

AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DA CARGA CRÍTICA DE FLAMBAGEM DE PILARES DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO EM FASE CONSTRUTIVA

Marcello Gomes Marques Filho ⁽¹⁾, Kaio César Borges Benedetti ⁽²⁾, Daniel de Lima Araújo ⁽³⁾

RESUMO

O colapso de pilares pré-moldados em fase construtiva, embora não possua critérios de verificação nas normas vigentes, pode causar sérias consequências em caso de ocorrência. Este artigo objetiva avaliar a estabilidade elástica de pilares pré-moldados durante essa fase, utilizando o método de Rayleigh-Ritz. Estuda-se, também, a contribuição de estais para o aumento da capacidade de carga dos pilares pré-moldados, bem como os efeitos decorrentes do ângulo de posicionamento dos estais, da altura de fixação desses no pilar e de incrementos na força de tração aplicada. São apresentados gráficos relacionando a tensão crítica e índice de esbeltez para pilares pré-moldados de seção constante para os diversos parâmetros avaliados. Por fim, é abordado um estudo de caso de pilar pré-moldado com mudança de seção, havendo também avaliação paramétrica dos fatores estudados.

Palavras-chaves: Concreto pré-moldado, flambagem, estabilidade de pilares.

- ⁽¹⁾ Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de Goiás, e-mail: marcellogomes@discente.ufg.br
- ⁽²⁾ Doutorando, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e-mail: kaio.engcivil@aluno.puc-rio.br
- ⁽³⁾ Professor Doutor, Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, e-mail: dlaraujo@ufg.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo El Debs (2017), ao se projetar pré-moldados, deve-se considerar, além da situação final, situações transitórias correspondentes às fases de desmoldagem, transporte, armazenamento e montagem, que podem apresentar solicitações mais desfavoráveis que aquelas correspondentes à situação definitiva.

O colapso de estruturas em fase construtiva, caso venha a ocorrer, é um cenário extremamente crítico, uma vez que pode incorrer em grandes perdas materiais, lesões ou mesmo fatalidades. Deste modo, reforça-se a importância de se projetar com segurança, para todas as etapas e situações, as estruturas pré-moldadas

As normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 9062 (ABNT, 2017) não apresentam critérios de projeto para esta etapa, ressaltando pontos como a orientação de que a estrutura deve ser analisada em todas as fases em relação à estabilidade, utilizando-se contraventamentos provisórios sempre que necessário.

Na Austrália há um Código Nacional de Prática para Pré-moldados, *Tilt-up* e Elementos de Concreto na Construção de Edificações do *Australian Safety and Compensation Council* (2008), cujo escopo é de prover um guia para trabalhadores da indústria de construção geral no manejo seguro de elementos de concreto. Esse código prevê escoras temporárias para resistir a cargas esperadas, tais como cargas de construção e cargas de vento para estruturas em situação temporária, recomendando que as colunas sejam escoradas em duas direções ortogonais. É previsto, ainda, que não deve haver menos que dois suportes temporários para cada elemento de concreto, a menos que especificamente projetado, detalhado e especificado por um engenheiro. (AUSTRALIAN SAFETY AND COMPENSATION COUNCIL, 2008)

A estabilidade de pilares em fase construtiva, em especial para estruturas pré-moldadas, é um problema pouco abordado na literatura, verificando-se, por exemplo, mais situações de pesquisa em relação à estabilidade lateral de vigas pré-moldadas.

Urgessa *et al.* (2016) apresenta um estudo sobre a estabilidade da armadura de grandes colunas, constatando que o colapso em fase construtiva desses elementos é bastante comum, sendo a principal causa a falta de contraventamento adequado. O problema foi tratado considerando-se o regime elástico linear, obtendo-se as equações de equilíbrio para a armadura isolada e estaiada. Foram obtidas, por vias analíticas, as cargas críticas, evidenciando o efeito da altura e do ângulo de contraventamento sobre seus valores. Embora este trabalho abordasse a estabilidade da armadura, alguns dos conceitos aplicados podem ser utilizados para a verificação do pilar em si.

Para fins de obtenção de dados para aplicação numérica foi utilizado o trabalho de Mota (2005), que apresenta o projeto de uma estrutura pré-moldada de um edifício de sete pavimentos, com um total de mais de 29 metros de altura. Nesse trabalho foram discutidos aspectos usuais de projeto, como a concepção estrutural, a verificação das fases transitórias para os elementos isolados, a montagem da estrutura e sua estabilidade global, abordando que foram empregados estais na fase construtiva para garantir a estabilidade dos pilares, embora não sejam detalhados resultados de cálculo no trabalho.

Deste modo pretende-se, por meio desse trabalho, realizar o estudo da estabilidade elástica de pilares pré-moldados em fase construtiva aplicando-se o método de Rayleigh-Ritz, verificando o efeito de estais na sua capacidade de carga, bem como os efeitos decorrentes do ângulo de posicionamento dos estais, da altura de fixação dos mesmos no pilar e de incrementos na força de tração aplicada, buscando contribuir com a escassa bibliografia

sobre o assunto.

2 METODOLOGIA

A análise de estabilidade elástica abordada neste trabalho consiste em, inicialmente, encontrar a carga crítica por meio do método de Rayleigh-Ritz, traçando-se em seguida um gráfico que relaciona as tensões críticas de flambagem com a esbeltez do pilar, para o caso de uma seção única.

Estuda-se inicialmente o pilar sem a presença de estais, verificando-se, em seguida, o efeito da presença de estais sobre a tensão crítica, bem como o efeito da variação de parâmetros como a posição da seção de fixação dos cabos, o ângulo de inclinação dos estais e a força de pré-tração aplicada nos cabos.

