



INFLUÊNCIA DOS TROÇOS DE CONCORDÂNCIA NA RESISTÊNCIA PLÁSTICA DE SECÇÕES I EM FLEXÃO COMPOSTA DESVIADA

António M. Baptista^a

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas

Resumo. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência dos troços de concordância, entre a alma e os banzos de secções em I, na sua resistência plástica em flexão composta e em flexão composta desviada. Este estudo baseou-se na aplicação de um novo critério de interacção, proposto pelo autor, que toma em consideração a influência dos troços de concordância e é aplicável à flexão em torno dos eixos de maior inércia ou de menor inércia da secção. Posteriormente, é apresentado um estudo sobre o critério do EC3 para o cálculo dos esforços resistentes em flexão composta desviada, na sequência do qual é proposta uma alteração a este critério que permitirá melhorar os resultados por ele fornecidos.

1. Introdução

A verificação da segurança das secções transversais de perfis de aço, no seu estado limite último de resistência em regime elastoplástico, é frequentemente efectuada com base no conceito de formação de uma rótula plástica.

No caso de secções transversais de perfis em I, submetidas simultaneamente a um esforço normal e a flexão desviada, esta verificação é habitualmente realizada através de critérios de interacção entre os esforços na secção, fornecidos na literatura ou nos regulamentos de cálculo.

No caso particular do critério de interacção adoptado no Eurocódigo 3 (EC3) [1], a verificação da segurança é efectuada com base na relação entre cada uma das componentes do momento flector actuante, segundo um dos eixos principais de inércia da secção, e o momento flector resistente da secção segundo o mesmo eixo principal, quando submetido ao esforço normal anteriormente referido. Deste modo, a resistência da secção à flexão composta desviada é calculada com base nos critérios de interacção prescritos no EC3 para o cálculo da resistência da secção à flexão composta, segundo cada um dos eixos principais de inércia da secção.

Estes critérios foram deduzidos com base em hipóteses simplificativas, pelo que poderão conduzir, nalguns casos, a diferenças significativas entre os respectivos resultados e os valores calculados com base numa integração exacta do campo de tensões normais na secção em causa [2]. Estas diferenças, por sua vez, irão reflectir-se no cálculo da resistência da secção à flexão composta desviada.

O presente trabalho apresenta uma proposta de alteração do critério de interacção adoptado no EC3 para a verificação da resistência de secções em I à flexão composta desviada, que consiste na substituição, no critério actual, dos valores da resistência da secção à flexão composta, calculados de acordo com o EC3, por valores da mesma resistência calculados através de outros critérios de interacção, obtidos através da integração da distribuição de tensões normais ao longo da secção [3].

Estes critérios, por sua vez, são frequentemente deduzidos com base numa geometria simplificada da secção em I, ignorando os troços de concordância entre cada um dos banzos e a alma do perfil [3]. Esta simplificação constitui frequentemente uma das críticas apontadas a estes critérios de interacção.

Com o objectivo de esclarecer a influência desta hipótese simplificativa no caso de uma secção em I submetida a flexão composta desviada, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre os valores resistentes do esforço normal e dos momentos flectores segundo cada uma das direcções principais de inércia, obtidos através de uma integração das tensões ao longo da sua secção transversal completa, incluindo os referidos troços de concordância, e os valores dos mesmos esforços obtidos através de uma integração das tensões ao longo de uma versão simplificada dessa secção transversal, sem troços de concordância.

Em seguida, é feita uma comparação entre os primeiros resultados (correspondentes a secções com troços de concordância) e os obtidos através do critério adoptado no Eurocódigo 3. Por último, é apresentada uma comparação entre os primeiros resultados e os obtidos através do critério do EC 3 alterado de acordo com as propostas apresentadas neste trabalho.

