

ANÁLISE DO PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO EM EDIFÍCIOS DE 5, 10 E 15 PAVIMENTOS (RELAÇÃO GEOMÉTRICA DE PLANTA 1:2)

Analysis of reinforced concrete pillars pre-dimensioning methods for 5, 10 and 15 floor buildings (geometric proportion plan 1:2)

Douglas Yoshiaki Benites Koyama¹, Augusto Romanini², Hyago Maurício Bremm Muller³, Jennifer Mayara Vilas Boas da Silva⁴



PALAVRAS-CHAVE:

Estruturas;
Concreto armado;
Pré-dimensionamento;
Pilares;
Edifícios.

KEYWORDS:

Structures;
Reinforced concrete;
Pre-dimensioning;
Pillars;
Buildings.

RESUMO: Elaborar o dimensionamento estrutural de edifícios em concreto armado consiste em iniciar um processo iterativo que pode durar dias até se determinar as dimensões finais dos elementos estruturais. Devido a esta situação, o engenheiro necessita contar com sua experiência de trabalho para a redução do tempo gasto no processo de dimensionamento ou utilizar métodos de pré-dimensionamento de estruturas de modo a estimar as seções próximas das seções definitivas dos elementos. Desta maneira, o presente estudo tem como finalidade aplicar métodos de pré-dimensionamento de pilares em edifícios de 5, 10 e 15 pavimentos e determinar a exatidão destes métodos comparando os resultados com o dimensionamento por meio de *software* estrutural, considerando, inclusive, o efeito dos ventos nessas estruturas. Após analisar os resultados, pode-se indicar o método mais exato para cada estrutura além do mais exato para cada posicionamento do pilar. Os métodos Bacarji-Pinheiro (1996) e Aufieri (1997) foram exatos para todas as três edificações. O método proposto por Fusco (1994) se mostrou o meio mais simplificado de pré-dimensionamento, dada a necessidade de poucos parâmetros, porém, obteve resultados satisfatórios apenas no edifício de 5 pavimentos.

ABSTRACT: *Elaborating structural dimensioning of reinforced concrete buildings involves initiating an interactive process which may take a few days to determine the structural elements' final dimensions. With this situation, the engineer needs to use either his job experience to reduce time spent on dimensioning process or structural pre-dimensioning methods, to estimate values of cross section columns area closer to its final dimension. Thus, this current study aims to perform column pre-dimensioning methods in buildings with 5, 10 and 15 floors, and determine accuracy of these methods comparing to results obtained by structural software, in addition, considering the horizontal effects caused by wind force to the buildings. After analyzing the results, it could indicate the most accurate method to each structure, and each column position. Bacarji-Pinheiro (1996) and Aufieri (1997) were effective for all these three buildings. The method proposed by Fusco (1994) has shown the most effortless technique once it needs fewer parameters to be considered, however its results satisfied values for the 5 floor building only.*

* Contato dos autores:

¹ douglaskoyama@hotmail.com (KOYAMA, D. Y. B.)

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Especialista em Gestão e Planejamento de Projetos e Obras. Projeta Engenharias LTDA, PROJETA, Brasil.

² augusto.romanini@gmail.com (ROMANINI, A.)

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Mestre em Engenharia Geotécnica (UFOP), Engenheiro Geotécnico Pleno - Mineração Usiminas S.A., MUSA, Brasil.

³ hyagomuller@gmail.com (MULLER, H. M. B.)

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar).

⁴ jennifermayaravb@gmail.com (SILVA, J. M. V. B.)

Arquiteta e Urbanista pela Faculdade de Ciências Sociais e Aplicadas de Sinop (FACISAS-UNIC), Mestra em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Estadual de Maringá (PPU/UEM) e doutoranda pela Universidade de São Paulo (USP).

1. INTRODUÇÃO

O anseio por moradias é natural do ser humano. A construção de abrigos contra intempéries e predadores foi um dos fatores que possibilitou a evolução do homem. No entanto, devido à arcaica tecnologia e falta de conhecimento e de materiais construtivos de qualidade, as edificações não venciam grandes alturas e apresentavam vida útil curta. Devido ao avanço da tecnologia aplicada na construção civil, houve um aumento da responsabilidade do profissional para execução de serviços ágeis que não abrissem mão da qualidade.

Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2009), o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo perdendo apenas para a água. Tal fato se dá em razão do seu custo-benefício que só é possível quando há um dimensionamento econômico por parte de profissionais. Por isso, é comum para o profissional se deparar com serviços de dimensionamento de elementos em concreto armado.

Conforme Alva (2007), elaborar projetos de edifícios em concreto armado requer um processo iterativo que pode ser demorado até que se determinem todas as dimensões das peças de uma estrutura. Devido a esta situação, o profissional necessita contar muito com sua experiência de trabalho para a redução do tempo gasto no processo de tentativa e erro até encontrar as seções ideais dos elementos. Uma alternativa é a utilização de métodos de pré-dimensionamento de estruturas que dispõem de cálculos de estimativas de seções dos elementos sem a necessidade de saber a carga de solicitação atuante.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho buscou analisar a precisão de três métodos de pré-dimensionamento de pilares (Aufiere, 1997; Bacarji; Pinheiro, 1996; Fusco, 2011) em edificações de 5, 10 e 15 pavimentos com proporções em planta 1:2, bem como compará-los com o dimensionamento feito por meio de *software* estrutural, verificando também os impactos nos métodos ocasionados pelos esforços dos ventos combinados com a classificação das estruturas em nós móveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura com conceitos e definições importantes para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo estes: Pilares; Estabilidade global; Parâmetros de instabilidade alfa (α); Coeficiente Gama-z (γ_z); Segurança por Estados Limites; Métodos de pré-dimensionamento; e Área de influência.

2.1 PILARES

Conforme Alva (2007), os pilares são elementos lineares (barra) posicionados verticalmente ou quase, sujeitos principalmente à compressão simples e flexo-compressão normal ou oblíqua. Em edifícios, recebem os esforços principalmente de vigas e lajes, e transmitem para elementos inferiores a eles (geralmente para fundações).

Os pilares podem ser classificados quanto ao seu posicionamento nas estruturas em pilares de canto, de extremidade e centro (intermediários), conforme mostra a Figura 1. Segundo Giongo (2007), pilares de canto são os que possuem elementos estruturais conectados de modo que gerem esforços de flexo-compressão oblíqua. Já os de extremidade, admitem-se excentricidade inicial em uma direção que gera esforços de flexo-compressão normal. Por fim, os pilares intermediários ou de centro são considerados elementos sujeitos a esforços de compressão centrada.

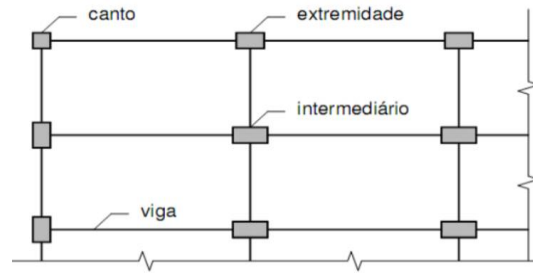


FIGURA 1: Classificação de pilares

FONTE: Oliveira et al. (2009)

2.2 ESTABILIDADE GLOBAL

Segundo Giongo (2007), a atuação simultânea das ações verticais e horizontais resulta em deslocamentos laterais dos nós da estrutura das edificações. Esse efeito (conhecido como não linearidade geométrica) é pressuposto, inicialmente, o equilíbrio na posição deslocada, o que gera esforços solicitantes adicionais (esforços de segunda ordem global) em vigas e pilares.

