

Aula 14 – Dimensionamento de Pilares à Flexocompressão Normal

O Desafio Oculto dos Pilares: Entendendo a Flexocompressão Normal

Imagine um edifício. Forte, imponente, seguro. Por trás dessa solidez, há uma complexa rede de elementos estruturais trabalhando em conjunto, e os pilares são, sem dúvida, os heróis silenciosos que sustentam todo o peso. Mas a vida de um pilar não é tão simples quanto apenas "aguentar peso de cima para baixo". Na realidade, eles raramente sofrem apenas compressão pura.

Na maioria das vezes, os pilares são submetidos a uma combinação de esforços: a força axial (o peso que vem de cima) e o momento fletor (uma força que tenta "dobrar" o pilar). Essa combinação é o que chamamos de **flexocompressão normal**. Compreender como os pilares reagem a essa dança de forças é fundamental para garantir a segurança, a durabilidade e a economia de qualquer estrutura. É aqui que a engenharia se encontra com a arte de projetar com inteligência.

Nesta aula, embarcaremos em uma jornada para desvendar os segredos do dimensionamento de pilares à flexocompressão normal. Nosso objetivo é que, ao final, você seja capaz de analisar o comportamento desses elementos sob cargas combinadas, utilizar ferramentas essenciais como os ábacos de interação e aplicar um roteiro de cálculo robusto para pilares retangulares. Prepare-se para ir além do básico e dominar um dos pilares (com o perdão do trocadilho!) do projeto de estruturas de concreto.

Você já conhece o comportamento de pilares sob compressão simples e de vigas sob flexão. Agora, vamos conectar esses conhecimentos para entender o que acontece quando esses dois mundos se encontram em um único elemento. Essa é a ponte que nos levará a um nível mais avançado de compreensão estrutural, essencial tanto para a prática profissional quanto para o sucesso em avaliações e concursos.

A Dança da Força e do Momento: Por Que Pilares Flexocomprimidos?

Você já parou para pensar por que um pilar, que parece tão reto e vertical, precisa ser dimensionado para flexão? A resposta está na realidade das cargas. Dificilmente uma força axial atua exatamente no centro geométrico de um pilar. Pequenas imperfeições construtivas, deslocamentos de cargas nas lajes e vigas, e principalmente, as ações horizontais como vento e sismos, geram momentos fletores que se somam à força axial.

Imagine que você está tentando empurrar uma caixa pesada. Se você empurrar exatamente no centro, ela se move em linha reta. Mas se você empurrar um pouco para o lado, a caixa não só se move, mas também tende a girar. Com os pilares, acontece algo semelhante: a força axial (o "empurrão") raramente é perfeitamente concêntrica, gerando uma excentricidade que, multiplicada pela força, resulta em um momento fletor.

Flexocompressão Normal: Combinação de força axial (N) e momento fletor (M) que define um estado de solicitação complexo onde a presença da força axial altera significativamente a capacidade do pilar de resistir ao momento fletor, e vice-versa.

A compreensão dessa interação é crucial. Um pilar mal dimensionado para flexocompressão pode falhar de forma frágil, sem aviso prévio, comprometendo toda a estrutura. Por isso, a NBR 6118:2014 dedica atenção especial a esse tipo de solicitação, fornecendo as diretrizes para garantir que nossos pilares sejam verdadeiramente robustos e seguros, mesmo sob as condições mais adversas.

O Coração da Resistência: Seção Transversal e Deformações

Para entender como um pilar resiste à flexocompressão, precisamos olhar para dentro dele, para a sua seção transversal. É ali que o concreto e o aço trabalham em conjunto, cada um desempenhando seu papel. Sob flexocompressão, a distribuição de tensões e deformações na seção do pilar é mais complexa do que na compressão simples ou na flexão pura.

Pense em uma viga sob flexão: um lado é tracionado e o outro comprimido, com a linha neutra (onde a tensão é zero) passando por algum ponto da seção. Agora, adicione uma força de compressão axial. Essa força "empurra" toda a seção, fazendo com que a linha neutra se desloque. Em pilares sob flexocompressão normal, a linha neutra geralmente permanece dentro da seção, e grande parte ou toda a seção está sob compressão, embora com intensidades variáveis.

Concreto

Diagrama parábola-retângulo ou retângulo equivalente (Whitney)

Aço

Comportamento elasto-plástico perfeito

Linha Neutra

Posição determina a capacidade resistente da seção

A NBR 6118:2014 estabelece modelos para a distribuição de tensões no concreto e no aço em estado limite último (ELU). É a partir da análise dessas distribuições de tensões e deformações que podemos construir os diagramas de interação, que veremos em breve. Eles são a representação gráfica da capacidade de uma seção de pilar de resistir a diferentes combinações de força axial e momento fletor, sendo uma ferramenta indispensável para o dimensionamento prático.

NBR 6118: A Bússola do Engenheiro – Estados Limites e Segurança

No mundo da engenharia estrutural, a segurança é a palavra de ordem. Não basta que uma estrutura "fique em pé"; ela precisa ser segura, durável e funcional ao longo de sua vida útil. É para garantir isso que temos a ABNT NBR 6118:2014, a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto. Ela é a nossa bússola, o guia que nos orienta em cada passo do dimensionamento.

