

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
Faculdade de Engenharia
Engenharia Civil - FAEN

CAMILA BARBOSA DE FREITAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS APROXIMADOS PARA
CÁLCULO DO EFEITO LOCAL DE SEGUNDA ORDEM EM UM PILAR
DE CONCRETO ARMADO**

CAMILA BARBOSA DE FREITAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS APROXIMADOS PARA
CÁLCULO DO EFEITO LOCAL DE SEGUNDA ORDEM EM UM PILAR
DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal da Grande Dourados, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Me. André Felipe Aparecido de Mello com área de concentração 3.01.00.00-3 – Engenharia Civil.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO H – ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 15:00 horas do dia 06 de junho de 2022, realizou-se no ambiente virtual Google Meet a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, intitulado **Análise comparativa de métodos aproximados para cálculo do efeito local de segunda ordem em um pilar de concreto armado** de autoria do(a) discente Camila Barbosa de Freitas, como requisito para a aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II.

Após a defesa e posterior arguição, a banca examinadora concluiu que o Trabalho apresentado deve ser:

Aprovado

Reprovado

O(A) discente(a) declara ciência de que a sua aprovação está condicionada à entrega da versão final (encadernada, corrigida e assinada) do Trabalho de Conclusão de Curso, nos termos em que especifica o regulamento do componente curricular, em anexo ao Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil da UFGD. O(A) orientador(a) se responsabilizará pela verificação e aprovação das correções do manuscrito feitas pelo(a) discente(a) para a elaboração da versão final.

OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

Atender às recomendações da banca.

DISCENTE

Nome: Camila Barbosa de Freitas

Assinatura:

Camila Barbosa de Freitas

BANCA EXAMINADORA

Orientador: André Felipe Aparecido de Mello

Assinatura:

André Felipe Mello

Membro: Agleison Ramos Omido

Assinatura:

Agleison Ramos Omido

Membro: Leonardo da Rosa Walz

Assinatura:

Leonardo da Rosa Walz

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS APROXIMADOS PARA CÁLCULO DO EFEITO LOCAL DE SEGUNDA ORDEM EM UM PILAR DE CONCRETO ARMADO

Camila Barbosa de Freitas¹; André Felipe Aparecido de Mello²
milah.vha@gmail.com¹; andremello@ufgd.edu.br²

RESUMO

Torna-se indispensável a consideração dos esforços solicitantes de segunda ordem com a maior propensão a deslocamentos horizontais em edificações atuais, com pilares mais esbeltos. Para a consideração dos esforços o estudo visou analisar esses efeitos em um pilar exemplo, através da apresentação e relação dos métodos de cálculo Pilar padrão: rigidez “*k*” e curvatura aproximada, *P Delta* e aplicação do programa *P Calc*. Foi utilizado um pilar exemplo ao qual foram aplicados os métodos de Pilar padrão obtidos na NBR 6118(2014), posteriormente foram comparados com o método iterativo de cargas fictícias *P Delta*, e por último, foi utilizado o programa *P calc* aplicando o método pilar padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r para a consideração dos efeitos com a finalidade de elaboração de uma tabela contendo a combinação dos diagramas. Os resultados mostram o valor de momento de segunda ordem do método de rigidez “*k*” aproximada apenas 0,81% maior ao processo acoplado a diagramas, juntos apresentando os menores valores de momento do estudo, e uma diferença de 1,09% entre o processo *P Delta* e o sistema de curvatura aproximada. A diferença máxima entre os momentos foi de 7,7% mostrando a efetividade dos resultados.

Palavras-chave: Pilar padrão; *P Delta*; *P Calc*.

ABSTRACT

It is essential to consider second order efforts with a greater propensity to horizontal displacements in current buildings, with slender columns. For the consideration of the efforts, the study aimed to analyze these effects in an example column, through the presentation and relation of the calculation methods Standard column: stiffness “*k*” and approximate curvature, *P Delta* and application of the program *P Calc*. An example column was used to which the standard column methods obtained in NBR 6118(2014) were applied, later they were compared with the iterative method of fictitious loads *P Delta*, and finally, the *P calc* program will be used applying the standard column method coupled with M, N, 1/r diagrams for the consideration of the effects with the purpose of elaborating a table containing the combination of the diagrams. The results show the value of second order moments of the approximate stiffness “*k*” method only 0.81% higher than the process coupled to diagrams, together presenting the lowest moment values of the study, and a difference of 1.09% between the *P Delta* process and the approximate curvature system. The maximum difference between the moments was 7.7% showing the effectiveness of the results.

Keywords: Standard-column; *P Delta*; *P Calc*.

