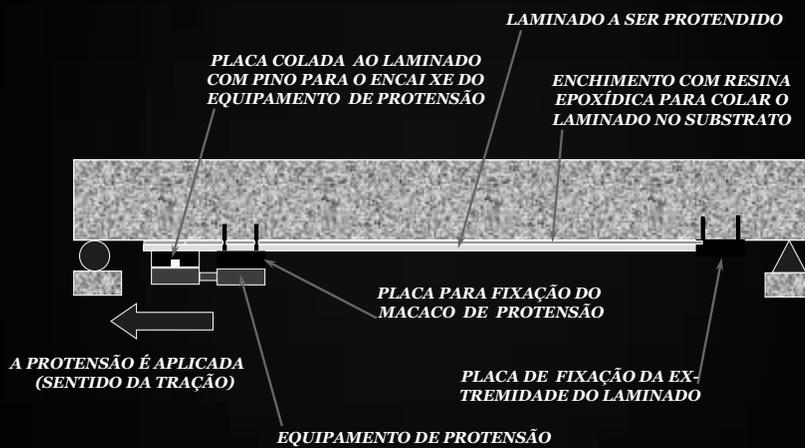
PECE-EPUSP

Ancoragem do reforço

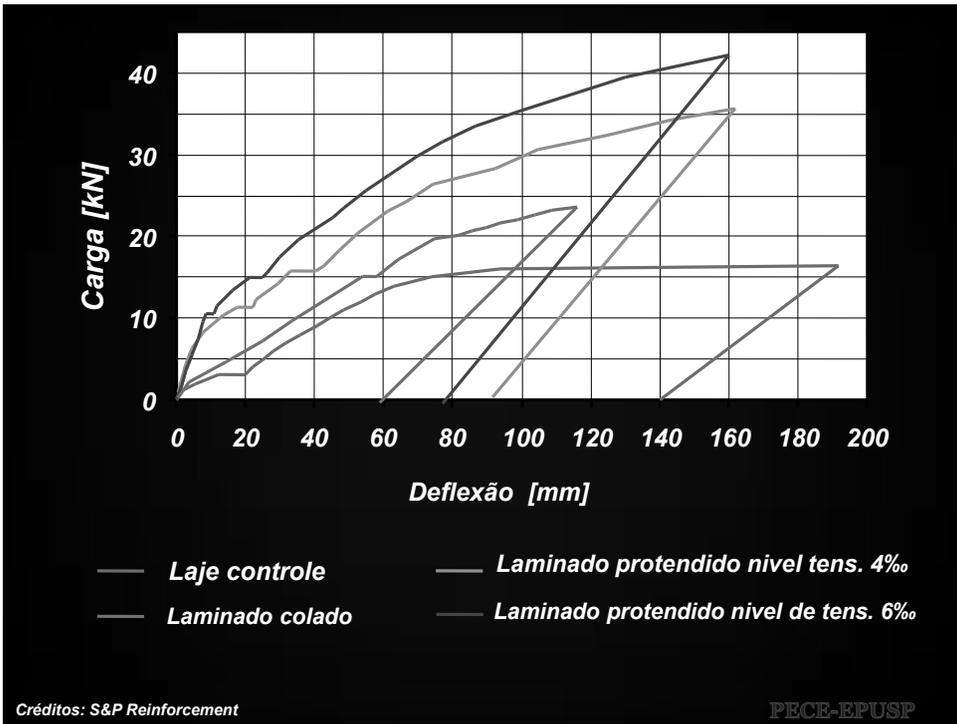


PECE-EPUSP

Protensão para laminados



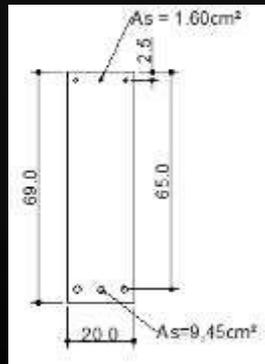
PECE-EPUSP



Exemplo Numérico

Uma viga de concreto armado deverá ser reforçada para receber uma carga tal que o valor do momento solicitante é $M_d = 288,3kN.m$. Sabe-se que o momento fletor devido ao peso próprio da viga é $M_{pp} = 29,0kN.m$. Para o reforço deve ser adotado fibras de carbono.

