

Capacidade de pilar em flexo-compressão reforçado por confinamento polimérico

VLADIMIR JOSÉ FERRARI - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-9230-927X> - (vjferrari2@uem.br) – UEM

RESUMO

NESTE ARTIGO APRESENTA-SE O PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PILAR DE CONCRETO ARMADO SOLICITADO EM FLEXO-COMPRESSÃO E REFORÇADO POR ENCASAMENTO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS (PRF). A METODOLOGIA EMPREGADA É A RECOMENDADA PELO ACI PRC-440.2 (2023) E BASEIA-SE NAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO E COMPATIBILIDADE DAS DEFORMAÇÕES, CONSIDERANDO-SE O COMPORTAMENTO DO CONCRETO CONFINADO. A CAPACIDADE DA SEÇÃO É OBTIDA PELA CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE INTERAÇÃO MOMENTO-FORÇA NORMAL (M-P), LIMITANDO-SE A APLICAÇÃO PARA CASOS DE RUÍNA CONTROLADA PELA COMPRESSÃO DO

CONCRETO. A TÍTULO DE EXEMPLIFICAÇÃO, A METODOLOGIA É APLICADA EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM PILAR RETANGULAR SOLICITADO EM FLEXO-COMPRESSÃO. OS RESULTADOS OBTIDOS PERMITEM VISUALIZAR AS MODIFICAÇÕES NO DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO REFORÇADA EM RELAÇÃO À SEM REFORÇO INDICANDO-SE A POSSIBILIDADE DE INCREMENTAR OS ESFORÇOS SOLICITANTES EM ATÉ 28% COM ELEVADA QUANTIDADE DE CAMADAS DE REFORÇO.

PALAVRAS-CHAVE: REFORÇO, CONFINAMENTO, PILAR, DIAGRAMA INTERAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

Pilares são elementos estruturais usualmente dispostos na vertical e im-

portantes numa edificação visto que a ruptura de um deles pode conduzir à ruína parcial ou total da estrutura. São comumente solicitados pela força normal, combinada com o momento fletor, devido às ligações com as vigas, desalinhamento vertical, excentricidades e forças horizontais.

Alguns dos motivos para o reforço de um pilar são a resistência inadequada do concreto, falha em projeto e alteração da utilização da edificação. A técnica de reforço com emprego de PRF é atrativa porque não modifica o tamanho da seção que pode ser confinada visto que o mecanismo é eficiente para aumento da

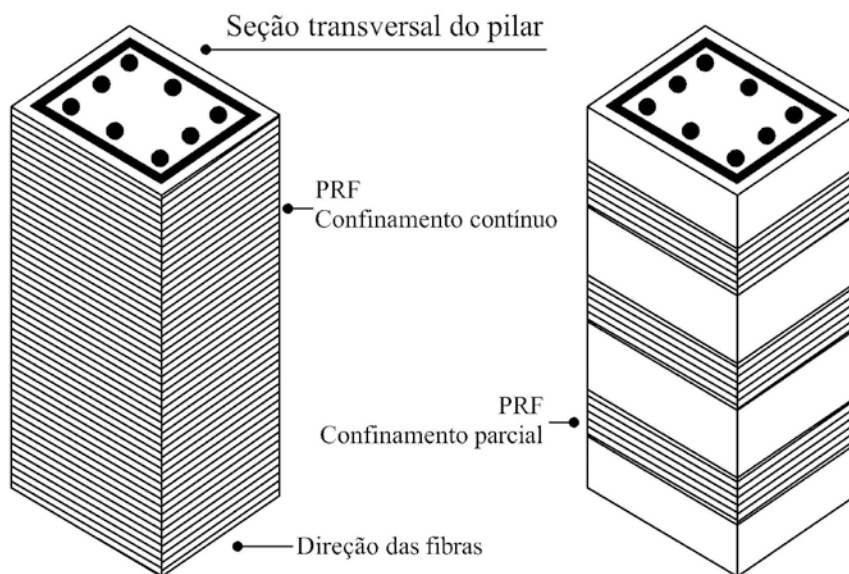


FIGURA 1

CONFINAMENTO DE PILAR COM PRF

FONTE: AUTOR

capacidade resistente e ductilidade de pilares carregados axialmente ou excêntrica-mente (ABOKWIED *et al.* 2021; SIDDIKA *et al.*, 2020; ACI PRC-440.2 2023).

O confinamento do concreto é um efeito obtido pelo encamisamento da seção pela orientação transversal das fibras poliméricas em relação ao eixo longitudinal do pilar, restringindo-se a expansão lateral do concreto comprimido pela pressão de confinamento (Figura 1).

Como já demonstrado nas pesquisas, o confinamento tem um impacto significativo em pilares curtos axialmente carregados de seção circular ou quadrada. Em pilares solicitados excêntrica-mente, são ainda poucos os estudos nacionais e a ausência de norma brasileira sobre o tema é um obstáculo aos profissionais da área de projeto. Entretanto, o envolvimento da seção com polímero pode aumentar a capacidade resistente de pilares solicitados pelo efeito combinado de força normal e momento fletor.

Neste artigo apresenta-se a formulação indicada no ACI PRC-440.2 (2023) para construção do diagrama simplificado momento-força normal (M-P) para verificação da capacidade resistente da seção de pilar solicitado por flexo-compressão e reforçado por encamisamento com PRF. A metodologia é aplicada, como exemplo, em seção transversal de pilar retangular de concreto armado solicitado por flexo-compressão.