2. Critério de interacção adoptado pelo Eurocódigo 3 para os esforços resistentes de uma secção em I submetida a flexão composta desviada

O cálculo dos esforços resistentes de uma secção em I submetida a flexão composta desviada é efectuado, de acordo com o Eurocódigo 3 (EC3) [1], através da Eq. (1):

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,n,y}} \right)^{\alpha_1} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,n,z}} \right)^{\alpha_2} = 1 \quad (1)$$

em que:

$$\alpha_1 = 2;$$

$$\alpha_2 = 5n, \text{ mas } \alpha_2 \geq 1;$$

$$n = N_{Ed} / N_{el};$$

N_{Ed} é o esforço normal actuante na secção;

$N_{el} = Af_y$ é o valor resistente do esforço normal da secção, em tracção simples;

A representa a área da secção transversal da secção em I;

f_y representa o valor nominal da tensão de cedência do aço da secção em I;

$M_{y,Ed}$ é a componente do momento flector actuante segundo o eixo principal y (Fig. 1);

$M_{pl,n,y}$ é o valor resistente do momento flector, no caso de flexão composta em torno do eixo principal y (Fig. 1), calculado através das Eqs. (2) ou (3) [1];

$M_{z,Ed}$ é a componente do momento flector actuante segundo o eixo principal z (Fig. 1);

$M_{pl,n,z}$ é o valor resistente do momento flector, no caso de flexão composta em torno do eixo principal z (Fig. 1), calculado através das Eqs. (4) ou (5) [1].

$$0 \leq n \leq 0,5a \Rightarrow M_{pl,n,y} = M_{pl,y} \quad (2)$$

$$0,5a \leq n \leq 1 \Rightarrow M_{pl,n,y} = \frac{1-n}{1-0,5a} M_{pl,y} \quad (3)$$

$$0 \leq n \leq a \Rightarrow M_{pl,n,z} = M_{pl,z} \quad (4)$$

$$a \leq n \leq 1 \Rightarrow M_{pl,n,z} = \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] M_{pl,z} \quad (5)$$

$$a = \min \left[\frac{A-2bt_f}{A}, 0,5 \right] \quad (6)$$

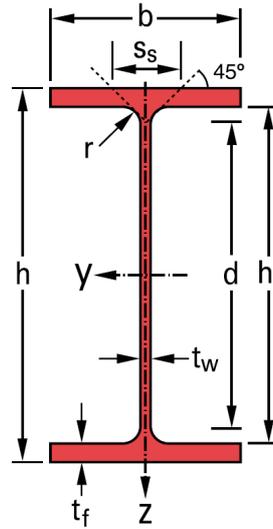


Fig. 1: Dimensões de uma secção em I, incluindo os troços de concordância entre cada um dos banzos e a alma do perfil

3. Novo critério de interacção para o cálculo dos esforços resistentes de uma secção em I submetida a flexão composta

3.1 Formulação geral

O novo critério de interacção, proposto neste trabalho para o cálculo dos esforços resistentes de uma secção em I submetida a flexão composta baseia-se na integração da distribuição de tensões normais ao longo da secção em I completa, incluindo os troços de concordância entre cada um dos banzos e a alma do perfil. Este critério pode ser definido para ambos os casos de flexão composta, em torno do eixo de maior inércia ou do eixo de menor inércia da secção em I, através das mesmas equações básicas, (7) e (8):

$$n_f \leq n \leq 1 \Rightarrow m_{pl,n} = \frac{3}{2k_1} \left[1 - (1 - k_2(1-n))^2 \right] \quad (7)$$

$$0 \leq n \leq n_f \Rightarrow m_{pl,n} = \frac{3}{2k_3} \left[k_4 - k_5 n^2 \right] \quad (8)$$

Estas equações foram formuladas num sistema de variáveis normalizadas. A variável n (9) representa o valor normalizado do esforço normal N , e a variável m (10) representa o valor normalizado do momento flector M :

$$n=N/N_{el} \quad (9)$$

$$m=M/M_{el} \quad (10)$$

em que $N_{el}=A f_y$ é o valor resistente do esforço normal da secção completa em tracção simples, e $M_{el}=W_{el} f_y$ representa o valor resistente do momento flector da secção completa em flexão simples, em regime elástico.

Os coeficientes n_f e k_i nas equações (7) e (8) dependem apenas das proporções geométricas da secção em I e do eixo de flexão, tomando, por isso, valores constantes para cada secção transversal e cada eixo de flexão em particular. Estes valores constantes de n_f e k_i , tal como a área da secção transversal A e o módulo de flexão elástico W_{el} , referentes à secção em I completa, podem ser inseridos numa base de dados ou numa tabela, para efeitos de uma aplicação manual fácil se não se dispuser de uma folha de cálculo, por exemplo. A definição destes coeficientes n_f e k_i é apresentada nas secções seguintes.

