



MAYCON OLIVEIRA CASTRO

**COMPARAÇÃO DE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS
PARA O PROJETO DE PILARES MISTOS DE AÇO E
CONCRETO**

**LAVRAS-MG
2021**

MAYCON OLIVEIRA CASTRO

**COMPARAÇÃO DE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS PARA O PROJETO DE
PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. D.Sc. Ígor José Mendes Lemes
Orientador
Eng. D.Sc. Rafael Cesário Barros
Coorientador

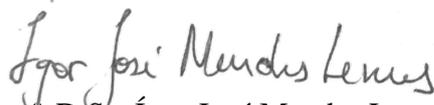
**LAVRAS-MG
2021**

MAYCON OLIVEIRA CASTRO

**COMPARAÇÃO DE PROCEDIMENTOS NORMATIVOS PARA O PROJETO DE
PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO
COMPARISON OF STANDARD CODES APPROACHES FOR DESIGN OF STEEL-
CONCRETE COMPOSITE COLUMNS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 23 de novembro de 2021.
D.Sc. Ígor José Mendes Lemes UFLA
D.Sc. Rafael Cesário Barros CONCREMAT
D.Sc. Maykmiller Carvalho Rodrigues UFLA



Prof. D.Sc. Ígor José Mendes Lemes
Orientador



Eng. D.Sc. Rafael Cesário Barros
Coorientador

**LAVRAS-MG
2021**

*Dedico esse trabalho aos meus pais
por me ensinarem o valor da educação.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e sempre estar comigo me dando forças para continuar.

Aos meus pais, Olívio Aurimar de Castro e Gracieth Aguiar Oliveira de Castro, por me apoiarem incondicionalmente e sempre terem acreditado em mim. Vocês são os pilares da minha vida.

Aos meus irmãos, Marlon Oliveira Castro, Iago Oliveira Castro e Ian Oliveira Castro, pela ajuda e paciência.

Ao professor Ígor J. M. Lemes, pela orientação, por ser um excelente profissional, por sempre ser solícito e pela dedicação no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Engenheiro Rafael Cesário Barros, pela coorientação, pela disponibilidade e colaboração na elaboração desse trabalho.

A minha prima, Bianca Oliveira, pela amizade e apoio ao longo do processo.

Aos meus amigos de infância, Felipe Orlando e Renan Vitor, pela companhia e companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos, Breno Alves, Gabriel Teles, Giovanna Jurioli, Isadora Possancini, Pedro Henrique e Wilgnner Lopes, por estarem comigo desde o início da graduação, por terem me ajudado nos momentos de dificuldade. Vocês foram as pessoas responsáveis por compartilhar comigo os meus momentos de maior felicidade nesse caminho.

A todos os meus amigos e pessoas que passaram pela minha vida e de alguma forma contribuíram para realização deste sonho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, pela dedicação e pelos ensinamentos compartilhados.

À UFLA, por ser uma excelente faculdade.

RESUMO

As estruturas mistas de aço e concreto são aquelas formadas por elementos de aço como: perfil, fôrma-laje ou chapas, ligadas ao concreto armado ou protendido, no qual o perfil de aço e as partes de concreto trabalham solidariamente. A utilização do sistema misto apresenta grandes vantagens estruturais, uma vez que o aço contribui com elevada resistência e leveza e o concreto com a alta rigidez. Devido a esses notórios benefícios houve um aumento da demanda por esses tipos de estruturas e conseqüentemente os campos de pesquisas para soluções mais econômicas e seguras estão crescendo cada vez mais. Atualmente existem algumas normas que regulamentam o dimensionamento de elementos mistos, como a ABNT NBR 8800:2008, a ANSI/AISC 360-16 e o EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004). Nota-se que para o dimensionamento de pilares mistos, segundo a norma brasileira, as curvas de interação para os esforços combinados são calculadas de modo simplificado. Isso se deve ao fato que para o cálculo da força axial resistente, o coeficiente de redução é determinado através de uma curva única de resistência baseado em ensaios de pilares metálicos, como resultado tem-se um dimensionamento mais conservador e menos econômico. Deste modo, esse trabalho busca discutir uma estratégia de solução utilizando um método de dimensionamento analítico para pilares mistos, baseando-se na aplicação dos domínios de deformação do concreto para a construção da curva de interação, assim como um estudo comparativo entre a estratégia aqui adotada e os procedimentos normativos supracitados. Para tal, utilizou-se um exemplo de um pilar misto com a seção transversal completamente revestida por concreto, onde a curva de interação obtida por meio da estratégia adotada foi confrontada com aquelas propostas pela NBR 8800:2008, a AISC 360 (2016) e o EUROCODE 4 (2004). Os resultados se mostraram bastante satisfatórios, já que a curva de interação determinada neste trabalho apresentou dados próximos da metodologia europeia e uma solução menos conservadora em relação às normas americana e brasileira, decorrente principalmente a um acréscimo da capacidade resistente da seção em função dos efeitos de compressão.

Palavras-chave: Pilares Mistos de Aço e Concreto. Métodos Normativos. Curvas de Interação de Esforços Normal-Momento Fletor.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações gerais.....	1
1.2	Motivação.....	2
1.3	Objetivos	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1	Considerações iniciais	3
2.2	Estado da arte	3
2.3	Processos de cálculo	4
2.3.1	Conforme a ABNT NBR 8800:2008	4
2.3.2	Conforme a ANSI/AISC 360-16	11
2.3.3	Conforme o EN 1994-1-1:2004	14
2.3.4	Aplicação dos domínios de deformação do concreto para as curvas de interação	21
2.4	Aplicabilidade prática do presente trabalho.....	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	Considerações iniciais.....	23
3.2	Consulta aos procedimentos normativos	23
3.3	Geração de Dados	25
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	26
4.1	Considerações iniciais.....	26
4.2	Exemplo de Calibração.....	26
4.3	Discussão	35
5	CONCLUSÃO	37
6	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

As estruturas mistas de aço e concreto são aquelas formadas por elementos de aço como: perfil, fôrma-laje ou chapas, ligadas ao concreto armado ou protendido, no qual o perfil de aço e as partes de concreto trabalham solidariamente. A principal finalidade do sistema misto é utilizar as principais propriedades dos materiais, de forma que as qualidades do aço supram as deficiências do concreto e vice-versa. Assim, esse tipo de estrutura se torna extremamente vantajoso uma vez que o aço contribui com sua alta resistência mecânica e leveza, enquanto o concreto contribui com a sua alta rigidez, resistência ao incêndio e protege o aço da corrosão.

Apesar dessas vantagens, nas construções mistas o concreto inicialmente era utilizado apenas como material de revestimento para os perfis de aço, tendo como função proteger contra o fogo e a corrosão. Ainda que o concreto tivesse uma participação significativa na resistência da estrutura, sua contribuição era negligenciada. Com a evolução da engenharia e a necessidade de construir edifícios cada vez mais altos, tornou-se necessário a busca por soluções construtivas que fossem seguras e economicamente viáveis. Nesse contexto, o resultado foi um aumento da demanda por estruturas mistas, uma vez que o aço contribuía com o alívio de cargas da estrutura, menor prazo de execução e obras mais limpas, e o concreto contribuía para estabilidade da edificação além de ser um material economicamente vantajoso.

Nesse cenário, os campos de pesquisas nessa área cresceram muito e permanecem ascendentes atualmente. Destaca-se, dentre os elementos estruturais que compõem uma estrutura mista, o pilar misto, o qual é o objeto de estudo deste trabalho. A norma brasileira responsável por regulamentar o dimensionamento de pilares mistos é a ABNT NBR 8800:2008 que, apesar de suas metodologias de cálculo serem baseadas na norma americana (ANSI/AISC 360-16) e europeia (EN 1994-1-1:2004) os resultados de capacidade resistentes são diferentes. Portanto, há a necessidade de estudos comparativos entre as normas e a busca por dimensionamentos alternativos que podem resultar em soluções menos conservadoras e mais econômicas.

1.2 Motivação

A norma brasileira responsável por regulamentar o dimensionamento dos pilares mistos de aço e concreto é a ABNT NBR 8800:2008. Quando o pilar misto está submetido a esforços compostos de flexão e compressão a verificação da segurança do elemento é dada por uma curva de interação entre os esforços. Para a construção dessa curva é necessário o cálculo do momento fletor e da força axial resistentes da seção mista sendo que a presença de concreto na seção transversal aumenta a complexidade da avaliação. Em virtude disso, a ABNT NBR 8800:2008 permite a consideração de um modelo simplificado que proporciona resultados conservadores e conseqüentemente menos econômicos.

1.3 Objetivos

O presente trabalho visa propor uma solução analítico-numérica para o dimensionamento de pilares mistos utilizando uma curva de interação, cuja a construção baseia-se no conceito de domínios de deformação do concreto, já que as principais normas vigentes geralmente apresentam métodos simplificados e garantem resultados, na maioria das vezes, conservadores. Para isso será utilizado um programa computacional capaz de gerar tais curvas de interação de esforços. Um exemplo de seção mista de aço e concreto será avaliado, no qual o resultado será comparado com as curvas de interação que são obtidas seguindo os procedimentos de cálculo das principais normas técnicas: ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16 e EN 1994-1-1:2004.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações iniciais

Essa seção tem como objetivo descrever detalhadamente os processos de dimensionamentos de pilares mistos de aço e concreto. Para isso, são descritas as abordagens das normas ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16, EN 1994-1-1:2004 e um procedimento no qual é utilizada uma aplicação dos domínios de deformação do concreto para a obtenção das curvas de interação. Os procedimentos normativos foram divididos em subseções e respeitou-se as nomenclaturas utilizadas nas normas.

2.2 Estado da arte

Existem diversas metodologias de cálculo para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto em temperatura ambiente. A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 apresenta dois modelos de cálculos simplificados, método I e método II, os quais se baseiam na norma americana ANSI/AISC 360-16 e europeia EN 1994-1-1:2004, respectivamente. Nesse contexto, diversas pesquisas foram realizadas partindo da comparação entre métodos nacionais e internacionais na busca por qual modelo é mais eficiente e realista.

Silva (2012) fez um estudo comparativo entre as normas brasileiras com as principais normas internacionais de dimensionamento de pilares mistos à temperatura ambiente. O autor iniciou-se seu trabalho fazendo considerações a respeito da EN 1994-1-1:2004 e do ANSI/AISC 360-10. Posteriormente, apresentou os métodos de dimensionamento da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, correlacionando alguns aspectos com as normas de referência, comparando-a e discutindo suas diferenças. Para viabilizar o estudo, o autor utilizou um código computacional, que envolve todos os critérios e processos de dimensionamento de pilares mistos das normas já citadas, incluindo a ANSI/AISC 360-05. Por fim, para validação dos métodos adotados, foram apresentados resultados de estudo experimentais comparando-os aos do cálculo teórico.