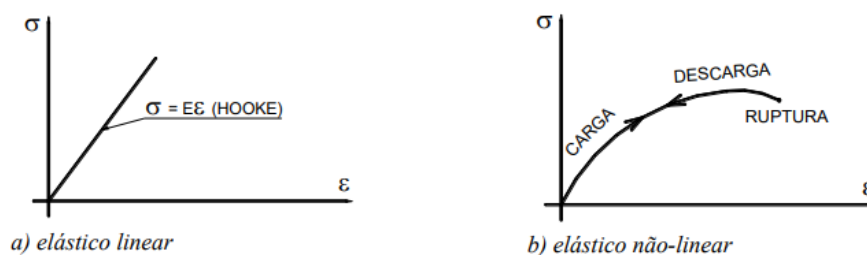
1 INTRODUÇÃO

De acordo com Carvalho e Pinheiro (2013), os pilares consistem em peças estruturais lineares de grande importância para a composição estrutural de uma edificação, já que recebem os carregamentos acumulados das lajes e vigas e as transmitem para a fundação. São predominantemente submetidos a ações de compressão que, somadas aos carregamentos horizontais, mudam as condições de estabilidade, alterando as circunstâncias iniciais de carregamento, resultando em efeitos de segunda ordem global.

Segundo Tullio e Machado (2020), existe a possibilidade de que os pilares não permaneçam em sua posição normal durante o carregamento, que são considerados efeitos de segunda ordem local. Os efeitos de segunda ordem geram excentricidades que são adicionados às obtidas em uma análise de primeira ordem. É de suma importância a consideração das não linearidades física e geométrica para a análise das excentricidades.

A não linearidade física é causada pelo comportamento físico do concreto empregado na estrutura e se relaciona diretamente ao módulo de elasticidade do material, já que, em estruturas não lineares, o módulo da elasticidade não é constante (MONCAYO, 2011). Para os materiais que não obedecem a Lei de Hooke, que relaciona linearmente a tensão e a deformação através da multiplicação do módulo de elasticidade pela deformação específica, o comportamento de linearidade é descrito pela Figura 1-a e de não linearidade é descrito através da Figura 1-b:

Figura 1 - Diagramas $\sigma \times \epsilon$.

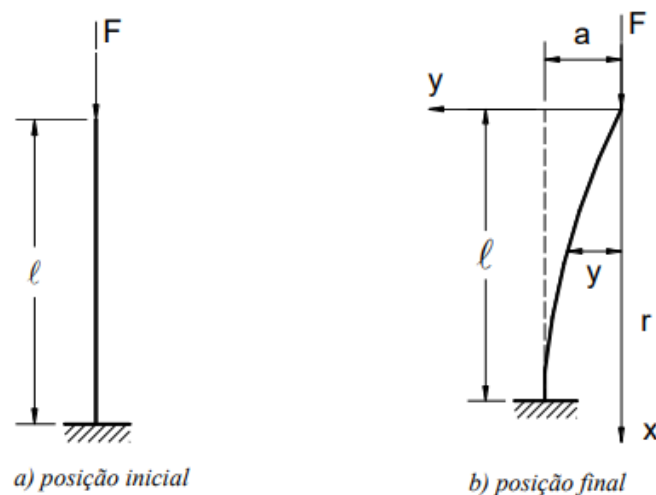


Fonte: BASTOS (2017)

A não linearidade geométrica se dá pela mudança na geometria da estrutura, que causa uma perturbação no domínio de deformações, resultando em uma distribuição não linear nas deformações da seção transversal como exposto na Figura 2. A

consideração das não linearidades é inviável se não realizada através de programas computacionais, devido dificuldade na construção de gráficos para a análise da estrutura, por este motivo a (NBR-6118:2014), estabelece uma análise linear com algumas correções para que o valor seja mais aproximado (MONCAYO, 2011).

Figura 2 - Não Linearidade Geométrica.



