

Reliability of partially encased steel-concrete composite columns under eccentric loading

Confiabilidade de pilares mistos aço-concreto parcialmente revestidos em flexo-compressão



M. F. PEREIRA^a
margot.fabiana@gmail.com

A. T. BECK^a
atbeck@sc.usp.br

A. L. H. C. EL DEBS^a
analucia@sc.usp.br

Abstract

The Brazilian design code for composite buildings (NBR8800) has never been subject to a reliability-based calibration of the partial factors used in design. As a consequence, the level of structural safety achieved by using these factors is, in general, unknown. This paper presents a study of the reliability of partially encased steel-concrete composite columns, subject to compression and bending. Literature statistics are used to quantify uncertainty in strength of structural materials and in loads. Reliability indexes are evaluated, via FORM, for two ratios between dead and live loads, and for some values of load eccentricity. It was found that larger load eccentricity leads to a reduction in reliability indexes. These values are larger than minimum values recommended in international design codes; hence one concludes that design of such columns using NBR8800 leads to acceptable safety levels.

Keywords: reliability, composite column, structural safety.

Resumo

A norma brasileira que embasa o projeto estrutural de edifícios contendo elementos mistos (NBR8800) nunca passou pelo processo de calibração, baseada em confiabilidade, dos coeficientes parciais de segurança utilizados em projeto. Como consequência, o nível de segurança obtido com o uso destes coeficientes é, em geral, desconhecido. Este trabalho apresenta um estudo da confiabilidade estrutural de pilares mistos de aço-concreto, parcialmente revestidos e submetidos à flexo-compressão. Estatísticas da literatura são utilizadas para caracterizar as incertezas nas propriedades dos materiais constituintes e nas ações. Índices de confiabilidade (β) são avaliados, via FORM, para duas razões entre ação permanente e ação variável, e para alguns valores de excentricidade da ação vertical. Verifica-se que o índice de confiabilidade dos pilares mistos diminui com o aumento da excentricidade de projeto. Estes valores estão acima de índices de confiabilidade mínimos sugeridos em normas internacionais, o que sugere que o projeto utilizando a norma NBR8800 resulta em colunas mistas seguras.

Palavras-chave: confiabilidade; pilares mistos; segurança estrutural.

^a Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

1. Introdução

A demanda por sistemas construtivos rápidos e econômicos coloca os elementos mistos em destaque na indústria da construção civil, já que possuem vantagens construtivas e estruturais. Comparando-se as estruturas mistas com estruturas de concreto armado, verifica-se a possibilidade de redução ou dispensa de formas e escoramentos, redução de custos com materiais e mão de obra e aumento da precisão dimensional dos elementos. Os elementos mistos também podem ser facilmente pré-fabricados industrialmente, restando apenas as etapas de içamento e montagem para realização in-loco.

Entretanto, a falta de conhecimento das possibilidades de elementos mistos pelos engenheiros projetistas inibe uma maior utilização. Foi somente em 2008 que os elementos mistos obtiveram um embasamento normativo mais apropriado, com a NBR 8800 [1]. Os códigos normativos brasileiros para projeto de estruturas de edifícios são baseados no método dos estados limites, no qual coeficientes parciais de segurança são utilizados para estabelecer uma margem de projeto em relação a cada uma das maiores fontes de incerteza em projeto: as ações e as resistências dos materiais. Estes coeficientes têm o papel de garantir um nível de segurança adequado à estrutura projetada. Entretanto, as normas brasileiras de projeto estrutural, e em particular a NBR8800, nunca passaram pelo processo de calibração, baseada em confiabilidade, dos coeficientes parciais de segurança, tais quais suas equivalentes estrangeiras (ACI 318 [2], EN 1992 [3], EN 1994 [4], FIB [5]). O processo de calibração da norma NBR 8800 foi estudado em [6], mas os coeficientes sugeridos nunca foram incorporados à norma.

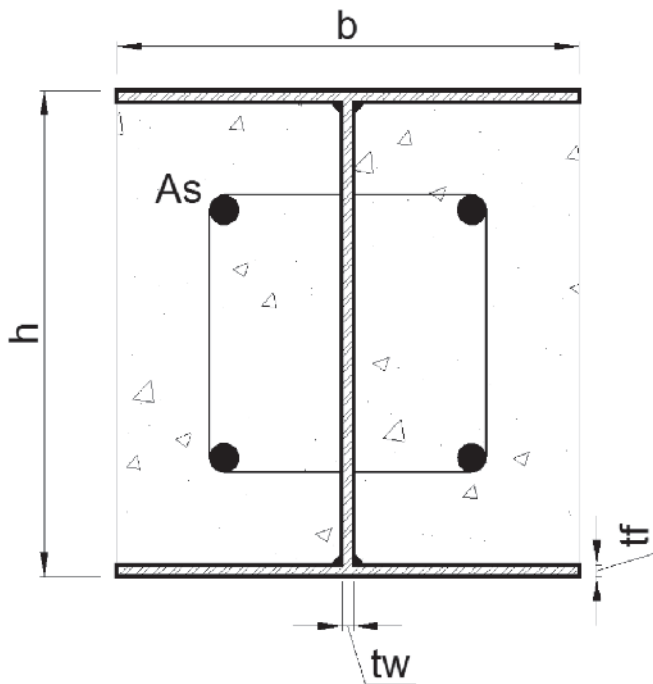


Figura 1
Seção transversal de pilar misto parcialmente revestido

Tabela 1

Coefficientes parciais de ações e resistência de acordo com a NBR 8800

Resistência			Combinação de ações Dead (D) + Live (L) 1,40D+1,5L
Aço	Concreto	Armadura	
1,1	1,4	1,15	

No caso específico dos elementos mistos, cuja normatização é recente, apenas algumas avaliações isoladas do nível de confiabilidade dos elementos são encontradas na literatura [7-11]. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma avaliação do nível de confiabilidade estrutural de pilares mistos parcialmente revestidos (Figura 1), submetidos a flexo-compressão, e projetados segundo os procedimentos previstos pela NBR 8800 [1].