Segundo Fusco (2011), para a finalidade de cálculo, dividem-se as estruturas em nós fixos e nós móveis. Estruturas de nós fixos, quando os deslocamentos laterais são pequenos (desprezíveis; menores que 10% dos esforços de primeira ordem), os efeitos de segunda ordem globais também são. Já as estruturas para as quais esses deslocamentos são consideráveis e conduzem a esforços de segunda ordem globais importantes (maiores que 10% dos esforços de primeira ordem) são chamadas de estruturas de nós móveis ou estruturas deslocáveis.

Com o objetivo de especificar se determinada estrutura encaixa em nós fixos ou nós móveis, a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica a análise por meio de dois parâmetros: instabilidade (α) e coeficiente (Y_z).

2.2.1 Parâmetros de instabilidade alfa (α)

De acordo com o estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), uma estrutura reticulada simétrica pode ser considerada como sendo de nós fixos se seu parâmetro de instabilidade (α) for menor que o valor α_1 , conforme Equação 1:

$$\alpha = H_{total} \sqrt{N_k / (EI)_{eq}} \quad \text{Eq. [1]}$$

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n \quad \text{se: } n \leq 3$$

$$\alpha_1 = 0,6 \quad \text{se: } n \geq 4$$

Em que:

n = o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação;

H_{total} = a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação;

N_k = o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura, com seu valor característico;

$(EI)_{eq}$ = módulo de rigidez da estrutura do edifício equivalente a um pilar de seção constante engastado na base e livre no topo.

2.2.2 Coeficiente Gama-z (γ_z)

A NBR 6118 (ABNT, 2014) caracteriza o coeficiente Gama-z em um parâmetro de classificação da estrutura quanto à deslocabilidade dos nós, destacando a significância dos esforços de segunda ordem globais para efeitos de cálculo. O valor do coeficiente γ_z é calculado pela expressão:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - (\Delta M_{tot'd} / M_{tot'd})} \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

$M_{tot'd}$ = o momento de tombamento;

$\Delta M_{tot'd}$ = a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada com seus valores de cálculo pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação obtidos da análise em primeira ordem.

Ainda conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014):

- Estruturas de nós fixos possuem $\gamma_z \leq 1,1$. Os efeitos globais de 2ª ordem são desprezíveis (inferiores a 10% dos respectivos esforços de 1ª ordem). É permitido considerar apenas os efeitos locais de 2ª ordem;
- Estruturas de nós móveis possuem $1,1 < \gamma_z < 1,3$. Os efeitos globais de 2ª ordem são importantes (superiores a 10% dos esforços de 1ª ordem). Sendo obrigatória a consideração dos efeitos de 2ª ordem globais e locais;
- Estruturas são consideradas instáveis quando $\gamma_z > 1,3$.

2.3 SEGURANÇA POR ESTADOS LIMITES

Segundo Bastos (2014), a segurança que todos os modelos estruturais devem considerar são os aspectos referentes à segurança e ao conforto do usuário. A NBR 6118 (ABNT, 2014) trata desses dois aspectos apresentando o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS).

ELU define-se pela segurança da estrutura contra o colapso. ELS define-se pela ocorrência, repetição ou duração de efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura.

2.4 MÉTODOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Dentre as técnicas utilizadas para auxiliar o projetista no dimensionamento de elementos estruturais, existem os métodos de pré-dimensionamento. Para Alva (2007), esses métodos são fatores importantes que agilizam o trabalho, uma vez que estas técnicas consistem em encontrar valores preliminares das seções de cada elemento da estrutura através de uma análise prévia.

Neste trabalho serão aplicados os métodos de Aufieri (1997), Bacarji e Pinheiro (1996) e Fusco (1994). Para todos eles a determinação das áreas de influência é o primeiro passo. As áreas de influência possuem a função de estimar uma área da concepção estrutural que irá exercer esforços sob o pilar em questão.

2.4.1 Áreas de influência

Este processo consiste em dividir as áreas dos pavimentos de acordo com a influência em cada pilar, dependendo do seu posicionamento na estrutura conforme ilustrado na Figura 2.

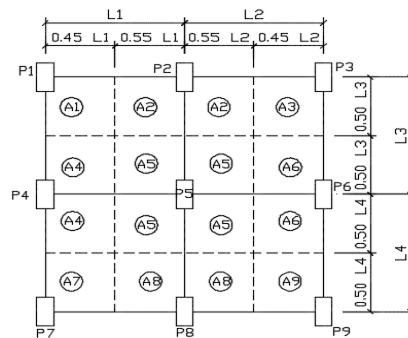


FIGURA 2: Área de Influência dos Pilares
FONTE: Adaptado de Bacarji e Pinheiro (1996)

- 0,45 L: para pilares de extremidade e canto, em sua menor direção;
- 0,55 L: para os complementos dos casos anteriores;
- 0,50 L: para pilares de extremidade e de canto, nas maiores dimensões.

2.4.2 Método de Fusco (1994)

Citado por Bastos (2015), o pesquisador utilizou a seguinte simplificação para o cálculo de pré-dimensionamento das seções de pilares intermediários (Equações 3 e 5), e para pilares de extremidade e canto (Equações 4 e 5). Segundo o autor, estima-se a carga N_d com valor 10 kN/m^2 por área de influência:

Pilares Intermediários:

$$A_c = \frac{N_d}{(0,5 \cdot f_{ck} + 0,4)} \tag{Eq. [3]}$$

Pilares de Extremidade e Canto:

$$A_c = \frac{1,5 \cdot N_d}{(0,5 \cdot f_{ck} + 0,4)} \tag{Eq. [4]}$$

$$N_d = 10 \cdot A_i \cdot \gamma_n \cdot \gamma_f \cdot (n + 0,7); \tag{Eq. [5]}$$

Em que:

A_c = área da seção de concreto (em cm^2);

N_d = Carga solicitante estimada obtida por (kN);

A_i = área de influência do pilar (em m^2);

f_{ck} = resistência característica do concreto (kN/m^2);

γ_n = coeficiente de majoração da força normal (Tabela 13.1 da NBR 6118);

γ_f = coeficiente de majoração da força normal (Tabela 11.1 da NBR 6118).

