



EFICIÊNCIA DA GEOMETRIA DAS SECÇÕES EM I SUBMETIDAS A FLEXÃO COMPOSTA

António M. Baptista^a

^a *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas*

Resumo. O presente artigo propõe uma definição para a eficiência da geometria de uma secção em I submetida a flexão composta. Em seguida demonstra-se que, para cada valor da espessura relativa da sua alma, α_b , é possível encontrar, em regime elástico e em regime plástico, um valor específico para a espessura relativa dos seus banzos, α_h , que permite aumentar a eficiência da resistência à flexão da secção. Por fim, são apresentadas representações gráficas dos factores α_b e α_h , referentes às secções em I das principais séries de perfis europeus, que mostram o posicionamento destes factores relativamente às configurações geométricas que optimizam a eficiência da resistência à flexão destes perfis.

1. Introdução

A eficiência da geometria da secção transversal de um perfil em I, submetida a um esforço normal inicial, depende da relação entre o momento flector máximo e o esforço normal adicional máximo, agindo separadamente, a que esta secção transversal ainda é capaz de resistir.

No caso de secções transversais de perfis em I laminados a quente, a sua capacidade de resistência depende das proporções geométricas da sua forma, ou seja, da relação entre a altura da secção e a espessura dos banzos, e da relação entre a largura da secção e a espessura da alma. Estas proporções são diferentes de uma série de perfis para outra e, por vezes, apresentam também variações importantes dentro de cada série. No domínio plástico, a variação da eficiência da secção em flexão composta é também afectada pela interacção entre o momento flector e outros esforços internos, nomeadamente o esforço normal [1] [2].

O presente trabalho apresenta um método de optimização da geometria da secção transversal de perfis em I, de modo a aumentar a sua eficiência em regime elástico e em regime plástico, melhorando a relação entre os esforços resistentes da secção em flexão composta (segundo cada um dos seus eixos principais de inércia) e a área da secção transversal, ou seja, a quantidade de aço necessária para fabricar a secção, sem que esta seja afectada por problemas de instabilidade local.

A aplicação deste método permite não só escolher a secção mais adequada entre diferentes soluções alternativas (de perfis laminados, por exemplo), como também escolher a geometria mais eficaz de uma secção soldada para resistir a uma determinada combinação de esforços em flexão composta.

2. Resistência de uma secção em I submetida a flexão composta

2.1 Regime elástico

Em regime elástico, o maior momento flector M a que uma secção em I submetida a um esforço normal N pode resistir pode ser calculado através da Eq. (1):

$$\frac{M}{W_{el}} = f_y - \frac{N}{A} \Leftrightarrow \frac{M}{M_{el}} = 1 - \frac{N}{N_{el}} \Leftrightarrow m = 1 - n \quad (1)$$

em que A e W_{el} representam, respectivamente, a área de secção transversal e o módulo de flexão elástico da secção em I, f_y é a tensão de cedência do aço, N_{el} e M_{el} correspondem aos valores máximos do esforço normal e do momento flector em regime elástico, e n e m representam os valores do esforço normal e do momento flector normalizados em relação aos esforços resistentes N_{el} e M_{el} . Supõe-se que os valores de todas estas variáveis são positivos; no caso de o valor dos esforços ser negativo, deverá ser introduzido o seu valor absoluto na Eq. (1) e atribuído o sinal adequado ao resultado obtido.

2.2 Regime plástico

No caso de uma secção em I sujeita a um esforço normal n e a flexão segundo o seu eixo de maior inércia, o valor máximo do momento flector normalizado $m_{pl,n,y}$ a que essa secção pode resistir em regime plástico pode ser calculado através da Eq. (2), no caso de o seu eixo neutro intersectar um dos seus banzos, ou da Eq. (3), no caso de o seu eixo neutro intersectar a sua alma:

$$\text{Se: } \frac{\alpha_h (1 - \alpha_b)}{1 - \alpha_b \alpha_h} \leq n \leq 1 \Rightarrow m_{pl,n,y} = \frac{3}{2} \left(\frac{1 - ((1 - \alpha_b \alpha_h)n + \alpha_b \alpha_h)^2}{1 - \alpha_b \alpha_h^3} \right) \quad (2)$$

$$\text{Se: } 0 \leq n \leq \frac{\alpha_h (1 - \alpha_b)}{1 - \alpha_b \alpha_h} \Rightarrow m_{pl,n,y} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{1 - \alpha_b \alpha_h^3} \right) \left(1 - \alpha_b \alpha_h^2 - \frac{(1 - \alpha_b \alpha_h)^2}{1 - \alpha_b} n^2 \right) \quad (3)$$