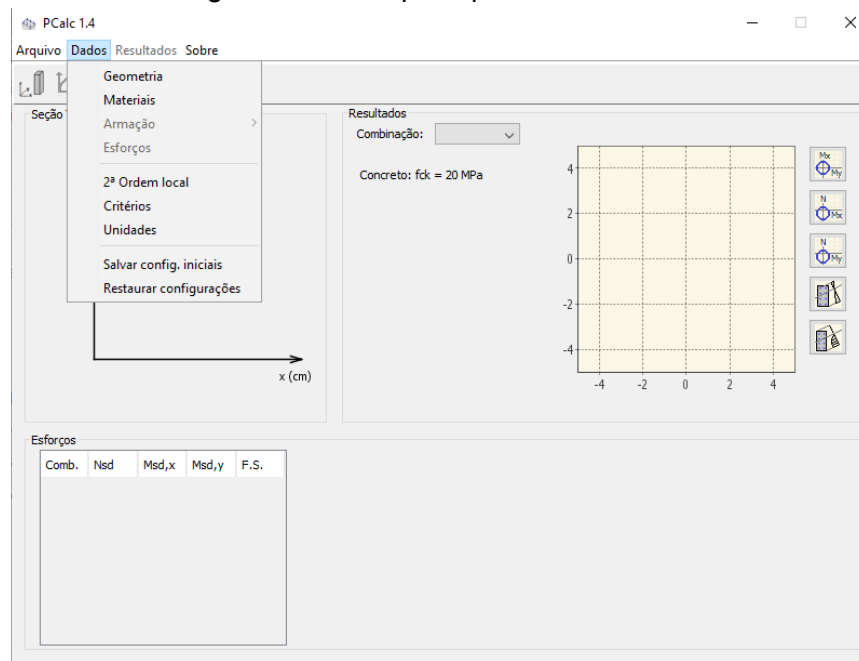
Fonte: BASTOS (2017)

Após a substituição da antiga NB-1 pela NBR 6118:2003, foram adicionados quatro métodos aproximados para o cálculo de efeitos de segunda ordem em pilares com índice de esbeltez inferior a 90, com destaque para os métodos pilar padrão com rigidez “ κ ” aproximada e pilar padrão com curvatura aproximada. São frequentemente utilizados devido a facilidade de aplicação manual, evitando a utilização de métodos computacionais (CASAGRANDE; SILVA. 2011).

Há também outros métodos, não normativos, que podem ser utilizados, dentre eles o processo P Delta. Durante o processo P Delta são criadas cargas horizontais fictícias na extremidade superior do pilar, que são corrigidas iterativamente até atingir a mínima diferença entre as cargas fictícias aplicadas, resultando em uma posição de equilíbrio.

Um método computacional também pode ser utilizado para a obtenção dos resultados propostos em norma. O P Calc - v. 1.4, que opera na linguagem Java, dispõe dos quatro métodos apresentados em norma para a avaliação do efeito de segunda ordem, considerando as não linearidades física e geométrica. A janela inicial do programa permite um acesso ágil e intuitivo da entrada dos dados necessários, como apresentado na Figura 3.

Figura 3: Janela principal PCalc - v. 1.4.



Fonte: P Calc por Autor (2022).

A ferramenta tem como dados de entrada a geometria da seção (onde é possível escolher a vinculação entre balanço e pilar biapoiado), a armação adotada e os esforços solicitantes: força normal e momentos na base ou topo do pilar. Pode também ser realizada mais de uma combinação de esforços para que o programa identifique a mais desfavorável entre elas.

Os resultados do PCalc são apresentados em diagramas de interação, formados por curvas envoltórias resistentes. Para garantir a segurança, o ponto representado pelo momento solicitante tem que estar dentro do diagrama, demonstrando que os esforços resistentes são maiores que os solicitados. Caso este ponto esteja fora do diagrama demonstra que o pilar não está resistindo às solicitações a ele aplicadas (KIMURA; CARDOSO, JUNIOR. 2013).

Foi considerada para o presente trabalho a seleção e análise comparada dos processos normativos apresentados ao decorrer do curso, com um método não normativo iterativo e uma ferramenta computacional, para que sejam comparados os resultados.

O enfoque está na aplicação dos métodos para um único pilar, em cálculos manuais descritos em norma, conjuntamente ao método também manual porém iterativo P-Delta, almejando a obtenção de armaduras consideravelmente iguais, para que sejam

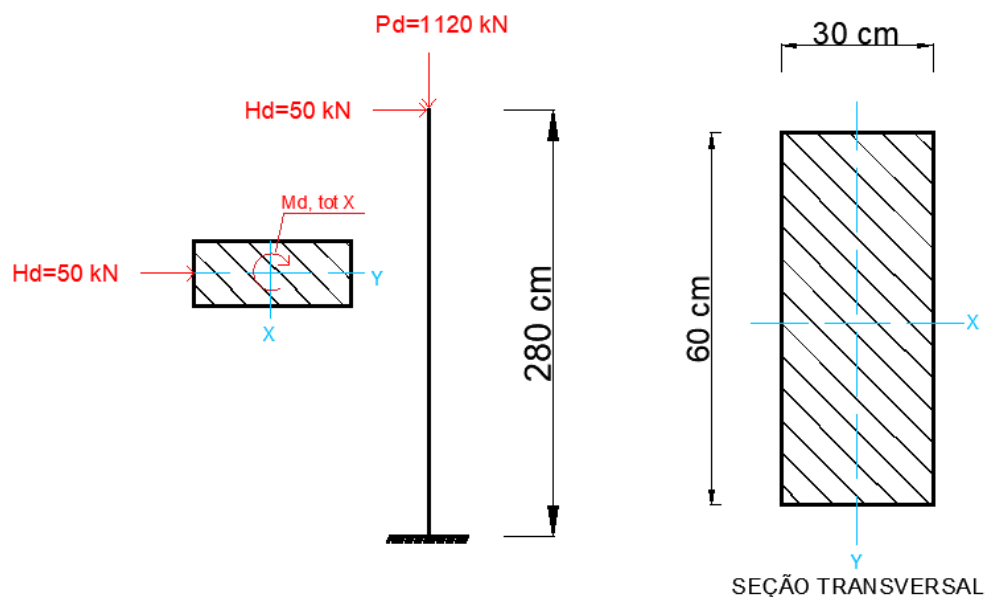
submetidas à ferramenta computacional PCalc utilizando o método pilar padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r, obtendo valores para momento de segunda ordem que serão defrontados aos obtidos nos métodos manuais.