A NBR 6118 adota a filosofia dos **Estados Limites**. Isso significa que projetamos a estrutura para que ela não atinja certos estados indesejáveis durante sua vida útil. Os principais são:

Estados Limites Últimos (ELU)

Relacionados à segurança da estrutura contra colapso ou ruptura. Aqui, consideramos as cargas majoradas por coeficientes de segurança (γ_f) e as resistências dos materiais minoradas (γ_c para concreto, γ_s para aço). É o ELU que garante que o pilar não vai "quebrar".

Estados Limites de Serviço (ELS)

Relacionados ao desempenho e à durabilidade da estrutura, como fissuração excessiva, deformações exageradas ou vibrações incômodas. Embora o dimensionamento à flexocompressão seja primariamente um problema de ELU, a consideração dos ELS garante o conforto e a vida útil da edificação.

Os coeficientes de segurança (γ_f , γ_c , γ_s) são como "margens de erro" que a norma nos obriga a incluir. Eles compensam incertezas nas cargas, nas propriedades dos materiais e nos modelos de cálculo. Por exemplo, um γ_f de 1.4 para cargas variáveis significa que, para fins de cálculo, consideramos que a carga pode ser 40% maior do que a esperada. Essa abordagem conservadora é o que nos permite dormir tranquilos, sabendo que as estruturas que projetamos são robustas e confiáveis.

O Mapa da Interação: Diagramas Momento-Curvatura

Para entender a capacidade de um pilar de resistir à flexocompressão, precisamos ir além de um único ponto de ruptura. Precisamos de um "mapa" que nos mostre como ele se comporta sob diferentes combinações de força axial e momento fletor, desde o início do carregamento até a falha. Esse mapa é o **diagrama momento-curvatura**.

Imagine que você está dobrando um pedaço de arame. No início, ele se deforma elasticamente e volta ao normal. Se você aplicar mais força, ele começa a dobrar permanentemente. E se você continuar, ele vai quebrar. O diagrama momento-curvatura de uma seção de concreto armado funciona de forma similar, mas considerando a complexidade dos dois materiais. Ele relaciona o momento fletor aplicado (M) com a curvatura (χ) da seção.

01

Ponto de fissuração

Onde o concreto começa a tracionar e fissurar

02

Ponto de escoamento do aço

Onde a armadura atinge sua tensão de escoamento

03

Ponto de ruptura

Onde o concreto atinge sua deformação limite ou o aço rompe

A forma do diagrama momento-curvatura é crucial para entender a ductilidade da seção – sua capacidade de deformar significativamente antes da ruptura. Seções mais dúcteis são desejáveis porque oferecem um aviso prévio de falha, permitindo evacuação e intervenção. Embora não seja usado diretamente no dimensionamento diário (para isso, temos os ábacos), o diagrama momento-curvatura é a base teórica para a construção de ferramentas mais práticas.

Ábacos de Interação: O Guia Rápido do Dimensionamento

Se construir um diagrama momento-curvatura para cada pilar fosse a única forma de dimensionar, a engenharia seria um processo muito mais lento. Felizmente, a partir desses diagramas complexos, podemos derivar uma ferramenta muito mais prática e visual: os **ábacos de interação**. Eles são, em essência, um resumo gráfico da capacidade resistente de uma seção de pilar sob diferentes combinações de força axial e momento fletor.

📄 **Ábacos de Interação:** Um "guia rápido" ou "mapa de desempenho" para a seção do seu pilar. Em vez de calcular ponto a ponto, você entra com os esforços solicitantes e o ábaco indica a quantidade de armadura necessária.

Os ábacos de interação são geralmente apresentados em forma adimensional, o que significa que eles podem ser usados para pilares de diferentes tamanhos e com diferentes resistências de concreto e aço, desde que a geometria da seção (retangular, circular, etc.) e a disposição da armadura sejam as mesmas. Isso os torna incrivelmente versáteis e uma ferramenta padrão na prática de projeto.

A curva principal do ábaco representa o limite de resistência da seção. Qualquer ponto (N_d , M_d) que caia dentro dessa curva indica que a seção é capaz de resistir aos esforços. Pontos fora da curva significam que a seção é insuficiente e precisa ser redimensionada (aumentar dimensões ou armadura). Dominar o uso dos ábacos é um passo fundamental para o dimensionamento eficiente de pilares.

Decifrando o Ábaco: Zonas de Comportamento

Um ábaco de interação não é apenas uma curva; ele é um panorama do comportamento de um pilar sob diferentes condições de carregamento. Cada região do ábaco corresponde a um modo de falha ou a um tipo predominante de solicitação, e entender essas zonas é crucial para interpretar corretamente os resultados do dimensionamento.

Compressão Pura

No topo do ábaco, onde o momento é zero ou muito pequeno. O pilar falha por esmagamento do concreto, comportando-se como um "bloco" comprimido.

Flexocompressão

A maior parte da curva. Tanto força axial quanto momento fletor são significativos. É a zona mais comum para pilares de edifícios.

Flexão Pura

Na parte inferior, onde a força axial é zero ou muito pequena. O pilar se comporta mais como uma viga.

Flexotração

Abaixo do eixo dos momentos, onde a força axial é de tração. Menos comum em pilares de edifícios.

Compreender essas zonas nos permite não apenas dimensionar, mas também otimizar. Por exemplo, se um ponto cai na zona de compressão pura, talvez a seção seja superdimensionada para flexão. Se cair na flexão pura, talvez a armadura de tração seja o fator limitante. O ábaco é uma ferramenta poderosa de análise e projeto.

