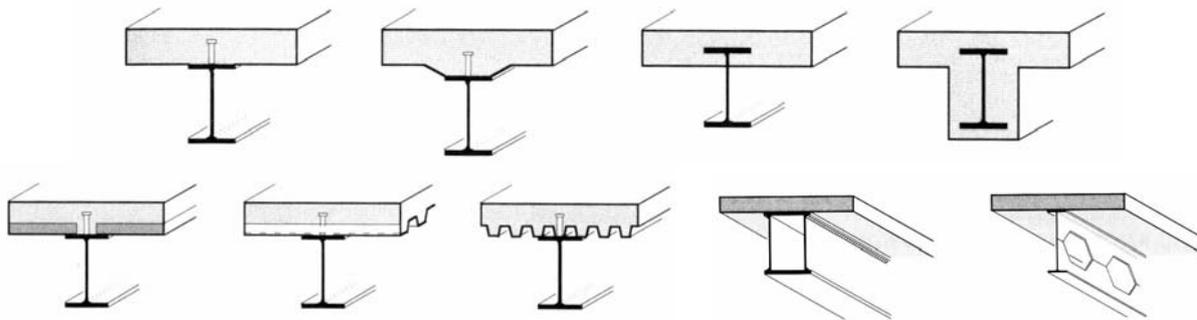


# ESTRUTURAS MISTAS AÇO-CONCRETO

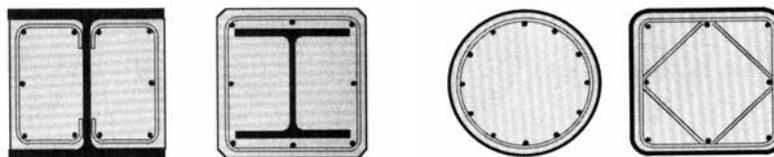
## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Regulamentação

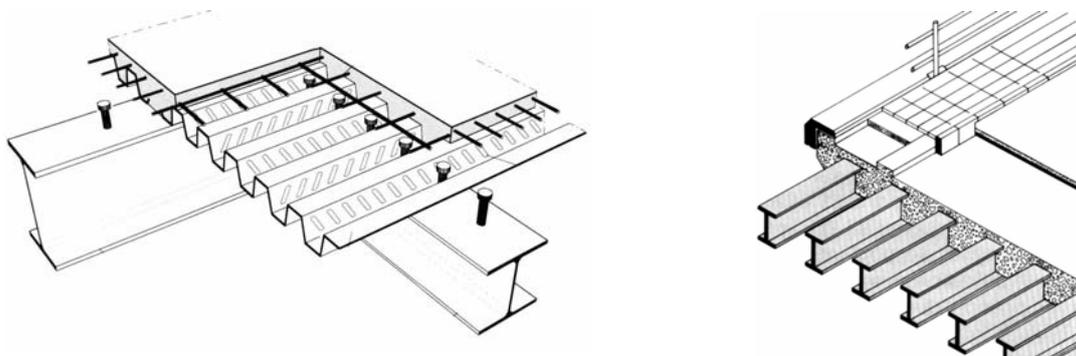
- Estrutura mista → elementos estruturais → (lajes, vigas, pilares e ligações) → seções mistas aço-concreto.



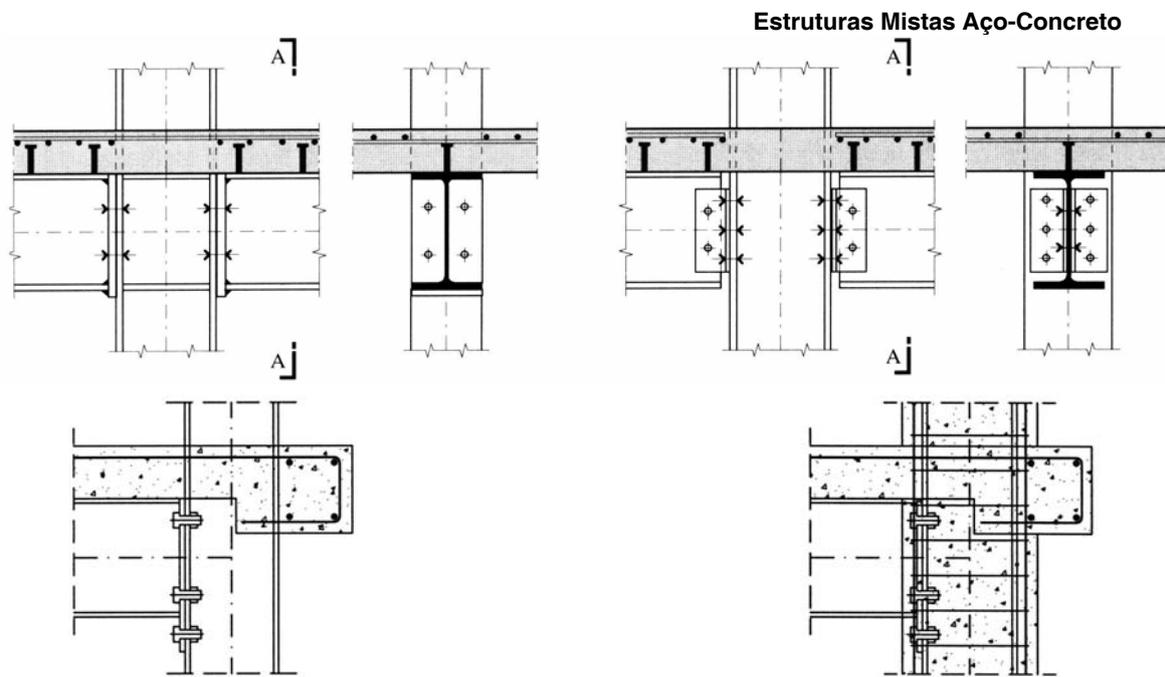
Seções mistas em vigas



Seções mistas em pilares



Lajes mistas



## Ligações em estruturas mistas

- Estruturas mistas → Edifícios, pontes, estacionamento, entre outros.



Edifício em estrutura mista



Ponte mista



Parque de estacionamento

- Comportamento global dos elementos mistos  
→ **ligação ao cisalhamento aço-concreto** →  
resistência ao cisalhamento → ao longo das  
superfícies de contato aço-concreto → **atrito**

ou por **processos mecânicos** → destaca → conectores.

□ **Principais vantagens** → **Estrutura Mista:**

- Utilização de médios e grandes vãos;
- Elevada resistência ao fogo;
- Bom comportamento → estabilidade;
- Uso de formas de aço colaborantes;
- Resistência das lajes de concreto →, necessárias por razões construtivas.

□ A concepção e o dimensionamento de estruturas mistas → **EC4 (EN1994) Projeto de estruturas mistas aço-concreto.**

□ Eurocódigo 4 está dividido:

- Pt 1-1: Regras gerais e para edifícios
- Pt 1-2: Resistência ao fogo
- Pt 2: Pontes

□ Eurocódigo 4 usado consistentemente com:

- EN 1990 Euroc. 0: Bases de Projeto
- EN 1991 Euroc. 1: Ações em Estruturas
- EN 1992 Euroc. 2: Projeto de Estruturas de Concreto
- EN 1993 Euroc. 3: Projeto de Estruturas de Aço
- EN 1998 Euroc. 8: Disposições p/ Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos.

□ Estrutura mista → dimensionada para desempenhar com eficácia as funções para as quais foi concebida (vida útil):

- i)* Colapso → **estados limites últimos;**
- ii)* Adequado desempenho em serviço → **estados limites de utilização;**
- iii)* **Durabilidade** → proteção a corrosão, etc.
- Estrutura mista → **concreto:**
  - resistência à compressão,
  - diminuição da esbeltez dos elementos em aço
  - proteção do aço contra a corrosão ou temperaturas elevadas em condições de incêndio.
- Estrutura mista → verificada em duas fases:
  - **i) Fase de construção**
  - **ii) Fase de utilização.**

## 1.2. Mecânica e Geométrica dos materiais

- Estrutura mista → diversos materiais:
  - **concreto,**
  - **armaduras de concreto armado,**
  - **aço estrutural,**
  - **formas perfiladas** em lajes mistas
  - **dispositivos de ligações** (parafusos, conectores, soldas, entre outros).
- Propriedades dos materiais + normas aplicáveis → cap. 3 EC 4 (EN 1994-1-1) →

remete EC 2 e 3 (Projeto de estruturas de concreto, Projeto de estruturas de aço).

- Principais características mecânicas dos concretos → EC 4 → + uso → concretos leves

Valor característico da resistência à compressão  $f_{ck}$  (cilindro), Valor médio da resistência à tração  $f_{ctm}$  e Módulo de elasticidade secante médio  $E_{cm}$

Classe	C20/ 25	C25/ 30	C30/ 37	C35/ 45	C40/ 50	C45/ 55	.....	C60/ 75
$f_{ck}$ (MPa)	20	25	30	35	40	45	.....	60
$f_{ctm}$ (MPa)	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	.....	4.4
$E_{cm}$ (GPa)	30	31	33	34	35	36	.....	39

Valor nominal do coeficiente de Poisson → cálculos elásticos → = 0.2.

- **Aço estrutural** → classes mais utilizadas → S235, S275 e S355 → tensão de escoamento  $f_y$  e de ruptura  $f_u$ , → EN 1993: EC3-1-1.
- EC4 → aços + resistentes → S 420 e S 460.

- O aço → **formas perfiladas** → lajes mistas → tensões de escoamento → 235 e 460 MPa → espessuras → 0.7 e 1.5 mm → galvanizadas
- Tensão de escoamento  $f_{yb}$  e de ruptura à tração  $f_{ub}$  → **parafusos** → EN 1993: EC3-1-8
- **Conectores** →, qualidade compatível com o desempenho → método de fixação → propriedades mecânicas devem obedecer a:
  - A relação entre a tensão última  $f_u$  e a tensão de escoamento  $f_y$  não deve ser inferior a 1.2;
  - Alongamento na ruptura → comp. inicial =  $5.65 \cdot \sqrt{A_0}$  ( $A_0$  área seção trans. inicial)  $\geq 12\%$ .

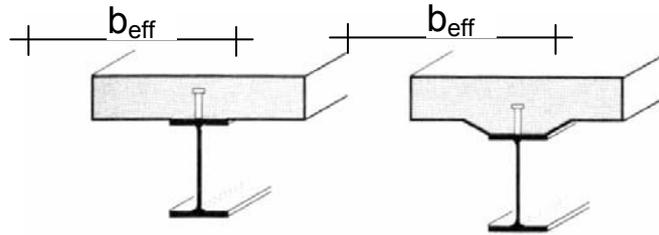
### 1.3. Análise global de estruturas mistas

#### 1.3.1. Modelagem

- Esforços e deslocamentos → **análise global elástica** ou → **análise global plástica**.
- Análise → **primeira ordem** ou de **segunda ordem** ( $P-\Delta$  globais ou efeitos  $P-\delta$  locais).
- **Modelagem** de uma estrutura mista → análise global de esforços e deslocamentos → fatores:
  - **i)** características de deformabilidade e rigidez;
  - **ii)** estabilidade global e dos seus elementos;
  - **iii)** comportamento das seções transversais,
  - **iv)** comportamento das ligações;
  - **v)** imperfeições;
  - **vi)** deformabilidade dos apoios.

- Estrutura mista → efeitos adicionais:
  - i) grau de ligação entre os materiais;
  - ii) seção efetiva dos elementos;
  - iii) fluência, retração fissuração do concreto
  - iv) sequência de construção.
- Estabilidade da estrutura, imperfeições, efeitos de 2ª ordem → semelhante → EC3-1-1
- Métodos simplificados → EC3-1-1 → método de amplificação ou o método simplificado → carga crítica → continuam aplicáveis.
- Imperfeições → est. mistas → = outras estrut:
  - i) tensões residuais;
  - ii) comportamento não linear do material;
  - ii) excentricidades nas ligações;
  - iii) excentricidades das cargas;
  - iv) falta de verticalidade;
  - v) falta de linearidade, etc...
- EC4 → (como EC3) → 2 níveis de imperfeições:
  - i) imperfeições globais da estrutura
  - ii) imperfeições locais dos elementos.
- Ligações mistas → rotuladas, semi-rígidas ou rígidas → Em geral nas estruturas mistas → ligações → elevada resistência e rigidez
- Estrutura mista → propriedades efetivas das seções → largura efetiva de concreto ( $b_{eff}$ ).

- Largura → dependente → “shear lag”, → valores diferentes → momento fletor + ou -



### Seção efetiva de vigas mistas

- EC4 → análise global elástica de esforços → simplificada → **seção efetiva constante.**
- Vigas apoiadas nas extremidades →  $b_{eff}$  → seção de meio vão
- Balanços →  $b_{eff}$  → seção apoio = longo do vão

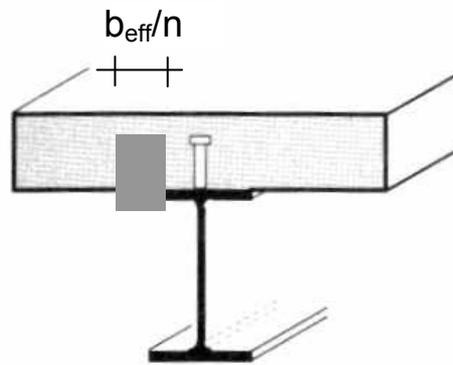
### 1.3.2. Análise da estrutura

- **Estado limite último** → análise elástica ou uma análise plástica; seções → dimensionadas → capacidade plástica.
- **Estado lim. utilização** → análise glob. elástica
- **Análise global elástica** → estrutura mista → **conceito de homogeneização de seções** → dividir área concreto por coef. homogeneiz:

$$\square n = E_a / E_c ,$$

- $E_a$  o módulo de elasticidade do aço
- $E_c$  o módulo de elasticidade do concreto

- **Fluência e retração** do concreto → coeficiente de homogeneização → **módulo de elasticidade reduzido** ( $E_c$ ) → concreto
- Classe 1 ou 2 → EC4 → simplificada desprezar o efeito da retração



### Homogeneização em aço

Estruturas pouco deform., não protendidas e não destinadas a armazenamento → efeito da fluência →  $E_c = E_{cm}/2$  → coeficiente de homogeneização →  $E_{cm}$  → módulo de elasticidade secante p/ cargas curta duração.

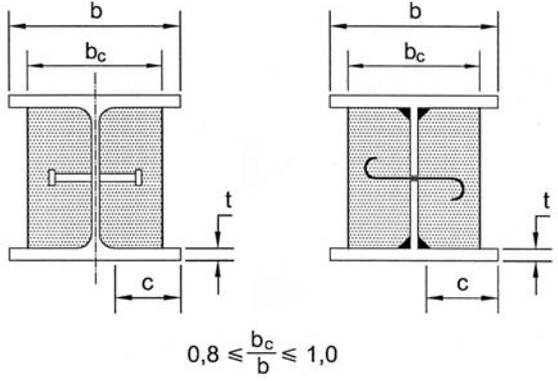
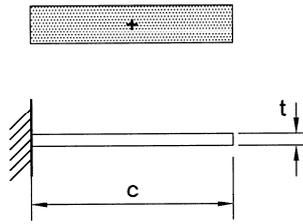
**Sequência de construção** → considerada → análise de elementos mistos classe 3 & 4. → classe 1 & 2 → efeito pode ser desprezado.

Análise elástica de vigas contínuas ou pórticos mistos → dependendo da classe das seções → até 40% redist. momentos → Quadro 5.1 EC4

- **Análise global plástica de uma estrutura mista** → suficientemente compactas (em geral de classe 1) → elevada capac. rotação → simétricas e cont. lateralmente → 5.4.5 EC4).