2. Normas de projeto de estruturas de aço e concreto de edifícios

O projeto de elementos mistos através dos procedimentos contemplados pela NBR 8800 [1] utiliza os critérios de segurança definidos na NBR 8681 [12] e valores de ações definidos em normas específicas [13].

Os códigos normativos de projeto de estruturas de edifícios nacionais utilizam o método dos estados limites para garantir que as estruturas atendam aos requisitos básicos durante a vida útil. Assim, para cada estado indesejável da estrutura, em termos de segurança ou de serviço, uma equação de estado limite é escrita. Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura, quando sujeita às combinações mais desfavoráveis das ações previstas, e podem ser equacionados por desigualdades do tipo:

$$R_d \geq S_d \tag{1}$$

onde:

R_d representa os valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes obtidos pelos procedimentos normativos;

S_d representa os valores de cálculo dos esforços atuantes, obtidos com base nas combinações últimas de ações aplicáveis.

Os valores de cálculo das ações e resistência são obtidos a partir dos valores representativos, multiplicando-os pelos coeficientes parciais de ponderação. Em seguida, os esforços atuantes devem ser avaliados, considerando a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura [1], com combinações de ações que têm probabilidades não desprezáveis de atuarem simultaneamente (Tabela 1).

A determinação da capacidade resistente de pilares mistos submetidos ao efeito combinado de força axial de compressão e momento fletor, em relação a um ou aos dois eixos de simetria, podem ser obtidos, segundo a NBR 8800 [1], por meio de um modelo de cálculo simplificado, denominado Modelo de cálculo I, ou um modelo mais rigoroso, denominado Modelo de cálculo II. Ambos modelos consideram diagramas de interação, que simplificam a curva real de interação momento fletor vs. normal.

O modelo de cálculo I é análogo ao cálculo de pilares de aço isolados, incluindo apenas a influência do concreto entre as mesas do perfil de aço. A curva de interação entre força normal e o momento fletor é composta por duas retas como indicado na Figura 2a. Já no Modelo de cálculo II, (Figura 2b), a curva de interação é formada por três retas, as quais delimitam a região segura. Este modelo de cálculo é similar ao apresentado pelo EUROCODE 4 [4]. Em ambos modelos (I e II) a não linearidade geométrica na análise do pilar é considerada por meio da adição de um momento fletor complementar devido às imperfeições.

As principais equações do dimensionamento de pilares mistos parcialmente revestidos, segundo a NBR 8800 [1], são apresentadas nesta seção. Detalhes das formulações podem ser encontrados em [1]. A força normal resistente de projeto do pilar misto é dada pela Equação 2.

$$N_{Rd} = \chi(\lambda) n \left(\frac{f_y n A_a}{\gamma_a} + \alpha_1 \frac{f_c n A_c}{\gamma_c} + \frac{f_s n A_s}{\gamma_s} \right) \quad (2)$$

onde f_y é a tensão de escoamento do aço do perfil, f_c é a resistência a compressão do concreto, f_s é a tensão de escoamento do aço da armadura, A_a , A_c e A_s são as áreas do perfil metálico, do bloco de concreto e armaduras, respectivamente. Os coeficientes parciais de segurança do aço estrutural, do concreto e aço das armaduras são representados, respectivamente, por γ_a , γ_c e γ_s . O coeficiente α_1 é um valor constante considerado como 0.85 para pilares mistos parcialmente revestidos.

Finalmente, $\chi(\lambda)$ representa o fator de redução, dado em função do índice de esbelteza (λ) como indicado na equação (3).

$$\chi(\lambda) = \begin{cases} 0,658, \lambda^2 & \text{if } \lambda \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda^2} & \text{if } \lambda \geq 1,5 \end{cases} \quad (3)$$

Neste trabalho optou-se por realizar as análises utilizando o Mo-

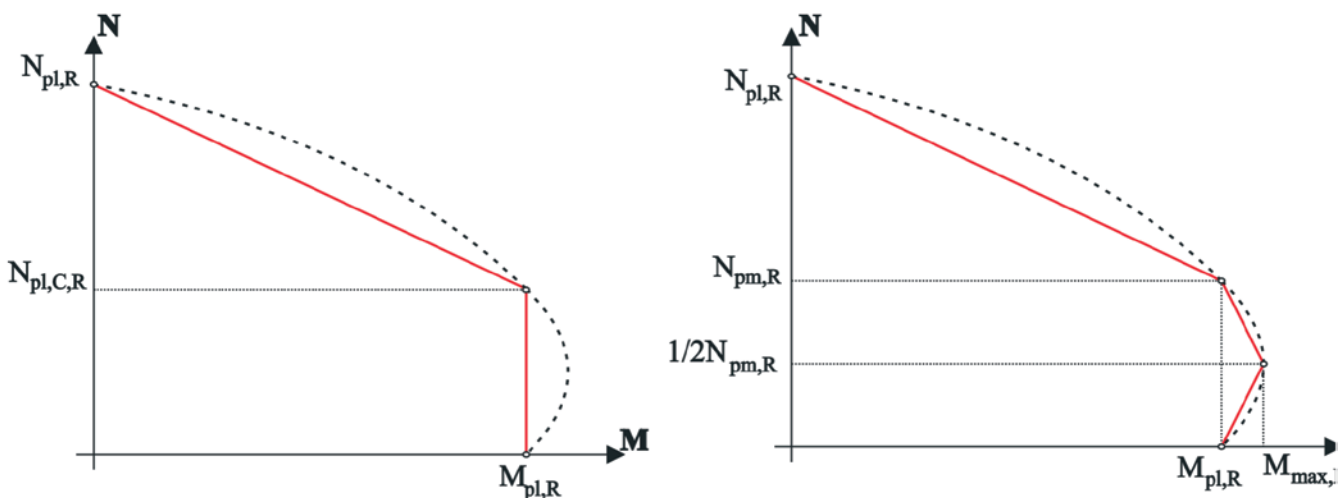


Figura 2
Curva de interação Momento vs. Normal para a) Modelo I b) Modelo II (4)

