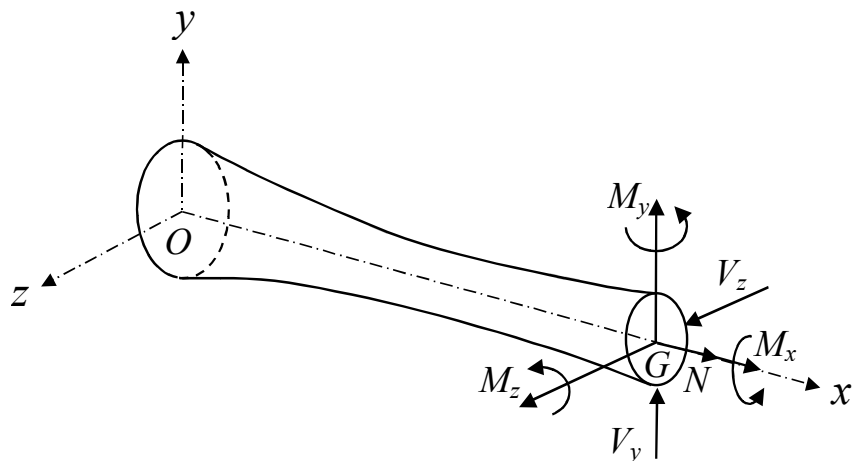


**CAPÍTULO V – Tensões de Flexão em Vigas**

**11ª AULA**

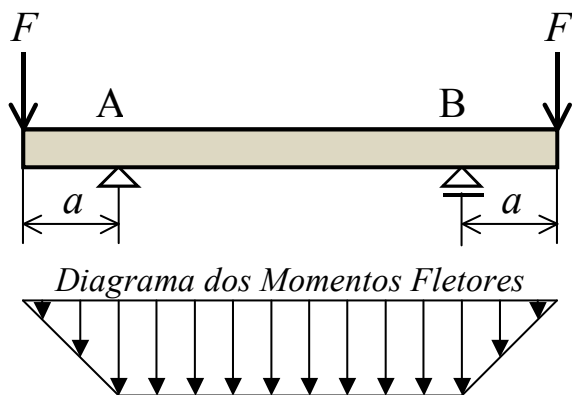
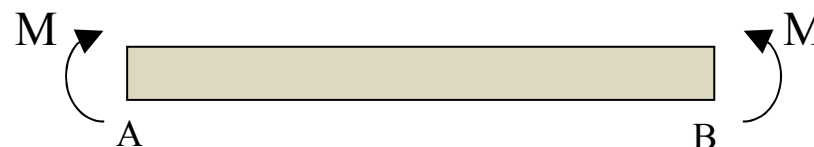
**5.1. Introdução. Tipos de Solicitação duma Viga:**



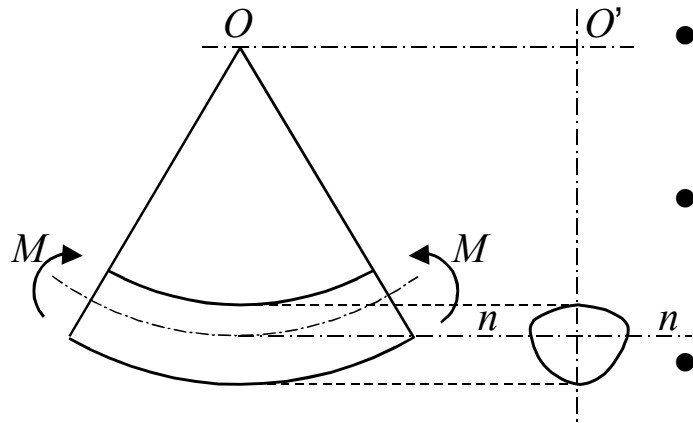
- Esforço Normal  $N$ , pode ser *tracção* ou *compressão*
- Momentos de Flexão  $M_z$  e  $M_y$
- Momento de Torção  $M_x$
- Esforços Transversos  $V_z$  e  $V_y$
- Eixos  $Oy$  e  $Oz$  são eixos principais de inércia da secção.
- Solicitações simples e compostas.
- Princípio da Sobreposição de esforços

**5.2. Flexão Pura duma Viga**

- solicitação única de *Momento de Flexão* constante.

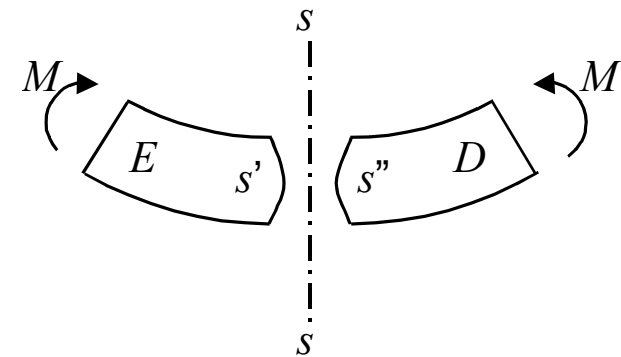


- Entre as duas secções A e B o esforço transversal é nulo. O momento flector é constante e igual a  $Fxa$ .
- Adopta-se a convenção de que o momento flector é positivo sempre que provoca na viga uma concavidade voltada para cima.
- Sendo constante o valor do momento de flexão, a deformação é a mesma em qualquer secção. Entre as secções A e B, o eixo da viga toma a forma de um arco de circunferência, com centro num ponto O do plano de solicitação.



- As fibras longitudinais, inicialmente rectilíneas, acompanham a curvatura do eixo, assumindo a forma de arcos de circunferência paralelos entre si.
- O Momento Flector tem resultante nula, pelo que as fibras não podem ficar todas à tracção ou todas à compressão – *Superfície Neutra* da viga e *Eixo Neutro (n-n)* da secção recta.
- O eixo neutro divide a secção em duas partes: uma em tração ( $\sigma > 0$ ) e outra em compressão ( $\sigma < 0$ ). Sobre o eixo neutro é  $\sigma = 0$ .

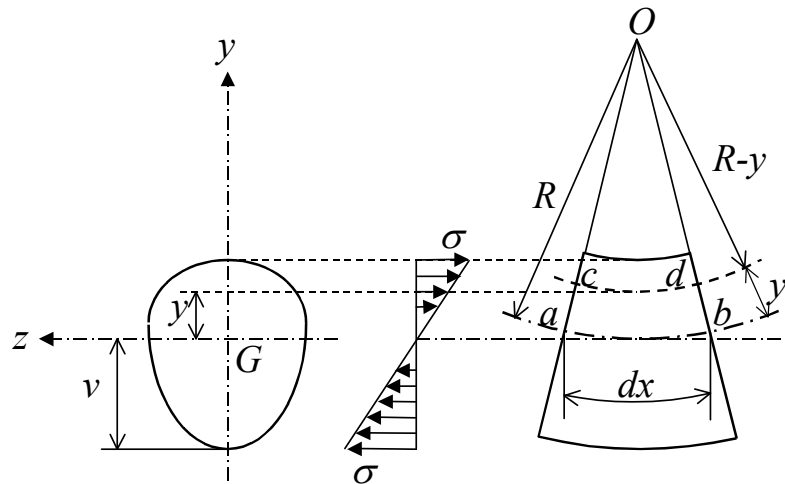
- A superfície ( $s-s$ ) de uma secção recta qualquer transforma-se, após a deformação nas superfícies ( $s'$ ) e ( $s''$ ), de cada uma das partes ( $E$ ) e ( $D$ ), respectivamente. Porque os dois troços E e D são idênticos e sujeitos ao mesmo tipo de solicitação, as superfícies ( $s'$ ) e ( $s''$ ) devem ser simétricas relativamente ao plano de corte ( $s-s$ ). E porque devem também ser sobreponíveis, as secções rectas têm de se manter planas. Por razões de simetria, esses planos devem passar todos pelo centro de curvatura do eixo da viga deformada.