2. CONFINAMENTO POLIMÉRICO DO CONCRETO

O mecanismo do confinamento, como indicado por Carrazedo (2002), pode ser compreendido idealizando-se um pilar circular de material elástico-linear e livre de qualquer restrição lateral. Com a solicitação axial (P), Figura 2, ocorre um encurtamento axial proporcional ao módulo de elasticidade (E) do material e uma expansão lateral proporcional ao produto do coeficiente de Poisson (ν) pelo módulo de elasticidade (νE).

Para o caso de envolvimento do pilar, antes da solicitação, por um tubo de parede fina, fica restringida a deformação lateral, desenvolvendo-se consequentemente no interior do tubo uma pressão (f_l), com magnitude que depende da solicitação axial, do material

do pilar, do tubo e das características geométricas.

O FIB (1999) explica o efeito do confinamento no concreto (Figura 3) ponderando que as tensões de compressão propagam-se preferencialmente pelos componentes mais rígidos (agregados graúdos), tendo o equilíbrio

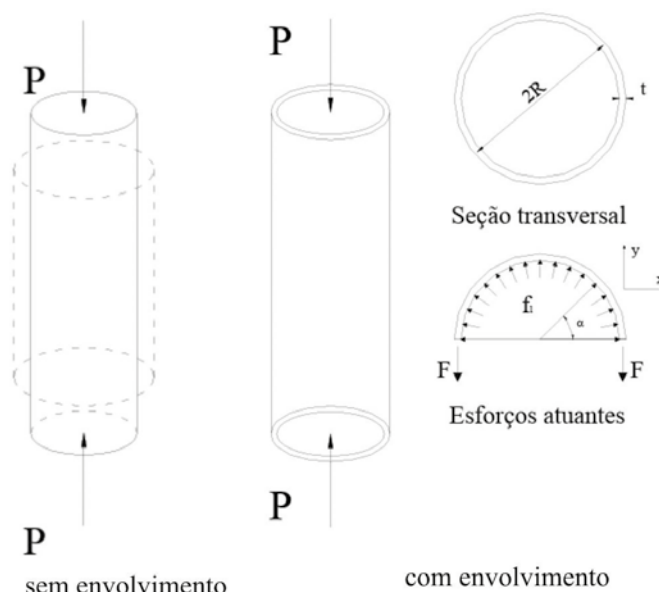


FIGURA 2

PILAR SOLICITADO À COMPRESSÃO SEM E COM ENVOLVIMENTO POR TUBO DE PAREDE FINA

FONTE: CARRAZEDO (2002)

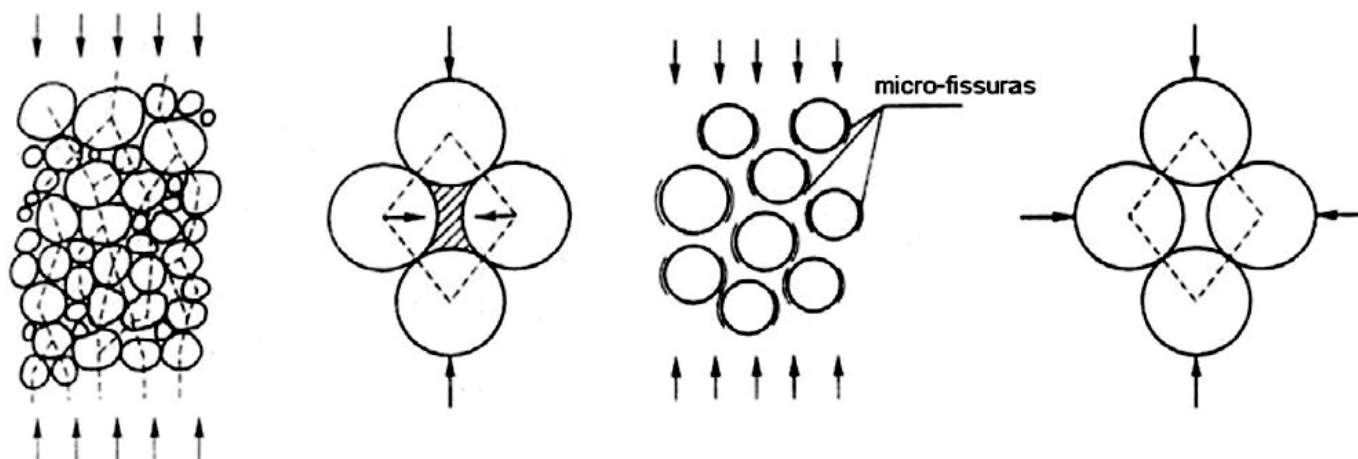


FIGURA 3

MECANISMO DO CONFINAMENTO DO CONCRETO

FONTE: FIB (1999)

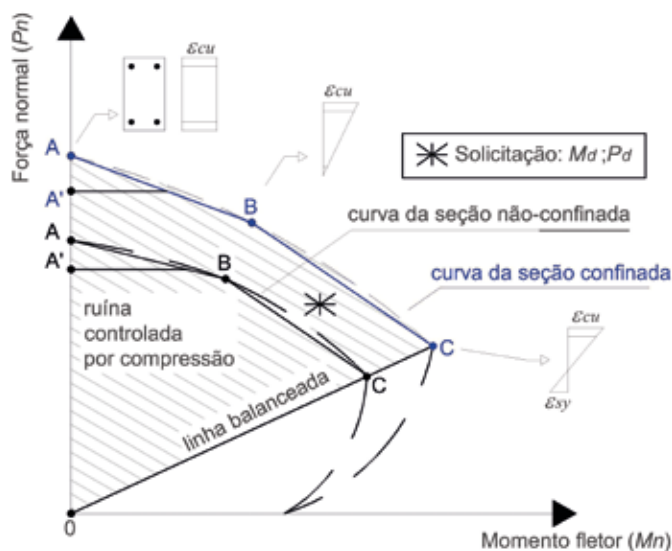


FIGURA 4
DIAGRAMA TÍPICO M-P

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

garantido por forças laterais provenientes da coesão da matriz cimentícia. A superação da coesão acarreta o surgimento de microfissuras na interface agregado-matriz e o aumento da solicitação promove a propagação com a ruptura do concreto por fissuras paralelas à direção da solicitação. O confinamento promove o aumento da coesão atuando no sentido de impedir a expansão lateral do concreto, formando

