

---

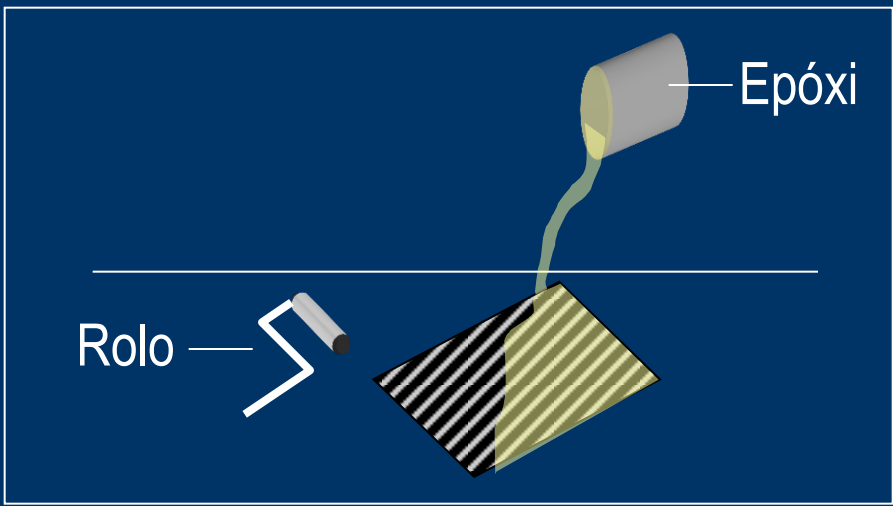
# Reforço estrutural com polímeros reforçados com fibras colados externamente

---

Material de apoio a disseminação do uso de FRP disponível em  
SIMTReC - Centre for Structural Innovation and Monitoring  
Technologies (antigo ISIS Canada) <http://simtrec.ca/about-us/>

## 1 Wet lay-up

Usado com mantas/tecidos flexíveis  
Reforço saturado com resina epoxídica  
Aplicar na superfície do concreto



Resina age como adesivo e como MATRIZ



## ② Pre-curados

Usados com placas rígidas pré-curadas

Aplicar o adesivo no PRF

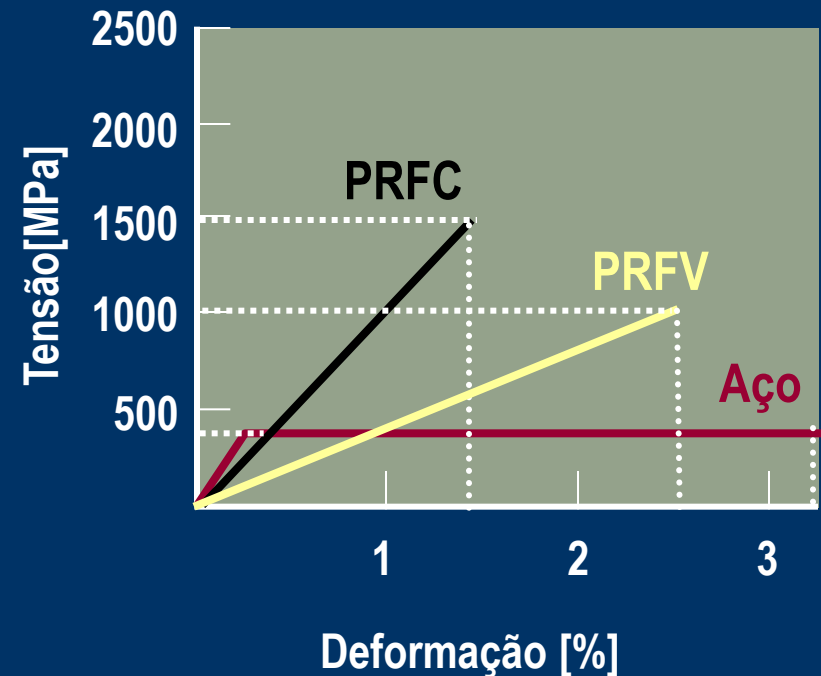
e na superfície do concreto

Não é tão adequado para determinadas formas estruturais



Resina age como  
adesivo e MATRIZ

- Propriedades do PRF (versus aço):
  - Comportamento linear elástico até a falha
  - Sem escoamento
  - Alta resistência última
  - Baixa deformação na falha



# Produtos a base de fibras sintéticas

Barras de fibra  
de vidro

Cabos de  
proentensão -  
carbono




Grelha de  
fibra de  
aramida


Roving de  
fibra de vidro

Roving de  
fibra de  
carbono

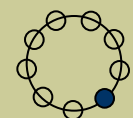
# Comparativo das propriedades do compósito final

Material	Resistência última	Mod. elasticidade	Deformação
PRF vidro	517-1207 MPa	30-55 GPa	2-4,5 %
PRF carbono	1200-2410 MPa	147-165 GPa	1-1,5 %
PRF aramida	1200-2068 MPa	50-74 GPa	2-2,6 %
Aço	483-690 MPa	200 GPa	> 1 %

- Aspecto importante do sucesso do reforço:  Condições do substrato
- Concreto deve transferir as cargas para o adesivo através da tensão de aderência
- As falhas da superfície devem ser corrigidas

- ① Falhas**   
Ruptura do PRF  
Esmagamento do concreto
- ② Seções planas permanecem planas**
- ③ Aderência perfeita entre aço/concreto e PRF/concreto**
- ④ Ancoragem adequada**
- ⑤ PRF é linear elástico até a falha**
- ⑥ Curva tensão x deformação do concreto é parabólica, despreza-se o concreto na região tracionada**
- ⑦ As deformações iniciais no PRF são desprezíveis**





## Fatores de resistência

Material	Ponte	Construção
Aço	$\phi_s = 0.90$	$\phi_s = 0.85$
Concreto	$\phi_c = 0.75$	$\phi_c = 0.6$
PRF	<i>Carbono</i> <i>Vidro</i>	$\phi_{frp} = 0.75$ $\phi_{frp} = 0.50$