Parâmetros Essenciais para o Ábaco: Geometria e Materiais

Para utilizar os ábacos de interação de forma eficaz, precisamos converter os esforços de projeto e as propriedades da seção em parâmetros adimensionais. Essa "normalização" permite que um único ábaco seja aplicável a uma vasta gama de situações, desde que a geometria da seção e a disposição da armadura sejam mantidas.

Força axial adimensional (ν - ν_u)

Representa a força axial de projeto (N_d) em relação à capacidade de compressão da seção de concreto.

$$\nu = N_d / (A_c \times f_{cd})$$

Onde:

- N_d é a força axial de cálculo (majorada)
- A_c é a área da seção de concreto ($b \times h$ para retangular)
- f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto (f_{ck} / γ_c)

Momento fletor adimensional (μ - μ_i)

Representa o momento fletor de projeto (M_d) em relação à capacidade de flexão da seção de concreto.

$$\mu = M_d / (A_c \times h \times f_{cd})$$

Onde:

- M_d é o momento fletor de cálculo (majorado)
- h é a altura da seção na direção do momento

Além de ν e μ , a **taxa de armadura (ρ - ρ_o)** é outro parâmetro crucial. Ela representa a relação entre a área de aço (A_s) e a área da seção de concreto (A_c). Os ábacos geralmente contêm curvas para diferentes valores de ρ , permitindo que você encontre a taxa de armadura necessária para os seus esforços de projeto. A NBR 6118 estabelece limites para ρ (mínimo e máximo) para garantir a ductilidade e evitar o congestionamento da armadura.

Roteiro de Cálculo: Passo a Passo para Pilares Retangulares – Parte 1

Dados Iniciais

Chega de teoria! Agora, vamos colocar a mão na massa e seguir um roteiro prático para dimensionar pilares retangulares à flexocompressão normal. Este roteiro será seu guia, passo a passo, para transformar os conceitos que vimos em um projeto concreto. A primeira etapa, e uma das mais importantes, é a coleta e organização dos dados iniciais.

Imagine que você está preparando uma receita. Antes de começar a cozinhar, você precisa ter todos os ingredientes à mão e nas quantidades certas. No dimensionamento, os "ingredientes" são as informações sobre as cargas, as dimensões preliminares do pilar e as propriedades dos materiais. Um erro aqui pode comprometer todo o projeto.

Passo 1: Coleta e Organização dos Dados de Entrada

Esforços Solicitantes de Projeto (ELU)

- Força Axial de Cálculo (N_d): A força de compressão que o pilar deve suportar
- Momento Fletor de Cálculo (M_d): O momento que tenta "dobrar" o pilar

Nota: Esses valores já devem ser os esforços majorados pelas combinações de ações da NBR 6118 (γ_f).

Dimensões Preliminares do Pilar

- Largura (b) e Altura (h) da seção transversal

Dica: Essas dimensões são geralmente definidas na fase de pré-dimensionamento, considerando arquitetura, esbeltez e cargas.

Propriedades dos Materiais

- Resistência Característica do Concreto (f_{ck}): Ex: C25, C30
- Resistência Característica do Aço (f_{yk}): Ex: CA-50

Lembre-se: A NBR 6118 define os valores de cálculo ($f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$ e $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$) que usaremos nos cálculos.

Detalhes Construtivos

- Cobrimento da Armadura (c): Distância da face externa do concreto à face externa da armadura
- Diâmetro dos Etribos (φ_{est}): Geralmente 5.0 mm ou 6.3 mm
- Disposição da Armadura: Simétrica (mais comum) ou assimétrica

Com esses dados em mãos, estamos prontos para o próximo passo: calcular os parâmetros que nos levarão ao ábaco de interação.

Roteiro de Cálculo: Passo a Passo para Pilares Retangulares – Parte 2

Cálculo dos Esforços de Projeto

Continuando nosso roteiro, uma vez que temos os dados iniciais, o próximo passo é garantir que os esforços que vamos usar no dimensionamento estejam corretos e de acordo com a norma. Isso significa aplicar os coeficientes de segurança da NBR 6118 para obter os valores de cálculo, que são os que realmente importam para a segurança da estrutura.

Pense nisso como um engenheiro de segurança de voo. Ele não projeta o avião para as condições ideais de tempo, mas sim para as piores tempestades imagináveis, adicionando margens de segurança em cada cálculo. Da mesma forma, na engenharia estrutural, usamos os esforços de cálculo, que são os esforços solicitantes majorados.

Passo 2: Determinação dos Esforços de Cálculo (Nd e Md)

1 Combinações de Ações (ELU)

A NBR 6118 estabelece diferentes combinações de cargas (permanentes, variáveis, vento, sismo, etc.) e seus respectivos coeficientes de majoração (γ_f). Você deve identificar a combinação mais desfavorável para o pilar em questão.

Exemplo simplificado:

- $N_d = \gamma_g \times N_{\text{permanente}} + \gamma_q \times N_{\text{variável}}$
- $M_d = \gamma_g \times M_{\text{permanente}} + \gamma_q \times M_{\text{variável}}$

Onde γ_g (para cargas permanentes) e γ_q (para cargas variáveis) são os coeficientes de majoração. Para edifícios, geralmente $\gamma_g = 1.4$ e $\gamma_q = 1.4$ (ou 1.5 para algumas situações).