3.2 Flexão em torno do eixo de maior inércia

No caso da flexão composta em torno do eixo de maior inércia da secção em I, os coeficientes $n_{f,y}$ e $k_{i,y}$ podem ser calculados através das Eqs. (11) a (16):

$$n_{f,y}=1-\frac{1-\alpha_h}{k_{2,y}} \quad (11)$$

$$k_{1,y}=1-(1-\alpha_b)\alpha_h^3+\frac{\alpha_e^4}{\alpha_r}\left[16-3\pi-\frac{16}{3(4-\pi)}+12(4-\pi)\left(\frac{\alpha_h}{2\alpha_e}-\frac{10-3\pi}{3(4-\pi)}\right)^2\right] \quad (12)$$

$$k_{2,y}=1-(1-\alpha_b)\alpha_h+\frac{\alpha_e^2}{\alpha_r}(4-\pi) \quad (13)$$

$$k_{3,y}=k_{1,y} \quad (14)$$

$$k_{4,y}=1-(1-\alpha_b)\alpha_h^2+\frac{\alpha_e^3}{\alpha_r}\left[4(4-\pi)\left(\frac{\alpha_h}{2\alpha_e}-\frac{10-3\pi}{3(4-\pi)}\right)\right] \quad (15)$$

$$k_{5,y}=\frac{(k_{2,y})^2}{\alpha_b} \quad (16)$$

em que:

$$\alpha_b=t_w/b \quad (17)$$

$$\alpha_h=h_i/h=(h-2t_f)/h \quad (18)$$

$$\alpha_e=r/h \quad (19)$$

$$\alpha_r=b/h \quad (20)$$

As dimensões b , h_i , h , t_w , t_f e r da secção em I, referidas nestas equações (17) a (20), são identificadas na Fig. 1. Os valores dos factores de escala N_{el} e $M_{el,y}$ são constantes para cada secção em I e cada tipo de aço (para cada valor de f_y), e podem ser obtidos através das seguintes equações:

$$N_{el}=A f_y=k_{2,y} b h f_y \quad (21)$$

$$M_{el,y} = k_{3,y} \frac{bh^2}{6} f_y \quad (22)$$

Os valores normalizados de N_{el} e $M_{el,y}$ são, por definição, iguais a 1. O valor normalizado $m_{pl,y}$ do momento resistente em regime plástico, $M_{pl,y}$, pode ser obtido através da Eq. (23).

$$m_{pl,y} = \frac{M_{pl,y}}{M_{el,y}} = \frac{3 k_{4,y}}{2 k_{3,y}} \quad (23)$$

3.3 Flexão em torno do eixo de menor inércia

No caso da flexão composta em torno do eixo de menor inércia da secção em I, os coeficientes $n_{f,z}$ e $k_{i,z}$ podem ser calculados através das Eqs. (9) a (16):

$$n_{f,z} = \frac{\alpha_b}{k_{2,y}} \quad (24)$$

$$k_{1,z} = \frac{k_{3,z}}{1 - \alpha_h} \quad (25)$$

$$k_{2,z} = \frac{k_{2,y}}{1 - \alpha_h} \quad (26)$$

$$k_{3,z} = 1 - (1 - \alpha_b^3) \alpha_h + \frac{\alpha_e^4}{\alpha_r^3} \left[16 - 3\pi - \frac{16}{3(4 - \pi)} + 12(4 - \pi) \left(\frac{\alpha_b \alpha_r}{2 \alpha_e} - \frac{10 - 3\pi}{3(4 - \pi)} \right)^2 \right] \quad (27)$$

$$k_{4,z} = 1 - (1 - \alpha_b^2) \alpha_h + \frac{\alpha_e^3}{\alpha_r^2} \left[4(4 - \pi) \left(\frac{\alpha_b \alpha_r}{2 \alpha_e} - \frac{10 - 3\pi}{3(4 - \pi)} \right) \right] \quad (28)$$

$$k_{5,z} = (k_{2,y})^2 \quad (29)$$

onde os coeficientes de forma α_b , α_h , α_e e α_r são os definidos nas equações (17) a (20).