No caso de uma secção em I sujeita a um esforço normal n e a flexão segundo o seu eixo de menor inércia, o valor máximo do momento flector normalizado $m_{pl,n,z}$ a que essa secção pode resistir em regime plástico pode ser calculado através da Eq. (4), no caso de o seu eixo neutro intersectar apenas os seus banzos, ou da Eq. (5), no caso de o seu eixo neutro intersectar também a sua alma:

$$\text{Se: } \frac{(1 - \alpha_b)}{1 - \alpha_b \alpha_h} \leq n \leq 1 \Rightarrow m_{pl,n,z} = \frac{3}{2} \left(\frac{(1 - \alpha_h)^2 - ((1 - \alpha_b \alpha_h)n - (1 - \alpha_b)\alpha_h)^2}{(1 - \alpha_h)(1 - \alpha_h(1 - (1 - \alpha_b)^3))} \right) \quad (4)$$

$$\text{Se: } 0 \leq n \leq \frac{(1 - \alpha_b)}{1 - \alpha_b \alpha_h} \Rightarrow m_{pl,n,z} = \frac{3}{2} \left(\frac{1 - \alpha_h(1 - (1 - \alpha_b)^2) - (1 - \alpha_b \alpha_h)^2 n^2}{1 - \alpha_h(1 - (1 - \alpha_b)^3)} \right) \quad (5)$$

Os parâmetros geométricos α_b e α_h indicados nas Eqs. (2) a (5) definem relações entre a espessura t_w da alma e a largura b do banzo da secção, e entre a espessura t_f dos banzos e a altura h da secção, respectivamente. O seu valor pode ser calculado através das Eqs. (6) e (7):

$$\alpha_b = 1 - \frac{t_w}{b} \quad (6)$$

$$\alpha_h = 1 - \frac{2 t_f}{h} \quad (7)$$

3. Eficiência da geometria das secções em I

3.1 Definição

A eficiência da resistência à flexão das secções de aço em I, previamente sujeitas a um esforço normal N , pode ser avaliada através da relação entre o maior momento flector M_N e o maior esforço normal N_N adicionais a que a secção pode ainda resistir, para além do esforço normal N anteriormente aplicado.

3.2 Regime elástico

Uma vez que, em regime elástico, os efeitos do esforço normal e do momento flector são independentes entre si, os valores de $N_{el,N}$ e de $M_{el,N}$ podem ser obtidos através das Eqs. (8) e (9):

$$N_{el,N} = A f_{y,N} \quad (8)$$

$$M_{el,N} = W_{el} f_{y,N} \quad (9)$$

em que:

$$f_{y,N} = f_y - N/A \quad (10)$$

O cálculo da eficiência da resistência à flexão em regime elástico, $e_{el,N}$, de uma secção de aço em I, pode, portanto, ser efectuado através da Eq. (11):

$$e_{el,N} = \frac{M_{el,N}}{N_{el,N}} = \frac{W_{el} f_{y,N}}{A \cdot f_{y,N}} = \frac{W_{el}}{A} = \frac{W_{el} f_y}{A \cdot f_y} = \frac{M_{el}}{N_{el}} \quad (11)$$

Esta equação mostra que, em regime elástico, a eficiência da resistência à flexão, $e_{el,N}$, é independente do valor residual da tensão resistente do material da secção, $f_{y,N}$, e, sendo assim, independente do valor do esforço normal N anteriormente aplicado. Além disso, de acordo com esta equação, é possível constatar que o valor de $e_{el,N}$ corresponde à excentricidade do esforço normal $N_{el,N}$ que, multiplicada pelo valor deste esforço, conduz ao valor do momento flector $M_{el,N}$:

$$M_{el,N} = e_{el,N} N_{el,N} = e_{el,N} (N_{el} - N) \quad (12)$$

3.2.1 Flexão em torno do eixo de maior inércia

No caso particular da flexão da secção I em torno do seu eixo de maior inércia, a eficiência da resistência à flexão, $e_{el,N,y}$, pode ser normalizada em relação à distância máxima, $h/2$, entre o eixo de maior inércia e as fibras extremas da secção:

$$\bar{e}_{el,n,y} = \frac{e_{el,N,y}}{h/2} = \frac{2}{h} \frac{M_{el,y}}{N_{el}} = \left(\frac{i_y}{h/2} \right)^2 \quad (13)$$

Nesta equação, a variável i_y representa o raio de giração da secção em I, em relação ao seu eixo de maior inércia.

