Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Danielle Malvaris Ribeiro

Comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas

Rio de Janeiro
2016

Danielle Malvaris Ribeiro

Comportamento Estrutural de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Prof. Ricardo Rodrigues de Araújo

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R484 Ribeiro, Danielle Malvaris.
Comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas / Danielle Malvaris Ribeiro. – 2016.
138f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, Ricardo Rodrigues de Araújo, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Aço - Estruturas - Dissertações. 3 Colunas metalicas - Dissertações. 4. Comportamento estrutural - Dissertações. I. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. II. Araújo, Ricaro Rodrigues de. III. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.04

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura _____ Data _____

Danielle Malvaris Ribeiro

Comportamento Estrutural de colunas de aço inox estaiadas e protendidas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 29 de abril de 2016.

Banca Examinadora:

_____

Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD. (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Ricardo Rodrigues de Araujo, D.Sc (Orientador)

Departamento de Engenharia Civil CEFET/RJ

_____

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, D.Sc. (Orientador)

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

André Techni da Silva, D.Sc.

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Sebastião Arthur Lopes de Andrade, PhD

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial meus avós Izidoro Ribeiro *(“in memorian”)* e Eunice Malvaris Ribeiro *(“in memorian”)*, que a todo momento me incentivavam profissionalmente e vibravam a cada conquista minha. Por mais difícil que tenha sido a caminhada, nunca pensei em decepcioná-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, dar-me forças e por colocar pessoas especiais no meu caminho nesta fase da minha vida.

À minha família: minha referência, meu alicerce e minha maior torcida. Agradeço todo amor, carinho e dedicação. Vejo a esperança em seus olhos em cada recomeço meu, certa de que acreditam nos meus sonhos.

Às minhas afilhadas, pela alegria que me proporcionam. É o amor da forma mais pura que já conheci.

Em meio a um período relativamente difícil, tive a grata surpresa de encontrar uma pessoa maravilhosa, que tornou minha caminhada mais suave e meus dias mais alegres. A você, meu amigo e companheiro, agradeço pelo amor, paciência e dedicação, além do interesse e grande incentivo na minha carreira.

Aos amigos, agradeço a compreensão pela minha ausência em tantos momentos, em prol de um sonho, uma conquista.

Aos meus chefes e colegas de trabalho, pelo apoio e incentivo, cientes do quanto é importante para mim a obtenção deste título. Muitas vezes tive que abdicar de tempo de trabalho para me dedicar a estes estudos. Agradeço a compreensão de todos.

A esta universidade, seu corpo docente e administração, por todo apoio ao longo do curso. Foi um grande prazer retornar à universidade na qual cursei minha graduação e retomar contato com ilustres mestres.

Aos meus colegas de Mestrado, em especial as queridas Isabella Gueiros, Raphaella Araújo e Luciana Pedreira, pelo companheirismo e apoio, quando necessário.

Aos meus orientadores, Prof. Pedro Vellasco, Prof. Luciano Lima e Prof. Ricardo Araújo, pela paciência, por toda a ajuda e compreensão demonstrada ao longo destes anos. Vocês são exemplos que pretendo seguir.

E finalmente a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha trajetória. Seja na minha vida pessoal ou na profissional, todos que passaram, de uma certa forma, contribuíram para minha formação.

“A nobreza do homem está em sentir gratidão pelas graças recebidas e gravá-las em seu coração” (Meishu-Sama). Gratidão eterna a todos vocês.

Não importa onde você parou...
Em que momento da vida você cansou...
O que importa é que sempre é possível e necessário recomeçar.
Recomeçar é dar uma nova chance a si mesmo...
É renovar as esperanças na vida e o mais importante:
Acreditar em você novamente.

Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

RIBEIRO, Danielle Malvaris. *Comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas.* 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

A utilização de sistemas de colunas de aço estaiadas e protendidas na construção civil tem despertado grande interesse de pesquisadores devido a sua leveza, capacidade portante de carga e agilidade no processo de montagem de estruturas, substituindo equipamentos de içamento e escoramento, proporcionando também economia no processo de montagem de estruturas. Até então, estes estudos têm sido focados em colunas de aço carbono. Visando agregar informações a estas pesquisas, o presente trabalho tem a intenção de analisar o comportamento estrutural das colunas, estudando os aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e duplex. Desenvolveu-se modelos numéricos no programa Ansys, baseado no método dos elementos finitos, a fim de determinar a carga crítica de flambagem e o nível de protensão ótima para as colunas em cada tipo de aço. Verificou-se que a resistência a flambagem das colunas aumenta substancialmente quando submetida a protensão. Foi determinado o nível de protensão ótima e verificada a influência da imperfeição inicial da coluna nos resultados das cargas críticas para os aços inoxidáveis e para o aço carbono. Com base nos resultados alcançados, constatou-se que os aços inoxidáveis estudados apresentam um comportamento semelhante ao aço carbono quanto a resistência mecânica, tendo como principal vantagem a resistência a corrosão.

Palavras-chave: Estruturas em aço inoxidável; Colunas de aço estaiadas protendidas.

ABSTRACT

RIBEIRO, Danielle Malvaris. *Structural behavior of prestressed stainless steel stayed columns*. 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The use of prestressed steel stayed columns systems in construction has aroused great interest of researchers due to its light weight, load bearing capacity and flexibility in the structures of the assembly process, replacing lifting and shoring equipment, also providing savings in the process structures assembly. Until then, these studies have been focused on carbon steel columns. In order to add information to this research, this study intends to analyze the structural behavior of columns, studying the austenitic stainless steels, ferritic and duplex. Developed numerical models in Ansys program, based on the finite element method in order to determine the critical load of buckling and the level of optimal prestressing for the columns on each type of steel. It was found that the resistance to buckling of the columns increases substantially when subjected to prestressing. It was determined the level of optimal prestressing and verified the influence of initial imperfection of the column in the results of critical loads for stainless steel and carbon steel. Based on the results, it was found that the studied stainless steels have a behavior similar to carbon steel as the mechanical strength, the main advantage of corrosion resistance.

Keywords: Stainless steel structures; Prestressed steel stayed columns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Chrysler Building em Nova Iorque, com espiral de aço inox [1]. 21
Figura 2 - Arco La Dèfense, em Paris, na França [2]. 22
Figura 3 - Ponte de Millau na França [4]. 23
Figura 4 - Ponte do Saber no Rio de Janeiro [5]. 24
Figura 5 - Montagem do Palco Mundo do Rock in Rio III [6] [7] [8]. 24
Figura 6 - Fachada do Edifício do Chiswick Park – Londres [9]. 25
Figura 7 - Curvas tensão *versus* deformação do aço carbono e aço inoxidável [13].26
Figura 8 – Gráfico tensão *versus* deformação de aço carbono e aço inoxidável [13]. 27
Figura 9 – Comportamento de aços carbono e inoxidável [13]. 28
Figura 10 – Composição dos diferentes tipos de aço inoxidável [13].....29
Figura 11 – Palco Mundo do Rock in Rio III na fase final de construção [6] [7].....33
Figura 12 – Coluna de aço estaiada utilizada como suporte temporário para a construção do Palco Mundo do Rock in Rio III [6] [7].....33
Figura 13 - Modelo de coluna de aço estaiada e protendida [6].....34
Figura 14 – Visão global da coluna em corte [6]. 34
Figura 15 - Cálculo da estabilidade de uma coluna de n painéis protendida estaiada. (a) Sistema estrutural; (b) Sistema para cálculo; (c) Primeiro modo de flambagem; (d) Segundo modo de flambagem [6] [7]. 39
Figura 16 – (a) Coluna estaiada protendida de dois painéis bi-rotulada; (b) Primeiro modo de flambagem. (c) Segundo modo de flambagem [6],[7].....40
Figura 17 – Ensaio bidimensional da coluna estaiada protendida com dois painéis [6] [7]. 41
Figura 18 - Comparação entre a carga de flambagem teórica e experimental da coluna de aço estaiada protendida [6],[7]. 42
Figura 19 – Efeito da imperfeição inicial na coluna estaiada e seus modos de flambagem [6] [7].....43
Figura 20 – Carga de flambagem teórica e experimental *versus* a protensão inicial [6] [7]. 44
Figura 21 – Aplicação do modelo para imperfeição inicial da coluna [25]. 45
Figura 22 – Imperfeições iniciais. a) Tipo I, b) Tipo II [25].....46

Figura 23 – Gráfico da deformação lateral pela carga total de protensão [21]. 46
Figura 24 – Gráfico do deslocamento axial pela força de protensão [25]. 47
Figura 25 – Gráfico da relação entre a carga de flambagem e a protensão inicial [25]. 47
Figura 26 – Modelo de restrição da coluna [7]. 48
Figura 27 – Modos de flambagem para as diversas colunas estaiadas estudadas [7]. 49
Figura 28 – Efeito do ângulo de abertura entre os braços [7]. 49
Figura 29 – Modos de flambagem da coluna: simétrico e assimétrico [6] [7]. 51
Figura 30 – Tipos de flambagem no modo 2 [6] [7]. 51
Figura 31 – Variação no comprimento dos braços [6] [7]. 52
Figura 32 – Variação do diâmetro dos estais [6] [7]. 52
Figura 33 – Variação do módulo de elasticidade dos estais [6] [7]. 52
Figura 34 - Carga crítica de flambagem versus protensão inicial para o modo 1 [6] [7]. 53
Figura 35 – Carga crítica de flambagem versus protensão inicial para o modo 2 [6] [7]. 53
Figura 36 - Gráficos comparativos para o modo 1 entre o modelo analítico e o modelo numérico [6] [7]. 54
Figura 37 – Gráficos comparativos para o modo 2 entre o modelo analítico e o modelo numérico [6] [7]. 54
Figura 38 – Ensaio da coluna de Araujo [6] [7]. 56
Figura 39 – Procedimento de cálculo da carga admissível estabelecido por Wadee [29] 57
Figura 40 – Resultados experimentais versus carga teórica por Wadee [29]. 58
Figura 41 – Modelos de colunas com um braço (a) e múltiplos braços (b e c) [31]. 60
Figura 42 – Combinação dos Modos de flambagem da coluna triple-bay [31]. 61
Figura 43 – Modelos de colunas com 3 braços [32]. 62
Figura 44 – Geometria e dimensões da coluna de aço inox de Servitova e Machacek [10] 63
Figura 45 - Configuração dos Sistemas: (a) Cruz, (b) X – Almeida [35]. 67
Figura 46 – Gráfico das curvas do aço carbono e dos aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex. 69
Figura 47 – Leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável [12]. 69

Figura 48 – Coluna dividida em 12 elementos [33]. 71
Figura 49 – Identificação dos elementos da coluna; a) coluna inteira; b) ampliação no meio da coluna. 72
Figura 50 – Modos de ensaio de Araujo nos seus estudos para o Doutorado. “Modo x” à esquerda e “Modo +” à direita [7]. 76
Figura 51 - Dimensões da coluna ensaiada por Araujo [5],[6].....77
Figura 52 – Curvas níveis de Protensão *versus* carregamento da coluna experimental de Araujo [6], [7] e do modelo numérico proposto no presente trabalho. 79
Figura 53 – Dimensões da coluna ensaiada por Servitova e Machacek [10] 80
Figura 54 – Gráfico Protensão versus carregamento da coluna experimental de Servitova [10] e do modelo numérico proposto no presente trabalho. 82
Figura 55 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço carbono. 86
Figura 56 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço carbono com imperfeição de 10 mm. 87
Figura 57 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço carbono com imperfeição de 20 mm. 87
Figura 58 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼, no meio e a 3/4 da coluna do aço carbono no melhor nível de protensão para imperfeição de 10 mm. 88
Figura 59 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço carbono com imperfeição de 10 mm 89
Figura 60 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço carbono com imperfeição de 20 mm. 89
Figura 61 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável austenítico. 92
Figura 62 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 8 mm. 93
Figura 63 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm. 93
Figura 64 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 15 mm.....94

Figura 65 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm. 94
Figura 66 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm. 95
Figura 67 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm. 95
Figura 68 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm. 96
Figura 69 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm. 96
Figura 70 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal ¼, no meio e a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm. 97
Figura 71 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm. 98
Figura 72 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm. 98
Figura 73 – Gráfico da carga externa *versus* carga nos braços da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm na protensão ótima. 99
Figura 74 – Gráfico da carga externa *versus* carga nos estais da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm na protensão ótima. 100
Figura 75 – Deformada da coluna de aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm e protensão de 2,3 kN (fator de escala 2). 100
Figura 76 – Deformada da coluna em corte e na vista superior. 101
Figura 77 – Gráfico de comparação entre as imperfeições das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável ferrítico. 103
Figura 78 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 8 mm. 104
Figura 79 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm. 104
Figura 80 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 15 mm. 105
Figura 81 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm. 105

Figura 82 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.....106
Figura 83 - Gráfico de carga externa versus deslocamento horizontal a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.....107
Figura 84 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.....107
Figura 85 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.....108
Figura 86 – Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal ¼, no meio e a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm. 108
Figura 87 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm. 109
Figura 88 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm. 110
Figura 89 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável duplex. ...112
Figura 90 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 8 mm. 113
Figura 91 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.....113
Figura 92 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 15 mm.....114
Figura 93 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm.....114
Figura 94 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm. 115
Figura 95 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm. 115
Figura 96 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm. 116
Figura 97 – Gráfico da carga externa versus deslocamento horizontal a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm. 116
Figura 98 – Gráfico da carga externa versus deslocamento horizontal a ¼, no meio e a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.....117

Figura 99 – Gráfico de carga externa versus deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm. 118
Figura 100 – Gráfico de carga externa versus deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm. 118
Figura 101 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 8mm. 122
Figura 102 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 10mm. 122
Figura 103 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 15mm. 123
Figura 104 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 20mm. 123
Figura 105 – Gráfico de comparação entre imperfeições e protensões para cada tipo de aço. 125
Figura 106 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e imperfeições para cada tipo de aço. 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração das colunas utilizadas no estudo de Serra et al. [30]. 59
Tabela 2– Propriedades mecânicas dos aços utilizados na modelagem numérica de Servitova e Machacek [10]. 64
Tabela 3 – Resultados da modelagem numérica de Servitova e Machacek [10]. 64
Tabela 4 – Valores das deformações e suas correspondentes protensões. 74
Tabela 5 – Comparação dos resultados obtidos do modelo experimental de Araujo [6], [7] com o modelo numérico proposto no presente trabalho. 78
Tabela 6 – Resultados experimentais - coluna de Servitova e Machacek [10] 80
Tabela 7– Comparação dos resultados obtidos do modelo experimental de Servitova e Machacek [10] com o modelo numérico proposto no presente trabalho. 82
Tabela 8 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço carbono. 85
Tabela 9 - Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimo de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço carbono. 85
Tabela 10 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço inox austenítico. 90
Tabela 11- Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável austenítico. 91
Tabela 12 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão do aço inoxidável ferrítico. 102
Tabela 13- Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável ferrítico. 102
Tabela 14 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço inoxidável duplex. 111
Tabela 15 - Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável duplex. 111

Tabela 16 – Acréscimo de carga na coluna em função da utilização de cabos (estais) ainda sem protensão. 120
Tabela 17 – Acréscimo de carga na coluna em função da protensão dos cabos (estais). 121
Tabela 18 - Comparação dos valores das cargas obtidas com as cargas dos modelos numérico e experimental de Servitova [10]. 124
Tabela 19 - Determinação do coeficiente de flambagem (k) para a coluna. 126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT-NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APDL	ANSYS Parametric Design Language
EUROCODE	European Committee for Standardisation
GUI	Graphical User Interface
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
LVDT	“Linear Variable Differential Transducer”
AISC	American Institute of Steel Construction

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia
L_f	Comprimento efetivo de flambagem
LVDTs	*Linear Variable Differential Transducer*
M	Momento fletor
Ned	Carga de Euler da coluna sem estais
$Nmax$	Máxima carga da coluna estaiada imperfeita
P	Carga aplicada na coluna
P_{cr}	Carga crítica de flambagem
r	Raio de giração
R_{ext}	Raio externo da seção circular da coluna
R_{int}	Raio interno da seção circular da coluna
T	Protensão aplicada [23]
T_{min}	Protensão mínima [23]
T_{opt}	Protensão ótima [23]
$V_0(x)$	Imperfeição inicial
σ_{cr}	Tensão crítica
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
σ_y	Tensão de escoamento
n	Modo de flambagem analisado
v	Deflexão
v_{max}	Deslocamento máximo que ocorre no ponto médio da curvatura
x	Altura do nó considerado
Y	Comprimento do elemento
$\bar{\alpha}_k$	Coeficiente linear que depende da rigidez longitudinal dos estais
β_k	Coeficiente angular que depende da rigidez à flexão dos braços
δ	Imperfeição máxima
γ_{M1}	Fator de segurança para a máxima carga da coluna imperfeita

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 20
1. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 38
1.1. Estudo da Coluna Estaiada por Belenya [22] 39
1.2. Estudo da coluna estaiada por Hafez e Temple [23] 40
1.3. Estudo da coluna estaiada por Wong e Temple [24] 42
1.4. Estudo da coluna estaiada por Chan [25] 44
1.5. Estudo da coluna estaiada por Jan Van Steirteghem [26] 48
1.6. Estudo da coluna estaiada por Saito [27] [28] 50
1.7. Estudo da coluna estaiada por Araujo [6] [7] 55
1.8. Estudo da coluna estaiada por Wadee [29] 56
1.9. Estudo da coluna estaiada por Serra et al. [30] 58
1.10. Estudo da coluna estaiada por Yu e Wadee [31] 60
1.11. Estudo da coluna estaiada por Yu, Wadee et al [32] 61
1.12. Estudo da coluna estaiada por Servitova e Machacek [10] 62
2. **MODELO NUMÉRICO** 65
2.1. Considerações Gerais 65
2.2. Descrição do Modelo Numérico 66
2.3. Propriedades dos Materiais (Leis Constitutivas) 68
2.4. Elementos de simulação 70
2.5. Etapas da modelagem 70
2.6. Condições de contorno 72
2.7. Solução e pós-processamento 73
2.8. Aplicação da força de protensão e da carga 73
2.9. Calibração do modelo numérico 75
2.9.1. *Calibração do Modelo de Araujo* 75
2.9.2. *Calibração do Modelo de Servitova* 79
3. **ANÁLISE PARAMÉTRICA** 83
3.1. Aço Carbono 84
3.2. Aço inoxidável Austenítico 90
3.3. Aço Inoxidável Ferrítico 101

3.4. Aço Inoxidável Duplex 110
4. **CONSIDERAÇÕES FINAIS** 119
REFERÊNCIAS 129
ANEXO 133

INTRODUÇÃO

Generalidades

Elementos leves e que suportam grandes vãos são frequentemente requisitados na área estrutural. Estruturas de aço vem sendo amplamente utilizadas na construção civil, visto que se destacam pela sua leveza, resistência, aumento da produtividade e racionalização do uso de materiais e mão de obra, além de tratar-se de um material cem por cento reciclável.

A busca por materiais que atendam a melhores performances quanto às suas propriedades tem sido constante. Os aços inoxidáveis apresentam um bom desempenho técnico quanto a sua alta resistência à corrosão e alta resistência a temperaturas elevadas. Estes aços são compostos basicamente por ligas de ferro-cromo, onde o cromo é o elemento mais importante e sua presença é indispensável para conferir a resistência à corrosão desejada. Suas características de resistência são obtidas graças à formação de um óxido de cromo protetor que impede o contato do metal base com a atmosfera agressiva.

Seguem relatos que uma das primeiras aplicações de aço inoxidável em grandes construções deu-se em 1928, quando foi construído o Chrysler Building em Nova Iorque (**Figura 1**). No topo do prédio foi colocado um espiral de aço inoxidável com tamanho equivalente a sete andares. Esta parte da estrutura sofreu apenas duas lavagens, uma em 1961 e outra em 1995, exemplo da pouca manutenção que o aço inoxidável exige, visto que o prédio se encontra em uma região costeira e poluída.

O aço inoxidável apresenta propriedades mecânicas cerca de 20% superior a do aço carbono. Sendo assim, permite que sejam utilizadas estruturas mais esbeltas, com menores seções. Como aplicação estrutural deste material tem-se o exemplo da estrutura do elevador do Arco La Defense, em Paris, na França (**Figura 2**).

A concepção do presente trabalho refere-se ao estudo de colunas estaiadas de aço inoxidável. A grande parte dos estudos encontrados menciona colunas de aço carbono.

Figura 1 - Chrysler Building em Nova Iorque, com espiral de aço inox [1].

Figura 2 - Arco La Dèfense, em Paris, na França [2].

Há muitos anos é estudado o comportamento das colunas, com resultados relevantes observados por Leonhard Euler [3]. Euler determinou a fórmula da carga crítica de flambagem considerando uma coluna ideal. Em menção ao seu estudo, a carga crítica também é denominada carga de Euler. A carga crítica de flambagem (P_{cr}) determina o valor limite para que ocorra a flambagem e a deflexão lateral, da peça onde atua o carregamento. Vários outros autores deram continuidade ao estudo do comportamento das colunas afim de encontrar soluções que otimizem o desempenho das mesmas. A partir destes estudos surgiram propostas de melhoria para o desempenho das colunas através da adição de estais com a criação de um sistema estrutural estaiado e protendido.

Os estais, em sua maioria, são compostos de barras ou cabos de aço. A utilização de estais vem sendo empregada em grandes obras no mundo inteiro, como a Ponte de Millau, no sul da França, inaugurada em 2004, considerada a mais alta do mundo, com 343 m de altura, com base no tamanho da estrutura de pontes [4]. Esta

é composta por sete pilares de concreto armado que sustentam 2460 m de extensão de tabuleiro, com 32 m de largura e 4,2 m de espessura (**Figura 3**). Aqui no Brasil, pode-se observar o uso de estais em pontes e passarelas, como a Ponte do Saber, primeira ponte estaiada do Estado do Rio de Janeiro, inaugurada em 2012, suspensa por 15 estais frontais e 6 de retaguarda em um único pilar (**Figura 4**). Já a utilização de estais para colunas de aço esbeltas, com a intenção de aumentar a capacidade das colunas de suportar cargas elevadas, vem sendo usada ainda de forma discreta. No Rock in Rio III, em 2001, utilizou-se este tipo de coluna de aço estaiada e protendida para a montagem do Palco Mundo, com a finalidade de liberar o uso de equipamentos de içamento, considerando a complexidade, o número de peças a utilizar e o curto prazo para a montagem (**Figura 5**). O mesmo tipo de estrutura foi utilizado em 1999, no Chiswick Park em Londres, no sistema de fachada (**Figura 6**), porém com mais cruzetas ao longo do comprimento das colunas.

Figura 3 - Ponte de Millau na França [4].

Figura 4 - Ponte do Saber no Rio de Janeiro [5].

Figura 5 - Montagem do Palco Mundo do Rock in Rio III [6] [7] [8].

Figura 6 - Fachada do Edifício do Chiswick Park – Londres [9].