## 1.4. Classificação de seções mistas

- Classificação de seções mistas → EC4 → semelhante → EC3 → 4 classes
- Classe de uma seção mista → mais desfavorável → sinal do momento fletor.
- Sub-capítulo 5.5 do EC4 → critérios para a classificação de seções mistas → + relevantes: Viga mista momento (+) → **mesa** comprimida → flambagem lateral seja impedida → ligação efetiva (conect.) a laje → Classe 1 → noutras situações → mesa → classif. → seções de aço.

<p>Seção laminada Seção soldada</p>  <p style="text-align: center;"><math>0,8 \leq \frac{b_c}{b} \leq 1,0</math></p>		 <p>Distribuição de tensões (compressão positiva)</p>
Classe	Tipo	Limite
1	Laminada ou soldada	$c/t \leq 9\varepsilon$
2		$c/t \leq 14\varepsilon$
3		$c/t \leq 20\varepsilon$

**Alma** → vigas mistas → Classe 3 (seção de aço) → considerada → Classe 2, envolvida em concreto → ligado mecanicamente ao aço → estribos/conectores → critérios → 5.5.3(2) EC4

**Mesa** → tipo de seções → classificada → quadro 5.2 do EC4 → 5.5.3 (2) do EC4.

Classificação de mesas em seções parcialmente envolvidas em concreto

- Estrutura mista → **classe 1 ou 2** por:
  - i) pode ser usada uma análise global plástica;
  - ii) Dimensionamento das seções → análise plástica → acréscimos de resistência de 20 a 40% → vigas → dimensionamento elástico;
  - iii) maior possibilidade de redistri. esforços;
  - iv) EC4 só permite o dimensionamento de vigas em interação parcial → classe 1 ou 2.
- Em fase de construção → enquanto o concreto não endurece → seções → classificadas e analisadas → apenas a parte de aço

## 2. LIGAÇÃO AO CISALHAMENTO

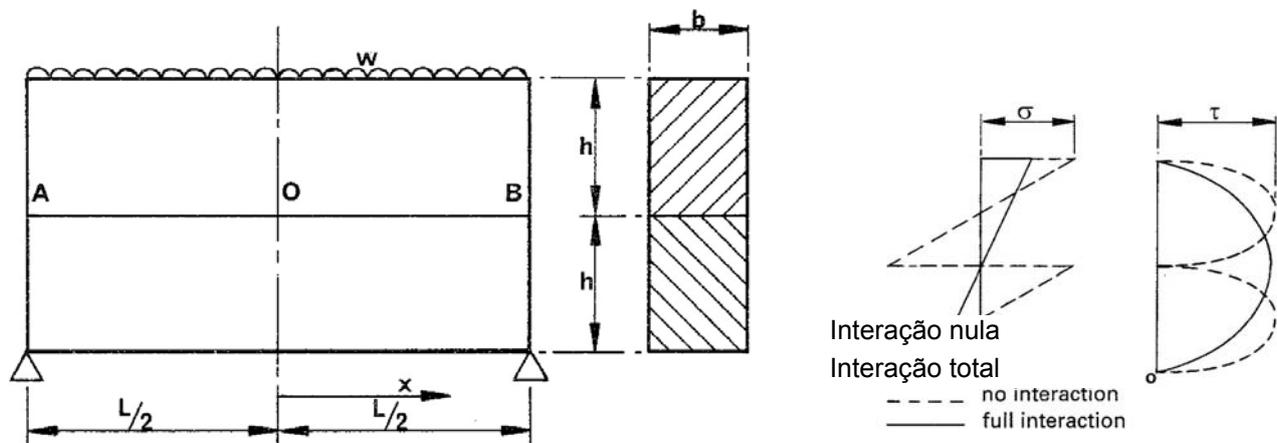
### 2.1. Introdução

- Comportamento global → viga, pilar ou laje mista → **ligação ao cisalhamento aço-concreto** → variação → momento e cortante → escorregamento → contato aço/concreto → se

não absorvidos → comportamento conjunto → Resistência → **grau de interação**

## 2.2. Grau de interação

- Elemento → dois materiais:
  - Interação total;
  - Interação parcial;
  - Interação nula.
- Viga bi apoiada → carga linearmente distrib.  $w$



### Viga simplesmente apoiada

- Não existe qualquer elemento de ligação entre as duas partes ao longo da superfície  $A-B$  → **interação nula** →, tensões + deformações → avaliadas em separado →, carga atuante =  $w/2$  em cada viga → momento de inércia →  $bh^3/12$ .
- Momento fletor máximo  $M_{máx} = w \cdot L^2/16$  → esforço cortante máximo  $T_{máx} = w \cdot L/4$ , → tensões normais e tangenciais máximas e a deformação máxima da viga a meio vão, são:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot w \cdot L^2}{8 \cdot b \cdot h^2} ; \tau_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot w \cdot L}{8 \cdot b \cdot h} ;$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{64 \cdot E \cdot b \cdot h^3}$$

Momento fletor → distância  $x$  → meio vão é:

$M(x) = w \cdot (L^2 - 4 \cdot x^2) / 16$ , → deform. longit. → fibras inf. da parte superior → = módulo → deform. máxima na fibra sup. da parte inf.:

$$\varepsilon(x) = \frac{M(x) \cdot z_{m\acute{a}x}}{E \cdot I_y} = \frac{3 \cdot w}{8 \cdot E \cdot b \cdot h^2} \cdot (L^2 - 4 \cdot x^2)$$

$$z_{m\acute{a}x} = h/2$$

Diferença → (extensão de deslizamento) → 2 fibras anteriores →  $ds/dx = 2 \cdot \varepsilon(x)$ .

Deslizamento → 2sup → distância  $x$  → meio vão:

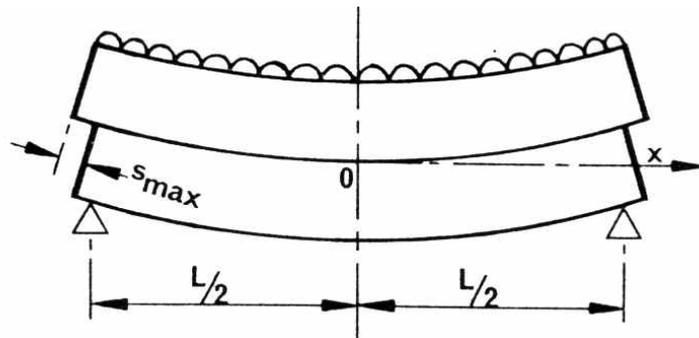
$$\frac{ds}{dx} = 2 \cdot \varepsilon(x) = \frac{3 \cdot w}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^2} \cdot (L^2 - 4 \cdot x^2)$$

$$\Rightarrow s = \frac{w}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^2} \cdot (3 \cdot L^2 \cdot x - 4 \cdot x^3) + C$$

$C = 0 \rightarrow s(x=0) = 0$  (seção de meio vão mantém-se plana).

$x = L/2 \rightarrow$  deslizamento máximo:

$$s_{m\acute{a}x} = w \cdot L^3 / (4 \cdot E \cdot b \cdot h^2)$$



Deformada de uma viga com interação nula

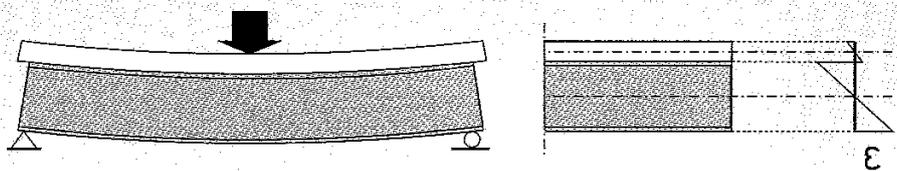
- Se a ligação entre as duas partes ao longo da superfície  $A-B \rightarrow$  **interação total**  $\rightarrow$  tensões e as deformações são avaliadas  $\rightarrow$  peça única  $\rightarrow$  tensões normais e tangenciais máximas e deformação máxima  $\rightarrow$  meio vão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot w \cdot L^2}{16 \cdot b \cdot h^2}; \tau_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot w \cdot L}{8 \cdot b \cdot h};$$

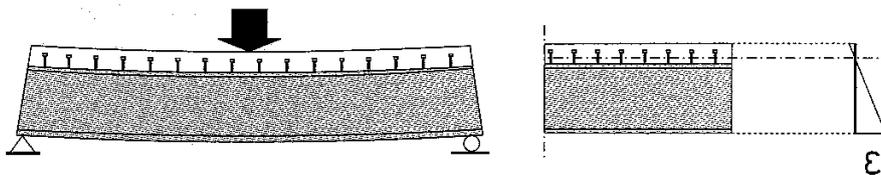
$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{256 \cdot E \cdot b \cdot h^3}$$

- Tensão tangencial máxima  $\rightarrow$  igual nos dois casos  $\rightarrow$  tensão normal  $\rightarrow$  metade quando existe interação total

- Deformação vertical máxima da viga → interação total → 25% → com interação nula.
- **Interação parcial** → intermedária → interação total e a interação nula
- Vigas →  $L/(2 \cdot h) = 20$ , →  $s_{máx}$  → 1/10 da deformação vertical → conclui-se → ligação ao cisalhamento longitudinal → superfície de contato → deve ser muito rígida p/ ser efetiva.



a) Interação nula



b) Interação total

Viga mista com interação nula e interação total

- Ligação ao cisalhamento → cisalhamento longitudinal por unidade de comprimento →  $V_x$  → **fluxo de cisalhamento**:

$$v_x = \tau_x \cdot b = \frac{3 \cdot w \cdot x}{4 \cdot h}$$

$$\tau_x = (3 \cdot w \cdot x) / (4 \cdot b \cdot h),$$

Tensão tangencial ao nível do eixo neutro numa seção à distância  $x$  da seção de meio vão.

□ Fluxo de cisalhamento total em meia viga (esforço de escorregamento) → integração da equação anterior, é:  $3 \cdot w \cdot L^2 / 32 \cdot h$ .

□ Análise elástica do escorregamento → conectores → resistir ao esforço de cisalhamento longitudinal → espaçados de acordo com o fluxo de cisalhamento → se a resistência ao cisalhamento de um conector →  $P_{Rd}$ , → **espaçamento  $p$**  entre conectores →

$$p \cdot v_x \leq P_{Rd}, \text{ equivalente a: } p \leq \frac{4 \cdot P_{Rd} \cdot h}{3 \cdot w \cdot x}$$

Viga em análise → carga uniform. distribuída → distribuição triangular de conectores → = diagrama de esforço cortante).

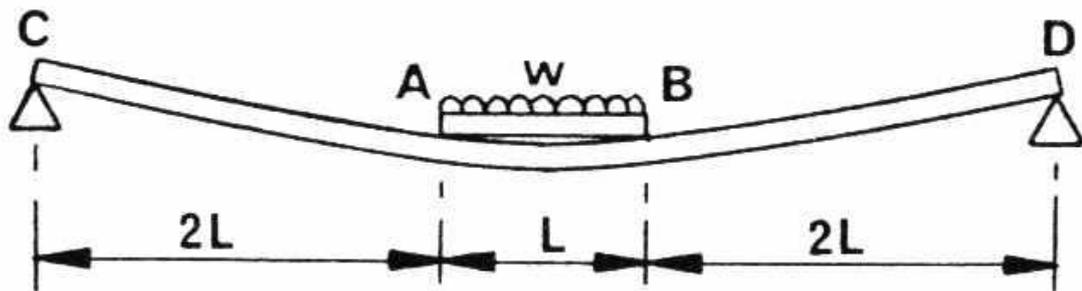
Se → redistribuição de tensões → possível → conectores → igualmente espaçados → dimensionamento de vigas mistas → EC4

## 2.3. Forças de levantamento

□ Tensão normal à interface AB → sempre de compressão → exceto nas extremidades

□ Tensão → tração → **forças de levantamento** → guindastes móveis

suspensos nos elementos de aço de uma laje de concreto mista → situações como:



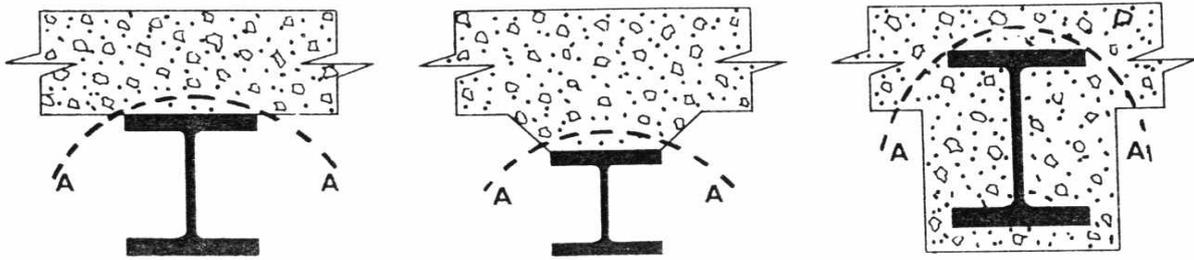
Forças de levantamento

- Conectores → prática → resistir → **escorregamento e ao levantamento**
- Forças de levantamento → normalmente muito menores → cisalhamento longitudinal → dimensionamento dos dispositivos de ligação → não se costuma considerar o seu efeito → conectores → formato → garantam alguma resistência ao levantamento.

## 2.4. Métodos de Ligação ao Cisalhamento Aço-Concreto

### 2.4.1. Aderência

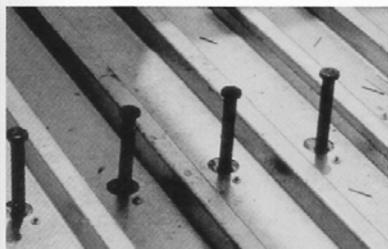
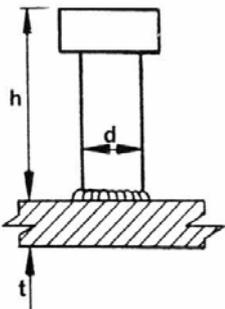
- Aderência ou atrito → processo + simples de ligação aço-concreto → peça mista → apenas resiste → forças de escorregamento baixas
- Vigas mistas → escorregamento → superfícies do tipo A-A → valores elevados → não é possível evitar o deslizamento só por atrito.



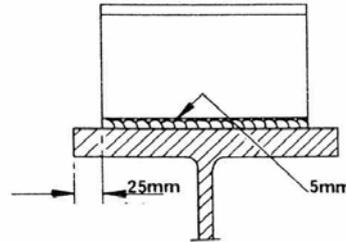
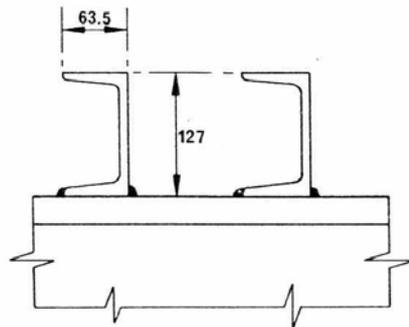
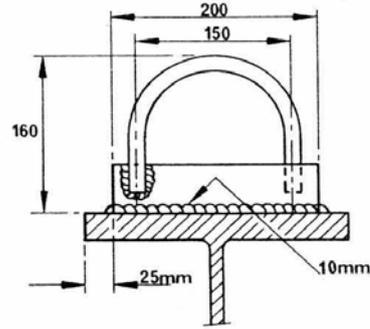
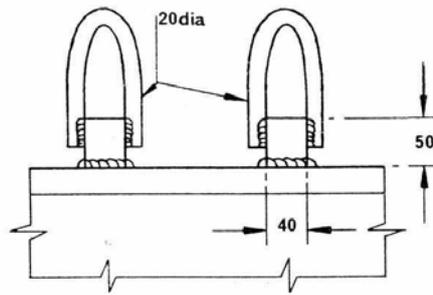
## Superfícies de escorregamento em vigas mistas

### 2.4.2. Conectores

- Conectores de cisalhamento → mais usado → **conector circular de cabeça tipo Stud** → diâmetro → 13 a 25 mm → comprimento  $h$  → 65 e 100 mm → resistência → ordem de 150kN.
- Principais vantagens deste tipo de conector:
  - solda fácil e rápida;
  - não são obstáculo à armaduras das lajes;
  - tem resistência e rigidez ao cisalhamento = em qualquer direção normal ao seu eixo.

