



CRITÉRIO DE INTERACÇÃO ENTRE O ESFORÇO NORMAL E O MOMENTO FLECTOR EM SECÇÕES SEMI-ELIPSOIDAIS OCAS TOTALMENTE PLASTIFICADAS

António M. Baptista ^a

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

Resumo. Os perfis tubulares de aço de secção elipsoidal ou semi-elipsoidal fornecem novas soluções com bastantes potencialidades estéticas e características estruturais interessantes. Contudo, existe ainda pouca informação disponível para o cálculo deste tipo de perfis, nomeadamente ao nível das disposições normativas adoptadas nos regulamentos de cálculo de estruturas de aço. A fim de contribuir para a resolução deste problema, o presente trabalho propõe um critério analítico para o cálculo dos esforços resistentes de secções semi-elipsoidais ocas totalmente plastificadas, submetidas a um esforço normal e a flexão segundo um dos seus eixos principais de inércia.

1. Introdução

A introdução dos perfis tubulares de aço de secção elipsoidal ou semi-elipsoidal no mercado da construção metálica tem vindo a despertar a atenção de arquitectos e de engenheiros de estruturas, devido às suas potencialidades estéticas e eficiência estrutural [1].

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. A formação de rótulas plásticas depende da geometria da secção e da interacção entre os seus esforços internos, pelo que é necessário dispor de expressões de cálculo específicas para cada tipo de secção transversal, a fim de se poder avaliar a sua resistência após a sua plastificação total.

No caso particular das secções ocas de forma elipsoidal ou semi-elipsoidal, não é fácil encontrar expressões de cálculo normativas que permitam avaliar a sua capacidade resistente quando totalmente plastificadas sob o efeito conjunto de um momento flector e de um esforço normal. Apesar de existirem relatos de estudos numéricos e experimentais sobre o comportamento deste tipo de secções [1] [2], as formulações propostas para estimar a sua resistência em regime elastoplástico são habitualmente complexas ou aproximadas [3].

Para o caso particular das secções de aço ocas de forma elipsoidal, totalmente plastificadas, o autor do presente trabalho propôs, na referência [4], um critério de interacção entre o momento flector (segundo um dos eixos principais de inércia) e o esforço normal.

O presente trabalho apresenta uma proposta de um critério de interacção do mesmo tipo, para secções de aço ocas semi-elipsoidais totalmente plastificadas, também deduzido com base numa integração exacta dos campos de tensões ao longo das suas zonas plastificadas, em tracção e em compressão, tendo em conta as hipóteses associadas à formação de uma rótula plástica e assegurando as condições de equilíbrio entre os esforços internos e as forças exteriores aplicadas.

2. Características geométricas e mecânicas de uma secção semi-elipsoidal

A Fig. 1 apresenta uma representação esquemática de uma secção semi-elipsoidal oca. A sua geometria é definida pela Eq. (1), em função das dimensões do semi-eixo maior, a , do semi-eixo menor, b , e da espessura da parede, t [2]; as dimensões a^* e b^* do contorno interior da secção são definidas através das equações (2) e (3), em função das dimensões anteriores.

$$\begin{cases} 0 \leq z \leq a \\ \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2 \leq 1 \leq \left(\frac{y}{b^*}\right)^2 + \left(\frac{z}{a^*}\right)^2 \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} 0 \leq z \leq t \\ \left(\frac{y}{b^*}\right)^2 + \left(\frac{z}{a^*}\right)^2 \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$a^* = a - t \quad (2)$$

