

<http://dx.doi.org/10.15202/25254146.2017v2n2p59>

MODELAGEM NUMÉRICA E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE COLUNAS DE AÇO ESTAIADAS E PROTENDIDAS COM VARIAÇÕES NO COMPRIMENTO DOS BRAÇOS

Caio César Costa dos Santos

Engenheiro Civil pelo CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
dos-caio@hotmail.com

Ricardo Rodrigues de Araujo

Doutor em Engenharia Civil pela PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Professor do CEFET/RJ
araujo.r.r@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste presente artigo é realizar modelagens numéricas e análises paramétricas, através do software *Ansys*, referentes a um caso de um sistema estrutural composto por um tubo de aço, para a coluna central, e tubos de aço com menor diâmetro para as barras perpendiculares à coluna central e estais protendidos ligando as extremidades da coluna de aço e barras. Esses modelos e análises são direcionados ao estudo da influência das alterações geométricas, como comprimentos das barras e inclinações dos estais protendidos nos valores de resultados teóricos de carga crítica, deslocamentos horizontais e flambagem de coluna. Veremos ser possível obter um aumento considerável no valor de carga crítica a partir do momento em que aumentamos o comprimento das barras perpendiculares a coluna. Verifica-se que, a partir de determinado aumento no comprimento das barras, a coluna principal passa se comportar com dupla curvatura, onde os deslocamentos horizontais a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento da coluna são maiores do que a $\frac{1}{2}$ da coluna.

Palavras-chave: Elementos finitos. Coluna de aço. Flambagem.

NUMERICAL MODELING AND COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN PRESTRESSED STAYED STEEL COLUMNS WITH ARMS VARIATIONS

ABSTRACT

The objective of this article is to perform modeling and parametric analysis, through the *Ansys* software, referring to a case of a structural system composed of a steel tube, for the central column, and tubes of Steel with smaller diameter for the arms perpendicular to the central column and prestressing stays connecting the ends of the steel column and arms. These models and analyzes are directed to the study of the influence of the geometric changes, such as arm lengths and inclinations of the prestressed stays in the theoretical values of critical load, horizontal displacements and column buckling. We will see that it is possible to obtain a considerable increase in the critical load value from the moment we increase the length of the arms perpendicular to the column. It is verified that, from a certain increase in the length of the arms, the main column behaves with double curvature,

where the horizontal displacements at $\frac{1}{4}$ and $\frac{3}{4}$ of the length of the column are greater than $\frac{1}{2}$ of the column.

Keywords: Finites Elements. Steel column. Buckling.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Hibbeler (2010), colunas são elementos estruturais compridos e esbeltos sujeitos a uma força de compressão axial e essa carga pode ser grande o suficiente para provocar uma deflexão ou uma oscilação lateral. Essa deflexão lateral é chamada de flambagem.

Nas colunas de aço esbeltas, o uso de sistemas de protensão por estais, reduzem o efeito causado por essa deflexão lateral, tornando-o uma solução a tal problema. Esta solução pode reduzir eficientemente o seu comprimento de flambagem. Atualmente, estudos estão sendo feitos a partir dessa temática. Diferentes autores vêm pesquisando e desenvolvendo métodos de sistemas estruturais com colunas para um melhor aproveitamento da capacidade de carga desses elementos, entre eles Belenya, 1977; Saito, 2007, 2009; Voevodin, 1970; Wong et al, 1979; Araujo et al, 2005, 2009; Almeida, 2014. Um exemplo da aplicação deste sistema estrutural foi durante a montagem do Palco Mundo do Rock in Rio em 2011, onde foram utilizadas como escoramento da estrutura (Figura 1).

Figura 1 – Palco Mundo do Rock in Rio 2001, em construção



Fonte: Araujo (2005)

Este fato motivou um estudo detalhando o comportamento do sistema estrutural composto por um tubo para a coluna central e tubos de menor diâmetro para as barras perpendiculares e estais protendidos ligando as extremidades da coluna de aço e das barras, isto é, uma coluna de aço esbelta protendida e estaiada (Figura 2), com variações no comprimento das barras

perpendiculares e, conseqüentemente, na inclinação dos estais protendidos, além da protensão aplicada nos estais, fatores que influenciam nos valores de capacidade de carga e também no modo de flambagem da coluna.

O carregamento foi introduzido no sistema por uma carga concentrada posicionada no topo da coluna, que possui um comprimento de 12 m. Neste estudo paramétrico, foram modeladas colunas com a inclinação de estais de 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 12%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100%.