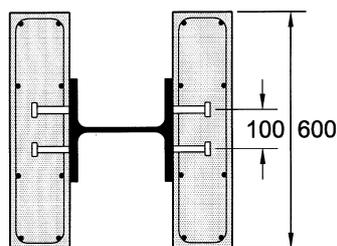
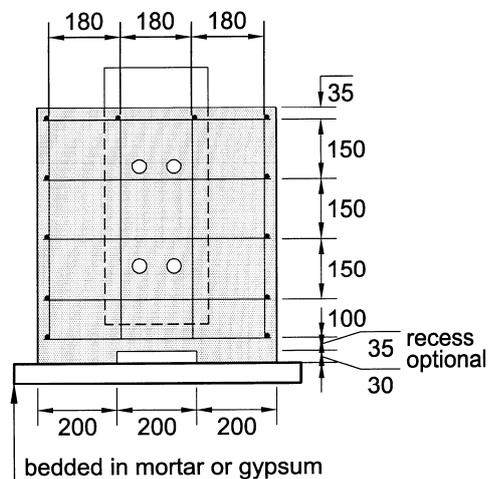
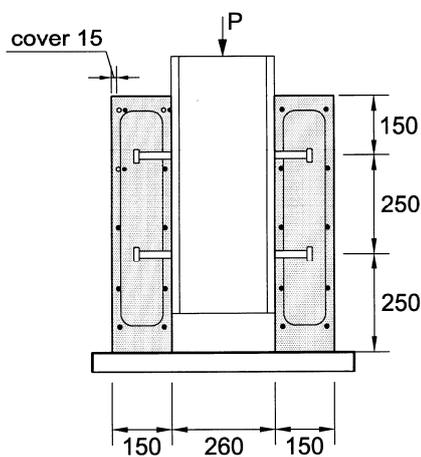


## Conectores circulares de cabeça tipo Stud



## Outros tipos de conectores de cisalhamento

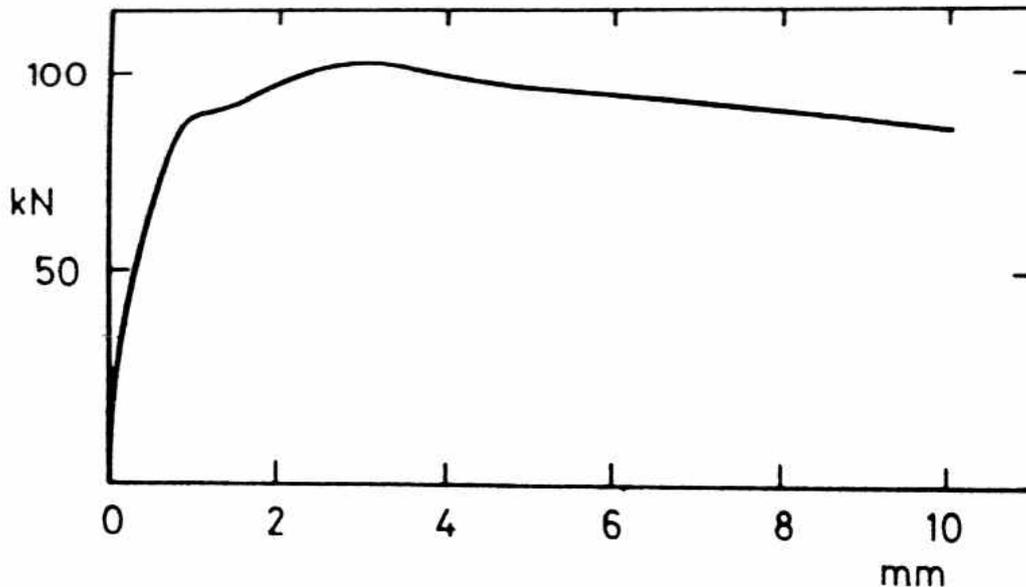
- Comportamento de um dado tipo de conector → testes modelos simples → curva carga-deslizamento até ruptura.



- reinforcement: ribbed bars  $\varnothing 10\text{mm}$  resulting in a high bond with  $450 \leq f_{sk} \leq 550 \text{ N/mm}^2$
- steel section: HE 260 B or 254 x 254 x 89 kg U.C.

## Ensaio de conectores de cisalhamento

- Curvas → conector circular de cabeça com 19 mm de diâmetro → laje mista
- EC4 → deslizamento → obtido através de um ensaio → é superior a 6 mm → dúti.



### Carga-deslizamento de um conector Stud

- Resistência ao cisalhamento → conector circular → menor dos valores entre:
- **resistência do conector**

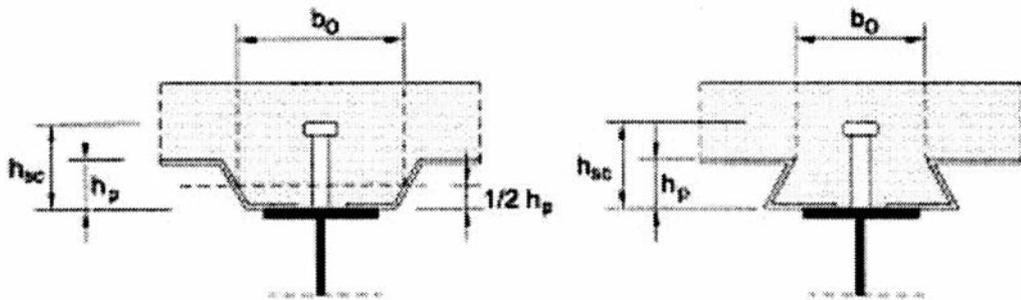
$$P_{Rd} = \frac{0.8 \cdot f_u \cdot (\pi \cdot d^2 / 4)}{\gamma_v}$$

**resistência do concreto envolvente,**

$$P_{Rd} = \frac{0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v}$$

- 6.6.3 EC 4 →  $f_u$  → resist. tração aço conector < 500 MPa →  $f_{ck}$  e  $E_{cm}$  → resist. caract. concreto comp. (cp cilíndrico) e módulo de elast. secante

- $\alpha = 0.2 \cdot [(h_{sc}/d) + 1]$  para  $3 \leq (h_{sc}/d) \leq 4$
- $\alpha = 1$  para  $(h_{sc}/d) > 4$ .
- $h_{sc}$  e  $d$  ( $16 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm}$ ) → altura e o diâmetro do conector
- Coef. parcial de segurança  $\gamma_v = 1.25$ .
- Vigas mistas → chapas de aço → forma colaborante → conectores nas nervuras



- Viga mista e laje mista na mesma direção
- Ensaios → resistência dos conectores → menor → que numa laje maciça → possível ruptura local das nervuras de concreto.
- EC4 → coeficientes de redução → resistência  $P_{Rd}$  → equações anteriores.
- Chapas + nervuras de concreto paralelas ao elemento de aço → coeficiente de redução é:

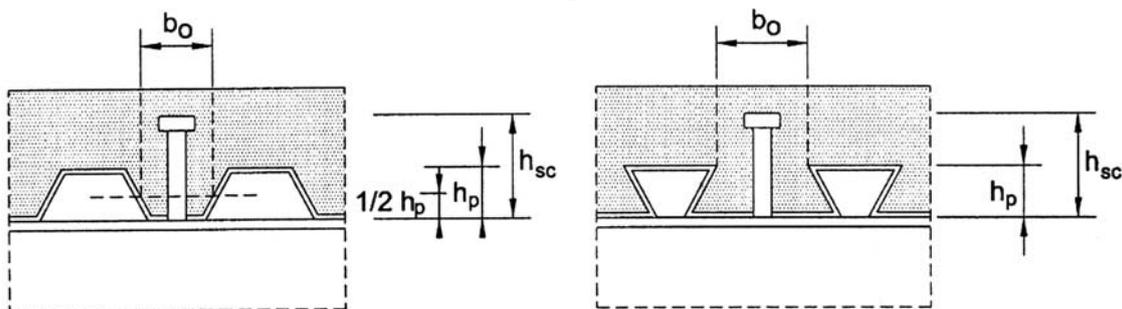
$$k_l = 0.6 \cdot \frac{b_o}{h_p} \cdot \left( \frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq 1.0$$

$$h_{sc} \leq h_p + 75 \text{ mm.}$$

- Chapas perfiladas com as nervuras de concreto → direção transversal ao elemento de aço → coef. de redução:

$$k_t = \frac{0.7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_o}{h_p} \cdot \left( \frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right)$$

$n_r$  → número de conectores numa nervura, no cruzamento com o elemento de aço,  $\leq 2$  no cálculo → coef. de redução.



nervuras na direção transversal

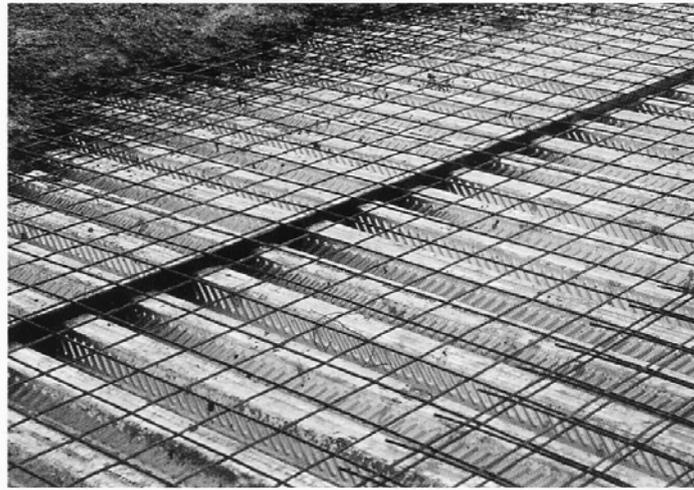
$k_t$  → não deve ultrapassar → limites → 6.6.4.2 (2) e (3) EC4 → geometria chapas, diâmetro e proc. solda dos conect.

- Devem ainda ser cumpridas as disposições construtivas → espaçamento, recobrimento e dimensões dos conectores → 6.6 do EC4.

### 2.4.3. Ligação ao cisalhamento em sistemas estruturais mistos com chapas de aço

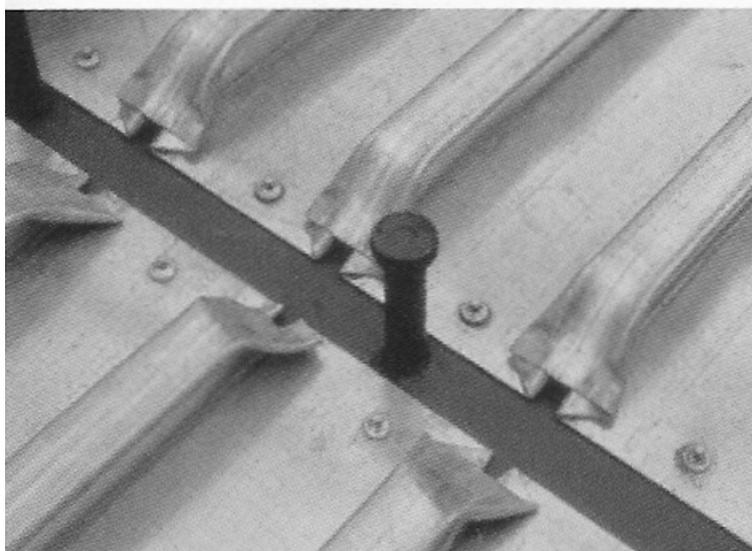
- Sistemas estruturais mistos com forma de aço → inviável soldar conectores a chapas →

espessura muito reduzida → geral → resistência deslizamento → aderência química, atrito → pequenas saliências e reentrâncias na chapa ou por amarração de extremidade.



### a) Saliências e reentrâncias

- Sistemas estruturais → forma de aço, a resistência ao cisalhamento longitudinal → aderência e atrito → fundamental → chapas sejam corrugadas.



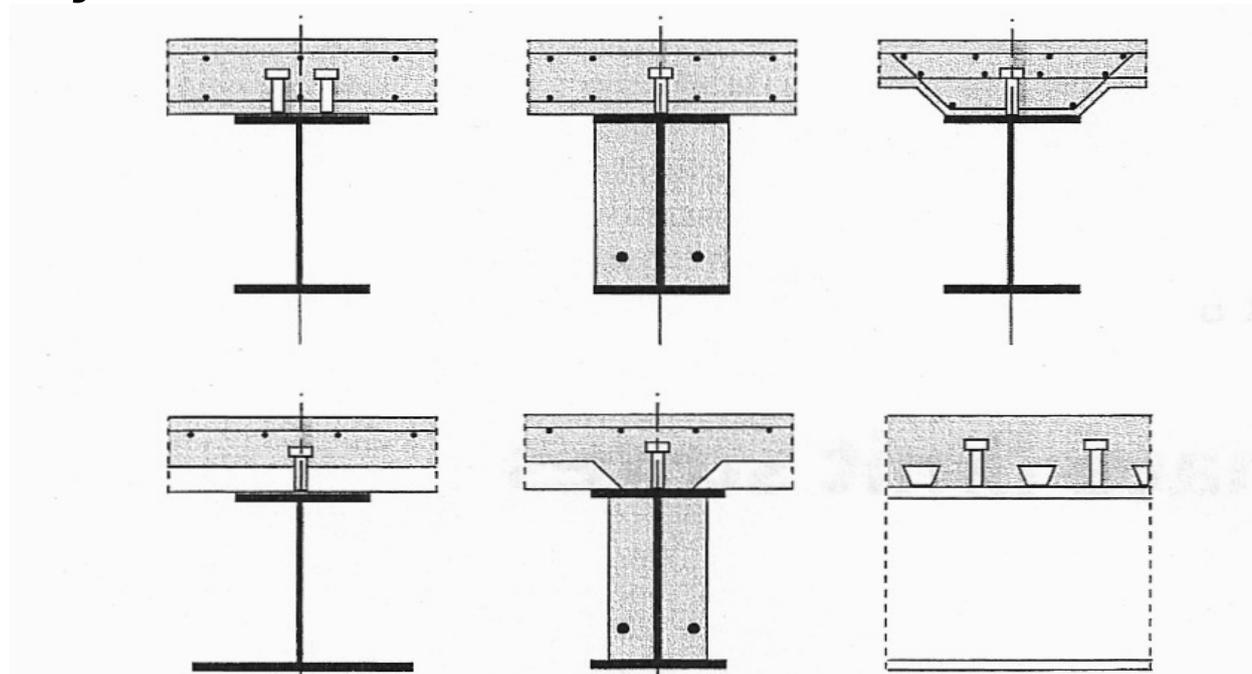
### b) Amarração de extremidade

- Não existem modelos analíticos suficientes desenvolvidos → resistência ao cisalhamento em lajes mistas.
- EC4 → métodos semi-empíricos → calibração de parâmetros → ensaios em escala real → descritos → lajes mistas
- **método m-k**
- **método da interação parcial,**

### 3. VIGAS MISTAS

#### 3.1. CONCEITOS GERAIS

- Viga mista → essencialmente à flexão → perfil de aço (I, H ou retangular oca) → ligado a uma laje em concreto armado
- U ou em L não devem ser usadas → a menos → elementos de ligação → impeçam a torção da seção.



