Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72646

ANÁLISE DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO PARA PILARES MISTOS PARCIALMENTE REVESTIDOS

ANALYSIS OF DESIGN MODELS FOR PARTIALLY ENCASED COMPOSITE COLUMNS

Bruno B. Marques [1]
Fernanda G. B. S. Oliveira [1]
Tainá M. Borghi [1]
Margot F. P. Milani [2]
Ana Lúcia H. C. El Debs [1]

Resumo: Novas propostas para a produção de pilares mistos têm sido objeto de pesquisas recentes, como o uso de agregados reciclados e de fibras de aço no concreto. Ainda não previstas nas normas vigentes, elas necessitam de validação diante dos modelos de dimensionamento. Este trabalho comparou os resultados experimentais de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto reforçado com fibras de aço e com concreto de agregados reciclados às resistências de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008) e o EN-1994-1-1 (2004). Os modelos normativos previram satisfatoriamente a resistência dos exemplares, com maiores discrepâncias para os pilares esbeltos. Foi verificada a relevância da consideração da excentricidade acidental e dos efeitos de segunda ordem para obtenção de resultados representativos.

Palavras-chaves: Pilares mistos; Concreto com fibras; Agregado reciclado.

Abstract: *New methodologies for producing composite columns have been the subject of recent research, such as recycled aggregates and steel fibers' incorporation into concrete. Not yet included in current standards, they need validation through design models. This work compared the experimental results of partially encased composite columns with steel fiber reinforced concrete and recycled aggregate concrete to the resistance according to the ABNT NBR 8800 (2008) and EN-1994-1-1 (2004). The design models yielded satisfactorily prediction for the resistance, with higher discrepancies for slender columns. Furthermore, the imperfection eccentricity and the second-order effects must be considered to obtain representative results.*

Keywords: *Composite columns; Steel fiber-reinforced concrete; Recycled aggregate.*

[1] *Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Brasil, email: brunobm@usp.br, fernanda.gabriella@alumni.usp.br, tainaborghi@usp.br, analucia@sc.usp.br*
[2] *Universidade Federal de São Carlos, Campus São Carlos – Brasil, email: margot@ufscar.br*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

1 Introdução

A associação do aço e do concreto em seções mistas de pilares permite obter elementos de elevada resistência, sendo o concreto capaz de reduzir os problemas com instabilidades locais e globais das seções aço. O uso pilares mistos parcialmente revestidos (PMPR) tem sido uma solução explorada em diversos trabalhos científicos (Prickett; Driver, 2006; Pereira; De Nardin; El Debs, 2020; Zhou et al., 2024). Estudos recentes de Pereira (2017) e Marques (2022) investigaram alternativas à proposta de PMPR apresentada na ABNT NBR 8800 (2008) e no EN-1994-1-1 (2004) que está ilustrada na Figura 1. Pereira (2017) estudou substituir o reforço convencional de barra de aço no concreto por telas soldadas e por fibras de aço distribuídas no concreto. Marques (2022), por sua vez, investigou o impacto do uso de concreto com agregados reciclados de concreto (ARC) com e sem reforço de fibras de aço. Ambos os estudos obtiveram desempenhos satisfatórios dos elementos, observando pequenos desvios no comportamento do elemento em função dos novos materiais empregados.

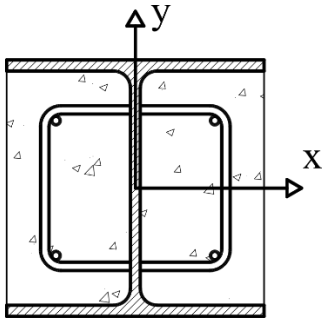

Figura 1. Seção transversal típica de um PMPR

Todavia, a aplicação dessas novas propostas depende não apenas de seu bom desempenho, mas também da capacidade dos modelos teóricos preverem o seu comportamento. Dessa forma, esse trabalho comparou as previsões das resistências obtidas pelos métodos de dimensionamento da ABNT NBR 8800 (2008) e do EN-1994-1-1 (2004) com os resultados experimentais dos PMPR produzidos com concreto reforçado com fibras e com concreto de ARC com e sem fibras que foram ensaiados por Pereira (2017) e Marques (2022).

