Comportamento em Serviço de Pilares de Canto de Concreto Armado

Sebastião Salvador Real Pereira*¹ Thiago Pena Bortone² Hugo Meireles de Resende³ João Marcelo Bernardes Real⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma comparação entre os deslocamentos calculados e medidos em ensaio de um pilar de canto de concreto armado, submetido a carregamento de curta duração. O pilar ensaiado faz parte do primeiro projeto habitacional pré-fabricado desenvolvido pela Precon Engenharia. O pilar tinha seção transversal quadrada e foi submetido a forças de compressão excêntricas. Os deslocamentos transversais, na seção média do pilar, foram medidos no ensaio e estimados através de um modelo matemático rigoroso, proposto por Pereira *et. al.* (2013). A análise comparativa revelou que, para o caso estudado, os deslocamentos medidos. A deformação do pilar depende da rigidez efetiva do pilar, bem como do processo executivo assim como das propriedades mecânicas médias dos materiais, principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração do concreto no instante da realização do ensaio. Em face da variabilidade desses parâmetros, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas por processos analíticos, mas boa correlação foi observada na comparação entre os descolamentos calculados e os medidos para cargas menores ou iguais às de serviço.

Palavras-chave: Flexão normal composta, pilares de concreto, resistência última.

1 Introdução

A NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto – é a norma que rege o dimensionamento de estruturas de concreto armado. Sabe-se que existe imprecisão nos deslocamentos determinados utilizando-se a equação de Branson, mesmo no caso de carregamentos de curta duração.

O estudo desenvolvido visou comparar os resultados de ensaio de um pilar esbelto de concreto armado, sujeito à flexão normal composta, de curta duração e pequena excentricidade, com aqueles obtidos através de um modelo matemático rigoroso, proposto por Pereira *et al.* (2013). O modelo considera a história do carregamento e os efeitos do tempo nas propriedades mecânicas do concreto. Foi levada em conta a influência da retração e deformação lenta do concreto, que ocorreram desde o fim da cura até o início do ensaio, assim como a de sua fissuração. O pilar foi dividido em elementos, cada um possuindo sua história de tensões e deformações.

A superfície do pilar tinha reentrâncias de maneira a garantir estanqueidade a água de chuvas na interface de contato com painéis pré-fabricados que compunham a edificação.

2 O Modelo Numérico

No desenvolvimento do modelo numérico as seguintes considerações foram feitas:

 carregamento aplicado em um plano de simetria do pilar;

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

² Departamentos de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

^{3,4} Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

^{*} Autor para correspondência: ssrp@dees.ufmg.br

- deslocamentos transversais e longitudinais infinitesimais;
- consideração somente das deformações normais paralelas ao eixo do pilar;
- possibilidade de variação da geometria do pilar ao longo do tempo, tanto transversal, quanto longitudinalmente;
- possibilidade de diferenças entre propriedades do material de cada elemento e em diferentes seções de cada um deles;
- consideração do efeito da retração e da fluência, bem como da evolução das propriedades mecânicas do concreto;
- possibilidade de variação, ao longo do tempo, das cargas aplicadas e das condições de contorno.

O elemento estrutural analisado foi discretizado, longitudinalmente, em diversos elementos de barra. A seção transversal de cada elemento foi discretizada em diversos elementos de concreto paralelos ao eixo de flexão e em elementos de aço correspondentes a cada uma das barras da armadura longitudinal. Considerouse a área líquida de concreto.

Durante os diversos estágios de carregamento foi determinado se cada um dos elementos de barra estava trabalhando no estádio I ou II, em função da distribuição das tensões normais em cada seção transversal.

O estado de deformação de cada seção transversal foi determinado, iterativamente, de maneira a garantir o equilíbrio entre os esforços solicitantes e os resistentes. Somente os elementos de concreto submetidos a tensões de tração superiores à resistência de tração do concreto foram considerados rompidos. Uma vez determinado o estado de deformação, a curvatura de cada seção transversal foi determinada.

Os deslocamentos do pilar foram obtidos, em cada etapa do carregamento, integrando-se as curvaturas das seções transversais ao longo de seu eixo e aplicando-se condições de contorno.

Tanto o concreto quanto o aço foram considerados trabalhando no regime elástico, pois a análise foi feita considerando-se condições de serviço. Foram utilizadas as prescrições da NBR-6118:2014 para determinação das propriedades mecânicas e reológicas do concreto.