Campos (2006) argumentou que com o avanço dos métodos computacionais e da construção de edifícios cada vez mais altos, a deformação lenta, o confinamento, a retração e aderência podem ser limitantes no cálculo dos pilares mistos. Nesse sentido, motivado pelas limitações normativas, o autor procurou discutir as diferentes formulações presentes na ABNT NBR 14323:1999, EN 1994-1-1:2004 e AISI/AISC 360-05. No final, alguns exemplos numéricos foram apresentados e discutidos para uma seção mista totalmente revestida.

Cavalcante (2018) realizou uma análise crítica das características de dimensionamento dos pilares mistos totalmente revestidos por concreto, propostos pelas normas brasileira ABNT NBR 8800:2008, europeia EN 1994-1-1:2004 e americana ANSI/AISC 360-16. A partir dessa análise foi feita uma comparação entre a norma brasileira e as demais normas internacionais citadas, por fim foi elaborado um roteiro simplificado para cada método utilizado, a fim de construir um passo-a-passo do processo de cálculo do dimensionamento.

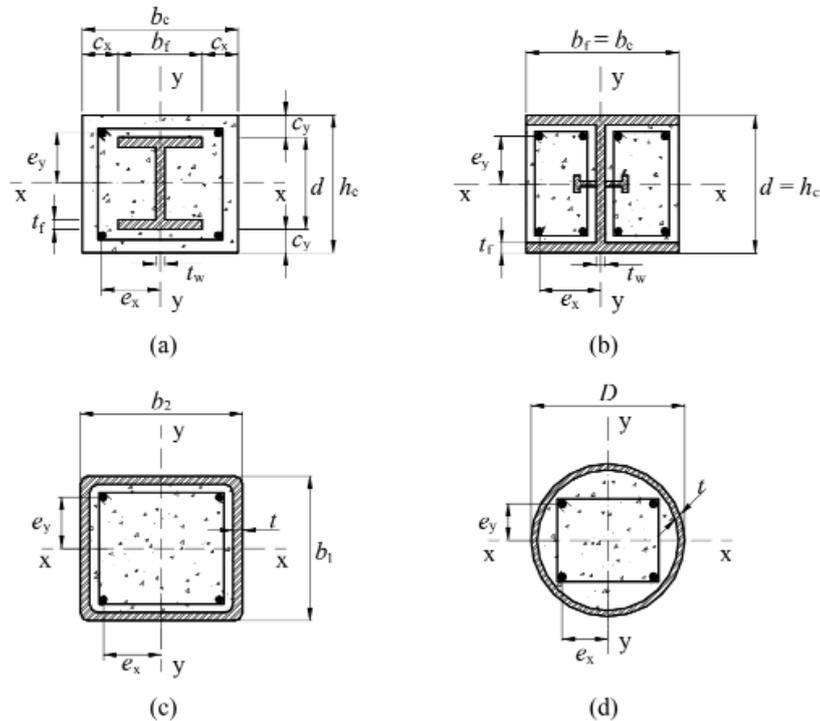
Uma aplicação computacional capaz de gerar curvas de esforços para seções transversais retangulares e circulares de concreto armado foi apresentado por Lima (2020). Para tal, o autor utilizou o método baseado na teoria de Euler-Bernoulli para avaliação das seções transversais compactas. Para demonstrar a eficácia e precisão do código o autor confrontou os resultados obtidos com os disponíveis na literatura.

2.3 Processos de cálculo

2.3.1 Conforme a ABNT NBR 8800:2008

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 – Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios é responsável por regulamentar o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto em temperatura ambiente no Brasil. A parte referente aos pilares mistos encontra-se no Anexo P, onde duas metodologias (modelo I e modelo II) são apresentadas. As duas metodologias são parte da memória de cálculo denominada pela norma como método simplificado. Os procedimentos lá descritos podem ser aplicados a pilares mistos com seções transversais total (Figura 1a), parcialmente revestidas com concreto (Figura 1b), com seções preenchidas com concreto (Figura 1c e 1d), submetidos à compressão axial ou flexo-compressão. Para seções tubulares recomenda-se o uso da norma ABNT NBR 16239 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares.

Figura 1 - Tipos de seções transversais de pilares mistos



Fonte: (ABNT NBR 8800:2008)

O método simplificado é regido por três hipóteses básicas. A primeira é que há interação completa entre o concreto e o aço, isso significa que deve ser assegurada aderência suficiente na superfície de contato entre os dois materiais de modo que não exista escorregamento significativo na superfície de contato dos mesmos.

A segunda hipótese é de que as imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas para a determinação da resistência de barras de aço submetidas a compressão axial. Isso significa que a curva para fator de redução associado à resistência à compressão dos pilares de aço, pode ser adotada para os pilares mistos, sem perda significativa de precisão. Em outras palavras pode-se dizer que o valor do fator de redução associado à resistência à compressão, χ , para pilares mistos é encontrado da mesma forma que o fator de redução para pilares de aço submetidos a compressão (FAKURY *et al.*, 2016).

A terceira hipótese é de que a flambagem local para força axial e momento fletor não pode ser um estado-limite último predominante. Assim, como forma de garantir a integridade do pilar misto a norma disponibiliza alguns requisitos de projetos para certificar que a flambagem local não ocorra.

Nas seções totalmente revestidas com concreto (Figura 1a) isso é garantido desde que sejam obedecidos os seguintes valores limites de cobrimento de concreto nas duas direções:

$$\begin{cases} 40\text{mm} \leq c_x \leq 0,4b_f \\ c_x \geq b_f / 6 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 40\text{mm} \leq c_y \leq 0,3d \\ c_y \geq b_f / 6 \end{cases} \quad (2)$$

em que b_f é a largura total da mesa da seção I ou H e d é a altura total da seção do perfil metálico.

Respeitando esse padrão de cobrimento, não é necessária a verificação de flambagem local.

Para evitar a flambagem local de seções I ou H (Figura 1b) parcialmente revestidas de concreto e seções tubulares preenchidas com concreto (Figura 1c e 1d), deve-se respeitar os seguintes valores limites das relações largura/espessura estabelecidos:

- a) Seções tubulares circulares preenchidas com concreto:

$$\frac{D}{t} \leq 0,15 \frac{E}{f_y} \quad (3)$$

- b) Seções tubulares retangulares preenchidas com concreto:

$$\frac{b_i}{t} \leq 2,26 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{1/2} \quad (4)$$

- c) Seções I ou H parcialmente revestidas com concreto:

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 1,49 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{1/2} \quad (5)$$

onde E é o módulo de elasticidade do aço; D é o diâmetro externo da seção tubular circular; b_i é a maior dimensão paralela ao eixo de simetria da seção tubular retangular; b_f é a largura total da mesa da seção I ou H; t é a espessura da parede da seção tubular e t_f é a espessura da mesa da seção I ou H.

A norma também prescreve alguns limites de aplicabilidade para essa metodologia simplificada de cálculo, que são descritos a seguir:

- a) Os pilares mistos devem ter dupla simetria e seção transversal constante;

- b) O fator de contribuição do aço, igual a $\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}}$, deve ser superior a 0,2 e inferior

a 0,9. Se δ for igual ou inferior a 0,2, o pilar deve ser dimensionado de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 como pilar de concreto e, se δ for igual ou superior a 0,9, o pilar deve ser dimensionado segundo a norma ABNT NBR 8800:2008, como pilar de aço.

- c) A esbeltez relativa do pilar λ_{rel} , não pode ser maior que 2,0;
- d) Seções transversais preenchidas com concreto podem ser fabricadas sem qualquer armadura, exceto para algumas condições em situações de incêndio (para essa situação, deve-se usar a ABNT NBR 14323:2013. Para as seções transversais total ou parcialmente revestidas com concreto, a área da seção transversal da armadura longitudinal não deve ser inferior a 0,3% da área do concreto. A máxima porcentagem de armadura na seção de concreto é 4% (por razões de segurança contra incêndio, maiores porcentagens de armadura podem ser utilizadas, porém não se pode considerar no dimensionamento à temperatura ambiente taxa superior a 4%);
- e) A relação entre a altura e largura das seções transversais mistas retangulares deve estar entre 0,2 e 5,0;

A força axial resistente de cálculo de pilares mistos axialmente comprimidos sujeitos à instabilidade por flexão é dada por:

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd} \quad (6)$$

sendo $N_{pl,Rd}$ a força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total e é dada pela soma das forças axiais resistentes de cálculo de seus componentes, perfil de aço, concreto e armadura longitudinal, conforme segue:

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd} \quad (7)$$

$$N_{pl,Rd} = f_{yd} A_a + \alpha f_{cd} A_c + f_{sd} A_s \quad (8)$$

com A_a sendo a área da seção transversal do perfil de aço; A_c é a área da seção transversal de concreto; A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal; f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço do perfil; f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão; f_{sd} é a resistência de cálculo ao escoamento da armadura longitudinal e α um coeficiente igual a 0,95 para seções tubulares circulares preenchidas com concreto e 0,85 para as demais seções.

O fator de redução χ , definido na Equação (6), é calculado em função do índice de esbeltez reduzido $\lambda_{0,m}$, que é dado por:

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_e}} \quad (9)$$

As funções que compõe a curva única de resistência são dadas pelas seguintes equações:

- a) Para $\lambda_{0,m} \leq 1,5$, χ é dado por:

$$\chi = 0,658 \lambda_{0,m}^2 \quad (10)$$

b) Para $\lambda_{0,m} > 1,5$, tem-se:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_{0,m}^2} \quad (11)$$

$N_{pl,R}$ é o valor de $N_{pl,Rd}$ tomando-se respectivamente f_y , f_{ck} e f_{ys} no lugar de f_{yd} , f_{cd} e f_{sd} na Equação (8), ou seja:

$$N_{pl,R} = f_y A_a + \alpha f_{ck} A_c + f_{ys} A_s \quad (12)$$

sendo N_e a carga crítica de flambagem elástica por flexão dada pela equação de flambagem de Euler, ou seja:

$$N_e = \frac{\pi^2 (EI)_e}{(KL)^2} \quad (13)$$

em que (KL) é o comprimento de flambagem do pilar e $(EI)_e$ é a rigidez à flexão efetiva da seção transversal mista, dada por:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s \quad (14)$$

no qual I_a é o momento de inércia da seção transversal do perfil de aço; I_s é o momento de inércia da seção transversal da armadura do concreto; I_c é o momento de inércia da seção transversal do concreto não-fissurado; E_a é o módulo de elasticidade do aço estrutural; E_s é o módulo de elasticidade do aço da armadura; $E_{c,red}$ é o módulo de elasticidade reduzido do concreto.

Os efeitos de retração e fluência do concreto devem ser levados em conta e podem ser contemplados simulando uma redução do módulo de elasticidade do concreto, assim tem-se:

$$E_{c,red} = \frac{E_c}{1 + \varphi \left(\frac{N_{G,Sd}}{N_{sd}} \right)} \quad (15)$$

onde E_c é o módulo de elasticidade do concreto, φ é o coeficiente de fluência do concreto, que simplifiadamente pode ser tomado como 2,5 nas seções total ou parcialmente revestidas com concreto e igual a zero nas seções tubulares preenchidas com concreto; a relação $N_{G,Sd}/N_{sd}$ pode ser tomada igual a 0,6; N_{sd} é a força axial solicitante de cálculo e $N_{G,Sd}$ é parcela da força axial solicitante de cálculo devida à ação permanente e à ação decorrente do uso de atuação quase permanente.