- Quatro modos de ruptura potenciais

Esmagamento do concreto antes do escoamento do aço

Escoamento do aço seguido por esmagamento do concreto

Escoamento do aço seguido por ruptura do PRF

~~— Descolamento do PRF —~~

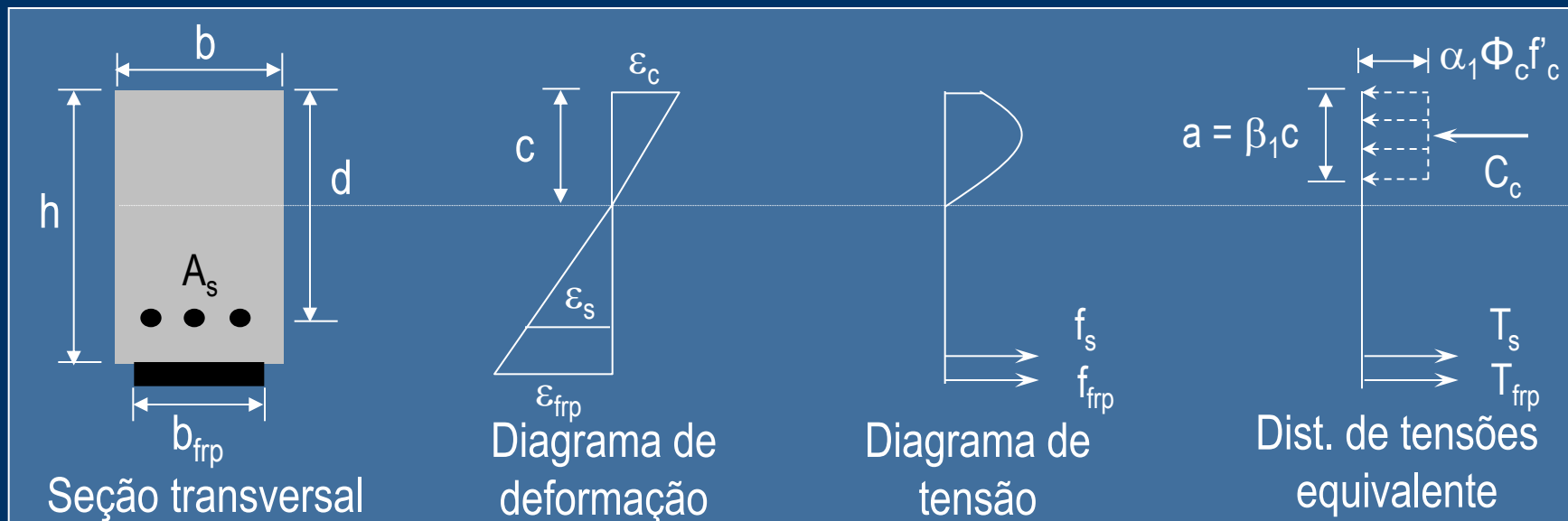


*Descolamento* é prevenido com mecanismos de ancoragem adicional

Adotar modo de falha → Análise → Checar modo de falha

**\*\*\* Adotar deformações iniciais no reforço igual a zero \*\*\***

## Dimensionamento



- Equilíbrio de forças na seção

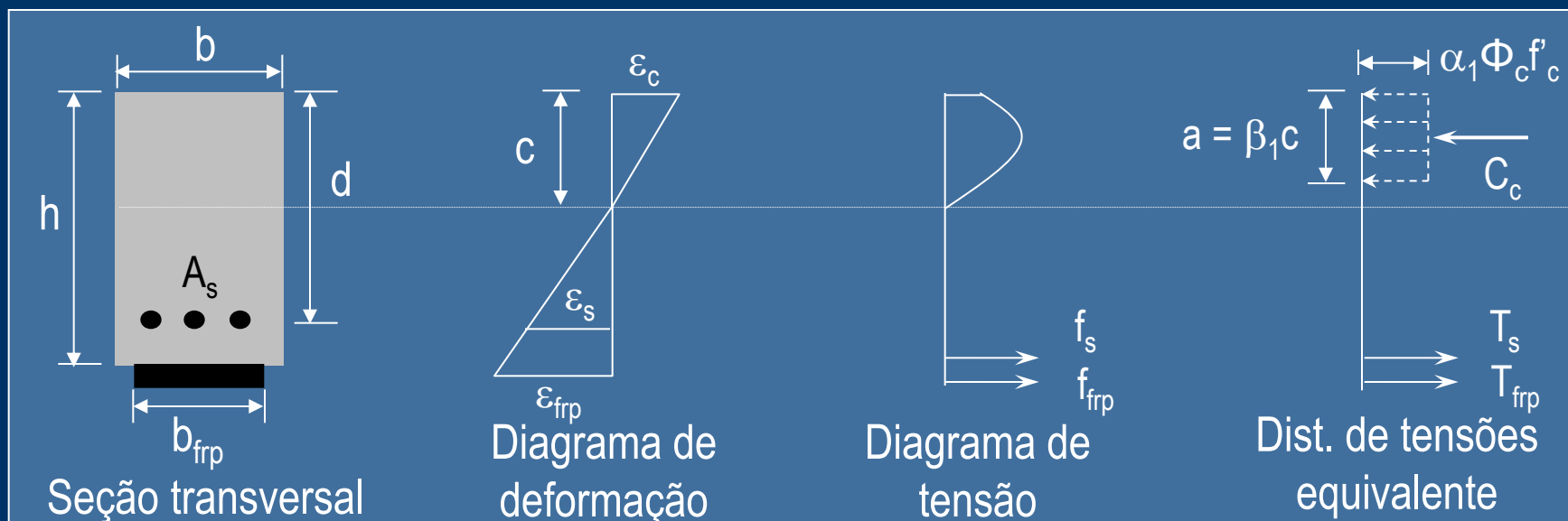
$$T_s + T_{frp} = C_c \quad \text{Eq. 4-1}$$