A proposta do presente trabalho é dar seguimento aos estudos realizados de colunas de aço estaiadas e protendidas, utilizando o material aço inoxidável para a coluna, juntamente aos estais como cabos. Este estudo, utilizando como material o aço inoxidável, já foi iniciado em 2011, quando foi construído o primeiro protótipo para ensaio experimental tridimensional do sistema estrutural e simulada uma das primeiras modelagens computacionais do mesmo [10]. Ainda não há indícios de que este tipo de coluna de aço inoxidável estaiada e protendida foi utilizada. Contudo este sistema estrutural tem grande potencial de uso para fins de escoramento ou utilizadas como elemento estrutural em fachadas, entre outros.

Características singulares dos aços inoxidáveis [11] [12] [13] [14] [15]

O aço, de forma geral, diferencia-se entre si pela forma, tamanho e uniformidade dos grãos que o compõem e é claro, por sua composição química. Esta pode ser alterada em função do interesse de sua aplicação final (construção civil, mobiliário urbano, utensílios domésticos, etc), obtendo-se através da adição de

determinados elementos químicos, aços com diferentes graus de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência a corrosão, entre outros [14].

No que diz respeito a comparação do aço carbono com o aço inoxidável, quanto ao desempenho do aço quando submetido a diferentes esforços, comportam-se de formas distintas. O aço carbono apresenta-se com uma curva tensão *versus* deformação com um comportamento linear elástico até o limite de escoamento e um patamar antes do encruamento. Já o aço inoxidável expressa um comportamento não linear elástico até o limite de escoamento não caracterizado, como representado na **Figura 7**.

O traçado das curvas dos aços carbono e inoxidável também se diferencia pela sua forma, no gráfico tensão *versus* deformação, evidenciando a diferença no comportamento estrutural dos aços.

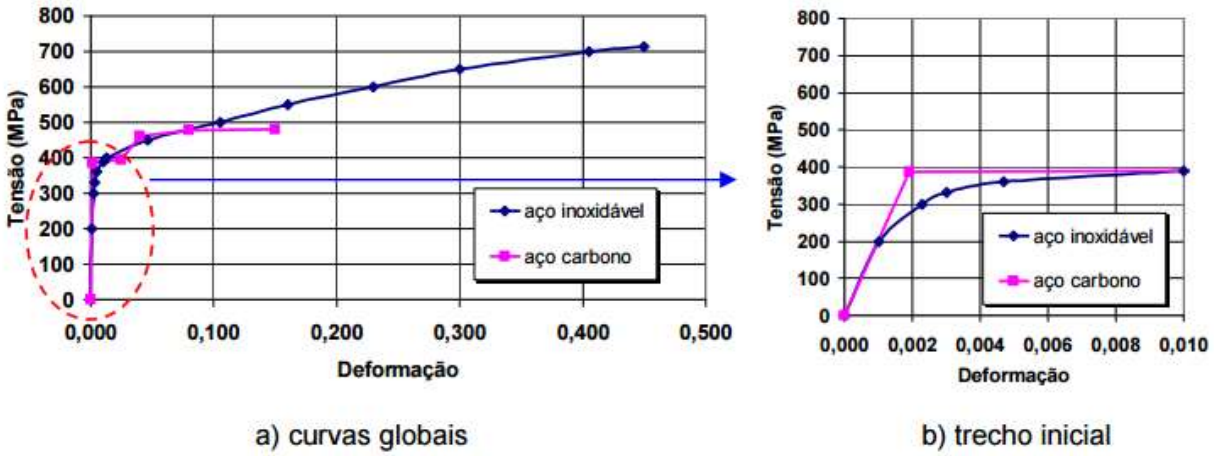


Figura 7 - Curvas tensão *versus* deformação do aço carbono e aço inoxidável [13].

No ensaio de tração do aço, o corpo de prova é submetido a uma carga de tração crescente até sua ruptura. Seu comportamento é caracterizado em um gráfico tensão *versus* deformação e são verificados os seguintes domínios, de acordo com a **Figura 8**:

- O domínio elástico (0-A) onde as deformações não são permanentes. Cada tensão corresponde a uma deformação específica de cada aço. Cessado o esforço de tração, o corpo de prova retorna às condições iniciais;

- O domínio plástico (B-C) onde para cada tensão corresponde uma deformação permanente. Cessado o esforço de tração, em qualquer momento deste domínio, o corpo de prova não retorna às condições iniciais;
- Na transição entre os dois domínios (A-B), existe um ponto para o qual o corpo de prova sofre deformação sem nenhum acréscimo de tensão. Refere-se ao escoamento do material. Observa-se que nos aços inoxidáveis, esta transição não é tão visível quanto no aço carbono e se define o limite de escoamento (LE) como o ponto na curva determinado pela intersecção de uma paralela à reta que define o domínio elástico (0-A) a 0,2 % de deformação permanente.
- O ponto C determina o fim do regime plástico e é definido como limite de resistência (LR).

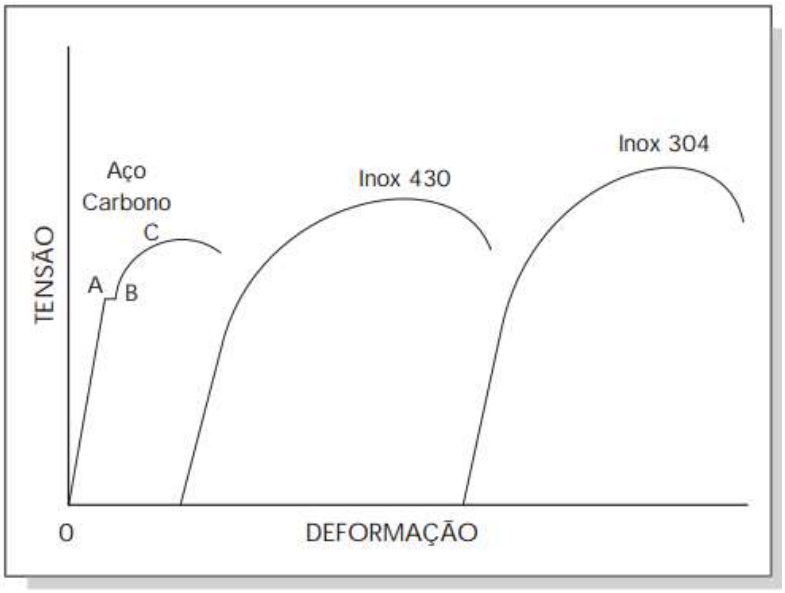


Figura 8 – Gráfico tensão *versus* deformação de aço carbono e aço inoxidável [13].

Os limites de escoamento do aço carbono mostrado no gráfico são ligeiramente superiores aos dos aços inoxidáveis. Contudo, os limites de resistência dos aços inoxidáveis são superiores ao do aço carbono, que significa que eles suportam deformações maiores antes de ocorrer falha do material.

A curva de tensão *versus* deformação é específica para cada tipo de aço. Nas curvas tensão *versus* deformação, observa-se também que os aços austeníticos apresentam o regime plástico maior que os aços ferríticos, conforme Figura 9.

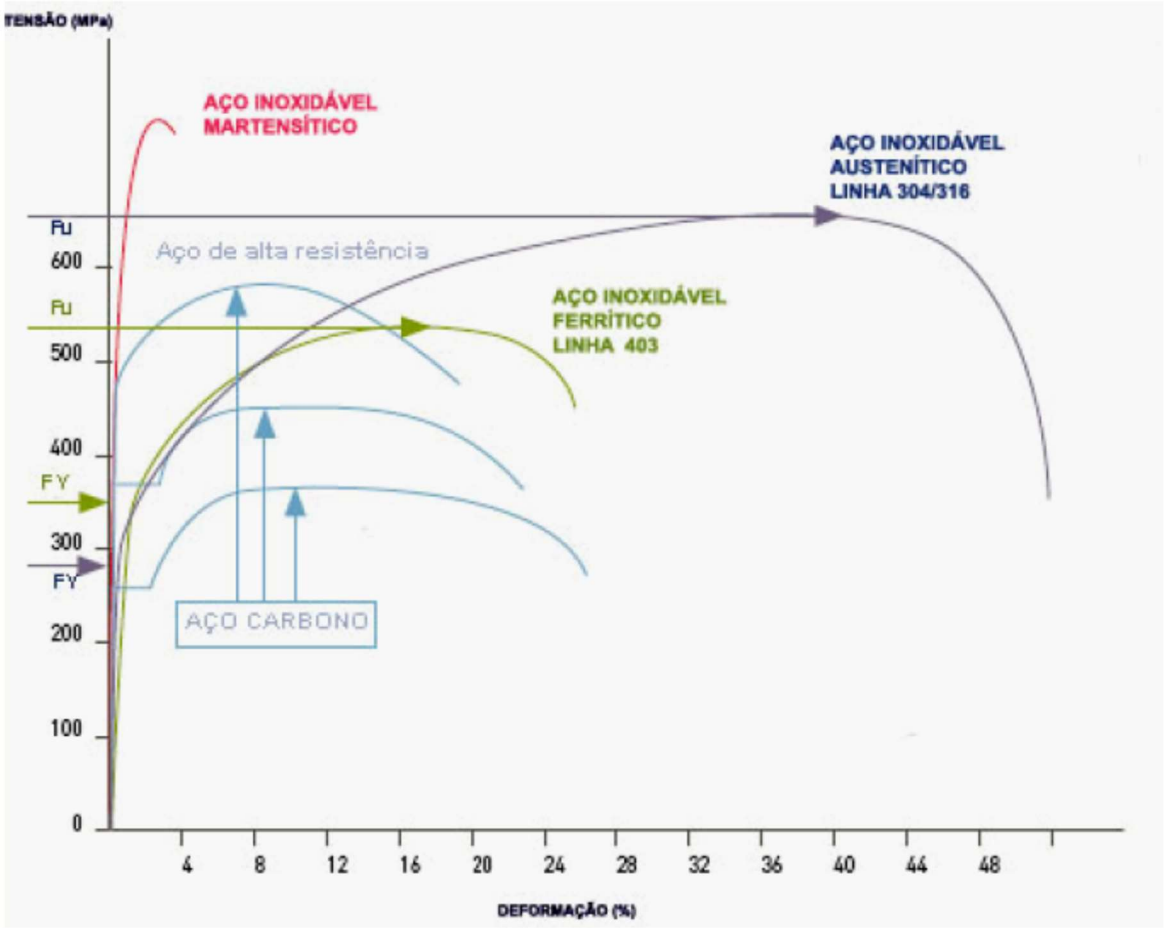


Figura 9 – Comportamento de aços carbono e inoxidável [13].

Uma das diferenças mais relevantes de comportamento às solicitações entre os vários tipos de aço é o encruamento, representado pelo aumento das características (dureza, limites de escoamento, de resistência e de cisalhamento) pelo efeito de trabalho mecânico. O maior grau de encruamento do aço inoxidável pode ser compensado pela sua ótima resistência a corrosão atmosférica, o que permite a utilização de espessuras inferiores às utilizadas pelo aço carbono, tornando as peças mais leves. Com isso, os esforços de conformação podem se aproximar aos exigidos para conformação do aço carbono.

Além desta diferença, pode-se dizer que o aço inoxidável apresenta um endurecimento sensivelmente maior que o aço carbono, com isso exige equipamentos mais robustos para sua conformação.

Tipos de aços inoxidáveis [11] [12] [13] [14] [15]

Existe uma grande variedade de aços inoxidáveis com mudança dos níveis de resistência à corrosão e resistência mecânica. O que define a classificação é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um deles originando atributos específicos com relação a resistência mecânica e possibilidade de resistir a diferentes ambientes. A **Figura 10** mostra a composição de cada tipo de aço inoxidável.

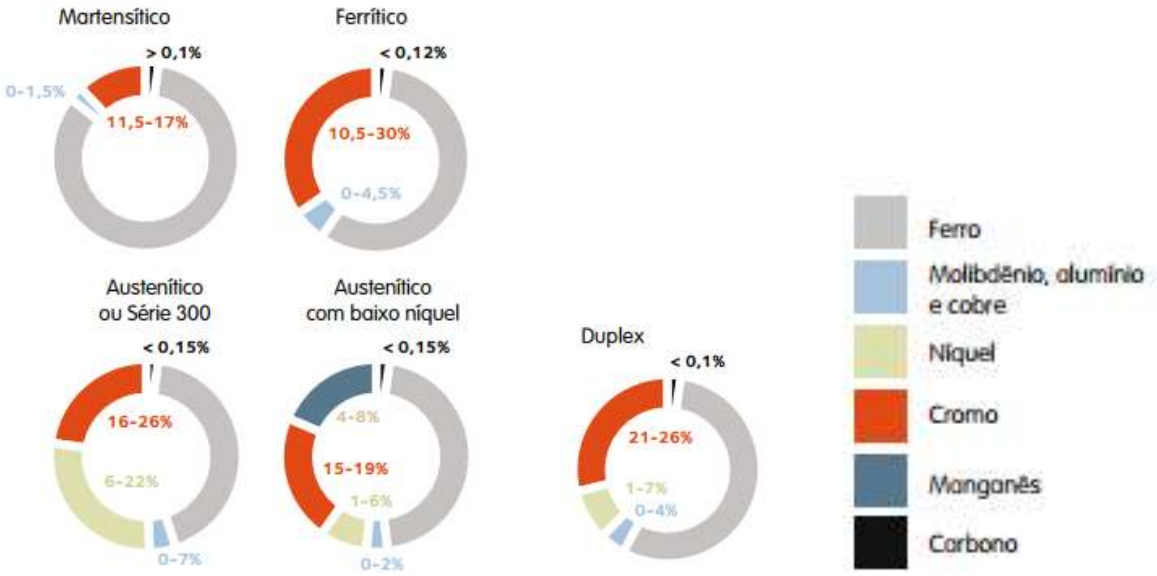


Figura 10 – Composição dos diferentes tipos de aço inoxidável [13].

Os tipos de aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco principais grupos: ferrítico, martensitico, austenítico, dúplex e endurecido por precipitação (*Precipiation Hardening*).

- Austeníticos: são ligas não-magnéticas de ferro-cromo-níquel que não podem ser endurecidos por tratamento térmico, tendo o nível de teor de carbono restrito. Dependendo do teor de níquel, respondem a trabalho a frio com aumento da resistência mecânica, podendo ser utilizado em operações severas de conformação, evitando ruptura prematura e trinca. Podem ser endurecidos por deformação e, neste estado, são ligeiramente magnéticos. A adição de elementos de liga, como o molibdênio, aumenta sua resistência a corrosão. Os aços mais utilizados, tipo 304 (1.4301), tem 17 % de cromo e 8 % de níquel

apresentando excelente ductilidade, conformabilidade e tenacidade e até em temperaturas criogênicas.

- Ferríticos: são ligas ferro-cromo com teores tipicamente entre 11 e 17 % de cromo. O teor de carbono é mantido baixo resultando em uma limitada resistência mecânica. Não são endurecíveis por tratamento térmico. Estes aços apresentam baixo custo e tem limitada resistência à corrosão comparado com os austeníticos mais comuns. Da mesma forma, são limitados na tenacidade, conformabilidade e soldabilidade em comparação aos austeníticos. Tem-se como exemplo de aços ferríticos o 3 Cr 12 (1.4003) e 430 (1.4016).

- Martensíticos: São ligas de ferro-cromo, com teor de 12 a 15% de cromo. São similares aos aços carbono e de baixa liga. Tem uma estrutura similar aos ferríticos. Devido a adição de carbono, podem ser endurecidos e a resistência aumentada pelo tratamento térmico, da mesma forma que os aços carbono. São classificados como uma família ferro magnético “duro”. Pode-se citar aços martensíticos 420 (1.4028), 431 (1.4057) como tipos temperáveis com carbono normal e 248 S V (1.4418) como tipo de aço com baixo teor de carbono e mais o nitrogênio.

- Duplex: possuem uma estrutura mista de austenita e ferrita e como resultado apresentam características desses dois tipos de aços. Uma composição química típica tem 22 % de cromo, 5 % de níquel e 3 % molibdênio com pequena adição de nitrogênio. Estes aços são endurecidos por tratamento térmico e são mais duros que os aços ferrítico e austenítico na condição recozida mole. Como os aços ferríticos, são ferro magnéticos e apresentam uma boa conformabilidade e soldabilidade como os aços austeníticos. Podem ser utilizados em projeto com seções mais finas que os aços austeníticos e sua grande vantagem é sua maior resistência a corrosão sob tensão. O molibdênio é normalmente adicionado para aumentar a resistência a corrosão galvânica e por pite. Tem-se como exemplo deste tipo de aço o duplex 2205 (1.4462) e 1.4501.

- Aço inoxidável endurecido por precipitação: são endurecidos por tratamento de envelhecimento, possuindo algumas similaridades com os aços martensíticos, contudo o processo metalúrgico para endurecimento é diferente. Costumam apresentar estrutura martensítica e assim são ferro magnéticos. Os aços endurecíveis por precipitação tem boa ductilidade e tenacidade, dependendo do tratamento térmico. Sua resistência à corrosão é comparável ao aço austenítico 304 (1.4301). Podem ser soldados mais facilmente que os aços martensíticos comuns. Exemplo destes aços são o 17 – 4 PH (1.4542) e 520 B (1.4594).

Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis apresentam propriedades diferentes em função da sua composição. O gráfico tensão *versus* deformação dos três tipos de aço inoxidável é mostrado na Figura 9.

Os aços ferríticos, austeníticos e dúplex não são capazes de aumentar a sua resistência ou serem endurecidos por meio de tratamento térmico, porém respondem em vários níveis, com o aumento de resistência ao ser conformado a frio. Os ferríticos tem propriedades mecânicas adequadas em temperatura ambiente e tem uma limitada ductilidade comparável aos aços austeníticos. Os aços austeníticos, com sua característica de arranjo atômico de cubo com face centrado tem propriedades totalmente distintas, mecanicamente são mais dúcteis e tenaz em temperaturas criogênicas. Os aços dúplex que tem uma estrutura mista de austenita e ferrita, compartilham de algumas das propriedades de outros tipos de aços, no entanto mostram-se mais resistentes que os aços ferríticos e austeníticos.

Motivação

A busca por elementos capazes de vencer vãos cada vez maiores, em curto espaço de tempo e espaço físico limitado, vem desafiando engenheiros de todo o mundo. Situação deste tipo pôde ser vista na construção do Palco Mundo, no Rock in Rio III, em 2001 [16], [17]. A cobertura do palco teve quarenta metros de altura, noventa metros de diâmetro e oitenta metros de boca de cena. Para tal, foram consumidos cerca de cento e vinte toneladas de aço e trinta e três quilômetros de lona sintética laminada. Tratava-se de um desafio cumprir o prazo, considerando a velocidade da obra utilizando sistemas convencionais para sua montagem, tendo em vista a escassez de guindastes de grande porte disponíveis no Brasil à época. Procurou-se então desenvolver um sistema inovador para o suporte temporário. Para isto foram utilizadas colunas de aço estaiadas e protendidas. São colunas esbeltas, que, para otimizar sua capacidade portante, foram utilizadas barras perpendiculares, ligadas a barra principal por estais, aplicando protensão nestes estais. Para a montagem do palco foram utilizados dois modelos de colunas, ambas com 29 metros de altura em aço ASTM A-500: uma para suportar cargas de 200 kN, de 219 mm de diâmetro externo e 4,75 mm de espessura; outra para suportar cargas de 90 kN, de diâmetro externo de 165 mm e 3,75 mm de espessura. Os tubos secundários foram dispostos no formato de cruz com comprimento de 1,5 m, com 88 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura. Para os estais foram utilizadas barras redondas de aço ASTM A-36 com 19 mm de diâmetro externo, com protensão da ordem de 36 % da carga de serviço da coluna (**Figura 11** e **Figura 12**).

Este sistema estrutural foi amplamente abordado por Araújo [6], em 2005, a partir de um modelo de colunas com 12 metros de altura e 89,3 mm de diâmetro externo no tubo principal, travado por 4 barras perperdinculares a este, de 60 cm de extensão, com 42,6 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura, estabilizada por 4 estais. A esta estrutura foram aplicados diversos níveis de protensão (**Figura 13** e **Figura 14**).

Figura 11 – Palco Mundo do Rock in Rio III na fase final de construção [6] [7].

Figura 12 – Coluna de aço estaiada utilizada como suporte temporário para a construção do Palco Mundo do Rock in Rio III [6] [7].

Figura 13 - Modelo de coluna de aço estaiada e protendida [6].

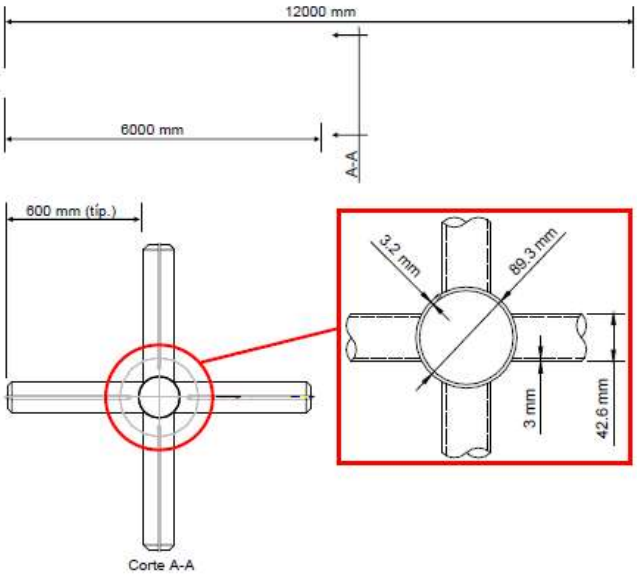


Figura 14 – Visão global da coluna em corte [6].

Esta solução estrutural colabora para a redução do comprimento de flambagem, fazendo com que o mesmo seja reduzido pelo menos à metade do comportamento inicial da coluna. Quanto à utilização dos estais e a protensão da coluna principal, verifica-se que a resistência a flambagem da coluna torna-se substancialmente maior.

Araújo [6] concluiu que a simples utilização dos estais consegue aumentar em até 100 % a carga última da coluna e em até 200 % quando utilizada a protensão ótima.

Em 2009, Araújo [7] complementa os estudos realizados em 2005, adicionando novos resultados experimentais utilizando um novo processo na obtenção dos esforços dos estais e aprimorando o sistema de aplicação de carga na coluna. Fez uso de inteligência computacional, enriquecendo o estudo paramétrico e ampliando os resultados. Ainda complementou com análises dinâmicas, tornando um dos mais

completos estudos da área de estabilidade estrutural de colunas estaiadas e protendidas da época, tendo como contribuições mais relevantes:

- Pioneirismo no ensaio tridimensional horizontal de colunas de aço esbeltas estaiadas e protendidas birrotuladas;
- Pioneirismo na utilização de cabos e barras de vergalhões como estais para compor o sistema estrutural;
- Desenvolvimento de células de cargas específicas para os estais com a utilização de um sistema de apoio rolante, objetivando a compensação do peso próprio da coluna;
- Utilização de redes neurais bayesianas afim de prever resultados, otimizando quantidade de análises numéricas;
- Pioneirismo no estudo dinâmico utilizando análises modais e transientes para este tipo de coluna através do programa ANSYS.