Para os casos de pilares mistos sujeitos aos efeitos combinados de força axial de compressão e momento fletor em relação a um ou aos dois eixos de simetria da seção transversal a norma apresenta dois modelos de cálculos, um mais simplificado, denominado modelo de cálculo I e um mais rigoroso, denominado modelo de cálculo II.

A verificação para atuação simultânea da força axial de compressão e dos momentos fletores, para o modelo de cálculo I, pode ser feita obedecendo a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação:

a) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (16)$$

b) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (17)$$

onde N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de compressão; N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo de compressão, já determinada anteriormente; $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal e $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal, dado por $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$.

O momento fletor resistente de plastificação de cálculo, $M_{pl,Rd}$, em relação ao eixo x ou ao eixo y (respectivamente, $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$) de seções mistas duplamente simétricas, pode ser calculado por:

$$M_{pl,Rd} = f_{yd} (Z_a - Z_{an}) + 0,5 f_{cd1} (Z_c - Z_{cn}) + f_{sd} (Z_s - Z_{sn}) \quad (18)$$

em que Z_a é o módulo de resistência plástico da seção do perfil do aço; Z_s é o módulo de resistência plástico da seção da armadura do concreto; Z_c é o módulo de resistência plástico da seção de concreto, considerado não-fissurado; Z_{an} , Z_{cn} e Z_{sn} são módulos de resistência plásticos definidos nas subseções P.5.4.3 e P.5.4.4 da ABNT NBR 8800:2008 e f_{cd1} é igual ao produto αf_{cd} .

O momento fletor máximo resistente de plastificação de cálculo, $M_{max,pl,Rd}$, em relação ao eixo x ou ao eixo y (respectivamente, $M_{max,pl,x,Rd}$ e $M_{max,pl,y,Rd}$) de seções mistas duplamente simétricas pode ser calculado por:

$$M_{max,pl,Rd} = f_{yd} Z_a + 0,5 f_{cd1} Z_c + f_{sd} Z_s \quad (19)$$

Já para verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores segundo o modelo de cálculo II, pode ser feita seguindo as seguintes equações:

$$N_{sd} \leq N_{Rd} \quad (20)$$

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1,0 \quad (21)$$

com μ_x sendo um coeficiente dado por:

a) Para $N_{sd} \geq N_c$:

$$\mu_x = 1 - \frac{N_{sd} - N_{pl,c,Rd}}{N_{pl,Rd} - N_{pl,c,Rd}} \quad (22)$$

b) Para $\frac{N_c}{2} \leq N_{sd} < N_c$:

$$\mu_x = \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}}\right) \left(\frac{2N_{sd}}{N_{pl,c,Rd}} - 1\right) + \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \quad (23)$$

c) Para $0 \leq N_{sd} < \frac{N_c}{2}$:

$$\mu_x = 1 + \frac{2N_{sd}}{N_{pl,c,Rd}} \left(\frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} - 1\right) \quad (24)$$

no qual μ_y é um coeficiente calculado da mesma forma que μ_x , trocando-se as grandezas referente a x por y ; $N_{pl,c,Rd}$ é dado por $f_{cd1}A_c$; $N_{pl,Rd}$ é a força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total; N_{sd} é a força axial solicitante de cálculo; $M_{c,x}$ e $M_{c,y}$ são dados, respectivamente, por $0,9M_{pl,x,Rd}$ e $0,9M_{pl,y,Rd}$, onde os momentos fletores resistentes de plastificação de cálculo em relação aos eixos x e y (respectivamente $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$) são obtidos segundo a Equação 18; $M_{d,x}$ e $M_{d,y}$ são dados, respectivamente, por $0,8M_{max,pl,x,Rd}$ e $0,8M_{max,pl,y,Rd}$, onde os momentos fletores máximos resistentes de plastificação de cálculo em relação aos eixos x e y (respectivamente $M_{max,pl,x,Rd}$ e $M_{max,pl,y,Rd}$) são obtidos segundo a Equação 19. Caso $M_{d,x}$ seja menor que $M_{c,x}$, então $M_{d,x}$ deve ser tomado igual a $M_{c,x}$. O mesmo deve ser feito em relação a $M_{d,y}$ e $M_{c,y}$; $M_{x,tot,Sd}$ e $M_{y,tot,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo totais, respectivamente, em relação aos eixos x e y , definidos na subseção P.5.3.2 da ABNT NBR 8800:2008.

2.3.2 Conforme a ANSI/AISC 360-16

A norma norte americana ANSI/AISC 360-16 – *Specification for Structural Steel Buildings* é a responsável por definir as regulamentações de projeto de pilares mistos de aço e concreto nos Estados Unidos. O capítulo I (*Design of Composite Members*) aborda os critérios de dimensionamento de pilares mistos ou elementos comprimidos com seções transversais totalmente revestidas ou seções tubulares preenchidas com concreto. Entretanto não faz parte do escopo de utilização da norma os pilares parcialmente revestidos com concreto.

A norma permite a utilização de dois métodos de cálculos para a determinação da capacidade resistente e esforços solicitantes do componente. Um dos métodos é o *Allowable Strength Design (ASD)* no qual o dimensionamento dos componentes trata-se do cálculo baseado nos esforços resistentes admissíveis, enquanto o outro método o *Load and Resistance Factor Design (LRFD)* trata-se do cálculo através dos estados limites. Nesse trabalho será utilizado o método LRFD considerando a distribuição plástica de tensões.

Para o método de distribuição plástica de tensões, a resistência nominal deve ser calculada assumindo que os componentes de aço alcançarão uma tensão de F_y em tração ou compressão. Já os componentes de concreto em compressão devido a força axial e/ou flexão atingirão uma tensão de $0,85f'_c$ para pilares mistos com perfis revestidos e $0,95f'_c$ para perfis preenchidos.

Os elementos que compõem o pilar misto devem obedecer a algumas limitações que são impostas pela norma, as seguintes condições devem ser satisfeitas, exceto quando justificado por testes ou análises:

- a) A resistência à compressão do concreto deve estar entre 21 MPa a 69 MPa para concreto de densidade normal, e entre 21 MPa e 41 MPa para concreto de densidade baixa.
- b) A tensão de escoamento mínima do perfil de aço utilizada no cálculo da força dos membros mistos não deve ser menor que 525 MPa.
- c) A tensão de escoamento mínima da armadura utilizada no cálculo da força dos membros mistos não deve ser menor que 550 MPa.

Para aplicação do método de dimensionamento de um pilar misto totalmente revestido algumas limitações também devem ser levadas em conta:

- a) A área do perfil de aço no núcleo do pilar deve ser de no mínimo 1,00% da área total da seção transversal.

- b) O concreto deve ser reforçado com barras longitudinais contínuas e armaduras transversais, podendo conter estribos ou ganchos.
- c) A taxa de armadura longitudinal mínima, ρ_{sr} , deve ser 0,004, onde ρ_{sr} é dado por:

$$\rho_{sr} = \frac{A_{sr}}{A_g} \quad (25)$$

com A_{sr} sendo a área das barras de reforço contínuas em mm² e A_g a área bruta do componente misto em mm².

A resistência de compressão de cálculo, $\phi_c P_n$, deve ser determinada utilizando o método LRFD, como já mencionado e o estado limite de flambagem deverá ser determinado de acordo com a esbeltez do pilar, assim tem-se:

$\phi_c = 0,75$ para LRFD.

- a) Quando $\frac{P_{no}}{P_e} \leq 2,25$

$$P_n = P_{no} \left(0,658 \frac{P_{no}}{P_e} \right) \quad (26)$$

- b) Quando $\frac{P_{no}}{P_e} > 2,25$

$$P_n = 0,877 P_e \quad (27)$$

onde:

$$P_{no} = f_y A_s + f_{ysr} A_{sr} + 0,85 f'_c A_c \quad (28)$$

P_e é a carga crítica de flambagem elástica, determinada de acordo com o capítulo C ou apêndice 7 da ANSI/AISC 360-16, definida por:

$$P_e = \pi^2 \frac{(EI_{eff})}{L_c^2} \quad (29)$$

sendo A_c a área de concreto em mm²; A_s a área da seção transversal de aço em mm² e E_c é o modulo de elasticidade do concreto, em MPa, dado por:

$$E_c = 0,043 w_c^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad (30)$$

EI_{eff} é a rigidez efetiva da seção mista, em Nmm², dado por:

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad (31)$$

C_1 é o coeficiente para cálculo da rigidez efetiva da seção mista, dado por:

$$C_1 = 0,25 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0,7 \quad (32)$$

onde E_s é o módulo de elasticidade do aço igual a 200.000 MPa; F_y é a tensão de escoamento mínima da seção de aço, em MPa; F_{ysr} é a tensão de escoamento mínima do aço das armaduras, em MPa; I_c é o momento de inércia da seção de concreto em relação ao eixo neutro elástico da seção mista, em mm^4 ; I_s é o momento de inércia da seção do perfil de aço em relação ao eixo neutro elástico da seção mista, em mm^4 ; I_{sr} é o momento de inércia da armadura em relação ao eixo neutro elástico da seção mista, em mm^4 ; K é o fator de comprimento efetivo; L é o comprimento lateral do membro, em mm e L_c é o comprimento efetivo do componente, em mm, definido por:

$$L_c = KL \quad (33)$$

f'_c é a força específica de compressão do concreto, em MPa e w_c é a densidade do concreto, sendo limitada por $1500 \leq w_c \leq 2500 \text{ kg/m}^3$.

A resistência à flexão de cálculo, $\phi_b M_n$, assim como a resistência a compressão de cálculo é determinada em concordância com o método LRFD:

$$\phi_b = 0,90 \text{ para LRFD.}$$

No qual a resistência nominal de flexão, M_n , deve ser determinada usando um dos seguintes métodos:

- A sobreposição de tensões elásticas na seção mista, considerando os efeitos de escoramento para o estado limite de escoamento (momento de escoamento).
- A distribuição de tensões plástica apenas na seção de aço, para o estado limite de escoamento (momento plástico) na seção de aço.
- A distribuição de tensões plásticas na seção composta ou o método de compatibilidade de deformações, para o estado limite de escoamento (momento plástico) na seção mista. Os membros revestidos de concreto deverão ter conectores de aço presente.

