

CONCEITOS BÁSICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS: ASPECTOS NORMATIVOS

Silvana De Nardin

Dra. em Engenharia de Estruturas– Pós-doutoranda: snardin@sc.usp.br

Ana Lucia H. de C. El Debs

Professora Doutora: analucia@sc.usp.br

Departamento de Engenharia de Estruturas

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a formulação básica para o dimensionamento e a verificação de pilares mistos preenchidos curtos. São descritos os principais conceitos contidos nas seguintes normas técnicas: AISC-LRFD, ACI 318, BS 5400, Eurocode 4 e NBR 14323. A formulação descrita neste trabalho é aplicável a pilares preenchidos submetidos à compressão simples e à flexo -compressão e permite conhecer, ainda que sucintamente, a abordagem adotada por normas técnicas de diversos países.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, técnico e científico fez surgir diversos sistemas estruturais e construtivos, entre os quais estão os sistemas formados por elementos mistos. Dentre os elementos estruturais que compõem tal sistema estão os pilares mistos aço-concreto, que são formados pela associação de um ou mais perfis estruturais de aço, revestidos ou preenchidos com concreto. A idéia de proteção dos pilares metálicos impulsionou o surgimento dos primeiros pilares mistos aço-concreto que, desde então, evoluíram e hoje apresentam variações no arranjo e composição destes materiais.

Os pilares cujos perfis são revestidos por concreto são denominados *mistos revestidos*. Este tipo de elemento misto surgiu devido à necessidade de proteger os perfis da ação nociva do fogo e da corrosão – Figura 1a.

Posteriormente, o concreto passou a ser utilizado como material de preenchimento dos perfis tubulares surgindo, desta forma, os *pilares mistos preenchidos*; elementos estruturais em que a seção de aço é formada por um ou mais perfis em aço estrutural, preenchida com concreto – Figura 1b.

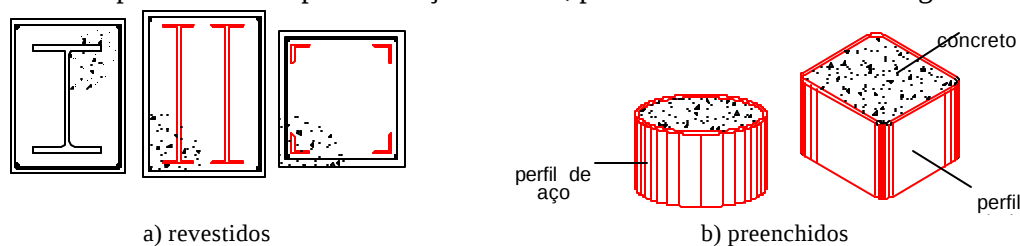


Figura 1: Exemplos de pilares mistos

A utilização de elementos mistos na composição de sistemas estruturais apresentou crescimento significativo nas últimas décadas. Tal crescimento, sobretudo quanto à utilização de pilares mistos preenchidos, justifica-se por vantagens econômicas, construtivas e estruturais inerentes a estes elementos. Neste sentido, podem ser destacadas vantagens como: redução das dimensões dos elementos estruturais, com conseqüente economia de materiais, mão-de-obra e maior área livre por pavimento; grande resistência, rigidez e ductilidade, especialmente com o advento dos aços e concretos de alta resistência. Em relação aos aspectos construtivos, se destacam a ausência de formas e a possibilidade de eliminar ou reduzir armaduras, propiciando economia de materiais e mão-de-obra, redução do desperdício daqueles e maior limpeza no canteiro de obra.

O recente surgimento dos concretos de alta resistência - CARs - permitiu ampliar a utilização dos pilares mistos preenchidos pois, além de uma melhoria no projeto arquitetônico, propiciada pela possibilidade de maiores vãos, a economia resultante do uso de maiores resistências para o concreto se reflete na redução da seção dos pilares e dos elementos de fundação.

Em função das características descritas há pouco, este trabalho adquire relevância pois apresenta, de forma breve e sucinta, a formulação e procedimentos utilizados para o dimensionamento de pilares preenchidos curtos, submetidos a solicitações de compressão simples ou de flexo-compressão. Além disso, é um meio de divulgação de um elemento estrutural cuja utilização e vantagens estão consagradas em diversos países. Desta forma, contribui para introduzir no Brasil, a idéia de empregar elementos mistos como solução estrutural.