2 METODOLOGIA

Será apresentado a seguir o pilar utilizado para aplicação dos métodos de cálculo, assim como os dados da geometria da seção transversal, do concreto a ser utilizado e dados da armadura.

A Figura 4 apresenta a seção de 1800 cm^2 sendo a altura no eixo y (h_y) igual a 60cm e altura em x (h_x) igual a 30 cm com a distância entre o eixo da armadura de compressão e a face mais próxima do elemento (d') 4,3 cm, o comprimento do pilar é de 280 cm sendo o comprimento de flambagem em x e y igual a 560 cm.

Figura 4 - Pilar exemplo



Fonte: Autor (2022).

As resistências do concreto e armadura calculadas a partir dos procedimentos descritos na NBR 6118:2014, para a utilização, junto com o Módulo de Elasticidade do concreto estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Resistências do concreto e armadura.

Concreto C20		AÇO CA-50	
f_{ck} (MPa)	20	$f_{y,d}$ (kN/cm ²)	43,48
f_{cd} (kN/cm ²)	14,29		
$f_{ct,m}$ (MPa)	2,21		
$f_{ct,d}$ (kN/cm)	1,105		
E_{ci} (MPa)	25000		

Fonte: Autor (2022).

O pilar exemplo teve suas duas direções testadas em relação ao índice de esbeltez limite, para a verificação da necessidade de cálculo de esforço de segunda ordem. Para a direção em que o índice de esbeltez foi maior que a limite, foram aplicados os métodos descritos em norma e o processo iterativo.

Para o esforço solicitante de cálculo (N_d) do pilar utilizando a carga normal característica (N_k) estimada a partir do carregamento de lajes aplicada ao pilar, foi utilizada a expressão:

$$N_d = \gamma_f \cdot N_k \quad (1)$$

onde:

γ_f = é o coeficiente de ponderação das ações, é adotado como 1,4 no Estado Limite Último.

Para carga horizontal estimou-se, apenas para efeito de cálculo, o valor de 4,5% da força normal ao pilar resultando na carga de 50kN.

O índice de esbeltez (λ), dado pela razão entre o comprimento de flambagem (l_e) e o raio de giração do pilar (i), é utilizado para verificar a suscetibilidade do pilar a deformação nas duas direções do pilar, e foi calculada através da Equação 2:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (2)$$

onde o raio de giração (i) é calculado pela Equação 3:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

sendo, I o momento de inércia da seção na direção escolhida, e A a área da seção.

Os índices calculados foram comparados aos índices limite de esbeltez para cada direção. A direção em que este valor foi ultrapassado numa direção, seria denominada eixo crítico, ao qual são realizados os cálculos de momento de segunda ordem, causados quando as condições iniciais de carregamento são alteradas devido a deslocamentos horizontais. O índice de esbeltez limite é calculado pela Equação 4:

$$\lambda_{lim} = \frac{25+12,5 \cdot \frac{e_1}{h}}{\alpha_b} \quad (4)$$

onde:

e_1 é a excentricidade de 1º ordem;

$\alpha_b = 0,9$ de acordo com o item 15.8.2 da NBR 6118:2014.