Em 2011, Servitova e Machacek [10], ensaiaram um modelo similar ao de Araujo[6], [7], substituindo o material aço carbono por aço inoxidável. As colunas com 5 m de comprimento, de 50 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, com barras perpendiculares (braços) de 25 cm de comprimento, diâmetro externo de 4 mm e 1,5 mm de espessura, foram ensaiadas com níveis de protensão distintos.

Um dos testes foi realizado com a coluna sem cabos e os outros, com três níveis de protensão nos estais. Durante os testes, as deflexões foram medidas em sete pontos e em duas direções perpendiculares por potenciômetros fixados na armação experimental. Os cabos tracionados foram medidos por células de carga [18].

Da mesma forma, foi elaborado o modelo numérico para estudo e análise dos resultados. Tal modelo foi baseado no método dos elementos finitos, através do programa ANSYS.

Os estudos de Araujo [6], [7] das colunas de aço estaiadas e protendidas, seguidos pelo trabalho de Servitova e Machacek [10], pioneiros ao utilizar como material o aço inoxidável, serviram como referência para os estudos apresentados neste trabalho.

Em 2012, Osofero [19] ainda mostra um estudo de colunas estaiadas protendidas, apresentando em seu trabalho, inicialmente, o comportamento de colunas comuns, seguindo com a determinação da carga crítica de flambagem para colunas estaiadas e um processo de cálculo da máxima capacidade de carregamento

de colunas estaiadas. O autor leva em consideração a geometria dos cabos, o nível inicial de protensão dos mesmos e o nível de imperfeição das colunas. As colunas estaiadas são representadas com os braços em cruz simples. O comprimento deste braço é variável afim de representar os modos de flambagem possíveis.

A partir dos estudos mencionados, a busca por soluções de sistemas de escoramentos de estruturas complexas, com limitações de espaço físico e prazo restrito, motiva o estudo das colunas de aço estaiadas e protendidas, agora considerando como material de estudo, o aço inoxidável, considerando sua leveza, elevada resistência mecânica e a corrosão, além da fácil manutenção. A intenção da continuidade aos estudos é a descoberta de soluções mais econômicas, duradouras, o conhecimento das propriedades e o comportamento destes materiais.

Objetivos

Com base na motivação apresentada anteriormente, o objetivo deste trabalho consiste no estudo e avaliação do comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas. O estudo tem como embasamento a modelagem computacional com uso de software baseado no método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS [20];

O sistema estrutural em questão tem como objetivo a redução do comprimento de flambagem da coluna, visto que a tendência é a de utilização de colunas cada vez mais esbeltas.

As ações desenvolvidas para composição desta dissertação são:

- Elaboração de um modelo numérico em elementos finitos da coluna estaiada considerando os efeitos da imperfeição inicial e variação dos níveis de protensão;
- Comparação das deformações, deslocamentos e modos de flambagem do modelo experimental com o modelo computacional para calibração do mesmo;
- Análise do comportamento das colunas estaiadas e protendidas de aço inoxidável dos tipos: austenítico, ferrítico e duplex, e comparação com o modelo em aço carbono para determinar suas principais semelhanças e diferenças.

Estrutura da dissertação

Este capítulo introdutório expôs, além da apresentação do aço inoxidável como material utilizado na construção civil, a comparação das suas propriedades e características com o aço carbono. Ainda retrata a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, com um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos além dos objetivos do presente trabalho.

No capítulo um são apontados resumos das principais referências bibliográficas que se referem ao elemento coluna estaiada e protendida, assim como a evolução do seu estudo.

O capítulo dois apresenta as considerações necessárias para a apresentação do modelo numérico. Além da explanação do modelo criado, é considerado neste capítulo a calibração deste modelo, que foi realizada através de comparação com os resultados experimentais de Araújo [6], [7] e Servitova e Machacek [10].

No capítulo três são revelados os resultados das análises paramétricas da modelagem de colunas com o aço carbono e os três tipos de aço inoxidável: austenítico, ferrítico e duplex.

Finalmente, no capítulo quatro são apresentadas as considerações finais, com as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma síntese de trabalhos realizados ao longo dos anos sobre a evolução dos estudos de colunas de aço estaiadas e protendidas desenvolvidos por pesquisadores do Brasil e do mundo.

Entende-se por colunas os “elementos estruturais comprimidos, podendo ser esbeltos ou não, sujeitos a uma força de compressão axial, e a deflexão lateral que ocorre, em alguns casos, é denominada flambagem” [3].

Os primeiros estudos voltados ao comportamento das colunas foram realizados pelo matemático e físico suíço Leonhard Euler em 1757 [3]. Em seus estudos, analisou o comportamento de uma coluna sujeita a flambagem, considerando uma coluna ideal. A coluna conceituada como ideal é perfeitamente reta antes da aplicação da carga, composta por um material homogêneo e a carga aplicada a coluna deve estar precisamente no centroide da sua seção transversal. Ainda deve ser admitido que o material da coluna se comporte de forma linear-elástico, com flexão em um único plano. Por definição, carga crítica ou carga de Euler ou carga crítica de flambagem é o valor da carga que provoca a flambagem da coluna e pode ser definida pela equação:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_f}$$

Onde:

P_{cr} - Carga crítica de flambagem ou carga de Euler;

E – Módulo de elasticidade do material;

I – Inércia da seção;

L_f – Comprimento de flambagem.

Outros estudos foram desenvolvidos na intenção da melhoria do desempenho das colunas após os estudos de Euler. Até que em 1970, o russo Voevodin [21] foi o primeiro a utilizar estais protendidos. Baseado em seus estudos, Belenya [22] desenvolveu um sistema estrutural com barras secundárias (braços), formando uma cruzeta, perpendicular a coluna principal e travada por meio de cabos.

Deram continuidade aos estudos: Hafez *et al.* [23], Wong *et al.* [24], Chan [25], Steirteghem *et al.* [26], Saito [27], [28], Araujo [6], [7], Wadee [29], Serra *et al.* [30], Yu, Wadee [31], Yu, Wadee *et al.* [32], Servitova e Machacek [10]. Os conceitos

desenvolvidos pelos mesmos serão aplicados e tomados como base para o presente trabalho.

1.1. Estudo da Coluna Estaiada por Belenya [22]

Belenya [22] apresenta em seus estudos, baseado em Voevodin [21], o aproveitamento máximo de colunas esbeltas para suportar cargas. Para isto, utilizou braços, dispostos perpendicularmente à coluna principal, com travamento por meio de cabos. Como exemplo pode ser determinada a carga crítica de flambagem de uma coluna com n painéis, carregada axialmente, com apoio nas extremidades, com molas elásticas nas seções transversais.(**Figura 15**)

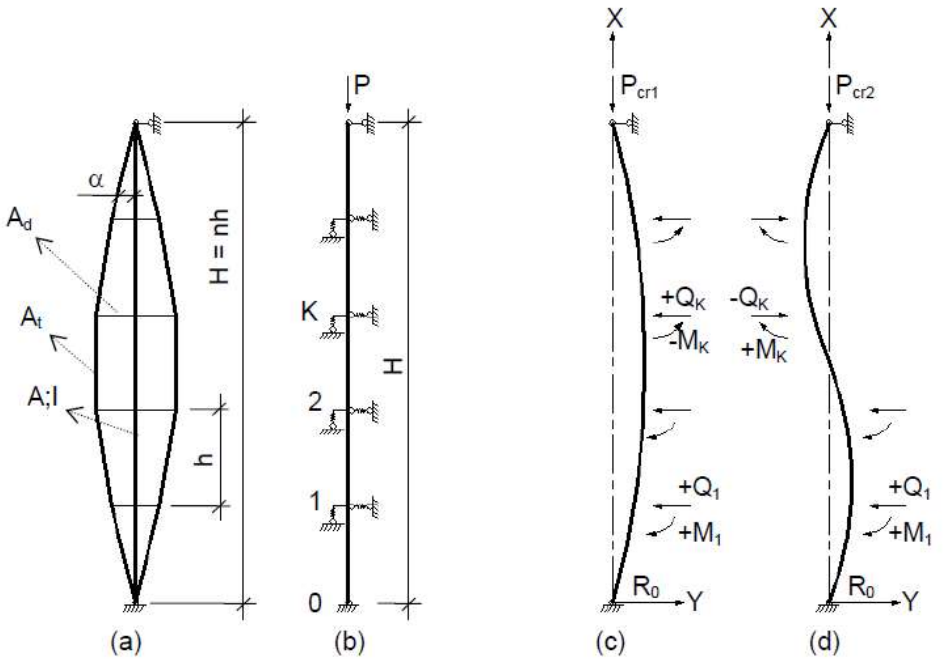


Figura 15 - Cálculo da estabilidade de uma coluna de n painéis protendida estaiada. (a) Sistema estrutural; (b) Sistema para cálculo; (c) Primeiro modo de flambagem; (d) Segundo modo de flambagem [6] [7].

As molas elásticas (Figura 15.b) representam o efeito das tensões nos cabos e rigidez dos braços do sistema estrutural (Figura 15.a). São representados o primeiro modo de flambagem da coluna (Figura 15.c) e segundo modo de flambagem (Figura 15.d).

1.2. Estudo da coluna estaiada por Hafez e Temple [23]

Hafez e Temple [23] foram pioneiros nos estudos de protensão em estais. Estudaram o efeito de protensão inicial nos estais na carga crítica de flambagem de uma coluna, considerando uma restrição no meio da altura. Os autores objetivavam determinar a mínima protensão efetiva, a protensão ótima e a máxima protensão das colunas estaiadas protendidas.

O modelo estudado foi de uma coluna estaiada em 2D com dois painéis e bi rotulada nas extremidades. As ligações entre a coluna central e as barras perpendiculares são consideradas como rígidas. Já as ligações dos os estais com a coluna central e com as barras perpendiculares são consideradas como rótulas ideais. O modelo é simétrico e submetido a uma carga axial concêntrica, não havendo imperfeição inicial na coluna (**Figura 16**).

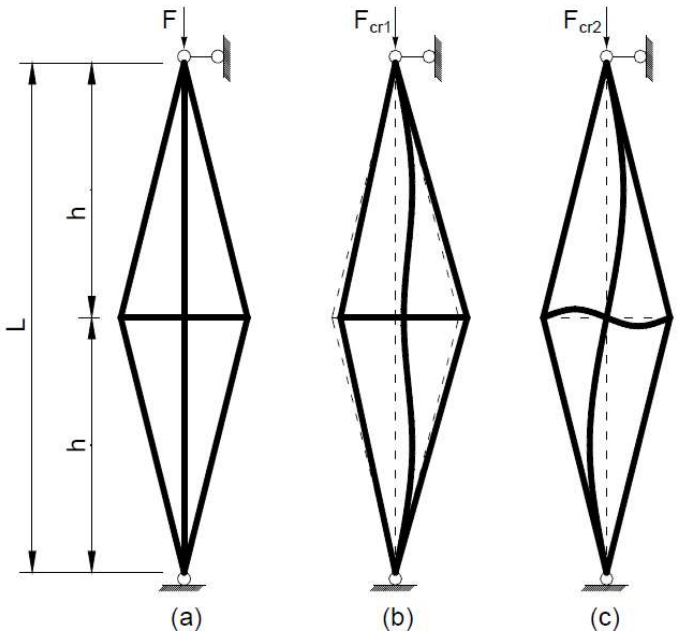


Figura 16 – (a) Coluna estaiada protendida de dois painéis bi-rotulada; (b) Primeiro modo de flambagem. (c) Segundo modo de flambagem [6],[7].

A carga crítica de flambagem da coluna estaiada é obtida pelo método dos elementos finitos. Utilizando este método, suas deformações axiais (coluna principal e barras perpendiculares) apresentam um efeito desprezível na carga máxima de flambagem.

A carga crítica de flambagem de uma coluna estaiada e protendida varia entre dois limites: a carga de Euler, como limite inferior, e pelo método dos elementos finitos, o limite superior. A magnitude desta carga, que percorre entre estes limites, é determinada a partir da intensidade da protensão inicial a ser aplicada nos estais.

Hafez e Temple [23] ainda realizaram uma série de ensaios em uma coluna estaiada com dois painéis, bi-dimensional, como mostra a **Figura 17**, afim de verificar a relação da protensão inicial e sua correspondente carga de flambagem. Foi utilizada uma coluna com 3,05 m de comprimento e as barras perpendiculares com 305 mm, ambas com a mesma seção transversal e mesmas propriedades mecânicas: 38,1 mm de diâmetro externo e 25,4 mm de diâmetro interno do tubo de aço, com módulo de elasticidade adotado de 201000 MPa, tensão de escoamento de 338 MPa e tensão de ruptura de 483 MPa. Nos estais foram utilizadas barras de aço de 3,18 mm de diâmetro com tensão de ruptura de 614 MPa e módulo de elasticidade de 202000 MPa. A comparação entre a carga de flambagem teórica e experimental foi representada no gráfico, apresentado na **Figura 18**.

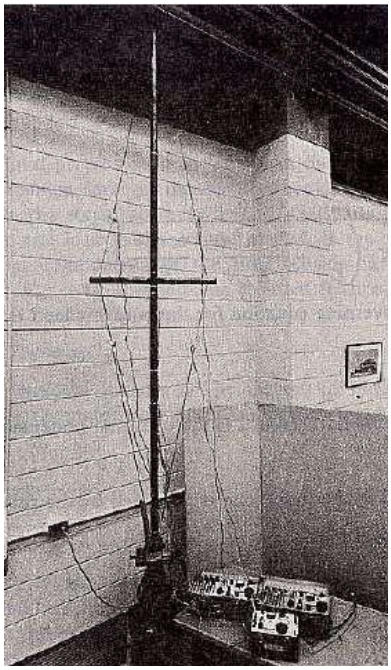


Figura 17 – Ensaio bidimensional da coluna estaiada protendida com dois painéis [6] [7].

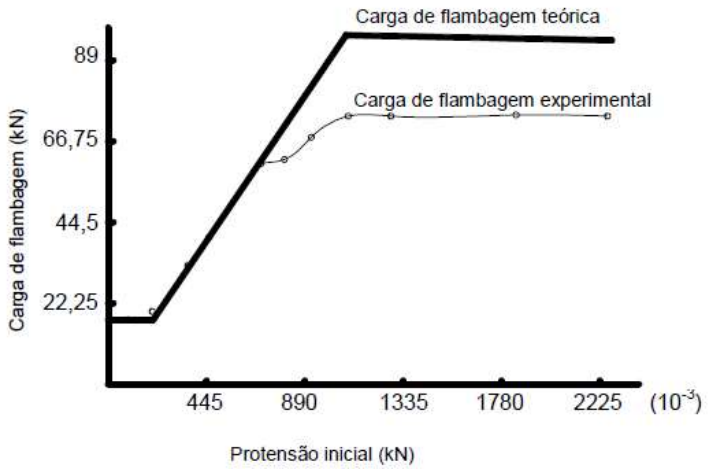


Figura 18 - Comparação entre a carga de flambagem teórica e experimental da coluna de aço estaiada protendida [6],[7].

A **Figura 18** mostra o gráfico protensão inicial versus carga de flambagem. A protensão mínima efetiva é a protensão inicial mínima nos estais, que causa efeito até se atingir a carga de Euler. A partir daí, os estais afrouxam e a coluna flamba, se não estiver mais restrita pelos estais. A protensão ótima equivale teoricamente ao valor de protensão inicial dos estais, que leva a coluna atingir a sua máxima carga de flambagem. A protensão máxima é a protensão inicial nos estais que acarreta em flambagem na coluna sem qualquer carga adicional aplicada.

1.3. Estudo da coluna estaiada por Wong e Temple [24]

Wong e Temple [24] estudaram o efeito da imperfeição inicial sobre o valor da carga crítica de flambagem de uma coluna de aço estaiada. Esta condição não foi contemplada no estudo de Hafez e Temple [24], onde a comparação entre a carga de flambagem teórica e experimental apresentava o resultado experimental 20% inferior ao valor teórico. A diferença entre os resultados se dá em consequência por não considerar o efeito da imperfeição inicial da coluna.

Nas estruturas reais, as inevitáveis imperfeições, fazem com que o comportamento real de um elemento comprimido se afaste do comprimento teórico. As imperfeições num elemento de uma estrutura real podem ser essencialmente de dois tipos: imperfeições geométricas (falta de linearidade, falta de verticalidade,

excentricidade das cargas, entre outras) e imperfeições do material (comportamento não linear, tensões residuais, entre outras) [24].

O efeito da imperfeição inicial pode ser considerável para determinar a carga crítica. O método aqui abordado, estuda o comportamento teórico a partir da análise não-linear em conjunto com o método dos elementos finitos para determinar a carga crítica de flambagem da coluna. O comportamento não-linear é dado através do processo de Newton-Raphson. Como resultado, é confirmado que o efeito da imperfeição inicial reduz significativamente a capacidade da coluna de suportar a carga aplicada. Sendo assim, os resultado teóricos e experimentais ficam mais próximos (**Figura 19**).

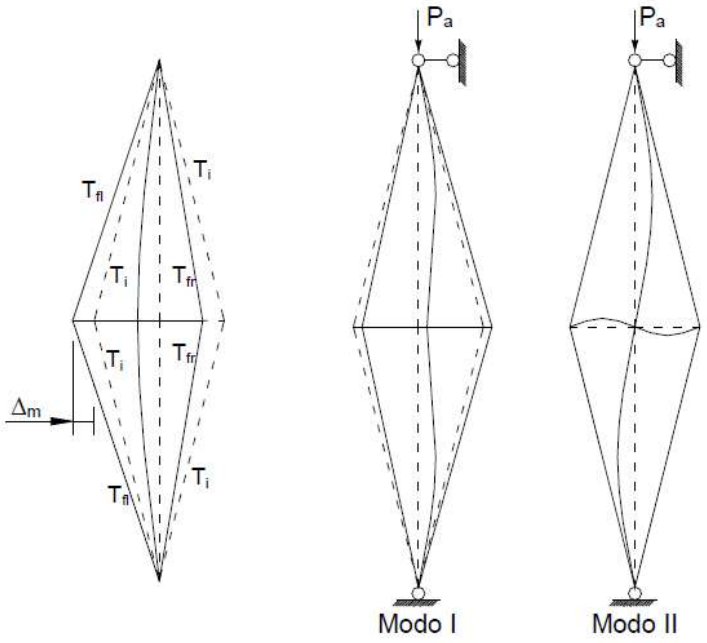


Figura 19 – Efeito da imperfeição inicial na coluna estaiada e seus modos de flambagem [6] [7].

Com base no modelo experimental de Hafez e Temple [24], abordado anteriormente, foram realizados diversos testes com o objetivo de verificar a relação entre a protensão inicial e a sua carga de flambagem correspondente, considerando agora a imperfeição inicial. Para tal modelo, foi adotado o módulo de elasticidade de 210000 MPa, a tensão de escoamento de 338 MPa e a tensão de ruptura de 438 MPa. Sendo que para os estais foram utilizadas barras de aço de 3,18 mm de diâmetro com tensão de ruptura de 614 MPa e módulo de elasticidade de 202000 MPa.

A partir deste modelo, com os resultados teóricos e experimentais, foi feito um gráfico comparativo (carga de flambagem x protensão inicial) que inclui os resultados para uma coluna ideal e real; e o resultado para uma coluna estaiada real, considerando a imperfeição inicial, como mostrado na **Figura 20**.

A partir deste gráfico deduz-se que os resultados experimentais se aproximam mais dos resultados teóricos para uma coluna estaiada real com imperfeição inicial do que de uma coluna estaiada ideal.

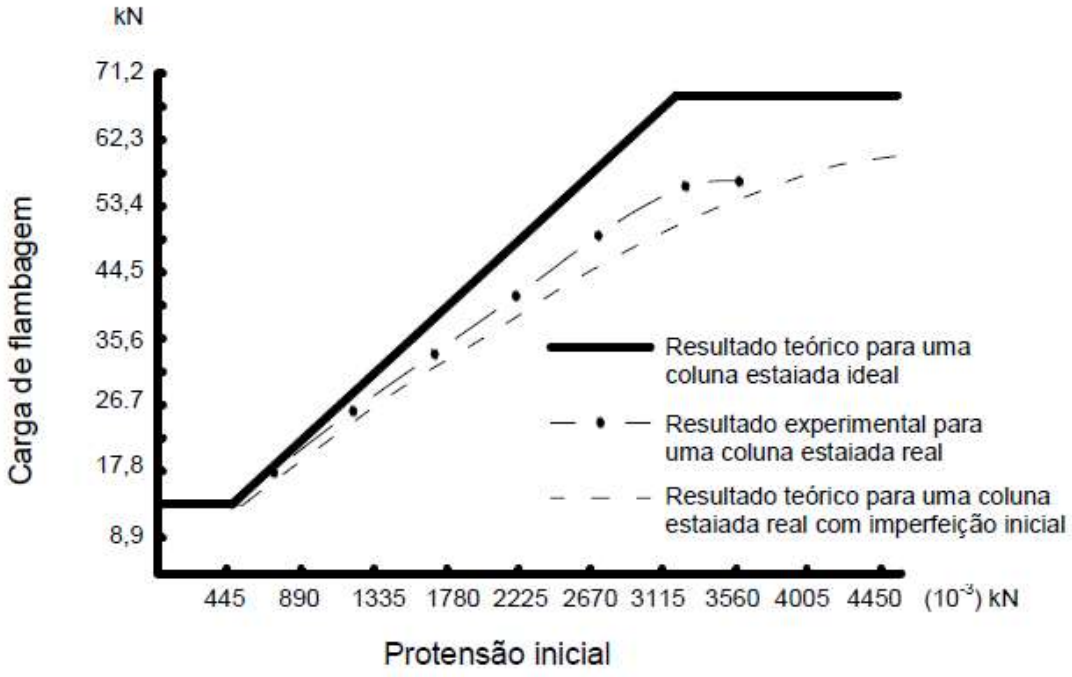


Figura 20 – Carga de flambagem teórica e experimental *versus* a protensão inicial [6] [7].

1.4. Estudo da coluna estaiada por Chan [25]

No estudo de Chan [25] foi desenvolvido um novo elemento para utilização no modelo computacional: o “pointwise equilibrium polynomial – PEP”. Este elemento, que pode ser usado para modelar um membro por um único elemento, foi utilizado para o estudo do comportamento da coluna com diversos comprimentos, imperfeição inicial e força de protensão nos estais.

Chan [25] no seu estudo ainda considerou que:

- os estais permanecem linearmente elásticos durante a protensão e do carregamento;
- as ligações são consideradas como rígidas entre a coluna central e as barras perpendiculares à mesma; rotuladas entre os estais e a coluna central e entre os estais e as barras perpendiculares;
- a coluna estaiada é simétrica;
- a carga axial não possui excentricidade alguma;
- o tipo de imperfeição inicial pode ser representado pela expressão: $v_0 = v_{m0}\,(1 - t^2)$, onde $t = \frac{2x}{L}$, v_0 é a imperfeição inicial lateral, v_{m0} é a amplitude da imperfeição inicial que corresponde a magnitude da imperfeição no meio do vão da coluna (**Figura 21**).