Dados: $f_{ck} = 20MPa$; Aço CA-50; $d=65cm$; $d'=4cm$



PECE-EPUSP

$$x = 1,25 \cdot d \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right]$$

$$x = 1,25 \cdot 69 \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{29}{0,425 \cdot 20 \cdot 69^2 \cdot 1,43}} \right] = 2,19cm$$

$$0,8 \cdot x = 1,753cm$$

$$z = 69 - 4 - \frac{1,753}{2} = 64,12cm$$

PECE-EPUSP

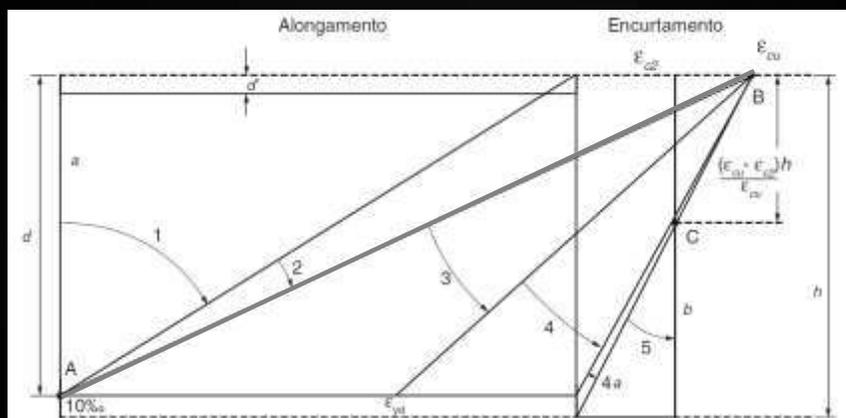
$$F_s = \frac{29}{0,6412} = 45,22 \text{ kN}$$

$$\sigma_s = \frac{45,22}{9,45} = 4,786 \text{ kN/cm}^2$$

Como: $\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$

Então: $\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \rightarrow \frac{4,786}{21000} = 0,228\%$

PECE-EPUSP



PECE-EPUSP

Profundidade da l.n. para $\varepsilon_{c2} = 3,5\%$ e $\varepsilon_s = 10\%$

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{(d-x)} \Rightarrow \frac{3,5}{x} = \frac{10}{(65-x)}$$

$$x = 16,85\text{cm}$$

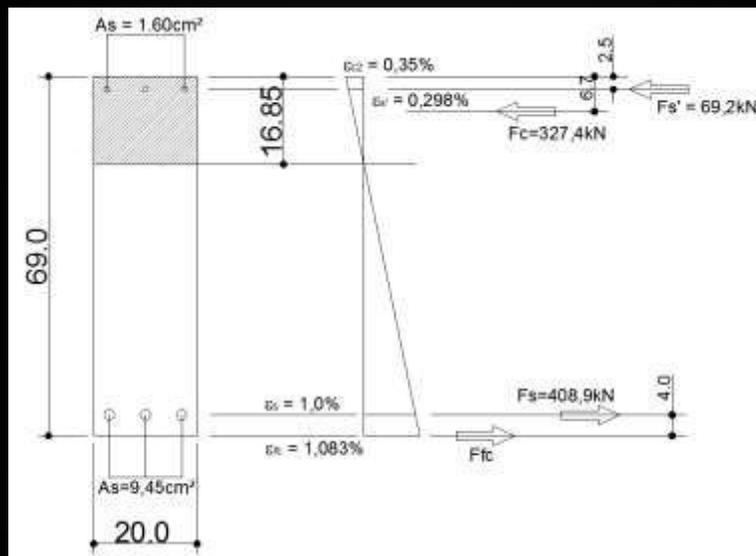
Para $x=16,85\text{cm}$:

$$F_c = \sigma_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8x = 327,4\text{kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 408,9\text{kN}$$