e a deformação última são incrementados mediante a presença de tensões laterais de confinamento.

Grande parte dos modelos teóricos existentes para o cálculo do confinamento foram desenvolvidos, segundo Diego *et al.* (2022), a partir de pesquisas realizadas em pilares de seções circulares e modificados para aplicações em seções não circulares. Os modelos indicados no ACI PRC-440.2 (2023) consideram as

um estado multiaxial de tensão capaz de incrementar a resistência do elemento comprimido.

Segundo Oliveira (2017), entre os primeiros ensaios de compressão axial do concreto confinado, podem ser citados os realizados por Richart *et al.* (1928) no estudo da influência da pressão lateral de armaduras transversais em cilindros de concreto. A pesquisa mostrou que a resistência à compressão

pesquisas de Lam & Teng (2003), Harries & Carey (2003) e Carey & Harries (2005).

3. METODOLOGIA DO ACI PRC-440.2 (2023)

Para excentricidade da força normal superior a 10% da dimensão do lado da seção do pilar, o ACI PRC-440.2 (2023) apresenta uma metodologia para a construção do diagrama simplificado de interação momento fletor-força normal (M-P) baseado nas equações de equilíbrio e compatibilidade das deformações. A metodologia difere-se do que é feito para seções de concreto armado pela consideração do comportamento do concreto confinado.

Na Figura 4 ilustra-se o diagrama típico (M-P) referente a capacidade resistente da seção confinada e não confinada solicitada em flexo-compressão. O incremento na capacidade do pilar reforçado é satisfatória pelo ponto com coordenadas dos esforços solicitantes (M_d-P_d), localizado no interior da região delimitada pelas retas do diagrama da seção confinada e pela linha balanceada que limita a ruína pelo efeito de compressão do concreto. O diagrama é formado por linhas retas conectadas aos pontos A, B e C correspondentes aos pares de valores (M-P), com as características apresentadas na sequência.

3.1 Seção em compressão axial pura

O ponto A do diagrama representa a seção transversal em compressão axial pura, com deformação uniforme para o concreto confinado (ϵ_{ccu}) ou não confinado (ϵ_{cu}). Aplicam-se os conceitos de confinamento do concreto idealizado por Lam & Teng (2003) e as Equações 1 e 2, respectivamente, para o cálculo da capacidade resistente da seção ($\phi P_n(A)$; $\phi M_n(A)=0$) e ($\phi P_n(A')$; $\phi M_n(A')=0$), considerando-se a excentricidade acidental com o coeficiente "0,80".

$$[1] \quad \phi P_n(A) = \phi \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f'_{cc}}{(A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}} \right]$$

$$[2] \quad \phi P_n(A') = 0,80 \cdot \phi \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f'_{cc}}{(A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}} \right]$$

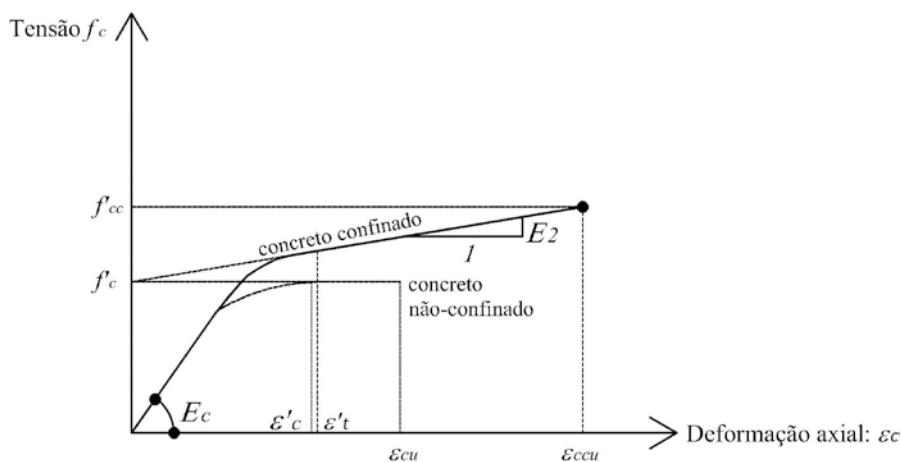


FIGURA 5
MODELO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO CONFINADO COM PRF