2 Análise de modelos de dimensionamento

Tanto a ABNT NBR 8800 (2008) quanto o EN-1994-1-1 (2004) consideram que a contribuição individual de cada material permite determinar a resistência do pilar misto, sendo admitido para isto a plastificação total da seção transversal. A resistência do elemento à compressão pode ser determinada por meio da Equação (01), em que χ é fator de redução da resistência à compressão para o modo de flambagem relevante. Nas equações apresentadas a seguir, os índices “a”, “c” e “s” fazem referência ao perfil de aço estrutural, ao concreto e ao aço das armaduras do concreto. Assim, na Equação (01) os termos f_{ik} representam as resistências características dos materiais, γ_i representam os coeficientes de segurança parciais dos materiais e A_i representam as áreas dos materiais na seção transversal.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd} = \chi\left(\frac{f_{yk}A_a}{\gamma_a} + \alpha_B\frac{f_{ck}A_c}{\gamma_c} + \frac{f_{sk}A_s}{\gamma_s}\right), \alpha_B = 0{,}85 \quad (01)$$

A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008) dispõe de dois métodos simplificados de dimensionamento para elementos submetidos à flexo-compressão. O Modelo II (MII), o mais rigoroso, será abordado. Nesse modelo, as Equação (02) e (03) devem ser atendidas, sendo que a última considera a interação entre esforço normal e momentos fletores. Nessas equações, N_{Sd} é a normal solicitante de projeto, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos solicitantes de projeto em cada direção e os parâmetros μ_x e μ_y são fatores relacionados ao dimensionamento de elementos submetidos à flexo-compressão obtidos em relação a cada eixo.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \leq 1 \quad (02)$$

$$\frac{M_{x,Sd}}{0{,}9\mu_x M_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{0{,}9\mu_y M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (03)$$

O EN-1994-1-1 (2004) também dispõe de dois métodos de dimensionamento para elementos submetidos à flexo-compressão, sendo abordado aqui o Modelo Simplificado (MS). No MS, além da Equação (02), as Equação (04) e (05) também devem ser atendidas no dimensionamento. O coeficiente α_{CM} depende da classe de resistência do aço, devendo ser tomado como 0,9 para $235 \leq f_y \leq 355$ MPa e 0,8 para $420 \leq f_y \leq 460$ MPa.

$$\frac{M_{i,Sd}}{\alpha_{CM}\mu_i M_{pl,Rd}} \leq 1, i = x, y \quad (04)$$

$$\frac{M_{x,Sd}}{\mu_x M_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{\mu_y M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (05)$$

O momento resistente plástico ($M_{pl,Rd}$) apresentado nas equações anteriores pode ser determinado pela Equação (06). Na Equação (06), Z_i representam os módulos resistentes plásticos das seções dos materiais, enquanto Z_{in} são os módulos resistentes plásticos em relação à linha neutra da seção.

$$M_{pl,Rd} = f_{yd}(Z_a - Z_{an}) + 0{,}5f_{cd1}(Z_c - Z_{cn}) + f_{sd}(Z_s - Z_{sn}) \quad (06)$$

Os momentos devido às imperfeições iniciais podem ser obtidos por meio das Equação (07) e (08), nas quais L_x e L_y são os comprimentos de flambagem dos pilares em cada direção, e_{imp} é a excentricidade devido às imperfeições geométricas iniciais e $N_{e,eff}$ é a força crítica de flambagem elástica calculada com a rigidez à flexão equivalente da seção composta. Além disso, o EN-1994-1-1 (2004) também amplifica o momento fletor solicitante (M_{Sd}) pelo fator k da Equação (09), em que β depende da distribuição do diagrama de momentos fletores ao longo do comprimento do elemento. Para todos os casos analisados nesse trabalho o valor de β é igual a 1,0.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

$$M_{x,imp,Sd} = N_{Sd} e_{imp,y} = \frac{N_{Sd} L_x}{200\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e,eff}}\right)} \quad (07)$$

$$M_{y,imp,Sd} = N_{Sd} e_{imp,x} = \frac{N_{Sd} L_y}{150\left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e,eff}}\right)} \quad (08)$$

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e,eff}}} \quad (09)$$

Na Figura 2 são comparadas as curvas de interação de ambas as normas, sendo compostas por múltiplos segmentos lineares, com as curvas teóricas considerando a plastificação total da seção transversal. A curva de interação da ABNT NBR 8800 (2008) pode assumir tanto o formato tri-linear quanto o formato bi-linear (A-B-C) dependendo das propriedades seção transversal e das resistências dos materiais.

