Trabalhos Apresentados V SSBEP 2025: ISBN 978-65-01-63537-8

Busca por Título

Busca por titulo Pesquisar

Busca por Autores

Busca por autores Pesquisar

Limpar Busca

9	Fatores de Influência no Dimensionamento de Pilares-Parede: Análise do Método das Faixas da NBR6118:2023	Gabriel Orso Garcia, Mauro de Vasconcellos Real, Paula Manica Lazzari	

Fatores de Influência no Dimensionamento de Pilares-Parede: Análise do Método das Faixas da NBR6118:2023

Gabriel Orso Garcia[1], Mauro de Vasconcellos Real[2], Paula Manica Lazzari[3]

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ggaarcia2@gmail.com

[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ mvrealgm@gmail.com

[3] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ p.manica.lazzari@gmail.com

Resumo

Pilares-parede são elementos cruciais no contraventamento de edifícios, e seu dimensionamento é complexo devido aos efeitos localizados de segunda ordem. A norma brasileira NBR6118:2023 prescreve o Método das Faixas como uma abordagem simplificada para essa análise, embora sua precisão seja debatida. Adicionalmente, a revisão de 2023 da norma introduziu um coeficiente de fragilidade (η_c) para concretos de alta resistência, cuja interação com o Método das Faixas permanece inexplorada. Este estudo realiza uma análise paramétrica para identificar as condições que causam divergências significativas no dimensionamento da armadura entre o Método das Faixas e uma análise convencional de seção única, quantificando também o impacto do coeficiente η_c. Utilizando um algoritmo computacional, foram analisados 1.146 casos de dimensionamento, variando-se sete parâmetros chave: excentricidades relativas, esbeltez, esforço normal, resistência do concreto, relação de lados da seção e a aplicação do fator η_c. Os resultados mostraram que o Método das Faixas produziu, em média, uma armadura 14,4% superior. As excentricidades de carga foram os fatores mais influentes: a excentricidade na direção de menor inércia (e_x/b) reduziu a divergência, enquanto aquela na direção de maior inércia (e_y/h) a amplificou. A introdução do fator η_c não impactou a razão de divergência entre os métodos, mas elevou a taxa de armadura necessária em mais de 25% para ambos. Conclui-se que a não consideração dos efeitos localizados de segunda ordem representa um risco, especialmente em pilares com alta esbeltez, seções alongadas e sob flexão dominante no plano de maior inércia.

Palavras-chave

Pilar-Parede; Método das Faixas; Efeitos de Segunda Ordem; NBR6118; Coeficiente de Fragilidade;

Introdução

Pilares-parede constituem elementos estruturais de importância fundamental na engenharia de edifícios de múltiplos pavimentos. Sua principal função é atuar como parte do sistema de contraventamento do edifício, absorvendo uma grande parcela dos esforços horizontais e conferindo a estrutura a rigidez e estabilidade necessárias. A NBR6118 (ABNT, 2023) define um pilar-parede como um elemento de superfície, cuja maior dimensão da seção transversal é pelo menos cinco vezes superior à menor dimensão.

Essa característica geométrica introduz uma nova complexidade na determinação dos esforços de segunda ordem dos pilares, que podem ocorrer de forma localizada. Os efeitos localizados de segunda ordem são um fenômeno intrínseco aos pilares-parede – eles decorrem da deformação não uniforme ao longo da maior direção da seção, podendo levar à ruptura de partes da seção ou das lâminas, antes que a seção inteira do elemento falhe.

A fim de considerar esses efeitos, a NBR6118:2023 estabelece uma abordagem simplificada, conhecida como "Método das Faixas" – que consiste em decompor o pilar parede em uma série de faixas verticais, que então são analisadas individualmente como se fossem pilares isolados submetidos a uma parcela dos esforços totais. Embora essa abordagem simplifique consideravelmente o dimensionamento desses elementos, sua validade e precisão são temas de debate constante na comunidade técnica (ARAÚJO, 2007; CAMPOS, 2016).

O tratamento de pilares-parede no Brasil evoluiu ao longo do tempo. A NBR6118:2003 foi a primeira a sistematizar o dimensionamento desses elementos de forma mais detalhada, introduzindo formalmente o método das faixas. No entanto, desde sua concepção, o método tem sido objeto de críticas. Araújo (2007) argumenta que o método tende a superestimar os efeitos localizados de segunda ordem. A principal crítica reside no fato de que, ao analisar cada faixa como um pilar isolado, o método desconsidera a continuidade do elemento estrutural e sua capacidade de redistribuição de esforços entre faixas adjacentes. Essa abordagem, segundo o autor, carece de justificação experimental e pode levar a resultados excessivamente conservadores.