2. UTILIZAÇÃO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS

As boas características atribuídas aos pilares preenchidos justificam o crescente interesse em ampliar o conhecimento atual e desenvolver pesquisas que visem aprimorar e agilizar a aplicação das normas e recomendações de projeto existentes. Além disso, justificam a utilização de sistemas estruturais formados pela associação de elementos mistos e elementos de concreto armado ou de aço. Como exemplo mais recente desta associação de tecnologias, cita-se o *Edifício Millennium Tower* localizado em Viena/Áustria – Figura 2.



Figura 2: Edifício Millennium Tower¹

Outro excelente exemplo da aplicação dos pilares mistos preenchidos é o *Shopping Center Iso Omena*, localizado na Finlândia e que envolve uma área para lojas, uma torre comercial e outra re-

¹ Fonte: http://www.aisc.org/Content/ContentGroups/Documents/Connections_IV_Proceedings/138.pdf (11-03-2003, 16:07h).

sidencial, localizadas acima do shopping center. A estrutura do shopping center é formada por lajes alveolares pré-moldadas, vigas de aço e pilares preenchidos; nestes pilares foram acrescentadas barras de armadura para aumentar a taxa de armadura longitudinal. Na Figura 3 são ilustrados alguns aspectos da estrutura deste shopping center em sua fase construtiva. Outros exemplos da utilização de pilares preenchidos em edifícios são dados na Tabela 1.



Figura 3: Detalhes do shopping center Iso Omena em sua fase construtiva²

Tabela 1: Exemplos da utilização de pilares preenchidos - sistemas estruturais de edifícios

 <i>Ed. Casselden Place:</i> Melbourne-Austrália, Pilares preenchidos com concreto C70 – seção circular ³ .	 <i>Ed. Forrest Centre,</i> localizado em Perth – Austrália ⁴ .	 <i>Ed. Two Union Square.</i> Washington-EUA. Pilares preenchidos com concreto de 130MPa ⁵ .	 <i>Ed. Commerzbank;</i> Frankfurt-Alemanha. Pilares preenchidos de seção triangular ⁶ .
---	---	---	--

Não dispomos de exemplos da utilização de pilares preenchidos no Brasil entretanto, provavelmente já tenham sido utilizados na composição de sistemas estruturais de alguns edifícios mas o acesso a tais informações é difícil e fica restrito à Cidade ou ao Estado em que tais elementos estruturais foram utilizados.

3. DIMENSIONAMENTO DE PILARES PREENCHIDOS: FORMULAÇÃO

Com a crescente utilização dos pilares preenchidos, surgiu a necessidade de tais elementos serem abordados pelas normas de dimensionamento. Assim sendo, a verificação e o dimensionamento dos pilares preenchidos foram incorporados às normas de projeto já existentes. Isto ocorreu com a norma americana ACI 318, que abordava somente elementos em concreto armado. O mesmo ocorreu com as normas AISC-LRFD e BS 5400 que, inicialmente enfocavam apenas elementos de aço.

A primeira "norma" criada com o objetivo de abordar exclusivamente elementos estruturais mistos

² Fonte: Prof. Mounir Khalil El Debs.

³ Council on tall buildings and urban habitat. Committee 3, p. 128, 1985.

⁴ Council on tall buildings and urban habitat. Committee 3, p. 357, 1985.

⁵ Commercial design (1998). <http://www.nbbj.com/SEAPRO~3.HTM> (06/06/1998).

⁶ The highest office building in Europe (1998). <http://www.hebel.com/commerzbank.htm> (06/06/1998).

foi o código europeu Eurocode 4. Posteriormente, foi elaborada a norma brasileira NBR 14323:2000 que aborda, em seu anexo B, o dimensionamento de pilares mistos em temperatura ambiente. Elementos mistos como pilares e lajes, não citados pela norma brasileira de estruturas metálicas NBR 8800:1986 (que aborda apenas vigas mistas) foram incluídos em anexos da norma NBR 14323:2000, também para a condição de temperatura ambiente. A abordagem adotada pela NBR 14323:2000 foi inspirada no Eurocode 4:1994, contudo, seria interessante incluir o dimensionamento de pilares e lajes mistas na NBR 8800:1986, que se refere a elementos metálicos e mistos (lajes e vigas) em temperatura ambiente. Isto vem sendo feito atualmente e, em breve, pilares e lajes mistas estarão presentes na nova versão da NBR 8800.

3.1 Nomenclatura

Ao iniciar o estudo sobre as recomendações normativas tornou-se necessário definir uma nomenclatura geral, elaborada a partir do estudo aprofundado destas normas. Esta nomenclatura básica é apresentada a seguir.