$$F_{s'} = f_{yd} \cdot A_{s'} = 69,2\text{kN}$$

PECE-EPUSP

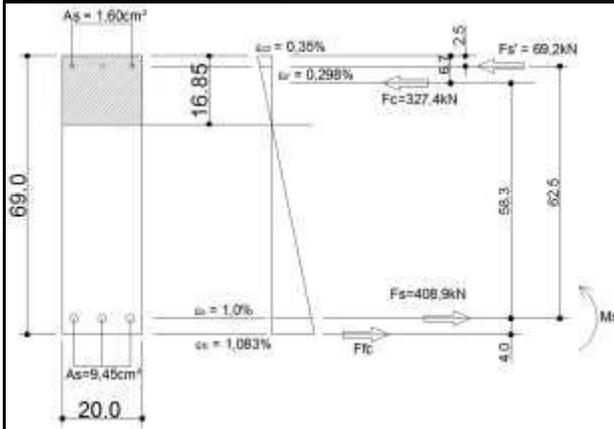


PECE-EPUSP

$$M_d = 288,3 \text{ kN.m}$$

$$M_s \Rightarrow 69,2 \cdot 0,625 + 327,4 \cdot 0,583 + F_{fc} \cdot 0,04 \geq 288,3 \text{ kN}$$

$$M_s \Rightarrow 234,13 + F_{fc} \cdot 0,04 \geq 288,3 \text{ kN}$$



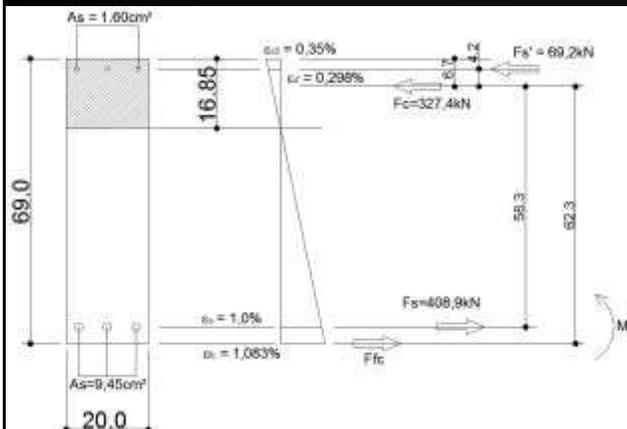
$$F_{fc} \geq 1354 \text{ kN}$$

PECE-EPUSP

$$M_d = 288,3 \text{ kN.m}$$

$$M_c \Rightarrow 69,2 \cdot 0,042 + 408,9 \cdot 0,583 + F_{fc} \cdot 0,623 \geq 288,3 \text{ kN}$$

$$M_c \Rightarrow 241,3 + F_{fc} \cdot 0,623 \geq 288,3 \text{ kN}$$



$$F_{fc} \geq 75,4 \text{ kN}$$

∴

$$F_{fc} \geq 1354 \text{ kN}$$

PECE-EPUSP

$$\varepsilon_{fc} = 10,831\text{‰} - 0,228\text{‰} = 10,603\text{‰}$$

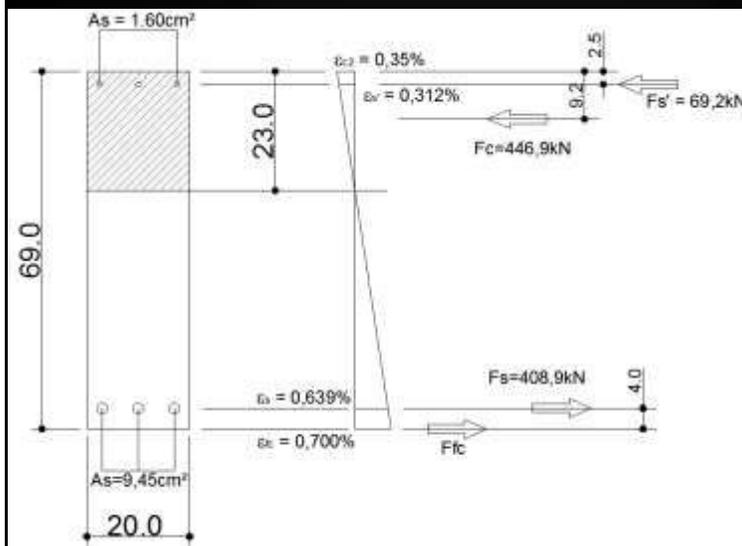
$$\sigma_{fc} = 10,603\text{‰} \cdot 24000 = 254,47 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{fc} = \frac{1354}{254,47} = 5,32 \text{ cm}^2$$

Muito alto!!!