Em seguida, estuda-se um pilar com seção variável, baseando-se em dados de pilares do Edifício do Instituto de Câncer do Estado do Ceará apresentados por Mota (2005). Os pilares são considerados monolíticos, perfeitamente engastados na base e livres no topo, sem a presença de imperfeições geométricas iniciais. Nesta análise, apenas um plano de flambagem é considerado.

2.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para se encontrar a carga crítica utilizando o método de Rayleigh-Ritz, é necessário encontrar as energias de deformação do sistema (U), o trabalho das cargas externas (W) e, em seguida, calcular a energia potencial total (Π) do sistema, por meio da diferença entre a energia de deformação e o trabalho. Este processo é realizado no estado perturbado do sistema, conforme Figura 1.

A energia de deformação interna do pilar pode ser aproximada conforme Equação 1,

considerando apenas a energia de flexão e desprezando a energia de membrana, utilizando-se da teoria inextensional de vigas, bem como aproximando a curvatura por meio de expansão em série de Taylor.

O trabalho das cargas externas, por sua vez, pode ser dividido em duas parcelas, sendo a primeira relativa ao trabalho exercido pelo peso próprio da coluna (**W_p**) e a segunda referente à carga crítica (**W_c**). Utilizando-se da curvatura aproximada e da hipótese de pequenos deslocamentos, pode-se descrever o deslocamento axial em função apenas do deslocamento transversal, apresentando-se os trabalhos conforme Equações 2 e 3.

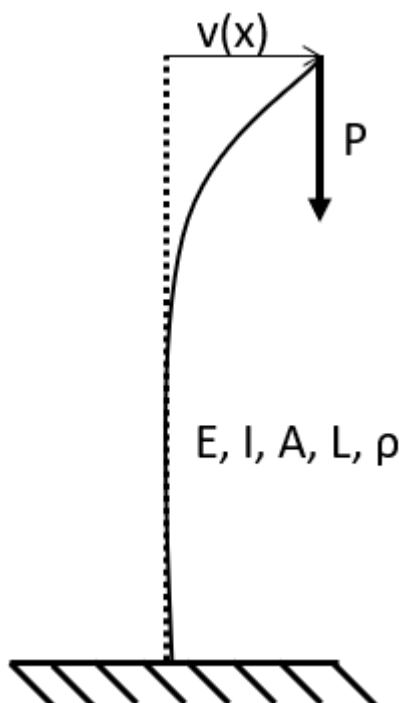


Figura 1 – Pilar em configuração perturbada

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} EI \left(\frac{dv(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (1)$$

$$W_c = \int_0^L \frac{1}{2} P \left(\frac{dv(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (2)$$

$$Wp = \int_0^L \frac{1}{2} \rho A (L - x) \left(\frac{dv(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (3)$$

Sendo:

E = Módulo de elasticidade do pilar;

I = Momento de inércia da seção transversal do pilar;

P = Carga crítica;

L = Comprimento do pilar;

ρ = Densidade do pilar;

v(x) = Deflexão lateral do pilar;

x = Altura em relação à base do pilar.

Ao se utilizar cabos para aprimorar o comportamento da estabilidade do sistema, conforme apresentado na Figura 2, deve-se considerar também suas formulações energéticas, o que foi realizado adaptando-se a formulação proposta no trabalho de Urgessa *et al* (2016).

Em relação à energia de deformação do cabo, descrita por meio da Equação 4, deve ser considerada a contribuição de apenas um dos cabos, uma vez um dos cabos se comprime quando ocorre deflexão lateral do pilar, não contribuindo para a estabilização do sistema.

Quanto ao trabalho relativo às forças de pré-tração dos cabos, deve-se considerar a contribuição de ambos os cabos aplicados, uma vez que a força de protensão é aplicada nos dois lados do pilar, podendo a expressão ser aproximada conforme a Equação 5.

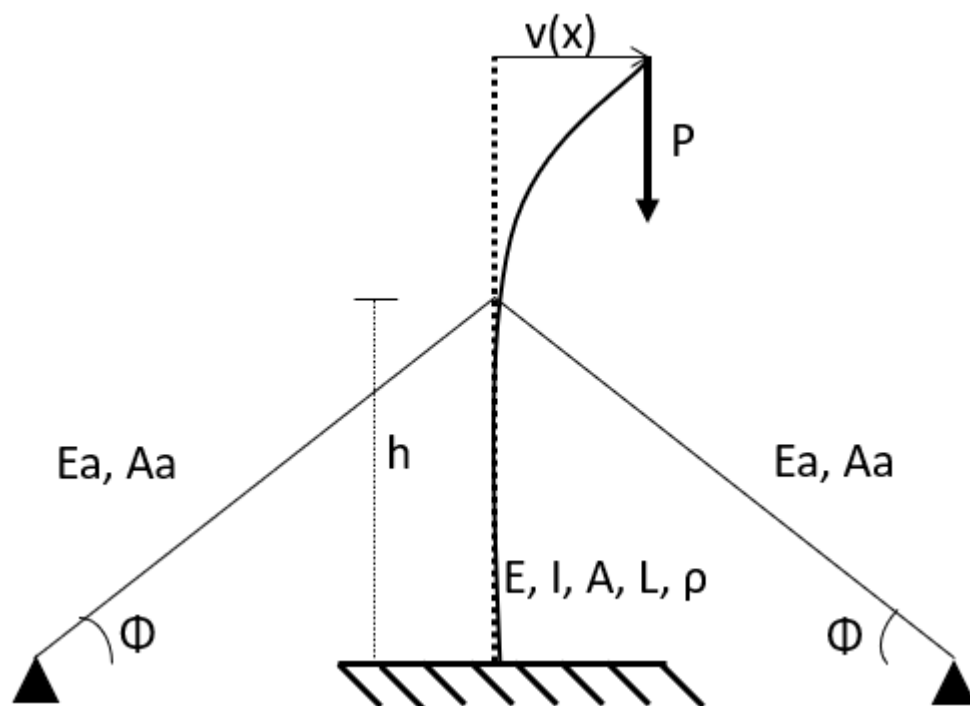


Figura 2 – Pilar em configuração perturbada com cabos para ancoragem

$$Ua = \frac{EaAa}{2h} \cos^2(\Phi) \sin(\Phi) v(h)^2 \quad (4)$$

$$Wa = 2 \int_0^h \frac{1}{2} P_0 \sin(\Phi) \left(\frac{dv(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (5)$$