$$T_s = \phi_s A_s f_s$$

$$T_{frp} = \phi_{frp} A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp}$$

$$C_c = \phi_c \alpha_1 f'_c \beta_1 b c$$

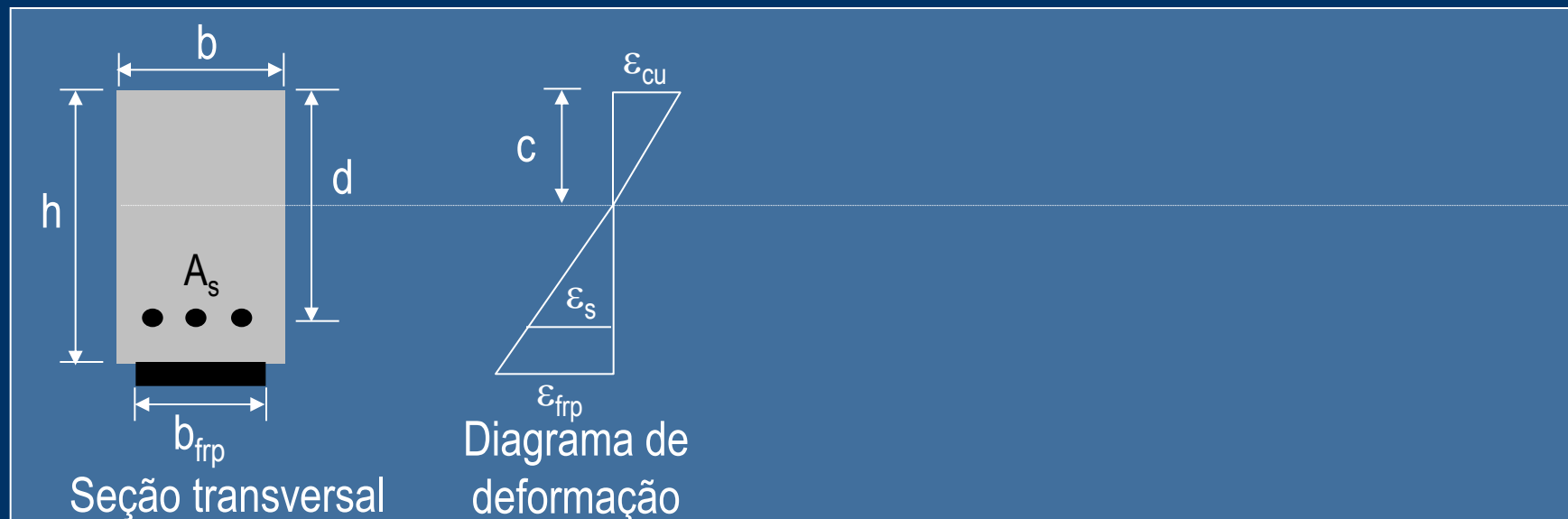
## Dimensionamento



- Aplicar as equações de compatibilidade das deformações para encontrar a posição da linha neutra,  $c$

- Capacidade resistente da seção:

$$M_r = T_s \left[ d - \frac{a}{2} \right] + T_{frp} \left[ h - \frac{a}{2} \right] \quad Eq. 4-5$$



### Passo 1: Verificar modo de falha

Adotar que a seção falha por esmagamento do concreto antes do escoamento do aço

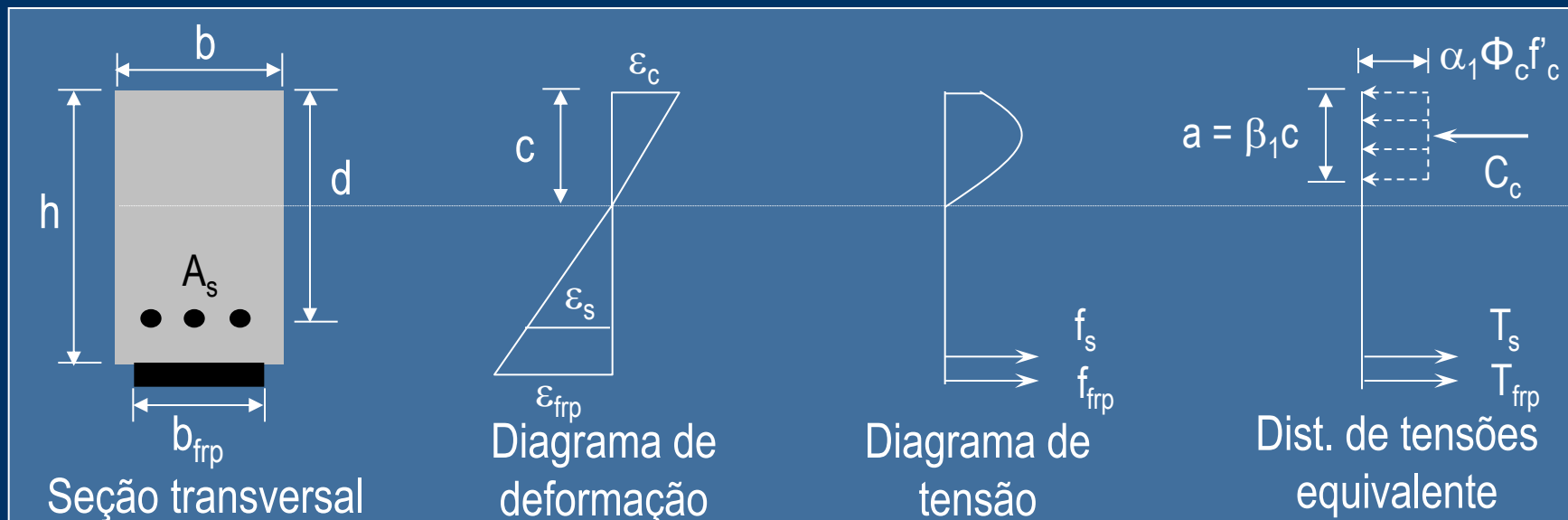
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.0035$$