### • HIPÓTESE DE BERNOULLI

**Durante o processo de deformação, as secções rectas da viga permanecem planas e perpendiculares às fibras deformadas. Cada secção recta roda relativamente às secções vizinhas, em torno do eixo neutro (n-n), de tal modo que o seu plano passa pelo centro de curvatura O do eixo da viga.**

- Deformação de uma fibra longitudinal (c-d):



$$\varepsilon = \frac{cd - ab}{ab}$$

$$\varepsilon = \frac{R - y}{R} - 1 = -\frac{y}{R} \xrightarrow{\text{Lei Hooke}} \sigma = E\varepsilon = -E \frac{y}{R}$$

- A posição do *eixo neutro* e a curvatura  $R$  da *fibra neutra* obtém-se a partir da condição:

$$\int_A \sigma dA = 0 \xrightarrow{\hspace{2cm}} \frac{E}{R} \int_A y dA = 0$$

- O eixo neutro passa pelo Centro de Gravidade da secção recta da viga, (conforme resulta da condição de ser nulo o integral.

$$\int_A y dA = 0$$

- Além disso, a soma dos momentos das forças de tensão são iguais ao momento flector  $M$ :

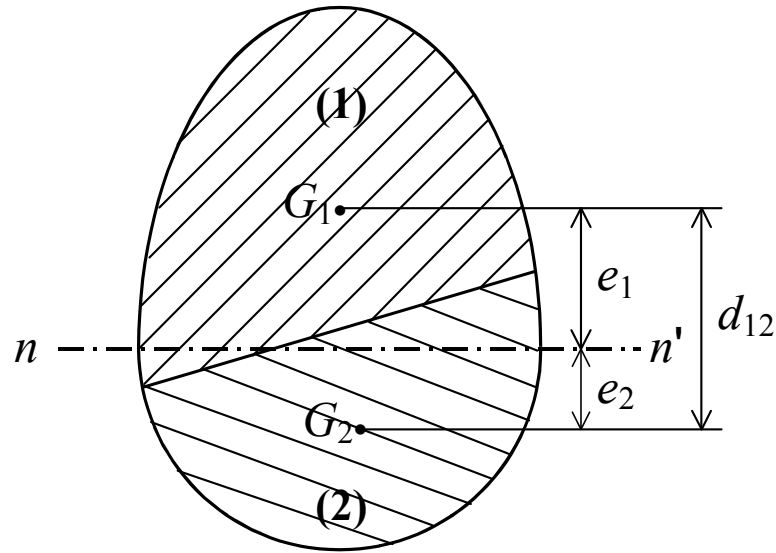
$$\int_A \sigma y dA = -\frac{E}{R} \int_A y^2 dA = -M \xrightarrow{\hspace{2cm}} \frac{1}{R} = \frac{M}{EI_z} \xrightarrow{\hspace{2cm}} \sigma = -\frac{M y}{I_z}$$

$$\sigma_{\max} = -\frac{M}{I_z / v}; \quad M_y = \int_A \sigma z dA = +\frac{E}{R} \int_A y z dA = 0$$

Os eixo  $x$  e  $y$  devem ser eixos principais de inércia da secção!

5.3. Vigas Compostas de Dois ou Mais Materiais Diferentes

12ª AULA



- Materiais (1) e (2), com módulos de Young  $E_1$  e  $E_2$ .
- Para um plano de solitação vertical, a posição do *eixo neutro*  $n-n'$  obtém-se a partir da condição:

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad \Rightarrow \quad \int_{A_1} \sigma_1 dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 dA_2 = 0$$

Donde, tendo em conta que  $\sigma = -\frac{E y}{R}$  (onde  $y$  é a distância ao *eixo neutro*):

$$\int_{A_1} \frac{E_1}{R} y dA_1 + \int_{A_2} \frac{E_2}{R} y dA_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad E_1 \int_{A_1} y dA_1 + E_2 \int_{A_2} y dA_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad E_1 A_1 e_1 + E_2 A_2 e_2 = 0$$

Por outro lado,

$$e_1 - e_2 = d_{12} \quad (\text{distância, na vertical, entre } G_1 \text{ e } G_2)$$

$$e_1 = \frac{E_2 A_2 d_{12}}{E_1 A_1 + E_2 A_2}$$

$$e_2 = -\frac{E_1 A_1 d_{12}}{E_1 A_1 + E_2 A_2}$$

- Considerando agora a condição de equilíbrio entre o momento flector  $M$  aplicado e as tensões internas  $\sigma$ , obtém-se:

$$M = - \int_A \sigma y dA = - \int_{A_1} \sigma_1 y dA_1 - \int_{A_2} \sigma_2 y dA_2$$

Por outro lado, considerando que:

$$\sigma_1 = -\frac{E_1 y}{R} \quad \text{e} \quad \sigma_2 = -\frac{E_2 y}{R} \quad \longrightarrow \quad M = \frac{E_1}{R} \int_{A_1} y^2 dA_1 + \frac{E_2}{R} \int_{A_1} y^2 dA_2$$

ou seja,

$$M = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{R} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \sigma_1 &= -\frac{ME_1 y}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \\ \sigma_2 &= -\frac{ME_2 y}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \end{aligned}$$

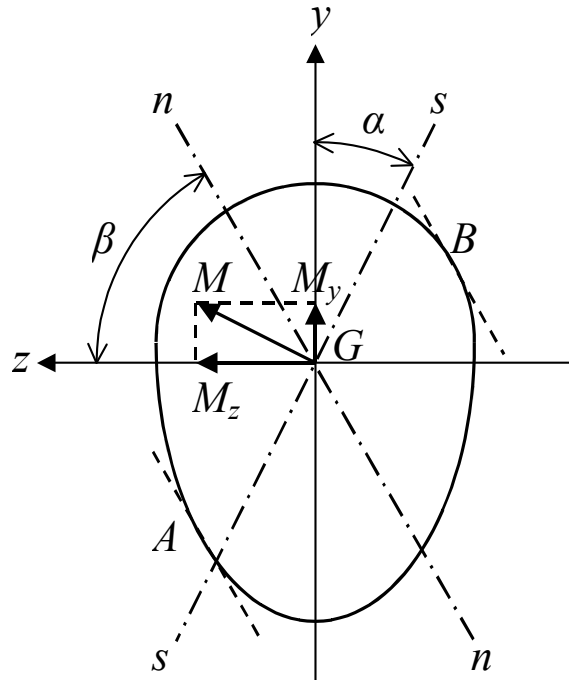
onde  $y$  é a distância ao eixo neutro da viga composta, definido pelas cotas  $e_1$  e  $e_2$  calculados acima.