2.4.3 Método de Aufieri (1997)

O autor utiliza a Equação 6 para encontrar o valor da área da seção transversal de um determinado pilar:

$$A_C = \frac{\phi \cdot A_i \cdot (g + q) \cdot (n + 0,7)}{(\sigma_{id})} \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

ϕ = coeficiente que majora as ações axiais já que as solicitações nos pilares são consideradas centradas:

- Pilares Internos -> $\phi = 1,8$;
- Pilares Extremidades -> $\phi = 2,00$;
- Pilares Canto -> $\phi = 2,30$;

A_i = área de influência do pilar;

n = número de pavimentos tipo acima do pilar estudado (o valor 0,7 corresponde à cobertura, suposta ter ação total equivalente a 70% do valor correspondente ao pavimento-tipo);

$(g + q)$ = carregamento uniformemente distribuído; é usualmente adotado entre 8 kN/m² e 12 kN/m²;

σ_{id} = tensão ideal de cálculo de concreto;

$$\sigma_{id} = 0,85f_{cd} + \rho \cdot (f_{sd} - 0,85 f_{cd}) \quad \text{Eq. [7]}$$

f_{cd} = força resistente de cálculo do concreto à compressão (kN/cm²);

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}; \quad \text{Eq. [8]}$$

f_{sd} = força resistente de cálculo do aço relativa à deformação de 0,2% (kN/cm²):

- Aço CA-25 -> $f_{sd} = 217 \text{ MPa}$;
- Aço CA-50 -> $f_{sd} = 420 \text{ MPa}$;
- Aço CA-60 -> $f_{sd} = 400 \text{ MPa}$;

ρ = Taxa geométrica de armadura longitudinal (adota-se 2%).

2.4.4 Método de Bacarji e Pinheiro (1996)

Os autores utilizam as Equações 9 e 10 para o cálculo das seções transversais dos pilares:

$$A_C = \frac{\alpha \cdot A_i \cdot p \cdot (n + 0,7)}{(\sigma_{id})} \quad \text{Eq. [9]}$$

$$\sigma_{id} = 0,85f_{cd} + \rho \cdot \sigma_{s2} \quad \text{Eq. [10]}$$

Em que:

α = Coeficiente de majoração da carga, dada por:

- $\alpha = 1,8$ para pilares intermediários;
- $\alpha = 2,2$ pilares de extremidade;
- $\alpha = 2,5$ pilares de canto;

A_i = área de influência do pilar;

p = força uniformemente distribuída. Entre 7 kN/m² e 13 kN/m²;

n = número de pavimentos tipo do edifício (o valor 0,7 corresponde à cobertura, suposta ter ação total equivalente a 70% do valor correspondente ao pavimento-tipo);

σ_{id} = tensão ideal de cálculo

f_{cd} = força resistente de cálculo do concreto à compressão, calculada conforme a Equação 8

ρ = taxa geométrica de armadura longitudinal. Adota-se 2%

σ_{s2} = tensão no aço relativa à deformação específica de 0,2%:

- Para aço CA-50A $\sigma_{s2} = 420 \text{ MPa}$;
- Para aço CA-60A $\sigma_{s2} = 355 \text{ MPa}$.

3. METODOLOGIA

Para a pesquisa e aplicação dos métodos de pré-dimensionamento de pilares, este estudo consistiu na elaboração de um projeto arquitetônico utilizado para três edifícios com cinco, dez e quinze pavimentos, definidos em Caso A (5 Pavimentos), Caso B (10 pavimentos) e Caso C (15 pavimentos). O modelo arquitetônico foi elaborado através do *software* Revit. Para a etapa seguinte, utilizou-se o AutoCAD 2D para a análise do projeto arquitetônico, posicionamento dos elementos estruturais e determinação das áreas de influência nos pilares seguindo o procedimento especificado pelo método. Para os cálculos de pré-dimensionamento e determinação preliminar das estruturas foi utilizado o Excel. O *software* Eberick V9 foi utilizado para o lançamento da concepção e obtenção do dimensionamento definitivo dos elementos estruturais. Por fim, para a verificação da precisão e exatidão dos métodos tendo como parâmetro os resultados obtidos pelo *software* estrutural, continuou-se o trabalho no Excel, onde foram gerados os resultados da pesquisa.

3.1 PROJETO ARQUITETÔNICO

Para o estudo, foi elaborada uma planta arquitetônica na proporção 1:2 em que todos os andares se assemelham exceto pelos pavimentos térreo e cobertura. O arquitetônico delimita o edifício com 28 m de comprimento e 14 m de largura, com uma área de ocupação de 380,48 m².

Todos os apartamentos possuem dois quartos, sala, cozinha, lavanderia, banheiro e sacada; pé direito de 3 m, tendo o piso em porcelanato e o forro em gesso a distância de 3,30 m entre lajes.

Buscou-se atender as dimensões mínimas de cômodos determinadas pelo Código de Obras de Sinop - MT. Logo, além dos limites mínimos de áreas, houve adoção de vãos de janelas e portas que atendessem aos quesitos mínimos de ventilação e iluminação natural, bem como de acessibilidade. A planta baixa está representada na Figura 3.

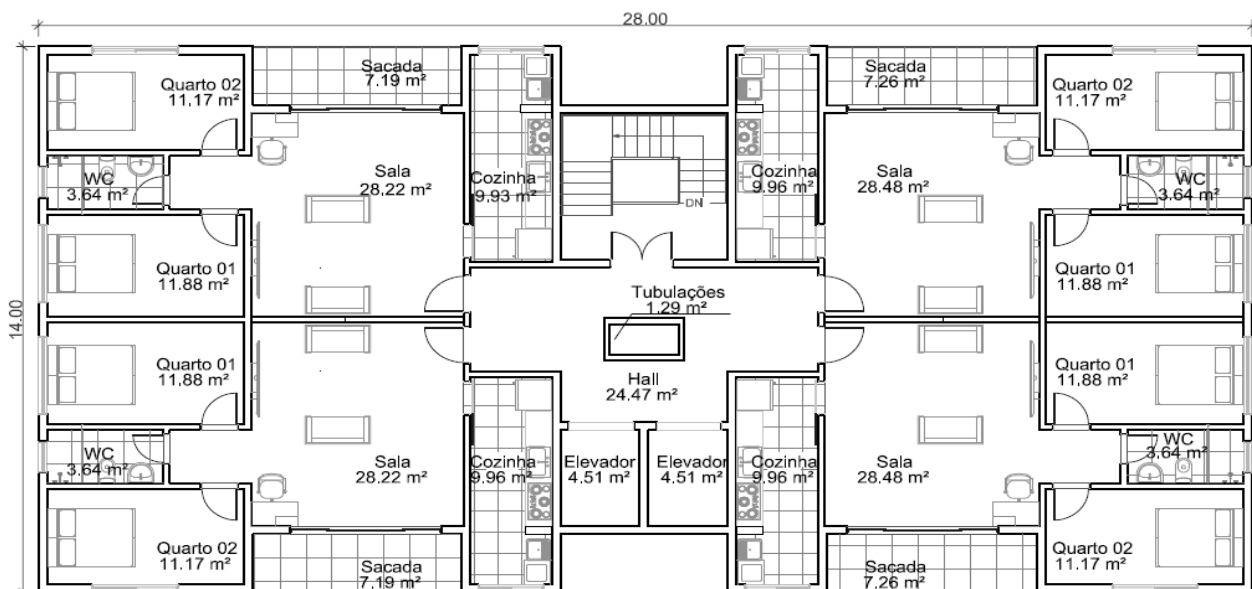


FIGURA 3: Modelo arquitetônico.

3.2 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

Para a elaboração do modelo estrutural, buscou-se respeitar as limitações da arquitetura quanto às dimensões das espessuras das paredes de 20 cm. Os vãos entre os pilares ficaram de 3,5 a 5,0 m gerando áreas de influências médias de 11 m².

Com o objetivo de analisar os impactos dos efeitos de 2ª ordem nos métodos de pré-dimensionamento de pilares, optou-se por elaborar um modelo estrutural em que o Gama-z ficasse de 1,10 a 1,20.