2 Excentricidade de Cálculo (ed)

A excentricidade é a distância entre a linha de ação da força axial e o centro geométrico da seção. Ela é fundamental, pois $M_d = N_d \times e_d$.

$$e_d = M_d / N_d$$

Importante: Para pilares, a NBR 6118 exige uma excentricidade mínima, mesmo que o momento de cálculo seja zero, para considerar imperfeições construtivas e efeitos de 2ª ordem. Essa excentricidade mínima é um dos tópicos da próxima aula, mas é bom já ter em mente sua existência.

Ao final deste passo, você terá os valores de N_d e M_d que serão a base para a entrada nos ábacos de interação. Esses valores já incorporam a segurança exigida pela norma, garantindo que o pilar será capaz de resistir às condições mais críticas previstas.

Roteiro de Cálculo: Passo a Passo para Pilares Retangulares – Parte 3

Determinação dos Parâmetros Adimensionais

Com os esforços de cálculo (N_d e M_d) devidamente determinados, o próximo passo em nosso roteiro é "traduzi-los" para a linguagem dos ábacos de interação. Essa tradução é feita através dos parâmetros adimensionais que vimos anteriormente: ν (ν) e μ (μ). Eles são a chave para entrar no ábaco e encontrar a solução para o seu pilar.

Pense em um mapa de coordenadas. Você tem um ponto (N_d , M_d) no "mundo real" e precisa encontrar a localização correspondente (ν , μ) no "mapa do ábaco". Para fazer isso, precisamos também das propriedades de cálculo dos materiais, que são as resistências características divididas pelos coeficientes de minoração da NBR 6118.

Passo 3: Cálculo dos Parâmetros Adimensionais

01

Resistência de Cálculo do Concreto (f_{cd})

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

Onde γ_c é o coeficiente de minoração do concreto (geralmente 1.4 para ELU).

02

Resistência de Cálculo do Aço (f_{yd})

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

Onde γ_s é o coeficiente de minoração do aço (geralmente 1.15 para ELU).

03

Área da Seção de Concreto (A_c)

$$A_c = b \times h$$

(para seção retangular)

04

Cálculo de ν (ν)

$$\nu = N_d / (A_c \times f_{cd})$$

Este valor representa a intensidade da força axial em relação à capacidade de compressão do concreto da seção.

05

Cálculo de μ (μ)

$$\mu = M_d / (A_c \times h \times f_{cd})$$

Este valor representa a intensidade do momento fletor em relação à capacidade de flexão do concreto da seção.

Atenção às Unidades: É crucial que todos os valores estejam nas mesmas unidades (por exemplo, kN e m para forças e momentos, MPa para resistências, m² para áreas).

Ao final deste passo, você terá o par de coordenadas (ν , μ) que permitirá a entrada no ábaco de interação e a determinação da armadura necessária.

Roteiro de Cálculo: Passo a Passo para Pilares Retangulares – Parte 4

Utilização do Ábaco e Definição da Armadura

Chegamos ao coração do dimensionamento: a utilização do ábaco de interação. Com os parâmetros adimensionais v (ν) e μ (m_i) calculados, o ábaco se torna a ferramenta que nos revela a quantidade de armadura necessária para que o pilar suporte os esforços de projeto com segurança.

Imagine que o ábaco é um mapa topográfico, e você acabou de calcular suas coordenadas de GPS (v e μ). Seu objetivo é encontrar a "altitude" (a taxa de armadura, ρ) nesse ponto do mapa.

Passo 4: Utilização do Ábaco e Determinação da Armadura

1

Localize o Ponto (v , μ) no Ábaco

- No eixo vertical do ábaco, encontre o valor de v
- No eixo horizontal do ábaco, encontre o valor de μ
- Marque o ponto de interseção (P) correspondente a esses dois valores

2

Determine a Taxa de Armadura (ρ)

- Observe as curvas de taxa de armadura (ρ) que cruzam o ábaco
- O ponto P estará entre duas dessas curvas de ρ . Interpole visualmente (ou numericamente, se o ábaco for digital) para encontrar o valor de ρ correspondente ao seu ponto P

Importante: Se o ponto P cair fora da curva mais externa do ábaco, significa que a seção de concreto ($b \times h$) é insuficiente para os esforços e precisa ser aumentada.

3

Calcule a Área de Aço Necessária (A_s)

Uma vez que você tem o valor de ρ , use a fórmula:

$$A_s = \rho \times A_c$$

Onde A_c é a área da seção de concreto ($b \times h$).

Este A_s é a área total de aço longitudinal necessária para a seção.

4

Defina a Armadura Longitudinal

- Com a área de aço total (A_s) em mãos, escolha barras de aço de diâmetros comerciais (ex: $\phi 10$, $\phi 12.5$, $\phi 16$, $\phi 20$ mm)
- Calcule a quantidade de barras que somem uma área ligeiramente maior ou igual a A_s
- Para pilares, a armadura é geralmente distribuída simetricamente nas faces

Este passo é o cerne do dimensionamento. Ao final, você terá a quantidade e o diâmetro das barras de aço que garantirão a capacidade resistente do seu pilar.

Roteiro de Cálculo: Passo a Passo para Pilares Retangulares – Parte 5

Verificações Finais e Detalhamento

O dimensionamento não termina com a determinação da armadura. Há uma série de verificações cruciais e detalhes de projeto que garantem a funcionalidade, a durabilidade e a construtibilidade do pilar. Ignorar essas etapas pode levar a problemas sérios na obra ou na vida útil da estrutura.