O valor normalizado $m_{pl,z}$ do momento flector resistente em regime plástico, $M_{pl,z}$, pode ser obtido através da Eq. (30).

$$m_{pl,z} = \frac{M_{pl,z}}{M_{el,z}} = \frac{3 k_{4,z}}{2 k_{3,z}} \quad (30)$$

3.4 Comparação entre resultados fornecidos pelo novo critério e pelo EC3

3.4.1 Flexão composta em torno do eixo de maior inércia

A Fig. 2 a) apresenta uma representação gráfica dos critérios de interacção de duas secções em I, submetidas a flexão composta em torno do eixo de maior inércia, calculados de acordo com o novo critério, proposto neste trabalho, e com o critério estipulado no EC3.

É possível constatar que, no caso da secção IPE 750×137, o EC3 sobrestima a resistência da secção quando os efeitos da flexão são predominantes, ou seja, quando o valor de $m_{pl,n,y}$ tende para 1 (quando o valor de $M_{pl,n,y}$ tende para $M_{pl,y}$), fornecendo no entanto resultados muito bons quando os efeitos do esforço normal são predominantes (quando $n > 0,6$, p ex.).

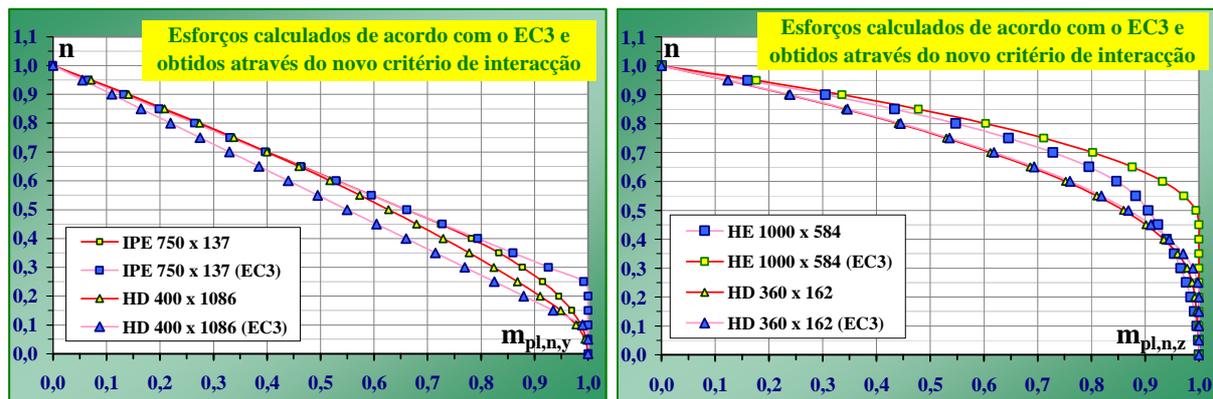
Por outro lado, no caso da secção HD 400×1086, o EC3 fornece resultados conservadores, sobretudo quando nenhuma das forças internas (n e $m_{pl,n,y}$) é predominante.

3.4.2 Flexão composta em torno do eixo de menor inércia

A Fig. 2 b) apresenta uma representação gráfica dos critérios de interacção de duas secções em I, submetidas a flexão composta em torno do eixo de menor inércia, calculados de acordo com o novo critério, proposto neste trabalho, e com o critério estipulado no EC3.

É possível constatar que, no caso da secção HD 360×162, o EC3 fornece resultados que praticamente coincidem com os obtidos através do novo critério, proposto neste trabalho.

Porém, no caso da secção HE 1000×584, o EC3 sobrestima consideravelmente a resistência da secção quando os efeitos da flexão são predominantes, ou seja, quando o valor de $m_{pl,n,z}$ tende para 1, apresentando uma boa concordância com o novo critério apenas quando o esforço normal é muito elevado (quando $n > 0,9$, por exemplo).



a) flexão composta em torno do eixo de maior inércia b) flexão composta em torno do eixo de menor inércia

Fig. 2: Comparação entre resultados fornecidos pelo novo critério e pelo EC3

4. Influência dos troços de concordância no caso da flexão composta

Foi já referido que o facto de alguns critérios de interacção entre os esforços plásticos resistentes de uma secção em I, submetida a flexão composta, serem deduzidos com base numa geometria simplificada [3], ignorando os troços de concordância entre cada um dos banzos e a alma do perfil, constitui frequentemente uma das críticas apontadas a estes critérios de interacção. No entanto, estas críticas não se baseiam, em geral, em estudos concretos que permitam quantificar a influência desta hipótese simplificativa.