- A_c : área de concreto
- A_s : área do perfil tubular
- E_c : módulo de elasticidade secante do concreto
- E_{cm} : módulo de elasticidade secante do concreto para ações de curta duração
- E_m : módulo de elasticidade modificado pela presença do concreto
- E_s : módulo de elasticidade do perfil tubular
- I_c : momento de inércia do concreto
- I_s : momento de inércia do perfil tubular
- M_{Rd} : momento fletor resistente – valor de cálculo
- M_{Sd} : momento fletor solicitante – valor de cálculo
- $M_{p,Rd}$: momento plástico resistente – valor de cálculo
- N_{cd} : capacidade resistente da seção de concreto – valor de cálculo
- N_e : força crítica de Euler
- $N_{G,Sd}$: parcelas permanente e quase permanente de N_{Sd}
- N_{Rd} : força normal resistente do pilar sujeito a flexo-compressão - valor de cálculo
- N_{Sd} : força normal solicitante – valor de cálculo
- $N_{p,Rd}$: força normal resistente de cálculo à compressão simples – valor de classificação
- $N_{p,R}$: força normal resistente à compressão simples considerando $\gamma_c = \gamma_s = 1$
- R : relação entre o menor e o maior momento fletor agindo nas extremidades do pilar misto
- a : altura do bloco de concreto comprimido
- b : menor dimensão externa do perfil tubular
- f_{ck} : resistência característica do concreto a compressão uniaxial em corpos-de-prova cilíndricos 15cmx30cm, aos 28 dias
- f_{cd} : resistência de cálculo do concreto a compressão uniaxial, em corpos-de-prova cilíndricos 15cmx30cm, aos 28 dias
- f_{cr} : resistência crítica modificada pela presença do concreto
- f_{cu} : resistência característica de cubos de concreto com 100mm de lado, aos 28 dias: $f_{cu} = 1,25f_{ck}$
- f_{my} : resistência ao escoamento modificada pela presença do concreto
- f_y : resistência característica do perfil tubular ao escoamento
- f_{yd} : resistência de cálculo do perfil tubular ao escoamento
- h : maior dimensão externa do perfil tubular
- h_n : distância entre o centro geométrico da seção transversal preenchida e a linha neutra

- i : raio de giração
- r : raio de dobramento do perfil tubular
- t : espessura do perfil tubular
- ℓ_e : comprimento de flambagem do pilar
- ℓ_E : comprimento do pilar para o qual a força resistente é igual à força crítica de Euler
- α_c : fator de contribuição do concreto
- β : relação entre o maior e o menor momento fletor agindo nas extremidades do pilar misto: $\beta=1/R$
- δ : relação entre a resistência de cálculo da seção de aço e a resistência de cálculo da seção mista, para o estado limite de plastificação
- γ_c : densidade do concreto ou coeficiente de ponderação do concreto
- γ_s : coeficiente de ponderação do aço do perfil tubular
- λ : índice de esbeltez
- λ_c : índice de esbeltez modificado pela presença do concreto
- $\bar{\lambda}$: parâmetro de esbeltez reduzida
- λ_{cr} : índice de esbeltez de Euler
- ρ : relação entre os valores de resistência à compressão do concreto e de ao resistência escoamento do aço

3.2 Filosofia de projeto, termos e especificações

Devido à inclusão dos pilares preenchidos em normas técnicas já existentes, estas abordam os pilares preenchidos sob filosofias de projeto muito distintas entre si. A norma ACI 318-R95 aborda o dimensionamento dos pilares mistos partindo da substituição do perfil tubular por barras de aço com área transversal equivalente, distribuídas em volta do núcleo de concreto.

A formulação apresentada pelo AISC-LRFD:1999 parte dos procedimentos empregados para o cálculo de pilares de aço, porém parâmetros como esbeltez e módulo de elasticidade são modificados para considerar a presença do concreto.

O Eurocode 4 foi redigido a fim de abordar estruturas mistas formadas por aço e concreto e, por isso, é a norma que apresenta a abordagem mais detalhada e completa para o dimensionamento e verificação de pilares preenchidos.

Quanto à resistência do concreto, para cada uma das normas consultadas, são apresentados diferentes valores limites. Na Tabela 2 são dados os limites normativos para a resistência dos materiais.

Tabela 2: Limites para resistência dos materiais

Norma	Concreto (MPa)	Aço (MPa)
AISC-LRFD:1999	$20,7 \leq f_{ck} \leq 55,1$	$248 \leq f_y \leq 379$
Eurocode 4:1994	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	$235 \leq f_y \leq 355$
NBR 14323:2000	$20 \leq f_{ck} \leq 40^7$	$250 \leq f_y \leq 350$
BS 5400:1979	$f_{ck} \geq 16$	$275 \leq f_y \leq 355$
ACI-318R:1995	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	-

⁷Limites sugeridos em QUEIROZ & PIMENTA & MATA (2001)

Na Tabela 3 são apresentadas as principais especificações para dimensionamento e verificação de pilares preenchidos, visando destacar as diferenças mais importantes.