□ EC4→ viga mista deve ser verificada

□ **Estados limites últimos**

- secções transversais;
- flambagem lateral;
- compressão da alma→ cargas transv;
- cisalhamento longitudinal;

**Estados limites de utilização**

- Deformações;
- Fissuração do concreto;
- Vibrações;

□ Estrutura mista→ **simplesmente apoiadas**→ou **contínuas**.

□ **Vigas simpl. apoiadas**→ **vantagens**:

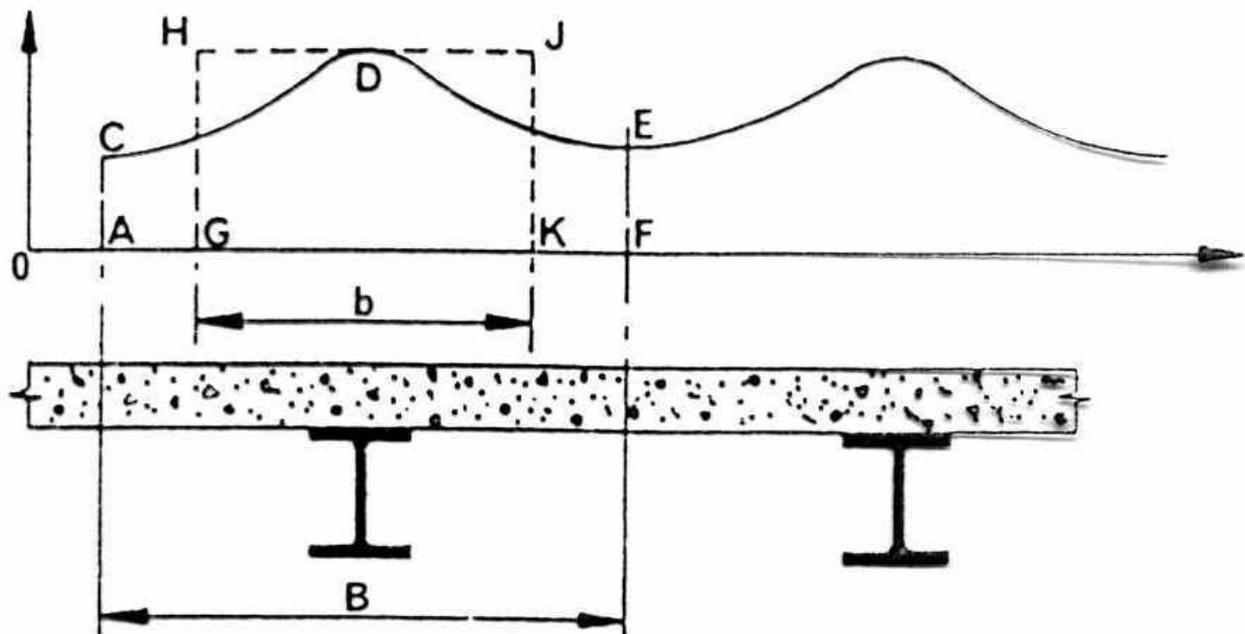
- Ligações + simples, logo + baratas;
- Só→ pequena zona da alma→ compressão→ mesa superior→ confinada pela laje→resistência → não seja condicionada→ flambagem lateral;
- Almas dos perfis→ menores tensões→ + fácil realizar furos→ serviços;
- Momentos fletores e esforços cortantes → estaticamente determinados→ não influenciados pela fluência, fissuração ou retracção do concreto;
- Não há interação→ vigas→ vãos adjac.

- Momentos fletores → pilares → pequenos
- Não há concreto tracionado parte superior da laje, exceto nos apoios.
- Análise e o dimensionamento → **vigas contínuas** → + complexo, estas apresentam algumas **vantagens**:
  - Relações vão/altura de maior valor para determinados limites de deformação;
  - Controlar melhor a fissuração da superfície superior da laje junto aos pilares interiores;
  - Laje de concreto tem uma frequência própria mais elevada → menos suscetível de vibrar com o movimento das pessoas;
  - Estrutura é mais resistente, em especial, em situações de incêndio.
- Ligação ao cisalhamento → viga mista → 2 graus de interação:
  - **interação de cisalhamento total**
  - **interação de cisalhamento parcial**
- Viga mista possui interação de cisalhamento total → aumento do número de conectores de cisalhamento não aumenta a sua resistência à flexão → caso contrário → interação é parcial.
- **Teoria plástica** → resistência à flexão das secções críticas de uma viga mista (classe 1 ou

- 2) → conectores de cisalhamento → ser igualmente espaçados
- Vigas mistas → formas colaborantes → não ser possível número de conectores necessários para interação total → redução da resistência à flexão da viga → interação parcial.
  - Pontes mistas → seções + esbeltas → classes 3, 4 → conectores → **teoria elástica**.

### 3.2. SECÃO EFETIVA

- Tensão normal média ao longo da laje:



Distribuição de tensões normais no concreto

- Baseado no valor máximo tensão (ponto *D*) → largura efetiva *b* → área *GHJK* = área *ACDEF*
- *Teoria da elasticidade* →  $b/B$  → depende de forma complexa → ***B/vão da viga, tipo de carregamento, condições nos apoios, etc.***

- EC4, a largura efetiva  $b_{eff}$  nos vãos e nos apoios intermediários de uma viga mista:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei}$$

$b_0$  → dist. entre conectores → dir. transv

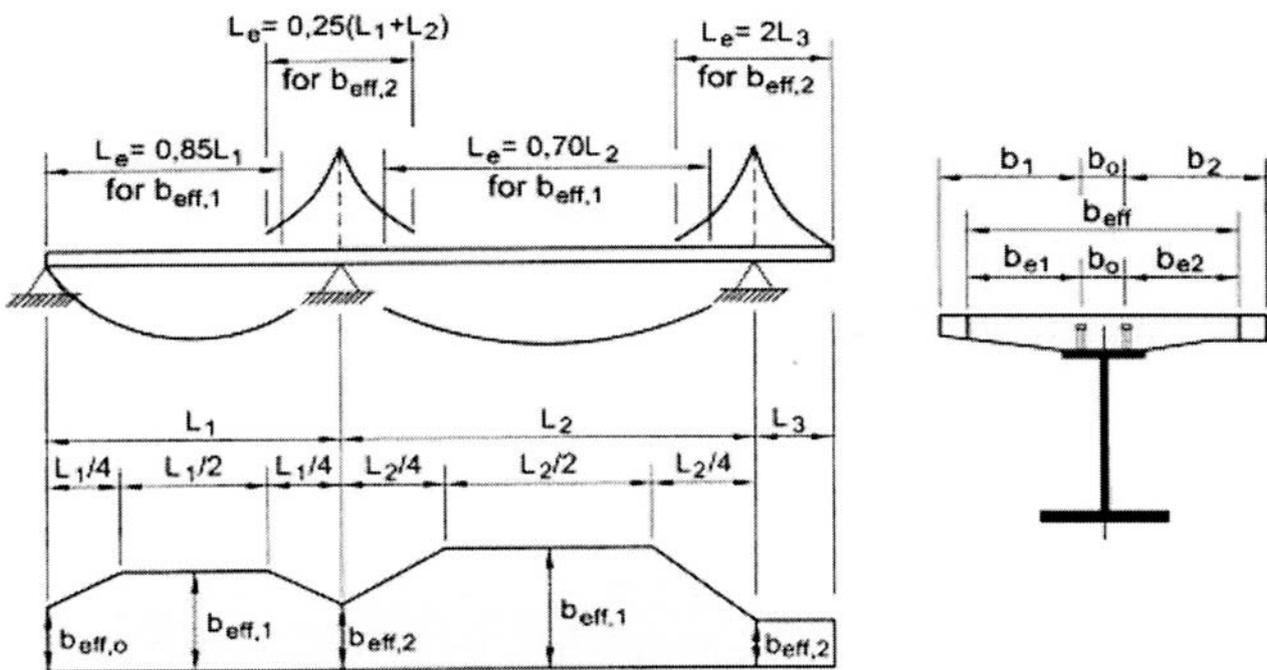
$b_{ei}$  a largura efetiva de cada lado da alma →,

$L_e/8$ ,  $\leq b_i$  (meia distância entre almas).

$L_e$  → aproxim. → distância seções momento nulo

Viga biapoiada →  $L_e =$  vão  $L$ , → largura efetiva →

$$b_{eff} = b_0 + L/4.$$



Largura efetiva em vigas contínuas

- Apoios de extremidade → largura efetiva:

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i \cdot b_{ei}$$

$$\beta_i = (0.55 + 0.025 \cdot L_e / b_{ei}) \leq 1.0,$$

$b_{ei}$  e  $L_e$  definidos para o vão adjacente

- **Propriedades elásticas** → seção transversal mista → homogeneização da seção em aço → dividindo a área de concreto pelo coeficiente de homogeneização  $n = E_a / E'_c$ , →
- $E_a$  módulo de elasticidade do aço
- $E'_c$  módulo de elasticidade efetivo do concreto →  $E'_c$  pode ser tomado como o módulo de elasticidade secante  $E_{cm}$  → efeitos de curta duração → valor reduzido → efeitos de longa duração → 5.4.2.2 do EC4).
- **Rigidez de flexão** sem fissuração e a rigidez de flexão com fissuração de uma seção transversal mista →  $E_a \cdot I_1$  e  $E_a \cdot I_2$ ,
- $I_1$  o momento de inércia em relação ao eixo neutro da seção homogeneizada em aço → **concreto tracionado** não está fissurado
- $I_2$  → desprezando o concreto tracionado → incluindo a armadura.

### 3.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

#### 3.3.1. Vigas com Interação Total

- Resistência à flexão → **análise plástica**, → seções mistas de Classe 1 ou 2
- Outros casos → **análise elástica**.

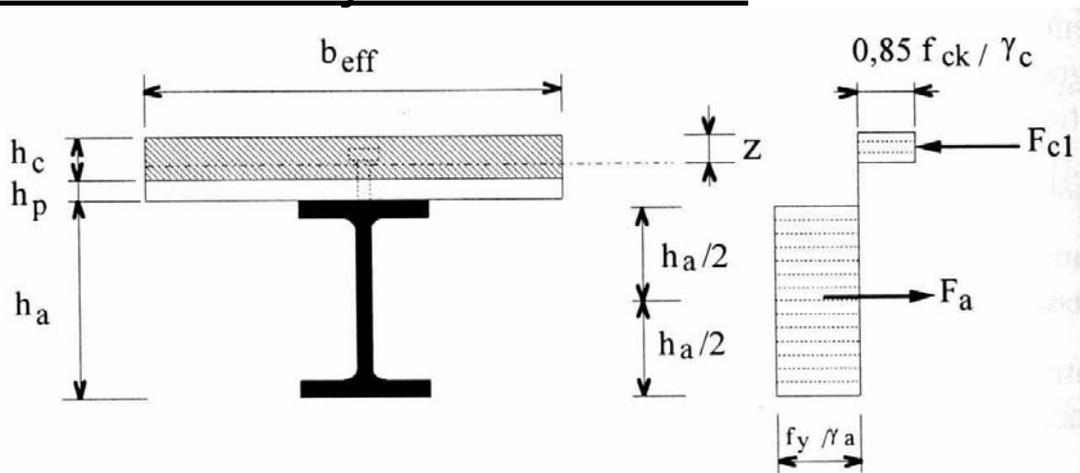
- Em ambos os casos deve-se considerar as seguintes hipóteses:
  - Desprezar resist. à tração do concreto;
  - Seções transversais planas das partes de aço estrutural e de concreto armado de uma viga mista mantêm-se planas.
- **Momento plástico resistente** → viga mista → interação total é:
  - Seção efetiva do elemento de aço estrutural → escoamento  $f_{yd} = f_y / \gamma_a$ , tração ou comp;
  - Seções efetivas das armaduras longitudinais tracionadas e comprimidas → escoamento  $f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$ , em tração ou em compressão;
  - As chapas perfiladas comprimidas devem ser desprezadas; as chapas tracionadas, se incluídas na seção efetiva, devem ser consideradas → escoamento  $f_{yp,d} = f_y / \gamma_{ap}$ ;
  - Área efetiva de concreto à compressão tem resistência máxima  $0.85 \cdot f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c$ , considerado constante ao longo da altura entre o LN plástica e fibra + comp. concreto.

### 3.3.1.1. Momento plástico resistente (+)

- Momento plástico resistente + → viga mista → seção aço I → laje concreto + forma de aço → nervuras perpendiculares ao eixo da viga

- Laje ser maciça → expressões continuam a ser válidas →  $h_p = 0$ .
- Momento resistente + → 3 posições → LN pl:
- **laje de concreto, mesa superior e alma.**

### i) Eixo neutro na laje de concreto



- 
- Flexão positiva com eixo neutro na laje
- $F_a$  e  $F_{c1}$  → resistências plásticas à tração do aço e à compressão do concreto

$$F_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a$$

$$F_c = h_c \cdot b_{eff} \cdot (0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c)$$

$A_a$  é a área de aço estrutural → tensão de escoamento →  $f_y / \gamma_a$  →  $\gamma_a = 1.0$  → EC4

$b_{eff}$  é a largura efetiva de concreto

$0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c$  → tensão à compressão do concreto →  $\gamma_c = 1.5$  → EC4

Se  $F_c > F_a$ ,  $\rightarrow$  eixo neutro  $\rightarrow$  laje de concreto  $\rightarrow$  distância  $z$  da face superior:

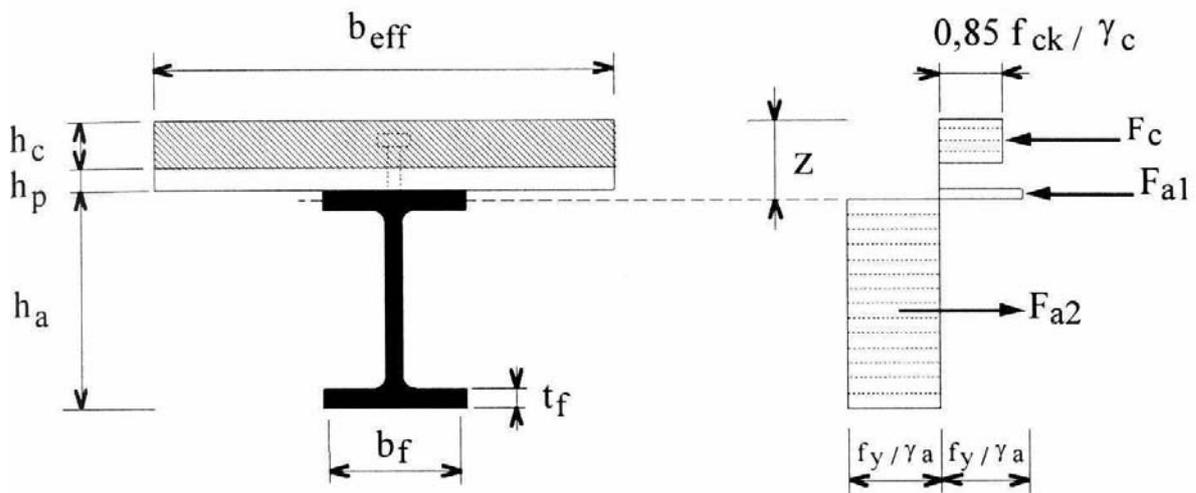
$$F_a = z \cdot b_{eff} \cdot (0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c) \Leftrightarrow$$

$$z = F_a / (b_{eff} \cdot 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c) \leq h_c$$