$$b^* = b - t \quad (3)$$

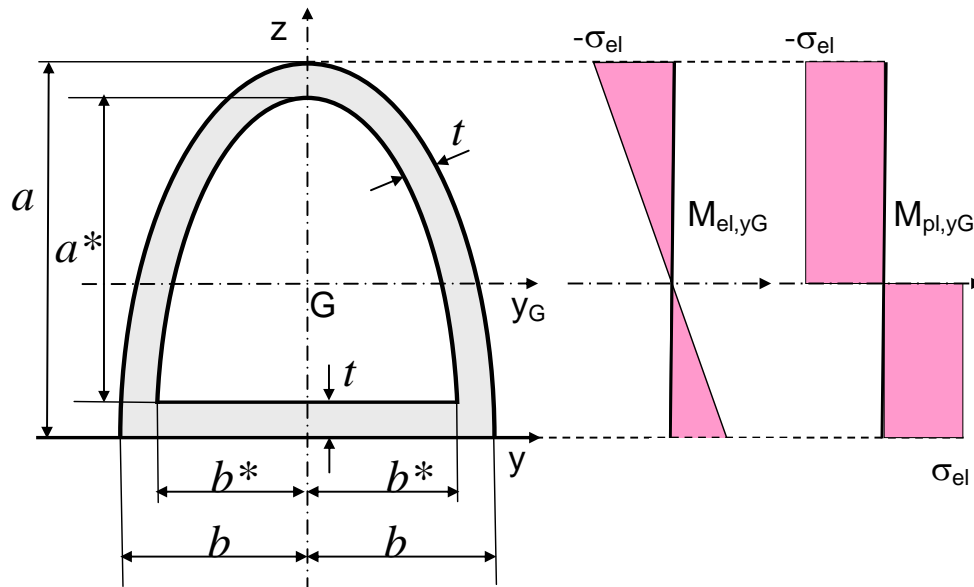


Fig. 1: Geometria de uma secção semi-elipsoidal oca flectida segundo o seu eixo y_G

A área de uma secção semi-elipsoidal oca é fornecida pela Eq. (4):

$$A = k_A \frac{\pi}{2} a b \quad (4)$$

em que:

$$k_A = 1 - \alpha_a \alpha_b + \frac{4}{\pi} \alpha_b \alpha_t \quad (5)$$

$$\alpha_a = a^*/a = (a-t)/a \quad (6)$$

$$\alpha_b = b^*/b = (b-t)/b \quad (7)$$

$$\alpha_t = t/a = 1 - \alpha_a \quad (8)$$

O esforços normais máximos em regime elástico, N_{el} , e em regime plástico, N_{pl} (considerando um comportamento elastoplástico perfeito, sem endurecimento, do material constituinte da secção), podem ser obtidos através da Eq.(9); a variável σ_{el} representa a tensão de cedência do material.

$$N_{pl} = N_{el} = k_A \frac{\pi}{2} a b \sigma_{el} \quad (9)$$

O momento de inércia I_y , em relação ao eixo y (Fig. 1), é fornecido pela Eq. (10):

$$I_y = k_{I,y} \frac{\pi}{8} a^3 b \quad (10)$$

em que:

$$k_{I,y} = 1 - \alpha_a^3 \alpha_b + \frac{16}{3\pi} \alpha_b \alpha_t^3 \quad (11)$$

A coordenada z_G do centro de gravidade G da secção (Fig. 1), pode ser obtida através da Eq. (12):

$$z_G = \frac{2 a}{3 \pi} \frac{\left(2 \left(1 - \alpha_a^2 \alpha_b \right) + 3 \alpha_b \alpha_t^2 \right)}{k_A} \quad (12)$$

O momento de inércia I_{yG} , em relação ao eixo y_G que passa pelo centro de gravidade G da secção (Fig. 1), é fornecido pela Eq. (13):

$$I_{yG} = k_{I,yG} \frac{\pi}{8} a^3 b \quad (13)$$

em que:

$$k_{I,yG} = k_{I,y} - 4 k_A \alpha_G^2 \quad (14)$$

$$\alpha_G = z_G/a \quad (15)$$

O momento elástico $M_{el,yG}$ da secção em relação ao eixo y_G pode ser determinado através da Eq. (16):

$$M_{el,yG} = \frac{I_{yG}}{a - z_{yG}} \sigma_{el} = \frac{k_{I,yG}}{1 - \alpha_G} a^2 b \sigma_{el} \quad (16)$$

O momento de inércia I_z , em relação ao eixo z (Fig. 1), pode ser calculado através da Eq. (17):

$$I_z = k_{I,z} \frac{\pi}{8} a b^3 \quad (17)$$

em que:

$$k_{I,z} = 1 - \alpha_a \alpha_b^3 + \frac{16}{3\pi} \alpha_b^3 \alpha_t \quad (18)$$

O momento elástico $M_{el,z}$ da secção em relação ao eixo z pode, por sua vez, ser obtido através da Eq. (19):

$$M_{el,z} = \frac{I_z}{b} \sigma_{el} = k_{I,z} \frac{\pi}{4} a b^2 \sigma_{el} \quad (19)$$

3. Variáveis reduzidas

A formulação a seguir apresentada para o cálculo do estado limite plástico de uma secção semi-elipsoidal oca, submetida a um esforço normal e a flexão em torno de um dos seus eixos principais de inércia, é escrita num sistema de variáveis reduzidas.