Para verificação de pilares mistos sujeito a esforços combinados de flexão e forças axiais deve ser levado em conta a estabilidade, conforme exigido pelo capítulo C da ANSI/AISC 360-16. Os pilares mistos sujeitos a flexão e compressão em membros duplamente e mono simétricos também devem ser limitadas pelas seguintes equações a fim de evitar a deformação em qualquer um dos seus eixos:

- Quando $\frac{P_r}{P_c} \leq 0,2$:

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (34)$$

b) Quando $\frac{P_r}{P_c} > 0,2$:

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (35)$$

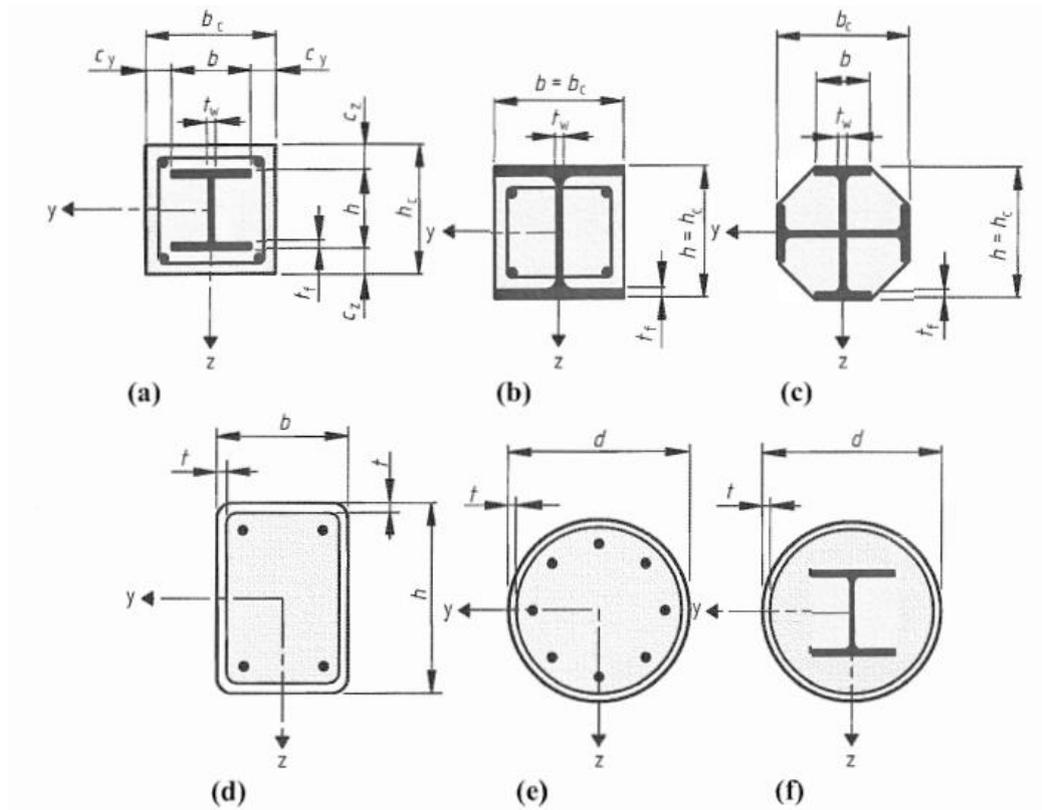
em que P_r é a força axial requerida, usando o método LRFD, em N; P_c é a força axial disponível, em N, e igual a $\phi_c P_n$, onde $\phi_c = 0,90$; M_r é o momento de flexão requerido, usando o método LRFD, em Nmm e M_c é o momento de flexão disponível, em Nmm, e igual a $\phi_b M_n$, onde $\phi_b = 0,90$. Os índices y e x representam os eixos de atuação dos momentos.

2.3.3 Conforme o EN 1994-1-1:2004

O *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings* é a norma europeia que define a regulamentação para o projeto de pilares mistos de aço e concreto. O item 6.7 (*Composite columns and composite compression members*) é o responsável por esse dimensionamento, onde são abordados dois métodos de cálculo. O primeiro é o Método Geral, cujo escopo inclui pilares mistos com seções transversais não simétricas ou não uniformes ao longo do seu comprimento, já o segundo é o Método Simplificado que abrange seções transversais duplamente simétricas e uniformes ao longo de seu comprimento. Nesse trabalho será abordado apenas o método simplificado.

Em conformidade com o EN 1994-1-1:2004 o dimensionamento é aplicável em pilares mistos ou elementos comprimidos com seções transversais parcial (Figura 2-b, 2-c) ou totalmente (Figura 2-a) revestidas por concreto e seções tubulares totalmente preenchidas com concreto (Figura 2-d, 2-e, 2-f), conforme a figura abaixo:

Figura 2 – Seções transversais típicas de pilares mistos e notação



Fonte: (EN 1994-1-1:2004)

Uma das condições exigidas pela norma para que a metodologia seja aplicável é de que os pilares mistos precisam ter classe de aço S235 a S460 e o concreto classe C20/25 a C50/60 com densidade normal (usualmente admitida de 2000 a 2600 kg/m³). O índice ‘S’ nas classes dos perfis de aço indica que o aço é estrutural e normatizado pelo *Eurocode* e os números seguintes a letra representa a resistência ao escoamento mínimo em MPa.

A taxa de contribuição do perfil aço deve ficar entre $0,2 \leq \delta \leq 0,9$, sendo δ definido por

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{Rd,pl}}$$

Onde A_a é a área da seção transversal do perfil de aço; f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do perfil de aço e $N_{Rd,pl}$ é a força resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total.

A influência da flambagem local da seção de aço na resistência deve ser considerada em projeto. Porém, essa verificação pode ser negligenciada caso sejam atendidos os seguintes requisitos de projeto:

Nos pilares mistos totalmente revestidos com concreto (Figura 2a) o cobrimento é capaz de evitar a flambagem local do perfil, desde que os seguintes limites sejam respeitados:

$$\begin{cases} c \geq 40\text{mm} \\ c \geq b/6 \end{cases} \quad (36)$$

ou seja, o cobrimento deve ser maior ou igual a 40mm e não menor que um sexto da largura da mesa. Além de garantir que os efeitos de flambagem local não ocorra, esse cobrimento mínimo também tem como premissa assegurar a transmissão segura das forças de aderência, a proteção contra a corrosão e fragmentação do concreto.

Para seções parcialmente revestidas e seções tubulares preenchidas com concreto, a norma traz algumas condições geométricas relativa à esbeltez dos elementos da seção transversal do pilar de aço. Assim, os seguintes limites devem ser respeitados como forma de garantir que as resistências dos materiais sejam atingidas antes que ocorra instabilidade local das seções:

- a) Seções tubulares circulares preenchidas com concreto (figura 2-e,2-f):

$$\frac{d}{t} \leq 90 \frac{235}{f_y} \quad (37)$$

- b) Seções tubulares retangulares preenchidas com concreto (figura 2-d):

$$\frac{h}{t} \leq 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (38)$$

- c) Seções de aço parcialmente revestidas com concreto (figura 2-b,2-c):

$$\frac{b}{t_f} \leq 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (39)$$

em que f_y é a resistência ao escoamento da seção do aço; d é o diâmetro externo da seção tubular circular; h é a maior dimensão paralela ao eixo de simetria da seção tubular retangular; b é a largura da mesa do perfil de aço; t é a espessura da parede da seção tubular; t_f é a espessura da mesa do perfil metálico.

Para aplicação do Método Simplificado o EN 1994-1-1:2004 apresenta algumas limitações que devem ser respeitadas a fim de atender o dimensionamento correto, tais como:

- Esse método é utilizado apenas em membros com simetria dupla e seção transversal continua ao longo do comprimento do pilar. O método simplificado não é aplicável se o componente de aço estrutural consistir em duas ou mais seções não conectadas.
- A esbeltez relativa ($\bar{\lambda}$) do pilar misto, definida pela Equação 45, deve ser menor ou igual a 2.
- Para pilares totalmente revestidos por concreto o cobrimento máximo deve ser:

$$\begin{cases} c_z \leq 0,3h \\ c_y \leq 0,4b \end{cases} \quad (40)$$

- d) A taxa máxima de armadura longitudinal não deverá exceder 6% da área de concreto.
- e) A relação entre altura e largura das seções transversais retangulares mistas deve estar dentro dos limites 0,2 e 5,0.

A resistência plástica de cálculo à compressão axial de uma seção transversal do pilar misto, $N_{pl,Rd}$, pode ser calculado pela soma das contribuições individuais das resistências plásticas de seus componentes:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (41)$$

com A_a sendo a área da seção transversal do perfil metálico; A_c a área da seção transversal do concreto; A_s a área da seção transversal da armadura longitudinal; f_{yd} a resistência ao escoamento de cálculo do aço do perfil; f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto; f_{sd} a resistência ao escoamento de cálculo do aço da armadura.

A Equação (41) se aplica a seções de aço revestidas e parcialmente revestidas de concreto. Para seções preenchidas com concreto o coeficiente de 0,85 pode ser substituído por 1,0.

Para um pilar misto submetido a compressão axial, simplificada, pode-se admitir que o valor de cálculo para a força normal atuante N_{Ed} deve satisfazer a seguinte relação:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (42)$$

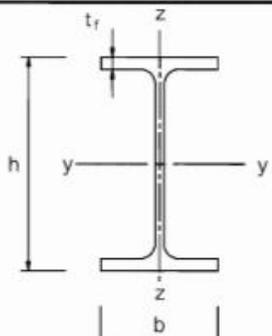
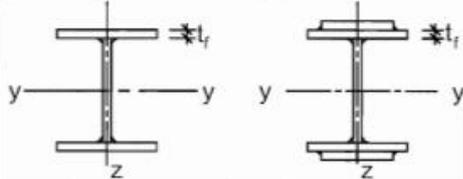
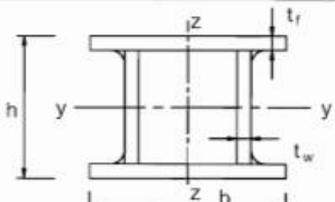
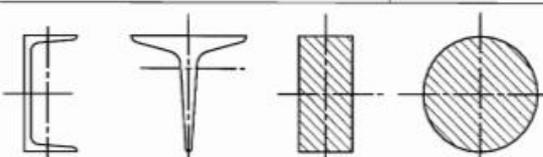
em que χ é um fator de redução para o modo de flambagem fornecido pela norma EN 1993-1-1 (2005), dado por:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 \quad (43)$$

$$\Phi = 0,5 \left(1 + \alpha (\lambda - 0,2) + \lambda^2 \right) \quad (44)$$

sendo α um fator de imperfeição, que é obtido a partir de sua correspondente curva de flambagem apropriada. Para determinar o tipo de curva de flambagem apropriada, o EN 1993-1-1:2005 disponibiliza uma tabela (Tabela 1) que leva em conta o tipo de seção transversal e o eixo de flexão do pilar. Definido a categoria da curva de flambagem, o valor de α é aferido por outra tabela (Tabela 2) que relaciona os tipos de curva e valores do fator de imperfeição.