PECE-EPUSP

Deve-se procurar uma nova profundidade para a linha neutra – Cálculo Interativo



PECE-EPUSP

$$M_s \Rightarrow 69,2 \cdot 0,625 + 446,9 \cdot 0,558 + F_{fc} \cdot 0,04 \geq 288,3kN$$

$$M_s \Rightarrow 292,6 + F_{fc} \cdot 0,04 \geq 288,3kN \therefore ok!$$

$$M_c \Rightarrow 69,2 \cdot 0,067 + 408,9 \cdot 0,558 + F_{fc} \cdot 0,59 \geq 288,3kN$$

$$M_c \Rightarrow 232,8 + F_{fc} \cdot 0,623 \geq 288,3kN$$

$$F_{fc} \geq 92,8kN$$

PECE-EPUSP

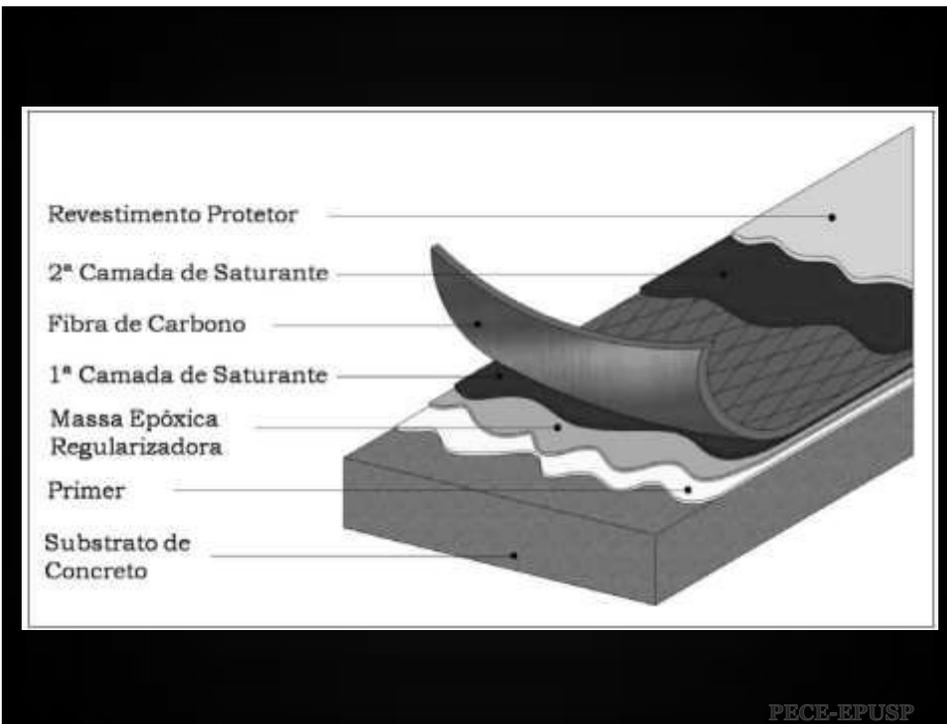
$$\varepsilon_{fc} = 7,00\text{‰} - 0,228\text{‰} = 6,772\text{‰}$$

$$\sigma_{fc} = 6,772\text{‰} \cdot 24000 = 162,53 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{fc} = \frac{92,8}{162,53} = 0,571cm^2$$

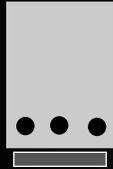
Gramagem	Espessura (mm)	Largura (cm)	Af/camada (cm ²)	N.º camadas
200 g/m ²	0,117mm	16cm	0,1872	3,05 (3 cam.)
300 g/m ²	0,176mm	16cm	0,2816	2,03 (2 cam.)
400 g/m ²	0,234mm	16cm	0,3744	1,53 (2 cam.)

PECE-EPUSP



Reforço à flexão – Comparativo

➤ 35% de acréscimo de carga acidental de viga simplesmente apoiada.