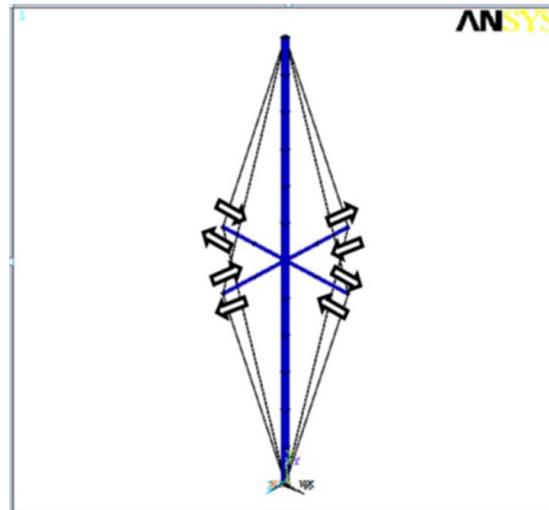
2 MODELAGEM NUMÉRICA

Para a constituição do modelo numérico, a modelagem foi feita da seguinte maneira: a coluna principal possui a altura de 12000 mm, diâmetro externo 89,3 mm e espessura de 3,2 mm; os braços possuem o comprimento variável (a definição do valor do comprimento é alvo de estudo, portanto, varia a cada modelagem feita) e um diâmetro externo possui 42,6 mm e espessura 3,0 mm; para os estais o diâmetro tem 6,35 mm, deformação inicial variável (de acordo com cada protensão aplicada), inclinação variável (o valor, em porcentagem, da inclinação de cada estai é diretamente ligado ao comprimento dos barras, logo, ela também varia de acordo com cada modelagem feita). Foi adotada como imperfeição inicial o valor de 8 mm (Figura 2).

Sobre o processo de parametrização do modelo criado, é possível alterar suas propriedades de material, o tipo de elemento de simulação, as propriedades geométricas, inclusive, o valor da imperfeição inicial, a quantidade de curvaturas de imperfeições iniciais, a quantidade de barras e estais, a altura da coluna, a quantidade e tamanho dos elementos e a inclinação dos estais.

Dois tipos de materiais foram usados na análise paramétrica. O primeiro foi usado para a coluna central e as barras secundárias com 205000 MPa de módulo de elasticidade e 20500 MPa de módulo tangente, coeficiente de Poisson a 0,3, tensão de escoamento de 380 MPa. O segundo tipo usado para os cabos com 100000 MPa de módulo de elasticidade e 10000 MPa de módulo tangente, coeficiente de Poisson a 0,3, tensão de escoamento de 750 MPa. O elemento utilizado para a simulação da coluna e das barras foi o PIPE 20, já utilizado por Araujo (2005 e 2009). O PIPE 20 é um elemento uniaxial com capacidade de compressão, de tensão, flexão e torção. O elemento tem seis graus de liberdade em cada nó. Para a representação dos estais, foi utilizado o elemento LINK 10. Este elemento apresenta características que permitem a simulação de elementos tridimensionais com três graus de liberdade em cada nó, podendo assim ser utilizado para a simulação de cabos.

Figura 2 – Modelo de coluna estaiada e protendida. As setas indicam a variação do comprimento das barras, o que influencia na capacidade de carga da coluna



Fonte: (O autor, 2017)

Como sugerido por Araujo (2005) e (2009), para que a aplicação da carga ocorra de maneira regulada durante a fase não linear, próximo à carga crítica (P_{cr}) de flambagem, estipulou-se que a ela fosse aplicada por meio de um deslocamento na direção y no ponto de extremidade superior da coluna.

Então, através do traçado de uma curva (carga P versus deslocamento d) foi possível atingir a carga crítica de flambagem e seu respectivo deslocamento máximo (ALMEIDA 2011). A aplicação de cargas nesta etapa foi realizada em um primeiro momento pelo GUI (*Graphical User Interface*) do ANSYS® (2016) e, posteriormente, foi introduzida à rotina de programação APDL.

A partir deste estudo, nos interessa destacar os resultados referentes aos seguintes comportamentos para colunas com diversas inclinações de estais:

- carga crítica das diferentes colunas;
- carga x protensão;
- carga x deslocamento horizontal dos nós a $\frac{1}{4}$ da coluna;
- carga x deslocamento horizontal dos nós a $\frac{1}{2}$ da coluna.

3 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Este presente capítulo tem por objetivo descrever a análise paramétrica que examina o comportamento estrutural das colunas de aço estaiadas e protendidas, assim como comparar o desempenho de carga e deslocamentos na coluna de aço e força nos braços e estais entre elas.