- As expressões anteriores para a posição do eixo neutro e para o cálculo das tensões podem ser generalizadas a uma viga composta de  $n$  materiais diferentes, assumindo as formas seguintes:

$$e_1 = \frac{\sum_{j=2}^{j=n} E_j A_j d_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=n} E_j A_j} \quad \text{e} \quad \sigma_i = -\frac{ME_i y}{\sum_{j=1}^{j=n} E_j I_j}$$

### 5.4. Flexão Desviada

- Quando o plano de solicitação  $s-s$  contém o eixo da viga, mas não inclui nenhum dos eixos principais de inércia da secção recta, diz-se que estamos em presença duma *flexão desviada*.



- Decompõe-se a solicitação segundo os dois eixos principais centrais de inércia:

$$M_z = M \cos(\alpha) \qquad M_y = M \sin(\alpha)$$

- Aplicando o princípio da sobreposição:

$$\sigma = -\frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y} = M \left( -\frac{y \cos(\alpha)}{I_z} + \frac{z \sin(\alpha)}{I_y} \right)$$

- A posição do *eixo neutro*  $n-n$  obtém-se a partir da condição  $\sigma = 0$ , isto é:

$$-\frac{y \cos(\alpha)}{I_z} + \frac{z \sin(\alpha)}{I_y} = 0 \qquad \Longrightarrow \qquad \text{tg}(\beta) = \frac{y}{z} = \text{tg}(\alpha) \frac{I_z}{I_y}$$

- As tensões máximas de flexão ocorrem nos pontos A e B, que são os pontos mais afastados do *eixo neutro*  $n-n$ .

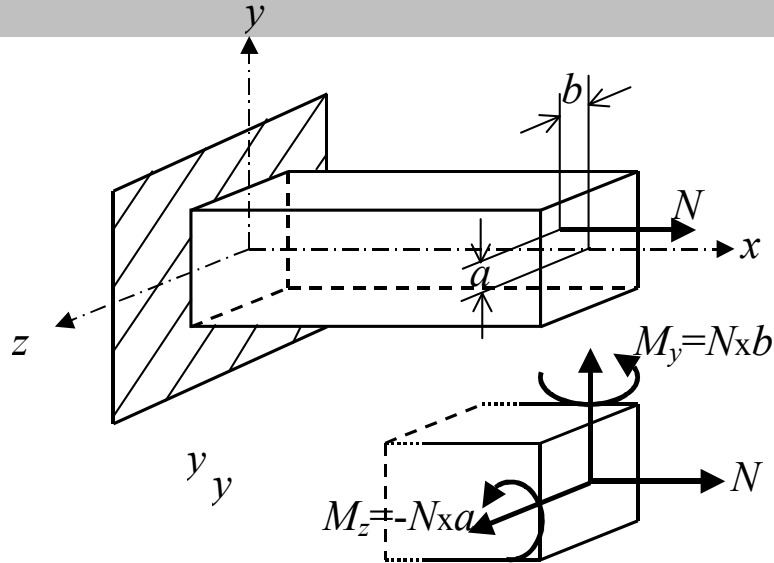
- Os ângulos de flexão entre duas secções afastadas dum comprimento  $l$ , provocadas pelos momentos  $M_z$  e  $M_y$  são  $\phi_y$  e  $\phi_z$ , dados respectivamente por:

$$\phi_y = \frac{M_y l}{EI_y} \quad , \quad \phi_z = \frac{M_z l}{EI_z} \quad \Longrightarrow \quad \Phi = \sqrt{\phi_y^2 + \phi_z^2} = \frac{Ml}{E} \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha)}{I_y^2} + \frac{\cos^2(\alpha)}{I_z^2}} \quad \Longrightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{M}{E} \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha)}{I_y^2} + \frac{\cos^2(\alpha)}{I_z^2}}$$

onde  $R$  é o raio de curvatura da fibra neutra da viga em *flexão desviada*!...

**5.5. Flexão Combinada com Esforço Normal**

**13ª AULA**



- Força excêntrica paralela ao eixo da viga.
- A tensão  $\sigma$  no ponto genérico de coordenadas P(y,z) obtém-se utilizando o *princípio de sobreposição de esforços*:

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y} = \frac{N}{A} + \frac{Nxa y}{I_z} + \frac{Nxb z}{I_y}$$

onde  $A$  é a área da secção recta da viga,  $N$  é a força axial excêntrica (excentricidades  $a$  e  $b$ ) e

$$M_z = -Nxa \quad \text{e} \quad M_y = Nxb$$

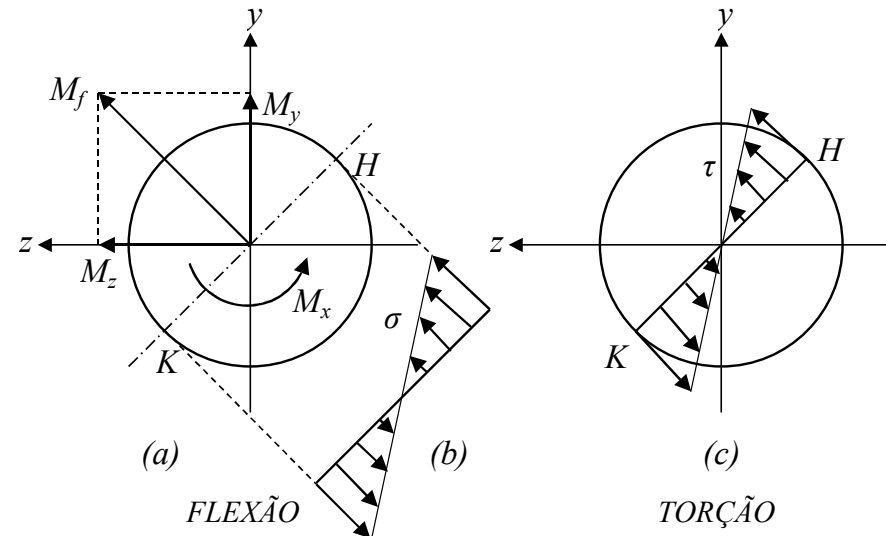
- Obviamente que quando  $a=0$  ou  $b=0$  está-se em presença de uma situação de flexão plana...

**5.6. Flexão Combinada com Torção**

**5.6.1. Caso duma Secção Recta Circular**

- Momento de torção  $M_x$  e momentos de flexão  $M_y$  e  $M_z$ .