O esforço normal reduzido n e os momentos flectores reduzidos m_y e m_z são definidos nas Eqs. (20) a (22):

$$n = N/N_{el} \quad (20)$$

$$m_{yG} = M_y/M_{el,yG} \quad (21)$$

$$m_z = M_z/M_{el,z} \quad (22)$$

Os valores reduzidos (normalizados) dos esforços máximos em regime elástico, n_{el} , $m_{el,yG}$ e $m_{el,z}$ são iguais a 1, por definição.

O principal interesse da utilização de variáveis reduzidas reside na separação entre os fenómenos físicos e a quantificação numérica das variáveis, associada a um determinado sistema de unidades. Deste modo, os valores dos esforços reduzidos tornam-se independentes das dimensões da secção transversal e da tensão de cedência do material e, conseqüentemente, do sistema de unidades em que os correspondentes valores dimensionais são indicados.

A utilização de variáveis reduzidas facilita também a interpretação física dos resultados. Quando o valor reduzido do momento plástico $M_{pl,yG}$ é $m_{pl,yG} = 1,3$, por exemplo, este valor indica que, depois de ter ultrapassado o seu estado limite elástico $M_{el,yG}$, a secção possui ainda uma resistência residual à flexão, segundo o eixo y_G , igual a 30% de $M_{el,yG}$.

4. Estado limite elástico

4.1 Secção semi-elipsoidal oca, flectida em torno do seu eixo y_G

O cálculo do estado limite elástico de uma secção semi-elipsoidal oca, submetida a um esforço normal n e a um momento flector m , segundo o seu eixo y_G (Fig. 1), pode ser efectuado de acordo com as seguintes expressões, onde um valor positivo de n corresponde a um esforço normal de tracção, e um valor negativo de n a um esforço normal de compressão:

$$m \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} 1 - 2\alpha_G \leq n \leq 1 & \Rightarrow n = 1 - \frac{\alpha_G}{1 - \alpha_G} m \\ -1 \leq n \leq 1 - 2\alpha_G & \Rightarrow n = -1 + m \end{cases} \quad (23)$$

$$m \leq 0 \Rightarrow \begin{cases} -1 + 2\alpha_G \leq n \leq 1 & \Rightarrow n = 1 + m \\ -1 \leq n \leq -1 + 2\alpha_G & \Rightarrow n = -1 - \frac{\alpha_G}{1 - \alpha_G} m \end{cases} \quad (24)$$

4.2 Secção semi-elipsoidal oca, flectida em torno do seu eixo z

O cálculo do estado limite elástico de uma secção semi-elipsoidal oca, submetida a um esforço normal n e a um momento flector m , segundo o seu eixo z (Fig. 1), pode ser efectuado de acordo com a seguinte expressão:

$$n + m = 1 \quad (25)$$

Faz-se notar que é suposto que ambos os valores dos esforços indicados na Eq. (25), n e m , sejam positivos. Se tal não acontecer, deverá ser utilizado o seu valor absoluto nos cálculos e, posteriormente, atribuído o sinal correcto ao resultado obtido.

5. Estado limite plástico

5.1 Secção semi-elipsoidal oca, flectida em torno do seu eixo y_G

O cálculo do estado limite plástico de uma secção semi-elipsoidal oca, submetida a um esforço normal n e a um momento flector m , segundo o seu eixo y_G (Fig. 1), é feito através de três conjuntos de expressões analíticas diferentes, dependendo dos valores de n em relação aos seguintes valores limites:

$$n_{o1} = 1 - \frac{4}{\pi k_A} \left(\arccos \alpha_a - \alpha_a \sqrt{1 - \alpha_a^2} \right) \quad (26)$$

$$n_{o2} = 1 - \frac{4}{\pi k_A} \left[\arccos \alpha_t - \alpha_t \sqrt{1 - \alpha_t^2} - \alpha_a \alpha_b \left(\arccos \frac{\alpha_t}{\alpha_a} - \frac{\alpha_t}{\alpha_a} \sqrt{1 - \frac{\alpha_t^2}{\alpha_a^2}} \right) \right] \quad (27)$$

No 1º caso, quando $n_{o1} \leq n \leq 1$:

$$n = 1 - \frac{4}{\pi k_A} \left(\arcsin \alpha - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \quad (28)$$

$$m = \frac{4(1 - \alpha_G)}{k_{I,yG}} \left(\frac{8}{3\pi} \alpha^3 - k_A \alpha_G (1 - n) \right) \quad (29)$$