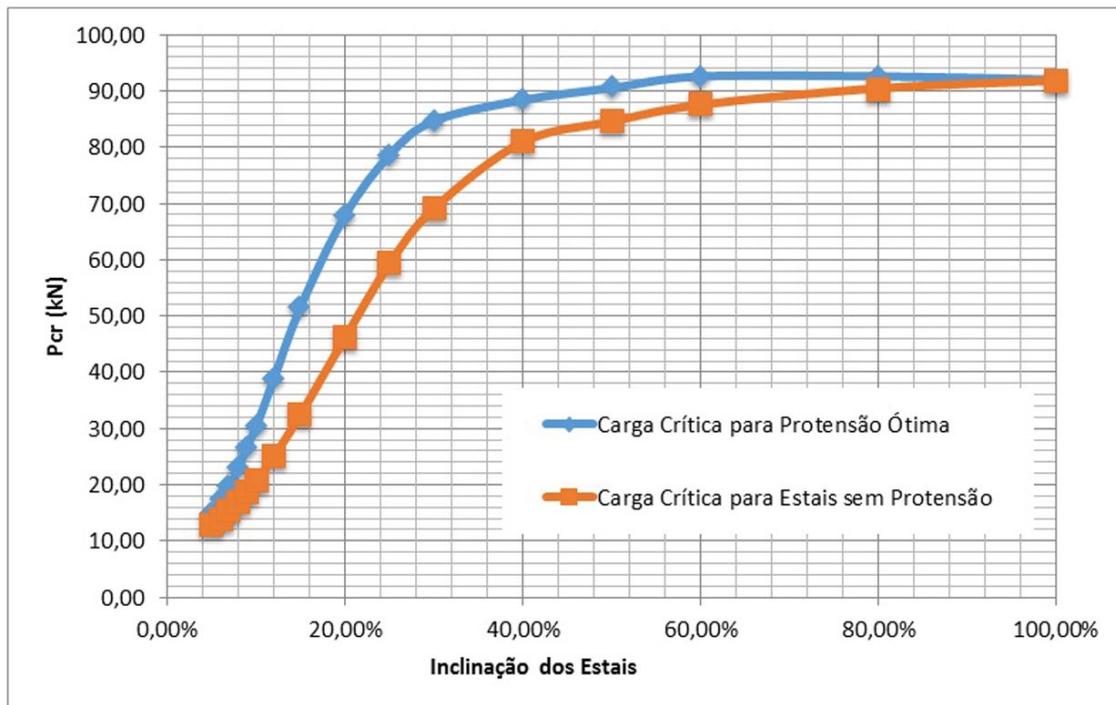
A análise paramétrica do presente trabalho é baseada nos dados geométricos utilizados por Araujo (2005), (2009). As colunas foram modeladas com imperfeição inicial de 8 mm, a mesma utilizada no modelo experimental de Araujo (2005). Quanto aos níveis de protensões, foram feitos 6 para cada modelo, e ainda um modelo com cabo esticado, sem protensão. Ao todo foram gerados 112 modelos.

Para a análise paramétrica determinou-se a melhor protensão em função da força de protensão ótima. Entende-se como força de protensão ótima a protensão onde há a maior carga crítica de flambagem dentre todas as cargas determinadas em cada protensão para esta coluna com o dado valor de inclinação de estai.

3.1 Análise dos resultados

Neste item são descritos os resultados alcançados das análises considerando os dezesseis comprimentos de braços (300 mm, 360 mm, 420 mm, 480 mm, 540 mm, 600 mm, 720 mm, 900 mm, 1200 mm, 1500 mm, 1800 mm, 2400 mm, 3000 mm, 3600 mm, 4800 mm e 6000 mm) e os diferentes níveis de protensão para que fosse obtida a carga crítica ótima para a coluna de aço. A Figura 3 apresenta o gráfico de variação da carga crítica para cada coluna, fazendo uma comparação entre os valores de P_{cr} para protensão ótima e estais sem protensão. Através deste gráfico é possível observar que o aumento da carga crítica acontece de acordo com o aumento da inclinação dos estais, além disso, a escolha da protensão ótima influencia o valor de carga crítica para cada inclinação de estai.

Figura 3 - Carga versus inclinação dos estais; força de protensão de 0,0 kN e protensão ótima



Fonte: (O autor, 2017)

A Tabela 1 demonstra, em valores, a relação entre a carga crítica e o comprimento dos braços e a variação, em porcentagem, de carga crítica em relação à carga crítica da coluna com inclinação de estais imediatamente de menor valor.

A partir da análise da Tabela 1 é possível perceber que a relação carga crítica/comprimento dos braços passa a sofrer uma queda constante a partir da coluna de inclinação dos estais de 20%

e a variação de aumento de carga crítica em função da carga crítica anterior se torna pequena a partir da inclinação de estais de 40% e comprimento dos braços 2,4 m (o valor passa a ser 4,4%).