No caso do critério de interacção proposto no presente trabalho, o valor dos esforços resistentes é obtido a partir da multiplicação dos valores normalizados destes esforços, n e m , pelos respectivos factores de escala, $N_{el} = A f_y$ (31) e $M_{el} = W_{el} f_y$ (32).

$$N = n A f_y \quad (31)$$

$$M = m W_{el} f_y \quad (32)$$

O facto de se ignorar a contribuição dos troços de concordância tem implicações ao nível do cálculo dos esforços normalizados n e m , e das características geométricas A e W_{el} (e, consequentemente, ao nível dos factores de escala N_{el} e M_{el}).

Os valores de $A = k_{2,y} b h$ (21), $W_{el,y} = k_{3,y} b h^2 / 6$ (22) e $W_{el,z} = k_{3,z} b^2 h / 6$, são afectados pelos troços de concordância, ao nível dos factores $k_{2,y}$, $k_{3,y}$ e $k_{3,z}$, através do coeficiente de forma $\alpha_e = r/h$ (19). Se os troços de concordância forem ignorados, considerando que $r=0$, temos que $\alpha_e=0$ e os factores $k_{2,y}$, $k_{3,y}$ e $k_{3,z}$ assumem as formas $k'_{2,y}$, $k'_{3,y}$ e $k'_{3,z}$ seguintes:

$$k'_{2,y} = 1 - (1 - \alpha_b) \alpha_h \quad (33)$$

$$k'_{3,y} = 1 - (1 - \alpha_b) \alpha_h^3 \quad (34)$$

$$k'_{3,z} = 1 - (1 - \alpha_b^3) \alpha_h \quad (35)$$

A simplicidade destas expressões, relativamente às Eqs. (13), (14) e (27), explica a vantagem da adopção da hipótese simplificativa de ignorar os troços de concordância da secção.

Entretanto, a substituição dos factores $k_{2,y}$, $k_{3,y}$ e $k_{3,z}$ pelos factores $k'_{2,y}$, $k'_{3,y}$ e $k'_{3,z}$ tem consequências ao nível dos valores de A , $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$. No entanto, um estudo anterior [4], realizado sobre um conjunto de 745 perfis em I de diferentes origens (europeus, americanos, britânicos e japoneses), revelou que as diferenças entre os valores dos factores $k_{2,y}$ e $k_{3,y}$ e os valores dos factores $k'_{2,y}$ e $k'_{3,y}$ correspondentes são, em média, inferiores a 2,0% (com um desvio padrão inferior a 1,5%); no caso dos factores $k_{3,z}$ e $k'_{3,z}$, as diferenças entre os respectivos valores são, em média, inferiores a 0,46% (com um desvio padrão inferior a 0,38%). Consta-se, assim, que estas diferenças são, em geral, relativamente baixas.

Por outro lado, recorda-se que os valores de A , $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$, referentes à secção completa, são constantes para cada secção em I, podendo ser inseridos numa base de dados ou numa tabela. Estas tabelas são frequentemente fornecidas em catálogos elaborados pelos fabricantes destes perfis em I. Deste modo, o novo critério proposto neste trabalho pode ser aplicado utilizando estes valores tabelados, referentes à secção completa, pelo que não existirão desvios ao nível dos factores de escala N_{el} , $M_{el,y}$ e $M_{el,z}$, que serão os correspondentes aos da secção completa, incluindo os troços de concordância.

Os valores dos esforços normalizados n , $m_{pl,n,y}$ e $m_{pl,n,z}$, poderão também ser afectados pela utilização dos factores k'_i em vez dos factores k_i nas Eqs. (7) e (8).

Porém, o estudo anteriormente referido [4] mostrou igualmente que, no caso da flexão composta em torno do eixo de maior inércia, as diferenças entre os valores de $m_{pl,n,y}$ calculados através das Eqs. (7) e (8) e utilizando, por um lado, os valores de $k'_{i,y}$ (obtidos a partir de $k_{i,y}$, quando $\alpha_e=0$), ou, por outro lado, os de $k_{i,y}$, são em média de 0,18%, estando compreendidas entre -0,24% e 0,61%, com uma probabilidade de 95% para um intervalo de confiança de 90%.