- Chapa de aço colada
 - Chapa de 3/16"
- 112 kg. peso morto
- Colocado c/ guincho



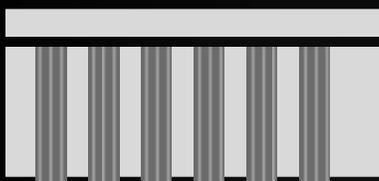
- 2 barras 1", 10 cm concreto
 - 1130 kg. peso morto
- Aço, fôrmas, concreto, cura
 - 28 dias > resistência



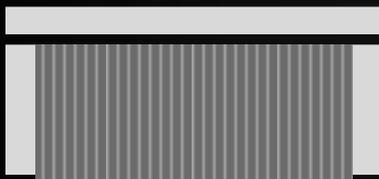
- Fibra de carbono
 - 1 camada
- 2,7 kg peso morto
- Aplicação manual

PECE-EPUSP

Reforço de Vigas a Cortante



Faixas Verticais



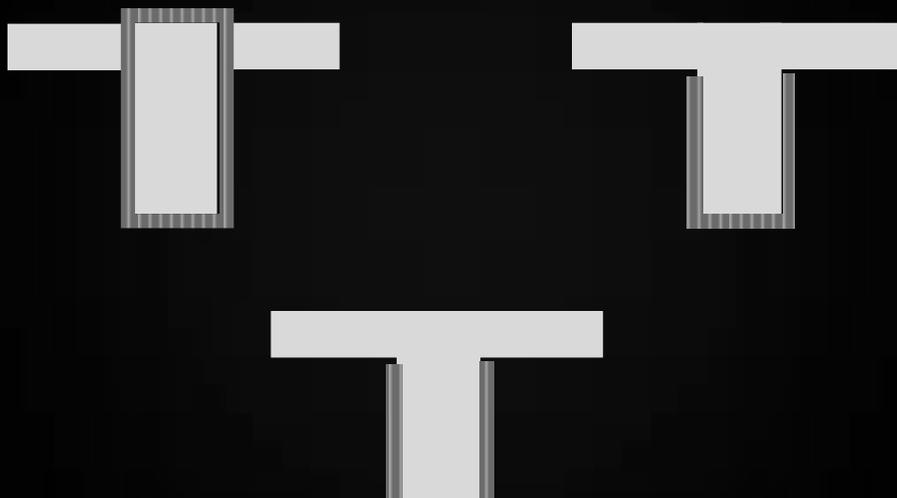
Manta



Faixas inclinadas

PECE-EPUSP

Reforço de Vigas a cortante



PECE-EPUSP



Créditos: S&P Reinforcement

PECE-EPUSP

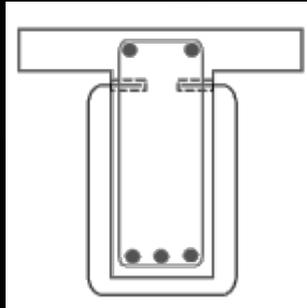


Chapa Metálica

$$e_{max} = 4mm$$

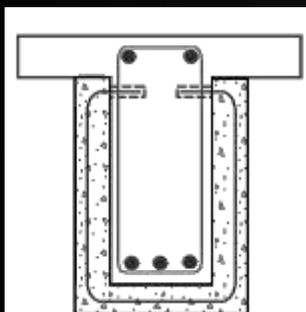
PECE-EPUSP

Reforço ao cisalhamento – Método convencional



PECE-EPUSP

Reforço ao cisalhamento – Método convencional



PECE-EPUSP

Reforço ao cisalhamento – Fibra de Carbono



Lajes

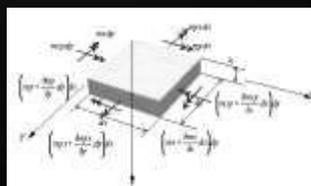
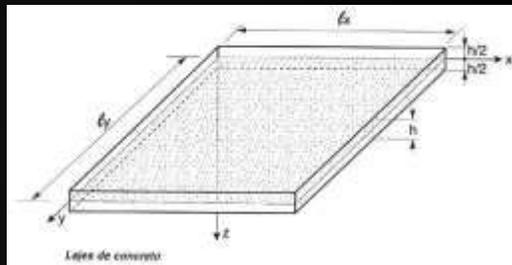
- *Elemento de Superfície*
- *Cargas normais ao plano médio;*
- *Comportamento:*
 - *Primário: Placa*
 - *Secundário: Chapa*

