

25- Comportamento Estrutural de Colunas Mistas.

Introdução

As colunas mistas são caracterizadas por possuir uma envoltória ou um núcleo de concreto. O primeiro caso compreende os casos em que perfis laminados ou soldados de aço são envolvidos em uma região de concreto como mostrado na figura 1a. O segundo caso compreende os tubos redondos e quadrados preenchidos com concreto, figura 1b. Barras de armadura adicionais geralmente são necessárias somente em colunas com grande seção transversal de aço e servem para aumentar a resistência da seção mista.

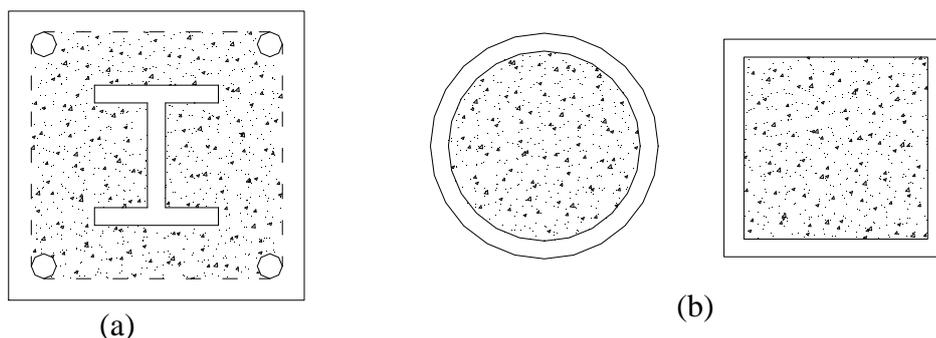


Figura 1 – Tipos de Colunas Mistas.

Uma grande parte dos projetos com estruturas de aço necessitam de uma camada de proteção em torno das seções de aço de forma a garantir uma durabilidade e resistência ao fogo adequada. Desta forma a solução mista se apresenta como uma consequência natural destes requisitos, pois conjuga os aspectos de proteção ao fogo e durabilidade da estrutura, além de aumentar a resistência estrutural da mesma. Estes fatos conduzem, em muitos casos, a estruturas mais econômicas que suas equivalentes não mistas. A este fato se soma a condição adicional que a resistência a flambagem lateral de uma seção mista é superior a de uma seção não mista devido à redução de sua esbelteza viabilizando ainda mais o seu uso.

As seções tubulares mistas além de apresentarem uma apresentação visual e estética mais adequada também proporcionam outras vantagens estruturais relacionadas com o efeito triaxial de confinamento do concreto e a resistência ao fogo da seção mista que é fortemente dependente da resistência do núcleo de concreto.

Referencial Teórico Básico

O EC4 aplica-se a colunas isoladas ou inseridas em pórticos, com uma das seções indicadas na figura 2, em aço S235 a S460 e concreto C20/25 a C50/60, e ainda verificando a

condição: $0.2 \leq \delta \leq 0.9$, sendo $\delta = A_a \cdot f_{yd} / N_{pl,Rd}$ a relação entre a resistência à compressão do aço estrutural e a resistência plástica à compressão da seção mista.

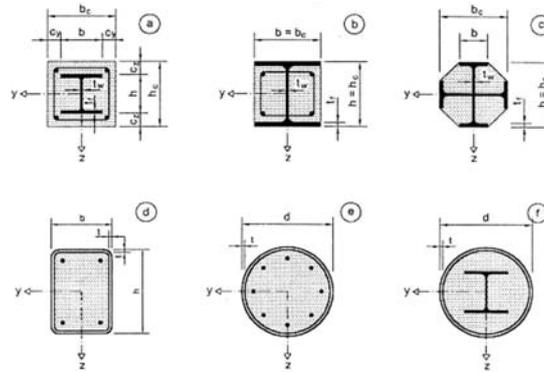


Figura 2 - Colunas mistas.

Segundo o EC4 (6.7.1), as colunas mistas devem ser verificadas quanto à: resistência dos elementos; resistência à flambagem local; resistência a cargas concentradas e resistência ao esforço cortante longitudinal.

No EC4 são previstos dois métodos para avaliação da resistência de uma coluna mista:

Método geral – aplicável a colunas com seção transversal não simétrica e/ou seção não uniforme ao longo do seu comprimento;

Método simplificado – aplicável a colunas com seção transversal duplamente simétrica e uniforme ao longo do seu comprimento.

Os efeitos da flambagem local podem ser desprezados quando os elementos em aço se encontram totalmente envolvidos em concreto, se o recobrimento não seja inferior a 40 mm, nem a 1/6 da largura da mesa, ou se forem verificados os limites estabelecidos em:

Quando uma coluna é submetida a cargas não aplicadas na totalidade da seção mista (só no aço ou só no concreto), ou ainda quando é submetido a esforço cortante, surgem tensões tangenciais ao longo das superfícies de contato aço-concreto. Estas tensões podem ser resistidas por conexão de esforço cortante mecânica (através de conectores), por atrito e aderência entre o aço e o concreto ou pelos dois processos em simultâneo.