Então:

$$\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{cu} (h-c)/c \quad Eq. 4-6$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} (d-c)/c \quad Eq. 4-7$$

## Procedimento de análise

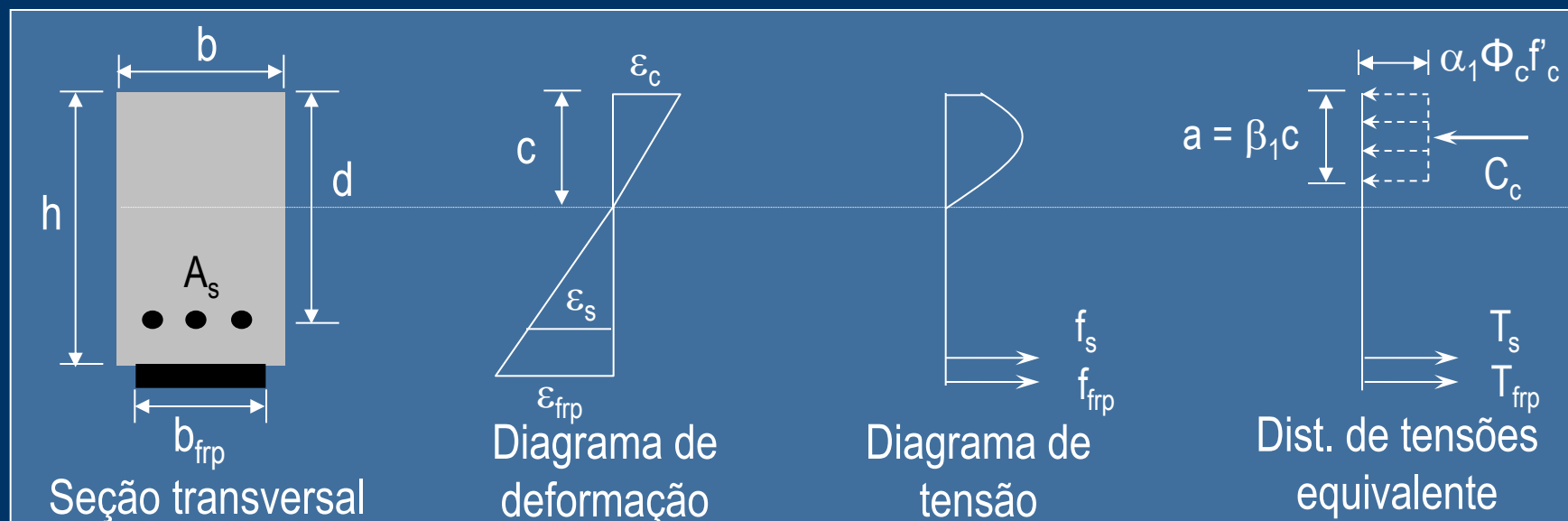


**Passo 2:** Determinar os fatores das tensões de compressão do concreto

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015f'_c > 0.67 \quad \text{Eq. 4-8}$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025f'_c > 0.67 \quad \text{Eq. 4-9}$$

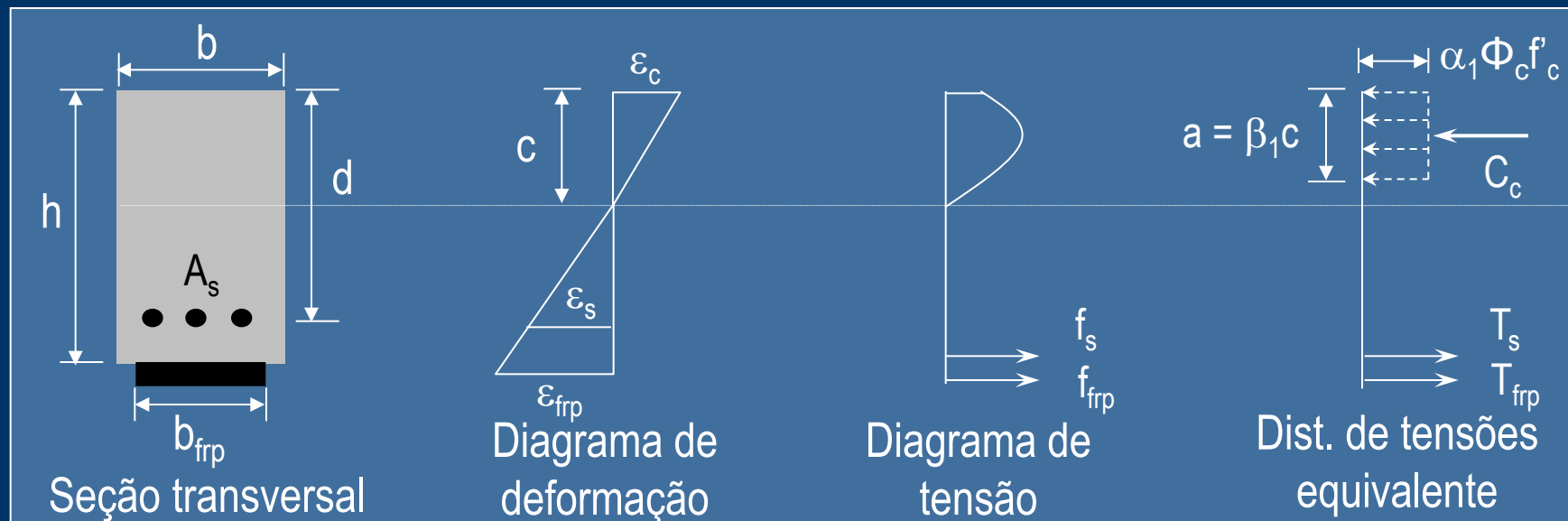
## Procedimento de análise



**Passo 3:** Determinar a profundidade do eixo neutro

$$\phi_s A_s f_s + \phi_{frp} A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp} = \phi_c \alpha_1 f'_c \beta_1 b c \quad Eq. 4-10$$