Pense em um chef que, depois de preparar um prato delicioso, esquece de temperar ou de arrumar a apresentação. O resultado final não será o mesmo. Na engenharia, as verificações e o detalhamento são o "tempero" e a "apresentação" que garantem a excelência do projeto.

Passo 5: Verificações Finais e Detalhamento

Verificação da Armadura Mínima ($A_{s,min}$)

A NBR 6118 exige uma armadura mínima para pilares, mesmo que os cálculos indiquem menos. Isso garante uma ductilidade mínima e evita problemas como a retração do concreto.

- $A_{s,min} = 0,15\% \times A_c$ (para $f_{ck} \leq 50$ MPa)
- $A_{s,min} = 0,17\% \times A_c$ (para $f_{ck} > 50$ MPa)

A armadura calculada (A_s) deve ser maior ou igual a $A_{s,min}$.

Verificação da Armadura Máxima ($A_{s,max}$)

A norma também limita a armadura máxima para evitar o congestionamento excessivo de barras, que dificulta a concretagem e pode comprometer a aderência.

- $A_{s,max} = 4\% \times A_c$ (para pilares com emendas)
- $A_{s,max} = 8\% \times A_c$ (para pilares sem emendas)

A armadura calculada (A_s) deve ser menor ou igual a $A_{s,max}$. Se for maior, as dimensões da seção de concreto ($b \times h$) precisam ser aumentadas.

Detalhamento dos Estribos

Os estribos são armaduras transversais que confinam o concreto e a armadura longitudinal, evitando a flambagem das barras e absorvendo esforços de cisalhamento.

A NBR 6118 define o diâmetro mínimo e o espaçamento máximo dos estribos, que dependem do diâmetro da barra longitudinal e da menor dimensão da seção.

Geralmente, o espaçamento não deve exceder a menor dimensão do pilar, 12 vezes o diâmetro da menor barra longitudinal, ou 20 cm.

Verificação do Cobrimento

Garantir que o cobrimento mínimo especificado pela NBR 6118 (que depende da classe de agressividade ambiental) seja respeitado para proteger a armadura contra corrosão.

Ao concluir essas verificações e detalhar a armadura (longitudinal e transversal), seu projeto de pilar estará completo e em conformidade com as exigências normativas, pronto para ser executado com segurança.

Exercício Prático 1: Verificação de Pilar Existente

Agora que você conhece o roteiro, vamos aplicá-lo em um cenário comum: a verificação de um pilar existente. Muitas vezes, em reformas ou avaliações estruturais, precisamos verificar se um pilar já construído é capaz de suportar novos esforços ou se ainda atende às normas atuais.

Problema:

Um pilar retangular de 20 cm x 40 cm, com concreto C25 e aço CA-50, possui 8 barras de $\phi 12.5$ mm (4 em cada face maior, simetricamente dispostas). O cobrimento é de 3 cm. Verifique se este pilar é capaz de resistir aos seguintes esforços de cálculo (ELU): $N_d = 600$ kN e $M_d = 60$ kNm.

Dados:

- $b = 20$ cm = 0.20 m
- $h = 40$ cm = 0.40 m
- $f_{ck} = 25$ MPa
- $f_{yk} = 500$ MPa
- $A_s = 8 \times (\pi \times (1.25 \text{ cm})^2 / 4) = 9.816 \text{ cm}^2 = 0.0009816 \text{ m}^2$
- $c = 3$ cm = 0.03 m
- $N_d = 600$ kN
- $M_d = 60$ kNm

Solução – Passo a Passo:

1. Propriedades de Cálculo:

- $\gamma_c = 1.4, \gamma_s = 1.15$
- $f_{cd} = 25 / 1.4 = 17.86$ MPa
- $f_{yd} = 500 / 1.15 = 434.78$ MPa

2. Área da Seção de Concreto (A_c):

- $A_c = 0.20 \times 0.40 = 0.08 \text{ m}^2$

3. Parâmetros Adimensionais (v e μ):

- $v = 600 \text{ kN} / (0.08 \text{ m}^2 \times 17.86 \text{ MPa} \times 1000) = 0.42$
- $\mu = 60 \text{ kNm} / (0.08 \text{ m}^2 \times 0.40 \text{ m} \times 17.86 \text{ MPa} \times 1000) = 0.105$

4. Taxa de Armadura Existente (ρ):

- $\rho = 0.0009816 \text{ m}^2 / 0.08 \text{ m}^2 = 0.01227 = 1.227\%$

Verificação no Ábaco: Com $v = 0.42$ e $\mu = 0.105$, localize o ponto no ábaco de interação para pilares retangulares com armadura simétrica. Compare a posição desse ponto com as curvas de ρ . Se o ponto (0.42, 0.105) cair abaixo ou sobre a curva de $\rho = 1.227\%$, o pilar é capaz de resistir. Se cair acima, ele é insuficiente.

Conclusão: O pilar é capaz de resistir aos esforços solicitantes.

Exercício Prático 2: Dimensionamento de Pilar Novo

Agora, vamos inverter o desafio: em vez de verificar, vamos dimensionar a armadura para um pilar novo, dadas suas dimensões preliminares e os esforços de projeto. Este é o cenário mais comum para um engenheiro projetista.

Problema:

Dimensionar a armadura longitudinal para um pilar retangular de 25 cm x 50 cm, com concreto C30 e aço CA-50. Os esforços de cálculo (ELU) são: $N_d = 950$ kN e $M_d = 120$ kNm. O cobrimento é de 3 cm. Considere armadura simétrica.