Na revisão de 2023, a NBR6118 estabeleceu um coeficiente minorador da resistência à compressão em concretos de alta resistência (η_c). O coeficiente tem como objetivo ajustar o diagrama tensão-deformação do concreto para refletir o comportamento mais frágil dos concretos com resistências mais altas ($f_{ck} > 40\ MPa$). Estudos indicam que a inclusão do η_c resulta em um aumento da área de aço necessária em pilares, tornando o dimensionamento conservador (BORGES et. al, 2023; ARAÚJO, 2024). Entretanto, a interação entre este novo coeficiente e o Método das Faixas para pilares-parede permanece inexplorada.

Portanto, este artigo tem o objetivo de investigar as condições paramétricas que geram divergências significativas entre o dimensionamento de pilares-parede pelo Método das Faixas e pela análise da seção única. Adicionalmente, avalia-se o impacto do recém-introduzido coeficiente de fragilidade (η_c) neste cenário.

Fundamentação Teórica e Metodologia

Segundo o item 15.9.3 da NBR6118:2023, a consideração aproximada dos efeitos localizados de segunda ordem em pilares-parede pode ser realizada através do Método das Faixas, desde que o índice de esbeltez de cada lâmina do pilar-parede não exceda o valor de 90. Este procedimento consiste na decomposição do pilar em faixas verticais de largura a_i, cujo comprimento não deve exceder 3 vezes a menor dimensão da seção transversal do pilar nem 100 cm. Após essa discretização, cada faixa é analisada como um pilar isolado, submetido a uma parcela dos esforços normais (N_i) e momentos fletores (M_{yid}) atuantes no elemento como um todo. O método de discretização proposto pela norma está apresentado na Figura 1.

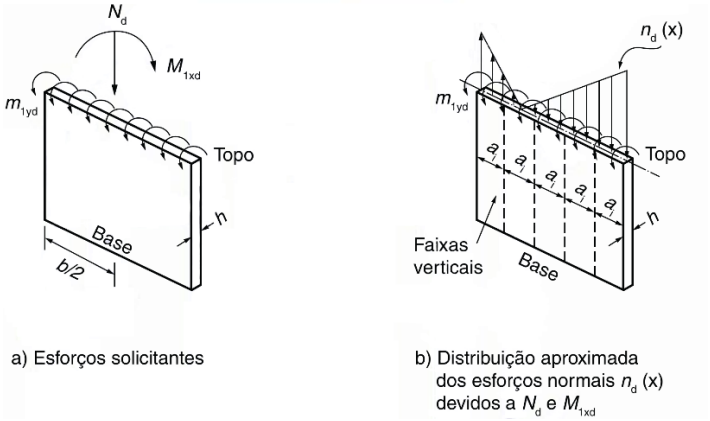


Figura 1 – Discretização dos pilares-parede (Fonte: ABNT, 2023).

Para análise dos efeitos de segunda ordem, a NBR6118:2023 permite que sejam utilizados 4 métodos distintos, dentre os quais o Método do Pilar-Padrão com Rigidez κ aproximada, prescrito no item 15.8.3.3.3 da norma, foi escolhido para aplicação neste trabalho. A escolha se justifica por sua ampla aplicação em projetos estruturais, velocidade e facilidade de programação. Seu domínio de validade, conforme a norma, restringe-se a pilares com índice de esbeltez $\lambda \leq 90$, armaduras simétricas e seção transversal constante.

O método considera a não-linearidade física do concreto de forma aproximada, através de uma expressão para cálculo da rigidez adimensional aproximada da seção (κ), a partir da qual o momento fletor de cálculo $M_{Sd,tot}$ pode ser calculado. A aproximação da não-linearidade física do elemento é feita considerando que a sua deformada se dará de forma senoidal. A rigidez κ é aproximada através da Equação 1, a partir da qual se obtém o momento total solicitante pela Equação 2. O processo de dimensionamento é feito para que a solução convirja e $M_{Rd,tot} = M_{Sd,tot}$.

$$\kappa = 32\left(1 + 5\frac{M_{Rd,tot}}{hNd}\right)\nu \tag{1}$$

Onde:
h é a dimensão da seção transversal na direção ortogonal ao momento fletor atuante;
N_d é a força normal atuante;
ν é a força normal adimensional.

$$M_{Sd,tot} = \frac{\alpha_b M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120\,\kappa/\nu}} \geq M_{1d,A} \tag{2}$$

Onde:
α_b é um parâmetro que depende da forma do diagrama de momentos fletores atuando na seção;
$M_{1d,A}$ é o maior momento absoluto atuante no pilar.