Tabela 1 – Seleção da curva de flambagem para uma determinada seção transversal

Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Rolled sections 	$h/b > 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 40$ mm	a a ₀
			$40 < t_f \leq 100$	b c
	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 100$ mm	b c
			$t_f > 100$ mm	d c
Welded I-sections 	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	
	$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	
Hollow sections 	hot finished	any	a	
	cold formed	any	c	
Welded box sections 	generally (except as below)	any	b	
	thick welds: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	any	c	
U-, T- and solid sections 		any	c	
L-sections 		any	b	

Fonte: (Eurocode EN 1993-1-1:2005)

Tabela 2 – Fator de imperfeição para as curvas de flambagem

Curva de flambagem	a_0	a	b	c	d
Fator de imperfeição α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Fonte: (Eurocode EN 1993-1-1:2005)

A esbelteza relativa para o plano de flexão considerado é dada por:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (45)$$

em que $N_{pl,Rk}$ é a resistência característica plástica à compressão, definida pela Equação 41 substituindo-se os valores de cálculo pelos valores característicos e N_{cr} é a carga crítica de flambagem elástica, ou carga de Euler, calculada através da rigidez axial efetiva $(EI)_{eff}$:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{(KL)^2} \quad (46)$$

A rigidez axial efetiva do pilar misto é dado pela soma das contribuições individuais das rigidezes de cada elemento componente da seção:

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{cm} I_c \quad (47)$$

onde I_a , I_s e I_c são os momentos de inércia do perfil de aço, da armadura longitudinal e da seção de concreto, respectivamente; E_a , E_s e E_{cm} são os módulos de elasticidade do perfil de aço, da armadura longitudinal e da seção de concreto, respectivamente e K_e é o fator de correção da rigidez do concreto, igual a 0,6.

Deve-se levar em conta a influência dos efeitos dos carregamentos de longa prazo, com isso o módulo de elasticidade do concreto E_{cm} deve ser reduzido para o valor de acordo com a seguinte expressão:

$$EI_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + (N_{G,Ed} / N_{Ed}) \varphi_t} \quad (48)$$

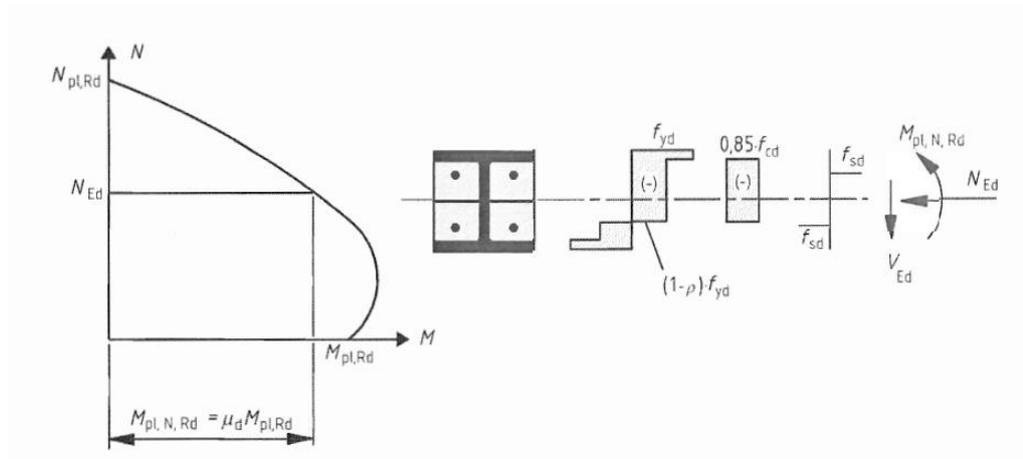
com $N_{G,Ed}$ sendo a parcela da carga permanente; N_{Ed} é a força total solicitante de cálculo; φ_t é o coeficiente de fluência dependente da idade do concreto e data do início do carregamento e E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto apresentado pela Eurocode 2: Part 1-1 (2003) como:

$$E_{cm} = 9,5 (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (49)$$

sendo f_{ck} a resistência do concreto em Mpa e E_{cm} dado em kN/mm².

A capacidade resistente da seção transversal de um pilar misto submetido a esforços combinados de compressão axial e momento fletor e a correspondente curva de interação pode ser calculada assumindo uma distribuição retangular de tensões, tendo em conta a ação da força cortante, como mostrado na Figura 3. A resistência à tração do concreto não deve ser levada em conta.

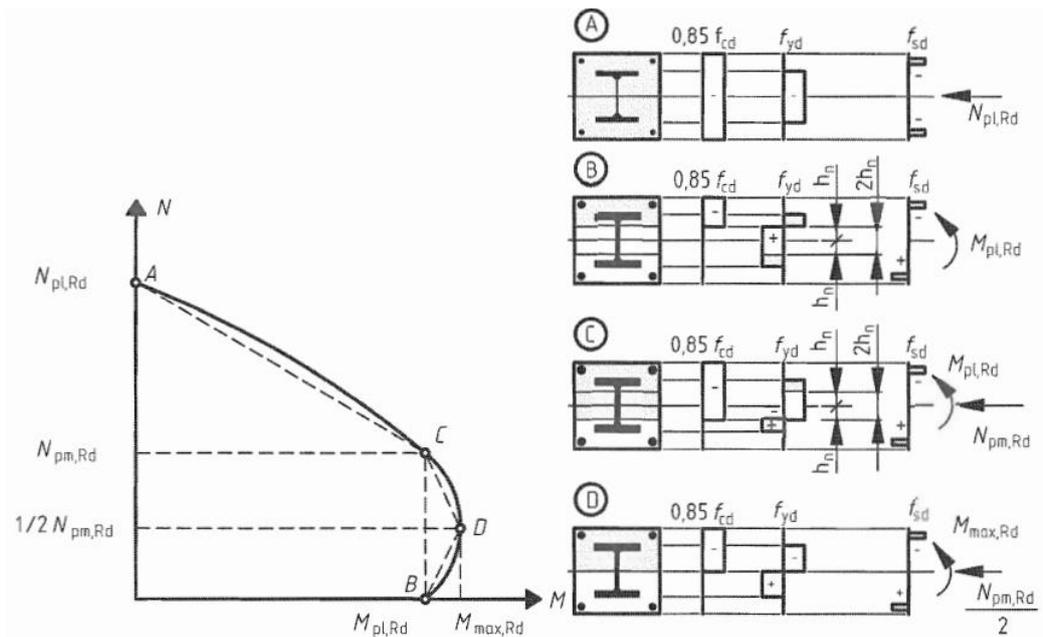
Figura 3 – Curva de interação de esforços para flexão composta normal



Fonte: (Eurocode EN 1993-1-1:2005)

Além disso a norma traz uma simplificação, no qual a curva de interação pode ser substituída por um diagrama poligonal, como mostrado na figura abaixo.

Figura 4 – Curva de interação simplificada



Fonte: (Eurocode EN 1993-1-1:2005)

A partir dessa curva de interação a verificação de segurança para esforços combinados de compressão e momento fletor pode ser satisfeita caso a seguinte equação seja respeitada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (50)$$

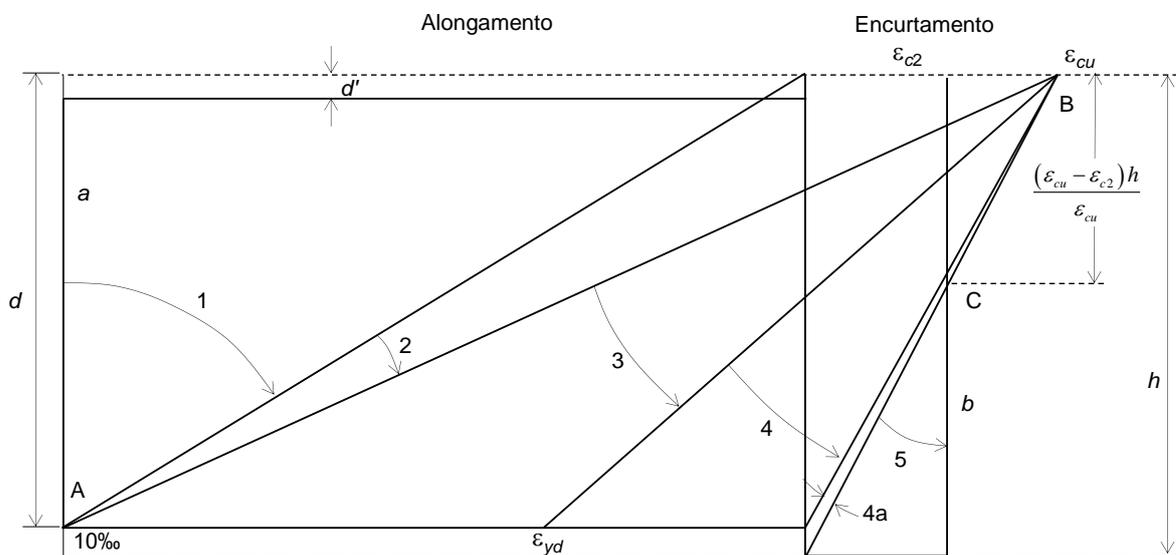
no qual M_{Ed} é definido como o maior momento final ou o máximo momento fletor ao longo do comprimento do pilar, e inclui as imperfeições e os efeitos de segunda ordem, caso necessário; $M_{pl,N,Rd}$ é a resistência da deformação plástica ao levar em consideração a força normal, N_{Ed} ,

dado por $\mu_d M_{pl,Rd}$; $M_{pl,Rd}$ é o momento resistente plástico, dado pelo ponto B da Figura 4; α_M é 0,9 para classe de aço entre S235 e S355 e 0,8 para classe de aço entre S420 e S460 e μ_d refere-se ao momento plástico de projeto, $M_{pl,Rd}$, para o plano de flexão considerado. Valores μ_d maiores que 1,0 só devem ser usados quando o momento fletor M_{Ed} depende diretamente da ação da força normal N_{Ed} , por exemplo, quando o momento M_{Ed} resulta de uma excentricidade da força normal N_{Ed} . Caso contrário, uma verificação adicional é necessária em concordância com a subseção 6.7.1 (7) da EN 1993-1-1:2005.

2.3.4 Aplicação dos domínios de deformação do concreto para as curvas de interação

Segundo LIMA (2020), para dimensionamento do elemento com intuito de resistir aos esforços solicitantes é utilizado o estado-limite último, portanto, será esse estado-limite abordado no trabalho. Dessa forma, para avaliar as seções transversais no estado-limite último e construir as curvas de interação de esforços foi utilizado o comportamento do concreto armado prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A Figura 5 apresenta os domínios de deformação.

Figura 5 – Domínios de deformação do concreto armado.



Fonte: Adaptado por LIMA (2020) da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Partindo das configurações deformadas fornecidas dentro dos domínios de deformação, foram estabelecidas equações integrais clássicas para a obtenção das forças internas (força normal e momento fletor). Assim, foi possível capturar as deformações em cada parte da seção transversal e transformá-las em tensões, utilizando as respectivas relações constitutivas dos materiais. Posteriormente, essas tensões foram transformadas em forças.

2.4 Aplicabilidade prática do presente trabalho

Esse estudo pode ser aplicado como uma metodologia menos conservadora para o dimensionamento dos pilares mistos de aço e concreto, garantindo economia, menor custo com materiais e sustentabilidade na área da construção civil.