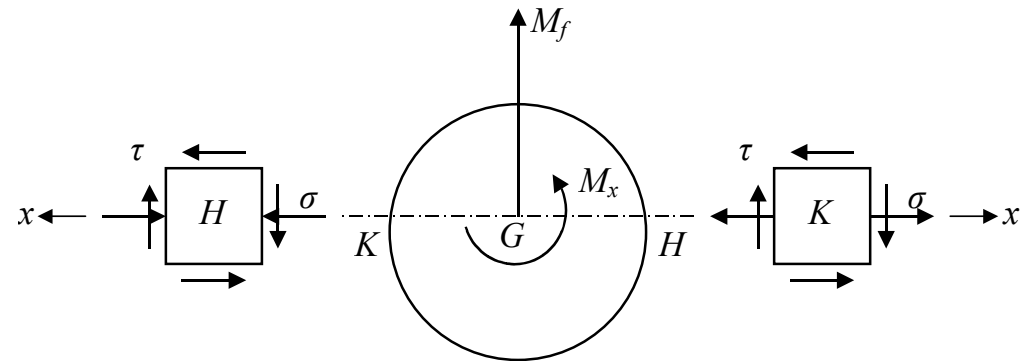
$$\sigma = \frac{M_y z - M_z y}{I_z} \quad \tau = \frac{M_x r}{I_x}$$



- O eixo neutro tem a direcção do momento flector resultante ( $M_f$ ) e os pontos críticos são  $H$  e  $K$ , onde a tensão de flexão atinge os valores máximos à tracção e à compressão:

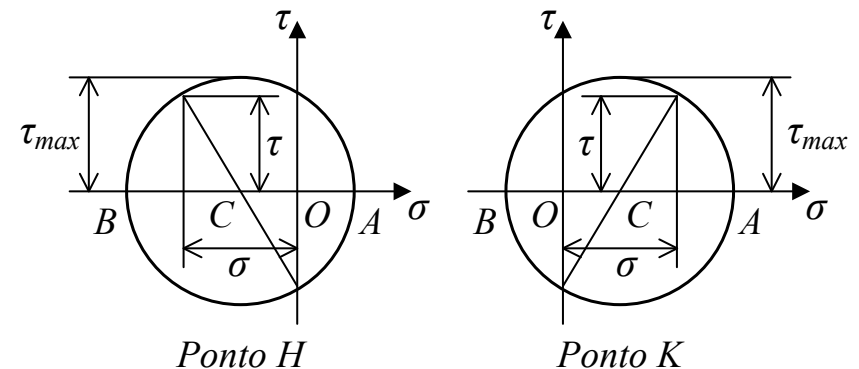
$$\sigma(H) = -\frac{M_f r}{I_z} \qquad \sigma(K) = +\frac{M_f r}{I_z}$$

- Do ponto de vista da torção, a tensão máxima também ocorre à periferia ( $r=R$ ), pelo que nos pontos  $H$  e  $K$  há a combinação de tensões máximas de flexão e de torção, conforme o esquema da figura ao lado.



- Aplicando a construção do círculo de Mohr à situação em cada um daqueles pontos críticos, obtém-se, em ambos os casos:

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\sigma/2)^2 + \tau^2}$$





### 5.6.2. Caso duma Secção Recta Rectangular

- No caso duma secção rectangular, os pontos críticos à flexão são os pontos *C*, mais afastados relativamente ao *eixo neutro n-n*.
- No que diz respeito à torção, os pontos críticos da mesma secção são os pontos *A*, sendo nulas as tensões de corte em *C*.
- Há ainda a considerar os pontos *B* da secção recta, onde existem simultaneamente tensões de flexão ( $\sigma$ ) e tensões de corte ( $\tau$ ).
- Assim, nos pontos *A*, tem-se:

$$\sigma_A = \frac{6M_y}{b^2h} \quad \text{e} \quad \tau_A = \alpha \frac{M_x}{b^2h}$$

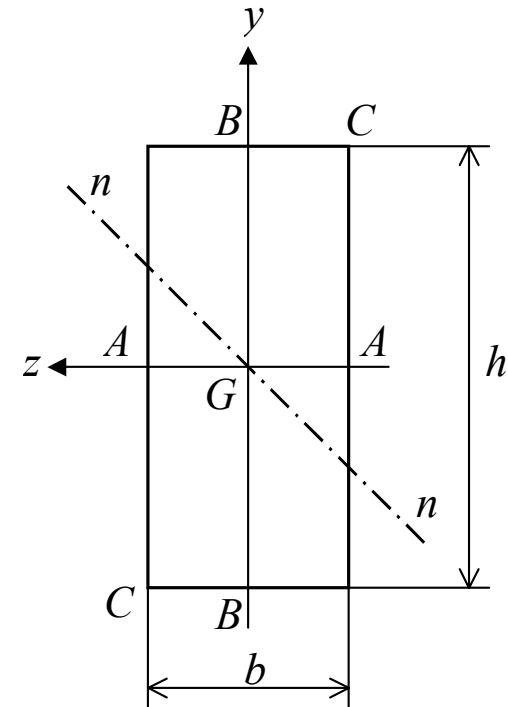
E nos pontos *B*:

$$\sigma_B = \frac{6M_z}{bh^2} \quad \text{e} \quad \tau_A = \beta \frac{M_x}{b^2h}$$

Nos pontos *C* a tensão tangencial é nula (por se tratar dum *canto...*), sendo a tensão de flexão dada por:

$$\sigma = \frac{6M_y}{b^2h} - \frac{6M_z}{bh^2}$$

- Finalmente, haverá que determinar em qual daqueles três pontos *A*, *B* ou *C* ocorre a combinação de tensões mais desfavorável, segundo um critério de resistência apropriado.



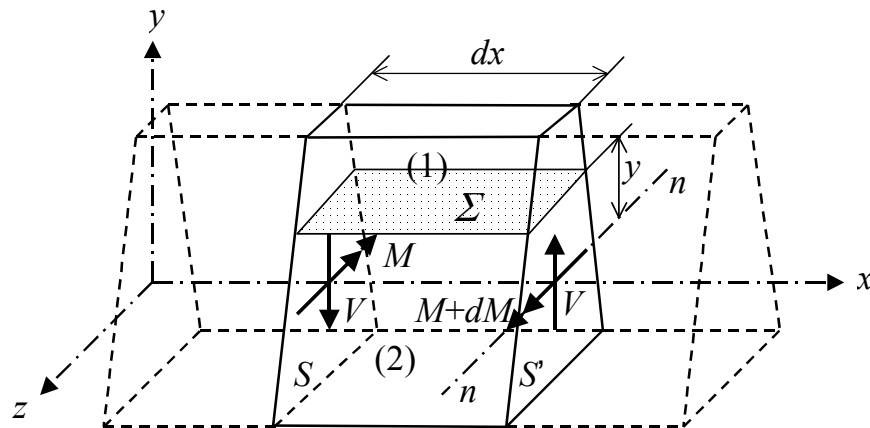
5.7. Flexão Combinada com Esforço de Corte

- No caso duma viga sujeita à flexão pura, o esforço de corte é nulo. No caso geral tal não acontece, designadamente quando o momento de flexão varia ao longo do eixo da viga, havendo uma sobreposição de efeitos de flexão e efeitos de corte.
- Admitindo a hipótese de Bernoulli que, neste caso á uma aproximação, as tensões normais associadas ao momento de flexão continuam a ser calculadas pela expressão:

$$\sigma = \frac{My}{I_z}$$

5.7.1. O Esforço Rasante

- Para obter a distribuição das tensões de corte sobre a secção recta, considere-se o equilíbrio dos momentos num elemento de viga de comprimento  $dx$ :



$$dM = -Vdx \quad \longrightarrow \quad V = -\frac{dM}{dx}$$

A variação do momento flector ao longo do eixo da viga implica necessariamente a existência de *Esforço de Corte*.