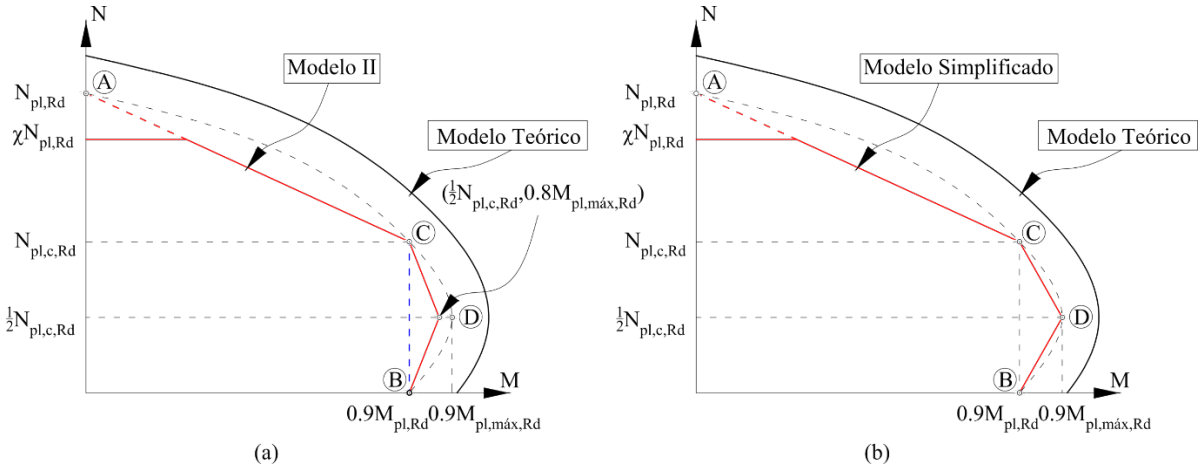

Figura 2. Curvas de interação Esforço normal vs. Momento fletor (a) da ABNT NBR 8800 (2008) e do EN-1994-1-1 (2004)

2.1 Determinação da resistência dos elementos

As análises comparativas desse estudo foram realizadas empregando o código inicialmente desenvolvido por Pereira (2017) para determinar a resistência de PMPR de acordo com a ABNT NBR 8800 (2008). O código foi posteriormente adaptado por Marques (2022) para permitir o dimensionamento de acordo com o EN-1994-1-1 (2004). As quatro etapas do código estão esquematicamente representadas na Figura 3. A Tabela 1 apresenta os dados experimentais obtidos pelos estudos conduzidos por Pereira (2017) e Marques (2022).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

