

Aula 4 – Dimensionamento de Pilares à Flexo-compressão

Objetivos da aula

- Compreender os conceitos e métodos para dimensionamento de pilares submetidos a flexo-compressão normal e oblíqua.
- Aplicar diagramas de interação e verificação de seções de concreto armado sob esforços combinados.
- Reconhecer estratégias de dimensionamento e detalhamento para atender requisitos de segurança e desempenho.

Conteúdo da aula (texto base)

- 1) Introdução ao dimensionamento de pilares
 - O dimensionamento de pilares submetidos a flexo-compressão combina esforços normais de compressão e momentos fletores em uma ou duas direções. O processo envolve verificação da capacidade resistente da seção considerando as interações entre os materiais (concreto e aço) e os esforços solicitantes.
 - A abordagem normativa contempla o dimensionamento tanto para flexo-compressão normal (um plano) quanto para flexo-compressão oblíqua (dois planos), com requisitos específicos para verificação de segurança em Estados Limites Últimos (ELU).
- 2) Diagramas de interação – base para verificação
 - Diagramas de interação representam graficamente a capacidade resistente de uma seção de concreto armado submetida a esforços combinados (N , M). A curva de interação define os pares (N , M) que levam a seção à ruína (momento resistente último para determinado esforço normal ou vice-versa).
 - A forma do diagrama de interação varia com as características da seção (dimensões, distribuição de armadura, resistência dos materiais), sendo fundamental para a verificação de segurança.

Fonte: Wikimedia Commons – Fractured reinforced concrete column

- 3) Flexo-compressão normal – um plano
 - No caso de flexo-compressão normal, a seção é solicitada por um esforço normal de compressão N e um momento fletor M em apenas um plano. A verificação envolve o cálculo da capacidade resistente da seção e a comparação com os esforços solicitantes (N_d , M_d).
 - A posição da linha neutra é determinada iterativamente para equilibrar os esforços normais e os momentos fletores atuantes, considerando as leis constitutivas do concreto e do aço.
- 4) Flexo-compressão oblíqua – consideração simultânea em dois planos

- A flexo-compressão oblíqua ocorre quando há momentos fletores atuando simultaneamente nas duas direções principais da seção (M_x e M_y). A verificação exige análise mais complexa, considerando a interação tridimensional entre N , M_x e M_y .
- Métodos normativos contemplam simplificações (ex.: método da excentricidade combinada, método da interação de momentos) que substituem verificações rigorosas, mantendo segurança adequada.

5) Verificação da seção e dimensionamento da armadura

- O dimensionamento envolve a definição da armadura longitudinal necessária para resistir aos esforços combinados. A armadura transversal (estribos) é dimensionada para confinar as barras longitudinais e resistir a esforços de cisalhamento, prevenindo instabilidade local.
- O cálculo pode ser feito por iterações manuais, tabelas de dimensionamento ou programas computacionais que traçam os diagramas de interação e determinam a armadura necessária.

6) Equações fundamentais para dimensionamento

- A verificação envolve as equações de equilíbrio de forças e momentos na seção transversal. A força normal resistente é dada por:

$$N_{Rd} = N_c + N_s - N_t$$

onde N_c é a contribuição do concreto, N_s e N_t são as contribuições das armaduras comprimida e tracionada, respectivamente.

- O momento fletor resistente é calculado em relação ao centroide da seção:

$$M_{Rd} = M_c + M_s + M_t$$

7) Exemplo numérico – dimensionamento simplificado

- Considere um pilar de seção 30×50 cm, concreto C25 ($f_{ck} = 25$ MPa), aço CA-50 ($f_{yk} = 500$ MPa), com esforços solicitantes de cálculo: $N_d = 1500$ kN; $M_{d,x} = 120$ kN · m; $M_{d,y} = 60$ kN · m. A seção é submetida a flexo-compressão oblíqua.
- Supondo distribuição simétrica de armadura (8 barras de 20 mm, área total $A_s \approx 2513 \text{ mm}^2$), verificar a segurança:
 - Calcular $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 25/1,4 \approx 17,86$ MPa
 - Calcular $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 500/1,15 \approx 434,78$ MPa
 - Verificar se os esforços solicitantes (N_d , $M_{d,x} = 120$ kN · m, $M_{d,y} = 60$ kN · m) estão abaixo da capacidade resistente da seção com a armadura proposta, usando diagramas de interação ou critérios normativos.
 - A taxa de armadura $\rho = A_s/A_c = 2513/[300 \times 500] \approx 1,67\%$, dentro dos limites normativos ($0,4\% \leq \rho \leq 8\%$).

8) Detalhamento e execução

- O detalhamento das armaduras deve seguir normas específicas, com comprimentos de ancoragem adequados, ganchos onde necessário e espaçamento entre estribos que atendam ao confinamento e à prevenção de flambagem local.
- Na execução, o posicionamento correto das armaduras e o controle do cobrimento são cruciais para o desempenho estrutural, especialmente em regiões de alta solicitação.

9) Estratégias de dimensionamento e boas práticas

- Distribuir a armadura de forma apropriada (mínimo de 4 barras para seções retangulares, preferencialmente armadura dupla-face em faces maiores) para melhor desempenho sob flexo-compressão oblíqua.
- Considerar a interação entre os esforços e verificar se as armaduras mínimas e máximas normativas são obedecidas.
- Adotar cobrimentos adequados e espaçamentos entre barras que permitam a concretagem adequada e a transferência de esforços entre materiais.

Fonte: Wikimedia Commons – Armação de pilar - Mutirão do Projeto Arquiteto de Família

Atividade prática

- Dimensione a armadura longitudinal para um pilar de seção 25×40 cm submetido a:
 - 1) Esforços de cálculo: $N_d = 1200$ kN; $M_{d,x} = 80$ kN · m; $M_{d,y} = 40$ kN · m.
 - 2) Concreto C30, aço CA-50, cobrimento nominal de 30 mm (CAA II).
 - 3) Compare os resultados com os limites normativos de armadura (0,4% a 8%) e esboce o detalhamento da seção.
 - 4) Discuta como a distribuição e o posicionamento das barras influenciam a capacidade resistente nos dois planos.

Pontos-chave

- O dimensionamento de pilares à flexo-compressão exige análise combinada de esforços normais e momentos fletores.
- Diagramas de interação são ferramentas essenciais para verificação da capacidade resistente das seções.
- Em flexo-compressão oblíqua, os esforços nos dois planos principais devem ser considerados simultaneamente.
- O detalhamento adequado das armaduras é fundamental para transferência de esforços e desempenho da estrutura.

Links suplementares da Aula 4

- Interaction diagrams in reinforced concrete: https://en.wikipedia.org/wiki/Interaction_diagram
- Reinforced concrete design: https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforced_concrete

- ABNT NBR 6118: https://en.wikipedia.org/wiki/ABNT_NBR_6118
- Concrete Society Technical Report: <https://www.concretecentre.com/>