- Imagine-se agora o elemento dividido em duas partes (1) e (2), por um plano  $\Sigma$  paralelo à *superfície neutra*, à distância  $y$  do *eixo neutro n-n*.

- Representando isoladamente a parte (1), esta fica em equilíbrio sob a acção das forças que actuam nas duas faces verticais  $S$  e  $S'$  e na face inferior  $\Sigma$ .
- Na secção  $S$ , a força normal  $N$  correspondente à tensão de flexão  $\sigma$  é dada por:

$$N = -\int_{A_1} \sigma dA = -\frac{M}{I_z} \int_{A_1} y dA$$

e na secção  $S'$ , onde o momento é  $M+dM$ :

$$\sigma' = \sigma + d\sigma = -\frac{(M + dM)y}{I_z}$$

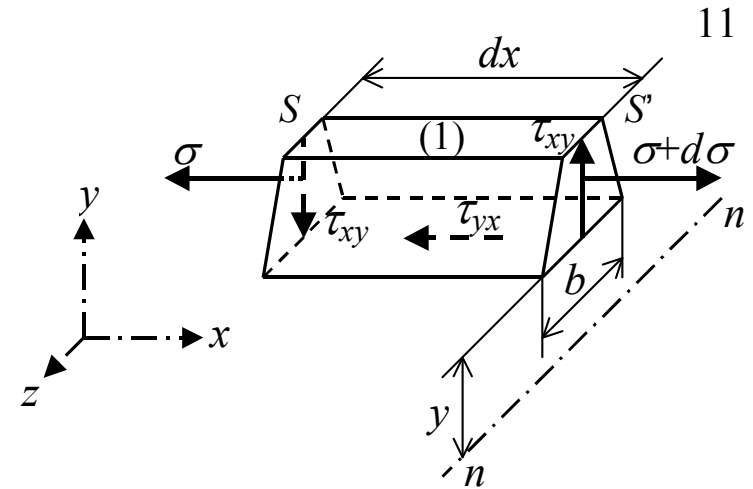
$$N + dN = \int_{A_1} (\sigma + d\sigma) dA = -\frac{M + dM}{I_z} \int_{A_1} y dA$$

- Na superfície  $\Sigma$  há a considerar as tensões  $\tau_{yx}$  ( $=\tau_{xy}$ ), aqui designadas por *tensões rasantes*. Admitindo que estas se distribuem uniformemente ao longo da espessura  $b$  da viga, temos:

Força de corte =  $\tau_{yx} b dx$  Equilíbrio FF Horizontais  $\int_{A_1} \frac{(M + dM)y}{I_z} dA - \int_{A_1} \frac{M y}{I_z} dA + \tau_{yx} b dx = 0$

Donde:  $\tau_{yx} = -\frac{dM}{dx} \frac{\int_{A_1} y dA}{I_z b}$   $\longrightarrow$   $\tau_{yx} = \tau_{xy} = \frac{V S}{I_z b}$  (fórmula de Jouravski!...)

Onde  $V = -\frac{dM}{dx}$  é o esforço transversal e  $S = \int_{A_1} y dA$  é o momento estático da área  $A_1$  relativamente ao eixo neutro da secção.

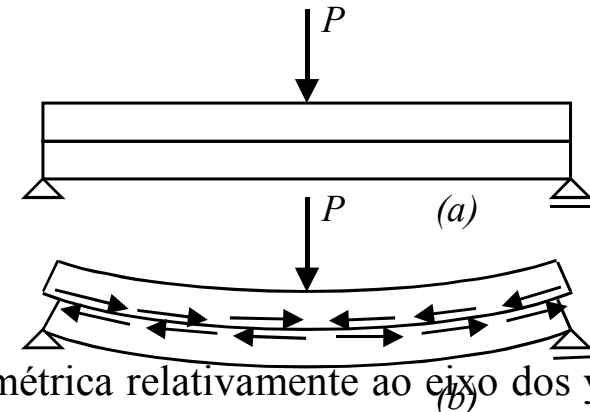


- É habitual pôr-se

$$R = \tau_{yx} b = \frac{V S}{I_z}$$

**Esforço Rasante** (força de corte por unidade de comprimento!)

- Dividindo longitudinalmente a viga em duas partes (a), estas tenderiam a deformar-se de acordo com o esquema (b), produzindo um deslizamento relativo entre ambas as partes. Para anular esse *deslizamento relativo*, há que aplicar as forças tangenciais indicadas, as quais traduzem a *tensão* ou *esforço rasante*!...



- No caso duma secção arbitrária, simétrica relativamente ao eixo dos yy, a tensão de corte  $\tau$  num ponto A qualquer sobre a horizontal C-C é, em geral, oblíqua relativamente ao eixo de simetria yy. A componente vertical  $\tau_{xy}$  é dada por

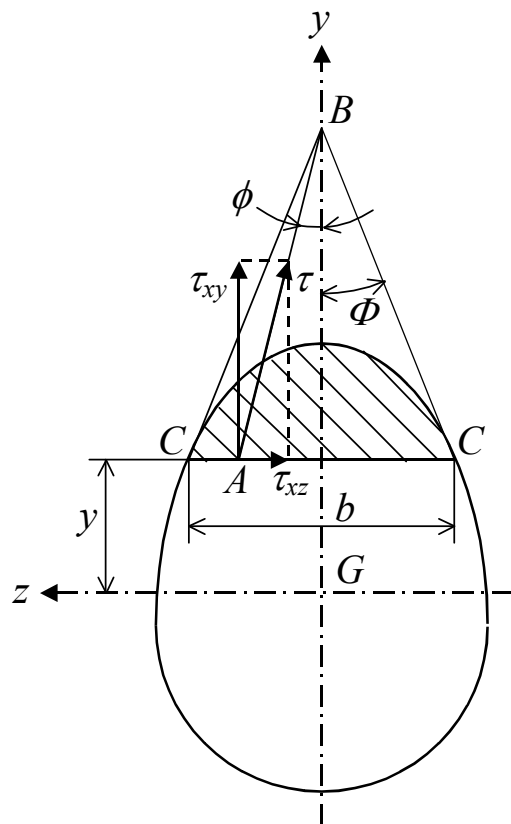
$$\tau_{xy} = \frac{V S}{I_z b}$$

- Admitindo que a tensão  $\tau$  no ponto A está também dirigida para o ponto B, definido a partir das tangentes em C, a componente  $\tau_{xz}$  é dada por:

$$\tau_{xz} = \tau_{xy} \operatorname{tg}(\phi) \quad \longrightarrow \quad \tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} = \frac{\tau_{xy}}{\cos(\phi)} = \frac{V S}{I_z b \cos(\phi)}$$