3 METODOLOGIA

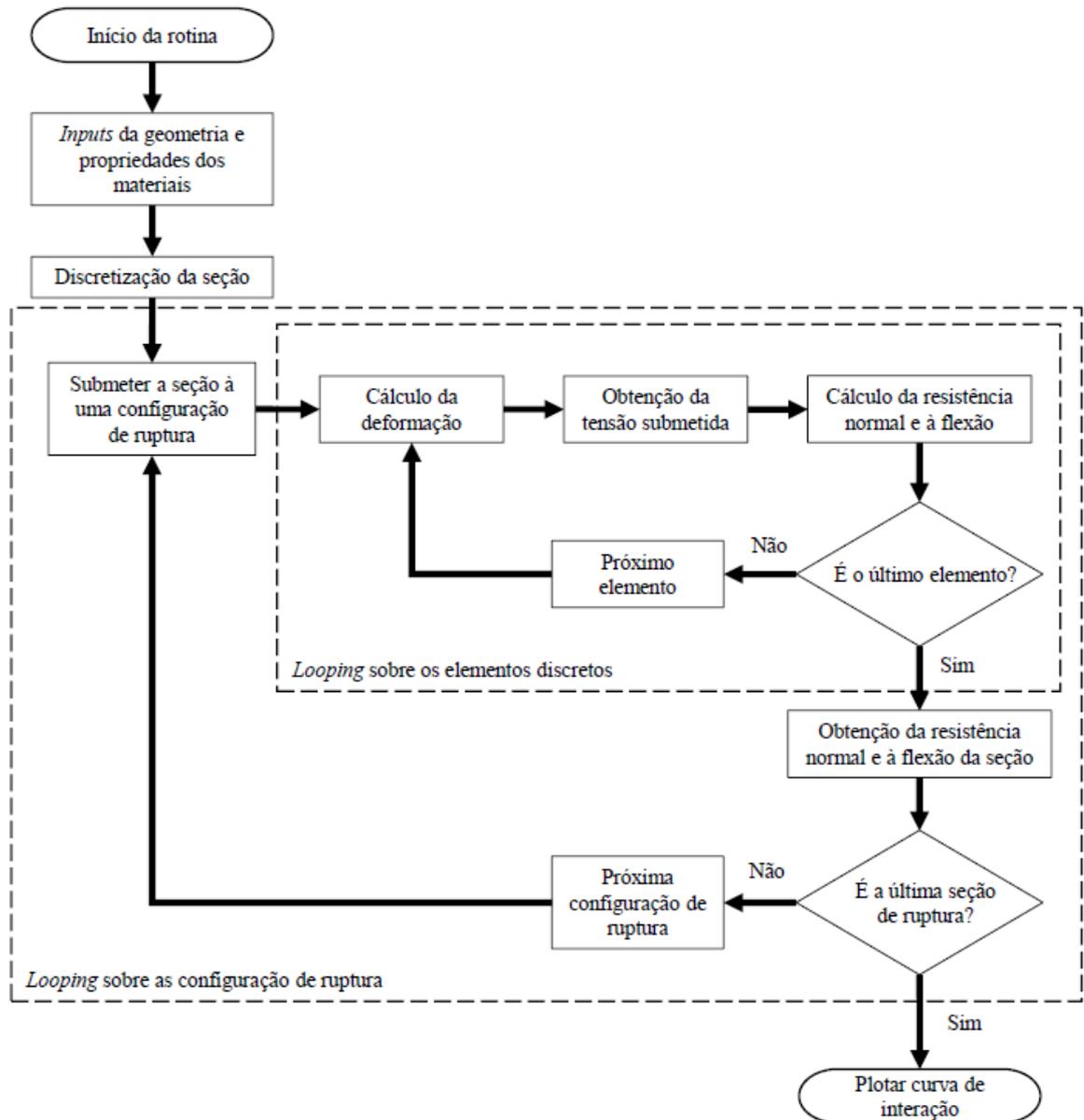
3.1 Considerações iniciais

Esse capítulo tem como objetivo descrever as ações realizadas na elaboração do presente estudo e aplicações para obtenção dos resultados.

3.2 Consulta aos procedimentos normativos

Foi feita uma análise das principais normas vigentes para o dimensionamento de pilares mistos e uma busca por bibliografias que faziam considerações a respeito dessas normas. Com isso, foi montado um roteiro detalhado das regulamentações de projeto de pilares mistos da norma brasileira (ABNT NBR 8800:2008), americana (ANSI/AISC 360-16) e europeia (EN 1994-1-1:2004). Para viabilizar o estudo, foi necessário a utilização de um código computacional que processa a curva de interação de esforços a partir de um procedimento numérico-analítico que utiliza os domínios de deformação do concreto. O código foi retirado da monografia de Lima (2020) - *“Aplicação para geração de curvas de interação de esforços para seções transversais retangulares e circulares de concreto armado”*, no qual feita uma adaptação para a aplicação em pilares mistos de aço e concreto. O processo de dimensionamento pode ser visualizado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do algoritmo de aplicação.



Fonte: LIMA (2020).

Para validar esse método de dimensionamento foi utilizado um exemplo numérico de um pilar com seção transversal mista totalmente revestida com concreto, aplicaram-se os quatro métodos de dimensionamentos citados e foram feitas comparações entre as diferentes curvas de interações resultantes.

3.3 Geração de Dados

O exemplo utilizado foi um pilar misto com seção transversal retangular e perfil metálico I totalmente revestido por concreto, sob a combinação de esforços de flexão (em apenas um eixo) e compressão, esse exemplo foi retirado da dissertação de Campos (2006). Com isso, passou-se para o dimensionamento do pilar segundo as regulamentações da ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16 e EN 1994-1-1:2004 e com a ajuda do programa computacional gratuito Visual Studio 2019, foi possível utilizar uma rotina computacional na qual são lidos os dados de entrada, que são as informações geométricas da seção transversal e as propriedades dos materiais e a partir de formulações analíticas fornece como saída a curva de interação de esforços a partir dos domínios de deformações do concreto.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Nesse capítulo será apresentado o cálculo de um exemplo de aplicação, retirado da dissertação de Campos (2006), seguindo os procedimentos de dimensionamento da norma brasileira (NBR 8800:2008), americana (ANSI/AISC 360-16) e europeia (Eurocode 2004), esses resultados serão comparados com a solução da curva de interação baseada nos domínios de deformação do concreto obtida pelo programa computacional. O capítulo se inicia com os cálculos normativos, passando pela solução fornecida pelo programa computacional e finaliza com uma discussão entre os métodos aplicado.

4.2 Exemplo de Calibração

a) Especificações do pilar misto

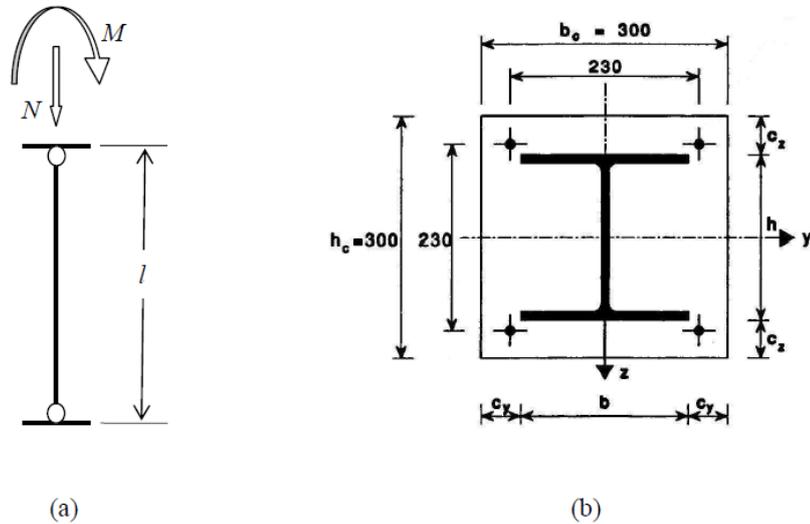
- Comprimento efetivo: 4,00 m;
- Pilar isolado indeslocável sem ação de carregamentos laterais intermediários;
- Compressão axial de projeto: $P_u = N_{sd} = 1100 \text{ kN}$;
- Momento fletor de projeto em torno do eixo xx : $M_{x,sd} = M_{x,nt} = 100 \text{ kN.m}$;
- A influência da força cortante será desprezada.

b) Propriedades dos materiais

- Perfil de aço: $f_y = F_y = 355 \text{ N/mm}^2$ e $E_a = 210 \text{ kN/mm}^2$
- Concreto (densidade normal): $f_{ck} = f'_c = 21 \text{ N/mm}^2$
- Armadura: $f_{sy} = F_{yr} = 500 \text{ N/mm}^2$ e $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$

c) Geometria e propriedades da seção transversal

Figura 7 - Pilar misto de aço e concreto: (a) Esquema de carregamento e vinculação – (b) Seção transversal mista de aço e concreto



Fonte: (Campos 2006).

$$b = 203,2 \text{ mm}$$

$$h = 203,2 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,3 \text{ mm}$$

$$A_a = A_s = 58,8 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 83.668 \text{ mm}^2$$

$$A_s = A_r = 452 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 1.539 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$Z_x = 497 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$Z_y = 230 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$t_f = 11,0 \text{ mm}$$

$$I_x = 4.565 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Calculo conforme a NBR8800:2008

Determinação da resistência de cálculo à compressão do pilar misto (N_{Rd}):

Cálculo da força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total:

$$N_{pl.Rd} = A_a f_{yd} + \alpha A_c f_{cd} + A_s f_{sd}$$

$$N_{pl.Rd} = 58,8 \times 10^2 \times \frac{0,355}{1,10} + 0,85 \times 83668 \times \frac{0,021}{1,40} + 452 \times \frac{0,500}{1,15}$$

$$N_{pl.Rd} = 3160,9251 \text{ kN}$$

Cálculo da força axial resistente nominal da seção transversal à plastificação total:

$$N_{pl.R} = A_a f_y + \alpha A_c f_{ck} + A_s f_{sy}$$

$$N_{pl.R} = 58,8 \times 10^2 \times 0,355 + 0,85 \times 83.668 \times 0,021 + 452 \times 0,5$$

$$N_{pl.R} = 3806,87 \text{ kN}$$

Cálculo do módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = \alpha_i \alpha_E \sqrt{f_{ck}}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \rightarrow \alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{21}{80} = 0,85$$

$$\alpha_E = 1,0 \text{ (brita de gnaisse)}$$

$$E_c = 0,85 \times 1,0 \times 5600 \sqrt{21} = 21.813,06 \text{ MPa}$$

Cálculo do módulo de elasticidade reduzido do concreto:

$$E_{c,red} = 0,4 E_c = 0,4 \times 2181,3 = 872,52 \text{ kN / cm}^2$$

Cálculo do momento de inércia da seção transversal da armadura do concreto:

$$I_{s,x} = I_{s,y} = 4,52 \left(\frac{23,0}{2} \right)^2 = 597,77 \text{ cm}^4$$

Cálculo do momento de inércia da seção transversal do concreto não-fissurado, na direção x e y, respectivamente:

$$I_{c,x} = \frac{b_c h_c^3}{12} - I_{a,x} - I_{s,x} = \frac{30 \times 30^3}{12} - 4565 - 597,77 = 62337,23 \text{ cm}^4$$

$$I_{c,y} = \frac{h_c b_c^3}{12} - I_{a,y} - I_{s,y} = \frac{30 \times 30^3}{12} - 1539 - 597,77 = 65363,23 \text{ cm}^4$$