A excentricidade normalizada $\bar{e}_{el,n,y}$ pode também ser calculada através da Eq. (14), em função dos parâmetros geométricos α_b e α_h definidos nas Eqs. (6) e (7):

$$\bar{e}_{el,n,y} = \frac{1 - \alpha_b \alpha_h^3}{3(1 - \alpha_b \alpha_h)} \quad (14)$$

O valor de $\bar{e}_{el,n,y}$, calculado através desta Eq. (14), possui um máximo, $\bar{e}_{el,n,y,max}$, para cada valor individual de α_b , que pode ser calculado através da Eq. (15):

$$\bar{e}_{el,n,y,max} = \alpha_h^2 \quad (15)$$

Sendo assim, o valor máximo de $\bar{e}_{el,n,y}$ é atingido quando:

$$\alpha_b = \alpha_{b,el} = \frac{3\alpha_h^2 - 1}{2\alpha_h^3} \quad (16)$$

Deste modo, a Eq. (16) define a melhor geometria de uma secção em I (através das relações geométricas $\alpha_{b,el}$ e α_h) que conduz a uma eficiência máxima da resistência à flexão desta secção em regime elástico, $\bar{e}_{el,n,y,max}$. Entretanto, convém referir que o valor dimensional do momento flector $M_{el,N}$ depende igualmente de factores de escala adoptados nos processos de normalização das variáveis, tais como a tensão de cedência do material, f_y , da largura da secção, b , e, em particular, da altura da secção h .

Por outro lado, os valores dos factores de forma α_b e α_h encontram-se delimitados pela relação h/b entre a altura e a largura da secção em I, e pelos limites c_f e c_w , associados à encurvadura local dos banzos e da alma de secções de Classe 3 [3]. Estes limites podem ser obtidos através de bibliografia especializada ou dos regulamentos de cálculo de estruturas de aço, como por exemplo o Eurocódigo 3 [3]:

$$\frac{b - t_w - 2r}{2t_f} \leq c_f \quad (17)$$

$$\frac{h - 2t_f - 2r}{t_w} \leq c_w \quad (18)$$

Deste modo, os valores dos coeficientes α_b e α_h , indicados na Eq. (16), encontram-se sujeitos às seguintes restrições:

$$\alpha_h \leq \alpha_{h,f}; \quad \alpha_{h,f} = 1 - \frac{(b - t_w - 2r)}{c_f h} \quad (19)$$

$$\alpha_b \leq \alpha_{b,w}; \quad \alpha_{b,w} = 1 - \frac{(h - 2t_f - 2r)}{c_w b} \quad (20)$$

É ainda de assinalar o facto de a eficiência da resistência à flexão, $\bar{e}_{el,n,y}$, se encontrar também associada à resistência à encurvadura global, no plano normal ao eixo de maior inércia, de um elemento estrutural constituído por um perfil I, sujeito a compressão. No caso de uma coluna simplesmente apoiada com uma imperfeição inicial equivalente, no plano de encurvadura, com uma amplitude $\omega_{z,o}$, submetida a um esforço normal de compressão simples, o valor máximo normalizado do esforço de compressão n que é possível aplicar em regime elástico pode ser obtido através da Eq. (21), equivalente à fórmula de Ayrton-Perry [4]:

$$n \left[1 + \frac{\frac{\omega_{z,o}}{z_M}}{\bar{e}_{el,n,y} \left(1 - \frac{n}{(\bar{e}_{el,n,y})^2} \left(\frac{L}{z_M} \right)^2 \frac{\varepsilon_y}{\pi^2} \right)} \right] = 1 \quad (21)$$

onde L representa o comprimento de encurvadura da coluna, $z_M = h/2$ é a distância entre o eixo de maior inércia da secção transversal e as suas fibras extremas comprimidas, e ε_y representa a extensão de cedência do material da coluna.

É possível constatar que quando a eficiência da resistência à flexão, $\bar{e}_{el,n,y}$, aumenta, o valor máximo do esforço de compressão n também se torna mais elevado, o que significa que a resistência à encurvadura do perfil no plano normal ao eixo de maior inércia também aumenta.

3.2.2 Flexão em torno do eixo de menor inércia

No caso particular da flexão da secção I em torno do seu eixo de menor inércia, a eficiência da resistência à flexão, $e_{el,N,z}$, pode ser normalizada em relação à distância máxima, $b/2$, entre o eixo de menor inércia e as fibras extremas da secção:

$$\bar{e}_{el,n,z} = \frac{e_{el,N,z}}{b/2} = \frac{2}{b} \frac{M_{el,z}}{N_{el}} = \left(\frac{i_z}{b/2} \right)^2 \quad (22)$$

A variável i_z representa o raio de giração da secção I em relação ao seu eixo de menor inércia.