Tabela 1 - Relação carga crítica de flambagem/comprimento dos braços

Comprimento dos Braços (m)	Inclinação dos estais	Carga Crítica para melhor protensão (kN)	Variação da carga crítica	Relação Carga Crítica/ Comprimento dos Braços
0,3	5%	14,96	-	49,87
0,4	6%	17,20	15,0%	47,78
0,4	7%	19,77	14,9%	47,07
0,5	8%	23,06	16,6%	48,05
0,5	9%	26,79	16,2%	49,62
0,6	10%	30,36	13,3%	50,6
0,7	12%	38,85	28,0%	53,96
0,9	15%	51,64	32,9%	57,38
1,2	20%	67,91	31,5%	56,59
1,5	25%	78,61	15,8%	52,41
1,8	30%	84,7	7,7%	47,05
2,4	40%	88,42	4,4%	36,84
3,0	50%	90,56	2,4%	30,19
3,6	60%	92,59	2,2%	25,72
4,8	80%	92,63	0,0%	19,3
6,0	100%	92,02	-0,7%	15,34

Fonte: (O autor, 2017)

A Tabela 2 demonstra os valores estipulados do coeficiente de flambagem (k) para as colunas modeladas.

Neste caso, é possível observar que, à medida que o valor da inclinação dos estais aumenta, seu comprimento de flambagem diminui ao ponto de chegar até 0,69.

As Figura 4 e Figura 5 mostram os deslocamentos na direção x da coluna à $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$, respectivamente, da altura da coluna para todas as 16 diferentes inclinações de estais, com a deformação inicial (ϵ): 0,00001 e força de protensão de 0,02 kN.

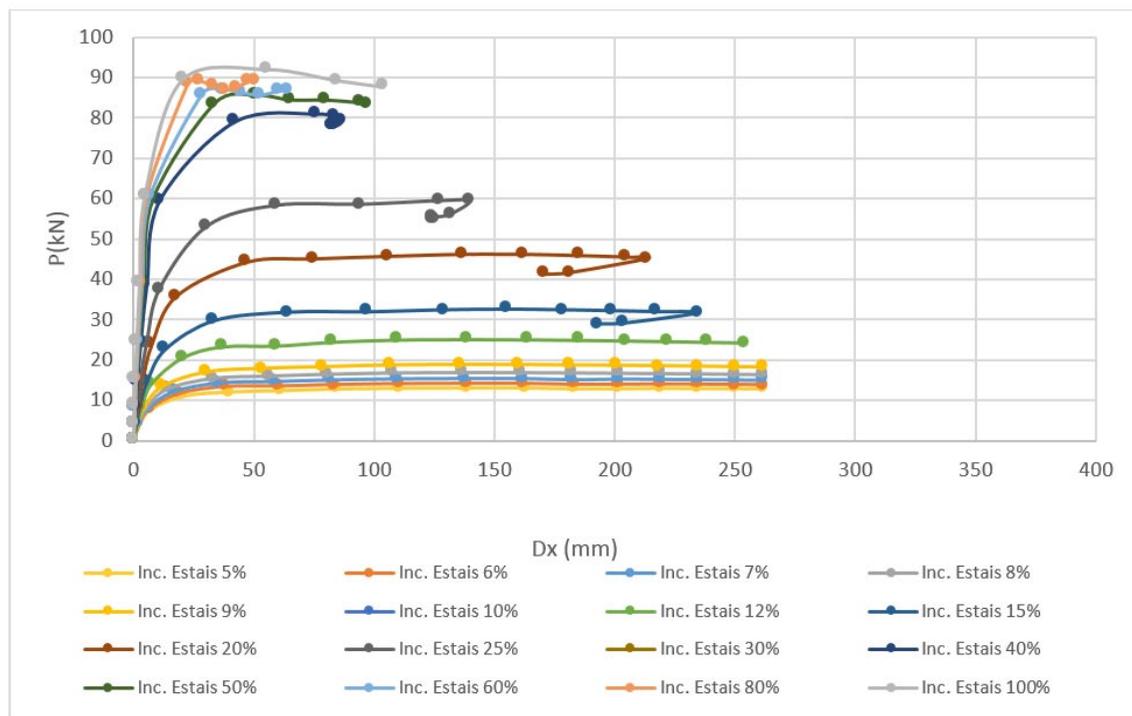
Uma observação a ser feita é que na coluna de inclinação dos estais de 25%, o deslocamento horizontal a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ da altura da coluna é maior do o deslocamento horizontal a $\frac{1}{2}$ da altura da coluna, e isso ocorre não somente para a protensão 0,02 kN, mas também para todas as outras protensões, e ainda quando não há protensão.