Tabela 3: Algumas prescrições normativas importantes

Item	Norma	Prescrição
Limites de esbeltez	BS 5400:1979	$\frac{\ell_e}{b} \leq 65$: seções retangulares
	Eurocode 4:1994; NBR 14323:2000	$\bar{\lambda} \leq 2,0$
Módulo de elasticidade longitudinal do concreto e do aço	BS 5400:1979	$E_c = 450f_{cu} = 562,5f_{ck}$
	Eurocode 4:1994	$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_c = 1,35}$
	NBR 14323:2000	$E_c = 42\gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{ck}} \quad (\gamma_c: \text{kN/m}^3; f_{ck}: \text{MPa})^8$
	AISC-LRFD:1999	$E_m = E_s + 0,4E_c \frac{A_c}{A_s}$ $E_c = 0,040957\gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{ck}} \quad (\gamma_c: \text{kg/m}^3; f_{ck}: \text{MPa})^1$
Instabilidade local	BS 5400:1979; ACI 318-R95; AISC-LRFD:1999	$t \geq b \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot E_s}}$
	Eurocode 4:1994	$t \geq \frac{b}{52\varepsilon}; \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \rightarrow f_y \text{ em MPa}$
	NBR 14323:2000	$\frac{h}{t} \leq 1,76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$
Coeficientes de ponderação	BS 5400:1979	$\gamma_s=1,10; \quad \gamma_c=1,50$
	Eurocode 4:1994	
	NBR 14323:2000	$\gamma_s=1,10; \quad \gamma_c=1,4$
	AISC-LRFD:1999	
Índices de Esbeltez	AISC-LRFD:1999	$\lambda_c = \frac{\ell_e}{r_s \pi} \left(\frac{f_{my}}{E_m} \right)^{0,5}; \quad f_{my} = f_y + 0,85 \cdot f_{ck} \cdot \frac{A_c}{A_s}$
	Eurocode 4:1994	$\lambda = \frac{\ell_e}{\pi} \left(\frac{A_s f_y + A_c f_{ck}}{E_s I_s + 0,8 \frac{E_c I_c}{1,35}} \right)^{0,5}$
	BS 5400:1979	$\lambda = \frac{\ell_e}{\pi} \left(\frac{A_s f_y + A_c f_{ck}}{E_s I_s + E_c I_c} \right)^{0,5}$

3.1 Compressão simples

As equações recomendadas por algumas normas de dimensionamento para o cálculo da capacidade resistente à compressão simples são apresentadas na Tabela 4.

⁸ Destas duas expressões resultam valores idênticos.

Tabela 4: Capacidade resistente à compressão simples - pilares mistos preenchidos

Norma	Capacidade Resistente à Compressão Simples
ACI 318R-95:1995	$N_{p\ell,Rd} = 0,85 \cdot (0,85 \cdot f_{ck} \cdot A_c + f_y \cdot A_s)$
AISC-LRFD:1994	$N_{p\ell,Rd} = 0,85 \cdot A_s \cdot f_{cr}$ $\text{se } \lambda_c \leq 1,5, f_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2}\right) \cdot f_{my} \text{ e se } \lambda_c > 1,5, f_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} \cdot f_{my}$
BS 5400:1979	$N_{p\ell,Rd} = 0,91 \cdot A_s \cdot f_y + 0,45 \cdot A_c \cdot f_{cu} = 0,91 \cdot A_s \cdot f_y + 0,562 \cdot A_c \cdot f_{ck}$
Eurocode 4:1994	$N_{p\ell,Rd} = \frac{A_s \cdot f_y}{\gamma_s} + 1,0 \cdot \frac{A_c \cdot f_{ck}}{\gamma_c}; \quad N_e = \pi^2 \cdot \frac{(EI)_e}{\ell_e^2}$ $(EI)_e = E_s \cdot I_s + 0,8 \cdot E_{cd} \cdot I_c; \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{p\ell,R}}{N_e}}$
$N_{p\ell,R}$: calculado considerando $\gamma_c = \gamma_s = 1$.	

A partir da formulação apresentada na Tabela 4 é possível dimensionar e verificar a capacidade resistente de pilares preenchidos curtos, submetidos à compressão simples. Maiores detalhes sobre esta formulação podem ser encontrados nas referidas normas técnicas e em DE NARDIN (1999), onde são apresentados e comparados, valores de capacidade resistente teóricos e experimentais. Para as seções quadradas e retangulares avaliadas por DE NARDIN (1999) houve excelente correlação entre valores teóricos e experimentais. A seguir, é apresentada a formulação para a situação de flexo-compressão.