Uma das inovações mais significativas da revisão de 2023 da NBR6118 foi a introdução do coeficiente de fragilidade η_c, aplicável a concretos com resistência característica a compressão maior que 40 MPa. A justificativa teórica para este coeficiente é a necessidade de considerar a maior fragilidade e a redução da ductilidade inerentes aos concretos de maior resistência. Esse fator atua

como um redutor na tensão de compressão máxima no diagrama parábola-retângulo – que representa a curva teórica de tensão x deformação do concreto, descrita pela Equação 3.

$$\sigma_c = 0{,}85\,\eta_c\,f_{cd}\left[1-\left(1-\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right] \tag{3}$$

Onde:
ε_c é a deformação de compressão do concreto;
ε_{c2} é a deformação de compressão onde a tensão máxima é atingida;
f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto.

E os valores de η_c e n são obtidos pelas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$\eta_c = \begin{cases} 1{,}0 \; se \; f_{ck} \leq 40\;MPa \\ \left({}^{40}/_{f_{ck}}\right)^{1/3} \; se \; f_{ck} > 40\;MPa \end{cases} \tag{4}$$

$$n = \begin{cases} 2 \; se \; f_{ck} \leq 50\;MPa \\ 1{,}4 + 23{,}4\left[\dfrac{(90-f_{ck})}{100}\right]^4 \; se \; f_{ck} > 50\;MPa \end{cases} \tag{5}$$

Para realizar a análise comparativa de forma sistemática, um algoritmo adaptado de Real (2022) foi utilizado, que se baseia no desenvolvido por Campos Filho (1996) para cálculo de uma seção de concreto em flexão composta oblíqua. O programa automatiza o cálculo de pilares e pilares-parede, calculando o momento de segunda ordem nas seções críticas e finalmente obtendo a área de armadura necessária. Para o dimensionamento de pilares-parede, como prática comum do mercado, tomou-se a área de todas as faixas como a maior área de aço obtida individualmente, homogeneizando-se a armadura calculada.

A geometria adotada para a seção do pilar pode ser vista na Figura 2. A armadura foi considerada uniformemente distribuída nas faces de maior dimensão. Para cálculo do centro de gravidade das armaduras de todos os pilares foi adotado cobrimento de 2,5 cm, armadura transversal ø 6,3 mm e foram consideradas barras longitudinais ø 20 mm.

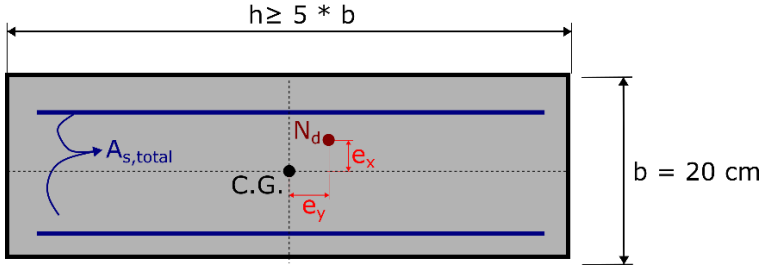


Figura 2 – Seção transversal dos pilares.

Assim, para cada pilar foi obtida uma área de aço calculada para uma seção única, chamada de $A_{s,ref}$ e uma área de aço calculada de acordo com o método das faixas $A_{s,faixas}$. O objeto de análise deste estudo foi a razão entre as duas áreas, determinada pela Equação 6.

$$R = \frac{A_{s,faixas}}{A_{s,ref}} \tag{6}$$

A rigor, uma avaliação precisa dos efeitos localizados de segunda ordem exigiria uma complexa análise não-linear, física e geométrica, utilizando modelos de casca para o pilar-parede. Na ausência de tal análise na prática corrente, o Método das Faixas é prescrito pela NBR 6118 como um procedimento simplificado para essa verificação. Nesse contexto, a razão R proposta neste trabalho, que compara o resultado do Método das Faixas com a análise de seção única, não deve ser interpretada como uma medida de conservadorismo absoluto, mas sim como um "índice de sensibilidade ao modelo". Valores de R elevados indicam que o dimensionamento é altamente sensível à forma como os efeitos de segunda ordem são considerados. Essa divergência sinaliza que a avaliação dos efeitos localizados é um ponto crítico para a segurança estrutural, exigindo uma postura mais criteriosa no dimensionamento ou, em casos de maior responsabilidade, a consideração de análises mais refinadas.