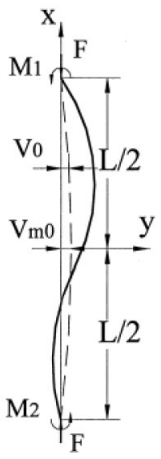


Figura 21 – Aplicação do modelo para imperfeição inicial da coluna [25].

Foram estudados as imperfeições iniciais Tipo I e Tipo II (**Figura 22**). As **Figura 23** e **Figura 24** mostram a relação entre a deformação lateral e o deslocamento axial pela carga total de protensão. De acordo com estes, deduz-se que quanto maior a imperfeição inicial, menor é a carga útima de protensão. Isto se repete em ambos os modos de flambagem (Tipo I e Tipo II).

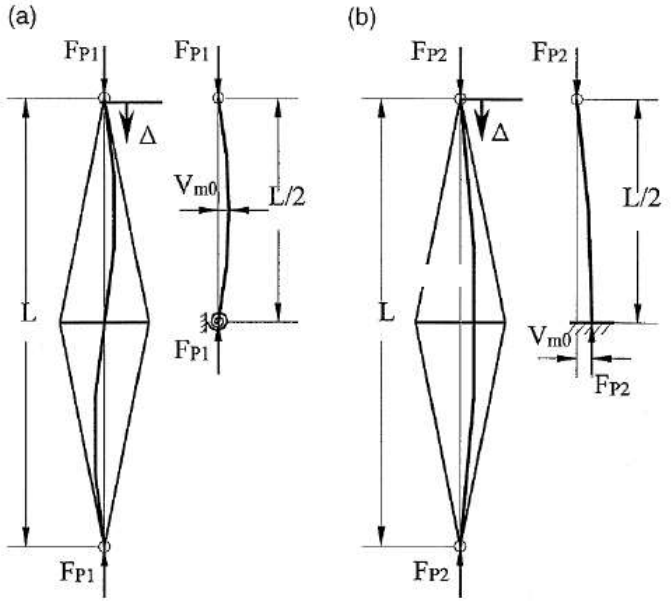


Figura 22 – Imperfeições iniciais. a) Tipo I, b) Tipo II [25].

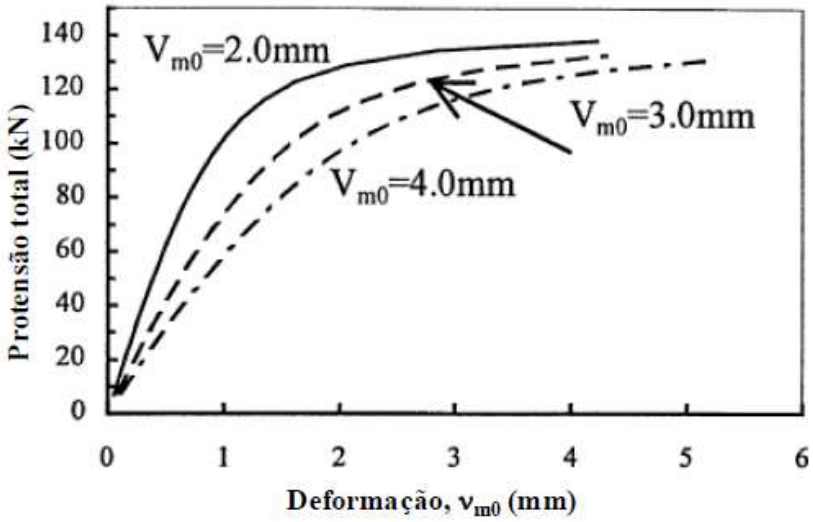


Figura 23 – Gráfico da deformação lateral pela carga total de protensão [21].

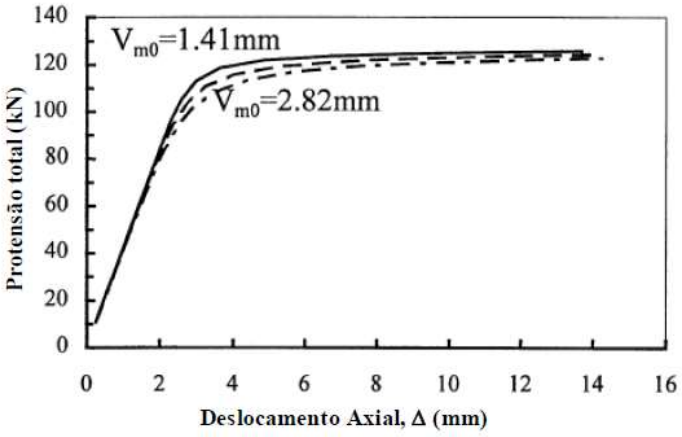


Figura 24 – Gráfico do deslocamento axial pela força de protensão [25].

Segundo Chan [25], para uma coluna com imperfeição inicial Tipo I, $v_{m0} = 2{,}0mm$ ($\frac{v_{m0}}{L} = \frac{1}{1525}$), que a carga de flambagem é de 127,1 kN, visto que a carga ideal de flambagem para este tipo de coluna estaiada é de 136,6 kN. Do mesmo modo, para uma coluna com imperfeição inicial Tipo II com uma imperfeição inicial de $v_{m0} = 1{,}41mm$, a carga de flambagem correspondente é de 125,75 kN, pouco inferior a 128,1 kN, que corresponde ao valor da carga de flambagem para a coluna estaiada ideal. Assim, conclui-se que o incremento na imperfeição inicial corresponde a uma redução da carga última de protensão em ambos os modos de flambagem (Tipo I e Tipo II).

A **Figura 25** ilustra a relação entre carga de flambagem e protensão inicial na coluna estaiada do Tipo I, considerando a imperfeição inicial. Quanto maior a imperfeição inicial, menor será a carga crítica de flambagem.

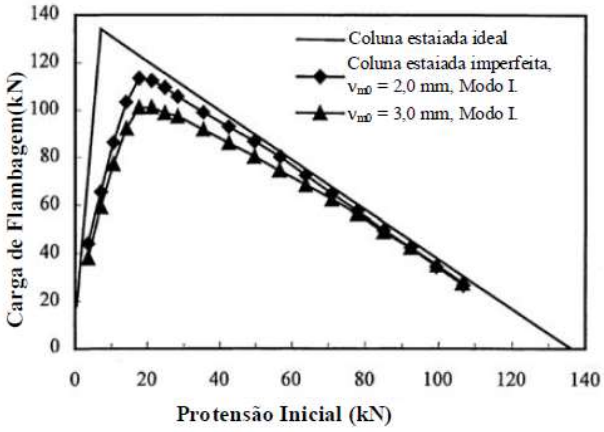


Figura 25 – Gráfico da relação entre a carga de flambagem e a protensão inicial [25].

Comparando resultados teóricos e experimentais, o elemento PEP para imperfeição inicial e um procedimento interativo incremental podem determinar o comportamento não-linear deuma coluna estaiada imperfeita com precisão.[25]

1.5. Estudo da coluna estaiada por Jan Van Steirteghem [26]

Steirteghem [26] estudou o comportamento da coluna com um sistema de restrição duplo, onde foi realizado um estudo numérico bidimensional, como mostra a **Figura 26**.

O estudo foi limitado em um tubo circular de aço com os seguintes parâmetros: seção transversal, espessura da parede do tubo, área dos estais, área dos braços, força de protensão e ângulo de abertura entre os braços. Foram realizadas duas tentativas para medir a eficiência das colunas. A primeira, levando em consideração a constante de volume do material e o valor da carga máxima de flambagem. A segunda, considerando uma dada carga de flambagem e o mínimo valor de volume de material necessário para sustentá-la.

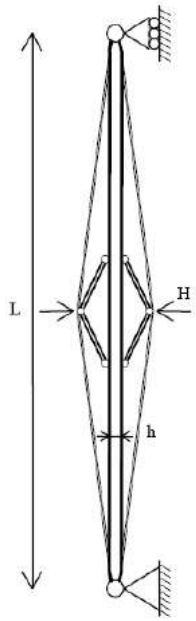


Figura 26 – Modelo de restrição da coluna [7].

Não foi levada em consideração a imperfeição inicial na coluna principal e admitiu-se que a mesma foi considerada como completamente rotulada nas extremidades. As barras deste sistema podem estar fixadas ou rotuladas na coluna central. As ligações entre os estais e os braços são rotuladas. A **Figura 27** mostra os modos de flambagens estudados.

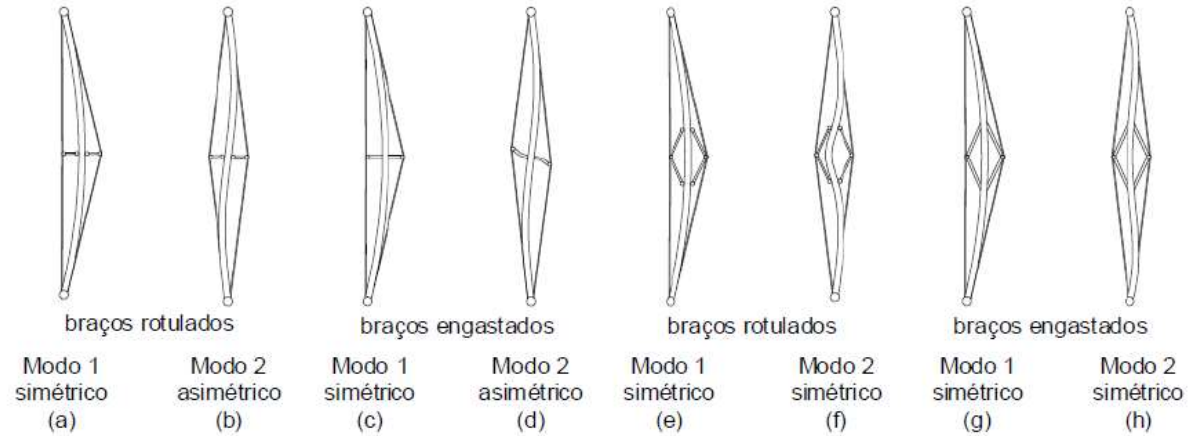


Figura 27 – Modos de flambagem para as diversas colunas estaiadas estudadas [7].

A **Figura 28** mostra os resultados onde o valor máximo atingido para a carga de flambagem da coluna com um sistema de travamento rotulado ocorre para a razão de 1/3, que corresponde a um comprimento de flambagem de L/3 e a uma carga máima obtida de 9 vezes o valor da Carga de Euler.

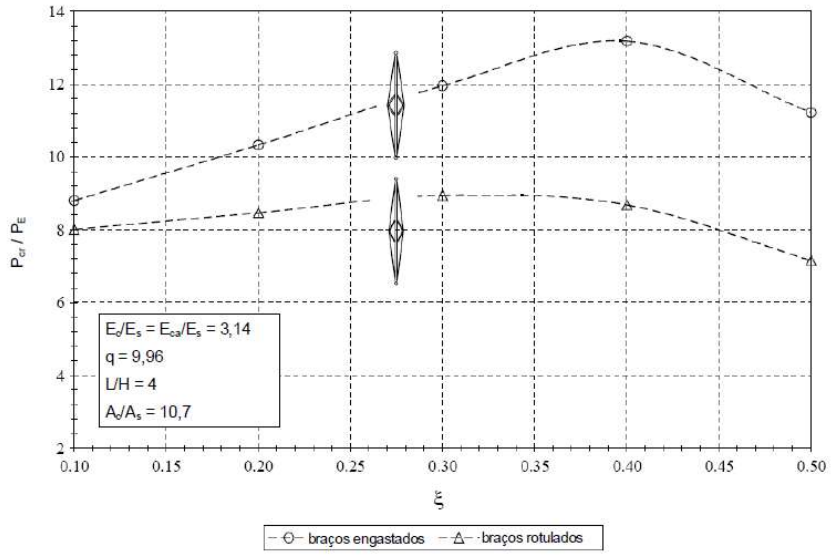


Figura 28 – Efeito do ângulo de abertura entre os braços [7].

1.6. Estudo da coluna estaiada por Saito [27] [28]

Dentre os estudos de colunas estaiadas, o de Saito [27], [28] é o mais completo, conseguindo abranger quase todos os efeitos que atuam na coluna principal.

Saito, em seu primeiro trabalho, abordou o efeito pós-flambagem na coluna estaiada. Um dos métodos utilizados para formular a modelagem da coluna é através da energia potencial total em conjunto com o método de Rayleigh-Ritz. Utilizou-se modelagem numérica através do programa ABAQUS como forma de comparação dos resultados. Para isso considerou:

- A coluna como simplesmente apoiada;
- Ligações rígidas entre a coluna central e as barras perpendiculares e rotuladas entre os estais com a coluna central e as barras perpendiculares;
- Carregamento axial na coluna, sem excentricidade e admitindo a coluna perfeitamente reta;
- As deformações axiais dos braços e a deformação por flexão dos estais foram ignoradas;
- Os estais afrouxam quando entram em compressão, pois não tem resistência a compressão;
- A análise como puramente elástica, visto que a relação tensão-deformação é completamente linear no momento do afrouxamento dos estais;
- Alteração na geometria devido a aplicação da protenção é ignorada;

Também foram considerados dois modos de flambagem: simétrico e assimétrico, como mostra a **Figura 29**. Quanto aos modos de deformação dos braços, de acordo com a **Figura 30**, dependem do estado de tensão dos estais:

- Tipo A – onde todos os estais afrouxam;
- Tipo B – onde todos os estais estão ativos;
- Tipo C – onde dois estais estão ativos.

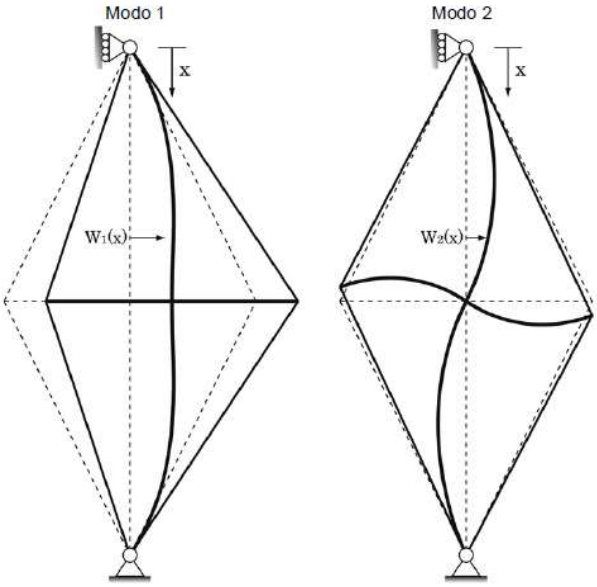


Figura 29 – Modos de flambagem da coluna: simétrico e assimétrico [6] [7].

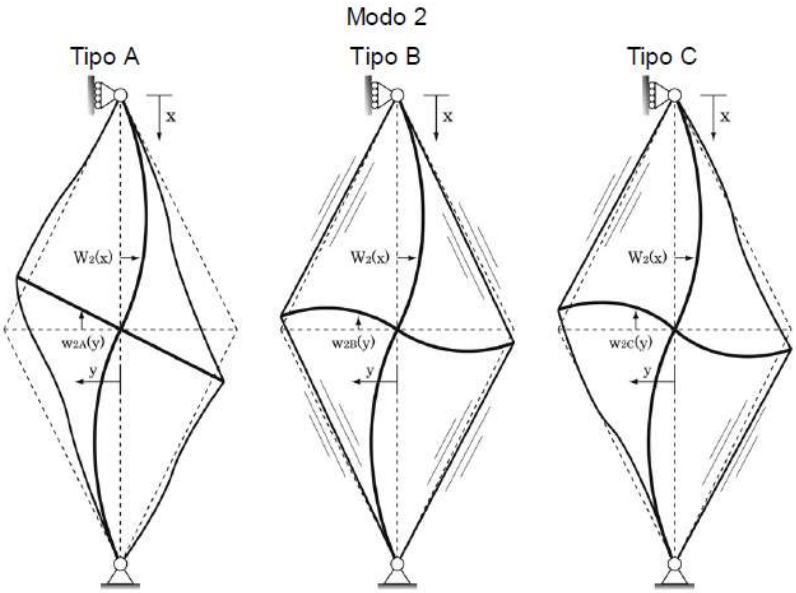


Figura 30 – Tipos de flambagem no modo 2 [6] [7].

Saito [27], [28] também realizou análises numéricas utilizando a mesma coluna estaiada que Hafez [23]. As figuras a seguir apresentam os resultados para a variação do comprimento do braço (**Figura 31**), variação do diâmetro dos estais (**Figura 32**) e variação do módulo de elasticidade dos estais (**Figura 33**).

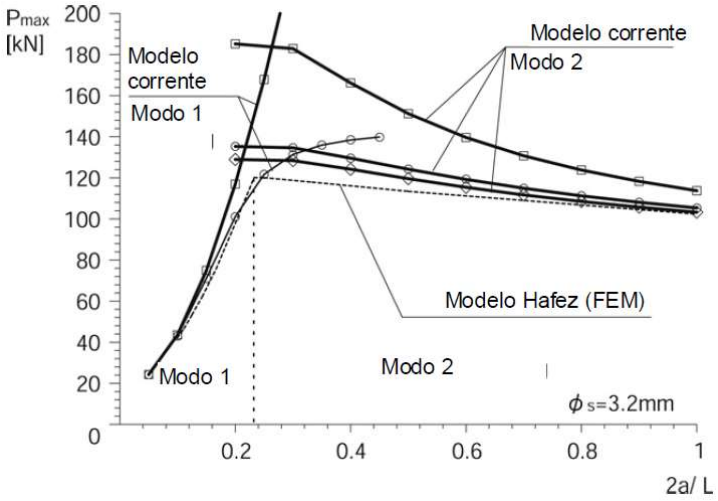


Figura 31 – Variação no comprimento dos braços [6] [7].

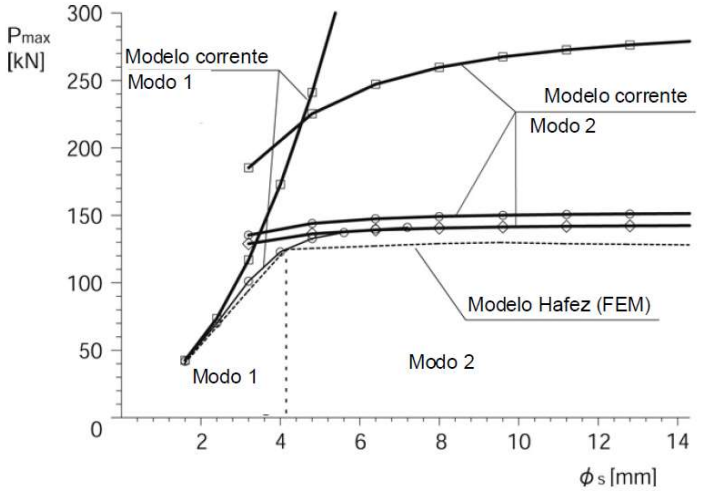


Figura 32 – Variação do diâmetro dos estais [6] [7].

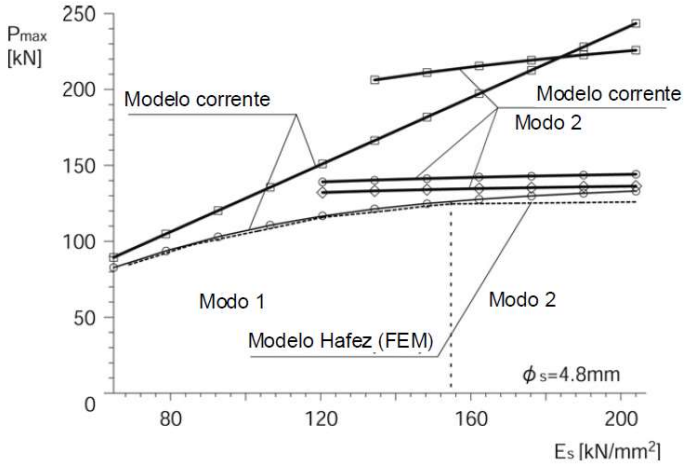


Figura 33 – Variação do módulo de elasticidade dos estais [6] [7].

Saito [27], [28] coletou oito pontos para investigar as mudanças no estudo pós-flambagem, como por exemplo a variação da imperfeição inicial para os modos 1 e 2, como mostram a **Figura 34** e **Figura 35**.

Com isso, foi desenvolvido um modelo numérico através do programa de elementos finitos ABAQUS afim de comparar os resultados obtidos com o modelo analítico. A **Figura 36** e **Figura 37** apresentam os resultados pós-flambagem do modelo numérico comparados ao modelo analítico.

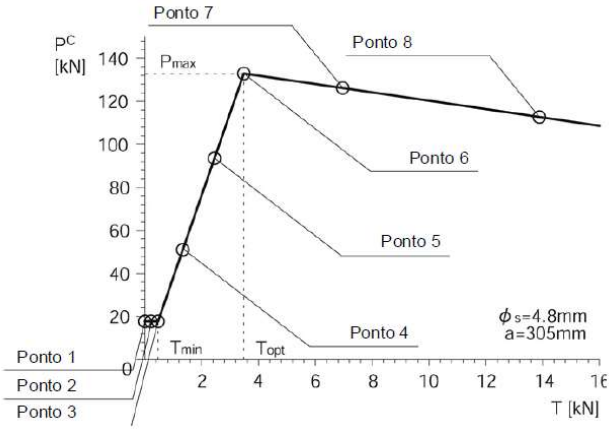


Figura 34 - Carga crítica de flambagem versus protensão inicial para o modo 1 [6] [7].

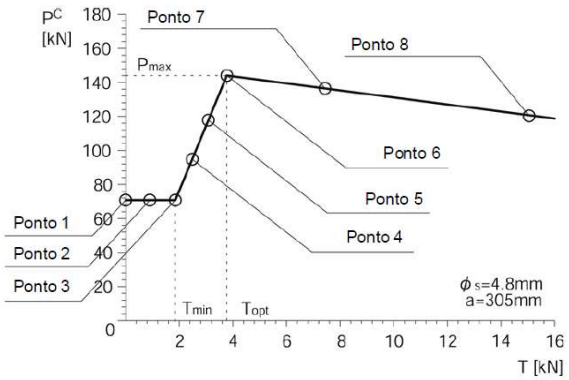


Figura 35 – Carga crítica de flambagem versus protensão inicial para o modo 2 [6] [7].

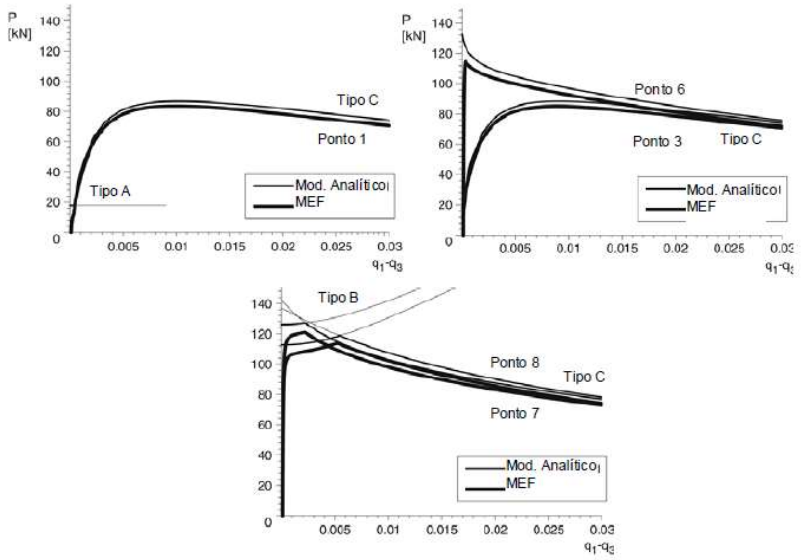


Figura 36 - Gráficos comparativos para o modo 1 entre o modelo analítico e o modelo numérico [6] [7].