O posicionamento dos elementos estruturais foi estudado visando a estabilidade dos edifícios, economia de materiais e a praticidade em executar o projeto, por isso o posicionamento simétrico. Estruturas com posicionamento prático dos elementos (alinhamento de pilares, vigas com dimensões lineares próximas), afetam positivamente os cálculos de pré-dimensionamento.

Para cada edifício optou-se por manter constantes as seções dos pilares, em todos os pavimentos, de modo a agilizar o processo de lançamento e dimensionamento da estrutura. A disposição dos pilares foi gerada tendo suas maiores dimensões alinhadas às menores dimensões dos edifícios (sentido do eixo y) de modo a auxiliar no enrijecimento das edificações. Ao todo, foram utilizados 33 pilares todos tendo dimensões com valores múltiplos de dois.

As vigas foram todas engastadas aos pilares fazendo com que os esforços de momento fossem resistidos pelo sistema como um todo. As seções das vigas são retangulares com dimensões 15 x 40 cm e 15 x 50 cm. Optou-se pela padronização dos elementos visando a linearidade do peso próprio dos elementos, o que facilita processos construtivos.

Para todos os pavimentos, as lajes foram consideradas maciças com 12 cm de espessura, sendo todas elas em continuidade com as lajes vizinhas. Já nas extremidades de cada pavimento dos edifícios, as lajes não possuem engastamento com as vigas, porque nos ELUs pode-se considerar grande perda de rigidez a torção das vigas de extremidade por fissuração e, com plastificação em torção destas, fica caracterizada um comportamento de rótula plástica, ou seja, o apoio extremo pode ser considerado como um apoio do segundo gênero no ELU.

A classe de agressividade do ambiente foi considerada moderado (CAA-2) com cobrimento das armaduras de 3 cm para vigas e pilares; f_{ck} do concreto de 35 MPa; e aço CA-50 para estruturas em geral e CA-60 para estribos. A concepção estrutural pode ser verificada na Figura 4.

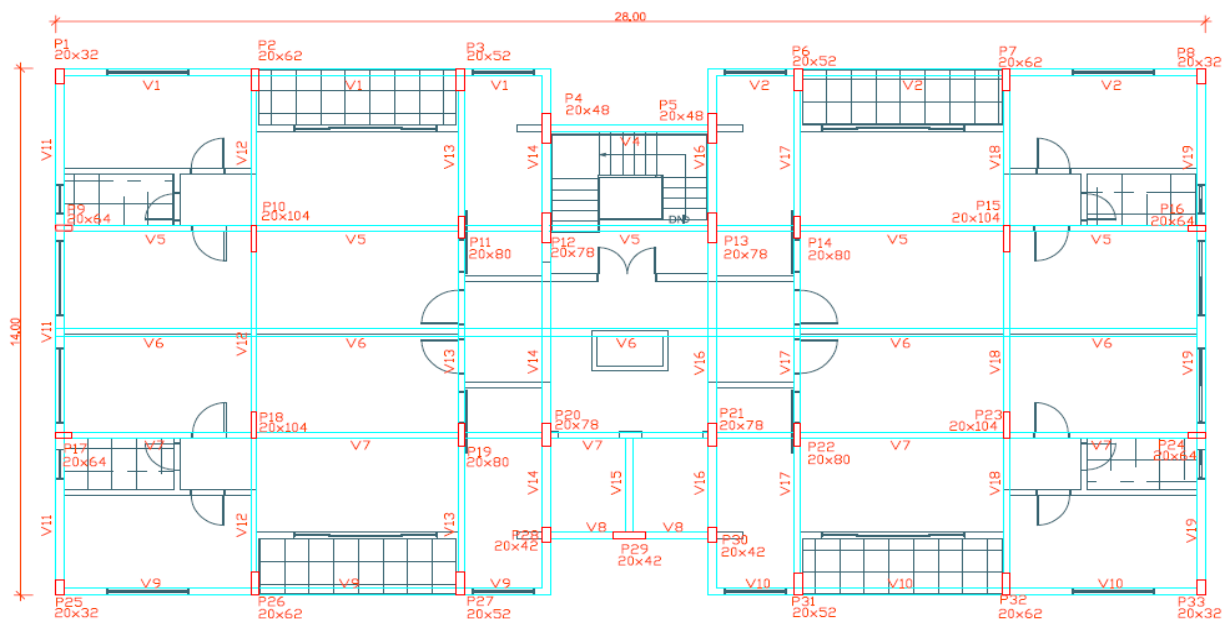


FIGURA 4: Posicionamento de vigas e pilares.

Foram previstas, respectivamente, as instalações de reservatórios d'água de 10.000 L, 20.000 L e 30.000 L e salas de máquinas para os edifícios de 5, 10 e 15 pavimentos, localizados acima das escadas e elevadores.

Valores de cargas acidentais, bem como do peso próprio dos materiais de revestimentos e das estruturas foram obtidos da NBR 6120 (ABNT, 1980).

3.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para os métodos de Bacarji-Pinheiro (1996) e Aufieri (1997) foram adotados o valor de 11 KN/m² como carga uniformemente distribuída para o cálculo de pré-dimensionamento e taxa de armadura longitudinal fixada em 2%. Os demais parâmetros utilizados foram mencionados anteriormente.

Devido à simetria do modelo estrutural proposto, as áreas de influências bem como as seções de alguns elementos se assemelharam, conforme mostra o Quadro 1.

QUADRO 1: Áreas de influência dos pilares.		
Pilares	Posição	Área de influência
P1; P8; P25; P33	Canto	5,14 m ²
P2; P7; P26; P32	Extremidade	11,65 m ²
P3; P6; P27; P31	Extremidade	8,1 m ²
P4	Extremidade	6,07 m ²
P5	Extremidade	6,23 m ²
P9; P17; P16; P24;	Extremidade	11,56 m ²
P10; P15; P18; P23	Interno	23,08 m ²
P11; P14; P19; P22	Extremidade	16,81 m ²
P12; P20	Extremidade	12,51 m ²
P13, P21	Extremidade	12,76 m ²
P28; P30	Interno	3,34 m ²
P29	Interno	5,48 m ²

3.4 LANÇAMENTO DA ESTRUTURA NO SOFTWARE

Foram lançados no Eberick V9 os elementos pré-determinados pelos métodos e então iniciou-se o processo de análise e conformação dos modelos estruturais às normas nacionais vigentes. Nesta etapa, definiu-se o modelo estrutural de cada edifício em que todos os elementos atendessem as exigências de estabilidade global e segurança dos estados limites últimos e de serviço, respeitando as deformações e deslocamentos máximos. Nesta etapa, os esforços dos ventos foram analisados pelo próprio programa seguindo alguns critérios estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 1988).

Fator topográfico: 1,00; Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre terreno = Classe B, categoria IV; Fator estatístico: 1,00; Velocidade do vento: 30m/s.

Devido aos esforços horizontais dos ventos, cargas aplicadas na estrutura e esbeltez dos elementos, houve a necessidade da adoção do processo de cálculo P-delta devido a estas estruturas serem consideradas nós móveis. Os valores calculados do gama-z dos edifícios estão representados no Quadro 2.