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

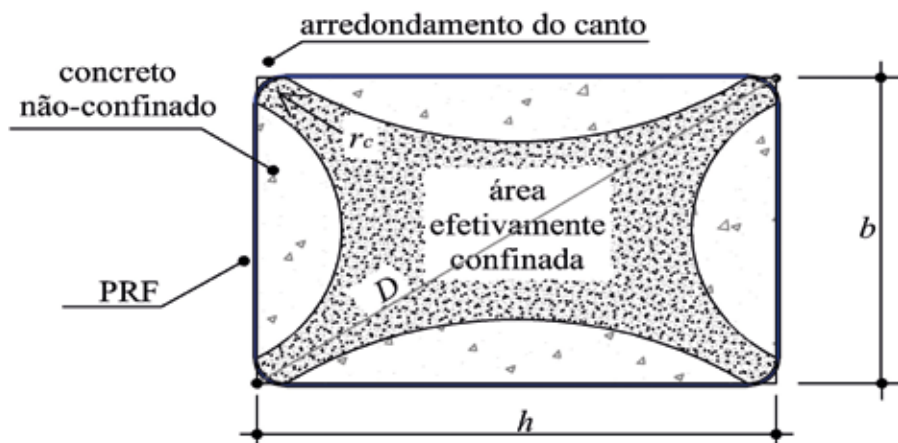


FIGURA 6

DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CONFINAMENTO EM SEÇÃO RETANGULAR

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

A curva tensão-deformação (f_c - ϵ_c) do concreto confinado (Figura 5) é representada por uma parábola seguida por trecho linear até a resistência máxima do concreto (f'_{cc}) e respectiva deformação (ϵ_{ccu}). O ponto de transição entre a parábola e o trecho linear é denotado pela deformação (ϵ'_t) e o concreto não-confinado tem comportamento representado por uma parábola seguida por trecho horizontal até a deformação ($\epsilon_{cu} = 0,003$).

A resistência à compressão do concreto confinado (f'_{cc}) é obtida pela Equação 3, sendo ($\Psi_f = 0,95$) o fator adicional de redução da resistência.

$$[3] \quad f'_{cc} = f'_c + \Psi_f \cdot 3,3 \cdot \kappa_a \cdot f_l$$

A pressão de confinamento (f_l) pelo envolvimento polimérico do concreto é determinada pela Equação 4.

$$[4] \quad f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}}{D}$$

Em que:

n : número de camadas do reforço;

t_f : espessura da manta de reforço;

E_f : módulo de elasticidade da manta de reforço;

ϵ_{fe} : deformação efetiva de ruptura do reforço, obtida pelo produto do fator de eficiência ($k_e = 0,55$) e a deformação última do polímero (ϵ_{fu}) pela Equação 5.

$$[5] \quad \epsilon_{fe} = \kappa_\epsilon \cdot \epsilon_{fu}$$

$$[6] \quad \kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2$$

$$[7] \quad D = \sqrt{b^2 + h^2}$$

A área de concreto não-confinado é delimitada entre cada parábola e o lado adjacente da seção e a área efetivamente confinada (A_e) é aquela entre as parábolas formando o núcleo confinado. A relação (A_e/A_c) é a área de concreto efetivamente confinada (Equação 8) com a taxa da armadura ($r_g = A_s/A_g$) e a área de concreto da seção transversal (A_c).

$$[8] \quad \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2 \cdot r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot A_g} \right] - \rho_g}{1 - \rho_g}$$

Deve-se garantir uma pressão mínima de confinamento do concreto (Equação 9) para assegurar comportamento ascendente do trecho linear do concreto confinado.

$$[9] \quad \frac{f_l}{f'_c} \geq 0,08$$

A deformação máxima do concreto confinado (ϵ_{ccu}) é determinada pela Equação 10, limitada em 0,010 para evitar fissuração excessiva e perda da integridade por falta de coesão.

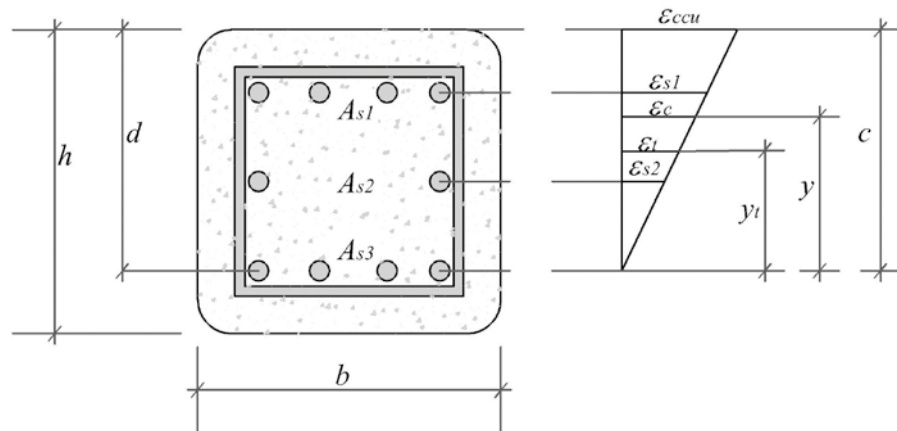


FIGURA 7

DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO PARA O PONTO B

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ccu} &= \varepsilon'_c \cdot \\ [10] \quad &\left(1,50 + 12 \cdot \kappa_b \cdot \frac{f_l}{f'_c} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \\ &\leq 0,010 \end{aligned}$$

O fator de eficiência (κ_b) considera influência da geometria da seção para a determinação da deformação axial última do concreto confinado (Equação 11) para seção não circular.

$$[11] \quad \kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0,5}$$

3.2 Compressão não uniforme (ponto B) e compressão e tração (ponto C)

O ponto B representa a seção toda comprimida, com distribuição de deformações caracterizada por valor máximo na borda mais comprimida (ϵ_{ccu} ou ϵ_{cu}) e zero na camada de armadura mais próxima da face menos comprimida (Figura 7) com linha neutra ($c = d$).