Para que fosse encontrado o valor do momento mínimo ($M_{d\,mín}$) foi necessária utilização da excentricidade mínima de primeira ordem ($e_{1\,mín}$) para x e y, utilizando a Expressão 5:

$$e_{1\,mín} = \frac{1,5+0,03 \cdot h}{\alpha_{b1}} \quad (5)$$

O momento mínimo dos eixos pilar, que qual foram somados os esforços de segunda ordem para a obtenção do momento total solicitante foram calculados pela fórmula da Equação 6:

$$M_{d\,mín} = N_d \cdot e_{1\,mín} \quad (6)$$

Para os métodos não computacionais apresentados a seguir, foram utilizados os ábacos de Venturini (1987) para obtenção da taxa mecânica de armadura (ω), utilizada para o cálculo das armaduras da seção. O dado de entrada para o ábaco é o valor do cobrimento dividido pela altura da seção na direção desejada. Também são utilizadas a força normal adimensional obtida no item 15.8.3.3.2 da NBR 6118:2014 o coeficiente momento adimensional (μ), calculado através da Equação 7:

$$\mu = \frac{M_{d\ tot}}{h_y \cdot A_c \cdot f_{cd}} \quad (7)$$

A partir dessa taxa foi possível realizar o cálculo da área da seção transversal da armadura longitudinal de tração, dada pela Equação 8:

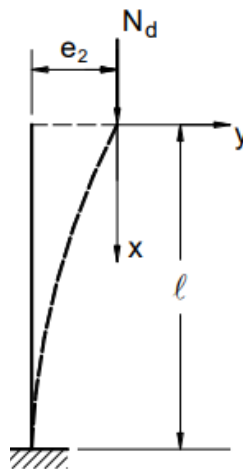
$$A_s = \frac{\omega \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (8)$$

Através deste valor pode-se adotar a armadura comercial com área mais próxima da obtida em cálculo.

2.1 Pilar-padrão

A NBR 6118:2014, estabelece para estes métodos, pilares com índice de esbeltez (λ) menor ou igual a 90 e o emprego dos mesmos em pilares com armadura constante e simétrica em torno do eixo e de seção constante como apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Pilar-padrão



Fonte: BASTOS (2017)

Para os métodos de Rigidez “ κ ” e Curvatura aproximada foram utilizados os procedimentos que estão descritos nos itens 15.8.3.3.3 e 15.8.3.3.2 da NBR 6118:2014.

2.2 P Delta

Segundo Lopes (2005), o processo de análise não-linear geométrica ocorre em estruturas onde os elementos estão sujeitos a forças axiais, que agem na direção

longitudinal da peça. É um processo que relaciona a carga axial (P) e o deslocamento horizontal (Δ), e pode ser resolvido de diversos métodos, o mais conhecido entre eles é o da carga lateral fictícia, onde a carga axial é fixada e se obtém através de cálculo uma carga horizontal fictícia para cada iteração do processo e, a partir dela, se encontra o momento resultante, comparando-o com o encontrado na iteração anterior, até que se chegue no equilíbrio da estrutura. O deslocamento do pilar exemplo em cada iteração pode ser visualizado de acordo com a Figura 6.

Figura 6: Iterações do processo P Delta.



Fonte: Autor (2022)

A análise do processo se inicia com o cálculo do momento inicial, na base do pilar, obtido pela multiplicação entre a força horizontal (H_d) e o comprimento da barra (l) como mostrado na Equação 9:

$$M_1 = H_d \cdot l \quad (9)$$

Em seguida é realizado o cálculo do deslocamento horizontal devido a ação da força horizontal, obtido através da Equação 10:

$$\Delta = \frac{H_d \cdot l^3}{3 \cdot (EI)_{sec}} \quad (10)$$

onde:

$(EI)_{sec}$ é a rigidez defasada. Seguindo o item 15.7.3 da NBR 6118:2014, foi utilizado para a aproximação de não linearidade física pela Equação 11:

$$(EI)_{sec} = 0,8 \cdot E_{CI} \cdot I_C \quad (11)$$

É possível então realizar o cálculo do momento resultante do deslocamento na base do pilar (M_2), por meio da equação 12:

$$M_2 = M_1 + (P_d \cdot \Delta) \quad (12)$$

onde:

P_d é a força normal de cálculo N_d

A partir destes cálculos é possível obter a primeira carga fictícia ($F_{fi.d}$) a ser utilizada para encontrar o próximo deslocamento horizontal, calculado pela Equação 13:

$$F_{fi.d} = \frac{P_d \cdot \Delta}{l} \quad (13)$$

Com o novo valor de carga horizontal, pode ser realizado o cálculo do novo deslocamento horizontal (Δ_i), pela Equação 14:

$$\Delta_i = \frac{F_{fi.d} \cdot l^3}{(EI)_{sec}} \quad (14)$$

Novamente será realizado o cálculo do momento devido ao deslocamento horizontal, assim como para o M_2 , mas utilizando o deslocamento da primeira iteração, como na Equação 15:

$$M_i = M + (P_d \cdot \Delta_i) \quad (15)$$

O processo será repetido até quando o momento calculado for de no máximo 0,01% do momento obtido na iteração anterior. O cálculo do erro para cada iteração, pode ser realizado através da Equação 16:

$$e = M_i - M_{i-1} \quad (16)$$

sendo:

M_i o momento da iteração atual;

M_{i-1} o momento encontrado na iteração anterior.