- A tensão de corte máxima ocorre nos pontos C da periferia:

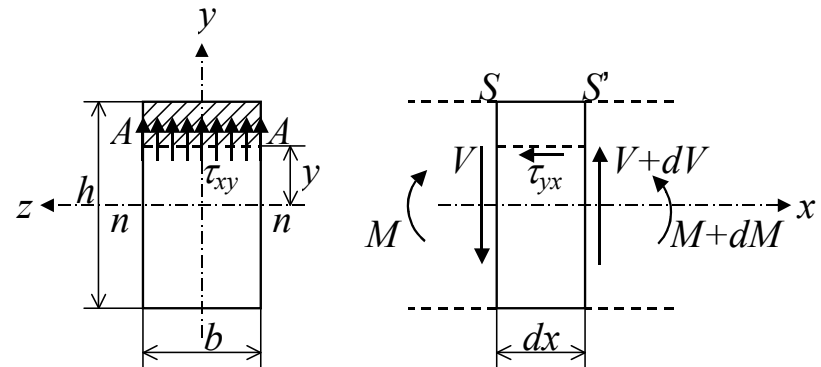
$$\tau_{\max} = \tau_{xy} / \cos(\Phi)$$



5.7.1. Viga de Secção Recta Rectangular

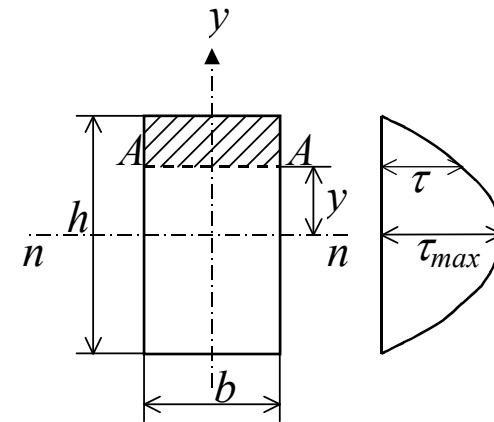
- As tensões  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  são dadas pela fórmula de Jouravski:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \tau = \frac{V S}{I_z b}$$



- Para uma secção rectangular, momento estático  $S$  num plano à distância  $y$  do eixo neutro é:

$$S = b \left( \frac{h}{2} - y \right) \frac{h/2 + y}{2} = \frac{b}{2} (h^2 - y^2)$$



Donde,

$$\tau = \frac{3V}{2bh} \left[ 1 - \left( \frac{2y}{h} \right)^2 \right] \longrightarrow \tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{V}{bh}$$

- A tensão de corte máxima ocorre ao nível do *eixo neutro* e é 50% superior àquela que seria obtida dividindo o *esforço transversal* ( $V$ ) pela área da secção transversal da viga, isto é, se fosse admitida uma repartição uniforme das tensões de corte ao longo da secção!...

**5.7.2. Viga de Secção Recta Circular**

- Para uma secção circular de raio  $R$ , a aplicação da fórmula de Jouravski num plano à distância  $y$  do eixo neutro conduz a:

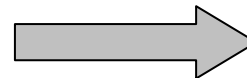
$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \tau = \frac{V}{I_z} \int_y^R u b' du$$

Da figura tira-se:

$$b = 2 R \cos(\alpha) \quad b' = 2 R \cos(\theta)$$

$$y = R \sin(\alpha) \quad u = R \sin(\theta)$$

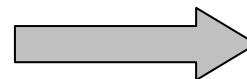
$$du = R \cos(\theta) d\theta$$



$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{V}{2I_z} \int_a^{\pi/2} 2R^3 \cos^2(\theta) \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{VR^2}{I_z \cos(\alpha)} \left[ -\frac{\cos^3(\theta)}{3} \right]_{\alpha}^{\pi/2} = \frac{VR^2 \cos^2(\alpha)}{3 I_z} \end{aligned}$$

Tendo em conta que, neste caso,

$$I_z = \frac{\pi R^4}{4} \quad \text{e} \quad \cos^2(\alpha) = 1 - \frac{y^2}{R^2}$$

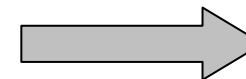


$$\tau_{xy} = \frac{4}{3} \frac{V}{\pi R^2} \left[ 1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2 \right] = \frac{VR^2 \cos^2(\alpha)}{3 I_z}$$

- A tensão tangencial resultante  $\tau$  nos pontos A do contorno é:

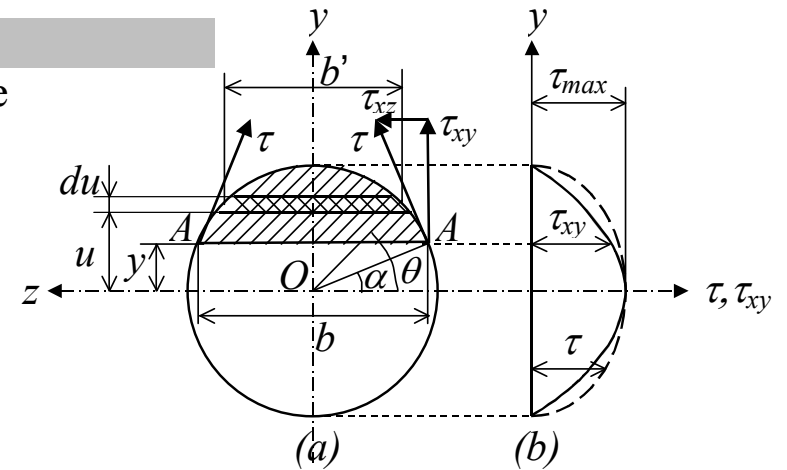
(variação parabólica!...)

$$\tau = \frac{\tau_{xy}}{\cos(\alpha)} = \frac{4}{3} \frac{V}{\pi R^3} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} \quad (\text{variação elíptica!...})$$



$$\tau_{max} = \frac{4}{3} \frac{V}{\pi R^2}$$

- A tensão de corte máxima ocorre também ao nível do *eixo neutro* e é 33% superior àquela que seria obtida dividindo o *esforço transversal* ( $V$ ) pela área da secção transversal da viga, isto é, se fosse admitida uma repartição uniforme das tensões de corte ao longo da secção!...