O ponto C representa seção com região comprimida e tracionada caracterizando-se ruína do tipo balanceada com deformação máxima de compressão (ϵ_{ccu} ou ϵ_{cu}) no concreto e deformação de tração de escoamento (ϵ_{sy}) na armadura mais próxima da face tracionada (Figura 8) com linha neutra (c), determinada pela Equação 12.

$$[12] \quad c = d \cdot \frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{ccu}}$$

As coordenadas dos pontos B e C do diagrama são obtidas pelas Equações 13 e 14 com os coeficientes "A" a "I" determinados pelas Equações 15 a 23.

$$\text{[13]} \quad \emptyset P_{n(B,C)} = \emptyset \left[\begin{array}{l} A.(y_t)^3 + B.(y_t)^2 + \\ C.(y_t) + D + \sum A_{si}.f_{si} \end{array} \right]$$

$$[14] \quad \phi_{M_n(B,C)} = \phi \left[\begin{array}{c} E.(y_t)^4 + F.(y_t)^3 + \\ G.(y_t)^2 + H.(y_t) + I + \\ \sum A_{si}.f_{si}.d_{si} \end{array} \right]$$

$$[15] \quad A = \frac{-b \cdot (E_c - E_2)^2}{12 \cdot f'_c} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c}\right)^2$$

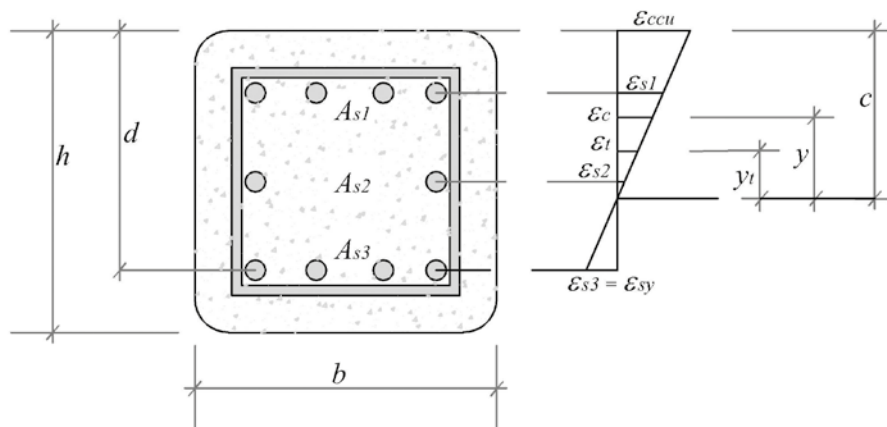


FIGURA 8

DISTRIBUIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NA SECÃO PARA O PONTO C

FONTE: ADAPTADO DO ACI PRC-440.2 (2023)

$$[16] \quad B = \frac{b \cdot (E_c - E_2)}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)$$

[17] $C = -b.f'_c$

$$[18] \quad D = b.c.f'_c + \frac{b.c.E_2}{2} . (\varepsilon_{ccu})$$

$$[19] \quad E = \frac{-b \cdot (E_c - E_2)^2}{16 \cdot f'_c} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2$$

$$F = b \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{(E_c - E_2)^2}{12 \cdot f'_c}.$$

$$\left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b \cdot (E_c - E_2)}{3} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right)$$

$$\text{[21]} \quad G = - \left(\frac{b}{2} \cdot f'_c + b \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right) \cdot \left(\frac{E_c - E_2}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \right)$$

$$\text{[22]} \quad H = b \cdot f'_c \cdot \left(c - \frac{h}{2} \right)$$

$$I = \frac{b \cdot c^2}{2} \cdot f'_c - b \cdot c \cdot f'_c \cdot \left(c - \frac{h}{2}\right) + \frac{b \cdot c^2 \cdot E_2}{3} \cdot (\varepsilon_{civ}) - \frac{b \cdot c \cdot E_2}{2} \cdot \left(c - \frac{h}{2}\right) \cdot (\varepsilon_{civ})$$

A posição da fibra correspondente à deformação (ϵ'_l) é representada pela coordenada vertical (y_l), medida a partir da linha neutra, conforme Equação 24.

$$[24] \quad y_t = c. \frac{\varepsilon'_t}{\varepsilon_{ccu}}$$

As deformações específicas em cada camada de armadura (ϵ_{si}) são calculadas pela compatibilidade (Equação 25) com (d_{si}) a distância entre o centro de gravidade da camada (i) e da seção transversal.

$$[25] \quad \varepsilon_{Si} = \varepsilon_{ccu} \cdot \frac{(c - d_{Si})}{c}$$

Conforme a posição da linha neutra (c), o sinal da tensão (f_{si}) é positiva para a compressão e negativa para a tração e, para considerar o efeito do sentido da rotação do momento das forças, deve-se tomar como positiva a distância (d_{si}) das armaduras acima do centro da seção e, negativa, para as camadas abaixo do centro de gravidade.

A deformação efetiva do reforço (ϵ_{te}) para o caso de flexo-compressão deve ser limitada pelo valor da Equação 26 para assegurar integridade ao cisalhamento do concreto confinado.

$$[26] \quad \varepsilon_{fe} = \kappa_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004$$

4. EXEMPLO

A seção transversal da Figura 9 é retangular (250 mm x 400 mm) e representa um pilar localizado no interior de uma edificação com solicitação de cálculo composta por força normal $P_d = 1.380$ kN e momento $M_d = 63$ kN.m. O pilar foi projetado e executado conforme a armadura indicada, concreto C30,

aço com resistência de cálculo de 435 MPa e cobrimento de 30 mm. Ocorre que, devido à necessidade de instalação de equipamentos sobre a laje, os esforços solicitantes devem ser aumentados em 28%: $P_d = 1.766 \text{ kN}$ e $M_d = 80,64 \text{ kN.m}$. Deseja-se, então, verificar a capacidade resistente da seção transversal sem reforço.