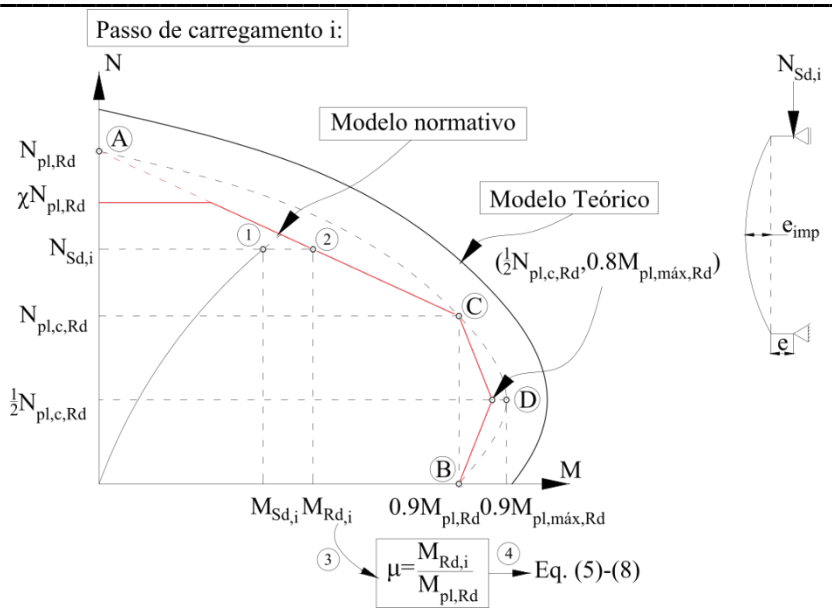

Figura 3. Esquema do funcionamento do código

Tabela 1 – Propriedades dos modelos de Pereira (2017) e Marques (2022)

Exemplar	Tipo de concreto	f_a (MPa)	f_c (MPa)	f_s (MPa)	$L_x=L_y$ (mm)	$F_{máx}$ (kN)	$M_{x,máx}$ (kNcm)	$M_{y,máx}$ (kNcm)
P-E0-S-C	Comum	385	36,7	524	722	1803,96	-	709
P-E0-S-F	Fibras	385	34,8	-	722	1648,91	-	795
P-EY25-S-C	Comum	385	36,7	524	722	1360,79	4137	-
P-EY25-C-F	Fibras	385	34,8	-	722	1336,30	4040	-
P-EX25-S-C	Comum	385	36,7	524	722	1189,03	-	3720
P-EX25-S-F	Fibras	385	34,8	-	722	1178,12	-	3572
P-E0-L-C	Comum	385	36,7	524	2122	1604,28	-	1442
P-E0-L-F	Fibras	385	34,8	-	2122	1717,36	-	1109
P-EX25-L-C	Comum	385	36,7	524	2122	913,27	-	4229
P-EX25-L-F	Fibras	385	34,8	-	2122	823,31	-	3580
M-E0-S-C	Comum	378	39,1	595	722	1696,37	-	945,56
M-E0-S-AR	ARC	378	36,7	595	722	1697,59	-	1038,76
M-E0-S-ARF	ARC+Fibras	378	34,7	-	722	1742,33	-	46,52
M-EX25-S-C	Comum	378	39,1	595	722	1138,14	-	3072,98
M-EX25-S-AR	ARC	378	36,7	595	722	1163,47	-	3151,72
M-EX25-S-ARF	ARC+Fibras	378	39,1	-	722	1083,35	-	2961,55

Fonte: Elaborada pelos autores.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

Na nomenclatura, os prefixos P e M indicam o trabalho de origem, seguido da magnitude da excentricidade E em mm (0 ou 25 mm), a direção da excentricidade (X – menor inércia e Y – maior inércia), do comprimento (S – curtos e L – longos) e por último há uma referência ao tipo de concreto. Em todas as análises realizadas, os coeficientes de segurança parciais e o fator α_B da Equação (01) foram adotados como 1,0.

3 Resultados e discussões

As previsões para a força e momento fletor de pico dos modelos estão apresentadas nas Figura 4 e 5. Estão apresentados também as previsões desconsiderando a excentricidade devido às imperfeições geométricas, identificadas como "S/I", para avaliar o seu impacto na resposta de cada modelo.

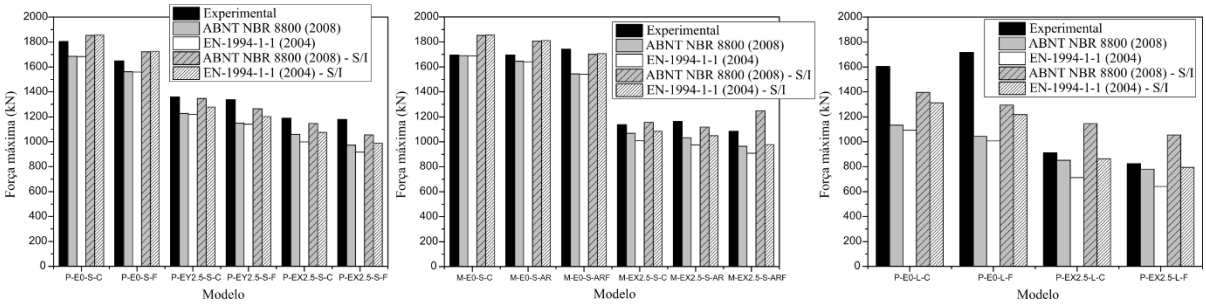

Figura 4. Comparação das previsões da força máxima dos modelos de dimensionamento para: (a) os pilares curtos de Pereira (2017), (b) os pilares curtos de Marques (2022), (c) os pilares longos de Pereira (2017)