Através de uma regra de três será encontrada a porcentagem de erro, o momento que mais se aproximar do erro previsto, será adotado como momento total.

2.3 PCalc

Sendo possível para o programa a utilização de outros métodos normativos além dos supracitados, foi escolhido para a análise o método pilar padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r, onde os esforços normais são multiplicados pelo deslocamento do pilar em cada seção, fazendo com o que o método seja mais preciso. O programa realiza os cálculos conforme o item 15.3.1 da NBR 6118:2014 gerando os gráficos apresentados na figura 7.

Figura 7 - Resultado das combinações M, N, 1/r.

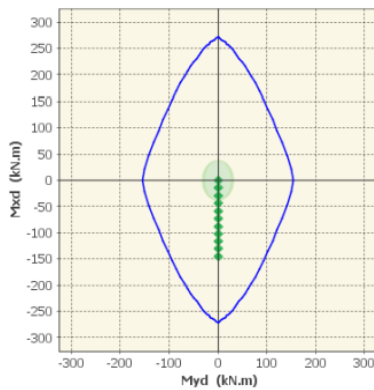


Figura: Diagrama de interação (Comb. 1)

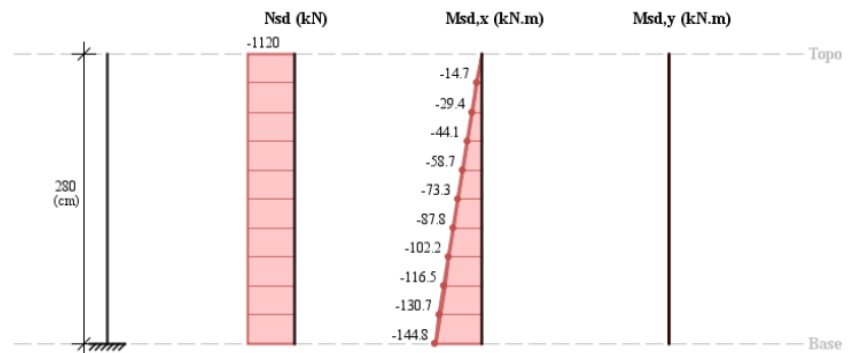


Figura: Esforços solicitantes de cálculo (Comb. 1)

Fonte: P Calc por Autor (2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente para a verificação da necessidade de cálculo dos esforços de segunda ordem obteve-se os resultados apresentados no Quadro 2 para índices de esbeltez nos eixos x e y.

Quadro 2: Índice de Esbeltez.

Eixos	Esbeltez Limite	Esbeltez Calculada
X	35	32,33
Y	35	66,66

Fonte: Autor (2022).

Nota-se a necessidade de cálculo de esforço de segunda ordem para o eixo Y (em torno do eixo X), visto que o valor calculado ultrapassa o valor limite.

Nos métodos dispostos em norma, pilar padrão com curvatura aproximada e pilar padrão com rigidez “*k*” aproximada, em que foram utilizados os itens 15.8.3.3.2 e 15.8.3.3.3 da NBR 6118:2014, obteve-se valores de momento de segunda ordem em torno do eixo x relativamente próximos, de acordo com o esperado, para momentos totais conforme o Quadro 3:

Quadro 3: Resultados Método Pilar Padrão

Etapas	Curvatura aproximada	Rigidez Aproximada
Excentricidade de 1º Ordem (cm)	3,3	-
Momento mínimo em X e Y (kN.m)	140	140
Curvatura na seção crítica	8,33E-05	-
Excentricidade de 2º Ordem (cm)	2,613	-
Força adimensional (v)	0,436	0,436
Momento total em X (kN.m)	155,269	144,986
Coefficiente (μ_x)	0,200	0,091
Coefficiente (μ_y)	0,190	0,091
Maior taxa mecânica (ω)	0,32	0,31

Fonte: Autor (2022).

No método de curvatura aproximada o valor de momento total na direção x é de 6,61% maior que o método de rigidez “*k*” aproximada, que se assemelha aos exemplos resolvidos de pilares intermediários pelos mesmos métodos na apostila de Bastos & Oliveira Neto (2004).

Foram obtidos valores mais próximos de momento total entre o método de curvatura aproximada com o processo iterativo P Delta, que apresenta um valor 1,09% maior, como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4: Resultados do processo P Delta.

Processo Iterativo P Delta					
Etapas	Iniciais	1º Iteração	2º Iteração	3º Iteração	4º Iteração
Força horizontal fictícia (kN)	-	5,411	0,586	0,063	0,007
Deslocamento Δ (m)	0,014	1,46E-03	1,58E-04	1,71E-05	1,85E-06
Momento na base do pilar (kN.m)	155,150	156,790	156,967	156,986	156,988
Erro (%)	-	1,046	0,113	0,012	0,00132

Fonte: Autor (2022).