01

Propriedades de Cálculo

- $\gamma_c = 1.4$, $\gamma_s = 1.15$
- $f_{cd} = 30 / 1.4 = 21.43$ MPa
- $f_{yd} = 500 / 1.15 = 434.78$ MPa

02

Área da Seção de Concreto (A_c)

$$A_c = 0.25 \times 0.50 = 0.125 \text{ m}^2$$

03

Parâmetros Adimensionais (ν e μ)

- $\nu = 950 \text{ kN} / (0.125 \text{ m}^2 \times 21.43 \text{ MPa} \times 1000) = 0.354$
- $\mu = 120 \text{ kNm} / (0.125 \text{ m}^2 \times 0.50 \text{ m} \times 21.43 \text{ MPa} \times 1000) = 0.089$

04

Utilização do Ábaco

Com $\nu = 0.354$ e $\mu = 0.089$, localize o ponto no ábaco de interação para pilares retangulares com armadura simétrica. Interpole entre as curvas de ρ para encontrar a taxa de armadura necessária.

(Assumindo um ábaco típico, para este ponto, o valor de ρ seria aproximadamente 0.010 ou 1.0%)

05

Cálculo da Área de Aço Necessária (A_s)

$$A_s = \rho \times A_c = 0.010 \times 0.125 \text{ m}^2 = 0.00125 \text{ m}^2 = 12.5 \text{ cm}^2$$

06

Definição da Armadura Longitudinal

Precisamos de 12.5 cm^2 de aço. Vamos escolher barras de $\phi 16$ mm (área = 2.01 cm^2 por barra).

Número de barras = $12.5 \text{ cm}^2 / 2.01 \text{ cm}^2/\text{barra} \approx 6.22$ barras.

Usaremos **8 barras de $\phi 16$ mm** (4 em cada face maior), totalizando $A_s = 8 \times 2.01 = 16.08 \text{ cm}^2$.

07

Verificações Finais ($A_{s,min}$ e $A_{s,max}$)

- $A_{s,min} = 0.15\% \times A_c = 0.0015 \times 1250 \text{ cm}^2 = 1.875 \text{ cm}^2$. ($16.08 \text{ cm}^2 > 1.875 \text{ cm}^2$ - OK)
- $A_{s,max} = 4\% \times A_c = 0.04 \times 1250 \text{ cm}^2 = 50 \text{ cm}^2$. ($16.08 \text{ cm}^2 < 50 \text{ cm}^2$ - OK)

Conclusão: O pilar deve ser armado com 8 barras de $\phi 16$ mm, distribuídas simetricamente.

Inovações em Materiais: Concretos de Alto Desempenho (CAD) e Autoadensáveis (CAA)

O concreto, material milenar, continua a evoluir. As inovações em sua composição e tecnologia de produção têm um impacto direto no dimensionamento e na performance das estruturas. Dois exemplos notáveis são os Concretos de Alto Desempenho (CAD) e os Concretos Autoadensáveis (CAA).

Concretos de Alto Desempenho (CAD)

O que são:

Concretos com alta resistência à compressão (geralmente acima de 50 MPa), maior durabilidade e menor permeabilidade. São obtidos com o uso de aditivos superplastificantes, adições minerais (sílica ativa, cinza volante) e uma dosagem otimizada.

Impacto no Dimensionamento de Pilares:

- **Redução de Seção:** Com um fck muito maior, é possível dimensionar pilares com seções transversais menores para a mesma carga, liberando espaço útil na arquitetura. Isso é especialmente valioso em edifícios altos.
- **Maior Durabilidade:** A menor permeabilidade do CAD confere maior resistência a ataques químicos e à corrosão da armadura, aumentando a vida útil da estrutura.

Aplicação Real: Arranha-céus, pontes de grandes vãos, estruturas que exigem alta resistência e durabilidade em ambientes agressivos.

Concretos Autoadensáveis (CAA)

O que são:

Concretos que, devido à sua alta fluidez e coesão, são capazes de se adensar sob o próprio peso, preenchendo completamente as fôrmas e envolvendo a armadura, sem a necessidade de vibração externa.

Impacto no Dimensionamento de Pilares:

- **Melhor Preenchimento:** Garante a homogeneidade do concreto e o completo envolvimento da armadura, o que se traduz em maior segurança e desempenho real da estrutura.
- **Redução de Mão de Obra e Ruído:** Elimina a necessidade de vibradores, agilizando a concretagem e reduzindo o ruído no canteiro.
- **Melhor Acabamento:** Superfícies mais lisas e uniformes, reduzindo a necessidade de reparos.

Aplicação Real: Estruturas com alta densidade de armadura (como pilares de grandes edifícios), elementos de geometria complexa, locais com restrição de ruído.

A incorporação desses materiais no projeto estrutural não só otimiza o uso de recursos, mas também eleva o padrão de segurança e eficiência das construções modernas.

Inovações em Materiais: O Papel das Fibras no Concreto

Além dos concretos de alto desempenho e autoadensáveis, a adição de fibras ao concreto tem revolucionado suas propriedades, especialmente em termos de ductilidade e tenacidade. As fibras atuam como uma "rede" interna, controlando a propagação de fissuras e melhorando o comportamento do material após a fissuração.