No 2º caso, quando $n_{o2} \leq n \leq n_{o1}$:

$$n = 1 - \frac{4}{\pi k_A} \left[\arccos \alpha - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} - \alpha_a \alpha_b \left(\arccos \frac{\alpha}{\alpha_a} - \frac{\alpha}{\alpha_a} \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_a^2}} \right) \right] \quad (30)$$

$$m = \frac{4(1 - \alpha_G)}{k_{I,yG}} \left[\frac{8}{3\pi} \left((1 - \alpha^2)^{3/2} - \alpha_a^2 \alpha_b \left(1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_a^2} \right)^{3/2} \right) - k_A \alpha_G (1 - n) \right] \quad (31)$$

No 3º caso, quando $-1 \leq n \leq n_{o2}$:

$$n = -1 + \frac{4}{\pi k_A} \left(\arccos \alpha + \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \quad (32)$$

$$m = -\frac{4(1 - \alpha_G)}{k_{I,yG}} \left(\frac{8}{3\pi} (1 - \alpha^3) - k_A \alpha_G (1 + n) \right) \quad (33)$$

Faz-se notar que estas expressões, Eq. (28) a Eq. (33), não permitem um cálculo directo dos esforços n ou m no estado limite plástico da secção, uma vez que o valor do parâmetro α não é conhecido *a priori*. No entanto, este parâmetro pode ser determinado através de um método numérico, com o auxílio de uma folha de cálculo por exemplo, em função do valor do esforço conhecido, n ou m , e ser em seguida introduzido na outra equação para se determinar o valor do esforço que se pretende calcular.

O valor do momento reduzido m , indicado pela Eq. (29), pela Eq. (31) ou pela Eq. (33), é suposto ser positivo. Caso contrário, deve ser utilizado o valor absoluto de m nos cálculos e o sinal do resultado obtido para o valor de n deve ser invertido (de positivo para negativo, ou vice-versa).

A Fig. 2 apresenta uma representação gráfica dos critérios de cálculo dos estados limite elástico e plástico de duas secções semi-elipsoidais ocas flectidas em torno do seu eixo y_G , definidos nas Eqs. (23) e (24), e nas Eqs. (28) a (33), respectivamente. É possível constatar que ambos os critérios são anti-simétricos em relação ao eixo vertical, ou seja: $m(-n) = -m(n)$.