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad eq(1)$$

$$m_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad eq(2)$$

$$m_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad eq(3)$$

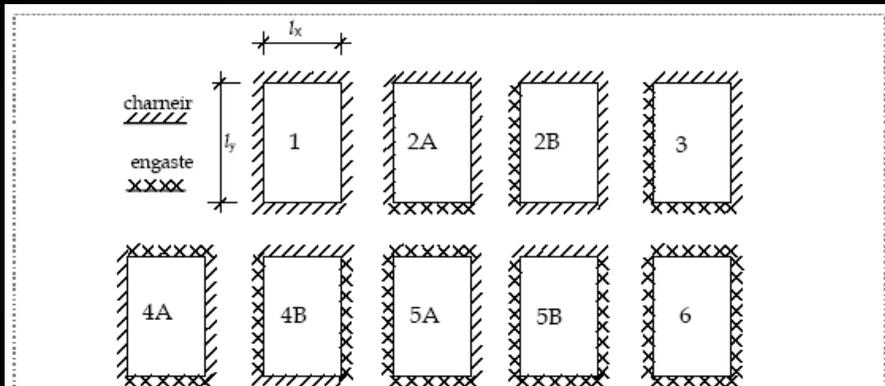
$$m_{xy} = -D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad eq(4)$$



(Timoshenko - Theory of Plates and Shells)

PECE-EPUSP

Tipos de apoio

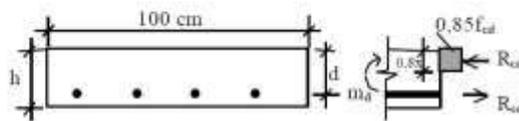


→ Tabelas → Czerny

PECE-EPUSP

Dimensionamento à Flexão

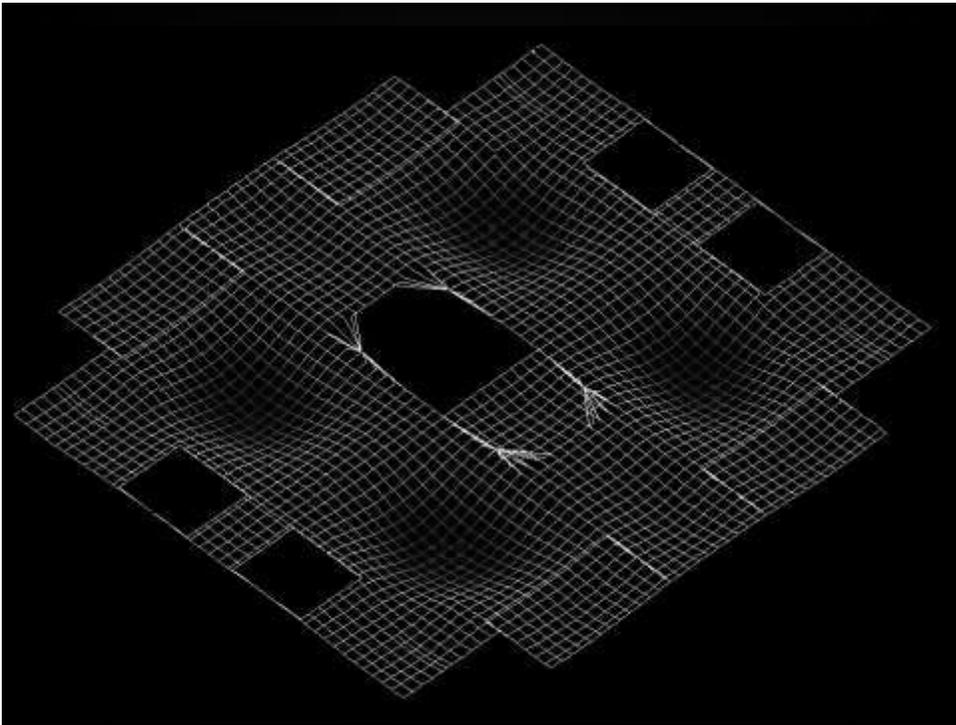
$$m_d = \gamma_f m_k = 1,4 m_k$$



$$x = 1,25d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{m_d}{0,425bd^2f_{cd}}} \right] \quad (x < x_{34})$$