No caso da flexão composta em torno do eixo de menor inércia, as diferenças entre os valores de $m_{pl,n,z}$ calculados através das Eqs. (7) e (8) e utilizando, por um lado, os valores de $k'_{i,z}$ (obtidos a partir de $k_{i,z}$, quando $\alpha_e=0$), ou, por outro lado, os de $k_{i,z}$, são em média de 0,69%, estando compreendidas entre -1,61% e 0,23%, com uma probabilidade de 95% para um intervalo de confiança de 90%.

As diferenças referidas foram calculadas para os 745 perfis em I atrás mencionados, considerando, para cada um destes perfis, 11 valores diferentes do esforço normal normalizado, uniformemente distribuídos entre $n=0$ e $n=1$, em ambos os casos de flexão composta (em torno dos eixos de maior e de menor inércia).

Os valores apresentados mostram que a influência dos troços de concordância, ao nível do cálculo dos valores dos esforços normalizados n , $m_{pl,n,y}$ e $m_{pl,n,z}$, é bastante reduzida, podendo ser desprezada no caso de se aplicar uma versão simplificada do critério de interacção proposto neste trabalho, baseada na utilização dos factores $k'_{i,y}$ ou $k'_{i,z}$, em vez de $k_{i,y}$ ou $k_{i,z}$.

As diferenças mais significativas fazem-se sentir sobretudo ao nível do cálculo dos factores de escala, A , $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$, mas, tal como foi referido, estes podem ser obtidos directamente

de catálogos elaborados pelos fabricantes dos perfis em I (os quais tomam em consideração a influência dos troços de concordância) ou, em alternativa, ser calculados separadamente com base nos valores dos factores $k_{i,y}$ ou $k_{i,z}$ (considerando $\alpha_e \neq 0$), eliminando-se assim estas diferenças.

5. Influência dos troços de concordância no caso da flexão desviada

O estudo da influência dos troços de concordância no caso da flexão composta desviada foi efectuado através da comparação dos valores dos esforços resistentes $n_{pl,my,mz}$, $m_{pl,n,mz,y}$ e $m_{pl,n,my,z}$ obtidos a partir de duas modelações diferentes de uma secção em I, através de um método semi-analítico desenvolvido pelo autor [5].

A primeira destas modelações corresponde a uma representação simplificada, em que cada troço de concordância foi substituído por um troço quadrado com a mesma área; deste modo, a área desta secção simplificada é igual à área nominal da secção em I, enquanto que as diferenças entre os valores das características $W_{el,y}$, $W_{el,z}$, $W_{pl,y}$ e $W_{pl,z}$ da secção simplificada diferem dos valores nominais destas características, em média, cerca de -0,0003 % (com um desvio padrão de 0,006%), no conjunto dos 745 perfis atrás referidos.

A segunda modelação corresponde a uma secção simplificada constituída apenas pelos dois banzos e pela alma, ignorando-se a existência dos troços de concordância.

A Fig. 3 apresenta uma comparação entre os valores dos esforços resistentes normalizados de uma secção HE 1000×584 obtidos através destas duas modelações. É possível constatar que a influência dos troços de concordância é muito pequena, uma vez que as curvas $m_{pl,n,my,z}(m_{pl,n,mz,y}; n_{pl,my,mz})$, obtidas com cada uma destas duas modelações da secção em I, se encontram praticamente sobrepostas, para um mesmo valor de $n_{pl,my,mz}$.

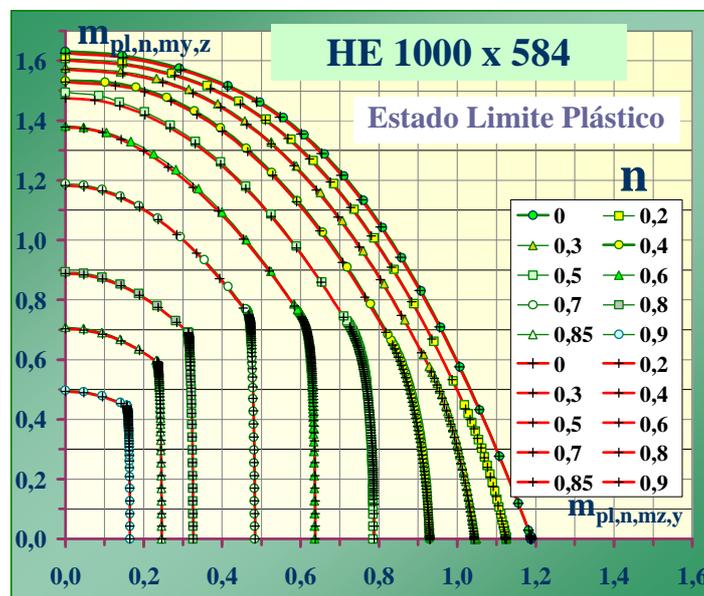


Fig. 3: Comparação entre os valores dos esforços resistentes normalizados, $n_{pl,my,mz}$, $m_{pl,n,mz,y}$ e $m_{pl,n,my,z}$, em flexão composta desviada, obtidos com e sem a influência dos troços de concordância