QUADRO 2: Valores do Gama-z de estabilidade global			
	Caso A	Caso B	Caso C
Direção X	1,13	1,17	1,20
Direção Y	1,11	1,13	1,15

Foi certificado que todos os elementos estruturais atendem as especificações dos ELUs e ELSs especificados na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Deste modo, foi realizado o dimensionamento dos pilares almejando seções em que a relação entre momento resistente de cálculo e momento solicitante de cálculo (M_{rd}/M_{sd}) fossem próximos de 1,00, e o resultado das taxas de armaduras longitudinais próximo de 2% da área dos pilares.

3.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS

Uma vez determinadas as dimensões de todos os elementos estruturais respeitando as especificações sugeridas pelas normas, elaborou-se análise dos valores obtidos pelo *software* e as seções pré-dimensionadas pelos métodos.

Das áreas calculadas pelos métodos, foram formados pilares tendo uma dimensão de suas seções fixadas em 15 cm e 20 cm e outra dimensão podendo ser encontrada pela divisão da área pré-dimensionada pela seção fixada. Esta segunda dimensão possui valores múltiplos de dois. Tendo essa nova seção transversal com dimensões em números inteiros, realizou-se o cálculo desta nova área transversal que foi comparada aos resultados obtidos pelo *software*.

Foram separados os dados conforme a classificação dos pilares quanto o seu posicionamento nos edifícios: pilares de canto, de extremidade ou internos.

A comparação dos resultados dos métodos de pré-dimensionamento com o dimensionamento do *software* foi feita analisando os erros absolutos e relativos, e o erro percentual absoluto médio MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*), conforme as Equações 11, 12, 13 e 14:

$$E_{abs} = A_{pre} - A_{Soft} \quad \text{Eq. [11]}$$

$$E_{rel} = \frac{E_{abs}}{A_{Soft}} \quad \text{Eq. [12]}$$

$$E_{porc} = E_{rel} * 100 \quad \text{Eq. [13]}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |E_{porc}| \quad \text{Eq. [14]}$$

Em que:

A_{pre} = área calculada através dos métodos de pré-dimensionamento

A_{Soft} = área calculada através do *software* Eberick

E_{abs} = erro absoluto

E_{rel} = erro relativo

E_{porc} = erro percentual

n = número de pilares

$MAPE$ = erro percentual absoluto médio

4. RESULTADOS

4.1 CASO A

Para este caso, devido ao número de pavimentos reduzidos e, conseqüentemente, redução dos esforços horizontais do vento e cargas verticais do peso próprio, houve uma notável exatidão dos métodos, que pode ser verificada na Figura 5.

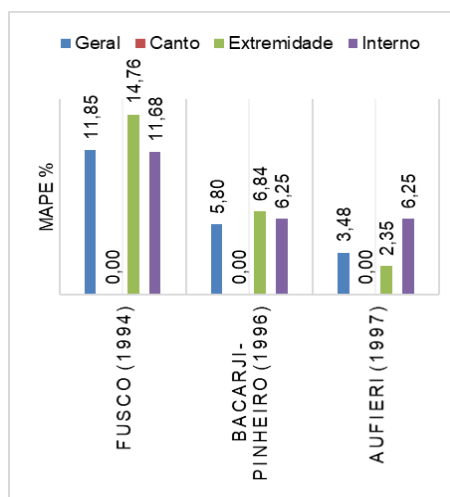


FIGURA 5: MAPE edifício 5 pavimentos.

Devido ao edifício possuir menores cargas solicitantes nos pilares, diversos deles que tiveram seções pré-dimensionadas abaixo do limite mínimo estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de 360 cm² foram adotadas as menores seções respeitando o modelo arquitetônico (15 x 25 cm e 20 x 20 cm), o que contribuiu para a melhoria da exatidão dos métodos.

Todos os métodos obtiveram erros nulos para pilares de cantos; no entanto, os erros aumentaram conforme analisados os pilares mais ao centro do edifício. Tais pilares receberam elevadas cargas solicitantes devido ao posicionamento de elementos como reservatório de água e casa de máquinas.

Das técnicas estudadas, o método Aufieri foi o que obteve melhor resultado, com erro geral de 3,48%, seguido pelo método Bacarji-Pinheiro. Ambos obtiveram erros relativamente altos e semelhantes nos pilares internos e os de extremidades situados próximos ao centro do edifício.

O método de Fusco, por possuir menos parâmetros a serem analisados, resultou em porcentagem de erros maiores, se comparado aos outros dois métodos, para pilares de extremidade e internos.

4.2 CASO B

Conforme o aumento de pavimentos, houve o aumento dos esforços horizontais e do coeficiente de estabilidade Gama-z. Pode-se observar um leve aumento na média do erro relativo dos métodos se comparado com o caso anterior.

O que indica que a precisão dos métodos não sofreu grandes influências dos esforços dos ventos, nem devido ao fato da estrutura possuir um coeficiente Gama-z de 1,17. No entanto, este pequeno aumento dos erros ocorreu, principalmente, devido aos resultados das imprecisões dos pilares situados ao centro das edificações.

Tal fato ocorreu devido aos pilares centrais da edificação receberem esforços verticais dos reservatórios, com maior capacidade em relação ao caso A, e que ocasionou uma sobrecarga além dos valores estimados pelos métodos. Outro aspecto que vale ressaltar é que a estrutura central da concepção

estudada possui pilares mais próximos que, conseqüentemente, gerou menores áreas de influência, resultando seções subestimadas de pilares.

De modo geral, o método de Bacarji-Pinheiro (1996) obteve destaque nos pilares de canto, tendo um MAPE de valor nulo, resultando no menor valor de MAPE geral. Em seguida, veio o método de Aufieri (1997).

Por outro lado, a média percentual dos erros relativos do método de Fusco foi consideravelmente elevada em relação aos outros dois métodos, principalmente para pilares de extremidade. Fato ocasionado devido à simplicidade das equações deste método, que não analisa a mesma quantidade de parâmetros iguais aos outros dois.

Os resultados do comparativo entre os métodos e o dimensionamento pelo *software* para o edifício de 10 pavimentos podem ser verificados na Figura 6.

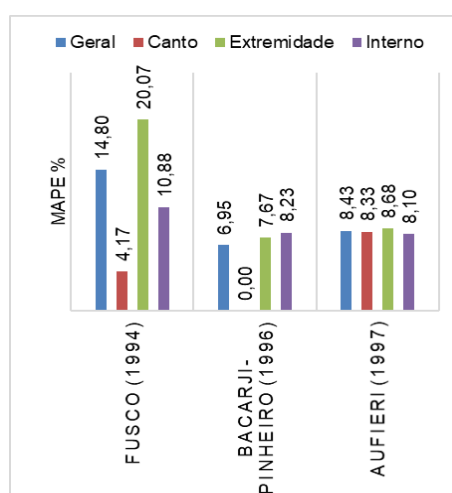


FIGURA 6: MAPE edifício 10 pavimentos

4.3 CASO C

O estudo comparativo do pré-dimensionamento para o edifício de 15 pavimentos por meio de análise do MAPE pode ser observado na Figura 7.

Uma vez que a edificação é mais elevada, possuindo maiores cargas, maior deslocabilidade e maior área de contato com os esforços horizontais do vento, os métodos de pré-dimensionamento obtiveram erros gerais dobrados em relação ao caso B, no entanto, ainda menores do que o esperado. Sendo os pilares internos e de extremidade os que obtiveram um aumento considerável se comparados a média dos erros entre os dois casos.