Em que:

Ea = Módulo de elasticidade do cabo;

Aa = Área da seção transversal do cabo;

h = Altura de ancoragem do cabo no pilar;

P₀ = Força de pré-tração no cabo;

Φ = Ângulo de ancoragem do cabo;

O funcional de energia potencial total no estado perturbado é obtido considerando a contribuição de todas as energias de deformação e trabalhos envolvidos no problema, conforme Equação 6.

$$\Pi = \sum U - \sum W \quad (6)$$

Para o estudo de caso de um pilar com seção variável, é necessário novamente modificar a modelagem matemática do problema, conforme apresentado na Figura 3. Deste modo, a energia potencial do pilar é obtida aplicando-se as integrais definidas nas Equações 1, 2 e 3, adaptando-se o domínio de integração para cada seção.

Para a parcela de energia dos cabos, são aplicadas as Equações 4 e 5 para cada cabo, adaptando-se a deflexão considerada na Equação 4, bem como o domínio de integração da Equação 5.

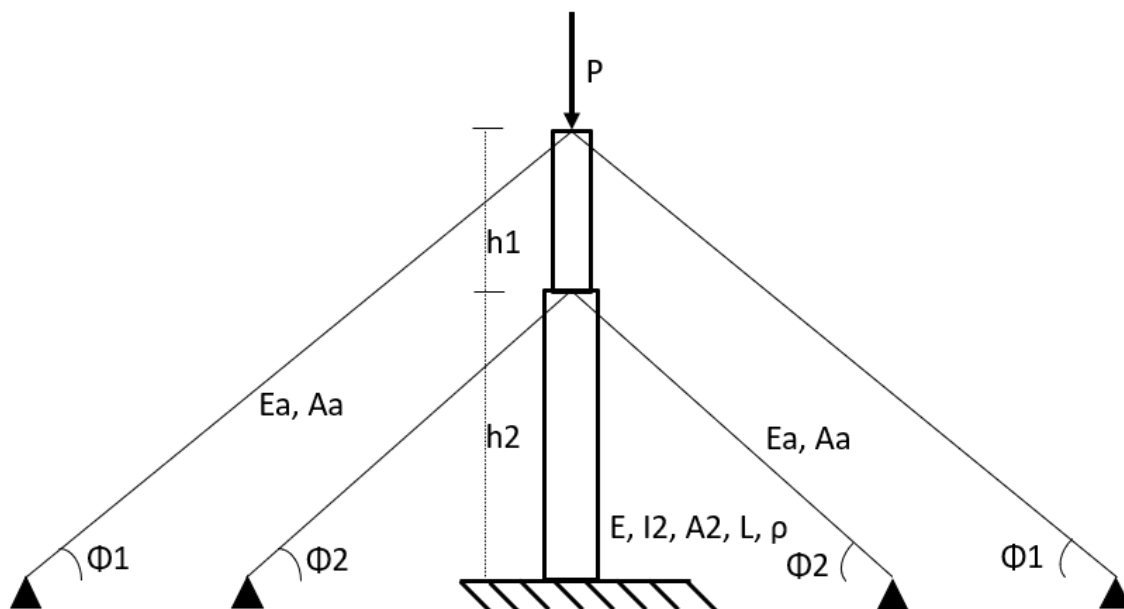


Figura 3 – Pilar de seção variável com múltiplos cabos

2.2 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Neste trabalho é aplicado o método de Rayleigh-Ritz, que atua diretamente no potencial de energia e consiste em substituir o campo de deslocamentos pelo produto de constantes quaisquer

por funções de forma.

Assumindo-se uma hipótese de pequenos deslocamentos, o funcional de Π é considerado linear. Deste modo, ao se aplicar o método de Rayleigh-Ritz, chega-se a um problema de autovalor que leva à obtenção das cargas críticas, por meio da solução não-trivial do sistema. Para esta análise, optou-se por funções de aproximação polinomiais, de acordo com a equação 7.

$$v_k(x) = \sum_{i=0}^n ck_i x_i^i \quad (7)$$

Onde:

$v_k(x)$ = Função de forma adotada para a k-ésima seção;

ck_i = Constante arbitrária;

x = Distância da seção do pilar em relação à seção engastada;

i = Grau do polinômio adotado para cada iteração;

n = Grau máximo do polinômio adotado

Como as funções de forma devem atender as condições de contorno, de deslocamentos e rotações nulas na base, os valores de $c1_0$ e $c1_1$ devem ser nulos. A substituição de $v(x)$ por $v_1(x)$, resolução das integrais e aplicação da Equação 8 resulta em um problema de autovalor em P de n-2 equações, sendo a carga crítica de flambagem o menor autovalor real positivo.

$$\delta \Pi = \sum_{i=0}^n \frac{\partial \Pi}{\partial c_{ki}} = 0 \quad (8)$$

Para o caso de um pilar pré-moldado com seção variável, são utilizadas duas funções de aproximação, $v_1(x)$ e $v_2(x)$. Além das condições de contorno geométricas referentes ao engaste, as funções de forma devem atender as condições de compatibilidade de deslocamentos e rotações na interface entre as seções, conforme apresentado na Equação 9.