- Método simplificado

A aplicação do método simplificado proposto no Ec4 pressupõe:

-Seção transversal duplamente simétrica e uniforme ao longo da coluna;

- $\bar{\lambda} \leq 2.0$, sendo $\bar{\lambda}$ o coeficiente de esbeltez reduzido;

-Em seções totalmente envolvidas em concreto, os limites máximos do recobrimento em termos de cálculo são: $c_z \leq 0.3 h$ e $c_y \leq 0.4 b$, sendo c_z e c_y definidos na figura 2;

-Área armadura longitudinal usada no cálculo deve ser inferior 6% área de concreto;

-A relação h_c/b_c deve estar compreendida no intervalo $0.2 \leq h_c/b_c \leq 5.0$, sendo h_c e b_c a altura e a largura da seção mista, de acordo com a figura 2.

A resistência plástica à **compressão** ($N_{pl,Rd}$) de uma seção mista é obtida adicionando a resistência dos diversos componentes (figura seguinte), através da expressão:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + 0.85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$$

sendo A_a , A_c e A_s as áreas das seções transversais de aço estrutural, concreto e armadura longitudinal e f_{yd} , f_{cd} e f_{sd} as respectivas tensões de cálculo dadas por f_y/γ_M , f_{ck}/γ_c e f_{sk}/γ_s , respetivamente. O coeficiente 0.85 pode ser aumentado para 1.0 no caso de seções fechadas cheias de concreto ou mesmo para valores superiores no caso de seções circulares.

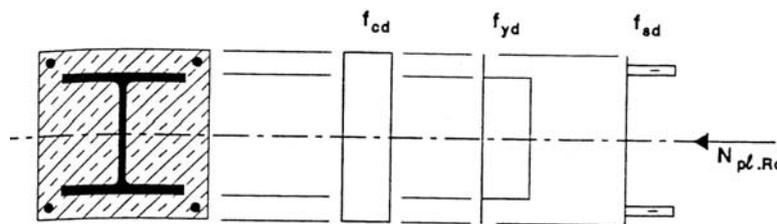


Figura 3 - Resistência plástica à compressão de uma seção mista

- Método geral

- Resistência de colunas mistas à compressão

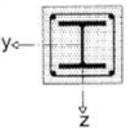
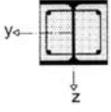
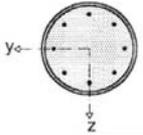
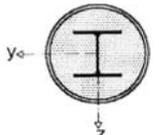
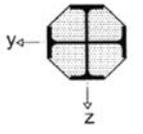
A verificação da resistência à compressão de um elemento pode ser efetuada através de uma análise de segunda ordem, tendo em conta as imperfeições ao nível do elemento, de acordo com o EC4, ou simplificadamente através da seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1.0$$

em que χ representa o coeficiente de redução da resistência plástica à compressão ($N_{pl,Rd}$) para ter em conta o efeito da flambagem. Este coeficiente é obtido de uma forma semelhante à considerada no EC3 para elementos metálicos, considerando as curvas de flambagem definidas no quadro seguinte e o coeficiente de esbeltez $\bar{\lambda}$ avaliado de acordo com a especificidade da seção (seção composta por mais do que um material). O coeficiente de esbeltez $\bar{\lambda}$ é dado por: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$ sendo $N_{pl,Rk}$ a resistência característica à compressão da

seção mista (resistência plástica considerando os coeficientes γ todos iguais a 1.0) e N_{cr} a carga crítica de Euler correspondente ao plano mais desfavorável, avaliada com base numa rigidez efetiva $(EI)_{eff}$, dada por: $(EI)_{eff} = E_a \cdot I_a + E_s \cdot I_s + K_e \cdot E_{cm} \cdot I_c$, sendo K_e um fator corretivo igual a 0.6 e os restantes símbolos com o significado referido anteriormente.