O fato da diferença das imprecisões entre os casos B e C serem maiores do que a relação do caso A e B comprova que uma estrutura que possuir maior Gama-z possui maior imprecisão dos métodos, visto que há a necessidade do reforço estrutural dos pilares por meio de maiores taxas de armaduras longitudinais. Porém o aumento da imprecisão dos métodos apenas não ocorreu justamente devido ao aumento das cargas solicitantes. Por causa da elevação das solicitantes, elevou-se os efeitos de segunda ordem, oriundos da combinação de esforços horizontais e verticais, que conseqüentemente, gerou o aumento de todas as seções dos elementos estruturais, o que tornou simples o dimensionamento de seções de pilares com taxas de armaduras longitudinais fixadas em 2%, fato que impactou positivamente na precisão dos métodos Aufieri e Bacarji-Pinheiro dos quais incluem este parâmetro em seus cálculos.

O método de Fusco gerou resultados de MAPE de pilares de extremidade elevados para todos os casos indicando considerável ineficiência do método quanto a estes pilares.

O método de Aufieri foi o que obteve melhores aproximações dos valores estimados com as seções definitivas, sendo importante ressaltar sua exatidão para os pilares internos.

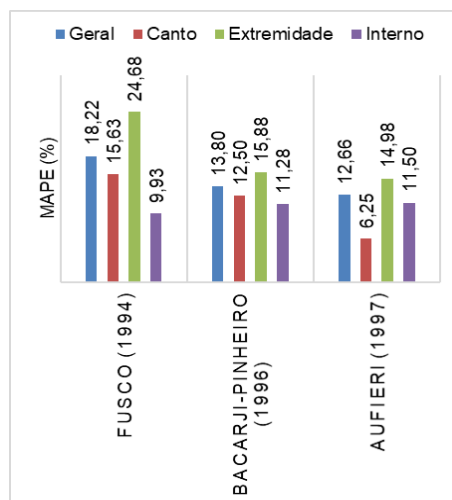


FIGURA 7: MAPE edifício 15 pavimentos.

4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com base nos dados extraídos pela análise dos métodos é possível levantar três principais questões que impactaram na precisão dos métodos.

Primeiramente a influência da complexidade dos métodos na precisão dos resultados. Quanto maior o número de parâmetros a ser analisado, maior o tempo do usuário utilizado no processo, no entanto maior será a exatidão do método. Em edifícios com grande quantidade de pavimentos tipos, onde os esforços dos ventos são significantes, os efeitos de segunda ordem podem ser mais um novo fator a ser considerado o que afeta na exatidão dos métodos de pré-dimensionamento de pilares. Como consequência do aumento da complexidade de análise da concepção estrutural, métodos que possuem poucos parâmetros em suas análises são menos precisos, pois subestimam as seções ideais, o que pode não atender as necessidades do projetista. Logo, os métodos de Aufieri e Bacarji-Pinheiro, que possuem mais parâmetros em suas considerações, foram igualmente exatos para todos os casos A, B e C nas proporções em planta de 1:2, mesmo estas estruturas serem consideradas nós móveis. Já o método de Fusco possuiu uma precisão inferior aos demais para os dois últimos casos, sendo suas estimativas apenas razoavelmente satisfatórias para o caso A.

Outro aspecto importante a ser levado em consideração é a atenção voltada para a porcentagem da taxa de armadura longitudinal. Para a efetividade dos métodos de pré-dimensionamento é importante que a taxa de armadura dimensionada seja a mais próxima possível da porcentagem pré-estabelecida. A Figura 8 indica a variação da média do erro relativo dos métodos de pré-dimensionamento aplicados no caso B que são causados devido a adoção de taxas de armaduras diferentes dos valores pré-estabelecidos nos métodos.

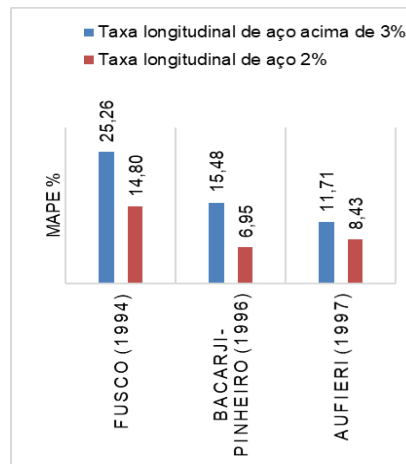


FIGURA 8: Comparativo do MAPE do Caso B após mudança da taxa de armadura longitudinal

Por último, é importante atentar-se que em edifícios que possuem a configuração pavimentos tipo tendem a solicitar alguns pilares com maiores cargas verticais por área de influência, provenientes por exemplo, das cargas de elevadores, escadas, reservatórios de água e salas de máquinas. Por causa desta concentração de carga diversos pilares apresentaram resultados de pré-dimensionamento subestimados. Pode-se notar também que, conforme o aumento do número de pavimentos agravou-se os resultados de elementos subestimados.

Os quadros 3, 4 e 5 indicam dados relacionando as cargas solicitantes por área de influência e os valores dos erros relativos das seções calculadas pelos métodos. Neles foram filtrados de modo a indicar dados dos pilares que se enquadram na situação descrita acima e que possuíram os maiores valores subestimados por parte dos métodos.

QUADRO 3: Influência das cargas nos métodos (Caso A)		
Pilar	EDIFÍCIO CASO A	
	Relação de carga nos pilares/Área de influência [kN/m ²]	Erro médio métodos (%)
4	125.57	0.00
5	125.57	0.00
12	114.45	-16.67
13	108.85	-11.11
20	132.24	-28.57
21	132.25	-23.81
28	182.29	0.00
29	95.55	0.00
30	182.25	0.00

QUADRO 4: Influência das cargas nos métodos (Caso B)		
Pilar	EDIFÍCIO CASO A	
	Relação de carga nos pilares/Área de influência [kN/m ²]	Erro médio métodos (%)
4	241.18	-19.79
5	241.15	-18.75
12	243.32	-22.62
13	243.32	-20.83
20	245.56	-22.62
21	245.56	-20.83
28	322.26	-16.67
29	194.47	-4.17
30	321.11	-16.67

QUADRO 5: Influência das cargas nos métodos (Caso C)		
Pilar	EDIFÍCIO CASO A	
	Relação de carga nos pilares/Área de influência [kN/m ²]	Erro médio métodos (%)
4	402.28	-19.44
5	394.40	-17.36
12	320.02	-25.00
13	320.02	-24.00
20	351.14	-20.51
21	351.14	-18.80
28	635.58	-49.21
29	368.89	-15.87
30	639.90	-49.21

Estes valores, juntamente com o resultado dos erros relativos referentes à cada pilar é mostrado nas Figuras 9, 10 e 11, que objetivou em uma análise do relacionamento das cargas aplicadas com a precisão dos métodos. Nessas imagens é possível perceber que os pilares (citados nos quadros acima) que estão localizados ao centro das edificações (4; 5; 12; 13; 20; 21; 28; 29; 30) possuem valores subestimados pelos métodos estudados.