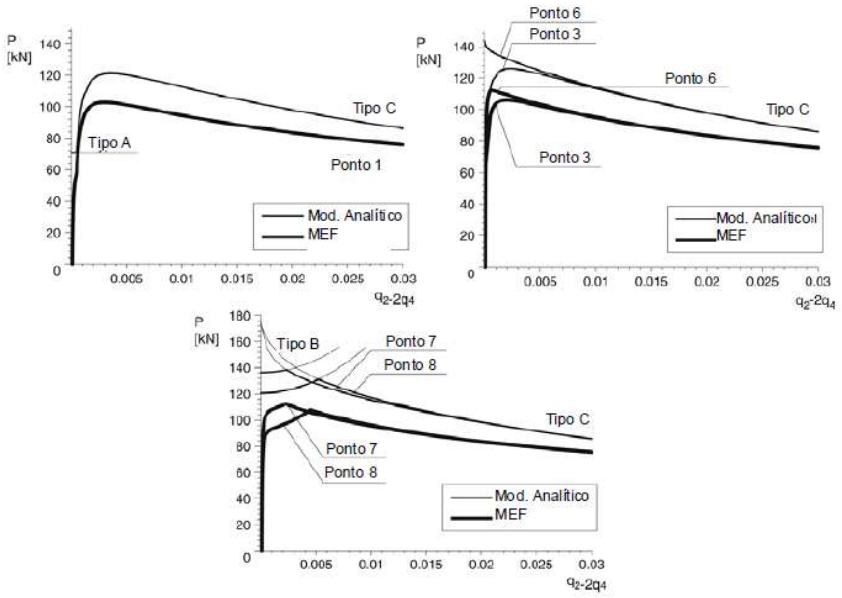


Figura 37 – Gráficos comparativos para o modo 2 entre o modelo analítico e o modelo numérico [6] [7].

Em um estudo mais recente, Saito [28] verifica a influência da interatividade dos dois modos de flambagem citados anteriormente, realizando análises não lineares através do programa ABAQUS, utilizando a mesma coluna estaiada apresentada. Com isto, foi verificado que a flambagem interativa vem a ser o pior caso, com uma

redução proporcional na máxima capacidade de carga, quando o maior modo de flambagem atua na resposta da flambagem crítica.

Com este estudo, conclui que o comportamento da flambagem interativa vem a ser fundamental com níveis baixos da máxima capacidade de carga quando o modo 2 de flambagem é crítico, especialmente onde a máxima capacidade de carga para os modos 1 e 2 coincidem. Contudo, seu trabalho baseia-se em uma coluna com uma esbeltez em média de 270 e utiliza barras como cabos, o que confere uma rigidez maior do que comparado a um modelo que utilize estais.

1.7. Estudo da coluna estaiada por Araujo [6] [7]

O estudo de Araujo [6], [7], em 2005 e 2009, foi baseado nas colunas de aço estaiadas e protendidas utilizadas na obra do Rock in Rio III. Em 2005 seus estudos estavam concentrados na análise dos resultados teóricos e experimentais, utilizando-se do programa de análise estrutural de elementos finitos ANSYS [20]. Em seu trabalho foram contemplados: os efeitos da imperfeição inicial, a rigidez longitudinal dos estais e a variação dos níveis de protensão. Além disso, foram avaliadas as dificuldades relacionadas ao processo de fabricação das colunas, assim como a realização do ensaio utilizando o tamanho real da coluna e realizado com a coluna na posição horizontal. Foram analisadas as deformações, deslocamentos e modos de flambagem do modelo experimental com o modelo teórico, obtido através do ANSYS [20]. Como conclusão do trabalho, Araujo [6], [7] afirmou que a simples utilização de estais pode aumentar em 100 % o valor da carga última da coluna em 200 %, quando uitilizada a protensão ótima. Além disso,concluiu que este aumento da capacidade de carga deve-se a redução do comprimento efetivo de flambagem da coluna em pelo menos 50 %, em função do travamento central obtido pela cruzeta. Visto as dificuldades de realizar o ensaio da coluna na vertical, com dimensões da coluna em escala real, de forma tridimensional, ensaiou a coluna disposta horizontamente, o que originou uma nova forma de ensaio, com uma série de medidas e cuidados a serem tomados.

Em continuação a seus estudos, em 2009, Araujo [6], [7] estudou experimentalmente mais três colunas semelhantes às anteriores. Em duas delas foram utilizados cabos de aço para os estais e na última foi utlizada vergalhão como

estai. Nas colunas que utilizavam cabos de aço como estais houve flambagem no primeiro modo, enquanto que a que utilizou vergalhão como estai flambou no segundo modo, concluindo que a maior rigidez dos cabos é responsável pela flambagem no segundo modo. No seu novo estudo, foi utilizado redes neurais, que possibilitou a criação de novos dados, mais simples e mais fáceis de utilização, otimizando o tempo das simulações computacionais. Ainda foi abordado neste estudo o comportamento dinâmico através de análise modal e análise transiente com aplicação de carga súbita no topo da coluna (**Figura 38**).

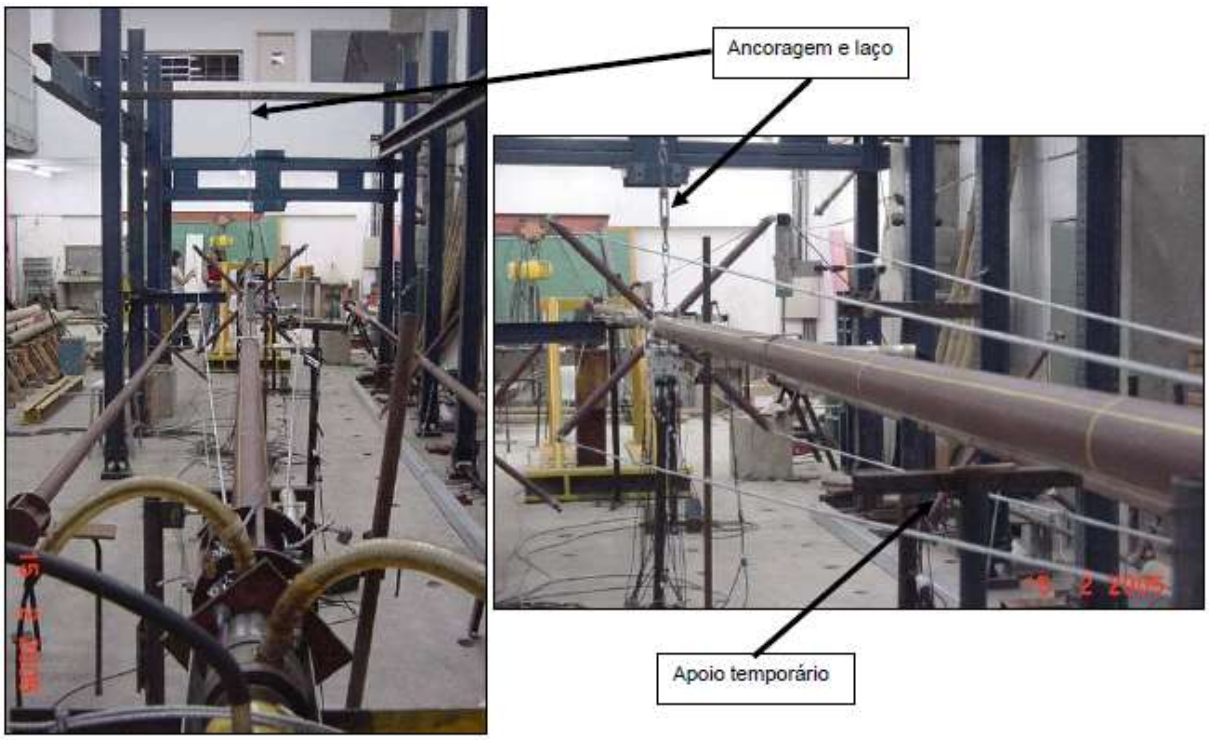


Figura 38 – Ensaio da coluna de Araujo [6] [7]

1.8. Estudo da coluna estaiada por Wadee [29]

Wadee [29], em 2012, faz uma breve revisão dos estudos desenvolvidos até então e apresenta procedimentos e equações para o cálculo da resistência de colunas de aço esbeltas estaiadas e protendidas, como mostrado na **Figura 39**.

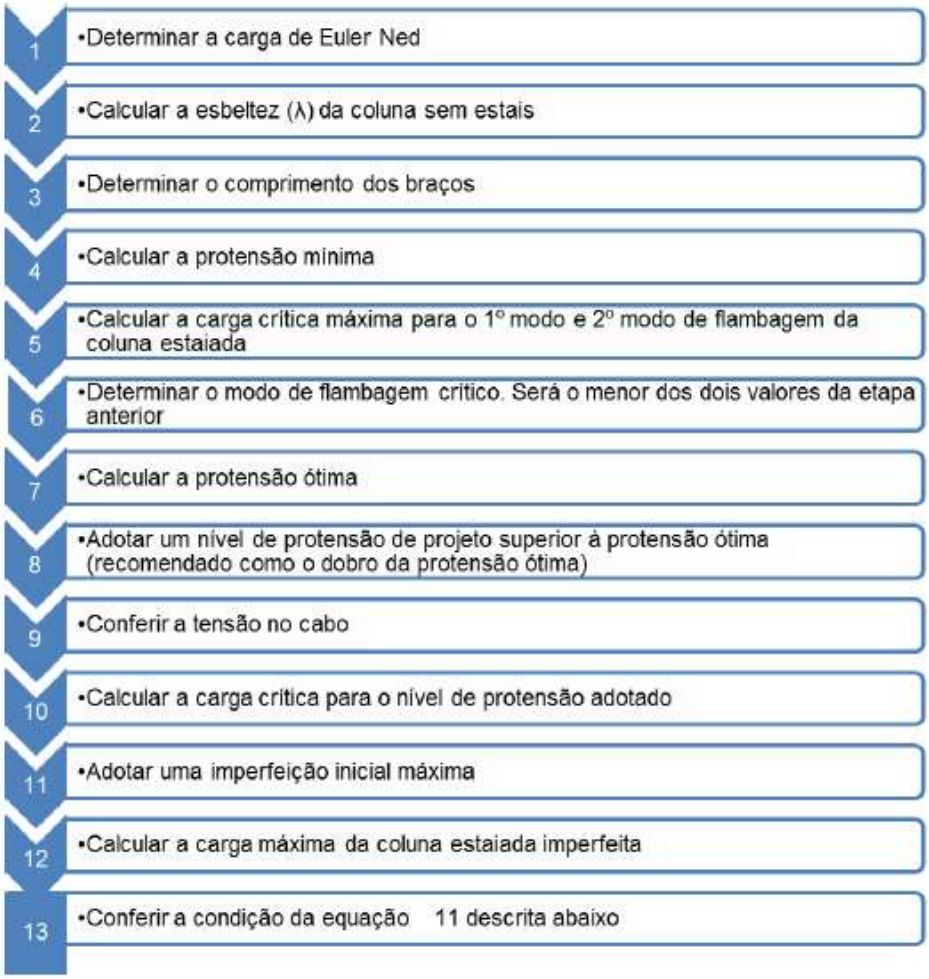


Figura 39 – Procedimento de cálculo da carga admissível estabelecido por Wadee [29]

$$\frac{Ned}{Nmax / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \qquad \text{(Eq. 11)}$$

Onde:

Ned: carga de Euler da coluna sem estais;

Nmax: máxima carga da coluna estaiada imperfeita;

γ_{M1}: fator de segurança para a máxima carga da coluna imperfeita.

Nos trabalhos de Wadee [29] foi considerado $\gamma_{M1} = 1,0$.

No seu estudo de colunas estaiadas com cruzetas simples ele chega a duas possibilidades de instabilidade global: o modo simétrico (primeiro modo de flambagem) e o modo antissimétrico (segundo modo de flambagem). Segundo ele, as

colunas ainda apresentam um comportamento pós-flambagem chamado modo assimétrico interativo.

Wadee [29] considerou o diâmetro dos estais e o comprimento da coluna principal como constantes, enquanto que o comprimento do braço era variável afim de representar todas as possibilidades de flambagem. Nos seus experimento, o nível de protensão variou de 0 a 3 vezes a protensão ótima calculada. Como nível de imperfeição inicial foi adotado: L/1000, L/400 e L/200.

Ao final do seu trabalho, ainda concluiu que os níveis de protensão utilizados dividem as colunas em dois grandes grupos: colunas onde o nível de protensão inicial aplicada foi inferior a 0,4 Topt e colunas onde o nível de protensão inicial foi superior a 0,4 Topt. No primeiro grupo, a carga de flambagem é maior que a carga teórica, enquanto no segundo a carga teórica foi maior que a carga crítica de flambagem experimental. Segue a **Figura 40** para ilustrar tal situação.

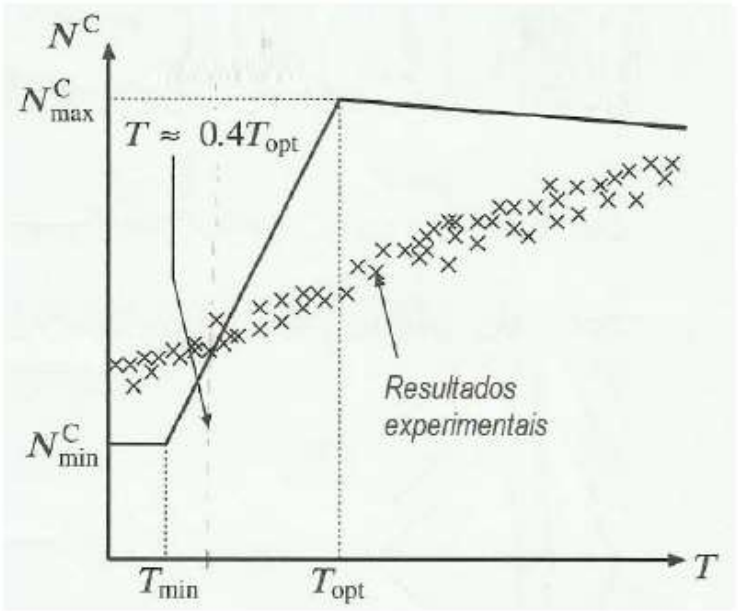


Figura 40 – Resultados experimentais versus carga teórica por Wadee [29].

1.9. Estudo da coluna estaiada por Serra et al. [30]

Serra et al. [30] realizaram ensaios experimentais de colunas estaiadas e protendidas com 12 metros de comprimento, considerando os seguintes elementos:

utilização de estais, esbeltez da coluna, variação do diâmetro da seção da coluna, tipo de aço, diâmetro dos cabos e nível de protensão. Para isto utilizou quatro configurações diferentes de coluna, como mostra a **Tabela 1**. O estudo contemplou dois tipo de aço carbono distintos, dois diâmetros de estais diferentes e cinco níveis de protensão inicial.

Tabela 1 – Configuração das colunas utilizadas no estudo de Serra et al. [30].

Name	Steel profile	Extracted from	Test #	Elastic modulus (E)	Yield stress (σ_y)		Ultimate stress (σ_u)	Ultimate strain (ϵ_u)
				Measured	Nominal	Measured	Measured	Measured
C01	CHS 101.8 × 8.0	Main column	1	209.89	355	369.32	540.55	18.38%
			2	206.08		369.27	536.75	12.03%
			3	219.26		*	566.10	*
			Mean	211.74		369.30	541.24	15.20%
			cov	3.20%		0.01%	2.95%	29.54%
C02	CHS 101.8 × 8.0	Main column	1	205.67	690	796.17	854.70	3.67%
			2	206.67		812.55	859.72	5.24%
			3	200.88		785.89	820.80	*
			Mean	204.41		798.20	845.07	4.46%
			cov	1.51%		1.68%	2.51%	24.89%
C03	CHS 139.7 × 6.3	Main column	1	202.92	355	*	558.79	*
			2	*		*	*	*
			3	208.85		*	576.42	*
			Mean	205.89		–	567.61	–
			cov	2.04%		–	2.20%	–
C04	CHS 139.7 × 6.3	Main column	1	210.13	690	769.65	857.41	4.12%
			2	213.74		775.02	848.67	3.03%
			3	206.62		779.14	864.72	*
			Mean	210.16		774.60	856.93	3.57%
			cov	1.69%		4.76	8.04	0.01

Os ensaios realizados foram projetados para obter informações suficientes para a compreensão e análise do comportamento ao longo das colunas. Utilizou-se os seguintes parâmetros: força externa aplicada pela célula de carga, tensão em cada um dos cabos protendidos e forças externas, deslocamentos lateral e axial no meio da coluna, deformação da coluna.

O trabalho concluiu que:

- Adicionando o sistema de estais a uma coluna muito esbelta tem-se um aumento na carga crítica de flambagem, conclusão similar de colunas menos esbeltas já evidenciada em outros estudos;
- A seção da coluna exerce efeito direto na carga crítica de flambagem com a mudança de sua esbeltez e deve ser representada por outro método;
- Ao aumentar a carga inicial de protensão nos cabos, a carga crítica é incrementada e o valor de três vezes a carga ótima não deve ser tomado como limite de dimensionamento.

- As colunas protendidas são altamente sensíveis a geometria e imperfeição.

Além de estudo experimental, métodos analíticos estudados anteriormente por outros autores foram utilizados para calcular as cargas críticas de flambagem elástica e das colunas estaiadas. A proposta de Wadee mostrou tendências qualitativas semelhantes quando comparados com os resultados experimentais. No entanto, refletindo a natureza empírica da método, os resultados podem tornar-se progressivamente inseguros quando aplicado aos casos que não se enquadram a esta gama de aplicabilidade. Os autores estão desenvolvendo estudos que abordam estas questões.

1.10. Estudo da coluna estaiada por Yu e Wadee [31]

Yu e Wadee [31] realizaram estudos numéricos e analíticos de colunas de aço estaiadas e protendidas com múltiplos braços ao longo do seu comprimento. Desenvolveram o modelo através do software de elementos finitos ABAQUS. Os parâmetros considerados foram: variação do diâmetro dos estais, a posição do braço ao longo do comprimento da coluna, imperfeição inicial da coluna, entre outros.

A **Figura 41** mostra o primeiro caso com um braço, uma restrição no meio da altura da coluna, e outros dois com múltiplos braços. O triple-bay mostra-se mais eficaz que o double-bay, devido à falta de rigidez lateral no meio do vão no último caso. Caso as cruzetas do triple-bay apresentem o mesmo comprimento, nota-se uma redução na capacidade de carga, assemelhando-se ao double-bay.

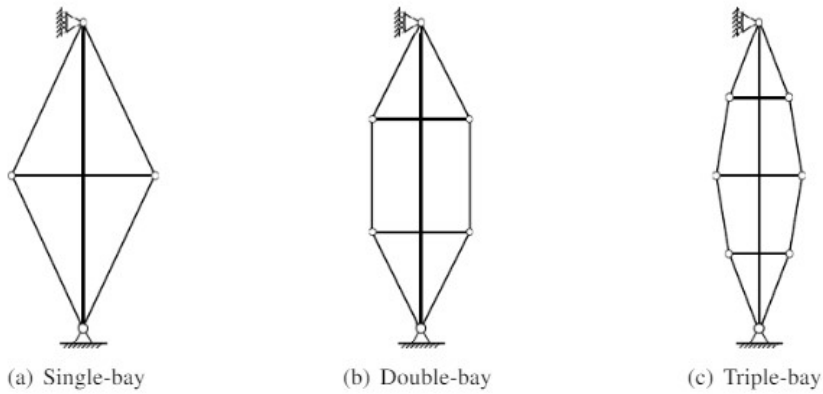


Figura 41 – Modelos de colunas com um braço (a) e múltiplos braços (b e c) [31].

Yu e Wadee [31] combinaram os dois modos de flambagem de colunas estaiadas triple-bay, usando-os para desencadear a interação entre instabilidade na análise de elementos finitos.

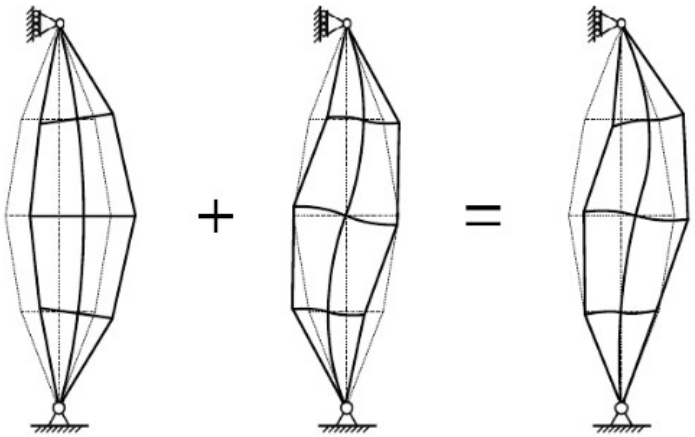


Figura 42 – Combinação dos Modos de flambagem da coluna triple-bay [31].

Como conclusão do estudo, foi verificado que o comportamento pós-flambagem da coluna estaiada e protendida triple-bay está intimamente ligada a geometria da estrutura. Quanto às imperfeições consideradas, constatou-se que quanto maior a imperfeição inicial, menor será sua capacidade de carga. Os resultados também mostram que a interação entre instabilidade é a situação mais perigosa, e isto tende a ocorrer quando o Modo 2 é o modo de flambagem crítico dominante. Esta conclusão é validada pelo modelo analítico, que permite uma análise mais detalhada de como os dois modos distintos interagem.

1.11. Estudo da coluna estaiada por Yu, Wadee et al [32]

Yu, Wadee et al. [32] desta vez estudam a estabilidade de colunas de aço estaiadas e protendidas com 3 braços no sistema estrutural. O trabalho concentrou-se em uma coluna principal com um sistema estrutural que consiste em 3 braços no meio do comprimento da coluna, com ângulos de 120 graus entre suas cruzetas, mantendo a simetria no plano xy, conforme **Figura 43**. No presente trabalho, o comprimento da coluna é fixo, contudo o diâmetro dos estais varia de 1,6 mm a 13 mm, considerando sete valores neste intervalo. Considerou-se cinco comprimentos dos braços variando de 152,5 mm a 762,5 mm. Foram adotadas diversas imperfeições iniciais.