2.1. Formulação

O pilar foi dividido em diversas seções, cada uma delas subdivididas em elementos. Esses elementos podiam possuir diferentes geometrias e propriedades mecânicas, bem como histórias de carregamento diferentes. Foi considerado que, em um instante genérico de tempo t_{u+1} , a deformação específica total de um elemento era dada por:

$$\varepsilon_{c}\left(t_{u+1}, t_{\theta}\right)$$

$$= \int_{t_{\theta}}^{t_{u+1}} \left(\frac{1}{E_{c}(\tau)} + \frac{\varphi(t_{u}, \tau)}{E_{c}}\right) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \qquad (1)$$

$$+ \varepsilon_{cs\theta} \beta_{s}\left(t_{u+1} - t_{s}\right)$$

A deformação total, nesse caso, incluiu os efeitos do carregamento, da fluência e da retração. Esses efeitos correspondiam ao primeiro, segundo e terceiro termos do lado direito da equação (1). A expressão para a retração e coeficiente de fluência do concreto, bem como do módulo de elasticidade tangente no instante t, foram aqueles prescritos pela NBR 6118. Quando o tempo genérico tu+1 era dividido em um número de sub-intervalos, a deformação total de cada elemento, em cada seção do pilar, passava a ser:

$$\varepsilon_{c(i)}(t_{u+1}, t_0) = \sum_{j=0}^{u+1} \frac{\Delta \sigma_{c(i)}(t_j)}{E_{c(i)}(t_j)} + \frac{1}{E_{c(i)}} \sum_{j=0}^{u} \Delta \sigma_{c(i)}(t_j) \varphi_{(i)}(t_{u+1}, t_j)$$
(2)
+ $\varepsilon_{cs} \varphi_{(i)} \beta_{s(i)}(t_{u+1} - t_{s(i)})$

onde o subscrito (i) se referia ao elemento i, e o (j)...

Pela equação (2) pode ser verificado que cada elemento pode ser de diferente material e possuir história de carregamento diferente em cada intervalo de tempo. É importante salientar que o coeficiente de fluência somente foi considerado até o instante de tempo (u), pois era nulo. Com a deformação de cada elemento definida, a curvatura da seção foi calculada.

Na equação (2), a variação de tensão $\Delta \sigma_{c(i)}(t_{u+1})$ pôde ser explicitada reescrevendo-se a equação depois de ser desenvolvido o primeiro somatório. Então:

$$\Delta \sigma_{c(t)}(t_{u+1})$$

$$= E_{c(t)}(t_{u+1})(\varepsilon_{c(i)}(t_{u+1},t_{\theta})) -$$

$$- \sum_{j=\theta}^{u} \frac{\Delta \sigma_{c(i)}(t_{j})}{E_{c(i)}(t_{j})} \qquad (3)$$

$$- \frac{1}{E_{c(i)}} \sum_{j=\theta}^{u} \Delta \sigma_{c(i)}(t_{j})\varphi_{(i)}(t_{u+1},t_{j})$$

$$- \varepsilon_{cs\theta(i)}\beta_{s(i)}(t_{u+1} - t_{s(t)})$$

Com tal incremento de tensão, a tensão final, em cada elemento no instante t_{n+1} , podia ser obtida por:

$$\Delta \sigma_{c(t)}(t_{u+1}) = \sum_{j=0}^{u+1} \Delta \sigma_{c(i)}(t_j)$$
(4)

Essa tensão final, em cada passo da análise, foi comparada com a resistência limite do material. No caso de concreto tracionado, esse limite foi definido pela resistência a tração f_{ctm} . Se essa tensão resistente fosse excedida, sua contribuição era negligenciada. Para elementos de aço, a tensão máxima era igual a tensão de escoamento.

A força axial e o momento fletor em cada seção transversal foram determinados por:

$$N_{R}(t_{u+1}) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{cc}(i)(t_{u+1})A_{c}(i)$$

$$+ \sum_{i=1}^{s} \sigma_{cs}(i)(t_{u+1})A_{s}(i)$$
(5)

$$M_{R}(\boldsymbol{t}_{u+1}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \sigma_{cc}(i) (\boldsymbol{t}_{u+1}) d_{c}(i) A_{c}(i) \qquad (6)$$

$$+\sum_{i=1}^{s}\sigma_{cs}(i)(t_{u+1})d_{s}(i)A_{s}(i) \qquad (6)$$

O equilíbrio entre os esforços internos e externos, em cada seção transversal do pilar, era dado por:

$$N_R = N_{EXT} \tag{7}$$

$$M_R = M_{EXT} \tag{8}$$

Em cada instante da análise, o estado de deformação e de tensão era determinado de maneira que as equações (7) e (8) fossem satisfeitas em cada seção. Quando isso não era conseguido para o estado de deformação adotado, um novo estado de deformação era introduzido e o procedimento repetido.