Tabela 2

Limites de aplicabilidade da NBR 8800

Item	Prescrição
Limite de índice de esbelteza λ	$\lambda < 2,0$
Dimensões da seção transversal	$0,2 \leq \frac{h_c}{b_c} \leq 5,0$
Instabilidade local	$\frac{b_f}{t} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ Pilares parcialmente revestidos

delo de cálculo II, cuja curva de interação é representada pela Equação (4), onde μ_x e μ_y representam fatores de interação entre momento fletor e normal.

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1,0 \quad (4)$$

onde, para cada um dos eixos considerados, tem-se $M_c = 0,9 M_{pl,Rd}$, sendo $M_{pl,Rd}$ calculado pela Equação (5).

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

Para fazer uso desses modelos, deve-se respeitar os limites de aplicabilidade do referido código normativo, como seções duplamente simétricas e outros itens citado na Tabela 2. Para casos que não respeitam estes limites, o EUROCODE 4 [4] apresenta o método geral de projeto.

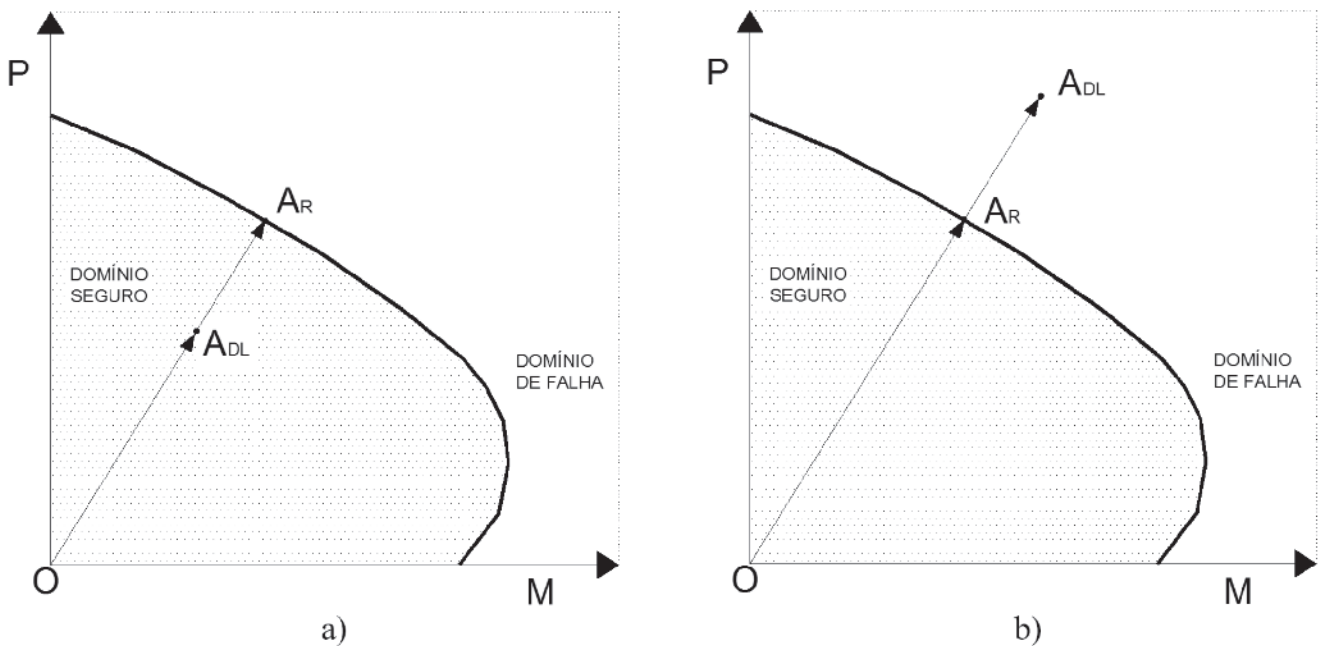


Figura 3
Diagrama de interação e equação de estado limite

3. Método de análise

Como visto, a resistência de um pilar misto depende das propriedades dos materiais e das características geométricas da seção transversal, porém tanto o comportamento do material como a geometria possuem incertezas.

Denomina-se por X_R o vetor das variáveis aleatórias que afetam a resistência da estrutura. Considera-se que estas variáveis sejam independen-

tes do tempo, isto é, que não haja degradação da resistência ao longo do tempo. Para um dado valor de X_R , a capacidade resistente do pilar pode ser avaliada pela curva de interação formada pelas coordenadas da força axial e momento fletor resistente para diferentes valores de excentricidade. Devido a relação existente entre força normal e momento fletor essa curva apresenta formato parabólico, mas como já comentado é possível utilizar curvas simplificadas composta por retas (Figura 2).

3.1 Equação de estado limite

Neste artigo é utilizada uma adaptação do método desenvolvido por Hong e Zhou [14] para pilares de concreto armado. Considera-se $P_R = p_R(X_R)$ como a representação da capacidade axial do pilar misto e $M_R = m_R(X_R)$ como representação do momento fletor resistente obtidos para um dado valor de X_R , de modo que os pares ordenados, denominado aqui por A_R , formem a curva que separa o domínio seguro do domínio de falha.