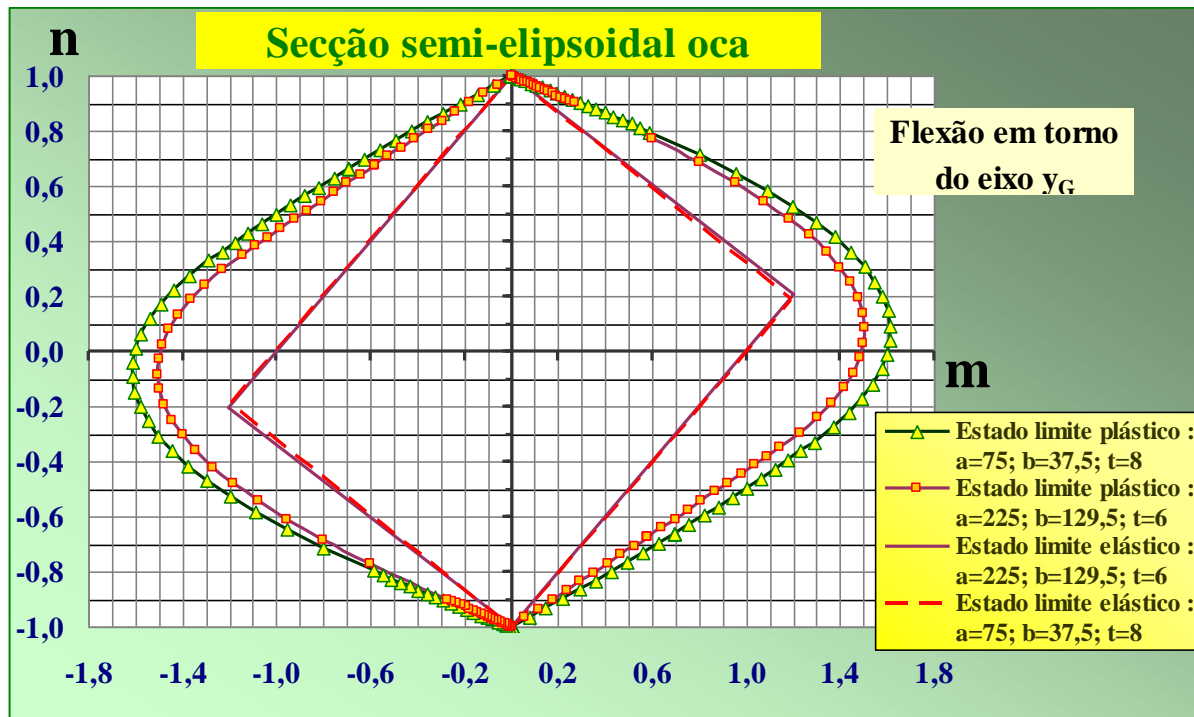


Fig. 2: Critérios de cálculo dos estados limite elásticos e plásticos de duas secções semi-elipsoidais ocas, flectidas segundo o seu eixo y_G .

5.2 Secção semi-elipsoidal oca, flectida em torno do seu eixo z

O cálculo do estado limite plástico de uma secção semi-elipsoidal oca, submetida a um esforço normal n e a um momento flector m , segundo o seu eixo z (Fig. 1), é feito através de dois conjuntos de expressões analíticas diferentes, dependendo dos valores de n em relação ao seguinte valor limite:

$$n_{o3} = 1 - \frac{2}{\pi k_A} \left(\arcsin \alpha_a - \alpha_a \sqrt{1 - \alpha_a^2} \right) \quad (34)$$

No 1º caso, quando $n_{o3} \leq n \leq 1$:

$$n = 1 - \frac{2}{\pi k_A} \left(\arcsin \alpha - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \quad (35)$$

$$m = \frac{16 \alpha^3}{3 \pi k_{I,z}} \quad (36)$$

No 2º caso, quando $0 \leq n \leq n_{o3}$:

$$n = 1 - \frac{2}{\pi k_A} \left[\arcsin \alpha - \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} - \alpha_a \alpha_b \left(\arcsin \sqrt{1 - \frac{1 - \alpha^2}{\alpha_b^2}} - \sqrt{1 - \frac{1 - \alpha^2}{\alpha_b^2}} \left(1 - \frac{1 - \alpha^2}{\alpha_b^2} \right) - \dots \right) - \arcsin \frac{\alpha_t}{\alpha_a} + \frac{\alpha_t}{\alpha_a} \sqrt{1 - \frac{\alpha_t^2}{\alpha_a^2}} + 2 \alpha_t \left(\alpha_b \sqrt{1 - \frac{\alpha_t^2}{\alpha_a^2}} - \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \right] \quad (37)$$

$$m = \frac{16}{3 \pi k_{l,z}} \left[\alpha^3 - \alpha_a \alpha_b^2 \left(1 - \frac{1 - \alpha^2}{\alpha_b^2} \right)^{3/2} + \frac{\alpha_b^2}{\alpha_a} \alpha_t^3 + \frac{3}{2} \alpha_t \left(\alpha_b^2 \left(1 - \frac{\alpha_t^2}{\alpha_a^2} \right) + \alpha^2 - 1 \right) \right] \quad (38)$$

Algumas destas expressões não permitem um cálculo directo dos esforços n ou m no estado limite plástico da secção, uma vez que o valor do parâmetro α não é conhecido *a priori*. No entanto, tal como foi já anteriormente referido, este parâmetro α pode ser determinado através de um método numérico com o auxílio de uma folha de cálculo, por exemplo, em função do valor do esforço conhecido, n ou m , e ser em seguida introduzido na outra equação para se determinar o valor do esforço que se pretende calcular.

Faz-se notar que é suposto que ambos os valores dos esforços reduzidos n e m indicados nas Eqs. (35) a (38) sejam positivos. Se tal não acontecer, deverá ser utilizado o seu valor absoluto nos cálculos e, posteriormente, atribuído o sinal correcto ao resultado obtido.

A Fig. 3 apresenta uma representação gráfica dos critérios de cálculo dos estados limite elástico e plástico de duas secções semi-elipsoidais ocas flectidas em torno do seu eixo z , definidos na Eq. (25) e nas Eqs. (35) a (38), respectivamente. Esta figura apenas mostra a representação destes critérios no quadrante dos valores positivos de n e de m , uma vez que estes critérios são simétricos em relação a ambos os eixos, horizontal (m) e vertical (n).