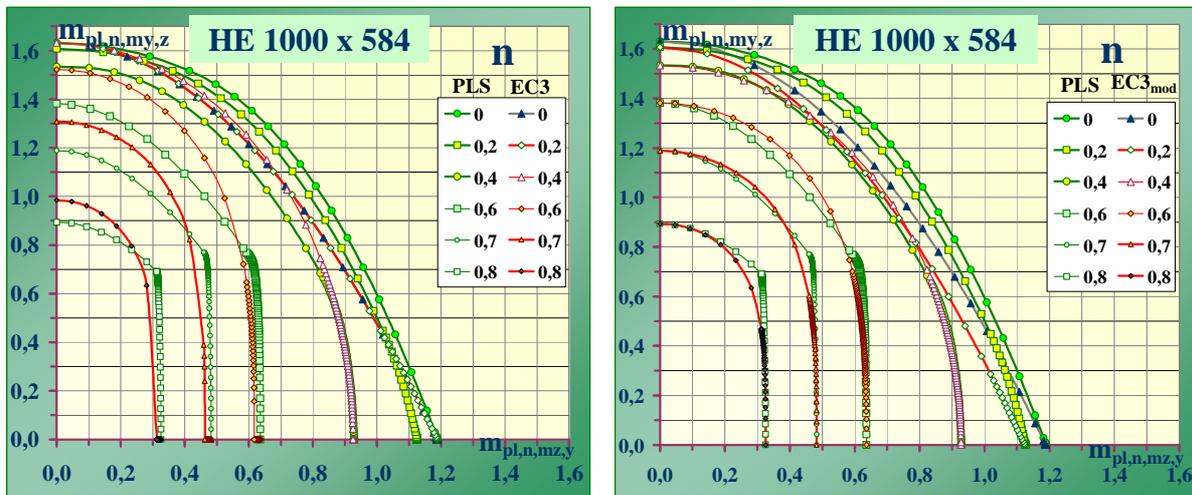
Deste modo, tal como acontecia nos casos de flexão composta atrás analisados, os efeitos dos troços de concordância no caso da flexão composta desviada também se fazem sentir sobretudo ao nível do cálculo dos factores de escala, A , $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$; porém, uma vez mais, as diferenças existentes podem ser eliminadas pelo processo anteriormente descrito.

6. Proposta de melhoria do critério de cálculo adoptado no EC3 para o cálculo dos esforços resistentes em flexão composta desviada

A Fig. 4 a) apresenta uma comparação entre os esforços resistentes normalizados de uma secção HE 1000×584 obtidos através do critério de cálculo adoptado no EC3, e os valores desses esforços fornecidos pelo método semi-analítico atrás referido [5], apresentados na Fig. 3, que serão tomados como solução de referência.

Os resultados indicam que, no caso desta secção, as soluções dadas pelas Eqs. (1) a (6) podem, nalguns casos, sobrestimar o valor de $m_{pl,n,my,z}$ até 7% do momento plástico $m_{pl,z}$ (30). Se esta secção HE 1000×584 for submetida, por exemplo, a um esforço normal $n=0,7$ e a um momento flector $m_{pl,n,my,z}=1,1780$, o valor máximo de $m_{pl,n,mz,y}$ fornecido pelo critério do EC3, é igual a $m_{pl,n,mz,y}=0,24515$, enquanto que o obtido através do método semi-analítico [5] é apenas de $m_{pl,n,mz,y}=0,04726$. O valor de $m_{pl,n,mz,y}$ fornecido pelo EC3 é 5,2 vezes superior; a diferença entre estes dois resultados corresponde a 17% do momento plástico $m_{pl,y}$ (23).