Curvas de flambagem e imperfeições em colunas mistas

Seção	Limites	Eixo de flambagem	Curva de flambagem	Imperfeição do elemento
		y-y z-z	b c	L/200 L/150
		y-y z-z	b c	L/200 L/150
	$\rho_s \leq 3\%$ $3\% \leq \rho_s \leq 6\%$	Qualquer Qualquer	a b	L/300 L/200
		y-y z-z	b b	L/200 L/200
		Qualquer	b	L/200
$\rho_s = A_s / A_c$, sendo A_s e A_c as áreas de aço e de concreto respetivamente				

A norma canadense dimensiona perfis tubulares preenchidos com concreto através de:

$$C = \tau C_r + \tau' C'_r \quad \text{onde: } C_r = \phi \rho A_s f_y$$

$$C'_r = 0,85 \phi_c f_{ck} A_c \lambda_c^{-2} \left(\sqrt{1 + 0,25 \lambda_c^{-4}} - 0,5 \lambda_c^{-2} \right) \quad \text{e} \quad \lambda_c = \frac{KL}{r_c} \sqrt{\frac{f_{ck}}{\pi^2 E_c}}$$

em que r_c é o raio de giração da área de concreto e E_c é o módulo de elasticidade inicial do concreto considerando efeitos de longa duração dado por: $E_c = \left(1 + \frac{S}{T} \right) 2500 \sqrt{f_{ck}}$, onde S e T representam as cargas de curta duração e a carga total respetivamente. Por sua vez os valores dos coeficientes τ e τ' são avaliados para qualquer tubo retangular ou para tubos

circulares com a razão comprimento/diâmetro ($L/D > 25$) através de: $\tau = \tau' = 1$, caso

$$\text{contrário: } \tau = \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma + \gamma^2}} \quad ; \quad \tau' = 1 + \left(\frac{25 \gamma^2 \tau}{D/t} \right) \left(\frac{f_y}{0,85 f_{ck}} \right) \quad \text{onde } \gamma = 0,02 \left(25 - \frac{L}{D} \right)$$

Esta equação é válida para limites de esbeltez mais severos que os da classe três dados por:

$$b/t \leq 2,98 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \text{para tubos retangulares e } D/t \leq 0,14 \frac{E}{f_y} \quad \text{para tubos circulares onde}$$

as variáveis b , D e t estão representadas na figura 3.

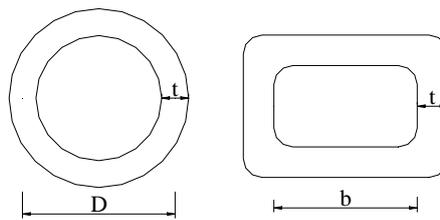


Figura 3 – Colunas Tubulares Mistas.

Avanços Recentes

-Método simplificado

-Resistência de colunas mistas à compressão + flexão uniaxial

A resistência plástica de uma seção mista à combinação de **compressão + flexão** deve ser obtida a partir da curva de interação entre os dois esforços, incluindo o efeito do esforço cortante se necessário, como a que se representa na figura seguinte. Na obtenção desta curva deve-se desprezar a contribuição do concreto nas zonas tracionadas.

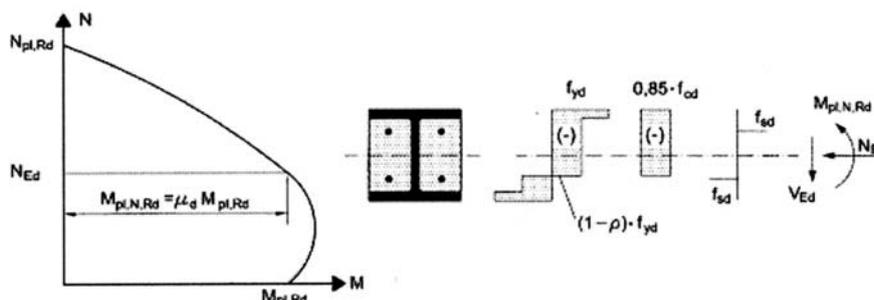


Figura 4 - Curva de interação compressão e flexão uniaxial numa seção mista

Em alternativa à curva da figura anterior, o Ec4 permite utilizar simplificadamente uma linha poligonal, tal como se ilustra na figura seguinte para uma seção em I totalmente envolvida em concreto. Nesta figura ilustram-se ainda os diagramas

-de tensões e correspondentes esforços relativos a cada um dos vértices da poligonal.

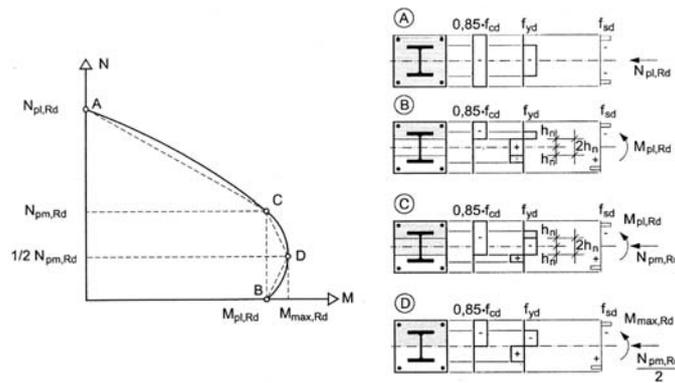


Figura 5 - Curva de interação compressão e flexão uniaxial simplificada

O ponto A corresponde à plastificação de toda a seção por compressão, logo tem coordenadas $(0, N_{pl,Rd})$. Para determinar os pontos B, C e D é necessário determinar o $M_{pl,Rd}$ (e a correspondente posição do eixo neutro plástico h_n) e o esforço axial $N_{pm,Rd}$. $N_{pm,Rd}$ representa o esforço axial centrado (logo sem influência no momento fletor) que é necessário adicionar para se passar do ponto B para o ponto C, cujo valor é obtido com base na figura seguinte (embora relativa a uma seção fechada cheia de concreto).