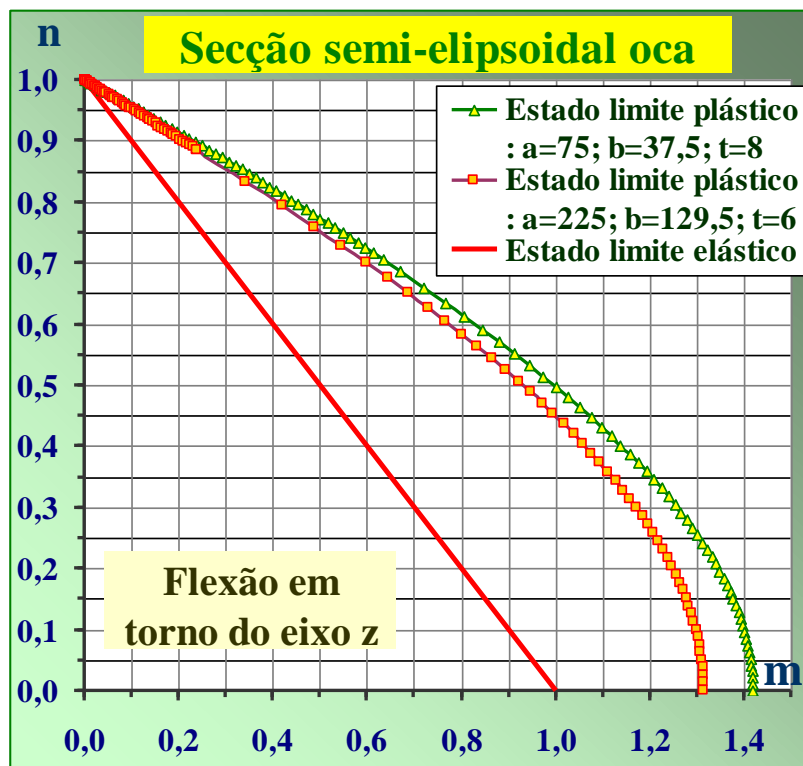


Fig. 3: Critérios de cálculo dos estados limite elásticos e plásticos de duas secções semi-elipsoidais ocas, flectidas segundo o seu eixo z .

6. Comparação com outros critérios propostos por outros autores

A norma europeia EN1993:2005 [5], que corresponde à última versão do Eurocódigo 3 (EC3), não fornece qualquer expressão para o cálculo do estado limite plástico de secções elipsoidais ou semi-elipsoidais ocas. O mesmo acontecia na pré-norma europeia ENV1993:1992 [6], que corresponde à versão anterior do EC3.

Sendo assim, na ausência de disposições normativas que cobrissem este problema, foi decidido comparar os resultados obtidos através dos critérios propostos neste trabalho com os resultados fornecidos por outros critérios, propostos por outros autores.

Nowzartash and Mohareb publicaram, na Ref^a [3], uma tabela com valores de um critério de interacção exacto para uma secção semi-elipsoidal oca, sujeita a um esforço normal, a flexão desviada (biaxial) e a um momento de torção. As dimensões desta secção estão relacionadas pela seguinte expressão (ver a Fig. 1):

$$\frac{b-t/2}{a-t/2} = 0,55 \quad (39)$$

Os valores desta tabela que correspondem aos casos particulares de um esforço normal conjugado com flexão segundo um dos eixos principais de inércia da secção, foram comparados com os resultados obtidos através dos critérios de interacção para o cálculo do estado limite plástico propostos no presente trabalho.

Estes critérios foram aplicados a uma secção semi-elipsoidal oca com as seguintes dimensões, que respeitam a relação indicada na Eq. (39): $a = 203 \text{ mm}$, $b = 111,35 \text{ mm}$ e $t = 6 \text{ mm}$.

Os valores tabelados na Ref^a [3] são também valores reduzidos, embora tenham sido normalizados em relação aos momentos plásticos da secção, $M_{pl,yG}$ e $M_{pl,z}$. Para se proceder à sua comparação com os valores fornecidos pelos critérios de interacção propostos neste trabalho foi necessário dividir os valores dos momentos flectores reduzidos, calculados através destes critérios, pelos valores reduzidos do momento plástico segundo a mesma direcção de flexão: $m_{pl,yG} = M_{pl,y} / M_{el,yG}$ or $m_{pl,z} = M_{pl,z} / M_{el,z}$.