A excentricidade $\bar{e}_{el,n,z}$ é também independente das dimensões da secção transversal e fornece igualmente uma medida do desempenho da secção em I em regime elástico, quando flechida em torno do seu eixo de menor inércia. O seu valor pode também ser calculado através da Eq. (23), em função dos parâmetros geométricos α_b e α_h definidos nas Eqs. (6) e (7):

$$\bar{e}_{el,n,z} = \frac{1 - \alpha_h (1 - (1 - \alpha_b)^3)}{3(1 - \alpha_b \alpha_h)} \quad (23)$$

Também neste caso, os factores de forma α_b e α_h são limitados pela relação h/b entre a altura e a largura da secção em I, e pelos limites c_f e c_w , associados à encurvadura local dos banzos e da alma de secções de Classe 3 [3], conforme indicado nas Eqs. (19) e (20).

A eficiência da resistência à flexão, $\bar{e}_{el,n,z}$, também se encontra associada à resistência à encurvadura global de um elemento estrutural, constituído por um perfil I, no plano normal ao seu eixo de menor inércia. No caso de uma coluna simplesmente apoiada com uma imperfeição inicial equivalente, no plano de encurvadura, com uma amplitude $\omega_{y,o}$, submetida a um esforço normal de compressão simples, o valor máximo normalizado do esforço de compressão n que é possível aplicar em regime elástico pode ser obtido através da Eq. (24), equivalente à fórmula de Ayrton-Perry [4]:

$$n \left[1 + \frac{\frac{\omega_{y,o}}{y_M}}{\bar{e}_{el,n,z} \left(1 - \frac{n}{(\bar{e}_{el,n,z})^2} \left(\frac{L}{y_M} \right)^2 \frac{\varepsilon_y}{\pi^2} \right)} \right] = 1 \quad (24)$$

onde L representa o comprimento de encurvadura da coluna, $y_M = b/2$ é a distância entre o eixo de menor inércia da secção transversal e as suas fibras extremas comprimidas, e ε_y representa a extensão de cedência do material da coluna.

Mais uma vez, é possível constatar que quando a eficiência da resistência à flexão, $\bar{e}_{el,n,z}$, aumenta, o valor máximo do esforço de compressão n também se torna mais elevado, o que significa que a resistência à encurvadura do perfil no plano normal ao eixo de menor inércia também aumenta.

3.3 Regime plástico

A eficiência da resistência à flexão das secções em I em regime plástico, $e_{pl,N}$, previamente sujeitas a um esforço normal N , pode ser avaliada por um método semelhante ao anteriormente descrito para o regime de comportamento elástico. Deste modo, pode ser obtida através da relação entre o maior momento flector $M_{pl,N}$ e o maior esforço normal $N_{pl,N}$ ($N_{pl,N} = N_{el,N}$) adicionais a que a secção pode ainda resistir, para além do esforço normal N anteriormente aplicado. Também neste caso, o valor de $e_{pl,N}$ pode ser interpretado como a “excentricidade” do esforço normal adicional $N_{pl,N}$ que, multiplicada pelo valor deste esforço, conduziria ao valor do momento flector adicional, $M_{pl,N}$:

$$e_{pl,N} = \frac{M_{pl,N}}{N_{pl,N}} = \frac{M_{pl,N}}{N_{pl,N} - N} \quad (25)$$

3.3.1 Flexão em torno do eixo de maior inércia

No caso particular da flexão da secção I em torno do seu eixo de maior inércia, a eficiência da resistência à flexão, $e_{pl,N,y}$, pode também ser normalizada em relação à distância máxima, $h/2$, entre o eixo de maior inércia e as fibras extremas da secção:

$$\bar{e}_{pl,n,y} = \frac{e_{pl,N,y}}{h/2} = \frac{2 M_{pl,N,y}}{h N_{pl,N}} \quad (26)$$

Tal como na fase de comportamento elástico, a eficiência da resistência à flexão de uma secção em I em regime plástico, $\bar{e}_{pl,n,y}$, também apresenta um valor máximo $\bar{e}_{pl,n,y,max}$ (27), para uma determinada geometria da secção, caracterizada pelos factores de forma α_h e α_b .

$$\bar{e}_{pl,n,y,max} = \frac{\alpha_h (1+n) \left[1 - \alpha_h + 2\alpha_h n^2 + \sqrt{(1-\alpha_h)^2 + 4\alpha_h n^2} \right]}{1 - \alpha_h + \alpha_h n^2 (3 + \alpha_h) + (1 + \alpha_h n^2) \sqrt{(1-\alpha_h)^2 + 4\alpha_h n^2}} \quad (27)$$

No entanto, em regime plástico, o esforço normal e o momento flector não são independentes entre si; por este motivo, a geometria mais eficaz da secção depende também do valor do esforço normal n , conforme indicado na Eq. (27), que é válida para valores de n que respeitem a seguinte condição: $0 \leq n \leq \alpha_h (1 - \alpha_b) / (1 - \alpha_b \alpha_h)$.