Momento fletor  $\rightarrow$  momentos em relação ao centro de gravidade das compressões:

$$M_{pl.Rd} = F_a \cdot (h_a / 2 + h_c + h_p - z / 2)$$

## ii) Eixo neutro na mesa superior do perfil



□ Nesta situação  $\rightarrow F_c < F_a$  :

$$F_a - F_c \leq 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a$$

$b_f / t_f \rightarrow$  largura/espessura da mesa de aço

Distância  $z$  (posição do eixo neutro)  $\rightarrow$  admitindo a resist. aço à compressão é:

$2 \cdot f_y / \gamma_a$ ,  $\rightarrow$  força  $F_a \rightarrow$  sua linha de ação:

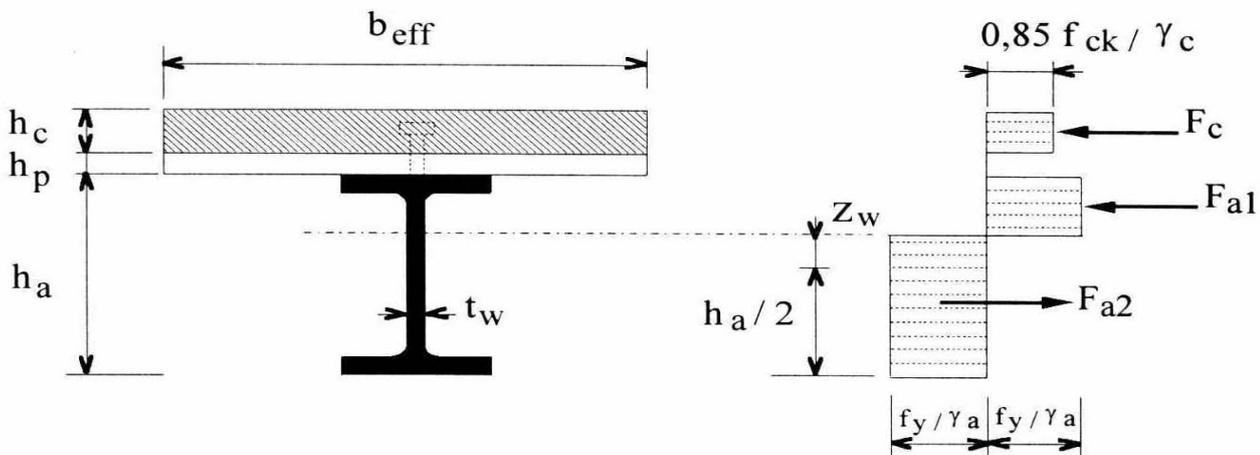
$$F_a = F_c + 2 \cdot b_f \cdot (z - h_c - h_p) \cdot f_y / \gamma_a$$

Momento fletor:

$$M_{pl.Rd} = F_a \cdot (h_a/2 + h_c/2 + h_p) - (F_a - F_c) \cdot (z + h_p)/2$$

### iii) Eixo neutro na alma do perfil de aço

- Se  $\rightarrow F_c < F_a$  e  $F_a - F_c > 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a \rightarrow$  eixo neutro  $\rightarrow$  alma do perfil  $\rightarrow$  diag. de tensões:



Flexão (+) com eixo neutro na alma de aço

Posição LN  $\rightarrow z_w$ ,  $\rightarrow$  altura da alma tração acima cg perfil  $\rightarrow$  resist. aço longo da altura  $\rightarrow 2 \cdot f_y / \gamma_a \rightarrow$  ter dist. unif. tensões comp.  $\rightarrow f_y / \gamma_a \rightarrow$  metade  $h_a/2$  superior perfil  $\rightarrow z_w$ :

$$z_w = F_c / (2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a)$$

Momento fletor resistente  $\rightarrow$  cg do perfil:

$$M_{pl.Rd} = M_{apl.Rd} + F_c \cdot (h_a/2 + h_c/2 + h_p) - F_c \cdot z_w/2$$

$$M_{pl.Rd} = M_{apl.Rd} + F_c \cdot (h_a/2 + h_c/2 + h_p) - F_c^2 / (4 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a)$$

$M_{apl.Rd} \rightarrow$  momento plástico do perfil de aço

### 3.3.1.2. Momento plástico resistente (-)

- Momento resistente (-) → seção mista → armadura da laje de concreto e do perfil de aço → concreto → desprezada → tração
- 2 situações + correntes → eixo neutro:

**LN na mesa superior e na alma.**

#### i) Eixo neutro na mesa superior do perfil

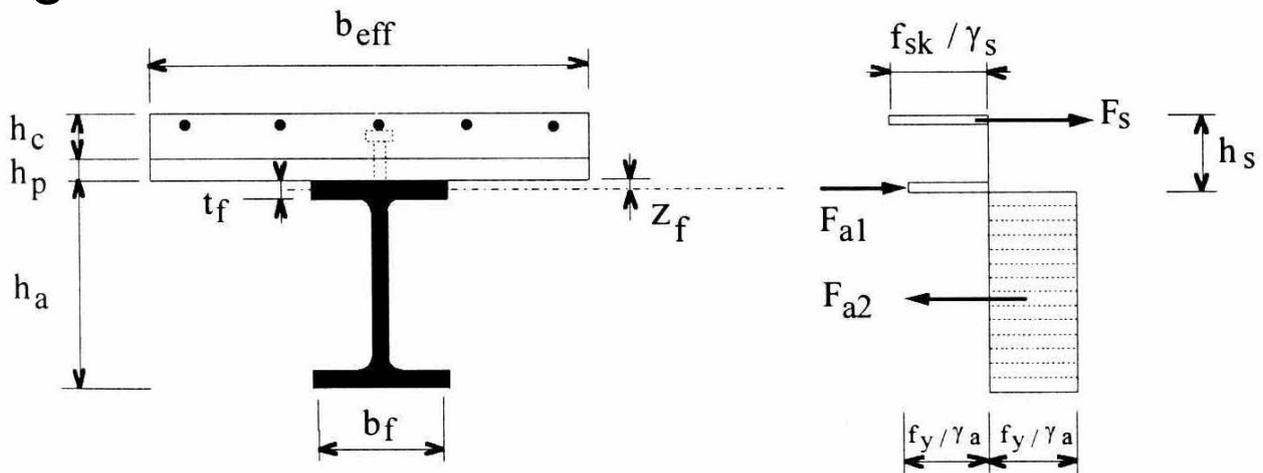
- Força de tração resistente →  $F_s$  → armadura neagtiva → área  $A_s$  → longo da seção efetiva:

$$F_s = A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s$$

- Eixo neutro plástico → mesa superior se:

$$F_a > F_s \text{ e } F_a - F_s \leq 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a$$

Diagramas de tensões são:



- Posição LN → espessura  $z_f$  mesa sup. Tração → admitindo → resist aço à tração →  $2 \cdot f_y / \gamma_a$  →  $F_a$  → + linha ação → mantenham com:

$$F_a = F_s + 2 \cdot b_f \cdot z_f \cdot f_y / \gamma_a$$

Momento fletor resistente → centro de gravidade da armadura da laje de concreto:

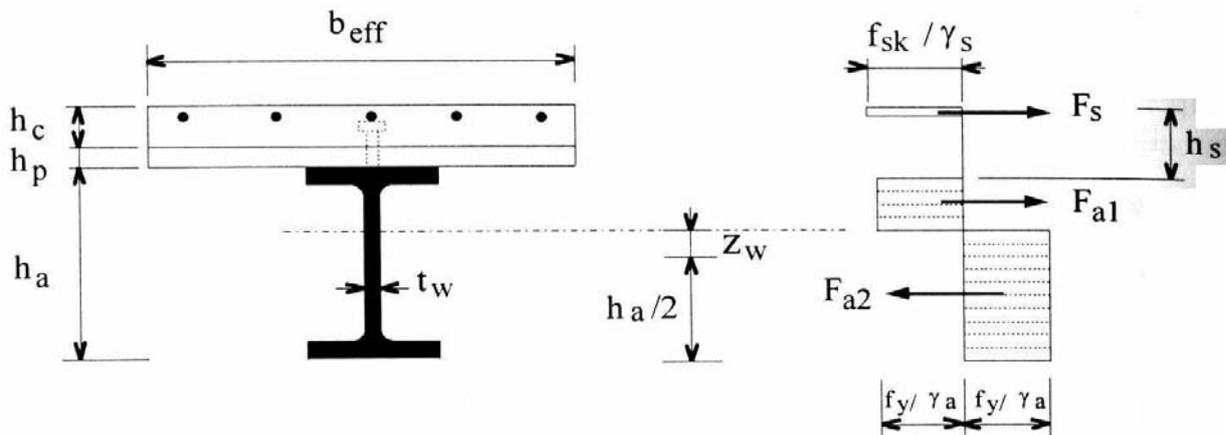
$$M_{pl.Rd} = F_a \cdot (h_a/2 + h_s) - (F_a - F_s) \cdot (z_f/2 + h_s)$$

**ii) Eixo neutro na alma do perfil de aço**

□ Eixo neutro plástico → alma se:

$$F_a > F_s \text{ e } F_a - F_s > 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a$$

□ Diagramas de tensões são:



□ Posição do eixo neutro →  $z_w$  → altura da alma em compressão acima do cg → perfil de aço → admitindo → resistência do aço longo altura →  $2 \cdot f_y / \gamma_a$  → dist. uniforme de tração →

$f_y / \gamma_a$  → metade  $h_a/2$  superior perfil →  $z_w$ :

$$z_w = F_s / (2 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a)$$

Momento resistente → cg do perfil de aço:

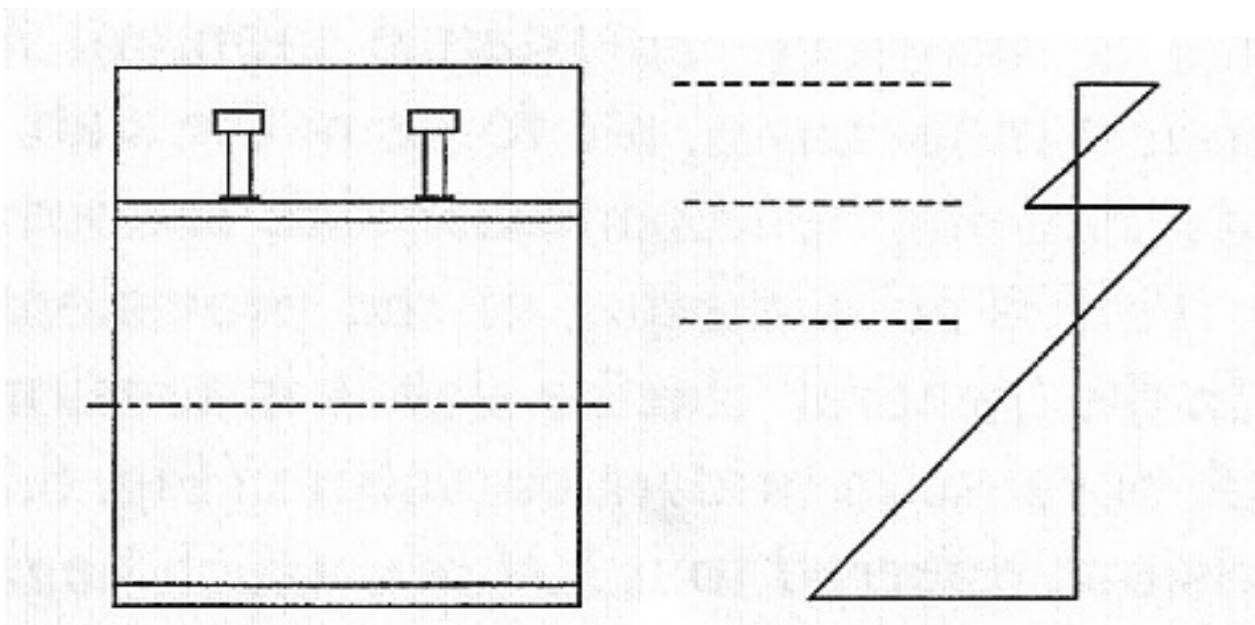
$$M_{pl.Rd} = M_{apl.Rd} + F_s \cdot (h_a/2 + h_s) - F_s^2 / (4 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a)$$

$M_{apl.Rd}$  → momento plást. do perfil de aço

### 3.3.2. Vigas com Interação Parcial

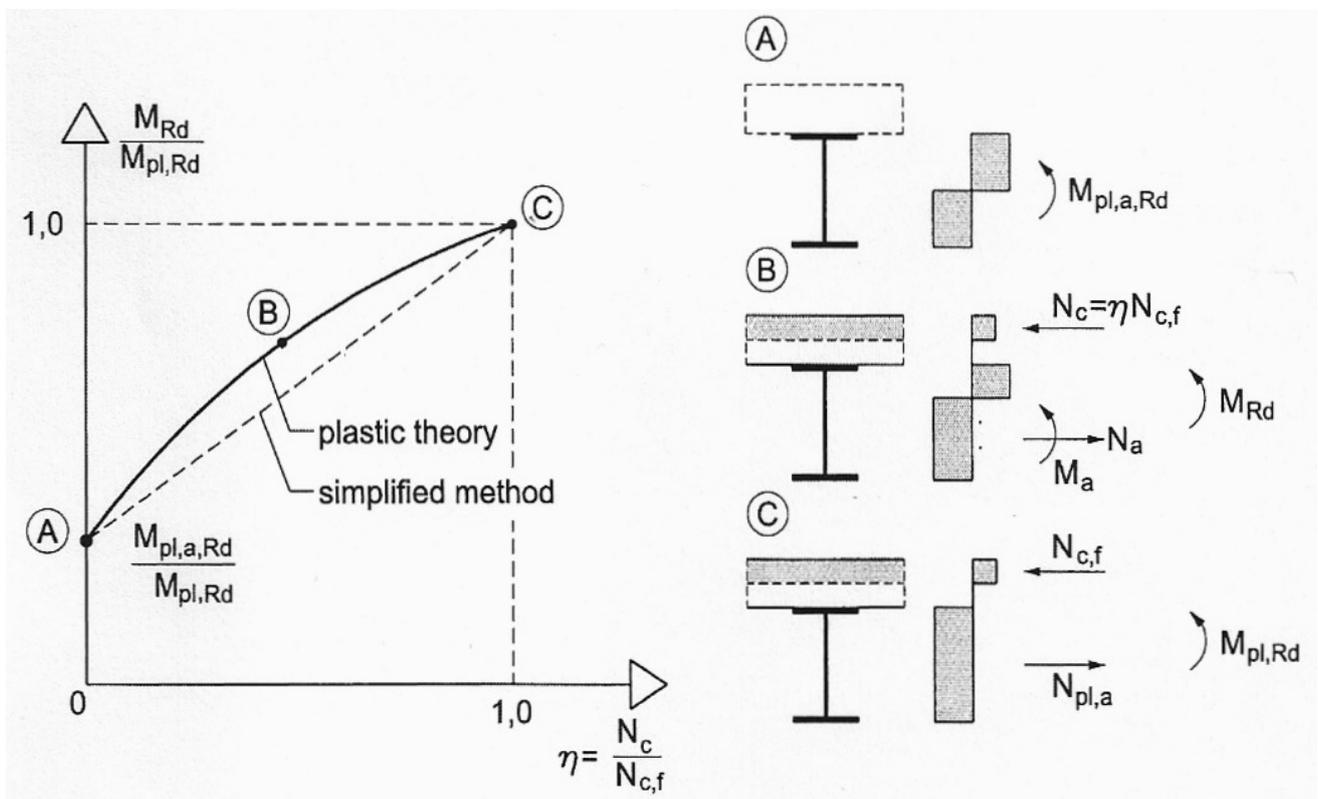
- Surge normalmente nas vigas mistas com formas e nervuras transversais → conectores só nas nervuras → usar número conectores  $n < \text{número mínimo } n_f \rightarrow \text{interação total.}$
- EC4 → interação parcial → só é permitida em zonas de **momento fletor (+)**
- Interação parcial → redução → cisalh. longitudinal → ligação → aço e concreto → redução → compressão no concreto →  $N_{cf}$  → antes →  $F_c \rightarrow N_c \rightarrow + \text{ desl.} \rightarrow \text{sup. contato}$
- **Grau de interação  $\eta$  é:**

$$\eta = \frac{n}{n_f} = \frac{N_c}{N_{cf}}$$



Deform. em viga mista com interação parcial

- Redução → compressão no concreto → redução → momento rest. (+) → viga mista.
- Análise plástica** da seção → diversos graus de interação → (Comp. Struct. of Steel & Concrete, R. P. Johnson) → relação entre máximo momento (+) resistente reduzido  $M_{Rd} (\geq M_{Ed})$  grau interação  $\eta$  - curva ABC:
- Interação parcial → momento plástico resistente (+) →  $M_{Rd}$  → entre inter. nula → (momento resistente = momento plástico do perfil  $M_{pl,a,Rd}$ ) → e a com interação total (momento resistente = momento resist. seção mista com inter. total  $M_{pl,Rd}$ ).