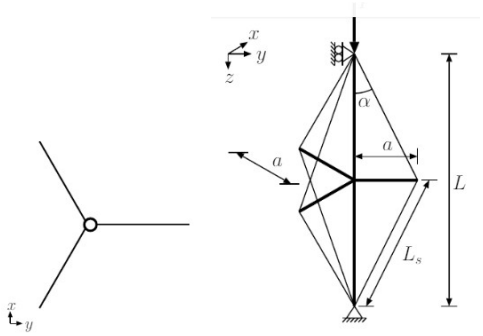


Figura 43 – Modelos de colunas com 3 braços [32].

A partir deste estudo, que diz respeito ao comportamento de colunas de aço estaiadas e protendidas com 3 braços, verificou-se que o comportamento de flambagem de uma coluna com este tipo de configuração pode ser simétrico ou anti-simétrico, dependendo da rigidez do sistema estrutural. Para sistemas com diâmetros menores de estais ou braços com comprimentos maiores, o Modo 1 é crítico.

Demonstrou-se a diferença no comportamento das colunas com a mesma imperfeição, porém dispostas em diferentes direções. Notou-se a limitação a um comportamento puramente elástico, que é perfeitamente justificada pela esbeltez dos principais elementos da coluna considerada. Para colunas estaiadas onde a coluna principal é menos esbelta, no entanto, um modelo seria absolutamente necessário para obter previsões realistas de capacidade de carga. Isto seria particularmente útil para mobilizar a capacidade de tais colunas com aços de resistência mais elevada, devido ao interesse crescente e importância prática.

1.12. Estudo da coluna estaiada por Servitova e Machacek [10]

Motivados pelos estudos de Araújo [6], [7], Servitova e Machacek [10] em 2011 testaram no CTU – Czech Technical University a primeira coluna estaiada protendida em aço inox. Para tal, foi utilizado como material o aço inoxidável austenítico 1.4301 em lugar ao aço carbono utilizado anteriormente por Araújo [6], [7]. O modelo consistiu em uma coluna de 5 m de comprimento, 50 mm de diâmetro externo e 2 mm de espessura e braços perpendiculares à coluna principal de 250 mm, 25 mm de diâmetro

externo e 1,5 mm de espessura, utilizando cabos (estais) para protensão de 4 mm de diâmetro (**Figura 44**)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Durante os testes, as deflexões foram medidas em sete pontos e em duas direções perpendiculares por potenciômetros fixados na armação experimental. Os cabos tracionados foram medidos por medidores de tensão [10], [14].

Conhecida a imperfeição inicial da coluna, sua deflexão foi medida através de digitalização 3D. Contudo, não há informações sobre a magnitude da imperfeição experimental fornecida na referência [10], [14].

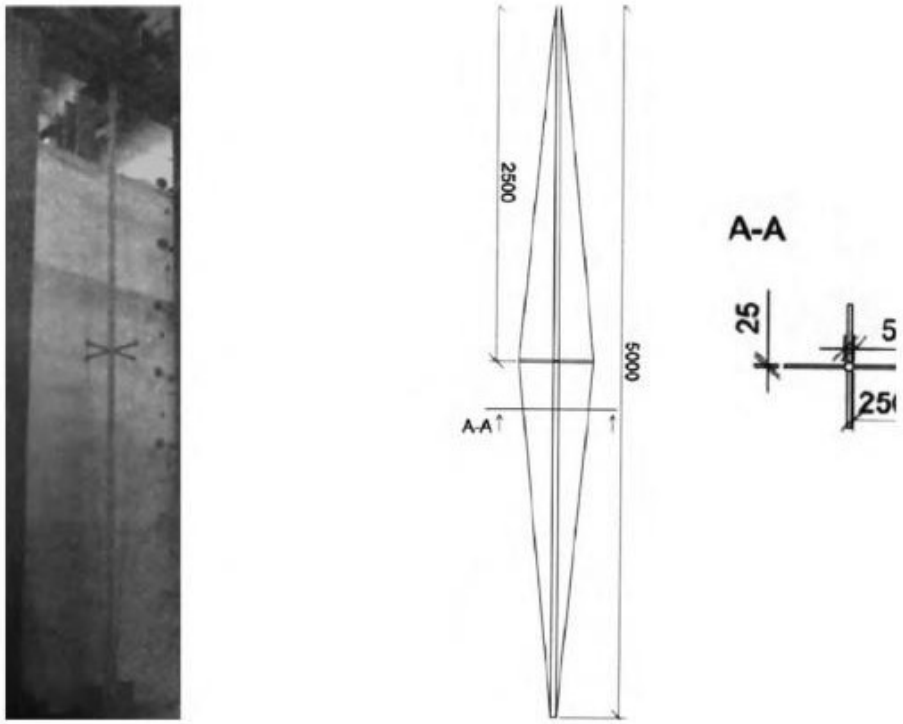


Figura 44 – Geometria e dimensões da coluna de aço inox de Servitova e Machacek [10]

Foram realizados três ensaios com a coluna experimental na posição vertical. Dentre estes, um dos ensaios foi feito com a coluna sem cabos. Os demais, com os três níveis de protensão nos cabos. No ensaio sem cabos, a carga crítica de flambagem observada foi de 7,04 kN. Nos ensaios com cabos protendidos a 3,9 kN, 4,54 kN e 5,44 kN, ficou determinada a carga crítica de flambagem de 17,75 kN, 14,93 kN e 16,23 kN, respectivamente.

Além do ensaio experimental, Servitova e Machacek [10] desenvolveram a modelagem numérica baseada no modelo computacional por método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS [20].

Para o modelo computacional desenvolvido, foram adotados os elementos descritos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para material multilinear, de geometria não linear, com propriedades mecânicas em MPa. Na tabela mostra os dois tipos de materiais utilizados: aço inoxidável para a coluna principal e os braços, aço carbono para os estais.

Tabela 2– Propriedades mecânicas dos aços utilizados na modelagem numérica de Servitova e Machacek [10].

Aço	**E_{tan} cabo**	**E_{tan} aço**	**E aço**	**E estais**	**ν aço**	**ν estais**	**σ_y estais**	**σ_y aço**
Carbono	10×10^3	205×10^3	205×10^3	100×10^3	0,3	0,3	750	380
Inox	10×10^3	-	204×10^3	100×10^3	0,3	0,3	750	-

Testadas as colunas de Servitova e Machacek [10], foram exibidos como resiultados, para uma amplitude máxima de L/500 correspondente a 10 mm (NBR 8800:2008) [33], uma carga crítica de flambagem de 23,61 kN para um nível de protensão de 3,9 kN; 30% maior que o reultado experimental. Para o nível de protensão de 4,54 kN, a coluna apresentou cargas inferiores aos demais níveis de protensão utilizados, devido uma inclinação na coluna causada por uma imperfeição muito maior. Já para o nível de protensão de 5,44 kN, chegou-se a uma carga crítica de flambagem de 21,9 kN que correspondeu a um resultado 35 % maior comparado ao resultado experimental [14]. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** seguem os resultados da modelagem numérica para a primeira coluna em aço inoxidável.

Tabela 3 – Resultados da modelagem numérica de Servitova e Machacek [10].

Imperfeição inicial		**10mm**		
Força de protensão	s/estais	3,9 kN	4,54 kN	5,44 kN
P_{cr}	-	23,61 kN	Cargas inferiores	21,9 kN

2. MODELO NUMÉRICO

2.1. Considerações Gerais

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar o processo de modelagem de uma coluna de aço inoxidável estaiada e protendida. A modelagem numérica adotada neste trabalho baseia-se no método dos elementos finitos. Tal método tem sido largamente utilizado em simulações de problemas complexos. A modelagem foi executada a partir de um estudo paramétrico, com linguagem de programação de modelagem do ANSYS, o APDL.

O programa ANSYS [20] possibilita a execução dos mais diversos tipos de análises, como as estruturais, fluidodinâmicas, térmicas, eletromagnéticas e multifísicas. O ANSYS hoje segue com a versão 17.0 [20]. Contudo a versão utilizada para a elaboração do presente trabalho foi a 15.0.

A modelagem das colunas foi executada através de um modelo paramétrico para colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas, gerado através de um arquivo APDL. Para a elaboração do modelo, foram necessários dados relativos à geometria estrutural, às propriedades dos materiais e às propriedades dos elementos de simulação computacional mais condizentes com o estudo proposto.

Quanto a parametrização do modelo numérico, no modelo criado pode-se alterar o tipo de elemento de simulação estrutural, suas propriedades de material e as propriedades geométricas; é possível também alterar o valor da imperfeição geométrica inicial, a quantidade de curvaturas de imperfeições iniciais, a quantidade de braços e estais, a quantidade e tamanho dos elementos para uma análise mais apurada, a altura da coluna, e a inclinação dos estais [35], [36].

A primeira etapa do trabalho consiste, com base no trabalho desenvolvido o por Almeida [35], [36], verificar a calibração do modelo de colunas de aço carbono estaiadas e protendidas estudadas por Araujo [6], [7] e de colunas de aço inoxidável austenítico estaiadas e protendidas estudadas por Servitova e Machacek [10]. Ainda, segundo Almeida [35], a finalização do documento APDL possibilita a generalização do modelo para a simulação de colunas com propriedades totalmente diferentes.

Feita a calibração dos modelos, a segunda parte do trabalho compreende a análise paramétrica de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas com três tipos de aço inoxidável: austeníticos, ferríticos e duplex, utilizando os mesmos dados geométricos de Servitova [10].

2.2. Descrição do Modelo Numérico

O modelo numérico foi criado considerando dados relativos a geometria da estrutura, as condições de apoio, imperfeições, tipo de material e de carregamento. As propriedades dos materiais foram adequadas aos três tipos de aços inoxidáveis aqui citados e ainda ao aço carbono.

O sistema de travamento das colunas, formados pelos braços, pode ser em cruz ou em X. Para o modelo, o ângulo inicial de rotação para o sistema cruz corresponde a 0 (zero) grau e para o sistema X é de 45 graus. O que difere basicamente um sistema do outro é que no sistema cruz a imperfeição inicial está na direção dos braços, enquanto que no sistema X a imperfeição inicial é defasada em 45 graus em relação a direção dos braços [35], como mostrado na **Figura 45**. Todos os modelos numéricos tratados neste trabalho referem-se a colunas com sistema de travamento tipo X. Este sistema foi escolhido seguindo o modelo de Servitova e Machacek [10].

Além da necessidade de adaptação do modelo numérico, como citado anteriormente, foram analisados modelos com 4 tipos de imperfeições e alguns níveis de protensão. Os valores das imperfeições foram aplicados ao modelo através de funções matemáticas.

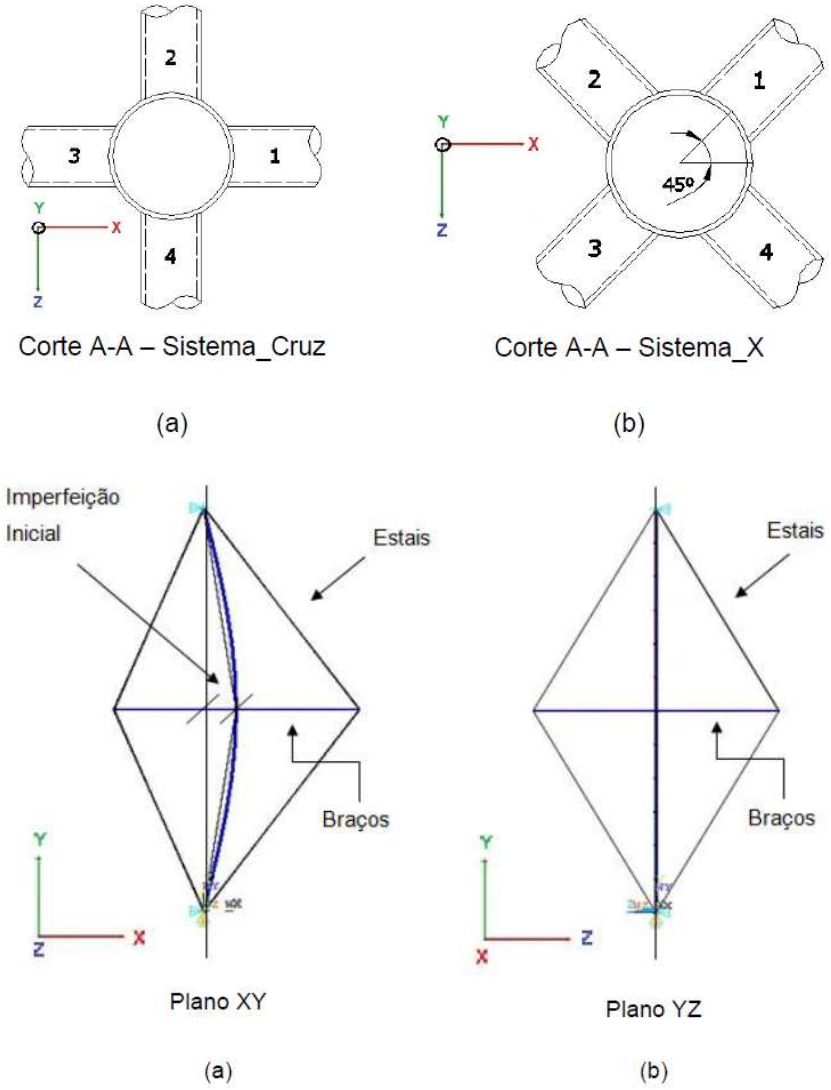


Figura 45 - Configuração dos Sistemas: (a) Cruz, (b) X – Almeida [35].

A escolha dos valores das imperfeições iniciais na coluna deu-se em função das imperfeições admitidas em normas: L/500 é a imperfeição máxima admitida pela norma brasileira NBR 8800 [33] e L/300 é a imperfeição máxima admitida pela norma europeia (EUROCODE) [34]. Como a coluna tem comprimento de 5 metros, os valores de L/500 e L/300 correspondem a 10 mm e 16,7 mm, respectivamente. Foram consideradas para os modelos, com intuito de uma gama maior de informações acerca das análises, quatro imperfeições iniciais: L/625, L/500, L/330 e L/250, que correspondem respectivamente a 8, 10, 15 e 20 mm.

Os níveis de protensão diversos utilizados nos modelos justificam-se em função da descoberta do valor da protensão ótima, protensão esta em que a estrutura obterá a sua maior carga crítica de flambagem.

Dados Geométricos

Seguem abaixo os dados geométricos utilizados para a modelagem:

Coluna principal:

- Altura da coluna estaiada: H = 5000 mm
- Diâmetro externo do tubo: Ø = 50 mm
- Espessura do tubo: t = 2 mm

Barras Perpendiculares (braços ou cruzeta):

- Comprimento das barras perpendiculares: l_d = 250 mm
- Diâmetro externo do tubo: $Ø_d$ = 25 mm
- Espessura do tubo: t_d = 1,5 mm

Estais:

- Diâmetro dos cabos: $Ø_t$ = 4 mm
- Deformação inicial dos cabos: variável (de acordo com cada protensão aplicada)
- Inclinação: 10 %

Foram adotadas como imperfeições geométricas iniciais, os seguintes valores nas análises numéricas:

- 8 mm: L/625
- 10 mm: L/500
- 15 mm: L/330
- 20 mm: L/250

2.3. Propriedades dos Materiais (Leis Constitutivas)

Foram consideradas as seguintes propriedades dos materiais utilizados:

- Módulo de Elasticidade: foi utilizada a curva de cada tipo de aço estudado, apresentado na **Figura 46**.
- Módulo de elasticidade dos cabos de aço para os estais: 100 GPa

- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Tensão de Escoamento dos estais: 750 MPa
- Módulo Tangente dos estais: 10 GPa

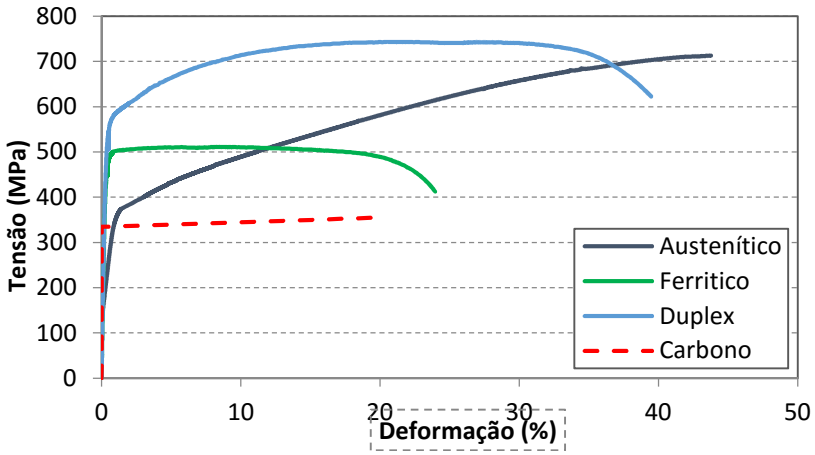


Figura 46 – Gráfico das curvas do aço carbono e dos aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex.

O aço inoxidável, ao contrário do aço carbono que apresenta um comportamento elástico-linear até atingir um patamar de escoamento definido, é um material que apresenta um comportamento não linear, como mostra a Figura 44. Por este motivo, a tensão de escoamento do aço inoxidável não é claramente definida, representada por uma tensão limite convencional de elasticidade correspondente a uma deformação de 0,2 %. Na **Figura 47** está representada a lei constitutiva do aço carbono e do aço inoxidável austenítico.

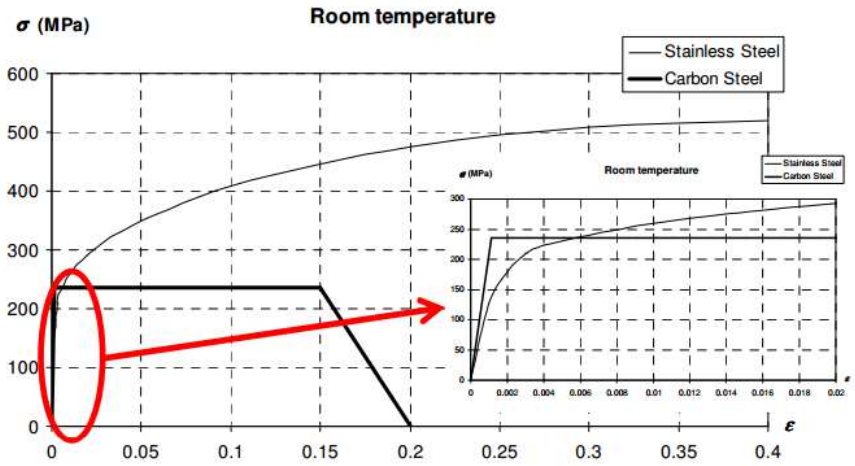


Figura 47 – Leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável [12].

2.4. Elementos de simulação

Os elementos finitos utilizados para a simulação da coluna e de seus braços, com elementos tri-dimensionais, foi o PIPE20, conforme sugerido por Araujo [6] [7], [35]. O elemento PIPE20 representa um elemento tubular uniaxial com capacidade de representação de esforços de tração e compressão, flexão e torção. Além disso, o PIPE20 apresenta seis graus de liberdade em cada nó [20], [35].

Para a representação dos estais, adotou-se o elemento LINK10. O elemento é definido por dois nós, uma área para sua seção transversal, uma tensão e as propriedades materiais isotrópicas. Este elemento apresenta características que permitem a simulação de elementos tri-dimensionais com três graus de liberdade em cada nó, podendo assim ser utilizado para a simulação de cabos [20], [35]. Este elemento de cabo 3D tem a característica original de uma matriz de rigidez bi-linear, resultando somente em um elemento de tração ou de compressão uniaxial. Ao utilizar a opção “tension-only” (somente tração), a rigidez é removida se o elemento entrar em compressão (simulação de um cabo frouxo) [6].

2.5. Etapas da modelagem

A modelagem das colunas consiste basicamente em três etapas: a declaração das variáveis e constantes do modelo, a geração dos nós dos elementos e a definição das condições de contorno.

Declaração de variáveis e constantes do modelo

A declaração de variáveis consiste:

- Na definição dos tipos de elementos de simulação do ANSYS a serem aplicados no modelo;
- Na definição das propriedades do material (coluna, braços e estais) como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de escoamento e módulo tangente ou curva real obtida em um ensaio de tração quando for o caso;
- Na definição do diâmetro e espessura das colunas e braços, assim como a área da seção dos estais e a deformação inicial dos cabos;

- Na definição do valor das imperfeições iniciais, assim como sua direção (x e z), do comprimento da coluna principal e de seus elementos, a quantidade de braços e de seus elementos.

Já nas constantes dos modelos são determinadas as equações que definem as extremidades de cada parte do sistema estrutural (coluna, braços e estais) e o ângulo inicial de rotação da geração dos nós e elementos dos braços. Conforme mencionado anteriormente, no presente trabalho foi utilizado o Sistema X.

A coluna foi considerada ideal, composta por 13 nós, consequentemente formada por 12 elementos, conforme a **Figura 48**.

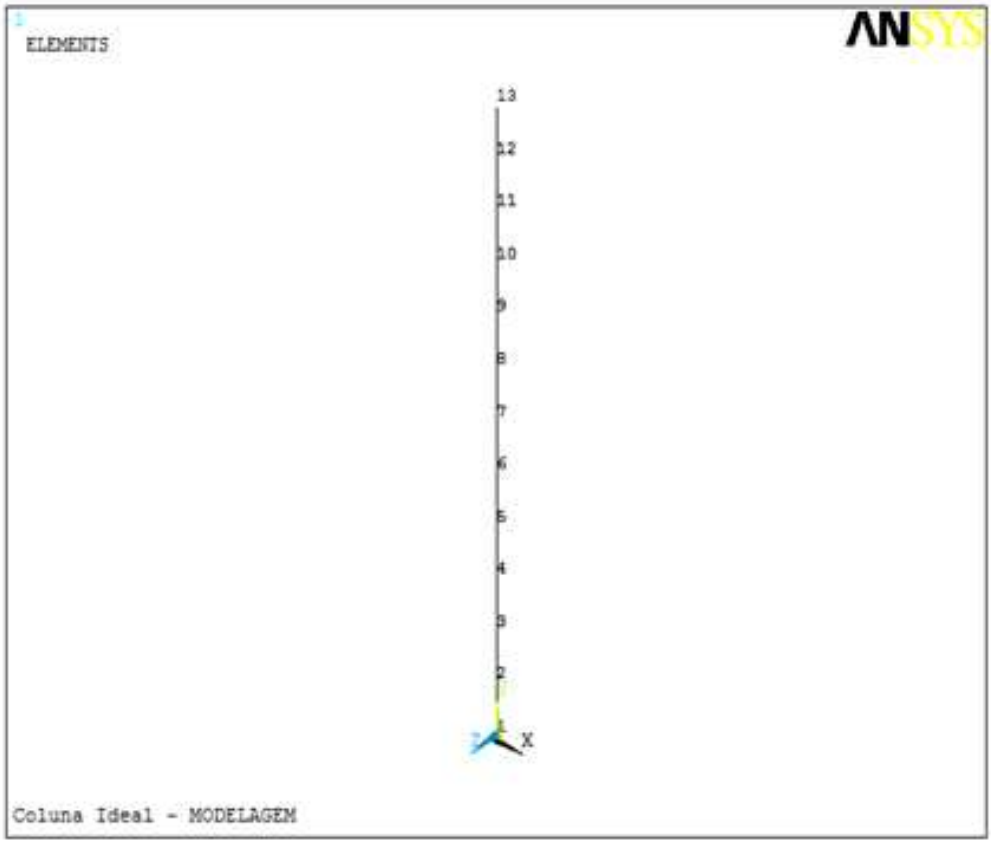


Figura 48 – Coluna dividida em 12 elementos [33].