Os valores de $m_{pl,yG}$ ou de $m_{pl,z}$ podem ser determinados através dos critérios propostos neste trabalho, para o caso particular em que $n = 0$.

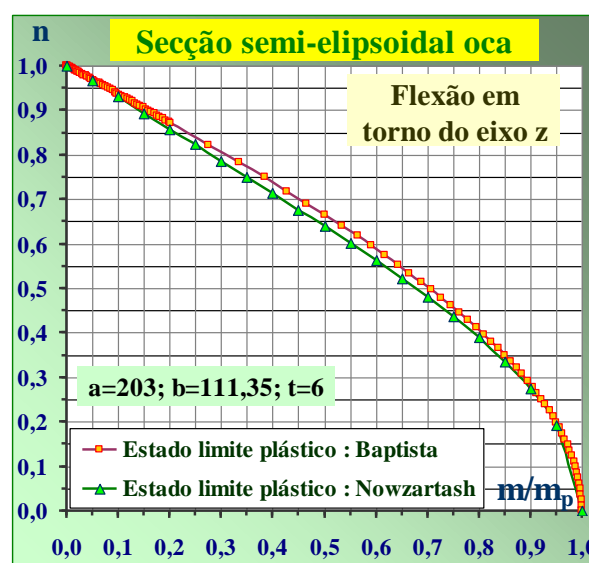


Fig. 4: Comparação entre os resultados fornecidos pelo critério proposto na Ref^a [3], e os resultados obtidos através do critério de interacção proposto no presente trabalho, no caso de flexão em torno do eixo z de uma secção semi-elipsoidal oca

A comparação entre os valores fornecidos na Tabela 1 da Ref^a [3], por Nowzartash e Mohareb, com os obtidos através das Eqs. (35) a (38), para o caso da flexão em torno do eixo z , é apresentada na Fig. 4. É possível verificar que os resultados obtidos por estes dois processos distintos são muito semelhantes entre si.

Alguns dos valores fornecidos na Ref^a [3] são ligeiramente inferiores aos calculados através das Eqs. (35) a (38), o que poderá ser explicado pelo facto de, no primeiro caso, os resultados terem sido afectados pelos efeitos de um momento torsor na secção, que diminuiu o valor dos restantes esforços resistentes, enquanto que os efeitos do momento torsor não foram tomados em consideração na dedução do critério de interacção proposto neste trabalho.

A mesma Ref^a [3] apresenta um outro exemplo de aplicação, de uma viga simplesmente apoiada com uma secção semi-elipsoidal oca, com as seguintes dimensões (ver a Fig. 1): $a = 225$ mm, $b = 125,5$ mm e $t = 8$ mm. Esta viga encontra-se sujeita a uma força axial de compressão e a uma força concentrada transversal, aplicada a meio-vão.

Este problema foi resolvido através das soluções analíticas propostas por Nowzartash e Mohareb na Ref^a [3] e através de um programa numérico de elementos finitos, até se atingir a plastificação completa da secção transversal situada a meio-vão da viga.

Os valores obtidos através destes dois métodos são apresentados na Fig. 5, tendo em conta que os valores do esforço normal apresentados nesta figura são simétricos dos indicados na Ref^a [3]. Esta troca de sinais foi necessária para permitir a sua comparação, na mesma figura, com os valores obtidos através do critério proposto neste trabalho, pois o esforço normal de referência utilizado por Nowzartash e Mohareb é um esforço de compressão que, de acordo com a convenção utilizada no presente trabalho é um esforço axial negativo.