Dimensionamento com interação parcial

- Simplificação conservativa → substituir a curva  $ABC$  → pela reta  $AC$ :

$$\eta = \frac{n}{n_f} = \left( \frac{M_{Ed} - M_{pl.a.Rd}}{M_{pl.Rd} - M_{pl.a.Rd}} \right)$$

No dimensionamento do número de conectores  $n$  → reta  $AC$  → definida em função do momento (+) resistente reduzido  $M_{Rd}$  →  $M_{Ed} = M_{Rd}$ , → número conectores → através:

$$M_{Rd} = M_{pl.a.Rd} + \frac{n}{n_f} \cdot (M_{pl.Rd} - M_{pl.a.Rd})$$

- Viga dimensionada → **interação parcial** → ligação ao cisalhamento longitudinal → **dútil** → EC4(6.6.1.2) → conectores com  $h \geq 4 \cdot d$  e  $16 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm}$  → limites  $L_e$  → comprimento viga → momento (+) → vigas contínuas → semelh. → consid. largura efetiva:

- Vigas de aço com mesas iguais.

$$L_e \leq 25 \text{ m}$$

$$\eta \geq 1 - \left( \frac{355}{f_y} \right) \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_e), \quad \eta \geq 0.4$$

$$L_e > 25 \text{ m} \quad \eta \geq 1.0$$

- Vigas de aço → mesa inferior com área > mesa superior mas < 3 vezes esse valor.

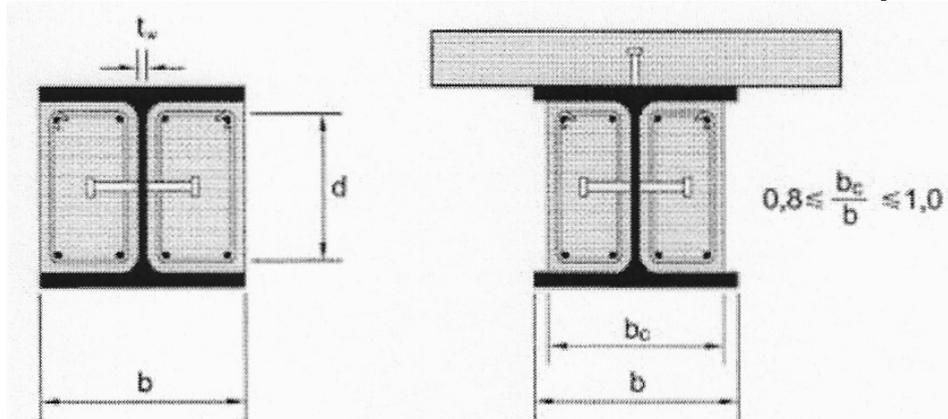
$$L_e \leq 20 m$$

$$\eta \geq 1 - \left( \frac{355}{f_y} \right) \cdot (0.30 - 0.015 \cdot L_e), \quad \eta \geq 0.4$$

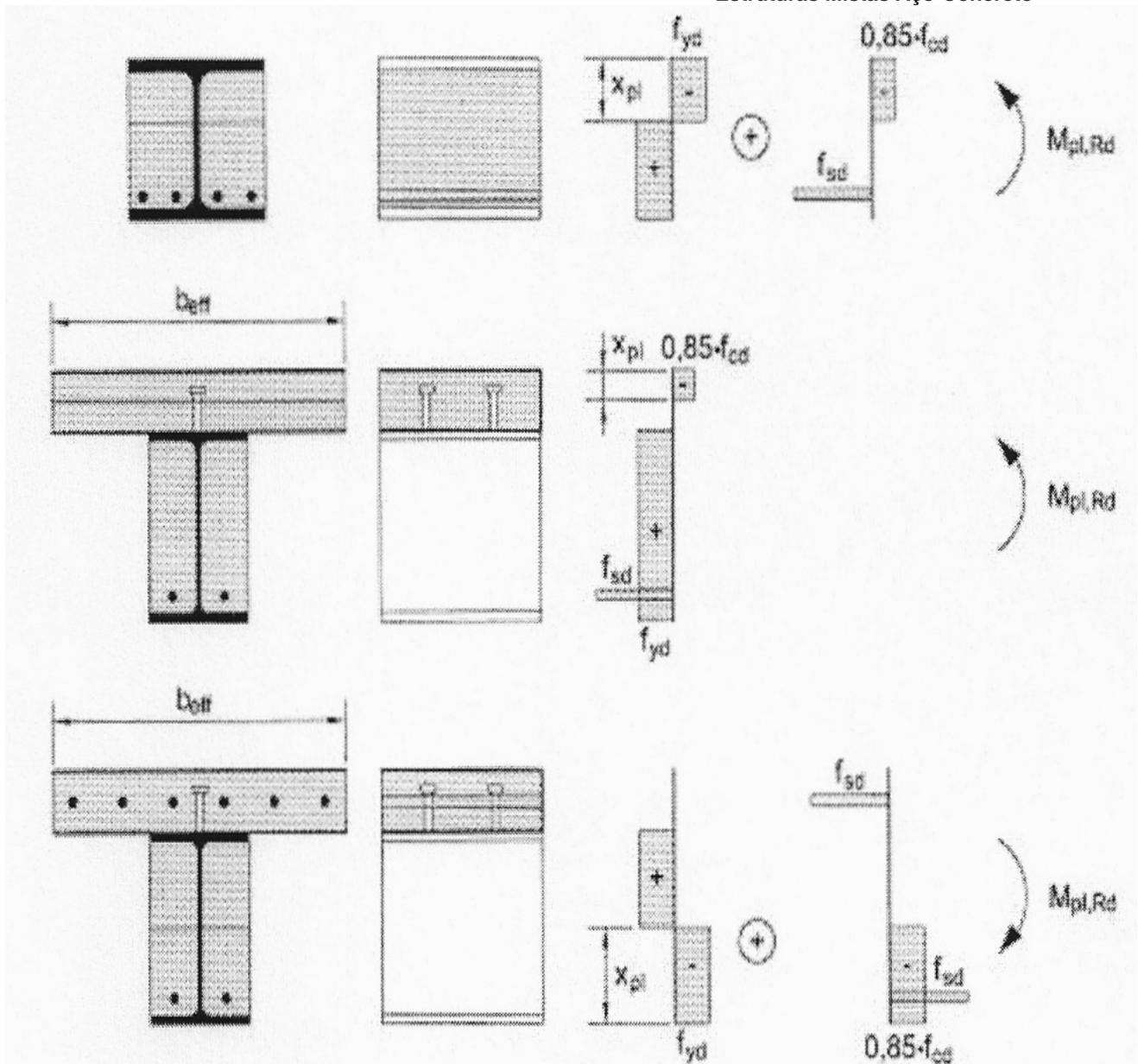
$$L_e > 20 m \quad \eta \geq 1.0$$

- EC4 6.6.1.2 → outros limites grau interação → p/ condições + espec. → limite mínimo de 0.4.
- Se interação de cisalhamento longitudinal não verifica os critérios de ductilidade referidos acima → vigas devem ser dimensionadas com base em critérios elásticos (como classe 3, 4) → ao nível da ligação ao cisalhamento ou resistência à flexão das seções críticas.
- Esta análise → + complexa → depende de:
  - **fluência**,
  - **retracção**
  - **fissuração do concreto**
  - **sequência de construção** (+ ou - grau de escoramentos).

### 3.3.2. Vigas Parcialmente Envol. em Concreto



- Vigas são em geral pré-fabricadas → aumenta custos de fabricação, transporte e montagem → apresentam vantagens:
  - Proteção da alma ao fogo e aumento resist. fogo → armadura longitudinal → particular mesa inferior
  - Confinamento da alma (e mesas) diminuindo a classe
  - Maior restrição à flambagem lateral.
  - Aumento da resistência ao esforço cortante, incluindo a resistência à flambagem local da alma por cortante.
- EC4 → relação comprimento/espessura da alma deve ser limitada a  $d/t_w \leq 124 \varepsilon$  → prática → par. envolvidas → geral → classe 1, 2
- Dimensionamento de vigas mistas parc. envolvidas em concreto → geral → resistência plástica → semelhante → outras vigas:



momento plástico vigas mistas parc. envolvidas

### 3.4. RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE

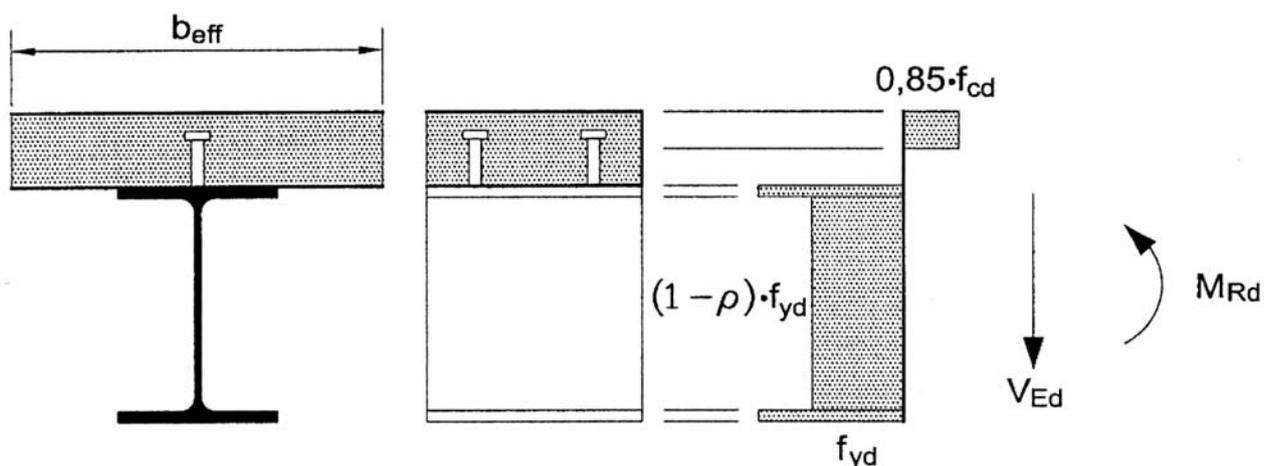
- Viga mista → sem alma em concreto → esforço cortante resistido → concreto da laje + perfil de aço → contribuição da laje → bastante reduzida → comparada com perfil → + não há modelo de dimensionamento bem definido → contabilize a resistência da laje → assume-se → cortante → totalmente resistido aço.

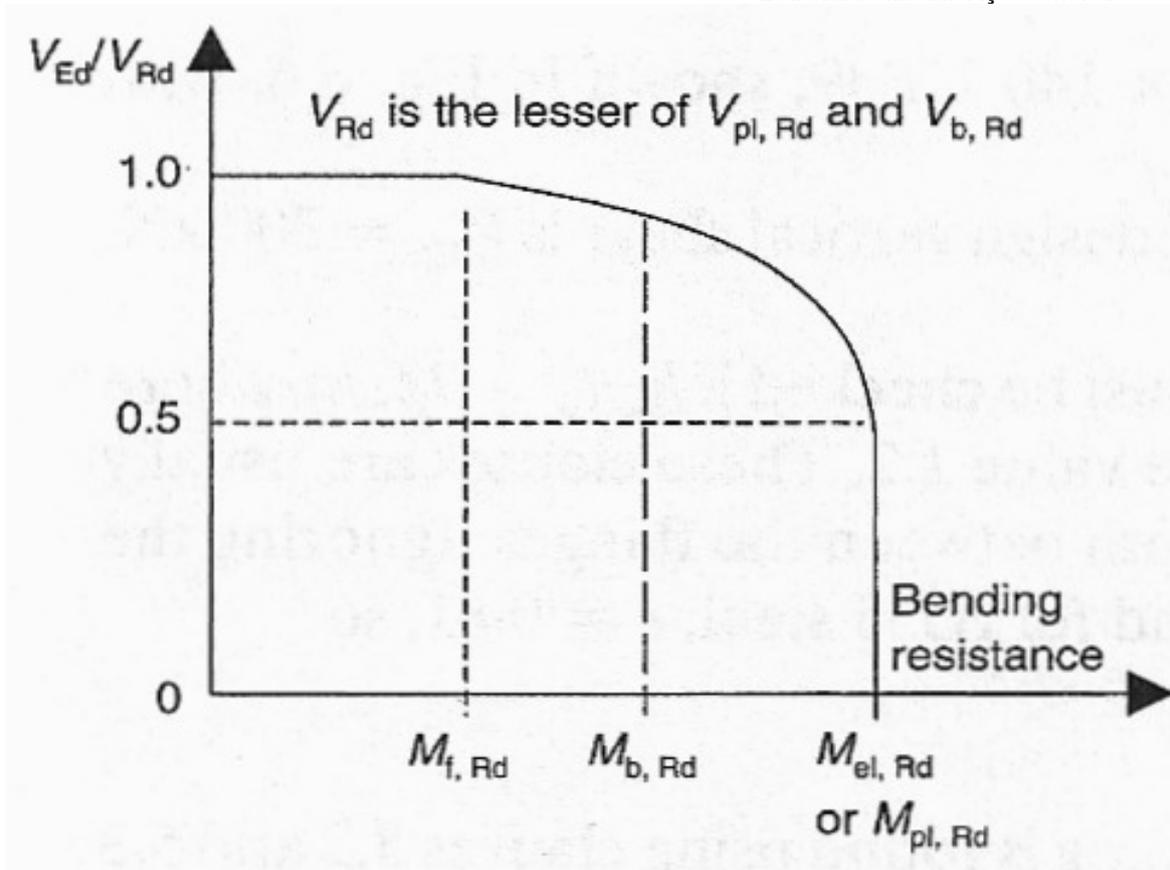
- Verificação do cortante → seção de aço:

$$V_{Ed} \leq V_{pl.Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_a$$

$A_v$  → área cisalhamento → perfil de aço.