Denomina-se por X_{DL} o vetor que contém as variáveis aleatórias relacionadas aos carregamentos atuantes no elemento. Tem-se $X_{DL} = \{D, L, M_D, M_L\}$ onde D e L representam os carregamentos axiais devido a ações permanentes e variáveis, respectivamente, e M_D e M_L representam o momento fletor devido as ações permanentes e variáveis. Logo, o ponto A_{DL} , para o mesmo valor de excentricidade, é o efeito combinado da força axial e momento fletor devido às ações totais atuantes. Fica claro que a falha ocorre quando os segmentos $\overline{OA_{DL}} > \overline{OA_R}$, ou seja, quando o vetor A_{DL} entrar no domínio de falha (Figura 3).

A equação de estado limite $g(X_R, X_{DL})$ pode ser estabelecida com base na comparação do comprimento dos segmentos $\overline{OA_R}$ e $\overline{OA_{DL}}$:

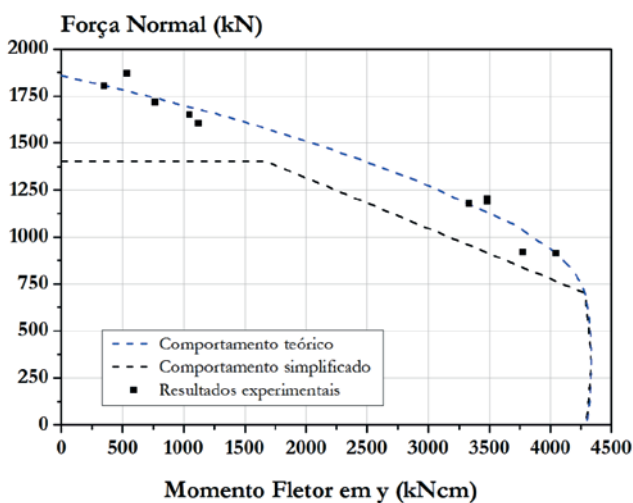


Figura 4
Resultados experimentais e resistência teórica segundo NBR 8800

Tabela 3

Características da seção transversal do pilar

Variável	Nominal	Média/nominal	COV	Tipo de distribuição
Resistência à compressão do concreto f_c	50 MPa	1.2	0.12	Normal
Tensão de escoamento do aço do perfil f_y	300 MPa	1.2	0.04	Normal
Tensão de escoamento do aço da armadura f_s	600 MPa	1.0	-	Determinístico
Módulo de elasticidade do aço E	200 GPa	1.0	-	Determinístico
Altura total da seção h	152 mm	1.0	-	Determinístico
Largura da mesa b	152 mm	1.0	-	Determinístico
Espessura da alma t_w	5.8 mm	1.0	-	Determinístico
Espessura da mesa t_f	6.6 mm	1.0	-	Determinístico
Área total de armadura	2.01 cm ²	1.0	-	Determinístico

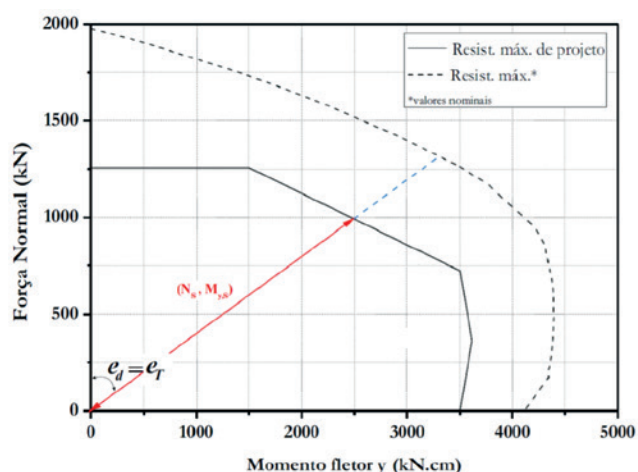
$$g(X_R, X_{DL}) = \left[P_R^2 + (M_R / h)^2 \right]^{1/2} - \left[(D + L)^2 + ((M_D + M_L) / h)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Com isto, a probabilidade de falha pode ser avaliada por meio de qualquer método de análise da confiabilidade estrutural, como FORM, SORM ou Simulação de Monte Carlo. Neste trabalho optou-se por utilizar o método FORM.

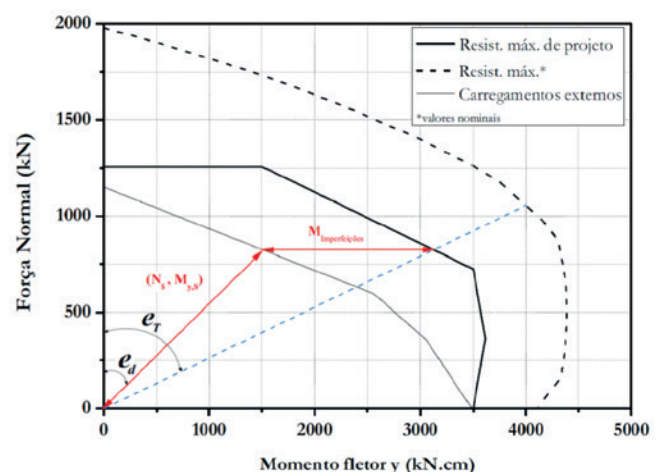
3.2 Erro de modelo

Uma fonte de incertezas relevante em problemas de confiabilidade estrutural é o chamando erro de modelo. Trata-se de uma medida da

diferença ou razão entre a capacidade resistente de um elemento estrutural, obtida através de ensaios, e a capacidade resistente prevista através de modelos de cálculo. Para o caso de pilares mistos sob carga centrada, existe na literatura informação abundante sobre erros de modelo [7, 8, 14]. No entanto, o mesmo não ocorre para o caso de carga excêntrica. Nossa busca na literatura mostrou-se infrutífera. Alguns resultados experimentais obtidos pelos autores, por ensaios de flexo-compressão em pilares curtos e esbeltos, demonstraram que o modelo da norma NBR 8800 [1] é bastante conservador para algumas situações, principalmente para maiores índices de esbeltez. A Figura 4 apresenta os resultados de capacidade resistente obtido para pilares medianamente esbeltos e curtos. Observa-se que os resultados experimentais apresentam pequena variabilidade, e estão próximos da curva que representa o modelo mecânico. Observa-se que os modelos de norma são