Tabela 2 - Determinação do coeficiente de flambagem (k) para as colunas modeladas

Coluna com inclinação dos estais de:	Pcr (kN) (estais sem protensão)	Cálculo de k	Protensão ótima (kN)	Pcr (kN)	Cálculo de k	Varição de Pcr
5%	12,94	1,84	2,35	14,96	1,72	7%
6%	14,08	1,77	1,57	17,20	1,60	10%
7%	15,44	1,69	3,14	19,77	1,49	12%
8%	17,00	1,61	1,57	23,06	1,38	14%
9%	18,75	1,53	2,35	26,79	1,28	16%
10%	20,68	1,46	2,35	30,36	1,20	17%
12%	25,05	1,33	2,35	38,85	1,06	20%
15%	32,53	1,16	3,14	51,64	0,92	21%
20%	46,16	0,98	3,14	67,91	0,81	18%
25%	59,29	0,86	2,35	78,61	0,75	13%
30%	69,12	0,80	1,57	84,70	0,72	10%
40%	80,97	0,74	2,35	88,42	0,71	4%
50%	84,60	0,72	1,57	90,56	0,70	3%
60%	87,57	0,71	1,57	92,59	0,69	3%
80%	90,50	0,70	1,57	92,63	0,69	1%
100%	91,88	0,69	0,02	92,02	0,69	0%

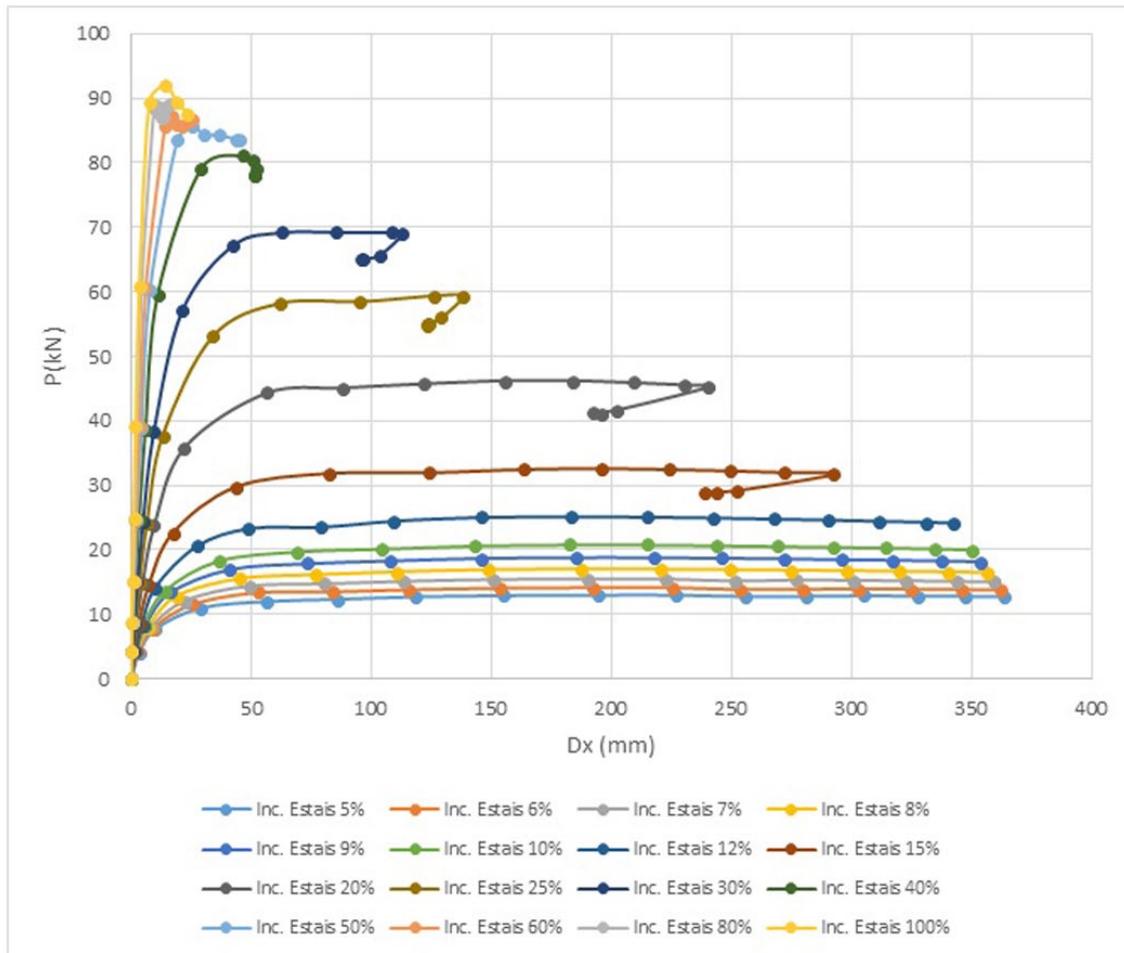
Fonte: (O autor, 2017)