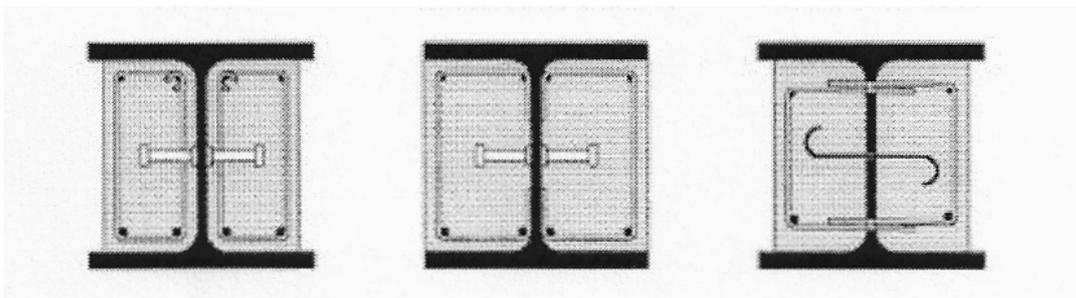
- Flambagem local da alma esforço cortante ( $V_{b,Rd}$ ) ou cargas concent. → → EC3 Pt. 1.5.
- Secções de classe 1 ou 2 →  $V_{Ed} > 50\%$  de  $V_{pl.Rd}$ , o momento plástico resistente → tensão resistente reduzida →  $(1 - \rho) \cdot f_{yd}$  → longo área cisalhamento →  $\rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2$ .
- Esforço cortante atuante → distribuído pela alma de aço e pela seção de concreto envolvente → proporcionalmente à contribuição de cada uma das partes → resistência à flexão da seção mista.





Redução do momento resist. → ao cortante

- Vigas mistas parcialmente envolvidas → contribuição → **concreto+armaduras** envolventes da alma → EC2 → se existir uma ligação efetiva à alma da viga

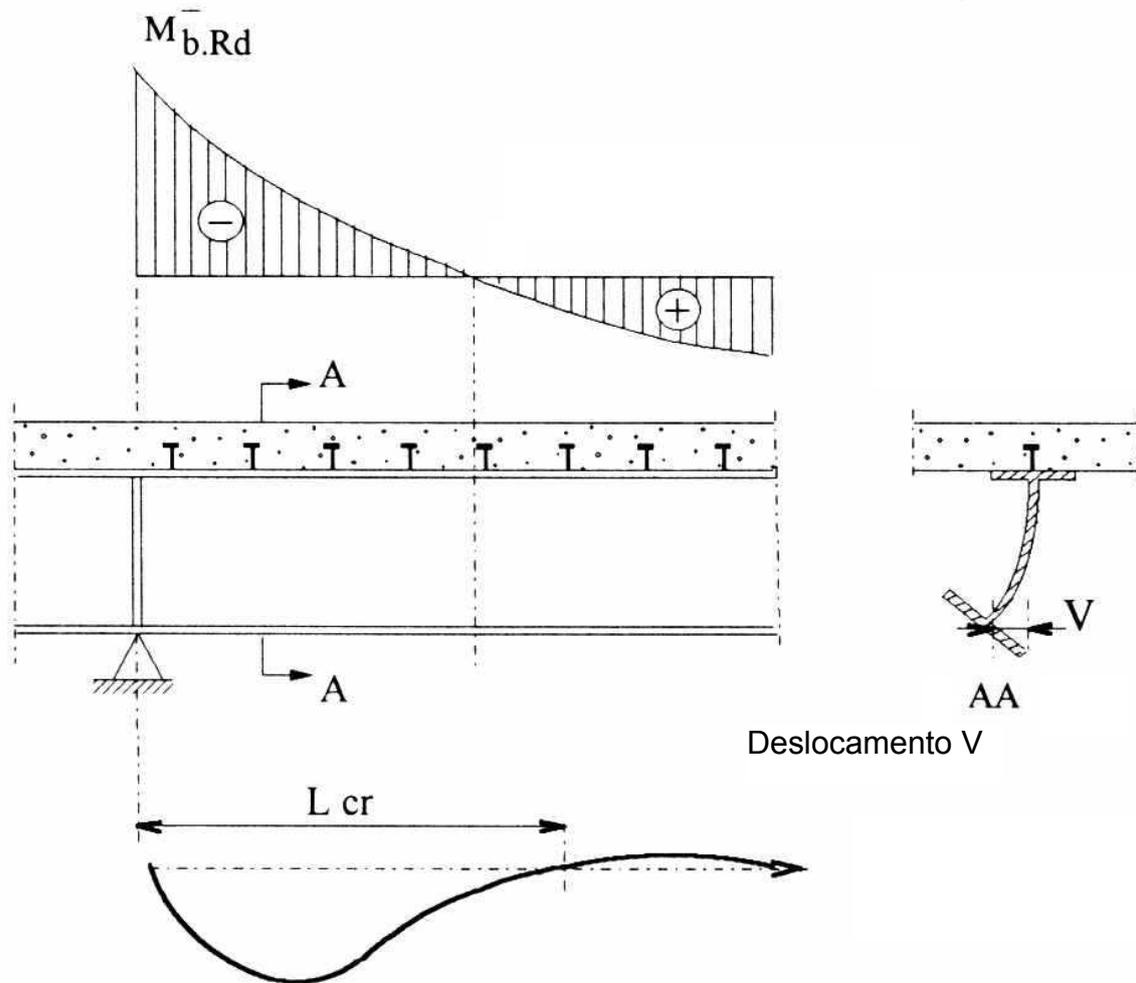


Ligação ao cisalhamento na alma

### 3.5. FLAMBAGEM LATERAL EM VIGAS MISTAS

- Viga mista → **momento fletor (+)** → mesa comprimida (superior) → ligado conectores → laje mista → largura efetiva > altura viga de aço → **lateralmente estável**
- Fase construção → escoramento usado → viga verificada → flambagem lateral → considerando apenas a parte de aço
- Vigas mistas → **flambagem lateral** → restringe-se quase exclusivamente → zonas **momento (-)** → apoios interm. → mesa inf. → compressão → cont. lateralmente → apoios
- Flambagem lateral em vigas mistas é diferente → vigas de aço → laje ao impedir a torção → obriga à **distorção da seção**
- Desl. lateral → mesa inferior é máximo → distância do apoio = 2 a 3 x altura da viga.
- **Flambagem lateral** vigas mistas → EC4 p.6.4.2 ou com metodologia geral → semelhante → EC3 → flambagem lateral de vigas de aço, com base na condição:

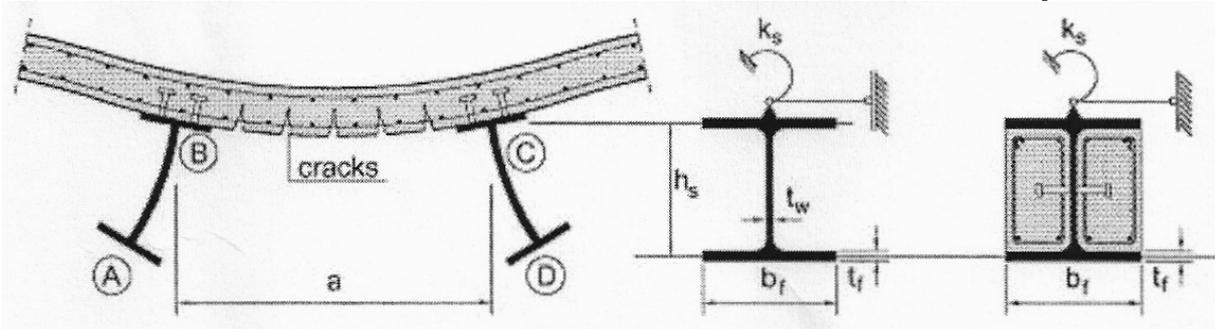
$$M_{Ed} \leq M_{b.Rd} = \chi_{LT} \cdot M_{Rd}$$



## Flambagem lateral em viga mista contínua

$\chi_{LT} \rightarrow$  (função da esbeltez reduzida  $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{M_{Rk}/M_{cr}}$  e das imperfeições)  $\rightarrow$  fator red. momento (-) resistente flamb. lateral e  $M_{Rd} \rightarrow$  momento resist. (-) seção mista.

$M_{cr} \rightarrow$  modelo "U invertido"  $\rightarrow$  função de um coeficiente de rigidez  $k_s$ ,  $\rightarrow$  dependente da rigidez da laje de concreto e da alma do perfil de aço  $\rightarrow$  cálculo  $\rightarrow$  complexo  $\rightarrow$  "Designers' Guide to EN 1994-1-1" – Johnson & Anderson.



### Modelo “U invertido”

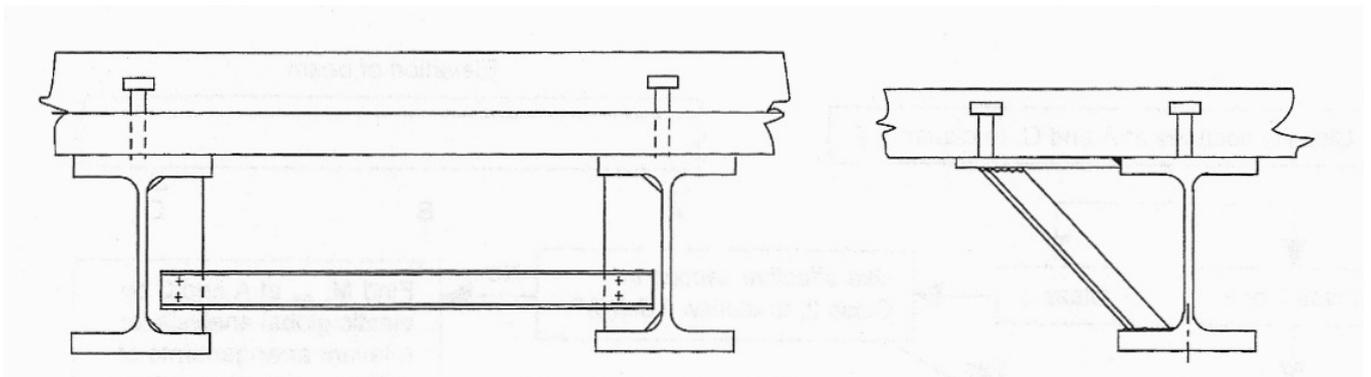
- EC4 6.4.3 → **metodologia simplificada**, → dispensa verific. flambagem lateral → vigas mistas contínuas ( $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.4$ ), se:
  - Vãos adjacentes não diferem mais de 20%.
  - Vãos em balanço < 15% vãos adjacentes;
  - Cargas uniform. dist., → parte da carga permanente superior = 40% carga total;
  - Mesa superior do perfil de aço ligada a laje por conectores, de acordo → 6.6 EC4
  - Laje é ligada pelo menos uma viga, aproxim. paralela à viga analisada → gerar “U” invert.
  - Se a laje de concreto for mista, deve desenvolver-se (bordos de apoio) entre as duas vigas que formam o “U” invertido;
  - Nos apoios as mesas inferiores dos perfis de aços devem ser contraventados lateralmente e as almas reforçadas;
  - Almas parc. envolvidas em concreto, os limites anteriores → aumentados em 200 mm para aço até à classe S 355, e em 150 mm para aço das classes S 420 e S 460.

- Se o perfil de aço for constituído por secções IPE ou HE não envolvidas em concreto, a sua altura máxima  $h$  não deve exceder os valores indicados no quadro seguinte.

Máxima altura (mm) perfis aço → vigas mistas

Perfil	Classe do aço			
	S 235	S 275	S 355	S 420 e S 460
IPE	600	550	400	270
HE	800	700	650	500

- Sempre que a resistência à flambagem lateral não seja verificada, devem ser previstos elementos de contraventamento como:



contraventamento lateral em vigas mistas

### 3.6. Resistência ao cisalhamento longitudinal

#### 3.6.1. Conectores

- Resistência cisalhamento longitudinal viga mista → conectores e armaduras transv. → laje.
- Comportamento → ligação viga-laje → número e tipo de conectores →  $>$  ou  $<$  deformabilidade cisalhamento → clasf. → **dúteis e não-dúteis**

- EC4 (6.6.1.1) → dútil → capacidade deform. → ensaios normalizados (AnexoB EC4) →  $>6\text{mm}$
- **Studs** →  $h \geq 4 \cdot d$  e  $16\text{ mm} \leq d \leq 25\text{ mm}$  , → geral → comportamento dútil.
- Conectores → resistir → **força de levantamento**  $> 10\%$  resistência ao cisalhamento → Studs → 6.6.5.7 do EC4 → verificam esta condição.
- Conectores → além resistência → **disposições const.** → 6.6.5 EC4
- *i)* recobrimentos;
- *ii)* reforços locais (zonas de extremidade e nervuras de concreto);
- *iii)* espaçamentos;
- *iv)* geometria, entre outros.

### 3.6.2. Dimensionamento dos conectores

- Vigas mistas → **teoria elástica** → cisalh. longitudinal/unidade de comprimento (esforço de escorregamento) → esforço cortante → espaçamento entre conectores ao longo da viga → acompanhar o diagrama de cortante.
- **Teoria plástica** → dimensionamento das vigas → cisalhamento longitudinal → análise plástica (também possa ser avaliado com uma análise elástica) → conectores → igualmente espaçados longo da viga → cisalhamento long.

- EC4 → Conect. = **espaçados** implica:
  - Conectores dúteis;
  - Seções críticas de classe 1 ou 2;
  - Verificação limites p/ interação parcial → 6.6.1.2 EC4
  - Momento resistente da viga mista < 2.5 x momento resistente da viga de aço.
- Viga → interação total → teoria plástica → **cisalhamento longitudinal total  $V_l$**  → resistido pelos conect. cisalhamento, entre seção momento Max. (+) e apoio extrem.:

$$V_l = F_{cf} = \textit{mínimo}$$

$$\left( \frac{A_a \cdot f_y}{\gamma_a}; \frac{0.85 \cdot A_c \cdot f_{ck}}{\gamma_c} + \frac{A_{se} \cdot f_{sk}}{\gamma_s} \right)$$

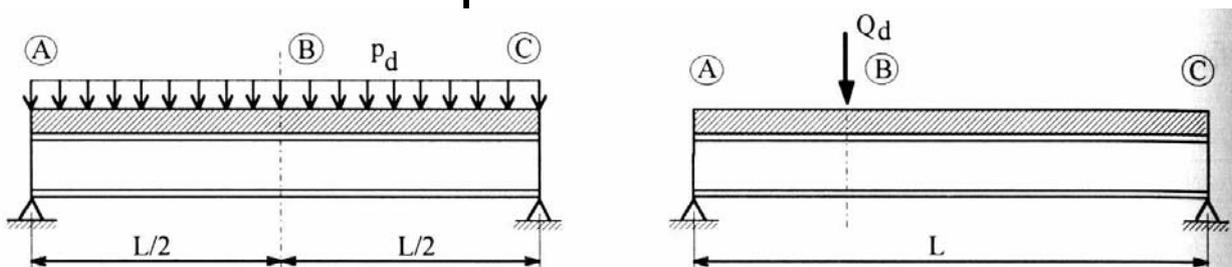
$A_a$  → área do perfil de aço,

$A_c$  → área de concreto na largura efetiva

$A_{se}$  → área de qq. armadura long. em compressão → incluída no cálculo da resistência à flexão da viga

Áreas ref. → seção Max. momento (+)

Vigas biapoiadas ou vãos extremos de viga contínua → cisalhamento calculado acima → resistido em comprimento crítico  $AB$  ou  $BC$ :



Comprimento crítico → vigas biapoiadas

- Cisalhamento longitudinal total  $V_I \rightarrow$  resistido por conectores  $\rightarrow$  entre seção momento máximo (+) e 1 apoio intermediário ou extrem. engastada (vãos int. vigas contínuas), é:

$$V_I = F_{cf} + \frac{A_s \cdot f_{sk}}{\gamma_s} + \frac{A_{ap} \cdot f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

$A_s \rightarrow$  área armadura long. efetiva da laje e  
 $A_{ap} \rightarrow$  área efetiva  $\rightarrow$  formas (se incluídas na seção efetiva)  $\rightarrow$  seção do apoio.