Para determinação da capacidade resistente da seção sem reforço, emprega-se a metodologia do ACI PRC-440.2 (2023), que consiste na determinação do diagrama M-P, visto que a seção está solicitada em

flexo-compressão com excentricidade ($e = 6.300 \text{ kN.m}/1.380 \text{ kN} = 4,57 \text{ cm}$) superior ao valor limite ($0,1h = 0,140 = 4 \text{ cm}$).

Em razão da limitação do tamanho do artigo, os resultados para a seção sem reforço são indicados diretamente pela apresentação do diagrama na Figura 10. O ponto em laranja representa a solicitação inicial de projeto com coordenada no interior da envoltória resistente da seção. O ponto em vermelho, fora da envoltória, é a condição com o aumento nas solicitações, denotando-se, portanto, falta de capacidade

da seção. Assim, a seção transversal não apresenta capacidade resistente para suportar as novas solicitações incrementadas em 28%.

Para o reforço do pilar por encaimamento emprega-se manta de fibras de carbono com as seguintes características geométricas e propriedades:

$t_f = 0,166 \text{ mm}$;
 $f_{tu}^* = 4.900 \text{ MPa}$;
 $\epsilon_{fu}^* = 0,021 \text{ mm/mm}$;
 $E_f = 230.000 \text{ MPa}$;

$C_E = 0,95$;

$f_{tu} = 4.655 \text{ MPa}$;

$\epsilon_{fu} = 0,01995 \text{ mm/mm}$.

Determina-se, inicialmente, o número de camadas de reforço necessárias para garantia da pressão mínima de confinamento ($f_{l,min} = 2,40 \text{ MPa}$). Rearranjando-se os termos da Equação 4, tem-se a Equação 27 que resulta em $n = 4$ camadas para ($\epsilon_{fe} = 0,004$ - Equação 26 para flexo-compressão) e ($D = 471,6991 \text{ mm}$ - Equação 7). Para $n = 4$ camadas, recalcula-se a pressão de confinando, resultando em $f_l = 2,5901 \text{ MPa} > f_{l,min}$.

$$[27] \quad n = \frac{D \cdot f_{l,min}}{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \epsilon_{fe}} = 3,71 \rightarrow n = 4 \text{ camadas}$$

O ponto A do diagrama M-P para a seção confinada tem coordenadas ($\phi P_n(A)$; $\phi M_n(A)=0$), sendo ($\phi P_n(A)$) a capacidade resistente da seção para compressão centrada e determinada pela Equação 1 (transcrita abaixo) com $\epsilon_{fe} = 0,01097$ (Equação 5), a pressão de confinamento $f_l = 7,1034 \text{ MPa}$ e a resistência do concreto confinado $f'_{cc} = 34,5785 \text{ MPa}$ (Equação 3) para $A_g/A_c = 0,5264$ (Equação 8) e $\kappa_a = 0,2056$ (Equação 6) com raio de arredondamento $r_c = 25 \text{ mm}$.

$$[28] \quad \phi P_n(A) = \phi \cdot \left[0,85 \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \right] = 2.156,8356 \text{ kN}$$

Para o ponto A', tem-se o valor ($\phi P_n(A') = 0,8 \cdot \phi P_n(A) = 1.725,4685 \text{ kN}$). As coordenadas do ponto B ($\phi P_n(B)$; $\phi M_n(B)$) são calculadas pelas Equações 13 e 14, empregando-se os dados indicados:

$b = 250 \text{ mm}$;
 $E_c = 26.070 \text{ MPa}$;
 $\epsilon_{fe} = 0,004$;
 $f_l = 2,5901 \text{ MPa}$;
 $\kappa_b = 0,6658$;
 $\epsilon'_c = 0,002$;
 $f'_{cc} = 31,6695 \text{ MPa}$;
 $E_s = 341,7605 \text{ MPa}$;
 $\epsilon'_t = 0,002332$;
 $c = d = 360 \text{ mm}$;
 $\gamma_t = 171,8567 \text{ mm}$;
 $\epsilon_{ccu} = 0,004885$;
 $A = -0,00008464 \text{ kN/mm}^3$;
 $B = 0,0436 \text{ kN/mm}^2$;
 $C = -7,50 \text{ kN/mm}$;
 $D = 2.775,1362 \text{ kN}$;
 $E = -0,00006348 \text{ kN/mm}^3$;