Recomenda-se para esta situação aplicar máximas cargas estimadas sugeridas pelos métodos. As figuras 12, 13 e 14 mostram os resultados de pré-dimensionamento antes e após aplicar a carga estimada máxima dos métodos nos elementos que se enquadram na situação descrita (12 kN/m² para Aufieri e 13 kN/m² para Bacarji-Pinheiro), mantendo o valor de 11 kN/m² para os demais pilares. Apesar do método de Fusco fixar a carga estimada em 10 kN/m², foi modificado em 12 kN/m² para os pilares ao centro da estrutura permanecendo os 10 kN/m² para os demais elementos.

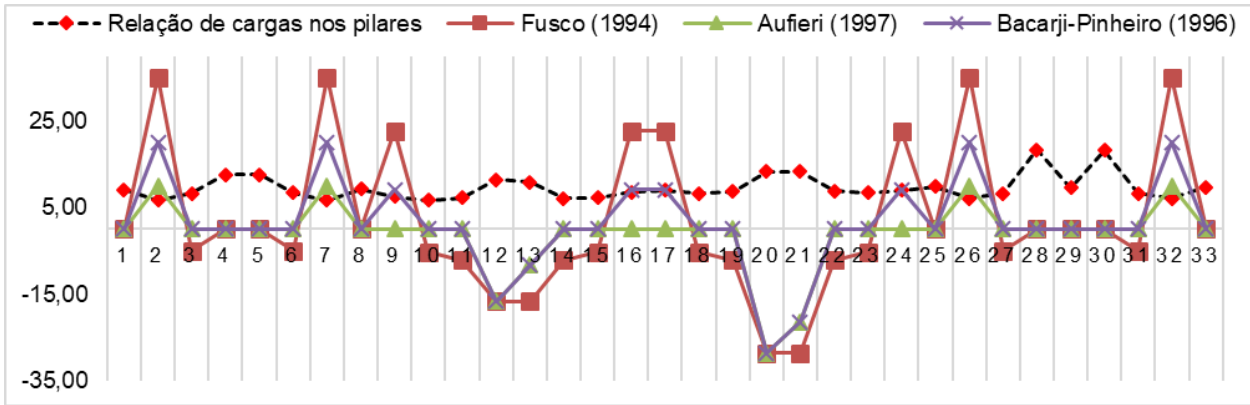


FIGURA 9: Relação Carga/Área e MAPE dos métodos de pré-dimensionamento aplicados no caso A.

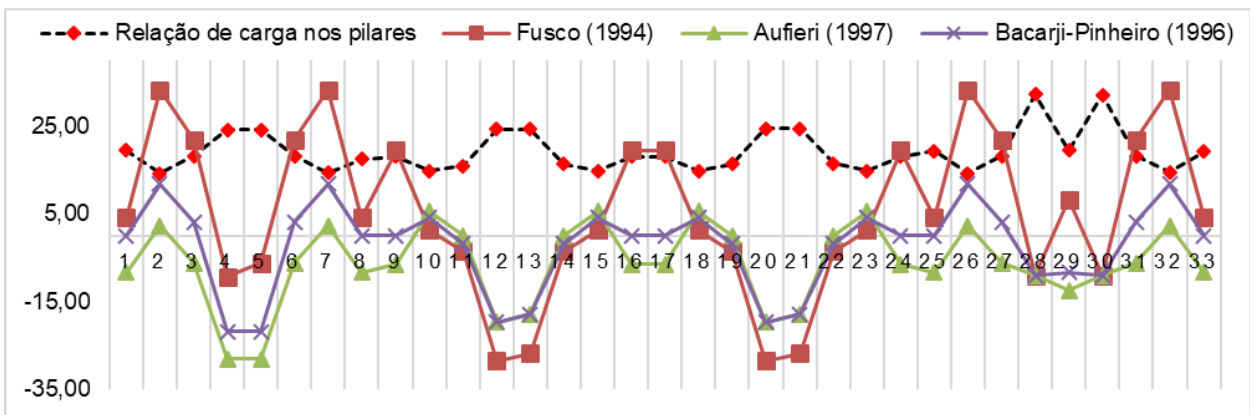


FIGURA 10: Relação Carga/Área e MAPE dos métodos de pré-dimensionamento aplicados no caso B.

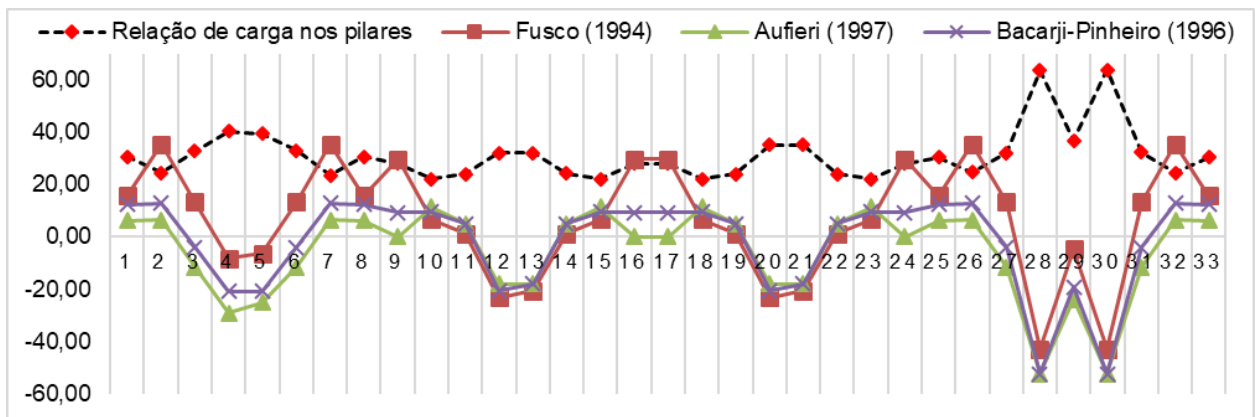


FIGURA 11: Relação Carga/Área e MAPE dos métodos de pré-dimensionamento aplicados no caso C.

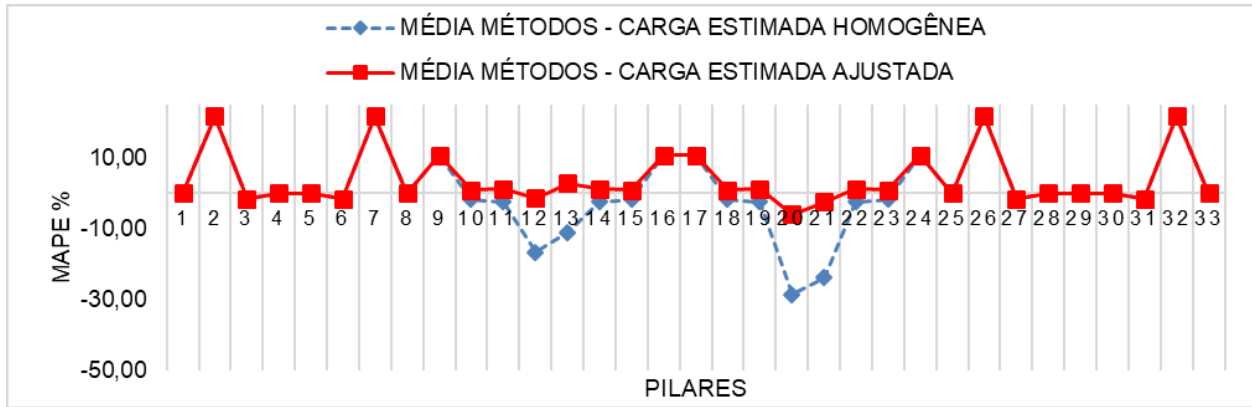


FIGURA 12: Comparativo de resultados MAPE após mudanças da carga estimada do Caso A.