Cálculo da rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista, na direção x e y, respectivamente:

$$(EI)_{ex} = E_a I_x + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s$$

$$(EI)_{ex} = 21000 \times 4565 + 0,6 \times 872,52 \times 62337,23 + 21000 \times 597,77$$

$$(EI)_{ex} = 141052458 \text{ kNcm}^2$$

$$(EI)_{ey} = E_a I_y + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s$$

$$(EI)_{ey} = 21000 \times 1539 + 0,6 \times 872,52 \times 65363,23 + 21000 \times 597,77$$

$$(EI)_{ey} = 79090605,26 \text{ kNcm}^2$$

Cálculo da força axial de flambagem elástica, na direção x e y, respectivamente:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 (EI)_{ex}}{l_x^2} = \frac{\pi^2 \times 141052458}{400^2} = 8700,82 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 (EI)_{ey}}{l_y^2} = \frac{\pi^2 \times 79090605,26}{400^2} = 4878,70 \text{ kN}$$

Cálculo do índice de esbelteza reduzido, na direção x e y, respectivamente:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{ex}}} = \sqrt{\frac{3806,87}{8700,82}} = 0,661$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{ey}}} = \sqrt{\frac{3806,87}{4878,70}} = 0,883$$

Para situação mais desfavorável da resistência de cálculo à compressão axial do pilar misto, tem-se:

$$\bar{\lambda}_y = 0,883 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\chi = 0,658^{0,883^2} = 0,722$$

Logo, a força axial resistente de cálculo é dada por:

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd}$$

$$N_{Rd} = 0,722 \times 3160,925 = 2282,19kN$$

Determinação da resistência de cálculo à flexo-compressão do pilar misto:

Cálculo do módulo de resistência plástico da seção da armadura do concreto:

$$Z_s = 452 \times \frac{230}{2} = 51980mm^3$$

Cálculo do módulo de resistência plástico da seção do concreto:

$$Z_{c,x} = \frac{b_c h_c^2}{4} - Z_a - Z_s = \frac{300 \times 300^2}{4} - 497000 - 51980 = 6201020mm^3$$

f_{cd1} é a resistência de cálculo do concreto à compressão multiplicado por um coeficiente:

$$f_{cd1} = \alpha f_{cd} = 0,85 \times \frac{21}{1,40} = 1,28kN / cm^2$$

Cálculo da resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura:

$$f_{sd} = \frac{500}{1,15} = 43,48kN / cm^2$$

Cálculo da resistência de cálculo ao escoamento do aço do perfil:

$$f_{yd} = \frac{355}{1,10} = 32,28kN / cm^2$$

Altura da linha neutra plástica:

$$h_n = \frac{A_c f_{cd1} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd1})}{2b_c f_{cd1} + 2t_w (2f_{yd} - f_{cd1})} \leq \frac{d}{2} - t_f$$

$$h_n = \frac{836,68 \times 1,28 - 0}{2 \times 30 \times 1,28 + 2 \times 0,73 (2 \times 32,28 - 1,28)} \leq \frac{22,52}{2} - 1,1$$

$$h_n = 6,33cm \leq 10,16cm$$

Módulo de resistência plástico do perfil de aço na região de $2h_n$:

$$Z_{an} = t_w h_n^2 = 0,73 \times 6,33^2 = 29,25 \text{ cm}^3$$

Módulo de resistência plástico da armadura de aço do concreto na região de $2h_n$:

$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sni} e_{yi}| = 0$$

Módulo de resistência plástico da seção de concreto na região de $2h_n$:

$$Z_{cn} = b_c h_n^2 - Z_{an} - Z_{sn} = 30 \times 6,33^2 - 29,25 = 1172,82 \text{ cm}^3$$

O momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x, é dado por:

$$M_{x,pl,Rd} = f_{yd} (Z_a - Z_{an}) + 0,5 f_{cd1} (Z_c - Z_{cn}) + f_{sd} (Z_s - Z_{sn})$$

$$M_{x,pl,Rd} = 32,28 (497 - 29,25) + 0,5 \times 1,28 (6201,02 - 1172,82) + 43,48 (51,98 - 0)$$

$$M_{x,pl,Rd} = 20577,11 \text{ kNcm}$$

$M_{c,x}$ é o momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x, multiplicado por um coeficiente de redução:

$$M_{c,x} = 0,9 M_{x,pl,Rd} = 0,9 \times 20577,11 = 18519,40 \text{ kNcm}$$

Força normal resistente de cálculo à compressão da seção transversal de concreto:

$$N_c = f_{cd1} A_c = 1,28 \times 836,68 = 1070,95 \text{ kN}$$

Assim, tem-se:

$$N_{Sd} = 1100 \text{ kN} > N_c = 1070,95 \text{ kN}$$

Logo, o coeficiente u_x é calculado da seguinte maneira:

$$u_x = 1 - \frac{(N_{Sd} - N_{pl,c,Rd})}{(N_{pl,Rd} - N_{pl,c,Rd})} = 1 - \frac{(1100 - 1070,95)}{(3160,93 - 1070,95)}$$

$$u_x = 0,986$$

Para verificação, tem-se:

$$N_{Sd} = 1100 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 2282,19 \text{ kN} \rightarrow ok$$

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1,0$$

$$\frac{10000}{0,986 \times 18519,40} + 0 \leq 1,0$$

$$0,55 \leq 1,0 \rightarrow ok$$

Calculo conforme a ANSI/AISC 360-16

Determinação da resistência de cálculo à compressão do pilar misto ($\phi_c P_n$):

Cálculo da força axial resistente nominal da seção transversal a plastificação total:

$$P_{no} = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} + 0,85 f'_c A_c$$

$$P_{no} = 355 \times 5880 + 500 \times 452 + 0,85 \times 21 \times 83668$$

$$P_{no} = 3806873,8 N = 3806,87 kN$$

$$P_e = \pi^2 \frac{(EI_{eff})}{L_c^2}$$

Módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = 0,043 w_c^{1,5} \sqrt{f'_c} = 0,043 \times 2000^{1,5} \sqrt{21} = 17624,75 MPa$$

Fator redutor da contribuição do concreto na rigidez efetiva para pilares mistos revestidos:

$$C_1 = 0,25 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0,7$$

$$C_1 = 0,25 + 3 \left(\frac{5880 + 452}{300 \times 300} \right) = 0,461$$

Cálculo da rigidez efetiva da seção mista, nas direções x e y, respectivamente:

$$EI_{eff,x} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c$$

$$EI_{eff,x} = 210000 \times 45650000 + 210000 \times 597,77 + 0,461 \times 17624,75 \times 62337,23$$

$$EI_{eff,x} = 9,59 \times 10^{12} Nmm^2$$

$$EI_{eff,y} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c$$

$$EI_{eff,y} = 210000 \times 15390000 + 210000 \times 597,77 + 0,461 \times 17624,75 \times 65363,23$$

$$EI_{eff,y} = 3,23 \times 10^{12} Nmm^2$$

Carga crítica da flambagem elástica, na direção x e y, respectivamente:

$$P_{e,x} = \pi^2 \frac{(EI_{eff})}{L_c^2} = \pi^2 \frac{9,59 \times 10^{12}}{4000^2} = 5915594,14 N = 5915,59 kN$$

$$P_{e,y} = \pi^2 \frac{(EI_{eff})}{L_c^2} = \pi^2 \frac{3,23 \times 10^{12}}{4000^2} = 1992426,39 N = 1992,43 kN$$

Cálculo da força axial resistente nominal:

$$\frac{P_{no}}{P_{e,x}} = \frac{3806,87}{5915,59} = 0,644 \leq 2,25 \rightarrow P_n = P_{no} \left(0,658^{\frac{P_{no}}{P_{e,x}}} \right)$$

$$P_n = 3806,87 \left(0,658^{0,644} \right) = 2907,40kN$$

Logo, a força axial resistente de cálculo é dada por:

$$\phi_c P_n = 0,75 \times 2907,40 = 2180,55kN$$

Determinação da resistência de cálculo à flexo-compressão do pilar misto:

Força axial disponível:

$$P_c = \phi_c P_n = 0,9 \times 2907,40 = 2616,66kN$$

Definição da equação de verificação:

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{1100}{2616,66} = 0,42 \geq 0,2 \rightarrow \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{r,x}}{M_{c,x}} + \frac{M_{r,y}}{M_{c,y}} \right) \leq 1,0$$

Momento fletor resistente nominal:

$$M_n = 35,5(497 - 29,25) + 0,5 \times 2,1(6201,02 - 1172,82) + 50,0(51,98 - 0)$$

$$M_n = 24483,74kNcm$$

Momento de flexão disponível:

$$M_{c,x} = \phi_b M_n = 0,90 \times 24483,74 = 22035,37kN$$

Verificação de segurança:

$$\frac{1100}{2616,66} + \frac{8}{9} \left(\frac{10000}{22035,37} + 0 \right) \leq 1,0$$

$$0,82 \leq 1,0 \rightarrow ok$$

Calculo conforme a EUROCODE 4 EN 1994-1-1:2004

Cálculo da força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total:

$$N_{pl.Rd} = A_a f_{yd} + \alpha A_c f_{cd} + A_s f_{sd}$$

$$N_{pl.Rd} = 58,8 \times 10^2 \times \frac{0,355}{1,10} + 0,85 \times 83668 \times \frac{0,021}{1,40} + 452 \times \frac{0,500}{1,15}$$

$$N_{pl.Rd} = 3160,9251kN$$

Cálculo da força axial resistente nominal da seção transversal à plastificação total:

$$N_{pl.R} = A_a f_y + \alpha A_c f_{ck} + A_s f_{sy}$$

$$N_{pl.R} = 58,8 \times 10^2 \times 0,355 + 0,85 \times 83.668 \times 0,021 + 452 \times 0,5$$

$$N_{pl.R} = 3806,87kN$$

Módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = 9,5(f_{ck} + 8)^{1/3} = 9,5(21 + 8)^{1/3} = 29,19 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

Módulo de elasticidade reduzido do concreto:

$$E_{c,red} = E_c \frac{1}{1 + \left(\frac{N_{Sd,G}}{N_{Sd}} \right) \varphi_t} = 29,19 \times \frac{1}{1 + 0,6 \times 2,5} = 11,68 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

Cálculo da rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista, na direção x e y, respectivamente:

$$(EI)_{ex} = E_a I_x + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s$$

$$(EI)_{ex} = 21000 \times 4565 + 0,6 \times 1168 \times 62337,23 + 21000 \times 597,77$$

$$(EI)_{ex} = 152104100,8 \text{ kNcm}^2$$

$$(EI)_{ey} = E_a I_y + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s$$

$$(EI)_{ey} = 21000 \times 1539 + 0,6 \times 1168 \times 65363,23 + 21000 \times 597,77$$

$$(EI)_{ey} = 90678721,6 \text{ kNcm}^2$$

Cálculo da força axial de flambagem elástica, na direção x e y, respectivamente:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 (EI)_{ex}}{l_x^2} = \frac{\pi^2 \times 152104100,8}{400^2} = 9382,55 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 (EI)_{ey}}{l_y^2} = \frac{\pi^2 \times 90678721,6}{400^2} = 5593,52 \text{ kN}$$