Viga em balanço  $\rightarrow F_{cf} = 0$ .

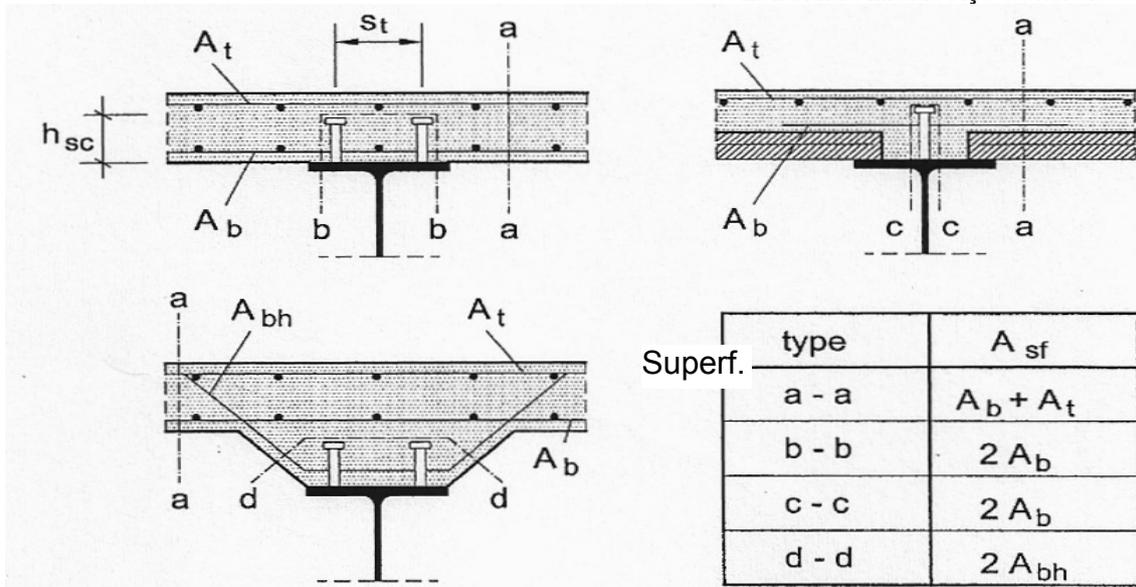
- Número de conectores (igualmente espaçados)  $\rightarrow$  comprimento crítico, é:

$$n_f = V_I / P_{Rd}$$

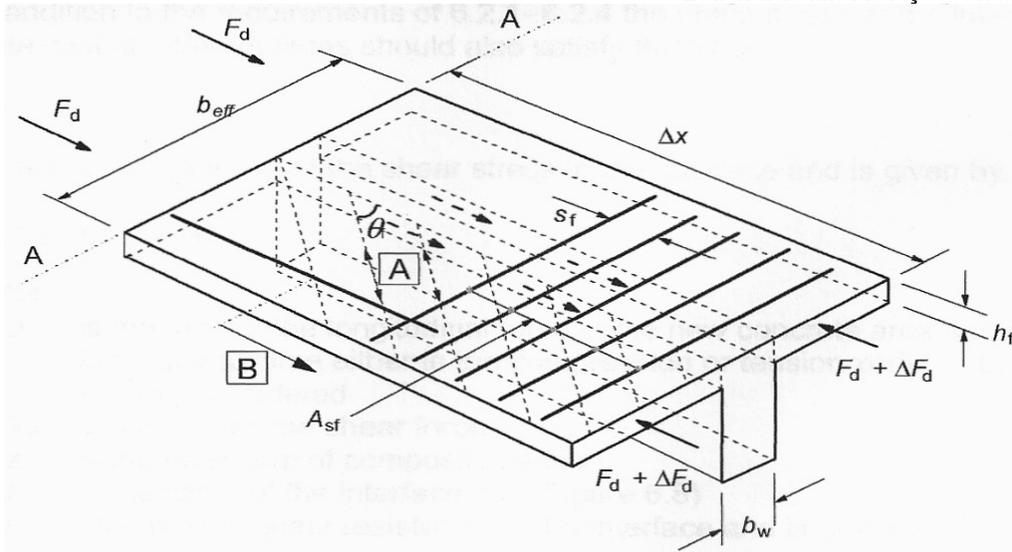
- $P_{Rd} \rightarrow$  resistência de um conector.

### 3.6.3. Armaduras transversais

- Vigas mistas  $\rightarrow$  armadura transversal  $\rightarrow$  evitar ruptura  $\rightarrow$  cisalh. Longit.  $\rightarrow$  superfície crítica
- Indica-se a quantificação da armadura  $A_{sf}$  por unidade de comprimento  $\rightarrow$  avaliação da resistência ao cisalh.  $\rightarrow$  superf. ruptura.



- - Superfícies de ruptura por cisalhamento
  - Comprimento → superfície de cish. →  $b-b$  →  $= 2 \cdot h_{sc} + d_c + s_t$ , →  $h_{sc}$  → altura total do conector,  $d_c$  → diâmetro da cabeça e  $s_t$  → espaçamento transv. entre conectores.
  - Limites → altura mínima dos conectores → lajes maciças de espessura uniforme → superfícies **tipo a-a** sejam condicionantes.
  - Cisalhamento long./comp →  $V_{Ed}$  → cish. Long. considerado → dimen. conectores.
  - Cish. long/unid. comp. →  $V_{Rd}$  → **modelo treliça** → 6.4.2 EC2 → vigas T → função da altura da laje  $h_f$ .



## Modelo de treliça em vigas em T

Armadura transversal →  $A_{sf}$  deve:

$$\frac{A_{sf} \cdot f_{yd}}{s_f} > \frac{v_{Ed} \cdot h_f}{\cot \theta_f}$$

$45^\circ \geq \theta_f \geq 26.5^\circ$  em mesas comprimidas

$45^\circ \geq \theta_f \geq 38.6^\circ$  em mesas tracionadas.

Para não haver ruptura da diagonal de concreto em compressão, deve-se:

$$v_{Ed} < v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta_f \cdot \cos \theta_f$$

$v = 0.6 \cdot (1 - f_{ck}/250)$  →  $f_{ck}$  em  $\text{N/mm}^2$ , → fator de redução da resistência ao cisalhamento do concreto fissurado.

- Armaduras transv. → ancoradas p/ além da largura efetiva da mesa de concreto viga mista

- Lajes de concreto → **formas de aço** → nervuras na direção transversal às vigas → ou se conectores forem soldados às vigas → chapas → entrar com a contribuição das chapas para a resistência ao cisalh. longitudinal →  $V_{Ed}$  → 6.6.6.4 do EC4

## 3.7. Estados limites de utilização

### 3.7.1. Generalidades

- Vigas mistas → estados limites de utilização normalmente considerados são:
  - **Deformações**
  - **fissuração do concreto**
  - **vibrações**
  - Verificados → EN1990 – Bases de Projeto.
  - Tensões e deformações → vigas mistas → estado limite utilização deve considerar:
    - “Shear lag”;
    - Fluência e retracção do concreto;
    - Fissuração do concreto;
    - Sequência de construção;
    - Interação parcial;
    - Escoamento → aço estrut. e armaduras;
    - Protensão;
    - Efeitos da temperatura;
    - Efeitos da torção.

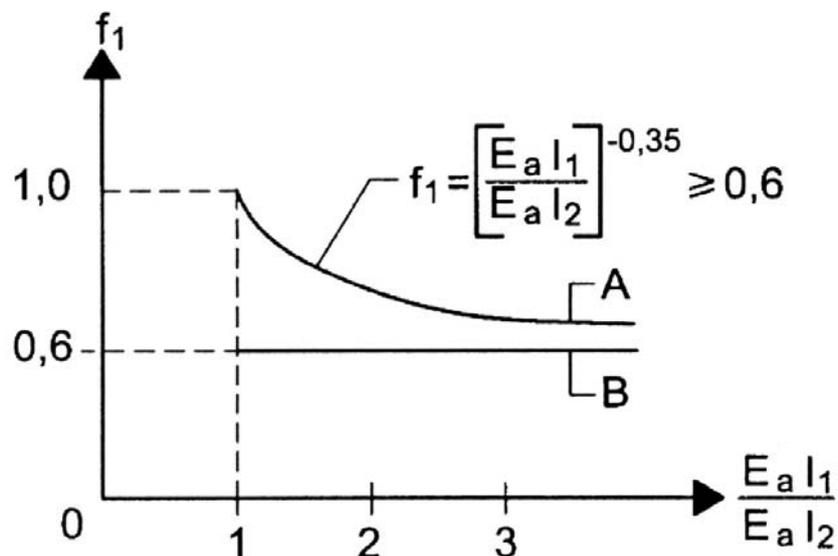
### 3.7.2. Deformações

- Limites de deformação → verificados para relações vão/altura total da seção mista da ordem de 15 a 18 → vigas biapoiadas e de 18 a 22 → vigas contínuas.
- Deformações → viga mista → **análise elástica** → **seção equiv. homogeneizada**
- **Sequência de construção** → vigas não escoradas na fase de construção → deformação → construção (aço) → adicionada à deformação → utilização (mista).
- Efeito do **escorregamento** em vigas mistas → inter. parcial → ELU, com grau inter.  $>0.5$  → 7.3.1(4) EC4 → desprezado
- Efeito da **fissuração do concreto** nas zonas de momento (-) → análise elástica → concreto fissurado → zona dos apoios intermediários (5.4.2.3 EC4) → ou método simplificado (aplicável classe 1, 2 ou 3) → método → multiplicar momentos (-) (se provocarem tensões  $> 1.5 f_{ctm}$  →  $f_{ctm}$  a resistência caract. concreto à tração) nos apoios interm. (obtidos → análise elástica → concreto não fissurado) por um coef. Red.  $f_1$  (corrigindo os momentos (+) nos vãos adjacentes) dado:

$$f_1 = \left[ \frac{(E_a \cdot I_1)}{(E_a \cdot I_2)} \right]^{-0.35} \geq 0.6$$

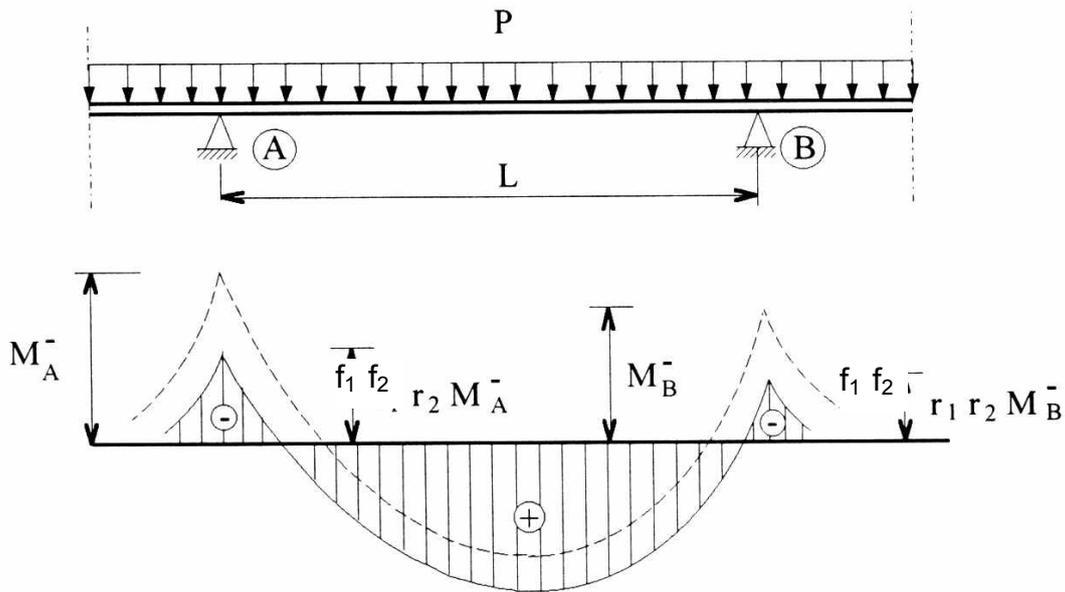
Se as cargas distribuídas/comp. = todos os vãos e os comprimentos de todos os vãos não apresentarem diferenças > 25%; nos outros casos considera-se → segurança  $f_1 = 0.6$

$I_1$  e  $I_2$  → inércias da seção mista em estado não fissurado e em estado fissurado.



Fator redução momentos sobre apoios interm.

- Influência da **escoamento do aço estrutural** (vigas mistas não apoiadas na construção) sobre os apoios intermediários → multiplicando momentos fletores por coef. redução adicional:
  - $f_2 = 0.5$  se  $f_y$  for atingido antes do endurecimento do concreto da laje
  - $f_2 = 0.7$  se  $f_y$  for atingido depois do endurecimento do concreto da laje.



Fissuração do concreto e escoamento do aço → deformações em uma viga mista contínua

- Vigas com uma relação vão/altura  $< 20$  não é necessário entrar em conta com o efeito da **retração do concreto**.

### 3.7.3. Vibrações

- EL utilização → **vibrações** → 7.3.2 do EC4 → aponta para os Anexos Nacionais.

### 3.7.4. Fissuração do concreto

- Estado limite → largura das fissuras → 7.3.1 do EC2 → vigas mistas → forma simplificada → limites → 7.4 do EC4 → áreas mínimas de armadura longitudinal e valores máximos de espaçamento e diâmetro dos vergalhões.
- Nos apoios de vigas bi apoiadas → armadura mínima de **0.4%** ou **0.2%** da área de concreto (na largura efetiva) caso de a viga ser

escorada/ escorada → armadura prolongar → comprimento mínimo 0.25 x comprimento viga

- Noutros casos deve ser usada um armadura mínima  $A_s$  (na largura efetiva):

$$A_s = \frac{k_s \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s}$$

$f_{c,eff}$  → tensão resist. concreto à tracção na idade da primeira fissura (mínimo 3 N/mm<sup>2</sup>),

$A_{ct}$  → área de concreto em tracção (simplificadamente considerado todo o concreto na largura efetiva),

$\sigma_s$  → máx. tensão permitida na armadura de reforço → tensão característica  $f_{sk}$ .

Coeficientes  $k_s$ ,  $k_c$  e  $k$  → efeito do deslizamento na ligação ao cisalhamento longitudinal, efeito da distribuição não uniforme de tensões no concreto e efeito das tensões de retracção ou devidas a variações de temperatura → calibrados experim. → tomam valores = 0.9, 1.0 e 0.8, respectivamente.

- Com o valor da armadura mínima  $A_s$  → calculada p/ expressão anterior → Quadros 7.1 e 7.2 → 7.4 EC4 → define-se o espaçamento e diâmetro dos vergalhões considerados p/ larguras fissuras máximas: 0.2, 0.3 e 0.4mm.