(a)



(b)

Figura 5

Estratégias de análise A) sem – e B) com – consideração da excentricidade adicional devido às imperfeições

Tabela 4
 Informações estatística para os carregamentos (16)

Carregamento	Media/nominal	COV	Distribuição
Força axial permanente	1.03	0.08	Normal
Momento fletor permanente	1.03	0.08	Normal
Força axial variável (extremo de 50 anos)	1.00	0.18	Gumbel
Momento fletor variável (extremo de 50 anos)	1.00	0.18	Gumbel

conservadores em relação aos resultados experimentais, especialmente o modelo que leva em conta imperfeições. Para cargas de pequena excentricidade, os valores normativos são especialmente conservadores. Já para maiores excentricidades, a variável erro de modelo apresenta média menor. Com esta análise, busca-se mostrar que o erro de modelo, em relação ao modelo mecânico, tem média próxima de um e pequeno desvio-padrão. Isto significa que esta variável teria efeito limitado na análise de confiabilidade que segue. Em função do pequeno número de exemplares físicos ensaiados, mostrou-se inviável caracterizar estatisticamente a variável erro de modelo, para incluí-la na análise.

4. Análise numérica e resultados

Foi avaliada a confiabilidade de pilares mistos com seção transversal conforme a Figura 1, considerando um pilar com índice de esbelteza reduzido de 0,41. As características geométricas e mecânicas necessárias para definição da capacidade resistente do pilar misto avaliado são apresentadas na Tabela 3: trata-se de um pilar composto por concreto com resistência nominal de 50 MPa e armação CA-50. Além disso, a Tabela 3 traz as informações estatísticas correspondentes. Vale salientar que para as variáveis adotadas como determinísticas os valores indicados na Tabela