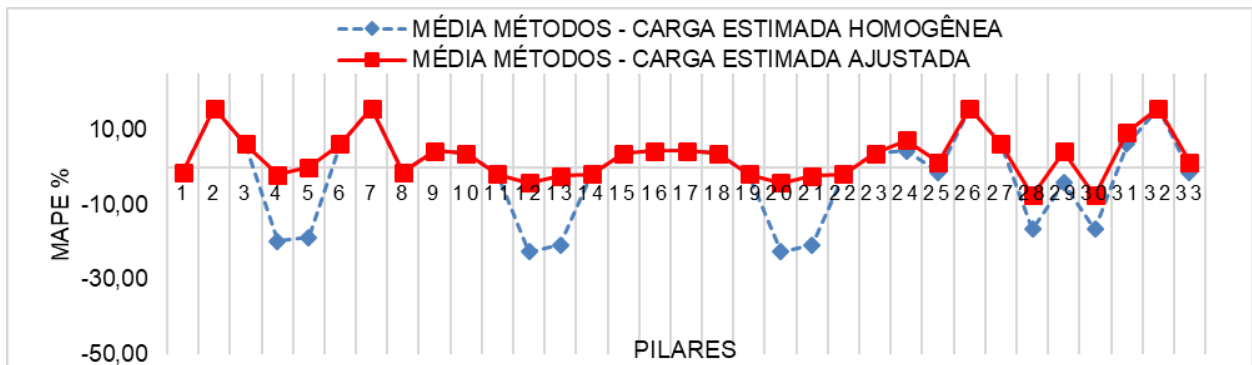


FIGURA 13: Comparativo de resultados MAPE após mudanças da carga estimada do Caso B.

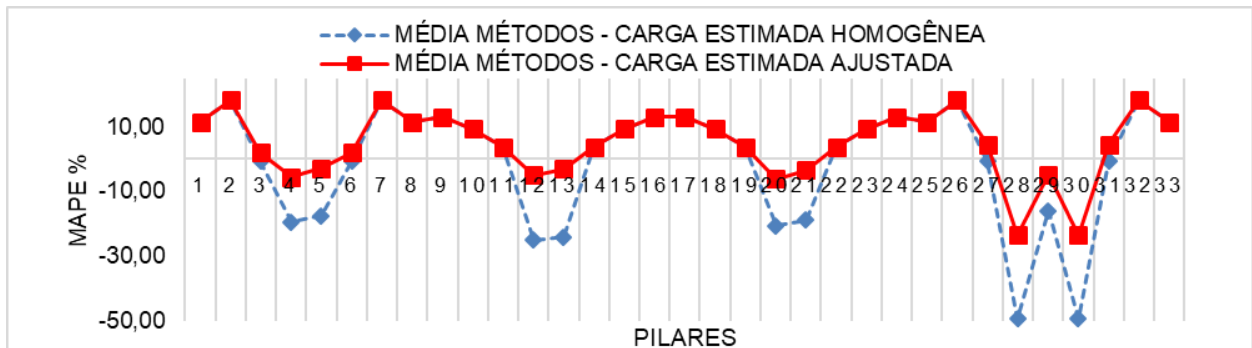


FIGURA 14: Comparativo de resultados MAPE após mudanças da carga estimada do Caso C.

5. CONCLUSÕES

A análise de três métodos de pré-dimensionamento de pilares em três edifícios com o mesmo posicionamento dos elementos estruturais, variando apenas o número de pavimentos, e comparando com os resultados obtidos pelo dimensionamento feito por meio do *software* Eberick, para um total de 99 pilares. Pode-se concluir que o método que melhor estimou a área de concreto de maneira geral foi o método de Aufieri (1997), o método de Bacarji-Pinheiro (1996) se mostrou igualmente eficaz. Já o método de Fusco obteve resultados menos exatos entre os três métodos estudados, porém é importante salientar que é o método que requer a menor quantidade de parâmetros a serem analisados antes de iniciar os cálculos de pré-dimensionamento, sendo então considerado o mais simples a ser aplicado.

Considerando os resultados gerais deste estudo, conclui-se que todos os três métodos apresentam respostas eficazes para situações específicas sendo cada um mais adequado para determinada finalidade de quem os utilizam. Deve-se atentar, também, em utilizar os máximos valores de cargas uniformemente distribuídas sugeridas pelos métodos para os pilares que possuem funções de sustentar elementos construtivos como escadas, elevadores e reservatórios, de modo a reduzir casos de subestimativa de seções dos pilares.

Para este trabalho, utilizou-se o sistema construtivo laje-viga-pilar em concreto armado moldados in loco sendo as lajes maciças de concreto armado. No entanto, é comum a utilização de lajes pré-moldadas com blocos de enchimento cerâmico ou isopor o que reduz o consumo de concreto, o peso próprio da estrutura e, conseqüentemente, o carregamento dos pilares. Pelo fato de a solicitação dos pilares ser reduzida, a carga estimada dos métodos de pré-dimensionamento de pilares gera valores superestimados. Portanto, sugere-se para trabalhos futuros, uma análise de pré-dimensionamento em pilares submetidos a carregamentos de outros tipos de lajes e então definir uma faixa de valores de cargas estimadas ideais para determinados sistemas construtivos e para determinados números de pavimentos. Sugere-se também a continuação da análise dos efeitos de segunda ordem na exatidão dos métodos de modo a inserir este parâmetro nos cálculos de pré-dimensionamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado**. Santa Maria, 2007. 24 slides.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- AUFIERI, F. A. **Diretrizes para o dimensionamento e detalhamento de pilares de edifícios em concreto armado**. 1997. 166 f. Dissertação Mestrado – Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- BACARJI, Edgar e PINHEIRO, Libânio Miranda. **Concepção estrutural e pré-dimensionamento de pilares**. 1996, Anais.. Florianópolis: Ufsc, 1996. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/8cdb89ec-e7b2-4320-9df4-d5396c63ccb6/prod_521_sysno_906086.pdf. Acesso em: 16 set. 2024.
- BASTOS, P. S. S. **Estruturas de concreto armado**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Bauru, 2014.
- BASTOS, P. S. **Pilares de concreto armado**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Bauru, 2015.
- FUSCO, P. B. (1994). Técnicas de armar estruturas de concreto. Editora Pini Ltda., São Paulo; GIONGO, J. S. **Concreto Armado: Projeto Estrutural de Edifícios**. São Carlos, 2007.
- PEDROSO, F. L. Concreto: material construtivo mais consumido no mundo. **Revista Concreto & Construções**. Ano XXXVII, n. 53, 2009.
- OLIVEIRA, P. H. R. de; CARVALHO, J. A. de; MARZULO, F.; ANTUNES, A. F. **Flambagem em pilares**. 2009. 34 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Santa Úrsula, Rio de Janeiro, 2009.