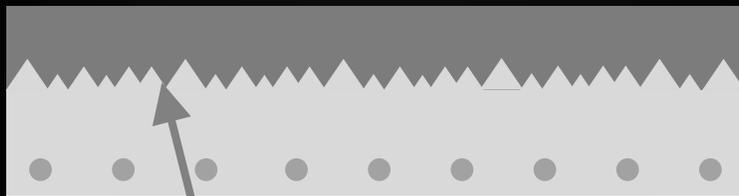
$$A_s = \frac{m_d}{f_{yd}(d - 0,4x)}$$

PECE-EPUSP



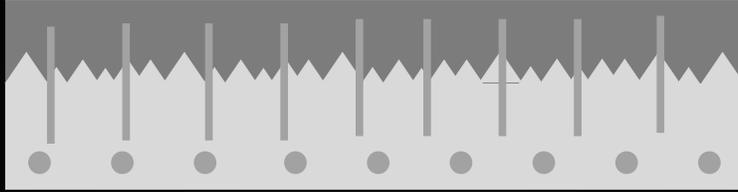


Aumento de espessura



PECE-EPUSP

Aumento de espessura



PECE-EPUSP

Considerações Finais

- *Ductilidade;*
- *Peso próprio;*
- *Facilidade de aplicação;*
- *Disponibilidade no mercado;*
- *Qualificação de mão de obra;*
- *Certificação dos produtos e sistemas.*