Figura 4 - Carga versus deslocamento horizontal a ¼ da altura da coluna



Fonte: (O autor, 2017)

Figura 5 - Carga versus deslocamento horizontal a ½ da altura da coluna



Fonte: (O autor, 2017)

A Tabela 3 identifica os valores de deslocamentos máximos encontrados na modelagem das colunas sem protensão a ¼ e ½ da altura da coluna e o gráfico da Figura 6 demonstra esses dados de maneira clara. As Figura 7 e Figura 8 mostram um esquema sobre o comportamento de flambagem entre as colunas.

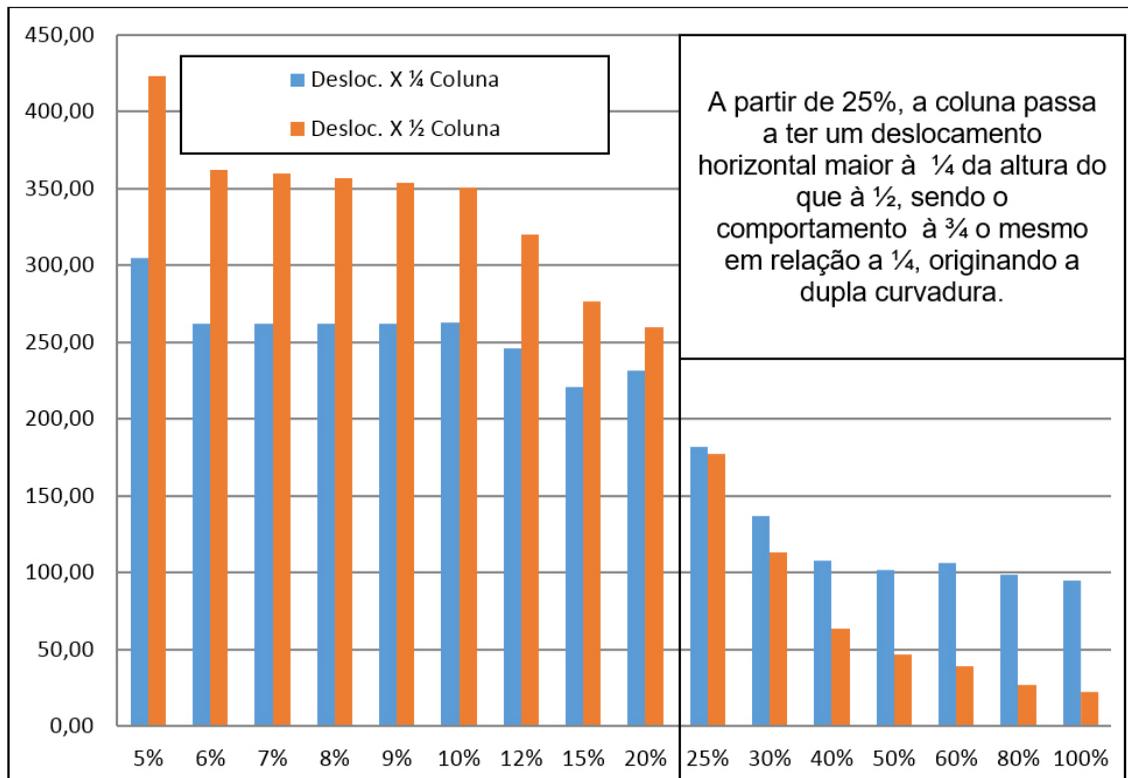
Com a análise de todos os resultados encontrados, considerando cada inclinação de estais e forças de protensão aplicadas, é possível elaborar o gráfico de dispersão que correlaciona as protensões aplicadas às cargas críticas de todas as colunas (Figura 9) e variações de capacidade de carga para as diferentes colunas e protensões.