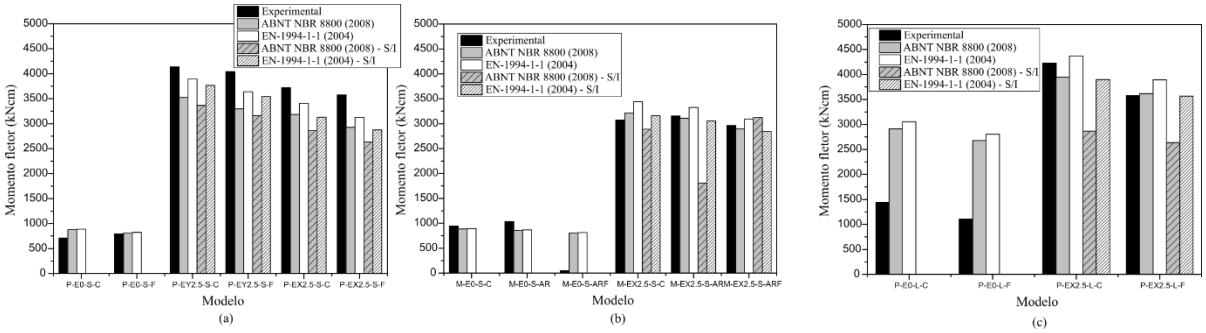

Figura 5. Comparação das previsões do momento fletor máximo dos modelos de dimensionamento para: (a) os pilares curtos de Pereira (2017), (b) os pilares curtos de Marques (2022), (c) os pilares longos de Pereira (2017)

Os dois modelos levam à valores similares, o que pode ser explicado pela semelhança entre as formulações, e conseguem prever satisfatoriamente a resistência dos pilares independentemente do concreto empregado. Nos pilares curtos e com excentricidade inicial nula, os valores previstos por ambos os códigos são praticamente iguais, o que se deve principalmente à excentricidade devido às imperfeições geométricas serem as mesmas em ambos os códigos e ao fato de não haver uma excentricidade inicial no carregamento. O EN-1994-1-1 (2004) maximiza tanto o momento de primeira ordem ($M^I=N_{Sd}e$) quanto o momento devido às imperfeições geométricas ($M_{imp}=N_{Sd}e_{imp}$) pelo fator k da Equação (09), enquanto a ABNT NBR 8800 (2008) maximiza apenas no segundo caso. Isso fica claro quando são observados os resultados para os exemplares submetidos à flexo-compressão, em que há maior discrepância entre os resultados de cada modelo, principalmente para a flexão no eixo

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

de menor inércia. Isso se deve ao valor da $N_{e,eff}$ ser consideravelmente menor, o que acaba trazendo maior relevância aos efeitos de segunda ordem simulados pelo fator k.

Os maiores desvios nas previsões em relação aos valores de referência ocorrem para os pilares de maior esbeltez, o que pode ser atribuído às imperfeições geométricas impostas excederem as observadas nos modelos físicos. O impacto das imperfeições geométricas fica mais evidente ao observar a Figura (6).