O valor máximo $\bar{e}_{pl,n,y,max}$ é atingido quando:

$$\alpha_b = \alpha_{b,pl} = \frac{(1 + \alpha_h)^2 - 2(1 + \alpha_h n^2) - (1 - \alpha_h) \sqrt{(1 - \alpha_h)^2 + 4\alpha_h n^2}}{2\alpha_h^2 (1 - n^2)} \quad (28)$$

No caso particular da flexão simples, quando $n = 0$, tem-se que:

$$\alpha_b = \alpha_{b,pl} = \frac{2(\alpha_h - 1)}{\alpha_h^2} \quad (29)$$

ou

$$\alpha_h = \alpha_{h,pl} = \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha_b}}{\alpha_b} \quad (30)$$

e

$$\bar{e}_{pl,n,y,max} = \alpha_h \quad (31)$$

Em regime plástico, os valores dos factores de forma α_b e α_h também se encontram delimitados pelos limites c_f e c_w , Eqs. (19) e (20), associados, neste caso, à encurvadura local dos banzos e da alma de secções de Classe 1 ou Classe 2 [3]. Estes limites também podem ser obtidos através de bibliografia especializada ou dos regulamentos de cálculo de estruturas de aço, como por exemplo o Eurocódigo 3 [3].

3.2.2 Flexão em torno do eixo de menor inércia

No caso particular da flexão da secção I em torno do seu eixo de menor inércia, a eficiência da resistência à flexão em regime plástico, $e_{pl,N,z}$, pode também ser normalizada em relação à distância máxima, $b/2$, entre o eixo de menor inércia e as fibras extremas da secção:

$$\bar{e}_{pl,n,z} = \frac{e_{pl,N,z}}{b/2} = \frac{2 M_{pl,N,z}}{b N_{pl,N}} \quad (32)$$

4. Eficiência da geometria das secções das séries europeias de perfis em I

As características geométricas das secções transversais dos perfis em I laminados a quente, correntemente utilizados na construção metálica, são bastante variáveis, de uma série de perfis para outra, e, por vezes, dentro de uma mesma série. A fim de avaliar a distribuição destas características geométricas procedeu-se a uma análise detalhada dos factores de forma α_b e α_h de cada uma das secções das seguintes séries europeias de perfis: HD, HL, HP, IPE, IPN, HEA-A, HEA, HEB, HEM e HE.

Os valores individuais das dimensões destes perfis foram obtidos a partir de um catálogo de um produtor. No caso dos perfis da série IPN, os banzos não têm espessura constante, devido à sua forma arredondada, pelo que foram adoptados os valores da sua espessura equivalente, também indicados no mesmo catálogo do produtor. Além disso, as secções I foram simuladas através de um modelo simplificado, que não toma em consideração a influência dos troços de concordância existentes entre a alma e cada um dos banzos da secção em I. A adopção desta hipótese simplificativa baseou-se nos resultados de outros estudos do autor do presente artigo, que demonstraram que a influência dos troços de concordância ao nível dos valores normalizados dos esforços, n e m , é bastante diminuta.