A obtenção dos autovalores se segue por meio da Equação 8.

$$v_1(L1) = v_2(0); \quad (9)$$

$$\frac{dv_1(L1)}{dx} = \frac{dv_2(0)}{dx}$$

Após a obtenção das cargas críticas de flambagem, manipulando-se a expressão obtida para a carga crítica, curvas de estabilidade são obtidas, relacionando a tensão crítica (σ) e o índice de esbeltez (λ), definidos nas equações 10 e 11.

$$\sigma = \frac{P}{A}; \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{2L}{\sqrt{I/A}}; \quad (11)$$

Onde:

σ = Tensão crítica;

P = Carga crítica;

A = Área da seção transversal;

λ = Índice de esbeltez;

L = Comprimento do pilar;

I = Inércia da seção transversal;

Para o caso do pilar pré-moldado com mudança de seção, a definição do índice de esbeltez não é aplicável, dessa maneira os resultados obtidos são apresentados por meio de tabelas contendo as cargas críticas de flambagem obtidas.

3 RESULTADOS

Aplicando-se funções de forma por meio de polinômios de 5º grau no método de Rayleigh-Ritz e empregando-se os parâmetros apresentados no Quadro 1 para o caso de um pilar com

seção única, são obtidos os resultados de tensão crítica obtidos em função do índice de esbeltez, avaliando-se parâmetros como o efeito do peso próprio, da presença de estais, bem como de seu ângulo de fixação.

Os cabos de protensão adotados na análise são cordoalhas de baixa relaxação CP190, de sete fios, com diâmetro nominal de 12.7 mm. Com as dimensões da seção transversal mostrada no Quadro 1 e adotando a altura do pilar descrito em Mota (2005), que tinha altura de 29.58 m, esse pilar teria um índice de esbeltez de 273.24, admitindo-o engastado na fundação e livre no topo.

Quadro 1 – Parâmetros empregados na análise de pilar com seção única

Parâmetro	Valor e Unidade de Medida
fck	40 MPa
b	0.8 m
h	0.75 m
E	30.1 GPa
I	0.028125
A	0.6 m ²
ρ	24.5 kN/m ³
Ea	200 GPa
Aa	100.9e-6 m ²

O posicionamento dos cabos foi realizado de forma a impedir a flambagem em relação ao eixo de menor inércia.

Para o estudo de caso do pilar com seção variável os parâmetros se encontram no Quadro 2. Também foram consideradas cordoalhas de baixa relaxação CP190, de sete fios, com diâmetro nominal de 12.7 mm. Os parâmetros foram adaptados de Mota (2005). O posicionamento dos cabos foi realizado de forma a impedir a flambagem em relação ao eixo de menor inércia de cada seção.

De acordo com Mota (2005), os pilares foram concebidos com seção transversal variável,

não sendo aplicável o conceito índice de esbeltez aos mesmos para a etapa construtiva.

Avaliando-se individualmente a esbeltez do pilar se cada uma das seções transversais fosse adotada ao longo de todo o pilar observa-se que, com 29.58 m de altura são obtidos índices de esbeltez de 256.17 (para $h = 1$ m) e 273.24 (para $h = 0.75$ m).

Quadro 2 – Parâmetros empregados na análise de pilar com seção variável

Parâmetro	Valor e Unidade de Medida
fck	40 MPa
b	0.8 m
E	30.1 GPa
h1	1.00 m
I1	0.0427 m ⁴
A1	0.8 m ²
L1	13.48 m
h2	0.75 m
I2	0.028125 m ⁴
A2	0.6 m ²
L2	16.10 m
ρ	24.5 kN/m ³
Ea	200 GPa
Aa	100.9e-6 m ²

3.1 EFEITO DO PESO PRÓPRIO

A figura 4 apresenta os resultados de tensão crítica na seção da base do pilar isolado (sem nenhum contraventamento horizontal) com peso próprio (em verde e linha sólida) e sem peso próprio (em preto, em linha tracejada). A tensão crítica foi obtida dividindo a força crítica de flambagem pela área da seção transversal do pilar. Nota-se que o efeito do peso próprio na tensão crítica é irrisório, podendo ser desprezado mesmo em casos de alta esbeltez.

Observa-se ainda que, para valores de esbeltez entre 250 e 300, a tensão crítica atinge valores inferiores a um décimo do f_{ck} , que são tensões muito baixas. Se for considerado, ainda, um fator de segurança mínimo de 1.5 (valor recomendado na verificação da instabilidade lateral de vigas pré-moldadas em fases transitórias segundo Mast (1993)), a máxima tensão de compressão nesse pilar durante a fase construtiva não poderia ultrapassar 2.66 MPa.