**5.7.3. Vigas de Secção Tubular Aberta**

- A fórmula de Jouravski pode também ser aplicada a vigas de secção tubular aberta, como é o caso dos perfis laminados utilizados em construção mecânica e construção civil:

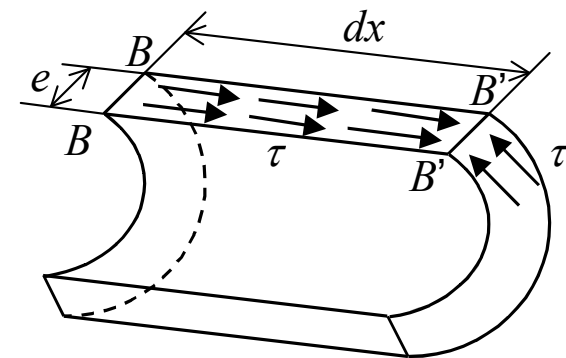
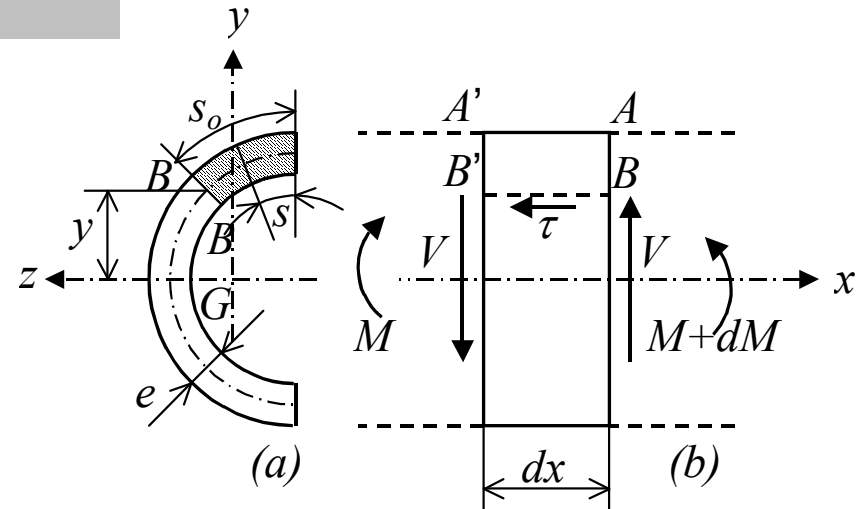
$$R = \frac{V S}{I_z}, \quad \text{onde} \quad S = \int_0^{s_0} y(s) e(s) ds$$

onde  $S$  é o momento estático da área a tracejado relativamente ao eixo neutro  $Gz$  e  $s$  representa o comprimento do arco corrente entre os pontos  $A$  e  $B$ .

- Admitindo que as tensões  $\tau$  que estão associadas ao esforço rasante na secção  $BBB'B'$  se distribuem uniformemente através da espessura  $e$ :

$$\tau = \frac{R}{e} = \frac{V S}{e I_z}$$

- Em virtude do princípio da reciprocidade das tensões tangenciais, pode dizer-se que as tensões rasantes que actuam na face  $BB B'B'$  são acompanhadas de tensões de corte iguais,  $\tau$ , que actuam no plano da secção recta, segundo a direcção da tangente à linha média da parede.



**(i)-Caso de um Perfil em U**

- Nas abas superior e inferior, as tensões de corte são horizontais ( $\tau_{xz}$ ), dadas pela fórmula de Jouravski. Assim, no ponto genérico B da aba superior, à distância  $u$  do bordo livre A, tem-se:

$$\tau_{xz} = \frac{V S}{e I_z} = \frac{Vuh}{2 I_z}$$

*tensão máxima na zona de ligação com a alma*

 $\rightarrow$ 

$$\tau_{max} = \frac{Vbh}{2 I_z}$$

Na aba inferior a distribuição das tensões  $\tau_{xz}$  é análoga, havendo apenas uma inversão do sentido, conforme indicado na figura

- No ponto genérico C da alma, à distância  $y$  do eixo neutro, tem-se:

$$S = a \left( \frac{h}{2} - y \right) \frac{h/2 + y}{2} + \frac{beh}{2} \quad e \quad \tau_{xy} = \frac{V h^2}{8 I_z} \left[ 1 - (2y/h)^2 \right] + \frac{Vbeh}{2 a I_z}$$

A tensão máxima na aba ocorre ao nível do eixo neutro ( $y=0$ ):

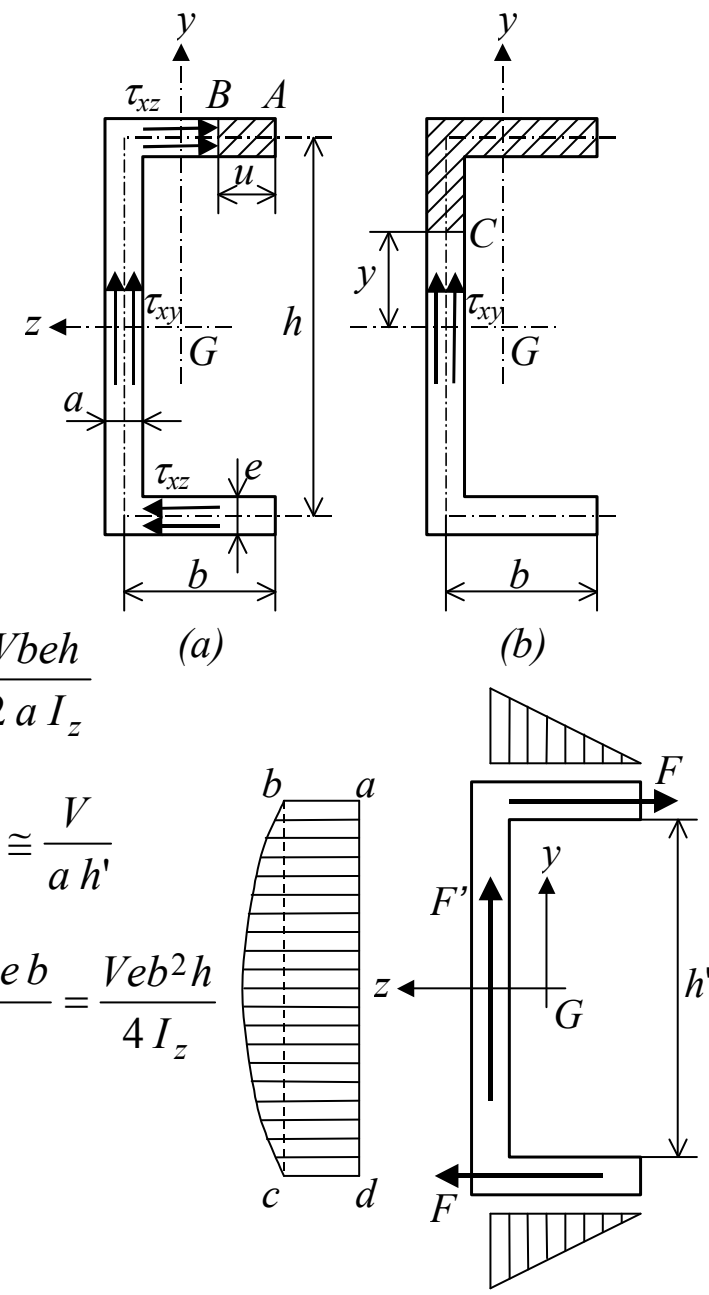
$$\tau_{max} = \frac{Vh^2}{8 I_z} + \frac{Vbeh}{2 a I_z} \cong \frac{V}{a h'}$$