Com isso, a coluna do modelo foi elaborada com 28 elementos: 12 elementos para colunas, 8 elementos para os braços e 8 também para os estais, conforme a Figura 49, que designa o número dos elementos; como os braços: 17 a 20; os estais: 21 a 28.

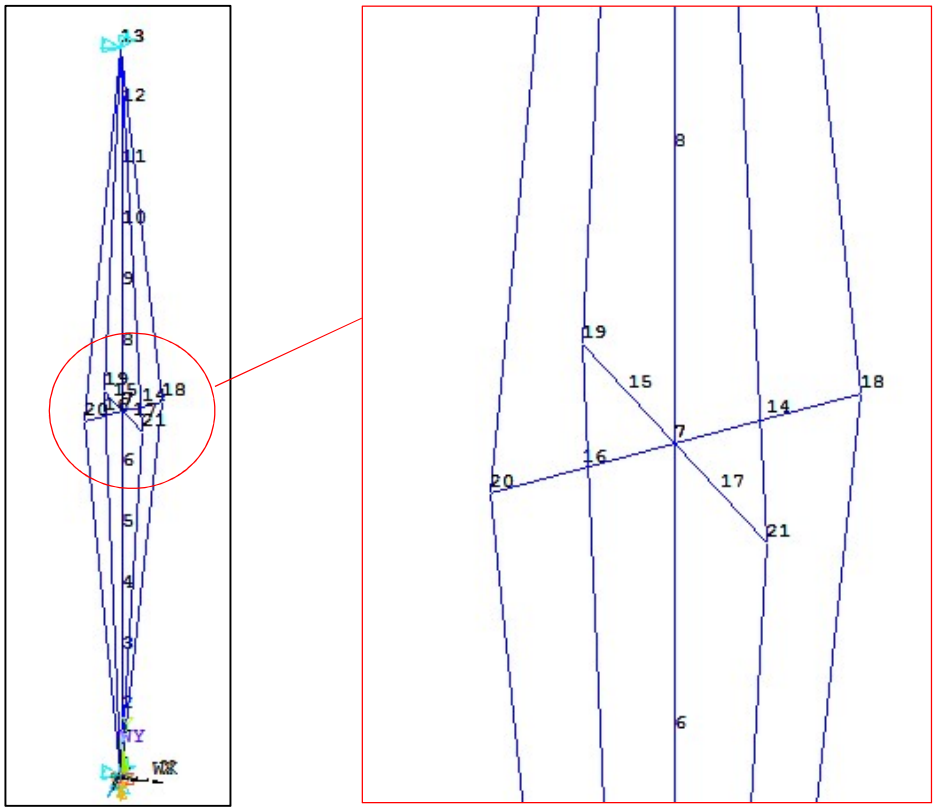


Figura 49 – Identificação dos elementos da coluna; a) coluna inteira; b) ampliação no meio da coluna.

2.6. Condições de contorno

As condições de contorno do modelo estrutural em questão foram relativas a uma coluna bi-rotulada. No nó da base foram restringidos os deslocamentos nas direções dos eixos globais X, Y e Z, além da rotação em torno do eixo global Y para se evitar rotação de corpo rígido. Já para o nó da extremidade superior, são restringidos apenas os deslocamentos nas direções dos eixos globais X e Z, pois na direção Y (eixo vertical), o deslocamento precisa estar liberado para que seja possível a aplicação da carga.

As ligações entre a coluna central e as barras perpendiculares à mesma são consideradas como rígidas; rotuladas entre os estais e a coluna central e entre os estais e as barras perpendiculares.

2.7. Solução e pós-processamento

Na etapa de solução o ANSYS utiliza-se de uma Análise Estática com 4 critérios de convergência:

- Critério de Força (F);
- Critério de Momento (M);
- Critério de Deslocamento (U);
- Critério de Rotação (ROT).

O estudo consiste em uma análise não linear completa através do uso de algoritmo de comprimento de arco para solução do sistema não linear de equações.

Além disso, também se faz necessário habilitar o programa para que analise corretamente o comportamento da coluna em relação à teoria da bifurcação, pois as colunas estudadas são muito esbeltas.

2.8. Aplicação da força de protensão e da carga

Pretende-se com este trabalho verificar e analisar a importância da aplicação da força de protensão nos estais, no intuito de aumentar a resistência da estrutura das colunas.

Segundo os estudos de Araujo [6], [7], o ANSYS permite a aplicação da protensão inicial por meio de dois tipos distintos de elementos: o PRESTS179 e o LINK10. Seu trabalho ainda mostra que não há viabilidade de aplicação do elemento PRESTS179, pois este elemento exige a existência de uma superfície para sua aplicação. Sendo assim, foi utilizado nos modelos o elemento LINK10 que também permite a aplicação da protensão por meio de deformações iniciais dos cabos [6], [7], [35]. Desta forma, a deformação foi aplicada no primeiro passo de carga. Cada deformação aplicada corresponde diretamente a um nível de protensão esperado, como apresentado na Tabela 4. A deformação equivalente a protensão desejada foi calculada através da relação entre tensão e deformação, onde a deformação inicial do cabo equivalente a protensão desejada, equivale a tensão no cabo sobre o módulo de elasticidade do mesmo.

Tabela 4 – Valores das deformações e suas correspondentes protensões.

DEFORMAÇÃO INICIAL (mm)	PROTENSÃO INICIAL (KN)
0	0
0,000796	0,9
0,001193	1,4
0,001591	1,9
0,001989	2,3
0,002387	2,8
0,002784	3,3
0,002944	3,5
0,003103	3,6
0,003182	3,7
0,003321	3,9

Como sugerido por Araujo [6], [7], para que a aplicação da carga ocorra de maneira controlada durante a fase não linear, próximo a carga crítica de flambagem, foi estipulado que a mesma fosse aplicada por meio de deslocamento prescrito na extremidade superior da coluna. Assim, através do traçado de uma curva (carga P *versus* deslocamento d) foi possível obter a carga crítica de flambagem e seu respectivo deslocamento máximo [35]. A aplicação de cargas nesta etapa foi realizada pelo GUI do ANSYS.

Através do menu “TimeHist Postpro” do ANSYS foi possível escolher as variáveis (cargas ou deslocamentos) desejadas para análise dos resultados. Assim, estes dados foram exportados para um arquivo de texto, que em seguida foi trabalhado no MS Excel 2013 [40]. Foi aplicada ao programa uma rotina por meio de APDL afim de determinar todos os resultados necessários de uma forma mais breve.

A partir destes resultados, nos estudos desenvolvidos no presente trabalho, interessam ser destacados os resultados relativos aos seguintes comportamentos para cada tipo de aço:

- Carga x deslocamento dos nós situados na metade da coluna;
- Carga x deslocamento dos nós situados a 1/4 da coluna;
- Carga x deslocamento dos nós situados a 3/4 da coluna;
- Carga x deslocamento vertical do nó da extremidade da coluna;
- Carga x força nos braços;

- Carga x força nos cabos;

Ainda compete uma análise comparativa dos diversos tipos de aço no que concerne:

- Protensão ótima x imperfeições;
- Cargas críticas x protensões (para as 4 imperfeições);
- Cargas críticas x imperfeições;

2.9. Calibração do modelo numérico

Nesta fase do trabalho foram feitas as calibrações dos dois modelos: a coluna de aço carbono de Araújo [6], [7], de 12 m de comprimento, tendo a coluna principal 89,3mm de diâmetro externo, espessura de 3,2 mm e braços perpendiculares a coluna principal com 600mm de comprimento, 42,6 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. A coluna de aço inoxidável de Servitova e Machacek [10], com 5 m de comprimento, tendo a coluna principal 50 mm de diâmetro externo, espessura de 2 mm e braços perpendiculares a coluna principal com 250 mm de comprimento, 25 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura.

2.9.1. Calibração do Modelo de Araujo

Araujo [6], [7] ensaiou colunas de aço carbono estaiadas e protendidas no laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

O ensaio da coluna ocorreu na horizontal, visto que o laboratório não tinha altura suficiente para o ensaio da coluna na vertical. Com isto, foram criados dois pórticos, um para cada extremidade da coluna, para aplicação da carga horizontal.

Na instrumentação do ensaio foram utilizados dezesseis extensômetros de resistência elétrica para medir as cargas atuantes no tubo principal e nos tubos secundários. Também se utilizou LVDTs (“Linear Variable Differential Transducer” – transdutor diferencial variável linear), ao todo em dez unidades, sendo que oito foram dispostos ao longo da coluna estaiada e dois nos pórticos de reação. Quatro relógios analógicos foram instalados: um em cada pórtico, um na extremidade da coluna e o outro próximo à metade da coluna. Foram utilizadas duas células de carga para

medição dos esforços, sendo que uma media a carga aplicada pelo macaco hidráulico, a outra media a carga inicial de protensão dos estais.

Algumas dificuldades surgiram durante o processo de montagem das colunas para o ensaio. Uma delas deu-se com relação ao peso próprio da coluna, assim como a rotação de uma das extremidades da coluna e a falta de espaço para colocação de mais uma rótula universal.

Foram efetuados dois ensaios experimentais, onde se variou a força de protensão aplicada nos cabos. O primeiro ensaio utilizou cabos levemente esticados, simulando o caso de uma coluna com o mínimo de protensão possível. No segundo, os cabos foram protendidos até um valor máximo de força, conseguido pelo aperto dos ganchos de ancoragem.

Já em 2009, Araujo [7] ensaiou três colunas de aço carbono estaiadas e protendidas de mesma medida do seu trabalho anterior. Estas colunas apresentaram as mesmas características geométricas, variando apenas o material empregado nos estais e seu nível de protensão. Também com a coluna na horizontal, as colunas foram ensaiadas em dois modos distintos: em modo x e em modo + (**Figura 50**). A primeira e a segunda colunas foram idênticas, e, com o objetivo de comparar e averiguar os resultados obtidos quanto ao processo de aplicação de carga, a maneira em que foram obtidos os esforços nos estais foi diferente. Já a terceira coluna apresentava diferença quanto aos cabos, que neste caso foi adotado barras de aço com 6,35mm de diâmetro, empregando o processo de medição dos esforços nos estais da segunda coluna.

Figura 50 – Modos de ensaio de Araujo nos seus estudos para o Doutorado. “Modo x” à esquerda e “Modo +” à direita [7].

A etapa de calibração para o presente trabalho adotou o modelo experimental de Araujo [6], [7]. Este estudo consistiu na comparação dos valores experimentais obtidos por Araujo [6],[7] para validação do modelo numérico elaborado para este trabalho. Foi selecionada para tal, a coluna no sistema X, com imperfeição inicial de 8mm, pois foi verificado por Araujo [6],[7] como a imperfeição real do modelo experimental.

Para tal modelo numérico, a coluna central foi dividida em 12 elementos, sendo assim, cada elemento tem o comprimento de 1 m, visto que a coluna tinha o comprimento de 12 metros.

As barras perpendiculares à coluna estão divididas em dois elementos com 0,30 m, em um total de 0,60 m para cada uma das duas barras, fazendo com que os estais fiquem com uma inclinação de 10 % em relação a coluna central (**Figura 51**).

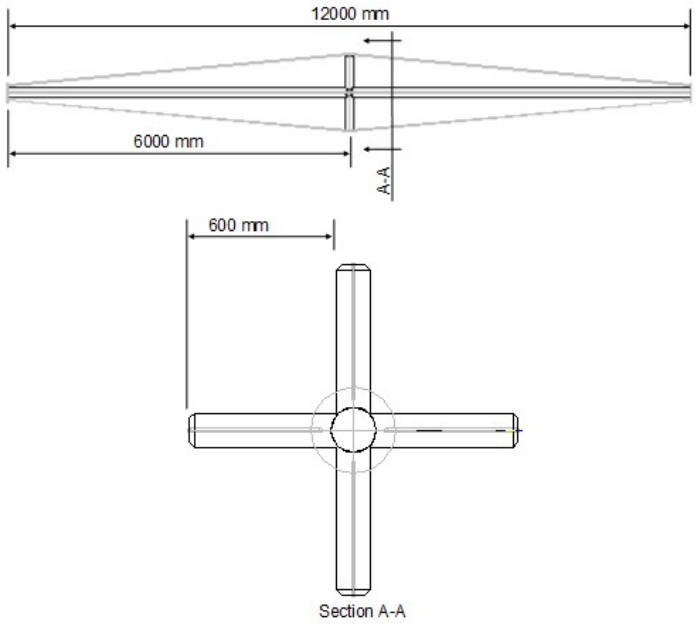


Figura 51 - Dimensões da coluna ensaiada por Araujo [5],[6]

Dados geométricos:

- Coluna:

  Altura da coluna: 12,00 m;

  Diâmetro externo: 89,3 mm;

  Espessura: 3,2 mm.

- Braços:

Comprimento: 600 mm (garantindo 10% de inclinação para os estais);

Diâmetro externo: 42,6 mm;

Espessura: 3 mm.

- Cabos:

Diâmetro: 6,35 mm;

Deformação inicial dos cabos: variável (dependendo do valor da protensão aplicada);

Inclinação: 10 % (obedecendo ao comprimento dos braços).

- Esbeltez da coluna: aproximadamente 394

Propriedades dos materiais:

Módulo de Elasticidade: 200.000 MPa;

Módulo de elasticidade dos cabos de aço para os estais: 100.000 MPa;

Coeficiente de Poisson: 0,3;

Tensão de Escoamento da coluna e dos braços: 380 MPa;

Módulo Tangente da coluna e dos braços: 20.000 MPa;

Tensão de Escoamento dos estais: 750 MPa;

Módulo Tangente dos estais: 10.000 MPa.

As colunas foram modeladas com as características e propriedades citadas, de modo que os resultados estão expostos na **Tabela 5** e na **Figura 52**.

Tabela 5 – Comparação dos resultados obtidos do modelo experimental de Araujo [6], [7] com o modelo numérico proposto no presente trabalho.

Coluna Experimental no Sistema X		Modelo Ansys no Sistema X		Erro (%)
Protensão (kN)	Carga (kN)	Protensão (kN)	Carga (kN)	
-	10,95	-	11,30	3,20
0,70	26,70	0,70	26,10	- 2,25
1,31	27,96	1,31	30,50	9,08
1,72	28,61	1,72	31,20	9,05
2,85	34,80	2,85	31,50	- 9,48
3,00	33,07	3,00	31,40	- 5,05

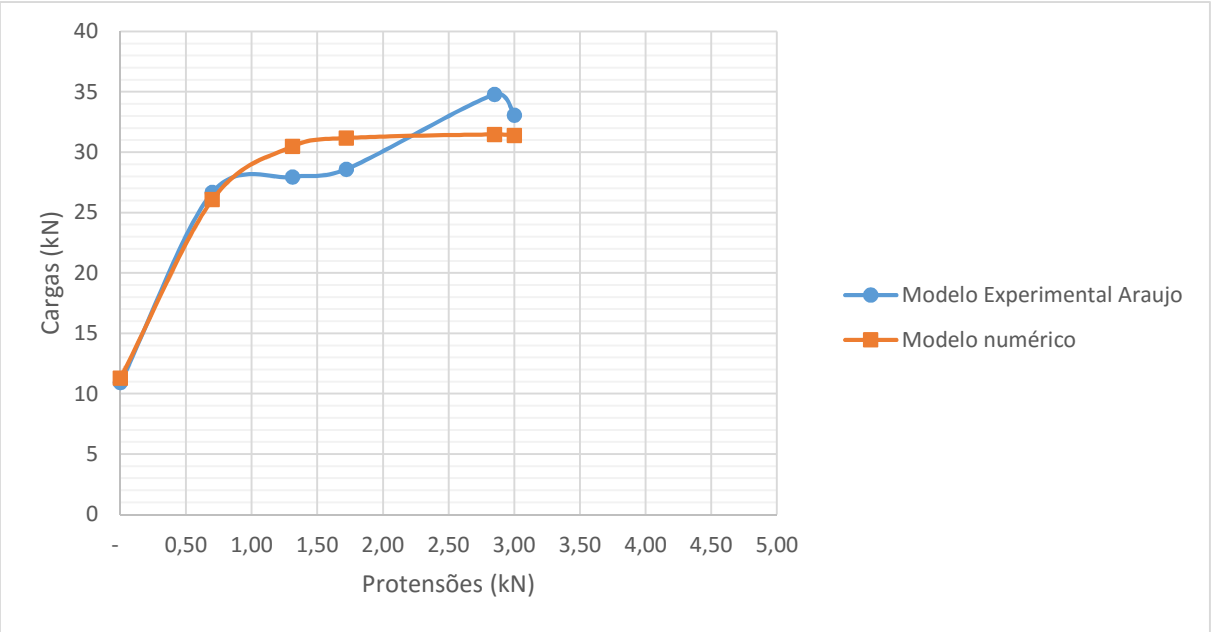


Figura 52 – Curvas níveis de Protensão *versus* carregamento da coluna experimental de Araujo [6], [7] e do modelo numérico proposto no presente trabalho.

Através da Tabela 4, pode-se verificar que as diferenças entre os valores do modelo numérico e dos experimentos foram pequenas. Estes valores tiveram uma variação de 2,25 a 9,48 %, apresentando um desvio padrão de 8,84.

As curvas de protensão *versus* deformação da **Figura 52** representa os modelos experimental de Araujo [6], [7] e numérico do presente trabalho. Ele mostra a proximidade dos valores obtidos, comparados ao modelo experimental, através das curvas.

2.9.2. Calibração do Modelo de Servitova

Servitova e Machacek [10], em 2011, baseada nos estudos de Araujo [6], [7] realizaram o primeiro ensaio de uma coluna em aço inox estaiada e protendida no Czech Technical University – CTU, em Praga. O modelo apresentava medidas diferenciadas do modelo de Araujo [6], [7], com dimensões reduzidas. O aço inoxidável utilizado para as colunas foi o Austenítico 1.4301.

Nos ensaios, as deflexões foram medidas através de potenciômetros fixados na estrutura em sete pontos e em duas direções perpendiculares. Já as forças nos cabos foram verificadas por meio de medidores de tensão. Conhecida a imperfeição

inicial da coluna, sua deflexão foi medida através de digitalização 3D [10]. Contudo, não há informação sobre o valor da imperfeição inicial da coluna ensaiada. A **Figura 53** retrata a coluna ensaiada por Servitova e Machacek [10].

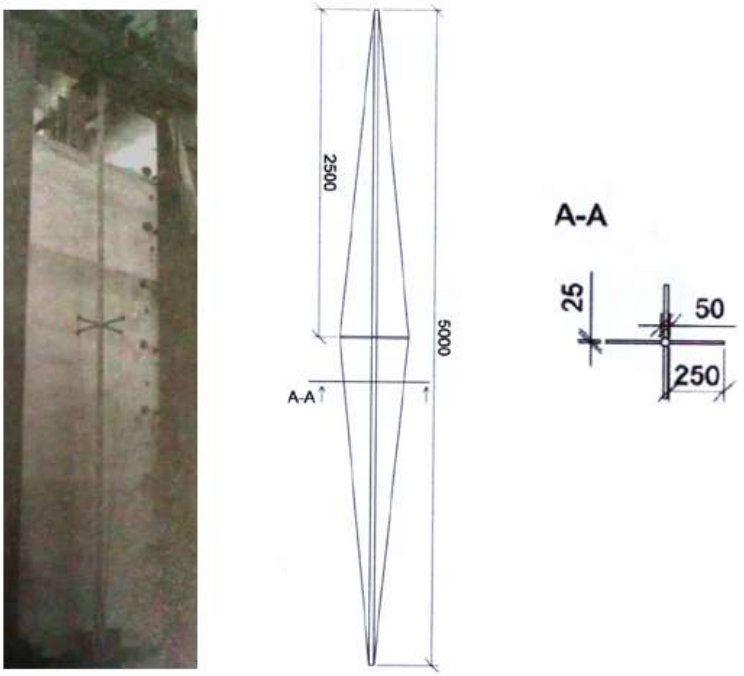


Figura 53 – Dimensões da coluna ensaiada por Servitova e Machacek [10]

Servitova e Machacek [10] realizaram três testes, sendo que no primeiro utilizaram a coluna experimental sem cabos e nos outros dois utilizaram três níveis de protensão, como mostrado na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Resultados experimentais - coluna de Servitova e Machacek [10]

PROTENSÃO (kN)	CARGA CRÍTICA SERVITOVA EXPERIMENTAL (kN)
sem estais	7,04
3,90	17,75
4,54	14,93
5,44	16,23

Na elaboração do APDL para o modelo da Servitova [10], a partir do APDL utilizado para calibração do modelo de Araujo [6], [7], alguns parâmetros precisaram

de alterações como: as propriedades do material, real constantes, a geometria das colunas e dos braços.

A coluna central, apesar da mudança de comprimento, continuou dividida em 12 elementos, modificando o comprimento do elemento utilizado no APDL de Araujo [6], [7]. O comprimento dos braços foi redimensionado a partir da inclinação dos estais de 10%.

A seguir são apresentadas as características geométricas e mecânicas da referida coluna.

- Coluna:
  Altura da coluna: 5,00 m;
  Diâmetro externo: 50,0 mm;
  Espessura: 2,0 mm.
- Braços:
  Comprimento: 250 mm (garantindo 10% de inclinação para os estais);
  Diâmetro externo: 25,0 mm;
  Espessura: 1,5 mm.
- Cabos:
  Diâmetro: 4,0 mm;
  Deformação inicial dos cabos: variável (dependendo do valor da protensão aplicada);
  Inclinação: 10 % (obedecendo ao comprimento dos braços).
- Esbeltez da coluna: aproximadamente 295
- Materiais:
  Módulo de Elasticidade: 204.000 MPa;
  Módulo de elasticidade dos cabos de aço para os estais: 100.000 MPa;
  Coeficiente de Poisson: 0,3;
  Tensão de Escoamento dos estais: 750 MPa;
  Módulo Tangente dos estais: 10.000 MPa.

As colunas foram modeladas com as características e propriedades citadas, de modo que os resultados estão expostos na Tabela 7 e na Figura 54.

Na Figura 54 são apresentados os resultados da comparação do modelo numérico proposto no trabalho e dos resultados experimentais de Servitova e Machacek [10]. Neste caso, tem-se poucos dados disponíveis no referido trabalho.

Mesmo assim, percebe-se que as curvas numéricas obtidas na presente dissertação aproximam-se dos resultados experimentais. A **Tabela 7** mostra que os erros tiveram uma variação de 2,48 a 21,13 %, apresentando um desvio padrão de 50,24.

Tabela 7– Comparação dos resultados obtidos do modelo experimental de Servitova e Machacek [10] com o modelo numérico proposto no presente trabalho.