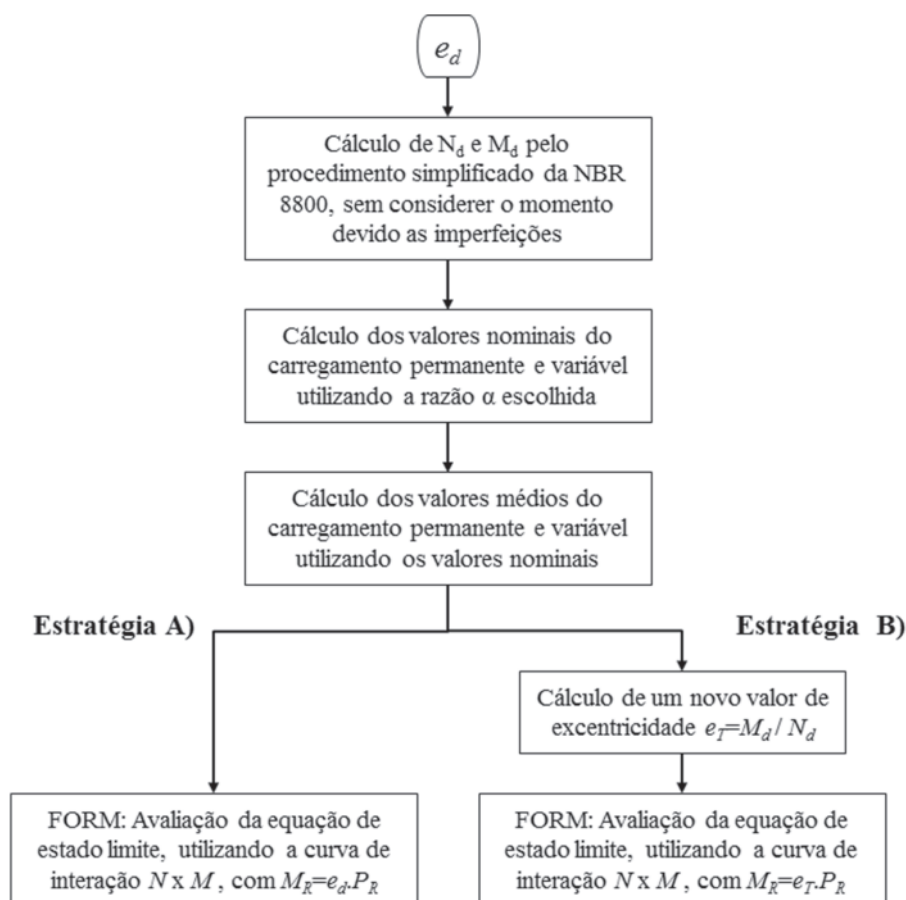


Figura 6
 Fluxogramas para as estratégias de análise

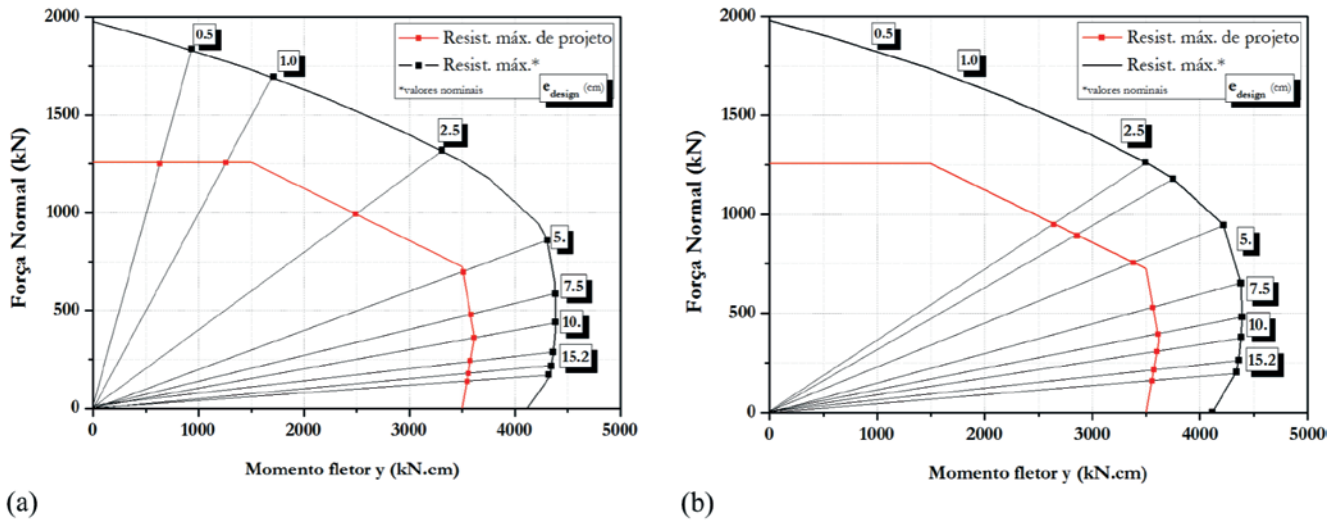


Figura 7

Diagramas esforço normal x momento fletor para as estratégias de análise: a) A e b) B

3 correspondem aos valores obtidos por ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais. Alguns aspectos da análise devem ser salientados:

- a) incertezas associadas às dimensões da seção transversas foram negligenciadas, pois seus efeitos na confiabilidade estrutural são usualmente baixos;
- b) as informações estatísticas assumidas para as variáveis aleatórias foram retiradas da literatura [15].

Na condição usual de projeto, dado o carregamento, o elemento estrutural é dimensionado de forma a suportar este carregamen-

to. Em análise de confiabilidade, é mais fácil, mas equivalente, adotar um processo inverso: dada uma seção transversal mista aço-concreto, “projeta-se” o carregamento admissível, segundo a norma (Eq. 1). Um mesmo carregamento admissível, ou de projeto, pode ser obtido a partir de diferentes combinações entre ação permanente e ação variável. Neste trabalho, denota-se por α a razão entre os valores nominais das ações variáveis e das ações permanentes ($\alpha = L_v/D_p$). Esta razão caracteriza as estruturas ditas pesadas ($\alpha \ll 1.0$) e as estruturas leves ($\alpha \geq 1.0$). Neste trabalho, são considerados dois valores, $\alpha = 0.25$ e $\alpha = 1.0$. Como se trata de