A análise paramétrica foi conduzida variando-se um conjunto de sete parâmetros, cujas faixas foram definidas com valores usuais de projeto e de forma a explorar os limites dos métodos. A Tabela 1 indica os parâmetros estudados e os valores adotados para cada um deles.

Tabela 1 – Parâmetros estudados

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valores adotados
Excentricidade relativa em X	e_x/b	%	5, 15, 25
Excentricidade relativa em Y	e_y/h	%	5, 15, 25
Resistência característica do concreto à compressão	f_{ck}	MPa	30, 40, 50, 60
Índice de esbeltez do pilar	λ	-	40, 70, 90
Força normal adimensional	ν	%	40, 60, 80
Relação de lados da seção	h/b	-	5, 10, 15
Consideração do fator de fragilidade	η_c	-	Verdadeiro, Falso

Considerando todos os parâmetros, foram criados ao todo 1458 casos de dimensionamento de pilares. Para os valores de f_{ck} de 30 e 40 MPa, onde o fator de fragilidade não incide, a variável que controla a aplicação do fator foi sempre considerada com valor "Falso".

Análise e Discussão dos Resultados.

Os resultados obtidos no estudo colaboram com uma compreensão mais aprofundada dos resultados dos dois métodos de dimensionamento utilizados e de como cada variável indicada na Tabela 1 influencia na divergência dos valores. A discussão foi estruturada partindo da análise geral e posteriormente passando pela análise das variáveis isoladas individualmente.

Para análise dos resultados, foram retirados os casos em que pelo menos um dos métodos resultou em armadura menor que a mínima estabelecida pela norma ($\rho_{min} = 0{,}40\%$), pois nesses casos, o cálculo da razão entre as armaduras fica distorcido. No total foram 312 casos excluídos por esse critério, assim, foram incluídos nas estatísticas para análise 1146 casos de dimensionamento.

A Figura 3 apresenta o histograma da razão entre as armaduras obtidas, sendo as barras vermelhas para quando η_c foi considerado no cálculo, as azuis para quando o fator de fragilidade foi desconsiderado e as barras pretas o caso geral, ou seja, a somatória dos dois anteriores.

As distribuições obtidas são marcadamente assimétricas à direita, a maioria dos casos simulados apresentou valores entre 0,80 e 1,20 com pico (moda) próxima de 1,0. Isso indica que, para a maioria dos casos estudados ambos os métodos conduziram a resultados com divergência máxima de 20%. A Tabela 2 apresenta os valores de média, mediana e coeficiente de variação das três distribuições apresentadas.

Em relação as taxas de armadura encontradas, a Tabela 3 apresenta os resultados médios de ambos os métodos, considerando ou não o fator de fragilidade do concreto. Observa-se que, apesar do fator não ter influência significativa no dimensionamento com o método das faixas, ao incorporá-lo as taxas de armadura longitudinal nos pilares cresceram significativamente.

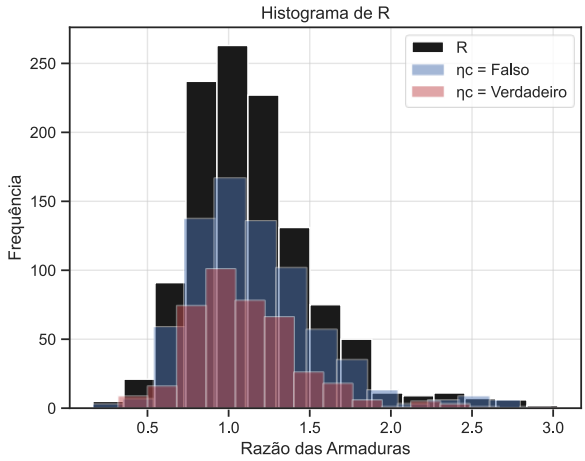


Figura 3 – Histograma da Variável R.