- ❏ **O que são Fibras no Concreto?** São pequenos filamentos, geralmente de aço, polipropileno, vidro ou carbono, que são misturados ao concreto durante a produção. Elas podem ter diferentes comprimentos e diâmetros, e sua função principal é melhorar as propriedades mecânicas do concreto, que por natureza é um material frágil à tração.

Como as Fibras Melhoram o Concreto (e os Pilares):



Controle de Fissuras

As fibras "costuram" as microfissuras que se formam no concreto, impedindo que elas se propaguem e se tornem microfissuras. Isso aumenta a durabilidade e a estética da estrutura.



Aumento da Tenacidade e Ductilidade

O concreto reforçado com fibras (CRF) não se rompe de forma frágil após a fissuração. Ele continua a suportar carga mesmo após o pico de resistência, deformando-se significativamente. Em pilares, isso é vital para a segurança, pois oferece um comportamento mais dúctil em caso de sobrecarga ou eventos sísmicos.



Melhora da Resistência à Tração na Flexão

Embora o concreto seja fraco à tração, as fibras aumentam sua capacidade de resistir a esses esforços, o que pode ser benéfico em regiões de pilares sujeitas a flexotração.



Redução de Armadura de Pele

Em alguns casos, o uso de fibras pode reduzir a necessidade de armadura de pele (armadura superficial para controle de fissuração), simplificando o detalhamento.

Aplicação em Pilares: Em pilares, o uso de fibras pode ser particularmente interessante em regiões de alta concentração de tensões, em pilares sujeitos a impactos, ou em estruturas localizadas em zonas sísmicas, onde a ductilidade é um requisito primordial. Embora não substituam a armadura principal, as fibras complementam seu desempenho, tornando o pilar mais resiliente e seguro.

Tecnologia e Softwares: BIM e a Era Digital do Projeto Estrutural

A engenharia estrutural, assim como outras áreas da construção, está passando por uma transformação digital. A metodologia **BIM (Building Information Modeling)** e o uso de softwares avançados são a vanguarda dessa mudança, otimizando o processo de projeto e execução.

- ❏ **O que é BIM no Contexto Estrutural?** BIM não é apenas um software, mas uma metodologia de trabalho colaborativa baseada na criação e gestão de um modelo digital de informações de uma construção. No contexto estrutural, isso significa criar um modelo 3D inteligente do esqueleto da edificação, onde cada pilar, viga e laje contém informações paramétricas (dimensões, materiais, armaduras, propriedades de cálculo).

Vantagens do BIM para Pilares e Estruturas:

Colaboração Integrada

O modelo estrutural pode ser facilmente compartilhado e coordenado com os modelos de arquitetura, instalações e outros, permitindo a detecção precoce de interferências (ex: um pilar no meio de uma porta) antes da construção.

Visualização e Análise

A visualização 3D facilita a compreensão da estrutura e permite análises mais complexas, como simulações de carregamento e comportamento sísmico.

Quantitativos Precisos

O modelo BIM gera automaticamente listas de materiais (concreto, aço), facilitando o orçamento e o controle de custos.

Automação do Detalhamento

Softwares BIM podem gerar automaticamente desenhos de detalhamento de armadura, cortes e plantas, reduzindo erros e tempo de projeto.

TQS

Um sistema completo que abrange desde a concepção estrutural até o detalhamento final, com módulos específicos para pilares, vigas, lajes e fundações. Permite a análise de efeitos de 2ª ordem e a interação com o modelo BIM.

Eberick

Outro software robusto, conhecido pela sua interface intuitiva e capacidade de gerar projetos completos de concreto armado e protendido, também com integração BIM.

Essas ferramentas não substituem o conhecimento do engenheiro, mas potencializam sua capacidade de projetar estruturas mais seguras, eficientes e econômicas, alinhadas com as tendências de digitalização da construção.

Sustentabilidade na Construção: Pilares do Futuro

A sustentabilidade não é mais uma opção, mas uma necessidade na engenharia civil. O setor da construção é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos. Projetar pilares e estruturas de forma sustentável significa minimizar o impacto ambiental sem comprometer a segurança e o desempenho.

Como o Dimensionamento de Pilares Contribui para a Sustentabilidade:

Otimização de Materiais

- **Dimensionamento Eficiente:** Um dimensionamento preciso e otimizado evita o superdimensionamento desnecessário. Isso significa usar a quantidade exata de concreto e aço, reduzindo o consumo de recursos e a emissão de CO₂.
- **Uso de CAD e CAA:** Concretos de Alto Desempenho permitem seções menores. Concretos Autoadensáveis otimizam o processo de concretagem, reduzindo perdas e retrabalho.

Materiais Sustentáveis

- **Concretos com Agregados Reciclados:** Utilização de agregados provenientes de resíduos da construção e demolição (RCD).
- **Cimentos de Baixo Carbono:** Cimentos com menor pegada de carbono, utilizando adições minerais em maior proporção.
- **Aço Reciclado:** O aço para armaduras já possui alto teor de material reciclado.

Durabilidade e Vida Útil

Um pilar bem dimensionado e construído, com atenção ao cobrimento e à qualidade do concreto, terá uma vida útil mais longa. Isso reduz a necessidade de reformas e reconstruções, economizando recursos a longo prazo.

A NBR 6118, ao exigir verificações de durabilidade (ELS), já incorpora esse princípio.

Ao projetar, o engenheiro tem a responsabilidade de buscar soluções que não apenas atendam aos requisitos técnicos, mas que também contribuam para um futuro mais verde. Pilares eficientes são pilares sustentáveis.