- A força resultantal (*horizontal*) em cada uma das abas é:

$$F = \frac{\tau_{max} e b}{2} = \frac{Veb^2 h}{4 I_z}$$

- E a força resultante (*vertical*) na aba é:

$$F = \frac{Vah^3}{12 I_z} + \frac{Vebh^2}{2 I_z} = V$$

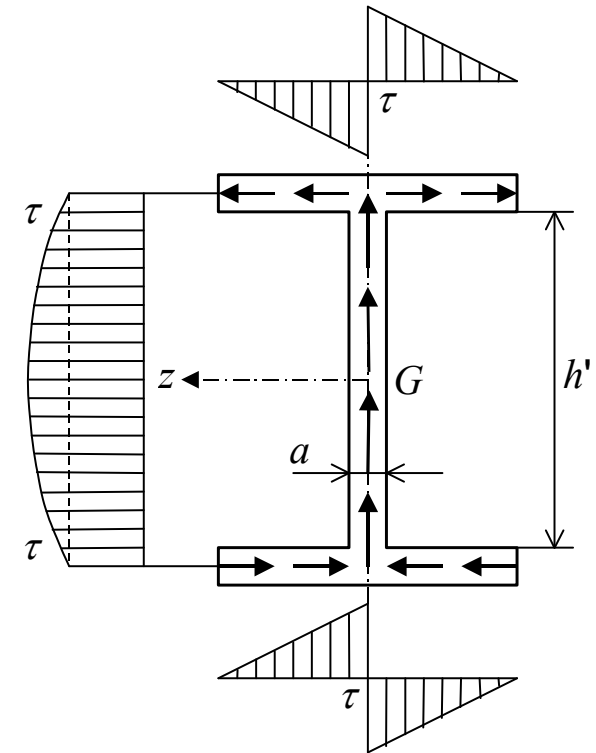




**(ii)-Caso de um Perfil em I**

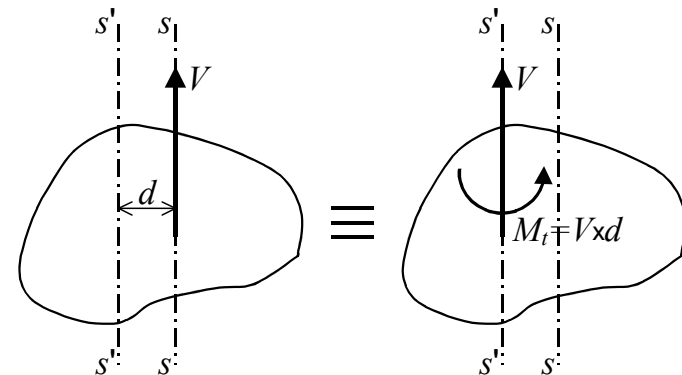
- A solução para o perfil em I obtém-se directamente do caso anterior, considerando o perfil I composto através da junção de dois perfis U.
- Também aqui a tensão máxima ocorre na aba, ao nível do eixo neutro ( $y=0$ ) podendo ser calculada através da fórmula:

$$\tau_{max} = \frac{VS}{a I_z} \cong \frac{V}{a h'}$$

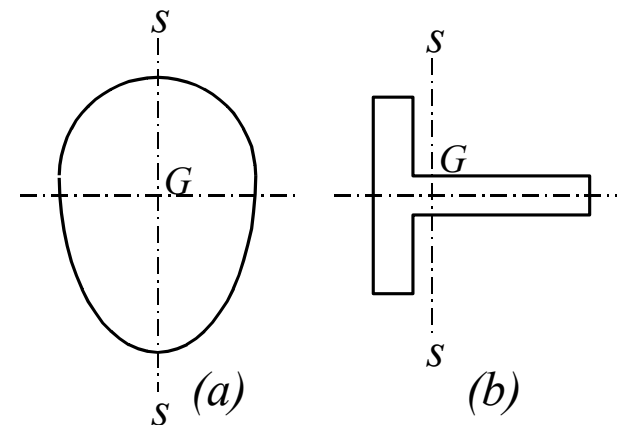


**5.7.4. Centro de Corte ou Centro de Torção**

- Quando a solicitação de flexão é acompanhada dum esforço de corte, a posição do plano de solicitação não é indiferente, uma vez que o seu deslocamento faz variar a distância das forças exteriores ao eixo da viga, introduzindo deste modo um determinado *momento de torção*.



- Se a secção recta da viga é simétrica relativamente a um dos eixos principais centrais de inércia, e se o plano de sollicitação contém esse eixo (*a*), por razões de simetria, cada secção roda em torno do eixo neutro, perpendicular a aquele eixo de simetria, e a viga deforma-se *sem torção*. Já no caso em que o eixo principal central de inércia *ss* não é eixo de simetria (*b*), verifica-se um fenómeno secundário de *torção da peça*. Este fenómeno pode ser claramente posto em evidência através duma análise mais aprofundada do comportamento à flexão duma viga de secção em *U*.

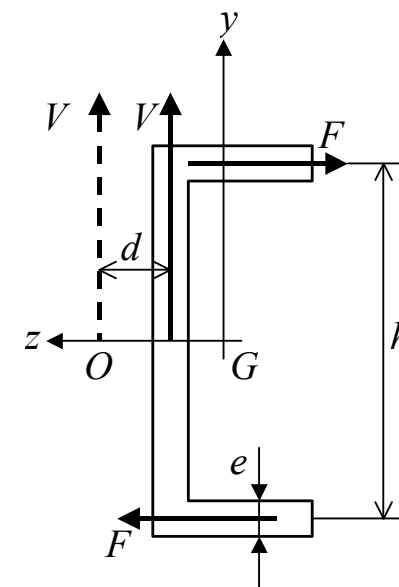


- Considere-se uma viga de secção em U sollicitada em flexão com esforço transversal. As resultantes das tensões de corte nas abas e na alma são, respectivamente, *F*, *-F* e *V*, em que as forças que actuam nas abas formam um binário de torção cujo momento é dado por:

$$M_t = F \times h = \frac{Veb^2h^2}{4I_z}$$

- O sistema constituído pelas três forças *F*, *-F* e *V* é equivalente à resultante vertical *V*, deslocada para a esquerda de uma distância *d*, de tal modo que:

$$V \times d = F \times h \quad \Rightarrow \quad d = \frac{F \times h}{V} = \frac{b^2h^2e}{4I_z}$$



- A intercepção da linha de acção dessa força resultante *V* com o eixo neutro define o ponto *O* que é o *centro de corte* ou *centro de torção* da secção .
- Sempre que o plano de sollicitação não passa pelo centro de torção, às tensões associadas ao esforço de corte, haverá que sobrepor as tensões de torção produzidas por um momento de torção igual ao produto do esforço transversal pela distância do plano de sollicitação ao centro de torção.