3.2 Flexo-compressão

Uma das formas de conhecer o comportamento de uma seção transversal qualquer, flexo-comprimida, é a construção dos diagramas de interação *Momento fletor x Força normal*. Tais diagramas relacionam valores resistentes de momento fletor e esforço normal que representam a capacidade resistente da seção mista flexo-comprimida. Se aos diagramas de interação for adicionada a habitualmente denominada "reta de carregamento", é possível encontrar a capacidade resistente (par M, N) da seção transversal em questão, para valores conhecidos de força axial excêntrica aplicada - F.

Os diagramas de interação são construídos a partir de equações de equilíbrio e da variação da posição da linha neutra y. Neste caso, os diagramas têm forma parabólica, oriunda da relação quadrática entre M e N. As equações de equilíbrio são construídas levando em conta a compatibilidade de deformações e dependem inteiramente das relações constitutivas adotadas para cada um dos materiais presentes na seção transversal.

A formulação apresentada pelas normas técnicas aqui discutidas parte dos diagramas de interação M-N. A seguir, são apresentadas as distribuições de tensões adotadas por cada uma dessas nor-

mas, necessárias para a construção das equações de equilíbrio.

Na Figura 4, os diagramas de tensões adotados pelo ACI 318 são apresentados, merecendo destaque, a mudança que ocorreu na distribuição de tensões no aço entre as edições do ACI 318 e ACI 318 R-95. A versão de 1995 permite plastificação total do perfil tubular.

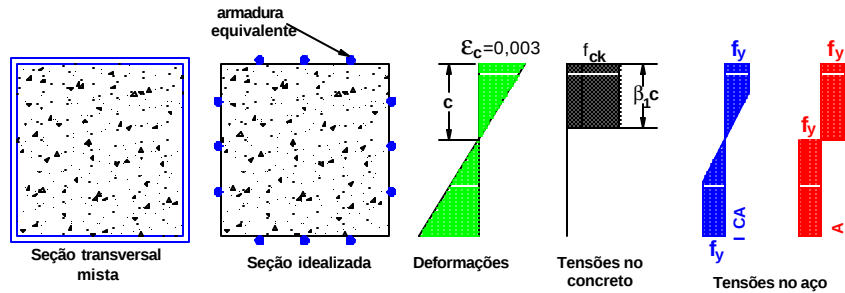


Figura 4: Equivalência proposta pelo ACI 318R-95

Quanto à altura do diagrama de tensões, o ACI 318R-95 apresenta uma particularidade: é utilizado um coeficiente para fazer com que tal altura varie em função da resistência do concreto. A altura do diagrama de concreto comprimido a , é reduzida pelo coeficiente β_1 a fim de utilizar um diagrama de tensões retangular equivalente. O coeficiente β_1 é função da resistência à compressão uniaxial do concreto e assume os seguintes valores:

- $\beta_1 = 0,85$ para $f_{ck} \leq 28$ MPa
- para $28 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 56$ MPa, a cada 7 MPa de acréscimo (além dos 28 MPa) β_1 sofre uma redução de 0,05;
- para $f_{ck} > 56$ MPa $\Rightarrow \beta_1 = 0,65$.

A distribuição de tensões admitida pela BS 5400:1979 é apresentada na Figura 5 e, em seu equacionamento, já estão incluídos o coeficiente redutor da resistência do concreto (γ_c), tomado igual a 1,5 e o efeito da fluência. A altura do bloco de concreto comprimido é dada por:

$$a = \frac{A_s - 2bt}{(b - 2t)p + 4t} \quad \text{e} \quad \rho = \frac{0,4f_{cu}}{0,91f_y} = \frac{0,5f_{ck}}{0,91f_y} \quad (1)$$

O parâmetro α_c , que representa a contribuição do concreto na resistência da seção mista é dado por:

$$\alpha_c = \frac{0,45 \cdot A_c \cdot f_{cu}}{N_{p\ell, Rd}} = \frac{0,562 \cdot A_c \cdot f_{ck}}{N_{p\ell, Rd}} \quad (2)$$