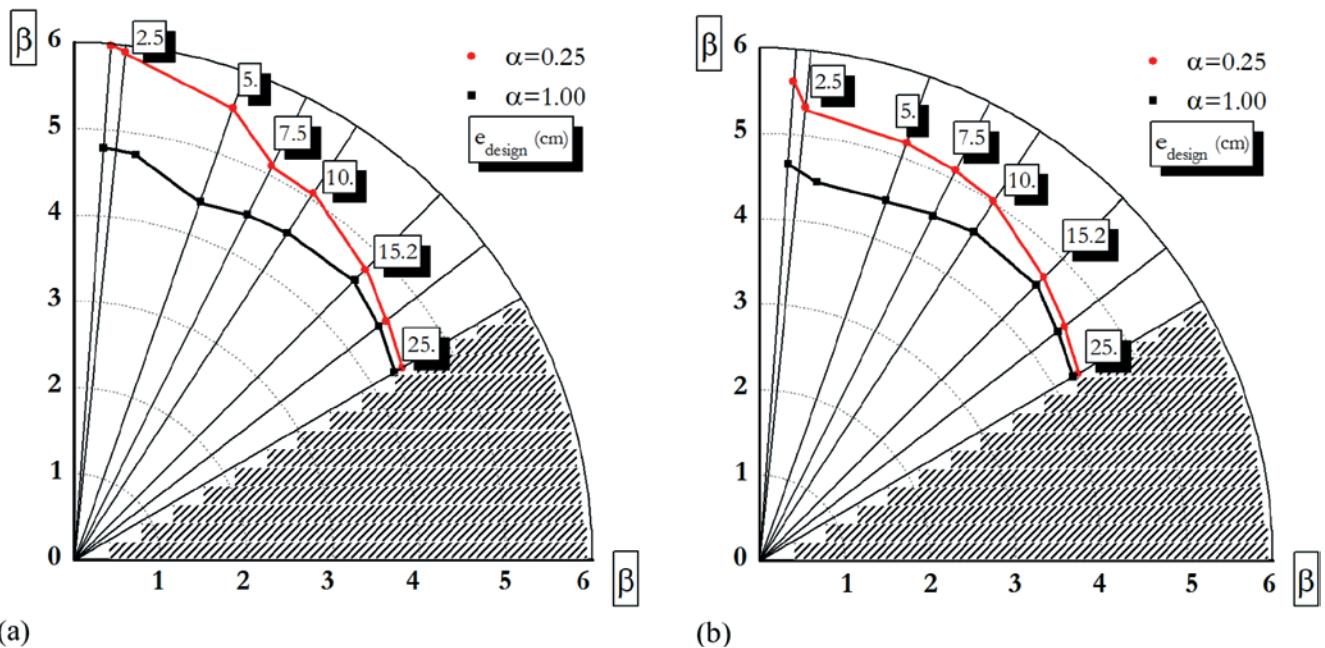


Figura 8

Índices de confiabilidade para as estratégias a) A e b) B

Tabela 5
Índices de confiabilidade

Excentricidade de projeto	Excentricidade relativa	Índice de confiabilidade β			
		Estratégia A		Estratégia B (com excentricidade adicional devido a imperfeições)	
$e_{design} \cdot e_{design}$ (cm)	e/h	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 1.00$	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 1.00$
1.0	0.007	5.98	4.79	5.62	4.65
2.5	0.015	5.92	4.75	5.33	4.48
5.0	0.035	5.55	4.40	5.18	4.46
7.5	0.050	5.11	4.48	5.11	4.51
10.0	0.065	5.07	4.52	5.01	4.59
15.2	0.100	4.76	4.59	4.69	4.56
25.0	0.165	4.40	4.44	4.31	4.25

pilares sob carga excêntrica, a mesma razão é admitida entre os valores nominais dos momentos fletores (M_{Dn} e M_{Ln}). O valor da excentricidade de projeto é dado por:

$$e_{design} = \frac{(1,4M_{Dn} + 1,5M_{Ln})}{(1,4D_n + 1,5L_n)} \quad (7)$$

Definida a seção transversal, a razão de carregamento e a excentricidade de projeto, encontra-se os valores nominais dos carregamentos (D_n , L_n , M_{Dn} e M_{Ln}). A partir destes valores são construídas as distribuições de probabilidade associadas as ações (Tabela 4), conforme Nowak [16].

A correlação entre as variáveis aleatórias esforço axial (D_n e L_n) e momento fletor (M_{Dn} e M_{Ln}) não é uma questão bem elucidada na literatura. É evidente que existe uma correlação positiva entre estas variáveis, porém não se pode afirmar que haja uma correlação perfeita, pois nem sempre os momentos fletores são originados de excentricidades reais no esforço axial. Assim, neste trabalho op-

tou-se por considerar um coeficiente de correlação linear de 0.5. O procedimento de análise baseado em Hong e Zhou [4] segue quatro passos:

1. Determinação da força axial de projeto e momento fletor de projeto do pilar misto com as características da Tabela 3 utilizando duas abordagens: Estratégia A - os procedimentos do Modelo II da NBR 8800 sem a consideração de imperfeições e Estratégia B - o Modelo II com a consideração de um momento adicional devido às imperfeições [1] (Figura 5);
2. Cálculo dos valores de L_n , D_n , M_{Ln} e M_{Dn} utilizando a razão α escolhida e o carregamento apresentado na Tabela 1;
3. Cálculo dos valores médios do carregamento permanente e variável utilizando os valores nominais (passo 2) e as razões apresentadas na Tabela 4;
4. Cálculo do índice de confiabilidade β utilizando o FORM e a equação (6).

Este procedimento para cada uma das estratégias é mostrado por meio de um fluxograma na Figura 6.

A Figura 7 apresenta, para as duas estratégias abordadas neste trabalho, o diagrama de iteração Força Normal vs. Momento fletor para o pilar avaliado. A curva “Resistência máxima de projeto” representa os pares ordenados obtidos no passo 1, para diferentes valores de excentricidades de projeto, mas reduzidos pelos coeficientes parciais de segurança. Já a curva “Resistência Máxima” representa os valores (nominais) que este par ordenado poderia atingir se não houvesse os fatores parciais de segurança. Vale salientar que na estratégia B ao se adotar um valor adicional de momento fletor devido às imperfeições modifica-se a excentricidade inicial, a qual passa a ter um valor maior, denominado excentricidade total.

Os índices de confiabilidade β obtidos para as duas razões de carregamento e para oito valores da excentricidade de projeto são apresentados na Figura 8. É possível observar que, apesar das diferenças nos procedimentos de análise adotados nas estratégias A e B, os índices de confiabilidade β resultaram da mesma ordem de grandeza, com valores ligeiramente maiores para a estratégia A, que não leve em conta as imperfeições geométricas.

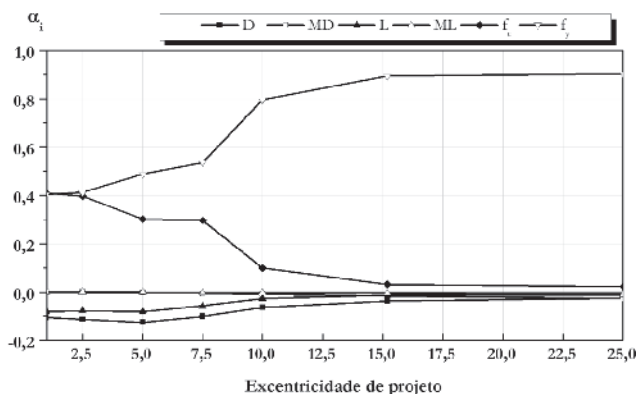


Figura 9
Fatores de sensibilidade das V.A.s do problema, estratégia B, $\alpha = 0.25$

Para as duas análises realizadas, observa-se que os valores de β diminuem à medida que o valor da excentricidade de projeto aumenta. Como os procedimentos de cálculo de pilares consideram predominantemente os esforços axiais de compressão, este resultado é coerente. Outro aspecto observado refere-se ao fato de, apesar da diminuição do índice de confiabilidade β , este se mantém acima de 4 para qualquer valor de excentricidade (Tabela 5). Este resultado pode ser uma consequência de não se ter considerado o efeito dos erros de modelo. Erros de modelo costumam variar em função da esbelteza do pilar [7,8] e, supõe-se, devem variar em função da excentricidade do carregamento.