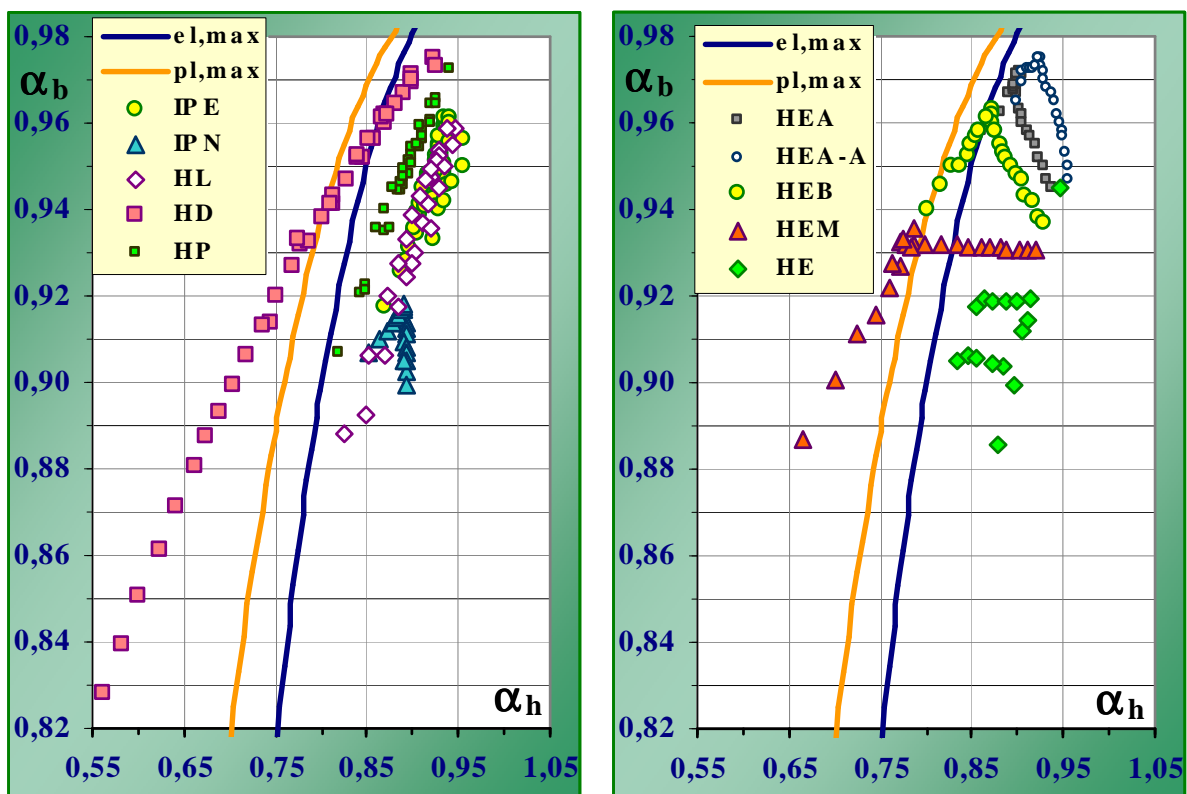
A distribuição dos factores de forma α_b e α_h dentro das diferentes séries de perfis laminados a quente é apresentada nas Figs. 1 a) e 1 b). Estas figuras mostram que algumas séries apresentam pequenas variações destes factores, como no caso da série IPN, enquanto que outras apresentam grandes variações, como no caso da série HD. As Figs. 1 a) e 1 b) apresentam

duas linhas, “el,max” e “pl,max”, com a localização dos factores de forma definidos nas Eqs. (16) e (29), que correspondem às “formas óptimas” que conduzem aos valores máximos da eficiência da resistência à flexão das secções em I, $\bar{e}_{y,el,max}$ e $\bar{e}_{y,pl,max}$ respectivamente. As secções transversais com as formas que asseguram a melhor eficiência da resistência à flexão em regime elástico são aquelas que se situam mais perto da linha “el,max”, enquanto que as secções transversais com as formas que garantem a melhor eficiência da resistência à flexão em regime plástico são aquelas que se situam mais perto da linha “pl,max”.

Conforme se pode observar através da Eq. (16), o valor de $\bar{e}_{el,n,y,max}$ depende também do factor de forma α_b . As Figs. 2 a) e 2 b) mostram que, para cada valor de α_b , o valor máximo da eficiência da resistência à flexão em regime elástico se localiza na intersecção de cada uma das curvas $\bar{e}_{el,n,y}(\alpha_b = cte; \alpha_h)$ com a linha “el,max” definida através da Eq. (15): $\bar{e}_{el,n,y,max} = \alpha_h^2$.

As mesmas Figs. 2 a) e 2 b) mostram que o valor máximo de $\bar{e}_{el,n,y}(\alpha_b = cte; \alpha_h)$ aumenta quando o valor de α_b é mais elevado.

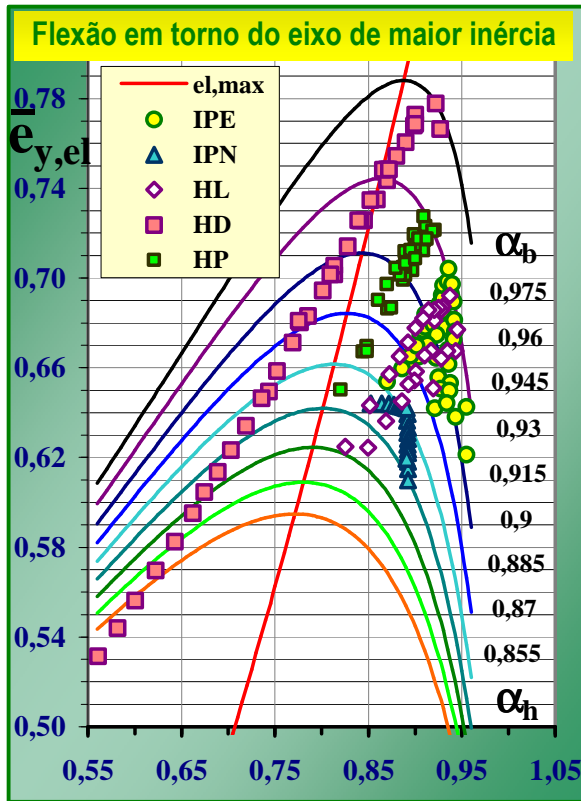
Por outro lado, em regime plástico, o valor de $\bar{e}_{pl,n,y,max}$ depende não só do factor de forma α_b mas também do valor de n , conforme indicado nas Eqs. (27) e (28). No entanto, os estudos efectuados pelo autor revelaram que a melhor opção para otimizar a geometria da secção em I, em regime plástico, consiste em utilizar as expressões correspondentes ao caso particular da flexão simples, Eqs. (29) e (31), uma vez que esta é a situação que corresponde aos valores mais baixos da eficiência da resistência à flexão da secção em regime plástico. As Figs. 3 a) e 3 b) mostram que o valor máximo de $\bar{e}_{pl,n,y}(\alpha_b = cte; \alpha_h)$, localizado na intersecção de cada uma destas curvas com a linha “pl,max”, também aumenta quando o valor de α_b é mais elevado.