Para a BS 5400, são consideradas seções preenchidas, aquelas cujo fator de contribuição do concreto pertença ao intervalo:

$$0,10 < \alpha_c < 0,80$$

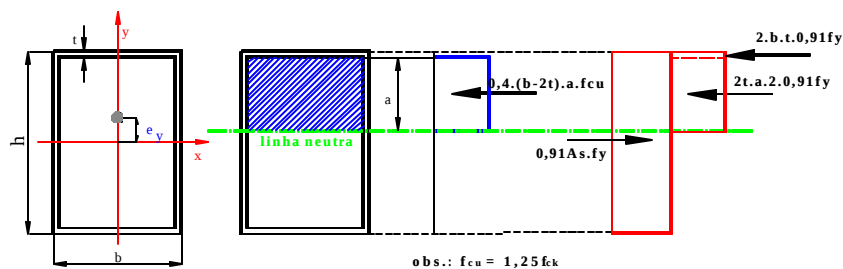
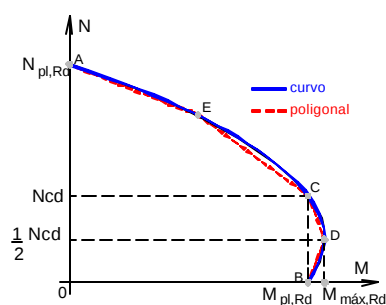


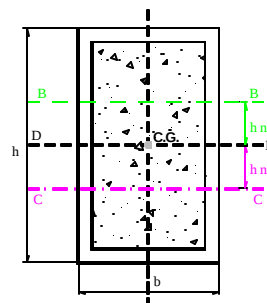
Figura 5: Seção preenchida flexo-comprimida - BS 5400:1979

Apesar de todas as normas em questão adotarem diagrama retangular de tensões para o concreto, a largura de tal diagrama varia muito de uma para outra. As recomendações do ACI 318R-95, AISC-LRFD e Eurocode 4 remetem para um diagrama de tensões com largura f_{ck} . Em contrapartida, a norma BS 5400 sugere $0,56f_{ck}$.

O dimensionamento e verificação de seções preenchidas via Eurocode 4 têm por base as curvas europeias de resistência. Pelo método simplificado, aplicável a seções duplamente simétricas e sem variações de seção ao longo da altura do pilar preenchido, a curva parabólica que exprime a atuação simultânea de M e N é reduzida a uma poligonal representada por cinco pontos, que ilustram as diversas solicitações normais a que o pilar preenchido pode estar sujeito - Figura 6.



a) diagramas de interação M-N



b) seção mista duplamente simétrica

Figura 6: Diagrama M-N Eurocode 4:1994 - seções mistas flexo-comprimidas

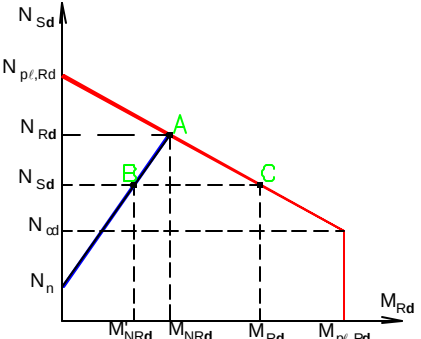
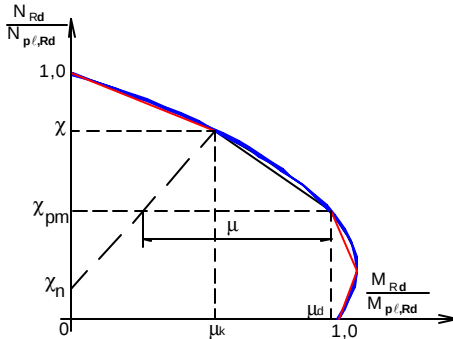
Os pontos do diagrama M-N representam:

- **ponto A:** situação de compressão simples ($M=0$; $N_{p,Rd}$)
- **ponto B:** flexão pura com ruptura ocorrendo quando a deformação última do concreto à compressão é atingida ($M_{p,Rd}$; $N=0$)
- **ponto C:** seção submetida à flexo-compressão ($M_{p,Rd}$; N_{cd})
- **ponto D:** seção submetida à flexo-compressão ($M_{máx,Rd}$;)
- **ponto E:** seção submetida à flexo-compressão. Para o cálculo do par (M,N) , a linha neutra é suposta situada num ponto intermediário entre h_n e a borda da seção, tendo-se
$$h_e = \frac{h_n}{2} + \frac{h}{4} \quad \text{e} \quad N_{Rd,E} = b \cdot (h_E - h_n) \cdot f_{cd} + 2t \cdot (h_E - h_n) \cdot (2f_{yd} - f_{cd}) + N_{cd}.$$

As expressões para o cálculo de $N_{p,Rd}$, $M_{p,Rd}$, $M_{máx,Rd}$ e N_{cd} são dados na Tabela 5.