Pode-se notar que, para obtenção do resultado pelo processo iterativo P Delta foram necessárias quatro iterações, até a obtenção de um percentual aceitável de erro proposto na dissertação de Moncayo (2011), que obteve um percentual de 0,005% em sua iteração final, no caso do presente trabalho o erro da última iteração foi de 0,0013%, atendendo portanto o erro máximo permitido.

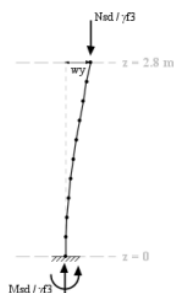
Para os métodos normativos, foi obtido através dos ábacos de Venturini que a menor taxa mecânica (ω), estava onde o momento mínimo (em torno do eixo y), foi adotado igual ao momento na base do pilar, fazendo com que se obtivesse o mesmo coeficiente μ_y para os dois métodos como demonstrado na tabela 3. Para o eixo x, onde foram obtidos os momentos de segunda ordem os coeficientes μ_x foram praticamente iguais para os dois métodos, resultando em áreas de aço muito próximas. Para uma comparação mais equivalente entre os métodos, foi adotado o mesmo diâmetro para as barras de armadura longitudinal, resultando em 10 barras de 16mm, também para o processo iterativo P Delta, resistindo às solicitações de todos os métodos.

Na utilização do programa P Calc, o cálculo realizado através do método pilar padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r foram obtidos os resultados apresentados na Figura 7.

Figura 7: Pilar padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r

Momentos em torno do eixo x:

Tabela: Cálculo 2ª Ordem para o momento Mx



z [m]	Msd,tot,x / γf3 [kN.m]	1/rx [10³/m]	EIsec,x [kN.m²]	wy [m]	Msd1,x [kN.m]	Msd2,x [kN.m]	Msd,tot,x [kN.m]
2.8	0	0	0	0.00428	0	0	0
2.52	-13.4	-0.162	82639.48	0.00365	-14	-0.7	-14.7
2.24	-26.7	-0.324	82616.22	0.00302	-28	-1.4	-29.4
1.96	-40.1	-0.485	82567.09	0.00242	-42	-2.1	-44.1
1.68	-53.4	-0.646	82511.82	0.00186	-56	-2.7	-58.7
1.4	-66.6	-0.808	82429.51	0.00135	-70	-3.3	-73.3
1.12	-79.8	-0.969	82338.05	0.0009	-84	-3.8	-87.8
0.84	-92.9	-1.13	82238.14	0.00053	-98	-4.2	-102.2
0.56	-105.9	-1.299	81652.18	0.00024	-112	-4.5	-116.5
0.28	-118.8	-1.496	79478.66	0.00006	-126	-4.7	-130.7
0	-131.6	-1.725	76354.91	0	-140	-4.8	-144.8

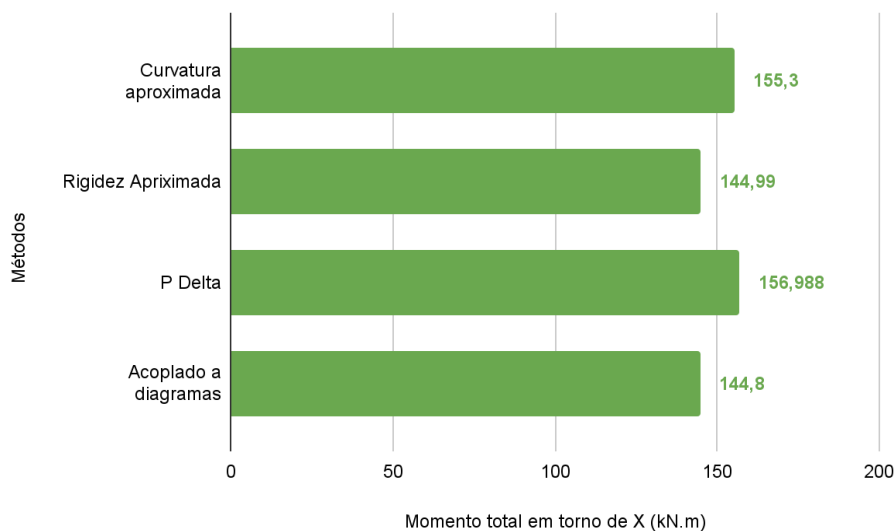
Figura: Deslocamento wy

Fonte: Autor (2022).