## Procedimento de análise



### Passo 4: Checar se o modo de falha está correto

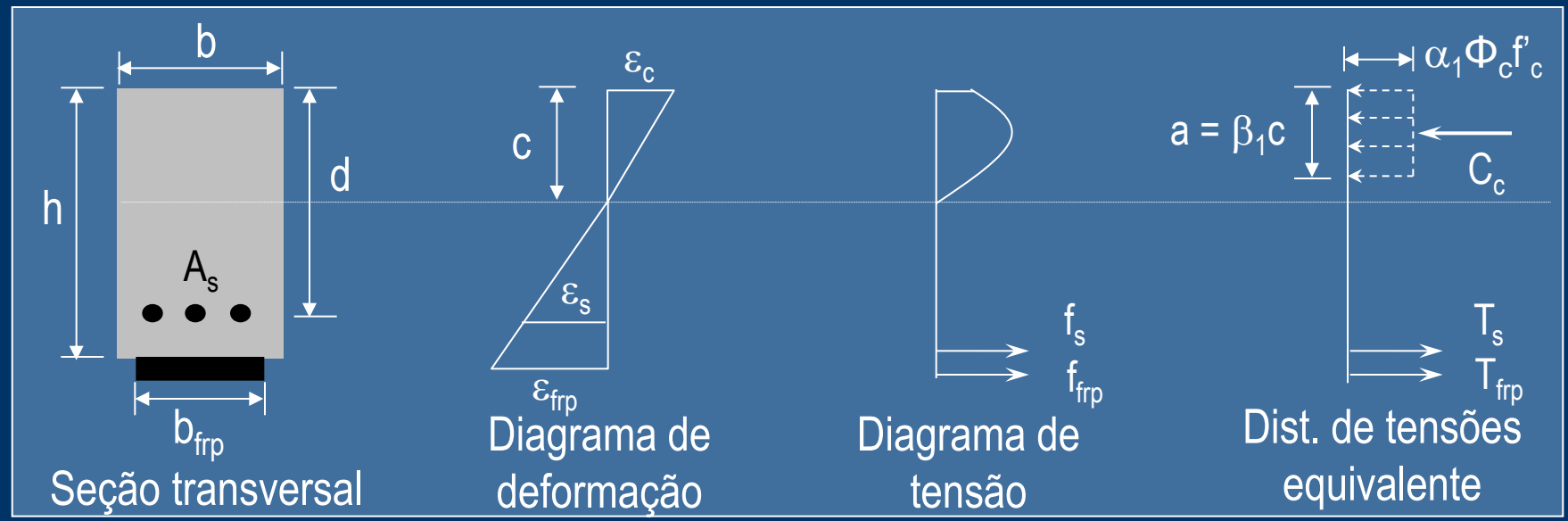
$$\epsilon_{frp} = \epsilon_{cu} (h-c)/c \stackrel{?}{>} \epsilon_{frpu} \quad Eq. 4-11$$

Se verdadeiro, passo 6

Se falso, passo 5



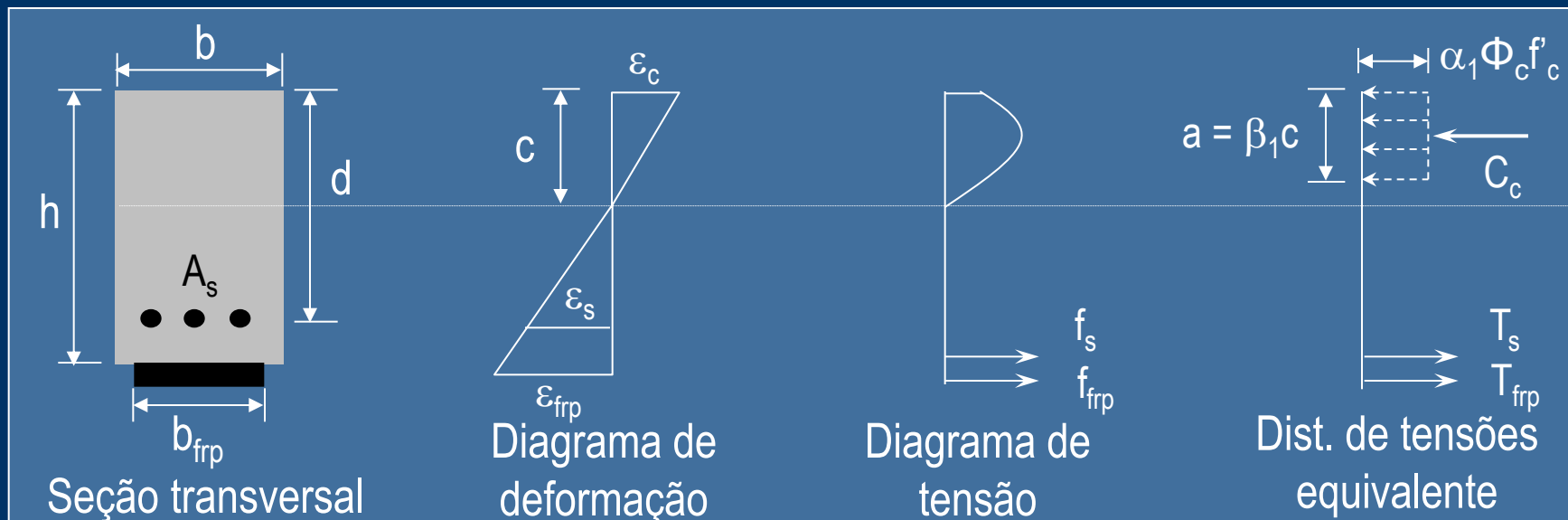
## Procedimento de análise



### Passo 5: Calcular o momento resistente

$$M_r = \phi_s A_s f_y \left[ d - \frac{a}{2} \right] + \phi_{frp} A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp} \left[ h - \frac{a}{2} \right] \quad Eq. 4-12$$