No entanto, os estudos efectuados mostraram que a principal causa destas diferenças não reside inteiramente na Eq. (1), mas antes na avaliação dos momentos resistentes $M_{pl,n,y}$ e $M_{pl,n,z}$, através das Eqs. (2) a (6), devido às diferenças entre os valores exactos destes momentos e os fornecidos pelo EC3, conforme se pode observar nas Figs. 2 a) e 2 b), por exemplo. Uma vez que estes momentos, $M_{pl,n,y}$ e $M_{pl,n,z}$, figuram nos denominadores da Eq. (1), podem introduzir desvios importantes nos resultados fornecidos por esta equação.



a) Critério de cálculo adoptado no EC3

b) Critério do EC3, com modificação proposta neste trabalho

Fig. 4: Comparação entre os esforços resistentes normalizados, $n_{pl,my,mz}$, $m_{pl,n,mz,y}$ e $m_{pl,n,my,z}$ de uma secção HE 1000×584 (ver Fig. 3), e os resultados obtidos através do critério de cálculo adoptado no EC3, ou através desse critério (EC3) com a modificação proposta no presente trabalho.

Uma solução possível para atenuar este problema consiste em substituir o uso das Eqs. (2) a (6) pelas Eqs. (7) e (8) propostas neste trabalho, utilizando os factores $k_{i,y}$, Eqs. (12) a (16), e $k_{i,z}$, Eqs. (25) a (29), ou, em alternativa, os factores $k'_{i,y}$ ou $k'_{i,z}$ obtidos através das mesmas equações mas considerando $\alpha_e=0$. Os resultados fornecidos para a secção HE 1000×584 pelo critério do EC3 modificado de acordo com esta proposta são apresentados na Fig. 4 b).

Esta figura permite constatar uma concordância, entre a solução de referência (Fig. 3) e os resultados obtidos através deste critério do EC3 modificado, bastante superior à verificada na Fig. 4 a), entre os resultados da mesma solução de referência e os obtidos através do critério adoptado no EC3.

7. Conclusões

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência dos troços de concordância, entre a alma e os banzos de secções em I, na sua resistência plástica em flexão composta e em flexão composta desviada. Este estudo baseou-se na aplicação de um novo critério de interacção, proposto pelo autor, para o cálculo dos esforços resistentes de uma secção em I submetida a flexão composta, que toma em consideração a influência dos seus troços de concordância e é aplicável à flexão em torno dos eixos de maior inércia ou de menor inércia da secção. Este novo critério fornece os valores normalizados dos esforços resistentes da secção, que deverão ser posteriormente multiplicados por factores de escala para se obterem os correspondentes valores dimensionais.

Os resultados deste estudo mostram que a influência dos troços de concordância sobre os valores normalizados dos esforços é praticamente desprezável, em ambos os casos de flexão composta e em flexão composta desviada, afectando sobretudo os valores dos factores de escala (A , $W_{el,y}$ e $W_{el,z}$). No entanto, os valores correctos destes factores de escala podem ser obtidos directamente de catálogos elaborados pelos fabricantes dos perfis em I (os quais tomam em consideração a influência dos troços de concordância) ou ser calculados com base nos factores $k_{i,y}$ ou $k_{i,z}$ do critério proposto neste artigo, eliminando-se deste modo os possíveis desvios resultantes da omissão dos troços de concordância nos cálculos efectuados.

Este trabalho apresenta ainda um estudo de comparação entre os valores fornecidos pelo EC3 para os esforços resistentes de secções em I submetidas a flexão composta desviada, e os valores destes esforços calculados através de um método desenvolvido pelo autor. Na sequência deste estudo é proposta uma alteração ao critério do EC3 que, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, permitirá uma melhor concordância com os esforços resistentes obtidos através de uma integração das tensões normais ao longo da secção transversal do perfil.

Referências

- [1] 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.
- [2] Massonnet C., Save M., “Calcul plastique des constructions. Vol. 1 – Structures dépendant d’un paramètre”, Ed. B. Nelissen, 3rd edition, 1976.
- [3] 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.).
- [4] Baptista A. M., Muzeau J.P. – “Comparison of the bending resistance efficiency of international series of hot-rolled steel I-sections”, *Construction Métallique*, 26 p, 3/2014.
- [5] Baptista A. M. – “Resistance of steel I-sections under axial force and biaxial bending”, *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 1–11, 2012.