Em função da semelhança existente entre a formulação adotada pela NBR 14323 e pelo Eurocode 4, ambas são listadas na Tabela 5.

Tabela 5: Formulação adotada pela NBR 14323:2000 e pelo Eurocode 4:1994

NBR 14323:2000	Eurocode 4:1994
 $\mu_k \cdot \left(\frac{N_{Sd} - N_n}{N_{Rd} - N_n} \right) + \frac{C_m \cdot M_{Sd}}{\left(1 - \frac{N_{Sd} - N_n}{N_e} \right) \cdot 0,9 M_{p\ell,Rd}} \leq \mu_d$ $C_m = 0,6 - 0,4R \geq 0,4; R = \frac{M_1}{M_2}$ $\mu_k = \frac{N_{p\ell,Rd} - N_{Rd}}{N_{p\ell,Rd} - N_{cd}} \leq 1,0$ $\mu_d = \frac{N_{p\ell,Rd} - N_{Sd}}{N_{p\ell,Rd} - N_{cd}} \leq 1,0$ $N_n = N_{Rd} \cdot \frac{(1-R)}{4} \leq N_{Sd}; N_{cd} = 0,7f_{ck} \cdot A_c$ $M_{p\ell,Rd} = f_{yd} \cdot (Z_{pa} - Z_{pan}) + 0,5f_{cd} \cdot (Z_{pc} - Z_{pcn})$ $Z_{pc} = \frac{(b-2t)(h-2t)^2}{4} - \frac{2}{3}r^3 - r^2(4-\pi)(0,5h-t-r)$ $Z_{pa} = \frac{bh^2}{4} \left[1 - \left(\frac{b-2t}{b} \right) \left(\frac{h-2t}{h} \right)^2 \right]$ $Z_{pcn} = (b-2t)h_n^2; Z_{pan} = bh_n^2 - Z_{pcn}$ $h_n = \frac{A_c \cdot f_{cd}}{2b \cdot 0,7f_{ck} + 2t(2 \cdot 0,9f_y - 0,7f_{ck})}$ $N_{p\ell,Rd} = 0,7f_{ck} \cdot A_c + 0,9f_y \cdot A_s$ $N_{Rd} = \rho \cdot N_{p\ell,Rd} *; N_e = \pi^2 \frac{EI_e}{\ell_e^2}$	 $M_{Sd} \leq M_{Rd} = 0,9\mu \cdot M_{p\ell,Rd}$ $\chi_{pm} = \frac{N_c}{N_{p\ell,Rd}}; \chi_n = \chi \cdot \frac{(1-\beta)}{4} \leq \chi_d$ $N_{p\ell,Rd} = A_s \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} + A_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$ $\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$ $\alpha = 0,21 \text{ para curva "a" de flambagem}$ $1. \text{ para } \chi_d \geq \chi_{pm}: \mu = \frac{\chi - \chi_d}{\chi(1 - \chi_{pm})}$ $2. \text{ para } \chi_d < \chi_{pm}: \mu = \left[1 - \frac{(1 - \chi) \cdot \chi_d}{(1 - \chi_{pm}) \cdot \chi} \right]$ $M_{p\ell,Rd} = M_{\text{máx},Rd} - M_{n,Rd}$ $M_{n,Rd} = Z_{pan} \cdot f_{yd} + 0,5 \cdot Z_{pcn} \cdot f_{cd}$ $M_{\text{máx},Rd} = Z_{pa} \cdot f_{yd} + 0,5 \cdot Z_{pc} \cdot f_{cd}$ $Z_{pc} = \frac{(b-2t) \cdot (h-2t)^2}{4} - \frac{2}{3} \cdot r^3 - r^2 \cdot (4-\pi) \cdot \left(\frac{h}{2} - t - r \right)$ $Z_{pa} = \frac{b \cdot h^2}{4} - \frac{2}{3} \cdot (r+t)^3 - (r+t)^2 \cdot (4-\pi) \cdot \left(\frac{h}{2} - t - r \right) - Z_{pc}$ $h_n = \frac{N_{cd}}{2b \cdot f_{cd} + 4t \cdot (2f_{yd} - f_{cd})}; N_{cd} = A_c \cdot f_{cd}$ $Z_{pcn} = (b-2t) \cdot h_n^2; Z_{pan} = b \cdot h_n^2 - Z_{pcn}$

* o valor de ρ é tabelado na NBR 8800:1986 em função da curva de flambagem. Para perfis tubulares deve ser usada a curva "a"

Z_{pa}: módulo resistente plástico da seção de aço; Z_{pc}: módulo resistente plástico da seção de concreto não fissurado; Z_{pan}, Z_{pcn}: módulos plásticos de resistência.