Tabela 2 – Valores estatísticos

Distribuição	Média	Mediana	C. V.
Caso Geral	1,144	1,084	0,337
η_c = Falso	1,166	1,097	0,342
η_c = Verdadeiro	1,103	1,048	0,328

Tabela 3 – Impacto do fator η_c nas taxas de armadura médias

Distribuição	$\eta_c = 1{,}0$	$\eta_c < 1{,}0$	Diferença (%)
Seção Única	4,62%	6,03%	30,52%
Método das Faixas	5,18%	6,50%	25,48%

Da análise estatística, têm-se que o método das faixas resultou, na média em 14,4% mais armadura que a análise desconsiderando os efeitos de segunda ordem localizados. Ressalta-se, entretanto, o alto valor do coeficiente de variação encontrado, indicando a grande dispersão de resultados. Além disso

a distância entre os valores médios e medianos reforçam a assimetria da distribuição. Em geral, ao considerar o fator de fragilidade do concreto aumentou-se a convergência entre os métodos.

A influência da excentricidade nos resultados pode ser observada na Figura 4. A razão entre armaduras R demonstrou-se inversamente proporcional a excentricidades relativas e_x/b. A influência nos resultados é maior para a excentricidade na direção X, de menor inércia, constatada pela queda na média de R de 1,45 para 5% de excentricidade relativa para 0,91 quando a excentricidade é 25%. Isso pode ser explicado pelo fato de que a flexão na direção de menor inércia é tratada de maneira similar pelos dois métodos, portanto quando ela se torna dominante no problema, a convergência tende a aumentar.

A excentricidade em Y apresentou o comportamento oposto, saindo de uma média de 0,86 quando aplicada uma excentricidade de 5% para 1,20 quando a excentricidade foi de 25%. Isso se justifica pois à medida que o momento na direção de maior inércia do pilar aumenta, mais proeminentes são os efeitos localizados de segunda ordem.

A análise dos diagramas de caixa indica que, para pilares-parede sob flexão dominante na direção de menor inércia, os efeitos localizados de segunda ordem não alteram significativamente a armadura calculada em comparação à análise da seção única.

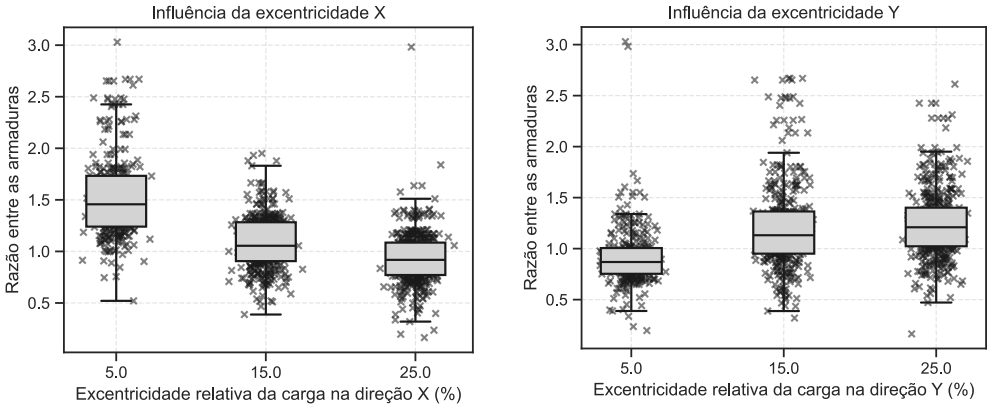


Figura 4 – Influência das Excentricidades.

Nos diagramas de caixa, os resultados individuais foram plotados sobre as caixas para facilitar a interpretação da distribuição dos dados. Com o propósito de aprimorar a representação gráfica, aplicou-se um ruído aleatório (*jitter*) à posição dos pontos, uma alteração puramente visual que não afetou os cálculos.

Em relação a resistência característica à compressão do concreto, f_{ck}, os resultados para 30, 40 e 50 MPa foram bastante parecidos, com médias próximas a 1,22 para os três valores. Entretanto, a resistência de 60 MPa apresentou resultados discrepantes em relação aos demais, com média de 1,00. A Figura 5 apresenta os gráficos de caixa para variação de f_{ck} e carga axial adimensional (ν).