O esforço axial $N_{pm,Rd}$, conforme se demonstra a seguir, é igual à resistência plástica à compressão da seção total de concreto, logo dado por $A_c \cdot f_{cd}$ ou $0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd}$, para seções fechadas cheias de concreto (concreto efetivamente confinado) ou seções em I ou H total ou parcialmente envolvidas em concreto. Desta igualdade pode-se determinar a posição do eixo neutro plástico h_n , o momento plástico da seção mista $M_{pl,Rd}$, o momento $M_{máx,Rd}$ e consequentemente a localização dos pontos B, C e D, ficando completamente definida a curva de interação (poligonal) entre o esforço axial de compressão e o momento fletor.

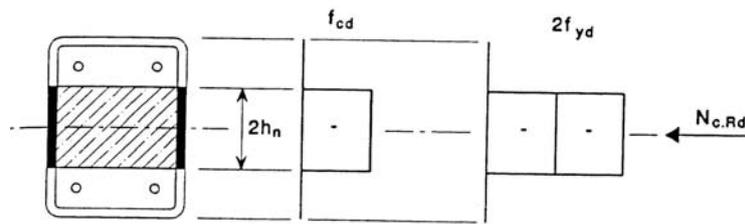


Figura 6 - Diagramas de tensões correspondentes ao esforço $N_{pm,Rd}$

- Método geral

Resistência de colunas mistas à compressão + flexão uniaxial

A verificação da resistência de colunas mistas à compressão + flexão uniaxial deve ser

efetuada com base na curva de interação através de:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d \cdot M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M$$

sendo M_{Ed} é o máximo momento ao longo do elemento tendo em conta as imperfeições e os efeitos de segunda ordem se necessário; $M_{pl,N,Rd} (= \mu_d \cdot M_{pl,Rd})$ é o momento plástico resistente tendo em conta o esforço axial; α_M é um coeficiente igual 0.9 para elementos em aço S235 a S355 e igual a 0.8 para elementos em aço S420 e S460;

O coeficiente $\mu_d = \mu_{dy}$ OU μ_{dz} é definido de acordo com a figura seguinte. Valores superiores a 1.0 só devem ser considerados se o momento fletor depender diretamente do esforço axial (cargas excêntricas).

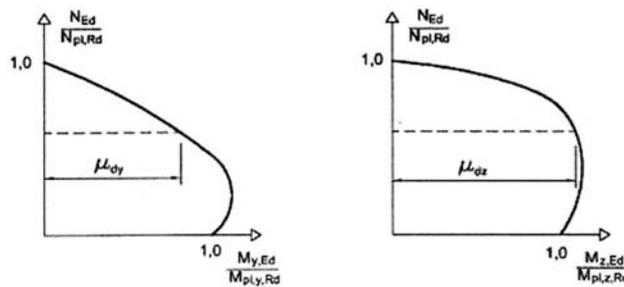


Figura 7 - Dimensionamento à compressão + flexão

-Resistência de colunas mistas à compressão + flexão biaxial

A verificação da resistência de colunas mistas à compressão + flexão biaxial deve ser efetuada através das seguintes condições:

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} \leq \alpha_{M,y} \quad \frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq \alpha_{M,z} \quad \frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq 1.0$$

em que $M_{pl,y,Rd}$ e $M_{pl,z,Rd}$ são os momentos plásticos resistentes segundo y e z respetivamente; $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ são os momentos de cálculo ao longo do elemento tendo em conta as imperfeições e os efeitos de segunda ordem; Os coeficientes μ_{dy} e μ_{dz} são calculados para cada eixo separadamente, de acordo com a figura anterior. As imperfeições podem ser consideradas apenas para o plano mais desfavorável; em caso de dúvida devem ser consideradas para os dois planos. Os coeficientes $\alpha_{M,y}$ e $\alpha_{M,z}$ são idênticos ao coeficiente α_M definido anteriormente.

Considerações Finais

As principais vantagens das colunas mistas são:

Aumento da resistência e da rigidez devido à diminuição da esbeltez;

Elevada resistência ao fogo;

Elevada resistência à corrosão.