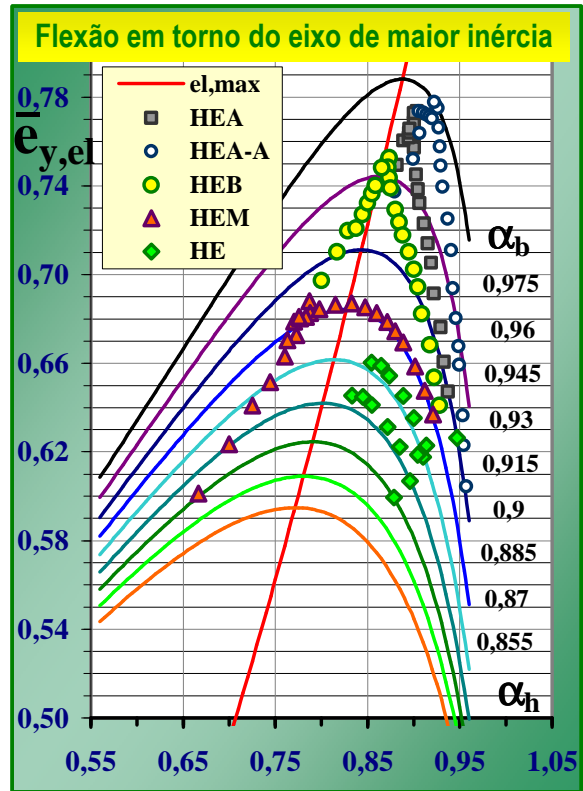
a) séries IPE, IPN, HL, HD e HP

b) séries HEA, HEA-A, HEB, HEM e HE

Fig. 1: Factores de forma das secções das principais séries europeias de perfis em I