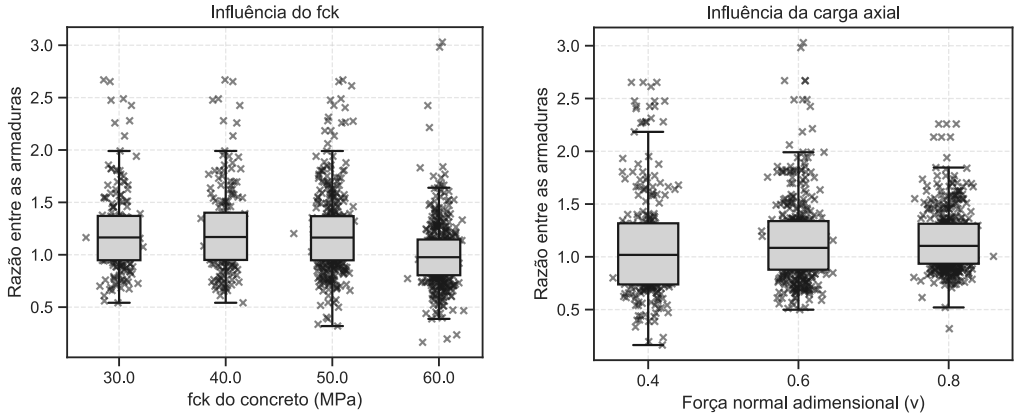


Figura 5 – Influência do f_{ck} e da força normal.

Em relação à força normal adimensional, observa-se que as médias foram razoavelmente próximas para os três valores estudados, entretanto, com o aumento de ν as dispersões dos resultados tenderam a diminuir. Tendência demonstrada pelo coeficiente de variação dos resultados, que caiu de 0,46 com $\nu = 0{,}40$ para 0,24 com $\nu = 0{,}80$.

O índice de esbeltez dos pilares apresentou correlação positiva com a razão de armaduras R, saltando de um valor médio de 1,06 para a esbeltez de 40 para um valor médio de 1,25 quando a esbeltez foi de 90. Ademais, observa-se um aumento no número de valores de $R > 2{,}5$. Com o aumento da esbeltez do pilar, os efeitos de segunda ordem tornam-se mais relevantes, tanto os locais quanto os localizados. Assim, as discrepâncias discutidas e percebidas nos itens analisados anteriormente tendem a potencializar-se em esbeltezes mais altas.

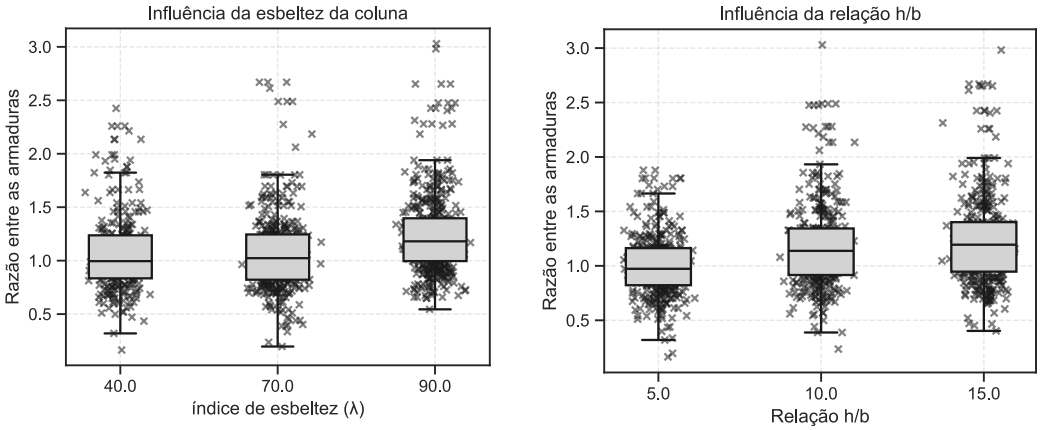


Figura 6 – Influência da geometria.

Em relação à geometria da seção, a variação na relação de lados h/b de 5, 10 e 15 produziu um aumento na divergência média R entre as armaduras, evidenciado pelos valores de 1,00, 1,19 e 1,24, respectivamente. Tal resultado é coerente com a interpretação de R como um índice de sensibilidade ao modelo: à medida que a seção se torna mais alongada, acentua-se a diferença de comportamento entre um pilar convencional e um pilar-parede. Com isso, a discrepância entre a análise simplificada

de seção única e a aproximação via Método das Faixas torna-se maior, reforçando que a escolha do método de análise é progressivamente mais crítica para elementos mais alongados.