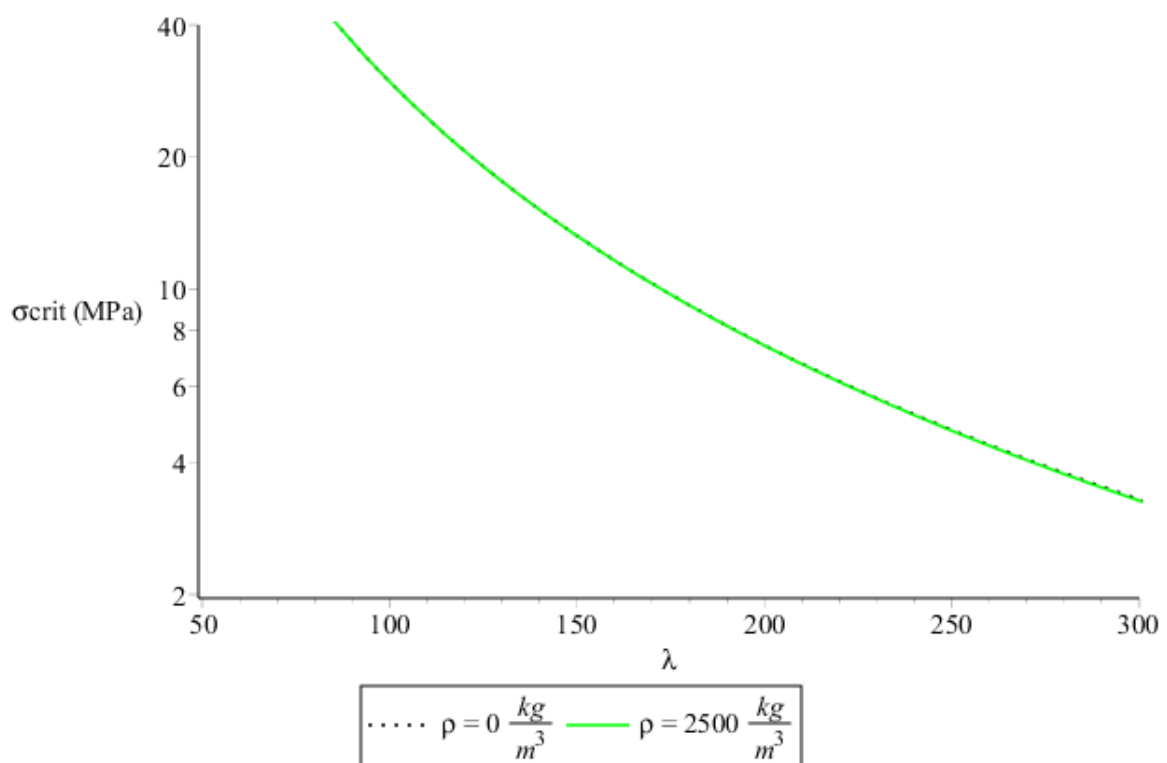


Figura 4 – Tensão crítica vs índice de esbeltez com e sem peso próprio

3.2 EFEITO DO USO DE CABOS DE PROTENSÃO

Para o estudo do efeito do uso de cabos de protensão (Figura 5), foi comparado o resultado obtido sem o cabo (em preto e linha tracejada), conforme resultado mostrado no item 3.1, e o resultado obtido com um cabo ancorado a 45° e fixado na metade da altura do pilar (em verde e linha contínua), com uma força de pré-tração de 15 kN, desprezando-se o peso próprio.

Por meio dos resultados apresentados na Figura 5, pode-se observar que a presença do cabo gerou um incremento na capacidade de carga, principalmente para altos valores de esbeltez. No caso do pilar com esbeltez igual a 273, houve um aumento de 33.83% na tensão crítica, a qual passou a apresentar um valor de 3.56 MPa, já admitindo um fator de segurança igual a 1.5.

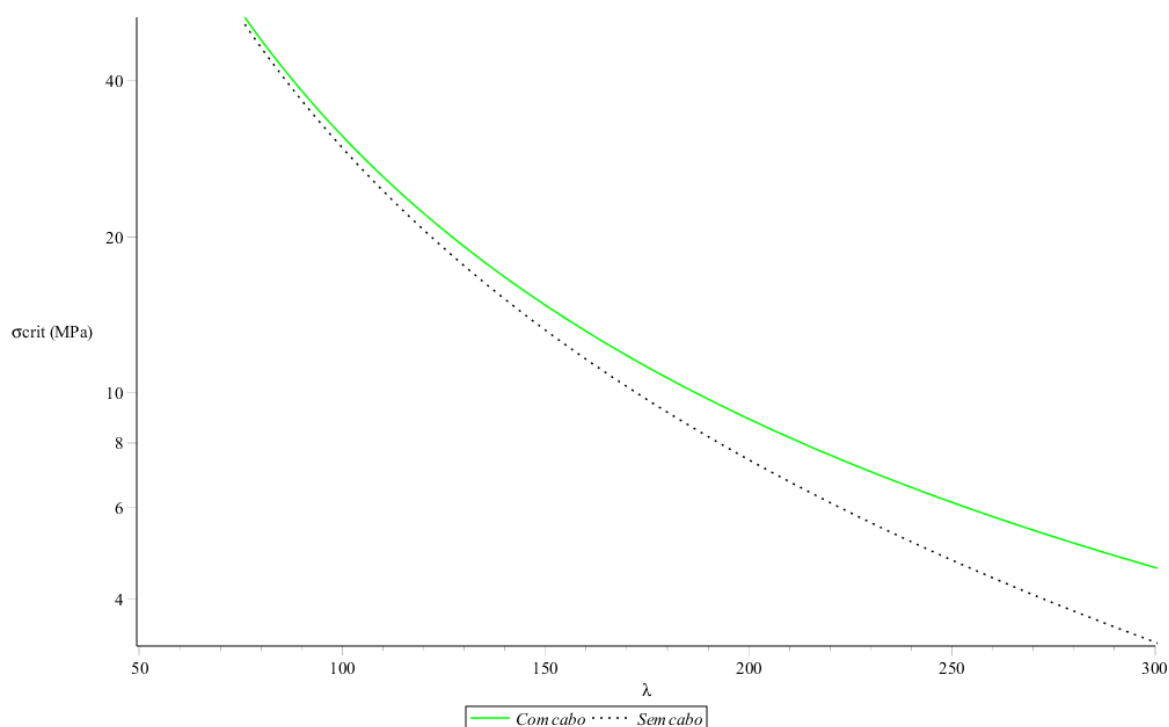


Figura 5 – Tensão crítica x índice de esbeltez com e sem presença de cabo

3.2.1 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE FIXAÇÃO DOS CABOS

Outro parâmetro avaliado foi a influência da posição de fixação dos cabos em relação à tensão crítica de flambagem. Os dados utilizados no item 3.2 foram novamente empregados, sendo mantidos o ângulo de ancoragem e a força de protensão, porém foram analisadas mais duas posições de fixação dos cabos ao pilar (Figura 6): uma em azul e linha contínua, que representa a fixação a três quartos da altura do pilar e uma em vermelho e linha contínua, que representa a fixação no topo do pilar.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos, podendo-se notar que a posição da fixação apresenta influência significativa em relação à tensão crítica de flambagem. Para um valor de esbeltez de 273 e admitindo-se um fator de segurança de 1.5, por exemplo, são obtidos valores de 2.66 MPa para o pilar sem cabo, 3.56 MPa para pilares com o cabo no meio de sua altura, de 5.42 MPa para fixação a três quartos da altura e de 8.76 MPa para o cabo fixado no topo do pilar. Isto é, a mudança da fixação do cabo da meia altura do pilar para o seu topo resultou em um aumento de 146.07% na tensão crítica de flambagem.