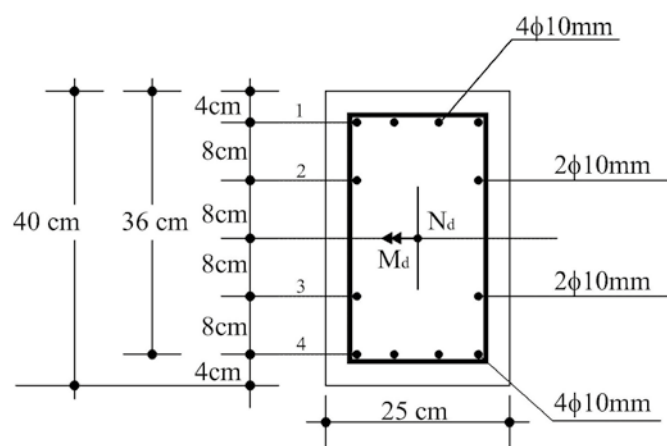


FIGURA 9

SEÇÃO TRANSVERSAL DO PILAR

FONTE: AUTOR

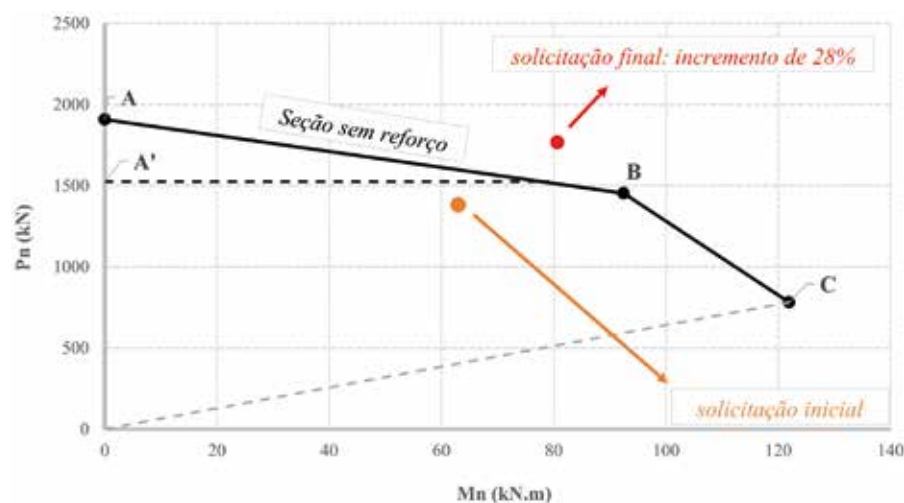


FIGURA 10

DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO SEM REFORÇO

FONTE: AUTOR

$F = 0,0426 \text{ kN/mm}^2$;
 $G = -10,7323 \text{ kN/mm}$;
 $H = 1.200 \text{ kN}$;
 $I = 60.010,8948 \text{ kN.mm}$;
 $f_{s1} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s2} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s3} = 227,85 \text{ MPa}$;
 $f_{s4} = 0$;

$$[29] \quad \phi P_{n(B)} = \phi \left[\frac{A \cdot (y_t)^3 + B \cdot (y_t)^2 + C \cdot (y_t) + D + \sum A_{si} \cdot f_{si}}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 1.680,3064 \text{ kN}$$

$$[30] \quad \phi M_{n(B)} = \phi \left[\frac{E \cdot (y_t)^4 + F \cdot (y_t)^3 + G \cdot (y_t)^2 + H \cdot (y_t) + I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 87,4797 \text{ kN.m}$$

O ponto C do diagrama M-P representa a condição em que a linha neutra corta a seção transversal com valor determinado pela Equação 12 ($c = 252,8177 \text{ mm}$) e a posição da fibra (y_t) com deformação específica de compressão correspondente a (ϵ'_t), segundo a Equação 24, igual a $y_t = 119,0857 \text{ mm}$. As coordenadas do ponto C ($\phi P_{n(C)}$; $\phi M_{n(C)}$) são calculadas pelas Equações 13 e 14, transcritas na sequência, empregando-se os seguintes valores para os coeficientes "A" até "I":

$A = -0,00017162 \text{ kN/mm}^3$;
 $B = 0,0621 \text{ kN/mm}^2$;
 $C = -7,50 \text{ kN/mm}$;
 $D = 1948,8987 \text{ kN}$;
 $E = -0,00012872 \text{ kN/mm}^3$;
 $F = 0,05049 \text{ kN/mm}^2$;
 $G = -7,0321 \text{ kN/mm}$;
 $H = 396,1328 \text{ kN}$;
 $I = 145.645,0626 \text{ kN.mm}$;
 $f_{s1} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s2} = 435 \text{ MPa}$;
 $f_{s3} = -110,46 \text{ MPa}$;
 $f_{s4} = -435 \text{ MPa}$;

$$[31] \quad \phi P_{n(C)} = \phi \left[\frac{A \cdot (y_t)^3 + B \cdot (y_t)^2 + C \cdot (y_t) + D + \sum A_{si} \cdot f_{si}}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 1.103,4179 \text{ kN}$$

$$[32] \quad \phi M_{n(C)} = \phi \left[\frac{E \cdot (y_t)^4 + F \cdot (y_t)^3 + G \cdot (y_t)^2 + H \cdot (y_t) + I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i}{I + \sum A_{si} \cdot f_{si} \cdot d_i} \right]$$

$$= 131,9878 \text{ kN.m}$$

Na Tabela 1, são reunidas as coordenadas para os pontos A, B e C do diagrama M-P para a seção transversal reforçada com $n = 4$ camadas de manta polimérica, com o respectivo diagrama indicado na Figura 11. Como se vê, com 4 camadas, a região delimitada pelo diagrama não engloba o ponto correspondente ao incremento de 28% nas solicitações; logo, a seção não tem condições de segurança para suportar ao aumento do carregamento. Empregando-se 8 camadas de reforço, é possível modificar o diagrama de forma a incrementar a capacidade da seção para atendimento as novas solicitações.