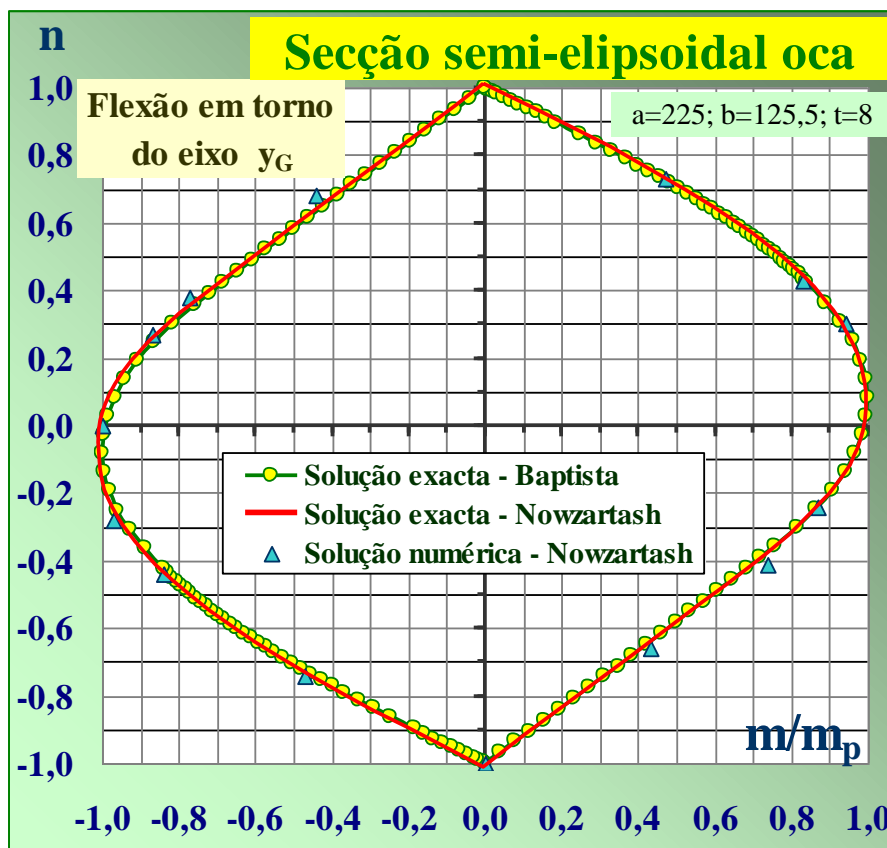


Fig. 5: Comparação entre os resultados fornecidos pelo critério proposto na Ref^a [3] e os resultados obtidos através do critério de interacção proposto no presente trabalho, no caso de flexão em torno do eixo y_G de uma secção semi-elipsoidal oca.

A comparação entre os resultados apresentados na Fig. 5 evidencia um excelente acordo entre os resultados fornecidos por Nowzartash e Mohareb e os obtidos através do critério proposto neste trabalho.

É de referir o facto de, neste caso, ao contrário do que acontecia no exemplo anterior, apresentado na Fig. 4, a secção semi-elipsoidal oca não estar submetida a um esforço de torsão. Além disso, os resultados obtidos através de vários cálculos numéricos por Nowzartash e Mohareb apresentam igualmente uma concordância com os valores obtidos através das duas formulações analíticas, atrás referidos.

7. Conclusões

Este trabalho apresenta uma proposta de um critério de interacção entre o esforço normal e o momento flector em secções de aço semi-elipsoidais ocas totalmente plastificadas, flectidas segundo um dos seus eixos principais de inércia.

Após uma definição das características geométricas e mecânicas que condicionam a resistência da secção, é apresentada uma série de equações, escritas em variáveis reduzidas (normalizadas), que permitem efectuar o cálculo dos esforços resistentes da secção nos seus estados limite elástico e plástico.

Por último, na ausência de disposições normativas que cobrissem este problema, é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos através dos critérios de cálculo do estado limite plástico propostos neste trabalho e os fornecidos na Ref^a [3] por Nowzartash e Mohareb. Esta comparação evidencia um excelente acordo entre ambos os grupos de resultados, nos casos de flexão segundo o eixo z e segundo o eixo y_G da secção semi-elipsoidal oca.

Esta concordância de resultados coloca em destaque uma vantagem importante do critério de interacção proposto no presente trabalho que, na opinião do autor, consiste na maior simplicidade da sua aplicação prática, em relação à da formulação proposta na Ref^a [3].

Referências

- [1] Chan T.M., Gardner L. “Bending strength of hot-rolled elliptical hollow sections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64 (2008) p.971–986
- [2] Chan T.M., Gardner L. “Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections”, *Engineering Structures*, Vol. 30 (2008) p.522–532
- [3] Nowzartash F., Mohareb M. “Plastic interaction relations for semi-elliptical hollow sections”, *Thin-Walled Structures*, 48 (2010), p. 42-54.
- [4] Baptista A.M. “Critério de interacção entre o esforço normal e o momento flector em secções elipsoidais ocas totalmente plastificadas”, *VII Congresso de Construção Metálica e Mista*, cmm, LNEC, Lisboa, Novembro de 2009, p.II-233 a II-242.
- [5] 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, May 2005.
- [6] CEN/TC 250. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European prestandard ENV 1993-1-1:1992, February 1992.