Cálculo do índice de esbeltez reduzido, na direção x e y, respectivamente:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{ex}}} = \sqrt{\frac{3806,87}{9382,55}} = 0,637$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{ey}}} = \sqrt{\frac{3806,87}{5593,52}} = 0,825$$

Para situação mais desfavorável da resistência de cálculo à compressão axial do pilar misto, tem-se:

Cálculo do fator de redução em função do índice de esbeltez:

$$\Phi_y = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right)$$

$$\Phi_y = 0,5 \left(1 + 0,49 (0,825 - 0,2) + 0,825^2 \right) = 0,993$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0$$

$$\chi = \frac{1}{0,993 + \sqrt{0,993^2 - 0,825^2}} = 0,647$$

Logo, a força axial resistente de cálculo é dada por:

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd}$$

$$N_{Rd} = 0,647 \times 3160,925 = 2045,12kN$$

Determinação da resistência de cálculo à flexo-compressão do pilar misto:

Força normal resistente de cálculo à compressão da seção transversal de concreto:

$$N_c = f_{cd1} A_c = 1,28 \times 836,68 = 1070,95kN$$

Momento fletor resistente de plastificação de cálculo:

$$M_{x,pl,Rd} = 32,28(497 - 29,25) + 0,5 \times 1,28(6201,02 - 1172,82) + 43,48(51,98 - 0)$$

$$M_{x,pl,Rd} = 20577,11kNcm$$

Momento fletor máximo resistente de plastificação de cálculo:

$$M_{x,max,Rd} = 32,28 \times 497 + 0,5 \times 1,28 \times 6201,02 + 43,48 \times 51,98$$

$$M_{x,max,Rd} = 22271,90kNcm$$

Com os valores acima é possível construir a curva de resistência do pilar misto e aferir o valor do momento resistente de cálculo levando em conta a sollicitação da força axial de 1100 kN.

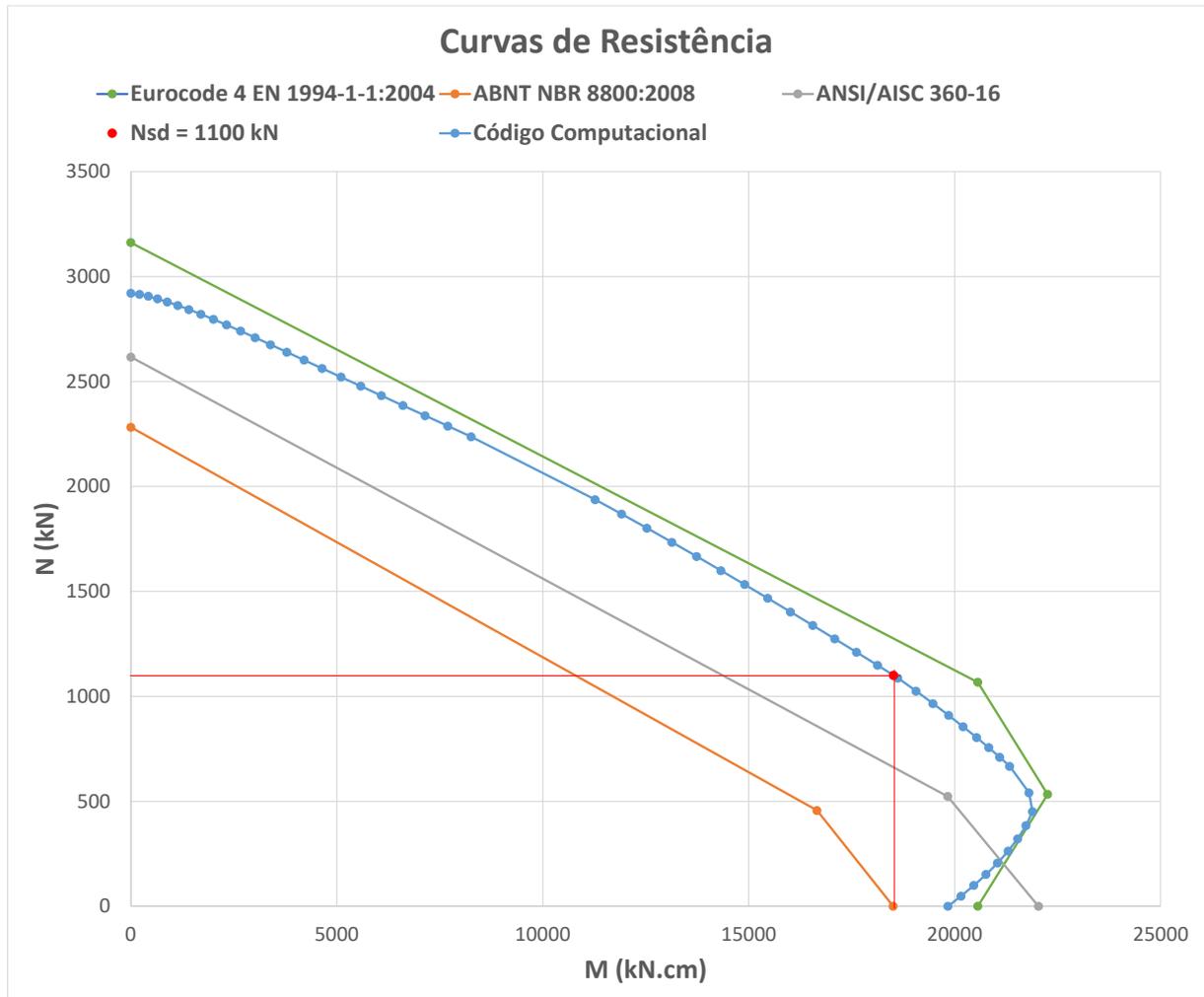
Verificação da resistência:

$$\frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \rightarrow \frac{10000}{20220} \leq 0,9 \rightarrow 0,49 \leq 0,9 \rightarrow ok$$

Curva de resistência baseada nos domínios de deformação do concreto

A Figura 8 apresenta a curva de resistência formada pelo código computacional, onde é possível aferir o valor do momento resistente de cálculo. Além disso, foi plotado as demais curvas concebidas pelos métodos normativos para efeitos de comparação.

Figura 8 – Curvas de resistências NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-16, Eurocode EM 1994-1-1:2004 e gerada pelo código computacional.



Fonte: Criado pelo autor.

$$M_{Rd} = 18517,61 \text{ kNcm} \leq M_{Sd} = 10000 \text{ kNcm} \rightarrow \text{ok}$$

4.3 Discussão

Nota-se que para as quatro metodologias de cálculo utilizada, o exemplo numérico atendeu os parâmetros de resistência do pilar. É possível observar que a curva de interação elaborada pelo código computacional possui padrão semelhante às normativas, estando em conformidade com a literatura. Além disso, pode-se dizer que essa metodologia fornece

resultados menos conservadores que as metodologias de cálculo utilizando os procedimentos da ABNT NBR 8800:2008 e da ANSI/AISC 360-16, isso se dá pelo fato que ambas as normas negligenciam o ganho de capacidade resistente da seção em função da compressão do concreto. Quando se trata da norma brasileira há uma redução ainda mais significativa em sua força axial resistente, pois ao considerar os efeitos de instabilidade por esbeltez o fator de redução da resistência axial é calculado levando em conta apenas o perfil metálico.

Comparando a curva de resistência baseada nos domínios de deformação do concreto com a curva gerada pelo método de dimensionamento do EN 1994-1-1:2004, o resultado da norma europeia, apesar de um pouco mais conservador, se mostrou bem próximo do resultado obtido pelo código computacional. Esse resultado bastante aproximado pode ser justificado pela forma simplificada de cálculo da norma europeia, uma vez que ela representa de forma bastante interessante, o comportamento da seção transversal levando em conta o aumento da capacidade resistente devido à compressão do concreto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo comparativo entre metodologias normativas prescritas para o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto. Para tal foram consideradas a norma nacional (ABNT NBR 8800:2008), americana (ANSI/AISC 360-16) e a europeia (EN 1994-1-1:2004). Adicionalmente foi feita a comparação de tais procedimentos com um processo baseado nos domínios de deformação do concreto, sendo esse menos conservador em virtude da consideração explícita das tensões, considerando a particularidade de cada material, na seção transversal.

Quando confrontado o resultado gerado pelo código computacional com as normas brasileira (ABNT NBR 8800:2008), americana (ANSI/AISC 360-16) e europeia (EN 1994-1-1:2008) pode ser observado que a metodologia utilizada no código é bem menos conservadora que a norma brasileira e americana, se tornando uma alternativa bastante econômica. Esse resultado conservador pode ser justificado pelo fato de ambas as normas não levarem em conta o aumento da capacidade resistente da seção em função da compressão do concreto.

Diferente das outras duas normas, a europeia apresentou ser uma solução mais conservadora que a utilizada no código, entretanto deve-se deixar claro que apesar dessa diferença, ambas as curvas demonstram resultados muito próximos. O motivo das envoltórias serem bem próximas foi o mesmo que sucedeu a diferença entre as outras curvas, tanto a norma europeia quanto o código proporcionaram resultados em que a contribuição do aumento de resistência da seção devida à compressão do concreto foi levada em conta.

6 REFERÊNCIAS

ACI 318. **Building code requirements for structural concrete an commentary.** *American Concrete Institute*, Detroit, MI, 2008.

AISC LRFD. **Specication for structural steel buildings.** *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL, 2016.

ANSI/AISC 360-16. **Specification for Structural Steel Buildings.** Chicago, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

CAMPOS, A. S. **Estudo sobre critérios de dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto.** Campinas, 2006.

CAVALCANTE, A. N. **Noções gerais de dimensionamento de pilar misto totalmente envolvido por concreto.** Fortaleza, 2018.

CHAVES, L. E. A. **Estudo de pilares de concreto armado e pilares mistos de aço e concreto totalmente revestidos.** Belo Horizonte, 2013.

EUROCODE 3: **Design of steel structure. Part 1-1: General rules and rules for buildings.** Brussels, 2003.

EUROCODE 4: **Design of composite steel and concrete structure. Part 1-1: General rules and rules for building.** Brussels, 2004.

FAKURY, Ricardo H.; CASTRO E SILVA, Ana Lydia R.; CALDAS, Rodrigo B. **Dimensionamento de Elementos Estruturas de Aço e Mistos de Aço e Concreto.** São Paulo, 2016.

LEMES, Í.J.M. **Análise avançada via MRPR de estruturas mistas de aço e concreto.** Ouro Preto, 2016.

NÓBREGA, A. P. M. **Análise do comportamento de pilares mistos aço-concreto em situação de incêndio.** Belo Horizonte, 2003.

SILVA, P. H. L. **Dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto.** São Paulo, 2012.