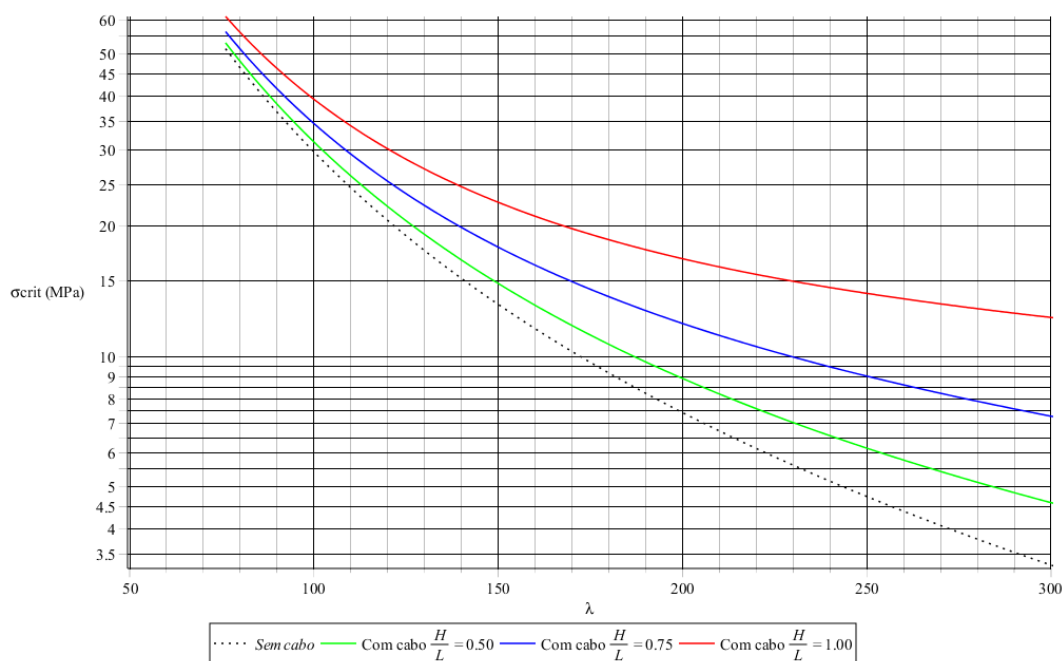


Figura 6 – Tensão crítica x índice de esbeltez em relação à posição de ancoragem do cabo

3.2.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ANCORAGEM

Avaliou-se, também o efeito do ângulo de ancoragem dos cabos na tensão crítica de flambagem obtida. Para essa avaliação, foi aplicada uma força de protensão de 15 kN para todos os casos, o cabo foi fixado no topo do pilar e foi avaliada a variação para os ângulos de ancoragem de 15, 30, 45, 60 e 75°.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos, podendo-se notar que o ângulo de ancoragem também apresenta efeitos significativos em relação à tensão crítica de flambagem. Conforme pode ser observado no gráfico, os melhores ângulos de ancoragem obtidos dentre os valores testados foram a 30 e a 45°. Para um valor de esbeltez de 273 e admitindo-se um fator de segurança de 1.5, por exemplo, são obtidos valores de 2.66 MPa para o pilar sem cabo, 6.91 MPa para fixação do cabo a 15°, 9.10 MPa para fixação do cabo a 30°, 8.76 MPa para fixação do cabo a 45°, 6.48 MPa para fixação do cabo a 60° e 3.82 MPa para fixação do cabo a 75°. A mudança da fixação do cabo de 45° para 30° resultou em um aumento de 3.88% na tensão crítica de flambagem. Comparando a situação do ângulo de fixação a 30° no topo do pilar com a situação de um pilar sem o cabo, observa-se um aumento de 242.11% na tensão crítica de flambagem, o que reforça a importância do ângulo e da altura de fixação.