Tabela 3 – Deslocamentos horizontais das colunas sem protensão

Inclinação dos Estais	Desloc. X ¼ Coluna (mm)	Desloc. X ½ Coluna (mm)
5%	304,66	423,12
6%	261,94	361,84
7%	262,06	359,40
8%	262,20	356,66
9%	262,33	353,57
10%	262,51	350,19
12%	245,63	320,34
15%	221,00	276,12
20%	231,70	259,60
25%	182,06	177,51
30%	136,99	113,32
40%	107,57	63,68
50%	102,07	46,44
60%	106,54	38,81
80%	98,53	26,89
100%	94,73	21,98

Fonte: (O autor, 2017)

Figura 6 – Deslocamentos horizontais à ¼ e ½ de altura da coluna, sem protensão



Fonte: (O autor, 2017)

Figura 7 – Coluna com curvatura simples para inclinação de estais de 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 12%, 15% e 20%

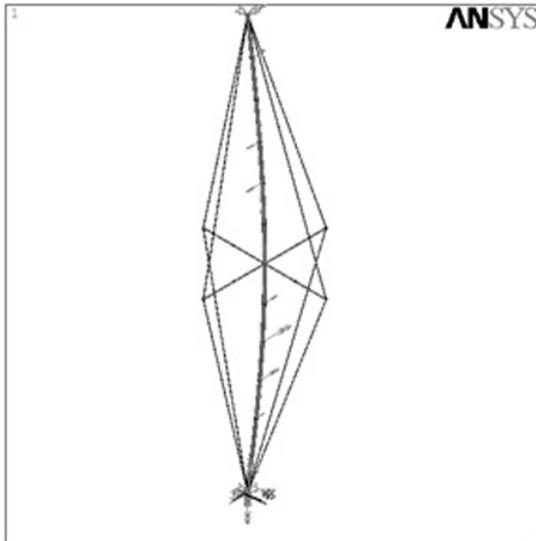
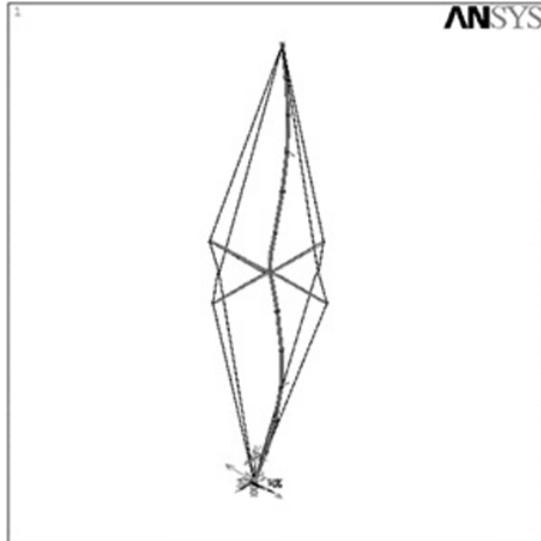
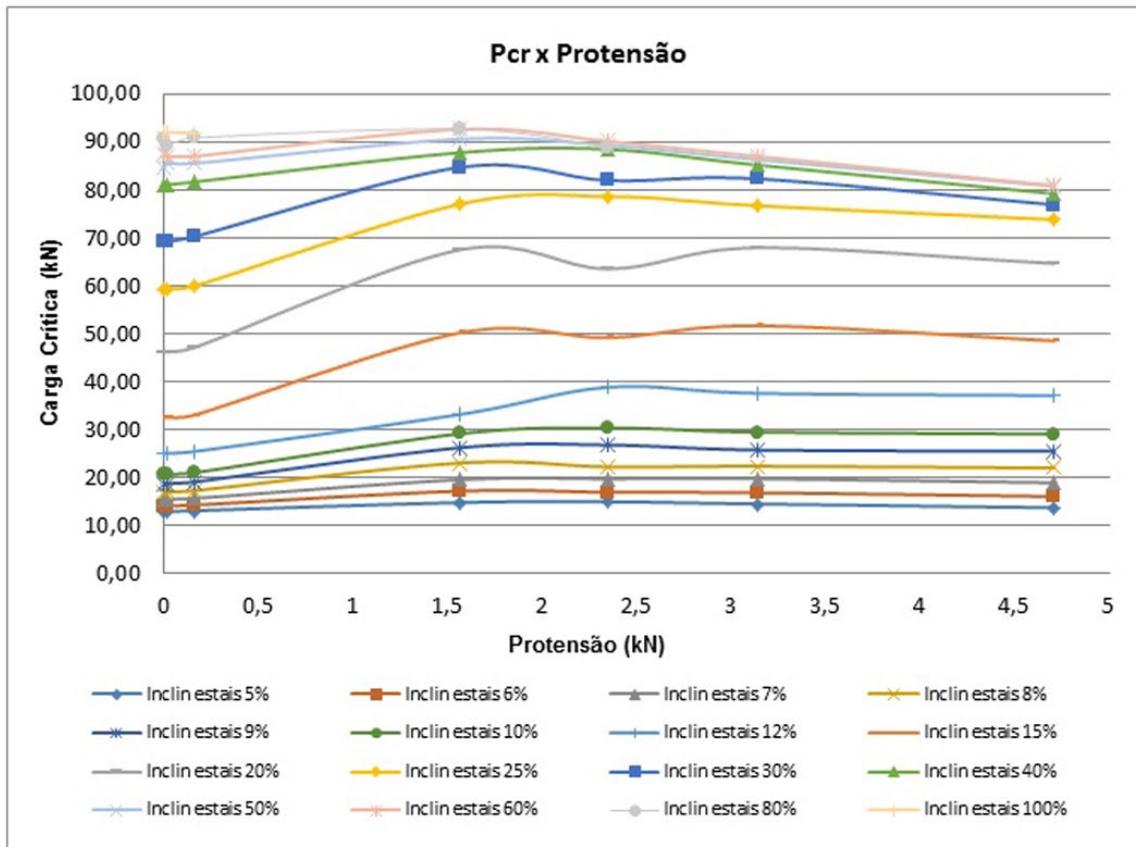