Depois que as condições de equilíbrio eram satisfeitas, em cada seção transversal, a forma fletida do pilar podia ser determinada. A relação entre os deslocamentos transversais e a curvatura era dada por:

$$\frac{d^2 y(t_{u+1})}{dx} = -\frac{1}{r(t_{u+1})}$$
(9)

As rotações eram obtidas integrando a equação acima. Então:

$$\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{t}_{u+1}) = \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{t}_{u+1}) \tag{10}$$

$$+\int_{0}^{x}\frac{1}{r(t_{u+1})}dx$$
(10)

Os deslocamentos transversais eram calculados por:

$$y(t_{u+1}) = y_0(t_{u+1}) \tag{11}$$

$$+ \theta_0 \left(t_{u+1} \right) x + \iint \frac{1}{r(t_{u+1})} dx \tag{11}$$

Como o pilar foi discretizado em diversos elementos de barra a equação acima era substituída por:

$$y(i) t_{u+1} = y_0(t_{u+1}) + \theta_0(t_{u+1})x$$

$$- \Delta \ell^2 \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{r_0(t_{u+1})} + \frac{1}{r(i)} \right) (2i-1) \right]_{(12)}$$

$$- \Delta \ell^2 \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{r(j)(t_{u+1})} + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^{i-1} \frac{1}{r(k)(t_{u+1})} \right]_{(12)}$$

É importante esclarecer que a equação (12) devia satisfazer as condições cinemáticas.

3 Metodologia do Ensaio

Nas extremidades do pilar, foram concretados

dois consoles para aplicação das cargas, conforme indicado nas Figuras 1, 2 e 3.

O pilar foi fabricado com concreto de resistência característica à compressão f_{ck} igual a 30 MPa, e armado com quatro barras longitudinais de 12,5 mm de diâmetro de aço CA-50, com estribos de 5 mm espaçados a cada 12 cm.

O ensaio foi realizado na idade de 28 dias e a resistência média a compressão, na idade do ensaio, era de 36,6 MPa.

O pilar foi ensaiado dentro de uma gaiola metálica composta de quatro perfis I, interligados nas extremidades, de maneira a proteger os operadores dos equipamentos de qualquer possível acidente durante os ensaios.

Foram aplicadas cargas colineares, nas extremidades do pilar, por meio de macaco hidráulico dotado de célula de carga axial para monitoramento da força aplicada em uma das extremidades, conforme Figuras 3 e 4.

Um relógio comparador foi posicionado no meio do vão, junto à borda inferior do pilar, para medição dos deslocamentos transversais, conforme indicado nas Figuras. 2 e 3. As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas na idade de execução do ensaio.



Figura 1 – Elevação do pilar; vista B-B; Seção C-C.



Figura 2 – Esquema de ensaio do pilar.

Carga axial [<i>kN</i>]	Deslocamentos ensaio d_{ens} [mm]	Deslocamentos estimados d_{mod} [mm]	Razão d _{ens} /d _{mod}
0.0	0.0	0.0	-
50.0	1.6	1.9	0.73
100.0	3.3	2.9	0.94
150.0	6.0	4.2	1.22
200.0	12.3	6.3	1.73

Tabela 1 – Cargas e deslocamentos na seção média do pilar.



Figura 3 – Vista geral do ensaio. Carga aplicada com excentricidade de 11,7 cm.



Figura 4 – Apoio passivo (a esquerda) e ativo (a direita).



Figura 5 – Relação carga axial versus deslocamento transversal.

4 Apresentação dos Resultados

São apresentados, na Tabela 1 e na Figura 5, os deslocamentos medidos e aqueles estimados pelo modelo matemático. A razão entre eles é, também, mostrada.

5 Análise Comparativa

Com a finalidade de comparar os resultados de ensaios (dens) com os valores teóricos obtidos do modelo numérico (dmod), calculou-se a média da razão entre esses valores obtendo-se (dens/dmod) = 1.56, com desvio padrão s = 0.37 e coeficiente de variação CV = (0.37/1.56)*100 = 24%.

A análise dos resultados acima revela que, para o caso estudado, o modelo adotado prevê, em média, deslocamentos menores em 36% do que aqueles medidos nos ensaios.

Para níveis de carregamento mais baixos podese observar uma melhor correlação entre os valores dos deslocamentos previstos e medidos no ensaio, pois para cargas mais baixas todo o pilar trabalha no Estádio I, não ocorrendo fissuração em nenhuma região do pilar.

6 Conclusões

A análise comparativa desenvolvida revelou que, para o caso estudado, os deslocamentos em serviço, obtidos com a formulação teórica adotada, apresentou boa correlação com os deslocamentos medidos. O coeficiente de variação foi de 24%. Vale lembrar que a deformação do pilar depende da rigidez efetiva das seções, ou seja, da forma do pilar, da distribuição das armaduras, da existência e distribuição das fissuras, das propriedades mecânicas do concreto e aço, e da contribuição do concreto entre fissuras, contribuição, essa, não considerada no modelo teórico. A deformação real depende também do processo executivo assim como das reais propriedades dos materiais, principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração do concreto no instante da realização do ensaio.

Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais, como previsto pela NBR 6118:2014. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas por processos analíticos.

Os resultados encontrados foram compatíveis com as condições de projeto para a edificação a que o pilar se destina.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem à UFMG, à FAPEMIG e à PRECON INDUSTRIAL pelo apoio financeiro e de infraestrutura para a realização do trabalho.

8 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). **NBR 6118:** Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. PEREIRA, S. S. R., CALIXTO, J. M., BORTONE, T.P. Numerical analysis of prestressed hollow core slabs under long term loading. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 6, n. 4, p. 613-622, 2013.