A relevância de cada variável para determinação de R foi avaliada através do coeficiente de correlação de spearman, que foi preferido pela natureza não-linear do problema. Os resultados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da Análise de Correlações

Variável	r_s
e_x/b	-0,60
e_y/h	0,40
h/b	0,26
λ	0,26
f_{ck}	-0,26
ν	0,12

Os coeficientes de correlação confirmam que, para os casos apontados neste trabalho, as variáveis que mais causaram divergência entre as abordagens de cálculo foram as excentricidades relativas da carga aplicada, principalmente na direção de menor inércia do pilar-parede.

Conclusões

Este estudo realizou uma análise paramétrica para quantificar a divergência do dimensionamento de armaduras de pilares-parede ao considerar o Método das Faixas prescrito pela NBR6118:2023 ou ignorar os efeitos de segunda ordem localizados.

Dentre os principais resultados, estão que as excentricidades relativas de primeira ordem são as principais influenciadoras de divergência, sendo a da menor direção de inércia do pilar atenuadora e a da maior direção uma fonte de discrepância dos resultados.

As outras variáveis estudadas (relação h/b, esbeltez do pilar, esforço axial adimensional e resistência do concreto) contribuem também para diferença nos resultados, mas em menor escala. O fator de fragilidade introduzido na nova NBR6118:2023 (η_c) não alterou significativamente os resultados comparando-se os métodos de dimensionamento adotados – entretanto, utilizá-lo levou a um aumento significativo nas taxas de armadura dos pilares parede.

Apesar deste estudo trazer esclarecimentos acerca do assunto, é importante reconhecer suas limitações. Primeiramente, as conclusões ficam limitadas as faixas de variáveis utilizadas. Ademais, seus resultados foram unicamente baseados em um dos métodos propostos pela NBR6118 para inclusão dos efeitos de segunda ordem locais, entretanto, existem outros mais refinados como o Método Geral e o Método do Pilar-Padrão Acoplado a Diagramas M, N, 1/r – que incorporam as armaduras calculadas para cálculo da rigidez da seção e consequentemente para estimativa dos efeitos de segunda ordem. Outra limitação importante é que este estudo se concentrou em pilares-parede de seção retangular, ou seja, de lâmina única, e, portanto, suas conclusões ficam também limitadas a pilares-parede deste tipo.

Adicionalmente, uma limitação inerente à própria métrica de comparação deve ser destacada. Ao quantificar a divergência entre dois métodos, o estudo expôs a sensibilidade do dimensionamento ao

modelo adotado, mas não o erro absoluto em relação a uma resposta física realista. A aferição da precisão do Método das Faixas exigiria uma análise não-linear, física e geométrica, e será objeto de estudo de trabalhos futuros dentro desta mesma linha de pesquisa.

Ademais, seria interessante uma comparação dos métodos da NBR6118 com as tratativas acerca de pilares parede de outras normas internacionais, como a europeia Eurocode 2 e a americana ACI-318.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6118: Projeto de Estruturas de Concreto. 2023.

ARAÚJO, J. M. Análise do processo aproximado da NBR-6118 para consideração dos efeitos localizados de segunda Ordem. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 10, p. 1-10, 2007.

ARAÚJO, J. M. O Novo Modelo do Eurocode 2/2023 para Dimensionamento à Flexão Simples e Composta. Editora Dunas. 2024.

BORGES, C. F. K.; REAL, M. V.; PESSUTO, Â. S.; CAMPOS FILHO, A.; LAZZARI, P. M.; COGO, N. F. Análise da Introdução do Fator η_c Pela NBR 6118:2023 no Dimensionamento de Seções Poligonais de Concreto Armado Submetidas à Flexo-Compressão Oblíqua. Em: III Seminário Sul Brasileiro de Pontes e Estruturas. 2023.

CAMPOS, M. C. B. N. Análise Numérica de Pilares-Parede de Concreto Armado com Seção Retangular. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

CAMPOS FILHO, A. Dimensionamento e Verificação de Seções Poligonais de Concreto Armado Submetidas à Flexão Composta Oblíqua. CPGEC/UFRGS - CE 53/96.

REAL, M. V. Programa em python para dimensionamento de seções de concreto sujeitas à flexão simples conforme a norma NBR 6118:2014. 2022. Disponível em: <https://github.com/mvreal/DimFlexS-NBR6118>