Para este método foi obtido um momento total em torno de x de 144,8 kN.m, praticamente se igualando ao processo de rigidez “ κ ” aproximada mesmo sendo um método mais preciso e que gera momentos de menor magnitude como constatado por Alves et al (2017), tornando mais efetivo o valor obtido através do cálculo manual. Em relação ao método pilar padrão com curvatura aproximada e o processo P Delta percebe-se diferenças de aproximadamente 6,7% e 7,7% respectivamente, pequenas mas ainda sim consideráveis.

Para uma clara visualização em relação aos momentos totais em torno do eixo x apresenta-se o gráfico da Figura 8, onde fica evidenciada a variação de resultados dos métodos utilizados para a análise do pilar.

Figura 8: Momentos totais.



Fonte: Autor (2022).

4 CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos propostos pode-se obter resultados comparativos efetivos em relação aos momentos de segunda ordem visto a proximidade dos valores obtidos e em suas variações com trabalhos utilizados como referência.

Tornou-se clara a funcionalidade dos métodos normativos pilar padrão com rigidez “ κ ” e curvatura aproximadas, pontuando uma tendência deste último ter resultados de momentos relativamente maiores em relação aos obtidos no primeiro. A relação desses métodos mostrou-se efetiva também em relação ao processo iterativo P Delta, ainda que se utilize outros meios para o alcance do momento total. Tendo uma proximidade maior

ainda ao método de curvatura aproximada, juntos apresentam os maiores valores de momento dentre os métodos apresentados, o que em algumas situações exigiram uma elevada área de aço.

No software P Calc, utilizando o modelo pilar padrão acoplado a diagramas M, N, $1/r$, ficou clara a maior precisão em relação aos métodos anteriores, visto que faz a relação momento-curvatura em todas as direções para cada situação do pilar. Pôde-se notar uma grande proximidade com o método de rigidez “ κ ” aproximada, sustentando que mesmo resultando em um menor valor de momento, as solicitações serão resistidas podendo resultar em uma área de aço menor.

De acordo com os resultados obtidos e os meios para a obtenção, o método Pilar padrão acoplado a diagramas M, N, $1/r$ torna-se o mais recomendado visto que o pilar é dividido em seções analisadas singularmente em todas as direções através dos esforços normais pelos deslocamentos, gerando um valor mais preciso de momento sendo possível adotar uma armadura efetiva mais próxima à calculada.

Sugere-se para trabalhos futuros uma análise comparativa dos métodos pilar padrão com rigidez “ κ ” aproximada e pilar padrão acoplado a diagramas M, N, $1/r$, aplicados a pilares de diferentes seções e vínculos e maiores solicitações, visando a verificação de uma possível tendência de proximidade nos resultados de momentos de segunda ordem.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Me. André Felipe Aparecido de Mello pelo trabalho de orientação, atenção, compreensão e incentivo.

A meus pais, irmã, avó, meu companheiro e todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, É. C.; GAMA, P. V.C.N.; SOUZA, P.M.S. **Projeto Ótimo de Pilares Esbeltos de Concreto Armado** E & S – Engineering and Science, (2017), 6:2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) . NBR 6118 . Projeto de estruturas de concreto - Procedimento . Rio de Janeiro . 2014

BASTOS,P. S. S. **Pilares de concreto armado: NOTAS DE AULA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO II**. UNESP - Campus de Bauru/SP, maio. 2017. 104 p. Notas de Aula.

BASTOS, Paulo Sérgio dos S.; OLIVEIRA NETO, Luttgardes. **Dimensionamento de pilares de canto segundo a NBR 6118:2003**. IBRACON (2004).

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, v. 2. São Paulo. Pini, 2013.

CASAGRANDE A.; SILVA, D. **Análise do Dimensionamento de Pilares de Concreto Armado pelo Método do Pilar Padrão com Rigidez “ κ ” Aproximada e pelo Método do Pilar Padrão com Curvatura Aproximada para Efeitos de 2º Ordem**. Dissertação. UNESC- Universidade do Extremo Sul Catarinense. Santa Catarina, 2011.

KIMURA, A. E.; CARDOSO, JUNIOR, S. D. **Sistema computacional para análise não linear de pilares de concreto armado**. IBRACON (2013).

LOPES , Pires Arlindo . **Estudos sobre diferentes métodos de análise p - delta**. Teoria e Prática na Engenharia Civil , 2005.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de Segunda Ordem Global em Edifícios com Estrutura de Concreto Armado**. Dissertação. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

TULLIO, F.; MACHADO, L. **A aplicação do conhecimento científico da Engenharia Civil 3**. Editora Atena. Ponta Grossa, 2020.

VENTURINI, W. S.; RODRIGUES, R. O. **Dimensionamento de peças retangulares de concreto armado solicitadas à flexão oblíqua**. São Carlos, EESC-USP, 1987.