5. CONCLUSÕES

Como apresentado no artigo, a metodologia empregada possibilita construir o diagrama simplificado de interação momento-força normal representativo da capacidade da seção transversal. Foi possível obter o diagrama para a seção sem reforço considerando-se concreto não confinado, com resistência à compressão

f'_c e deformação $\epsilon_{cu} = 0,003$ para diagrama típico tensão-deformação. Assim, comprovou-se que a seção tinha capacidade suficiente para suportar as solicitações previstas inicialmente em projeto, mas insuficiente para resistir as novas solicitações impostas pelo aumento de carregamento. A metodologia foi, então, empregada para a construção do diagrama da seção reforçada considerando-se o comportamento do concreto confinado com manta de fibras de carbono e representado pelo trecho pós-pico com comportamento linear ascendente (pressão mínima de confinamento), com resistência máxima f'_{cc} e deformação última ϵ_{ccu} . Para o número mínimo de 4 camadas de reforço, verificou-se capacidade insuficiente para o incremento das solicitações e que a região de concreto efetivamente confinada era de apenas 52% da área da seção retangular de relação entre os lados igual a 1,60 e raio de arredondamento de 25 mm.

TABELA 1

COORDENADAS DOS PONTOS DO DIAGRAMA M-P PARA A SEÇÃO REFORÇADA

Pontos	n = 4 camadas		n = 8 camadas	
	P_n (kN)	M_n (kN.m)	P_n (kN)	M_n (kN.m)
A	2.156,8356	0,00	2.406,75	0,00
A'	1.725,4685	0,00	1.925,40	0,00
B	1.680,3064	87,4797	1.815,43	84,21
C	1.103,4179	131,9878	1.306,46	131,83

FONTE: AUTOR

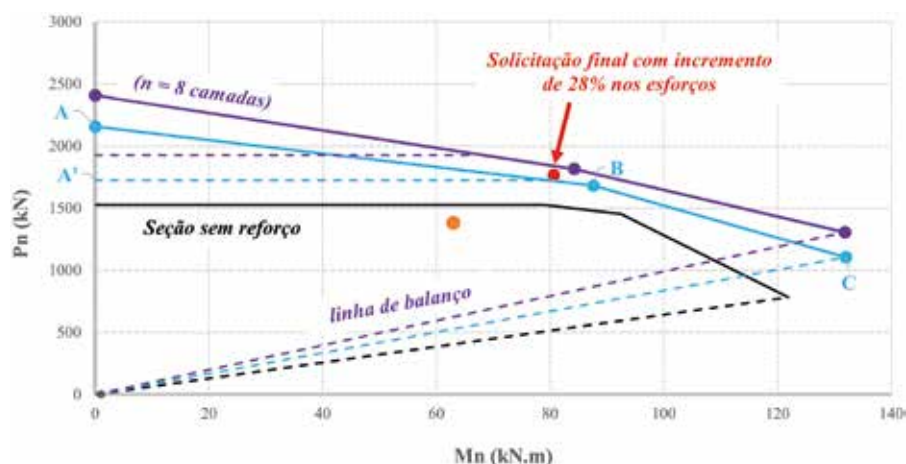


FIGURA 11

DIAGRAMA M-P DA SEÇÃO REFORÇADA

FONTE: AUTOR

As análises mostraram que seriam necessárias 8 camadas de reforço para que o pilar tenha condições de suportar as novas solicitações. Este resultado apenas representa o resultado da aplicação do

modelo proposto, uma vez que este número de camadas não é usual e demandaria, segundo o ACI PRC-440.2 (2023), a garantia de impregnação de todas as camadas e a verificação do efeito de cisalhamento

entre camadas. Neste caso, o mais adequado seria considerar outras técnicas de reforço, como o aumento da seção do pilar com armaduras adicionais, chapas e perfis metálicos colados externamente etc. ©

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI PRC-440.2. Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures - Guide. November, 2023.
- [2] ABOKWIEK, R. et al. RC columns strengthened with NSM-CFRP strips and CFRP wraps under axial and uniaxial bending: Experimental investigation and capacity models. Journal of Composites for Construction, 25, 2, 2021.
- [3] CARRAZEDO, R. Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002.
- [4] CAREY, S.A; HARRIES, K. A. Axial behavior and modeling of confined small, medium and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets. ACI Structural Journal. 2005.
- [5] DIEGO A. et al. Experimental investigation on the compressive behaviour of FRP-confined rectangular concrete columns. Archives of Civil and Mechanical Engineering. v.22, n.131, 2022.
- [6] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON - FIB. Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance. Bulletin 1, v.1, 1999.
- [7] HARRIES, K. A.; CAREY, S. A. Shape and Gap effects on the behavior of variably confined concrete. Cement Concrete Research. v.33, n.6, 2003.
- [8] LAM, L.; TENG, J. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and Building Materials. v.17, n.6-7, 2003.
- [9] OLIVEIRA, D. S. Reforço de pilares de concreto armado de seção transversal retangular mobilizando efeitos de confinamento. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2017.
- [10] RICHART, F. E. et al. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Engineering Experiment Station Bull. n.185, University of Illinois, Urbana, Ill, 1928.
- [11] SIDDIKA, A. et al. Performance, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-art review. Engineering Failure Analysis, 111, 2020.

KIT de PRÁTICAS RECOMENDADAS sobre ENSAIOS de DURABILIDADE das ESTRUTURAS de CONCRETO

O conjunto de **Práticas Recomendadas Sobre os Ensaios de Durabilidade das Estruturas de Concreto** é fruto do trabalho do **Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702 Procedimentos para Ensaios de Avaliação da Durabilidade das Estruturas de Concreto**.



PROMOÇÃO: Kit com 5 Práticas + Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado **SÓCIOS:** R\$ 300,00 | **NÃO SÓCIOS:** R\$ 550,00

Patrocínio



Adquira o seu na
Loja Virtual
do IBRACON:
<http://lojaibracon.org.br>