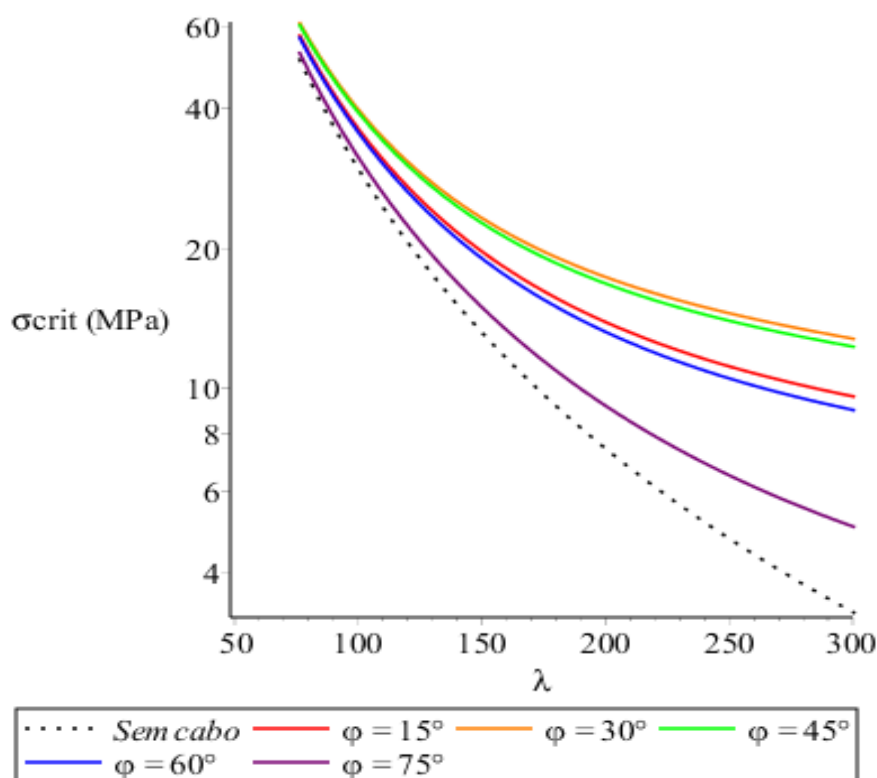


Figura 7 – Tensão crítica x índice de esbeltez em relação ao ângulo de ancoragem do cabo

3.2.3 EFEITO DA FORÇA DE PROTENSÃO

Avaliou-se, também o efeito da força de protensão dos cabos na tensão crítica de flambagem obtida. Para essa avaliação, o cabo foi fixado no topo do pilar, o ângulo de ancoragem foi fixado em 45° e foi avaliada a variação da força de protensão para valores de 10%, 30% e 50% da força de ruptura do cabo.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos, podendo-se observar que a presença de uma carga mínima já é suficiente para auxiliar na estabilização dos pilares e o incremento da força de protensão gera influências mínimas na tensão crítica de flambagem, o que é observável pela aparente sobreposição dos gráficos.

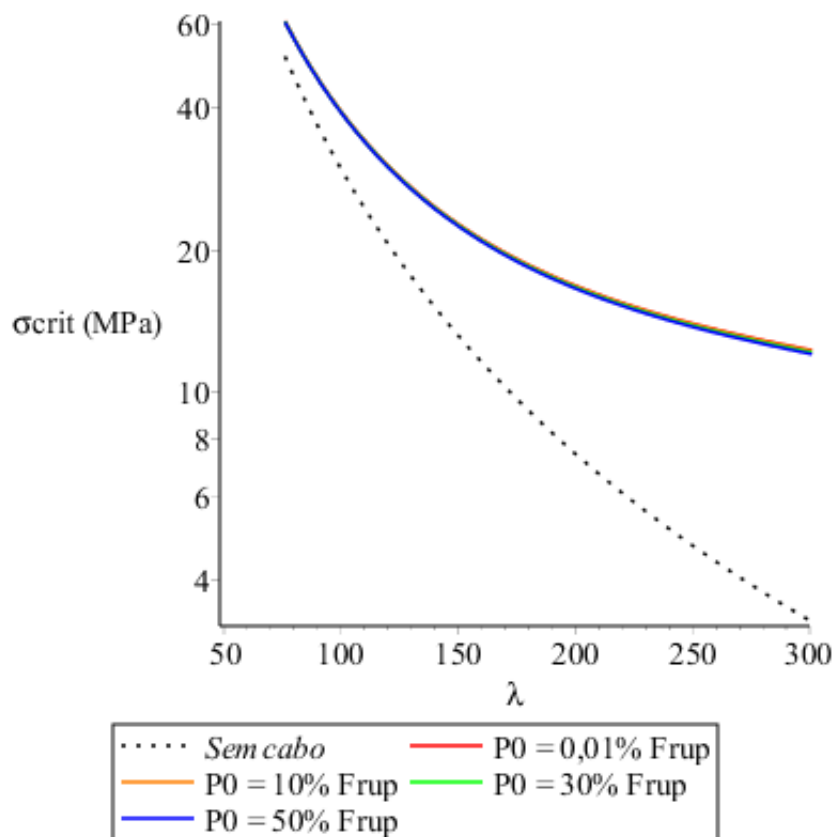


Figura 8 – Tensão crítica x índice de esbeltez em relação à força de protensão no cabo

3.3 ESTUDO DE CASO – PILAR COM SEÇÃO VARIÁVEL

A Tabela 1 mostra os resultados de carga crítica para o pilar de seção variável, cujos parâmetros foram apresentados Quadro 2. Foi avaliada a flambagem em torno do eixo de menor inércia para cada seção transversal do pilar.

Como previsto no modelo do pilar de seção constante, o peso próprio não influenciou de forma significativa na estabilidade do sistema, diferindo em 0.28% apenas.

A Tabela 2 apresenta os resultados da carga crítica de flambagem, bem como o ganho percentual de carga crítica em relação à situação sem a presença do cabo, para diversas variações de ângulos, força de protensão e posições de fixação dos cabos.

Tabela 1 – Carga crítica do pilar com seção variável

$\rho = 0 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$	
3226	kN	3217	kN

Tabela 2 – Carga crítica do pilar com seção variável – Avaliação Paramétrica – Sem peso próprio