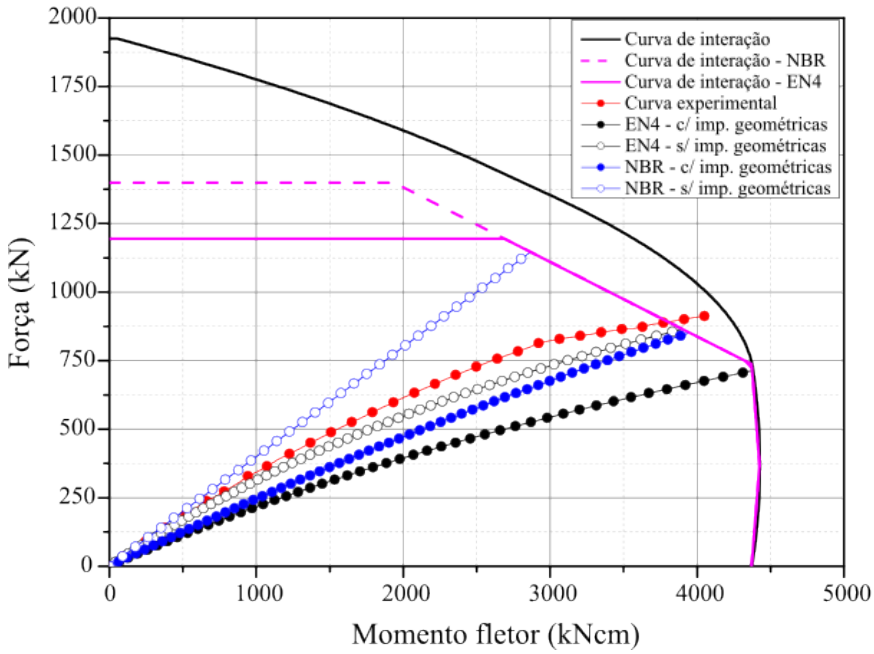

Figura 6. Impacto das imperfeições geométricas no pilar P-EX25-L-C

A curva que mais se assemelha ao resultado experimental é a do EN-1994-1-1 (2004) sem as imperfeições, o que é possível em função do fator k que maximiza o M^I. A curva da ABNT NBR 8800 (2008) se distância completamente da experimental quando as imperfeições não são consideradas já que a resposta se torna linear (ou seja, sem a consideração dos efeitos de segunda ordem, o que eleva o esforço normal resistente em função do menor momento fletor atuante. Ao empregar as imperfeições no modelo, a ABNT NBR 8800 (2008) se aproxima do comportamento da norma europeia sem a consideração das imperfeições e simula satisfatoriamente a resistência do modelo experimental. Já no caso do EN-1994-1-1 (2004), como tanto o momento M^I quanto o M_{imp} são maximizados pelo fator k, a norma europeia leva a um resultado mais conservador, com diminuição do esforço normal resistente em função do maior momento fletor atuante.

4 Conclusões

Uma análise da capacidade dos modelos teóricos preconizados na ABNT NBR 8800 (2008) e no EN-1994-1-1 (2004) foi apresentada, tendo sido observada boa concordância entre as previsões dos modelos de dimensionamento e os resultados experimentais. Ambas as normas se mostraram capazes de prever a resistência de PMPR produzidos com concreto reforçado com fibras e com concreto com agregado reciclado de concreto. Além disso, os resultados mostraram a importância da consideração das imperfeições geométricas e dos efeitos de segunda ordem. Apesar dos bons resultados, destaca-se a necessidade de as normas preverem especificações para a aplicação de concreto com fibras e com agregado reciclado em PMPR.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72646

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARTIZATION. **BS EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

MARQUES, B. B. **Estudo experimental e numérico de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto de resíduos reciclados de concreto e fibras de aço**. 2022. 221 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

PEREIRA, M. F. **Comportamento estrutural de pilares mistos parcialmente revestidos submetidos a flexo-compressão**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

PEREIRA, M.F.; DE NARDIN, S.; EL DEBS, A.L.H.C. Partially encased composite columns using fiber reinforced concrete: experimental study. **Steel and Composite Structures**, v. 34, n. 6, p. 909-927, 2020.

PRICKETT, B.S.; DRIVER, R.G. Behavior of Partially Encased Columns Made with High Performance Concrete. 2006. 221f. **Structural Engineering Report no 262**, Dept. of Civil and Environment Engineering, University of Alberta, AB, Canada, 2006.

ZHOU, J.; HU, Z.; WANG, B.; LI, X.; HAN, J. Experimental investigation of CFRP-confined partially encased composite columns under axial compression. **Journal of Building Engineering**, v. 81, p. 1-17, 2024.