Os resultados também mostram que os valores de β aumentam com a diminuição da relação entre ações variáveis e permanentes (relação α). Este resultado é esperado, pois os coeficientes de variação da ação permanente são menores que da ação variável. Portanto, quando a parcela de ação permanente aumenta, diminui a incerteza do problema, e aumentam os índices de confiabilidade. Um dos sub-produtos de uma análise de confiabilidade via FORM são os coeficientes de sensibilidade, que medem a importância, ou contribuição relativa, de cada uma das variáveis aleatórias ($\sum(\alpha)^2=1$). A Figura 9 apresenta os coeficientes de sensibilidade obtidos pela estratégia b). Verifica-se que a contribuição relativa de cada uma das variáveis varia com o valor de e_{design} adotado, aumentando a contribuição relacionada com o momento fletor e diminuindo a relacionada com a força axial. Além disso, com o aumento da excentricidade, a variável aleatória de resistência do aço passa a comandar a probabilidade de falha, chegando a um valor de $\alpha_i = 0,559$ (Figura 9). Comportamento similar foi observado para a estratégia de análise A.

5. Conclusões

Este trabalho buscou avaliar a segurança de colunas mistas de aço e concreto parcialmente revestidas, projetadas segundo a norma NBR 8800, e sujeitas a carregamento excêntrico. A segurança foi avaliada através da teoria de confiabilidade estrutural, e medida em termos do índice de confiabilidade β . Verificou-se que:

- A confiabilidade dos pilares está relacionada com o valor de excentricidade de projeto, diminuindo à medida que esta aumenta;
- O valor médio encontrado para o índice de confiabilidade β pela Estratégia A é igual a 4,57 para carregamentos com razão entre ações variáveis e ações permanentes igual a 1, e índice de confiabilidade médio de 5,26 para razão de carregamento igual a 0,25. Já para a estratégia B estes valores são 4,50 e 5,03; respectivamente;
- O projeto utilizando os coeficientes parciais de segurança preconizados na Norma Brasileira NBR8800 levam a níveis aceitáveis de segurança, mesmo com grande excentricidade;
- Sugere-se a coleta e realização de mais resultados experimentais para a caracterização estatística da variável erro de modelo, para o caso de pilares mistos sujeitos a cargas excêntricas.

6. Nomenclatura

A_a	– Área de aço
A_c	– Área de concreto
A_s	– Área da seção transversal da armadura
b_c	– Largura da seção de concreto

b_f	– Largura da mesa
E	– Módulo de elasticidade do aço
f_{cd}	– Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{yd}	– Resistência de cálculo ao escoamento do aço
f_{sd}	– Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura
h_c	– Altura da seção de concreto
$M_{tot,Sd}$	– Momentos fletores solicitantes de cálculo totais
$M_{pl,Rd}$	– Momento de plastificação
$N_{pl,Rd}$	– Força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total
t	– Espessura da chapa de aço
Z	– Módulo de resistência plástico
λ	– Índice de esbelteza
μ	– Fator de interação
χ	– Fator de redução calculado de acordo com o índice de esbelteza

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP e processo nº 2014/12694-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro.

8. Referências bibliográficas

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Rio de Janeiro, 2008.
- [2] American Concrete Institute. ACI 318R-95: building code requirements for structural concrete. Farmington Hills; Detroit, 1995.
- [3] Comité Européen de Normalisation. EN 1992-1-2: Design of concrete structures. General rules. Structural fire design, Brussels, 2004.
- [4] Comité Européen de Normalisation. EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures. General rules and rules for buildings, Brussels, 2004.
- [5] Comité Euro-international du Béton. CEB-FIB Model Code 1990. London, Thomas Telford, 1993.
- [6] Beck AT, Souza Jr. AC, 2010: A first attempt towards reliability-based calibration of Brazilian structural design codes. J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering 32, 119 - 127.
- [7] Oliveira WLA, Beck AT, Debs ALHC, 2008: Safety evaluation of circular concrete-filled steel columns designed according to Brazilian building code NBR 8800:2008. IBRACON Structures and Materials Journal 1, 212 - 236.
- [8] Beck AT, Oliveira WLA, DeNardim S, ElDebs ALHC, 2009: Reliability-based evaluation of design code provisions for circular concrete-filled steel columns. Engineering Structures 31, 2299-2308.
- [9] Vincent R, Tremblay R. "An Innovative Partially Composite Column System for High-Rise Buildings", Proceedings, North American Steel Construction Conf., Fort Lauderdale, Florida, 30-3 – 30-17, 2001.

- [10] Chicoine T, Tremblay R, Massicotte B. "Long-term Behavior and Strength of partially encased composite columns made with built-up steel shapes", *Journal of Structural Engineering, Canada*, 129(2), 141-150, 2003.
- [11] Tremblay R, Chicoine T, Massicotte B. "Design equation for the capacity of partially encased non-columns" *Proceedings, Composite Construction in steel and concrete IV*, ASCE, Reston, Virginia, 2002.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8681:2003: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003. (versão corrigida: 2004).
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6120:1980: cargas para cálculo de estruturas de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 1980 (versão corrigida: 2000).
- [14] Hong, H.P. and Zhou, W. 1999. Reliability evaluation of RC columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 784-790. Melchers, 1999.
- [15] Nowak, A. S.; Szerszen, M. Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1 – Statistical models for resistance. *ACI structural Journal*, New York, v. 100, n. 3, p. 377-382, 2003.