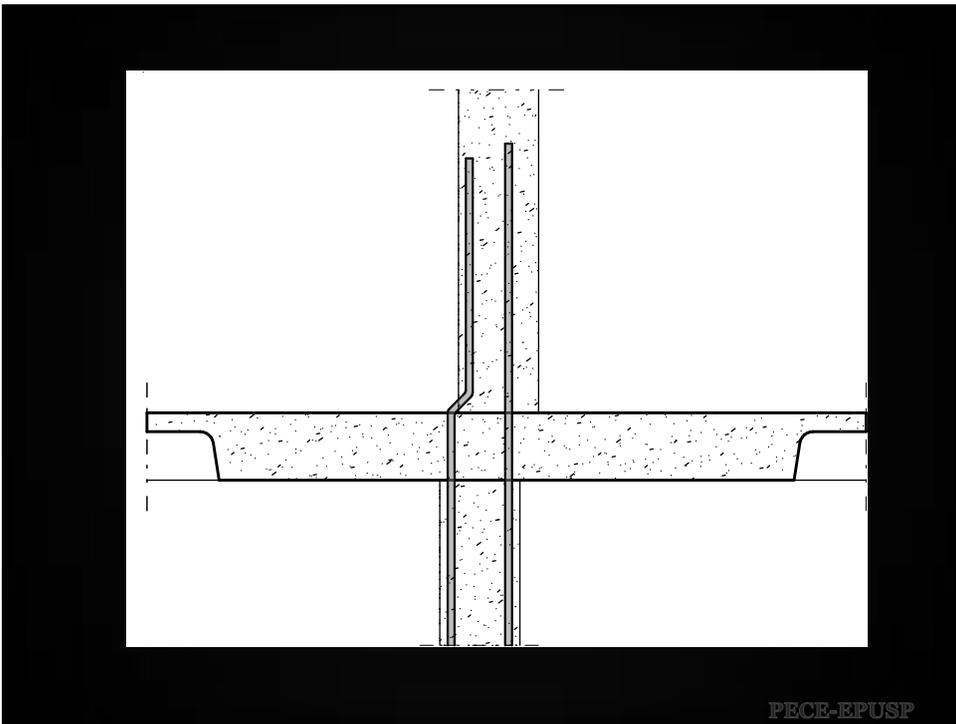
PECE-EPUSP

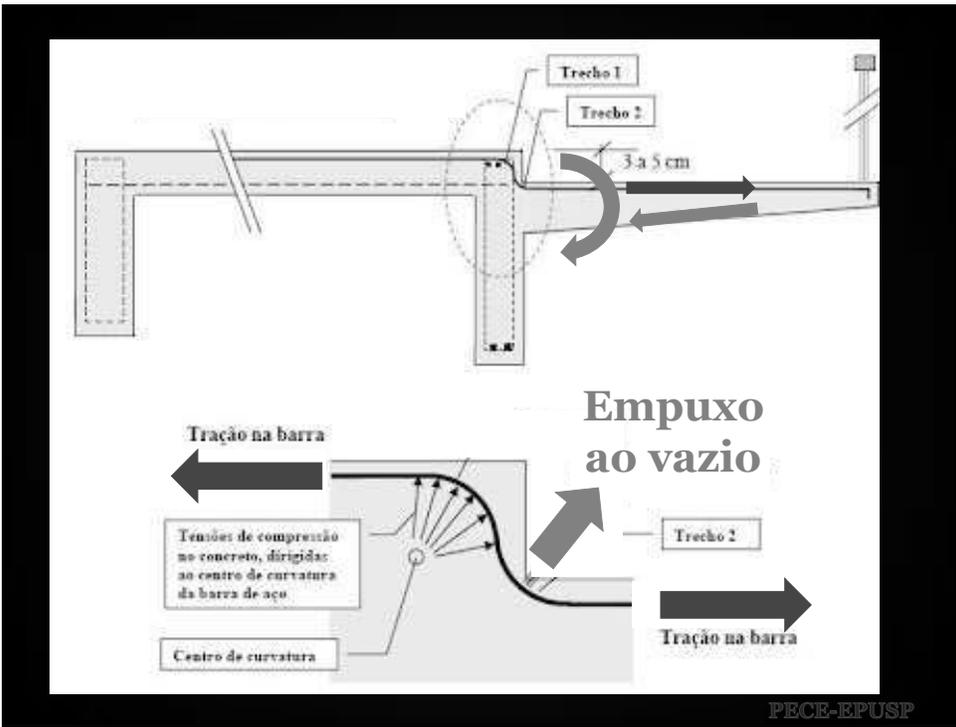
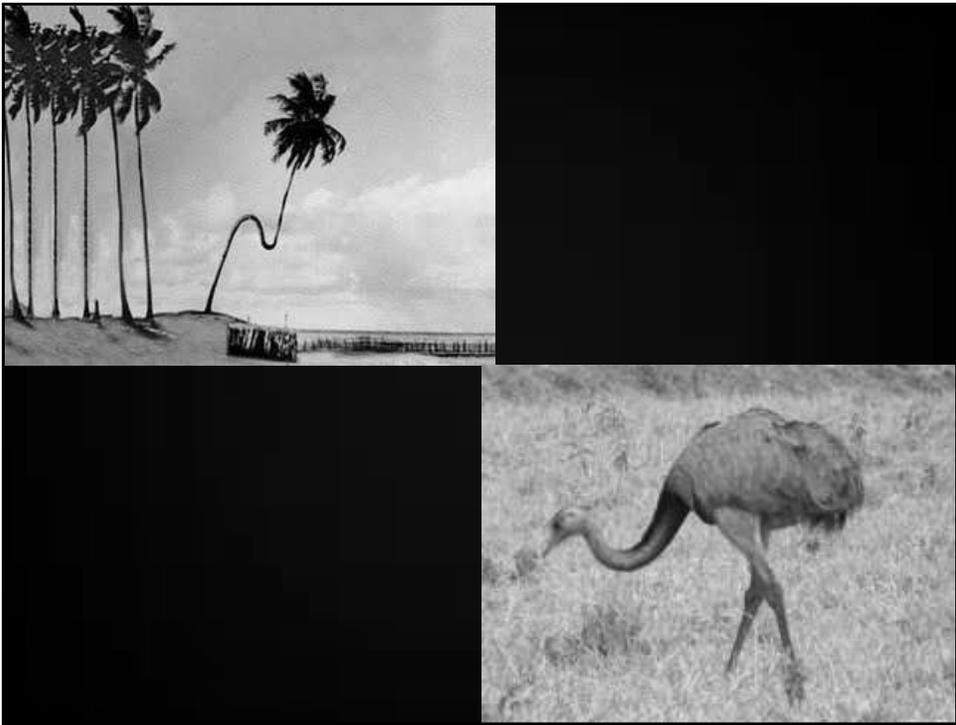


**“Engarrafamento”
de armaduras**

**O famoso gogó da
Ema...**

PECE-EPUSP







PECE-EPUSP

OBRIGADO!



"do Laboratório de Pesquisa aos Canteiros de Olorus"

www.concretophd.com.br

PECE-EPUSP