$\rho = 0 \text{ kg/m}^3$													
Força de Protensão:		0.01% da Força de Ruptura		10% da Força de Ruptura		20% da Força de Ruptura		30% da Força de Ruptura		40% da Força de Ruptura		50% da Força de Ruptura	
Posição	Ângulo de Ancoragem	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)	Carga Crítica (kN)	Ganho de Carga (%)
Cabo na Mudança de Seção	15°	3584	11.10	3583	11.07	3582	11.04	3581	11.00	3581	11.00	3580	10.97
	30°	3750	16.24	3749	16.21	3747	16.15	3746	16.12	3744	16.06	3742	16.00
	45°	3725	15.47	3723	15.41	3720	15.31	3718	15.25	3716	15.19	3714	15.13
	60°	3551	10.07	3548	9.98	3545	9.89	3542	9.80	3539	9.70	3536	9.61
	75°	3330	3.22	3327	3.13	3323	3.01	3319	2.88	3315	2.76	3311	2.63
Cabo no Topo do Pilar	15°	6885	113.42	6876	113.14	6866	112.83	6856	112.52	6846	112.21	6836	111.90
	30°	8776	172.04	8757	171.45	8738	170.86	8718	170.24	8699	169.65	8680	169.06
	45°	8479	162.83	8453	162.03	8426	161.19	8399	160.35	8371	159.49	8344	158.65
	60°	6520	102.11	6487	101.08	6454	100.06	6421	99.04	6387	97.99	6354	96.96
	75°	4232	31.18	4195	30.04	4158	28.89	4121	27.74	4084	26.60	4047	25.45
Cabo no Topo e na Mudança de Seção	15°	7107	120.30	7097	119.99	7087	119.68	7077	119.37	7067	119.06	7057	118.75
	30°	8990	178.67	8971	178.08	8952	177.50	8932	176.88	8913	176.29	8894	175.70
	45°	8699	169.65	8672	168.82	8645	167.98	8618	167.14	8591	166.31	8564	165.47
	60°	6734	108.74	6701	107.72	6668	106.70	6634	105.64	6601	104.62	6568	103.60
	75°	4326	34.10	4289	32.95	4252	31.80	4215	30.66	4178	29.51	4141	28.36

Os resultados mantiveram o comportamento observado para o pilar de seção constante, sendo a posição de fixação do cabo e o ângulo de ancoragem as variáveis de maior influência no aumento da carga crítica, sendo observado aumentos que variaram de 3% a 179%. Esses valores de aumentos observados na carga crítica desse exemplo são inferiores aos valores obtidos no caso do pilar de seção constante, mesmo no caso de uso de apenas um cabo. Isso deve-se ao fato de que o aumento de seção do pilar gerou incremento significativo da carga crítica do pilar isolado, fazendo com que o ganho de carga obtido seja percentualmente inferior em relação à situação do pilar de seção constante. Em relação à força de protensão, é importante que ela exista com um valor mínimo apenas para manter o cabo tracionado,

sendo incrementos de força pouco impactantes e até mesmo negativos, pois reduz o aumento do valor da carga crítica devido à presença dos cabos.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise de estabilidade linear de pilares de concreto pré-moldado em fase construtiva. Por meio do método de Rayleigh-Ritz, foram obtidas as relações entre tensão crítica e esbeltez, realizando uma análise paramétrica em relação a fatores como a presença de estais, o ângulo de ancoragem, a posição de fixação do cabo no pilar e a força de protensão.

O efeito do uso de cabos como estais sobre a estabilidade da coluna foi verificado, mostrando-se forte influência da posição de fixação do cabo no pilar e do ângulo de ancoragem adotados para o ganho de carga crítica do pilar pré-moldado. Verificou-se que incrementos na força de protensão não geram efeitos significativos sobre os resultados.

Por ter sido feita uma análise em regime elástico linear, não foram verificadas diferenças significativas ao considerar o peso próprio como carga adicional. Outra limitação da abordagem realizada, foi a verificação e estabilização em relação a apenas um dos planos de flambagem.

Trabalhos futuros podem abordar a não-linearidade do problema, considerar a presença de imperfeições iniciais, estudar o efeito de cargas dinâmicas como o vento, bem como avaliar a necessidade de utilização de estais para estabilização do pilar na outra direção de flambagem.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro.

AUSTRALIAN SAFETY AND COMPENSATION COUNCIL (2008). National code of practice for precast, tilt-up and concrete elements in building construction., Barton, ACT: Commonwealth of Australia,

EL DEBS, M. K (2017). Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações, 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

MAST, R. F. Lateral stability of long prestressed concrete beams – Part 2. PCI JOURNAL, p. 70 – 88, 1993.

MOTA, J. E (2005). Projeto da estrutura pré-moldada de edifício do instituto do câncer do estado do Ceará. *In: 1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO*, São Carlos, São Paulo.

URGESSA, G. S. *et al* (2016). Stability of large reinforcing column cages during temporary construction conditions. Practice periodical on structural desing and construction, Vol. 21, n. 1, 2016.

ABSTRACT

The collapse of precast columns in constructive stages, although there aren't verification requirements in the current standards, may cause huge consequences in case of its occurrence. This article aims to evaluate the elastic stability of precast columns during constructive stages using the Rayleigh-Ritz method. It's also studied the contribution of the guy cables to the increase of the load capacity of the precast columns, as well as the effects that the angle of inclination of the guy cables, the position in which the guy cable is fixated and the prestress tension of the cables may cause to that load capacity. Curves relating the critical tension and the slenderness of columns with constant transversal area are plotted, evaluating the parameters that are being analyzed. Finally, a case study of a column with change of transversal section is performed, in which a parametric evaluation of the studied factors is also performed.

Keywords: Precast concrete, buckling, column stability

CONCLUSIONS

In this article, a linear stability analysis of precast columns in constructive stages was presented. Using the Rayleigh-Ritz method, the relations of the critical tension and the slenderness ratio were demonstrated, by the means of a parametric analysis regarding to factors as the guy-cable presence, the angle of the guy cables, the position in which the guy cable is fixated and the prestress tension of the cables.

The effect of the guy cables utilization was verified, being showed the strong influence that the fixation position of the cable and its angle has in the critical load increase of the precast column. It was also shown that the effects of increments in the prestress tension was not significant.

Because of the linear elastic hypothesis adopted in this paper, the self-weight of the column was negligible to the results obtained. Another restriction regarding the results presented is that the buckling was checked only in one buckling direction.

Further studies may want to approach the non-linearity to model this problem, consider initial imperfections, study the effects of dynamic loads on the column's stability or evaluate the need of using guy cables to stabilize the other direction of buckling.