## Procedimento de análise

**Passo 5:** Calcular o momento resistente

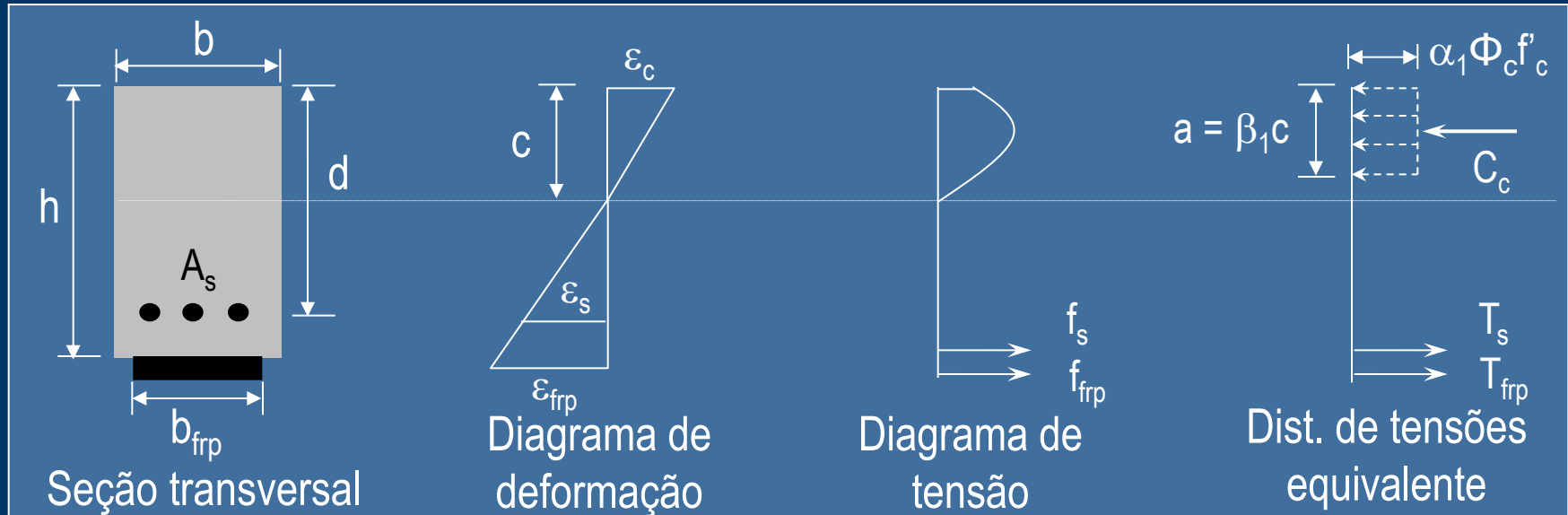
Checar se a deformação de escoamento do aço garante a deformabilidade necessária

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu}(d-c)/c \stackrel{?}{>} \epsilon_y$$

Se sim, OK

Se não, reduzir a quantidade de PRF e recalcular

## Procedimento de análise

**Passo 6:** Adotar modo de falha diferente

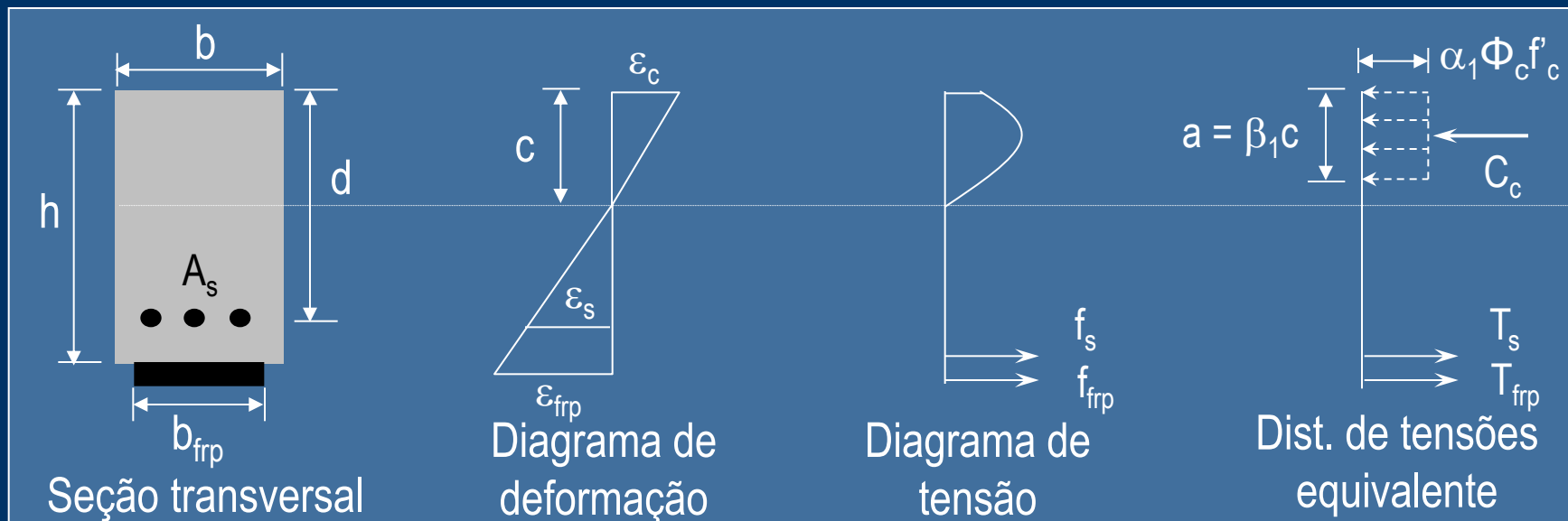
Assumir que falha ocorrerá por ruptura do PRF