Figura 8 - Coluna com dupla curvatura para inclinação dos estais 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100%



Fonte: (O autor, 2017)

Figura 9 - Relação carga crítica versus força de protensão



Fonte: (O autor, 2017)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento estrutural teórico de colunas de aço esbeltas, estaiadas e protendidas com diferentes comprimentos de braços perpendiculares e inclinação de estais. Os estudos realizados permitiram extrair as conclusões que se encontram no presente capítulo.

- Verificou-se que a direção em que é considerada a imperfeição geométrica sofre uma influência significativa nos resultados. Observou-se que na consideração de uma imperfeição horizontal, há os maiores deslocamentos, assim como havia sido observado por Araujo (2005) e Almeida (2014);

- Conclui-se também que a partir do aumento do comprimento das barras é possível obter uma diminuição no seu coeficiente de flambagem e aumento considerável de carga crítica. Porém é possível perceber que a relação de carga crítica/comprimento dos braços sofre uma diminuição quando a inclinação dos estais chega a 20% e a variação de aumento de carga crítica em função da carga crítica anterior sofre queda a partir da inclinação 40%.

- Foi possível perceber na análise de deslocamentos horizontais que as colunas com inclinação dos estais de 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 12%, 15% e 20% sofrem flambagem de curvatura simples e as colunas com 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100% de inclinação dos estais há dupla curvatura, pois os deslocamentos em $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento da coluna são maiores que em $\frac{1}{2}$ da coluna.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Samuel Ribeiro de; VELLASCO, Pedro Colmar Gonçalves da Silva; ARAUJO, Ricardo Rodrigues de. **Modelagem Computacional de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas**. In, 32º Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (CILAMCE). Ouro Preto, 2011.

ALMEIDA, Samuel Ribeiro de. **Modelagem Numérica de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas**. Projeto de Graduação; Depto de Estruturas e Fundações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Rio de Janeiro, 2014.

ANSYS® *Academic Research, Release 16.2* (www.ansys.com), 2016.

ARAUJO, Ricardo Rodrigues de. **Estudo teórico-experimental de colunas de aço estaiadas e protendidas**. Msc Dissertação, CIV-PUC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ARAUJO, Ricardo Rodrigues de. **Estudo do Comportamento Estrutural de Colunas de Aço Estaiadas e Protendidas**. DSc Tese, CIV-PUC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BELENYA, E.; **Prestressed load-bearing metal structures, English Translation.** MIR Publishers. Moscow, 1977.

HIBBELER, R. C. Resistência Dos Materiais - 7ª Ed. Editora Pearson, p.477 – 518. 2010

SAITO, Daisuke; WADEE, M. Ahmer. **Buckling behavior of prestressed steel stayed columns with imperfections and stressed limitation**, Engineering Structures, Elsevier, 31, 1-15, 2009.

SAITO, Daisuke; WADEE, M. Ahmer., **Post-buckling behaviour of prestressed steel stayed columns.** **Eng. Struct.**, 30 doi: 10.1016/j.engstruct, 2007.

VOEVODIN, A. A.; **Ustoichivost predvritelno-napryazhennoy shprengelnoy stoiki (Stability of a Prestressed Trussed Column)**, Trudy NIIR, Rússia, 1970.

WONG, K. C.; Temple, M. C.; **Stayed column with initial imperfection.** Journal of the Structural Division, ASCE, 105(2), 359-375, 1979.