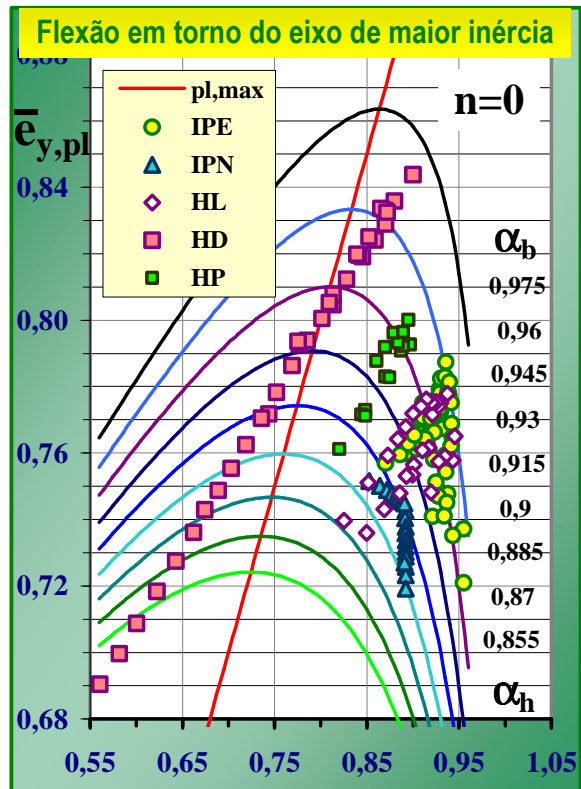


a) séries IPE, IPN, HL, HD e HP

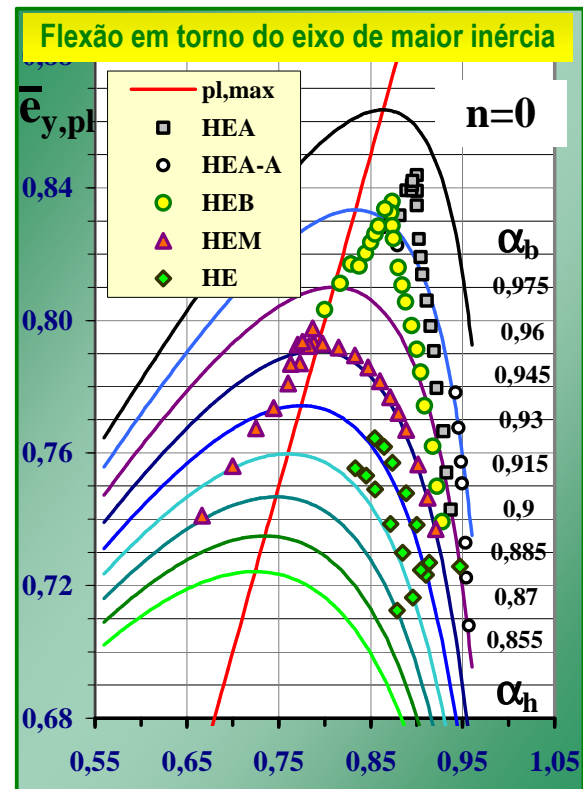


b) séries HEA, HEA-A, HEB, HEM e HE

Fig. 2: Valores de $\bar{e}_{y,el}$ das secções de Classe 1, 2 ou 3 das principais séries europeias de perfis em I



a) séries IPE, IPN, HL, HD e HP



b) séries HEA, HEA-A, HEB, HEM e HE

Fig. 3: Valores de $\bar{e}_{y,pl}$ das secções de Classe 1 ou 2 das principais séries europeias de perfis

5. Conclusões

No presente artigo, a eficiência da resistência à flexão de uma secção transversal de aço, submetida a um esforço normal inicial, é definida como uma propriedade que relaciona o momento flector máximo e o esforço normal adicional máximo, agindo separadamente, a que a secção transversal ainda é capaz de resistir. Esta propriedade depende essencialmente da forma da secção transversal, definida através das relações entre as diferentes dimensões da secção transversal.

Foi demonstrado que, para cada valor da espessura relativa da alma da secção transversal, α_b , é possível encontrar, quer em regime elástico quer em regime plástico, um valor específico para a espessura relativa dos seus banzos, α_h , que conduz a uma forma de secção transversal particular, cujas propriedades geométricas permitem otimizar a eficiência da sua resistência à flexão.

Por fim, são apresentadas figuras com representações gráficas dos factores de forma, α_b e α_h , e da eficiência da resistência à flexão das secções de Classe 1, 2 ou 3 (ou apenas de Classe 1 ou 2, no caso do regime plástico) das principais séries europeias de perfis em I. Estas figuras mostram o posicionamento destes factores de forma, para cada um destes perfis, relativamente às linhas “el,max” e “pl,max” sobre as quais se situam as representações dos factores α_b e α_h que conduzem aos valores mais elevados da eficiência da resistência à flexão das secções em I, em regime elástico e em regime plástico. Deste modo, a fim de melhorar o desempenho de uma secção em I específica bastará alterar um dos seus factores de forma, ou ambos, de modo a que a sua representação se aproxime das linhas referidas.

No entanto, faz-se notar o facto de os valores de α_b e α_h se encontrarem limitados pelas condições relativas à prevenção da instabilidade local dos banzos e da alma da secção, bem como por outras disposições de carácter arquitectónico ou ligadas aos métodos de produção dos perfis (geometrias permitidas pelos trens de laminagem disponíveis, por exemplo).

Por outro lado, o processo de optimização da geometria da secção pode ser dirigido com objectivos específicos, de modo a fixar um determinado valor para uma das dimensões da secção (altura ou largura, por exemplo) ou para uma das suas propriedades geométricas (área da secção transversal ou módulo de flexão em torno de um dos eixos principais da secção). Os limites da extensão deste artigo não permitem, porém, apresentar exemplos concretos da aplicação deste tipo de potencialidades das formulações apresentadas.

Referências

- [1] Massonnet C., Save M., “Calcul plastique des constructions. Vol. 1 – Structures dépendant d’un paramètre”, Ed. B. Nelissen, 3rd edition, 1976.
- [2] Baptista A.M. “Critério de interacção entre o esforço normal e o momento flector em secções de aço em I ou rectangulares ocas totalmente plastificadas”, *4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas – JPEE2006*, Lisboa, Portugal, 102-103, 2006 (artigo completo em CD-ROM, 15 p.).
- [3] CEN/TC 250, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Standard EN 1993-1-1:2005.
- [4] Baptista, A. M., “Modèle non linéaire géométrique et matériel fondé sur l’analyse des déformations globales des sections”, Tese de Doutoramento, Universidade Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, França, 1994, 480 p.