Consolidação e Próximos Passos

Chegamos ao fim de nossa jornada sobre o dimensionamento de pilares à flexocompressão normal. Vimos que um pilar raramente suporta apenas compressão, mas sim uma combinação de força axial e momento fletor. Essa interação complexa exige uma análise cuidadosa, guiada pela NBR 6118:2014, que nos fornece os conceitos de Estados Limites e os coeficientes de segurança essenciais.

Exploramos o comportamento da seção transversal sob flexocompressão, a base teórica dos diagramas momento-curvatura, e como os ábacos de interação se tornam a ferramenta prática indispensável para o dimensionamento. Percorremos um roteiro de cálculo detalhado, desde a coleta de dados até as verificações finais e o detalhamento da armadura, aplicando-o em exercícios práticos de verificação e dimensionamento. Por fim, abrimos uma janela para o futuro, discutindo as inovações em materiais como CAD, CAA e fibras, e o impacto da tecnologia BIM e dos softwares de projeto na otimização e sustentabilidade das estruturas.

Em prática:

- Sempre identifique os esforços N_d e M_d de cálculo (ELU) para o pilar
- Utilize os ábacos de interação como seu principal guia para dimensionar a armadura
- Não se esqueça das verificações de armadura mínima e máxima da NBR 6118
- Considere as inovações em materiais e tecnologias para projetos mais eficientes
- Pense na sustentabilidade em cada decisão de projeto

Autoavaliação:

1. Qual o principal motivo pelo qual os pilares são dimensionados à flexocompressão e não apenas à compressão pura?
 - a) Apenas para aumentar a quantidade de armadura.
 - b) Porque todas as cargas são aplicadas excêntrica.
 - c) Devido à combinação de força axial e momento fletor, que é a condição mais comum de solicitação.
 - d) Para considerar apenas os efeitos de 2ª ordem.
2. No contexto da NBR 6118:2014, qual o objetivo principal dos Estados Limites Últimos (ELU)?
 - a) Garantir o conforto dos usuários da estrutura.
 - b) Assegurar a durabilidade da estrutura contra corrosão.
 - c) Prevenir o colapso ou a ruptura da estrutura.
 - d) Reduzir o custo total da obra.
3. Os parâmetros adimensionais ν (ν_u) e μ (μ_i) são utilizados nos ábacos de interação para:
 - a) Determinar a resistência característica do concreto.
 - b) Converter os esforços de cálculo em valores que podem ser plotados no ábaco, independentemente das dimensões da seção.
 - c) Calcular o cobrimento da armadura.
 - d) Definir o tipo de aço a ser utilizado.
4. Qual das seguintes inovações em materiais permite a redução das dimensões da seção de um pilar para uma mesma carga, devido à sua maior resistência?
 - a) Concretos Autoadensáveis (CAA).
 - b) Concretos de Alto Desempenho (CAD).
 - c) Fibras de polipropileno.
 - d) Cimentos de baixo carbono.
5. Explique brevemente a importância da metodologia BIM no projeto de estruturas de concreto, especialmente no que tange à colaboração e detecção de interferências.

Gabarito:

1. c) | 2. c) | 3. b) | 4. b)

Resposta Sugerida (Questão 5): A metodologia BIM é crucial no projeto estrutural por permitir a criação de um modelo 3D inteligente e paramétrico da estrutura. Isso facilita a colaboração entre as diversas disciplinas (arquitetura, instalações, estrutura), pois todos trabalham no mesmo modelo ou em modelos coordenados. A principal vantagem é a detecção precoce de interferências (clashes), como um pilar que colide com uma tubulação ou uma porta, antes que a obra seja iniciada, evitando retrabalhos, atrasos e custos adicionais no canteiro.

Conexão com a Próxima Aula: Nesta aula, focamos no dimensionamento de pilares à flexocompressão normal, considerando os esforços de 1ª ordem. Mas a história não termina aqui! Na **Aula 15 – Análise de Esbeltez e Efeitos de 2ª Ordem em Pilares**, vamos aprofundar como a esbeltez do pilar e a interação entre a deformação e a força axial podem gerar momentos adicionais, que são cruciais para a segurança de pilares mais delgados.

Recursos Adicionais e Considerações Finais



ABNT NBR 6118:2014

Projeto de Estruturas de Concreto — Procedimento. Sua principal referência normativa para todos os aspectos do dimensionamento de pilares.



Livros de Concreto Armado

Consulte obras de autores renomados como Fusco, Carvalho e Pinheiro, ou Leonhardt e Mönning para aprofundamento teórico e prático.



Artigos Técnicos e Webinars

Mantenha-se atualizado sobre as inovações em materiais e softwares através de publicações especializadas e eventos técnicos.

NOTA IMPORTANTE: As informações regulatórias/legais/técnicas desta aula estão atualizadas até 2025. Consulte sempre fontes oficiais para verificar alterações.

O domínio do dimensionamento de pilares à flexocompressão normal é um marco importante na formação de qualquer engenheiro estrutural. Com os conhecimentos adquiridos nesta aula, você está preparado para enfrentar os desafios reais do projeto de estruturas de concreto, sempre priorizando a segurança, a eficiência e a sustentabilidade.

Lembre-se: a engenharia é uma ciência em constante evolução. Continue estudando, questionando e aplicando os conceitos aprendidos. O futuro das estruturas de concreto está em suas mãos!

Sucesso em seus projetos!