Então

$$\epsilon_{frp} = \epsilon_{frpu}$$

$$\epsilon_c < \epsilon_{cu}$$

## Procedimento de análise

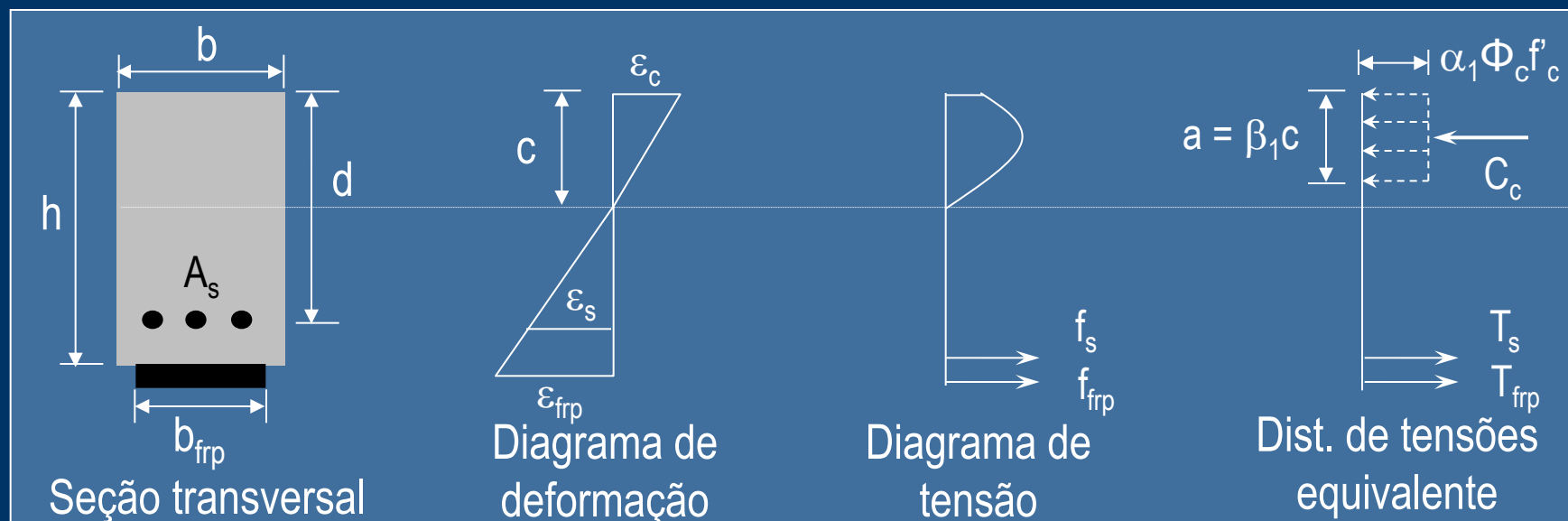


**Passo 7:** Determinar a profundidade do eixo neutro

$$\phi_s A_s f_y + \phi_{frp} A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frpu} = \phi_c \alpha_1 f'_c \beta_1 b c$$