O sinal de R varia em função do tipo de curvatura de flexão: para curvatura reversa, R é positivo e para curvatura simples, R é negativo.

Para a norma britânica BS 5400, a equação de interação M-N é dada por:

$$N_{Rd} = N_{p\ell,Rd} \cdot \left[k_1 - (k_1 - k_2 - 4k_3) \cdot \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} - 4k_3 \cdot \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

sendo:

$$M_{Rd} = 0,91f_y \left[A_s \cdot \frac{(h-a)}{2} + b t \cdot (t+a) \right] \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{(1+\eta)}{\lambda^2} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[1 + \frac{(1+\eta)}{\lambda^2} \right]^2 - \frac{1}{\lambda^2}}; \quad \eta = 0,002 \cdot \lambda_{cr} \cdot (\lambda - 0,2) \leq 0; \quad \lambda_{cr} = \pi \cdot \sqrt{\frac{11 \cdot E_s}{f_y}}$$

- k_1 : coeficiente que introduz o efeito da instabilidade global
- η : coeficiente que leva em conta as imperfeições iniciais do perfil tubular: $0 \leq \frac{k_2}{k_{20}} \leq 1$ e $k_{20} \leq 0,75$. Tal relação assume valores positivos quando ocorre curvatura simples de flexão. Se a relação k_2/k_{20} for negativa, deve ser tomada igual a zero.

$$\frac{k_2}{k_{20}} = \left[\frac{90 - 25 \cdot (2\beta - 1) \cdot (1,8 - \alpha_c) - c_4 \cdot \lambda}{30 \cdot (2,5 - \beta)} \right]; \quad k_{20} = 0,9 \cdot \alpha_c^2 + 0,2; \quad k_3 = 0,0$$

$C_4=100$ para curva "a" de flambagem

A norma americana AISC-LRFD apresenta duas curvas de interação, que são função da relação

$$\frac{N_{Sd}}{0,85N_{p\ell,Rd}} :$$

$$\frac{N_{Sd}}{0,85N_{p\ell,Rd}} \geq 0,2; \quad \frac{N_{Sd}}{0,85N_{p\ell,Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd}}{0,9M_{p\ell,Rd}} \right) \leq 1 \quad (5)$$

$$\frac{N_{Sd}}{0,85N_{p\ell,Rd}} < 0,2; \quad \frac{N_{Sd}}{2 \cdot 0,85N_{p\ell,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{0,9M_{p\ell,Rd}} \leq 1 \quad (6)$$

sendo:

$$M_{p\ell,Rd} = Z_{pa} \cdot f_{my} \quad (7)$$

e Z_{pa} definido na Tabela 5 e f_{my} na Tabela 3.

Na comparação entre valores de capacidade resistente previstos pelas normas aqui representados e oriundos de investigações experimentais verifica-se que a aplicação das recomendações normativas resulta em valores a favor da segurança – DE NARDIN (2003).

4. CONCLUSÕES

As normas técnicas aqui apresentadas e discutidas permitem dimensionar e verificar seções mistas preenchidas submetidas a solicitações de compressão simples e de flexo-compressão.

Os procedimentos de cálculo adotados pelas normas são similares entre si, diferindo principalmente, na forma como considerar a seção preenchida. Estas diferenças são fruto das diferentes filosofias de projeto, geradas pela incorporação dos pilares preenchidos a normas técnicas já existentes, sejam elas destinadas a elementos de aço ou de concreto armado.

A utilização destas normas é relativamente simples, sendo mais trabalhosa a aplicação do Eurocode 4:1994 e da norma brasileira NBR 14.323:2000.

Embora neste artigo não têm sido apresentadas comparações práticas entre valores de capacidade resistente previstos e resultados experimentais, tanto de pilares preenchidos submetidos à compressão simples quanto à flexo-compressão, a correlação entre ambos é satisfatória.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro para realização deste trabalho, concedido na forma de Bolsa de Doutorado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995). *ACI 318R-95 - Building code requirements for reinforced concrete*. Detroit.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (1994). *AISC-LRFD: Metric Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). *NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2000). *NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio*. Rio de Janeiro.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION (1979). *BS 5400, part 5: steel, concrete and composite bridges: code of practice for design of composite bridges*. London.
- DE NARDIN, S. (1999). *Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência*. São Carlos. 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DE NARDIN, S. (2003). *Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar*. São Carlos. 322p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION (1994). *ENV 1994-1-1: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings*. Brussels.
- QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATA, L. A. C. (2001). *Elementos das estruturas mistas aço-concreto*. Ed. O Lutador, 336p.