Eq. 4-15

## Procedimento de análise

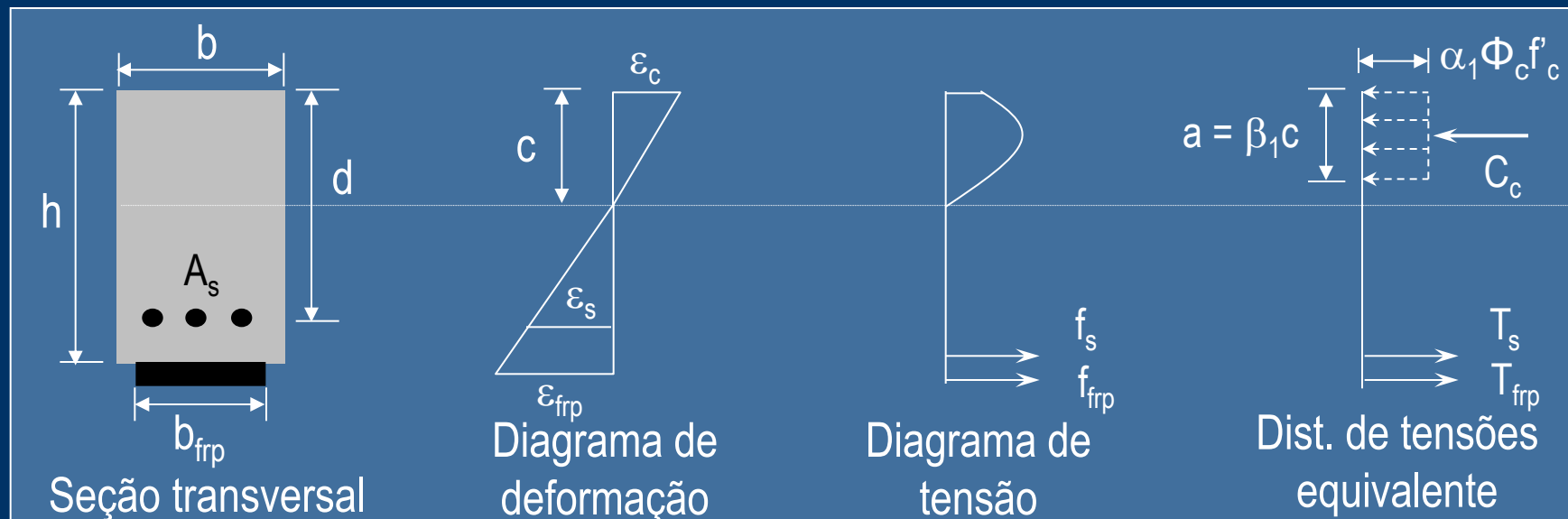


**Passo 8:** Checar se o modo de falha está correto

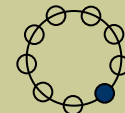
$$\epsilon_c < \epsilon_{cu}$$

$$\epsilon_{frpu} c / (h-c) < \epsilon_{cu}$$

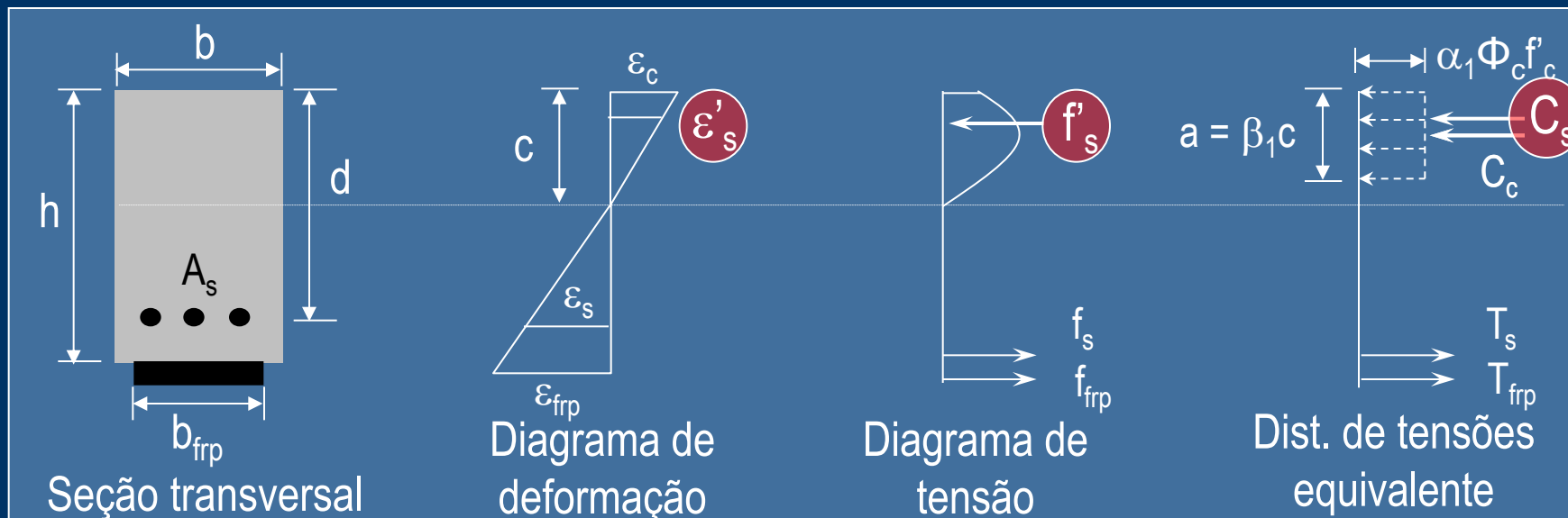
## Procedimento e análise

**Passo 9:** Calcular o momento resistente

$$M_r = \phi_s A_s f_y \left[ d - \frac{a}{2} \right] + \phi_{frp} A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frpu} \left[ h - \frac{a}{2} \right] \quad Eq. 4-17$$

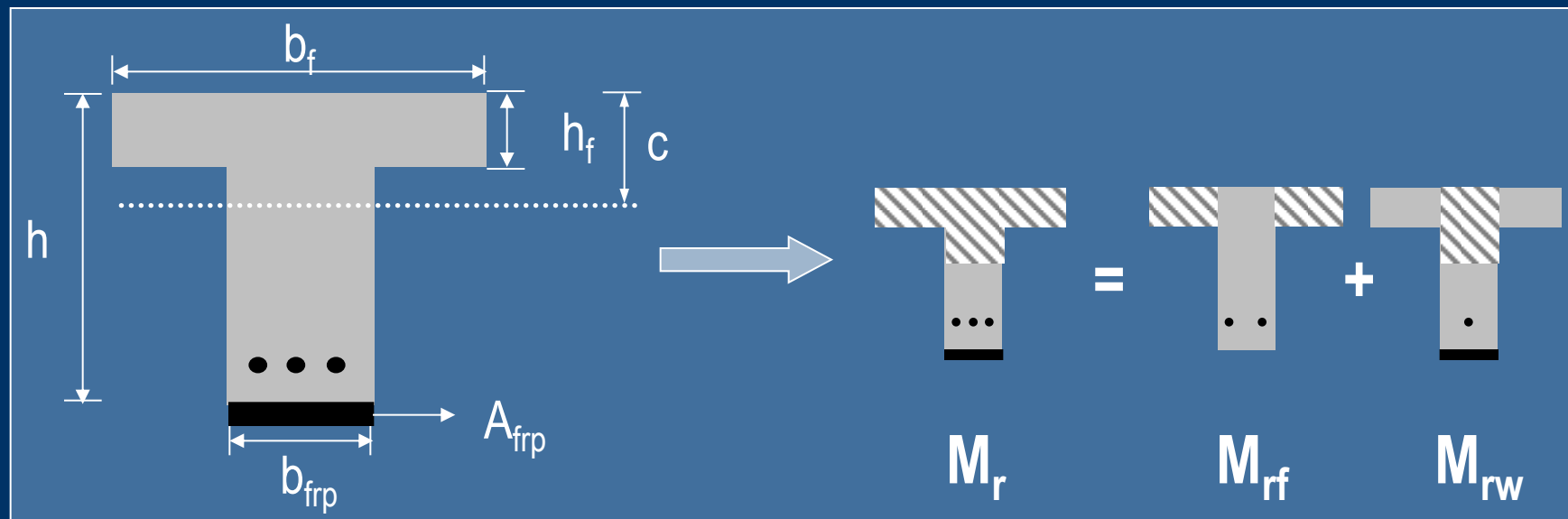


Com aço na compressão



- **Procedimento de análise similar**

Adicionar a resultante de compressão



- Procedimento de análise similar

Eixo neutro da mesa: tratar como uma seção retangular

Eixo neutro na alma: tratar como uma seção "T"



# Exemplos de aplicação



# Exemplos de aplicação



# Exemplos de aplicação



# Exemplos de aplicação