Coluna Experimental no Sistema X		Modelo Ansys no Sistema X		Erro (%)
Protensão (kN)	Carga (kN)	Protensão (kN)	Carga (kN)	
-	7,04	-	6,60	- 6,25
3,90	17,75	3,90	16,50	- 7,04
4,54	14,93	4,54	15,30	2,48
5,44	16,23	5,44	12,80	- 21,13

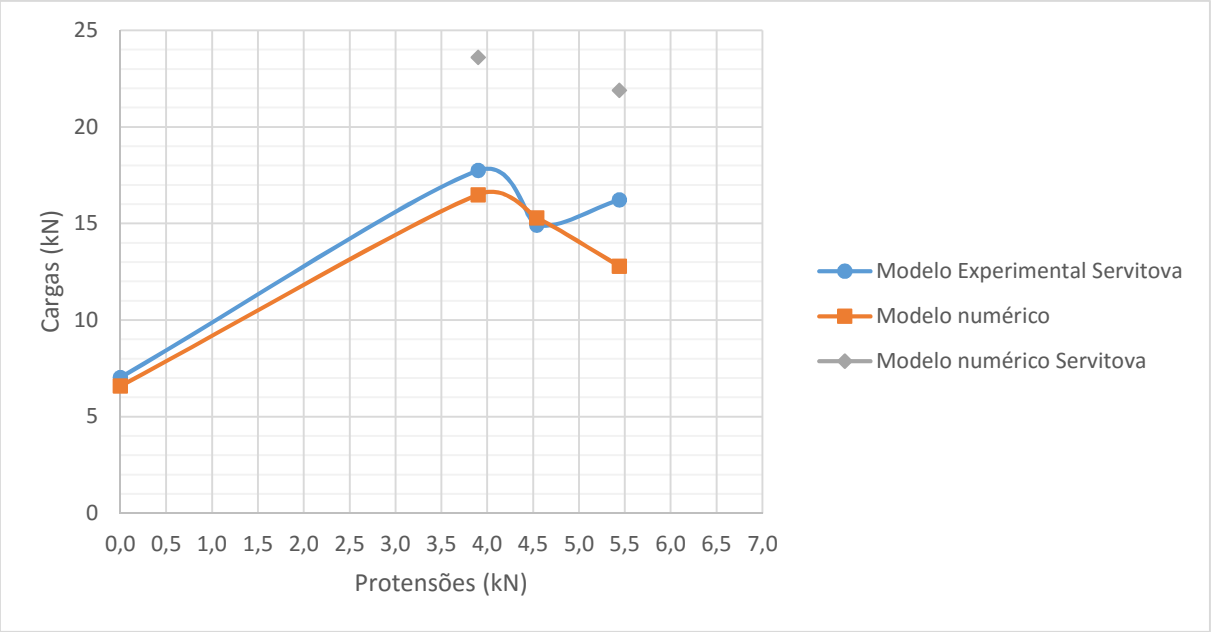


Figura 54 – Gráfico Protensão versus carregamento da coluna experimental de Servitova [10] e do modelo numérico proposto no presente trabalho.

3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Este capítulo descreve a análise paramétrica que teve como objetivo analisar o comportamento estrutural das colunas de aços inoxidáveis estaiadas e protendidas, assim como compará-las com o desempenho de colunas equivalentes em aço carbono.

A análise paramétrica do presente trabalho é baseada nos dados geométricos utilizados por Servitova e Machacek [10]. A escolha deste modelo deu-se visto que foi o único modelo experimental conhecido para o material aço inoxidável. Para os modelos numéricos utilizados na análise das colunas, foram considerados os aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex, e o aço carbono. As colunas dos modelos foram elaboradas com 4 imperfeições iniciais (8 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm) para o aço inoxidável e 2 imperfeições iniciais (10 mm e 20 mm) para o aço carbono. Quanto aos níveis de protensões, foram feitos em média de 7 para cada modelo, e ainda um modelo sem cabos e um com cabo esticado, sem protensão. Ao todo foram rodados 44 modelos referentes ao aço inoxidável austenítico, 37 modelos do aço inoxidável ferrítico, 36 relacionado ao aço inoxidável duplex e 19 modelos no tocante ao aço carbono, totalizando 136 modelos numéricos de colunas em aço. Para algumas imperfeições consideradas, o número de modelos variou para que se determinasse a carga ótima, para outras, 7 níveis de protensão diferentes foram suficientes. Para o aço carbono foram utilizadas apenas duas imperfeições iniciais (10 e 20 mm), considerando os valores iguais ou mais próximos dos limites fornecidos pelas normas brasileiras e europeia.

A análise numérica adotou a seguinte metodologia:

- Para cada tipo de aço considera-se um certo número de imperfeições iniciais nas colunas: 4 para o aço inoxidável e 2 para o aço carbono;
- Para cada imperfeição inicial na coluna, foram adotados diferentes níveis de protensão e para cada nível foi determinada uma carga crítica de flambagem;
- Determinou-se a melhor protensão em função da força de protensão ótima. Entende-se por força de protensão ótima a maior carga crítica de flambagem, dentre todas as cargas determinadas em cada protensão, para esta coluna com a dada imperfeição inicial.

Análise dos Resultados

Inicialmente serão mostradas as análises referentes ao aço carbono, o qual foi contemplado com menor número de modelos, visto consideradas apenas duas imperfeições. Na sequência, seguem os estudos relacionados aos aços austeníticos, ferríticos e duplex, respectivamente, com as quatro imperfeições para cada tipo de aço.

3.1. AÇO CARBONO

Primeiramente foram feitos os modelos sem cabos e com cabos esticados, sem protensão (protensão = 0 kN). Em seguida foram utilizados alguns níveis de protensão como: 0,9 kN, 1,4 kN, 1,9 kN, 2,3 kN, 2,8 kN, 3,3 kN e 3,8 kN. A

Tabela 8 apresenta os valores das cargas críticas em função dos níveis de protensão aplicados nos cabos para cada imperfeição inicial da coluna. Foram escolhidas estas duas imperfeições por representarem os valores máximos admitidos nas Normas Europeia e Brasileira. A

Tabela 9 mostra a comparação dos valores das cargas críticas obtidas dos modelos das colunas sem cabos e com cabos esticados com a carga de Euler. Através da mesma, foram destacadas as melhores protensões para cada imperfeição inicial e suas cargas críticas de flambagem, apresentando o valor percentual de acréscimo das cargas em função da protensão dos cabos para o aço carbono.

Tabela 8 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço carbono.

IMPERFEIÇÃO DE 10mm			IMPERFEIÇÃO DE 20mm		
PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)
VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		PROTENSÃO (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)	
-		6,6	-		6,28
0	-	12,19	0	-	11,05
0,9	7,38	16,03	0,9	8,14	12,97
1,4	11,48	18,37	1,4	12,67	14,8
1,9	15,59	19,28	1,9	17,19	16,27
2,3	18,87	19,83	2,3	20,81	17,02
2,8	22,97	19,87	2,8	25,34	17,48
3,3	27,07	19,81	3,3	29,86	17,62
3,8	31,17	19,62	3,8	34,39	17,65
-	-	-	4,25	38,46	17,54

Tabela 9 - Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimo de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço carbono.

Imperfeição (mm)	Carga de Euler (kN)	Pcr (kN)		Variação do valor de Pcr em função da Carga de Euler (%)	
		sem cabos	cabos esticados	sem cabos	cabos esticados
10,00	6,87	6,60	12,19	- 3,93	77,44
20,00		6,28	11,05	- 8,59	60,84
Imperfeição (mm)	**Melhor Protensão (kN)**	**Pcr na melhor protensão (kN)**		**Acréscimo de carga em função da protensão (%)**	
10,00	2,80	19,87		201,06	
20,00	3,8	17,65		181,05	

O gráfico da **Figura 55** mostra a variação da carga crítica de flambagem para duas imperfeições adotadas. Nota-se que com o aumento da imperfeição de 10 mm para 20 mm, acontece uma diminuição na carga crítica.

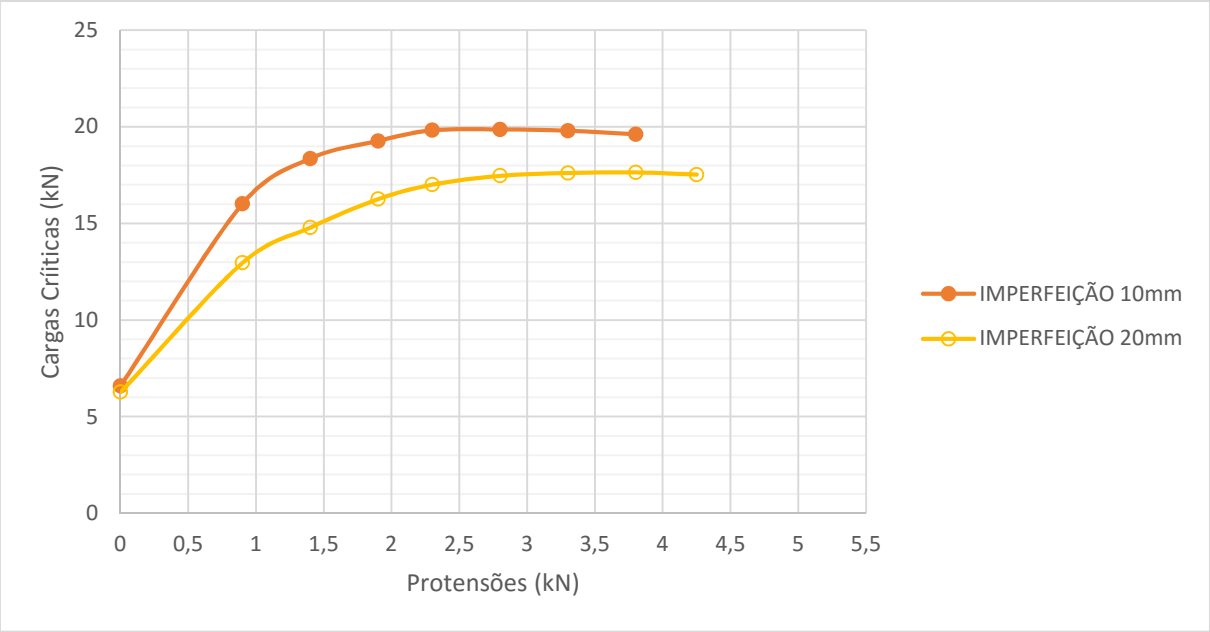


Figura 55 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço carbono.

A **Figura 56** e **Figura 57** apresentam as curvas de carga externa aplicada *versus* deslocamentos laterais, das imperfeições iniciais de 10 mm e 20 mm respectivamente, ocorridos na metade da coluna para os diversos níveis de protensão considerados. Segue a indicação com uma seta para a protensão ótima.

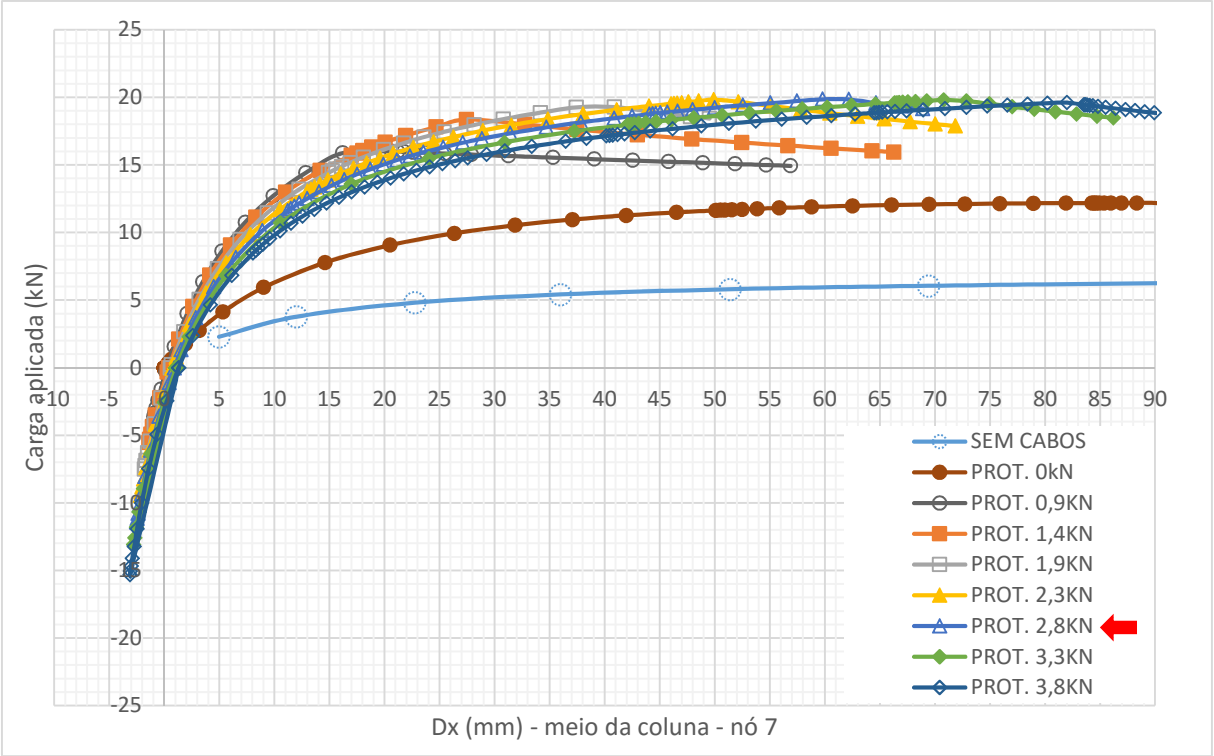


Figura 56 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço carbono com imperfeição de 10 mm.

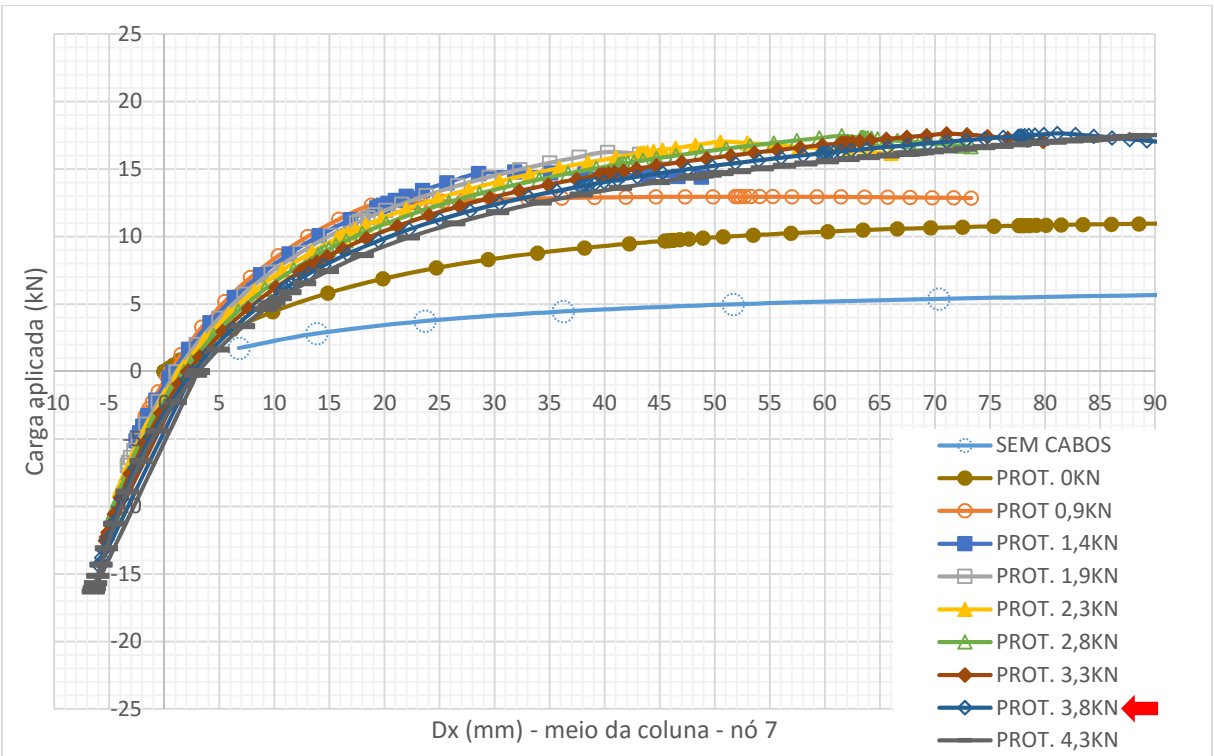


Figura 57 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço carbono com imperfeição de 20 mm.

A **Figura 58** mostra o deslocamento a ¼ da altura da coluna, no meio da coluna e a ¾ da coluna. A protensão escolhida foi a de 2,8 kN, por se tratar da protensão ótima. As curvas a ¼ e ¾ da coluna se sobrepõem, confirmando que a coluna está flambando de uma mesma forma nos dois locais. A curva na metade da coluna vai além das duas citadas anteriormente, apontando deslocamentos maiores no meio da coluna. Constata-se que o modo de flambagem para este de caso é o Modo 1, com uma deformada correspondente a meia onda de seno.

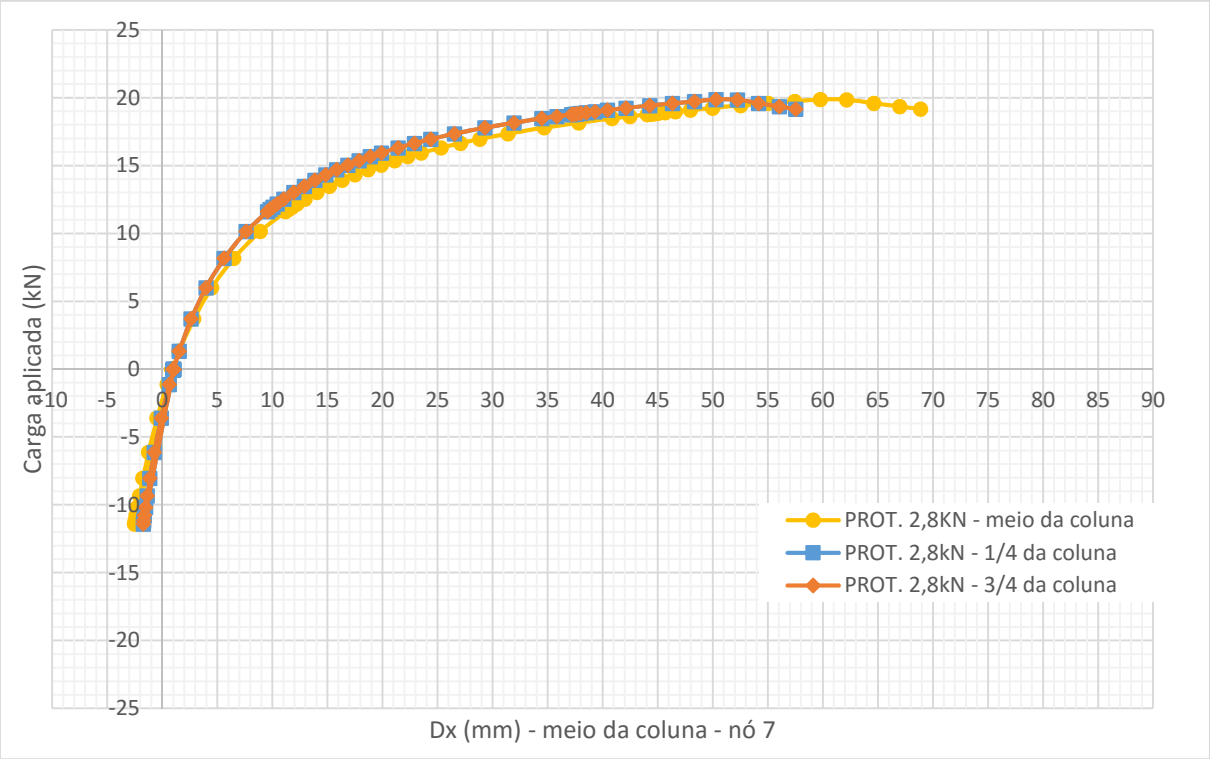


Figura 58 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼, no meio e a 3/4 da coluna do aço carbono no melhor nível de protensão para imperfeição de 10 mm.

A **Figura 59** e **Figura 60** representam, respectivamente, o deslocamento vertical da coluna em função da carga externa aplicada para as imperfeições iniciais da coluna de aço carbono de 10 e 20 mm.

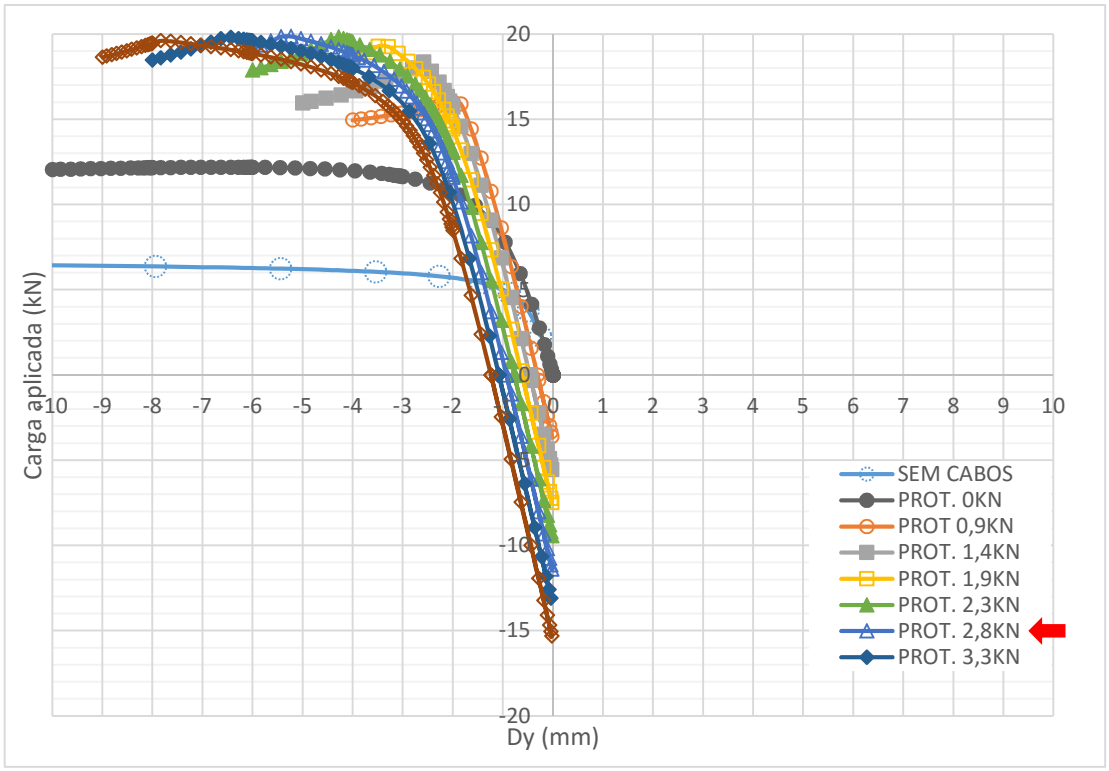


Figura 59 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço carbono com imperfeição de 10 mm

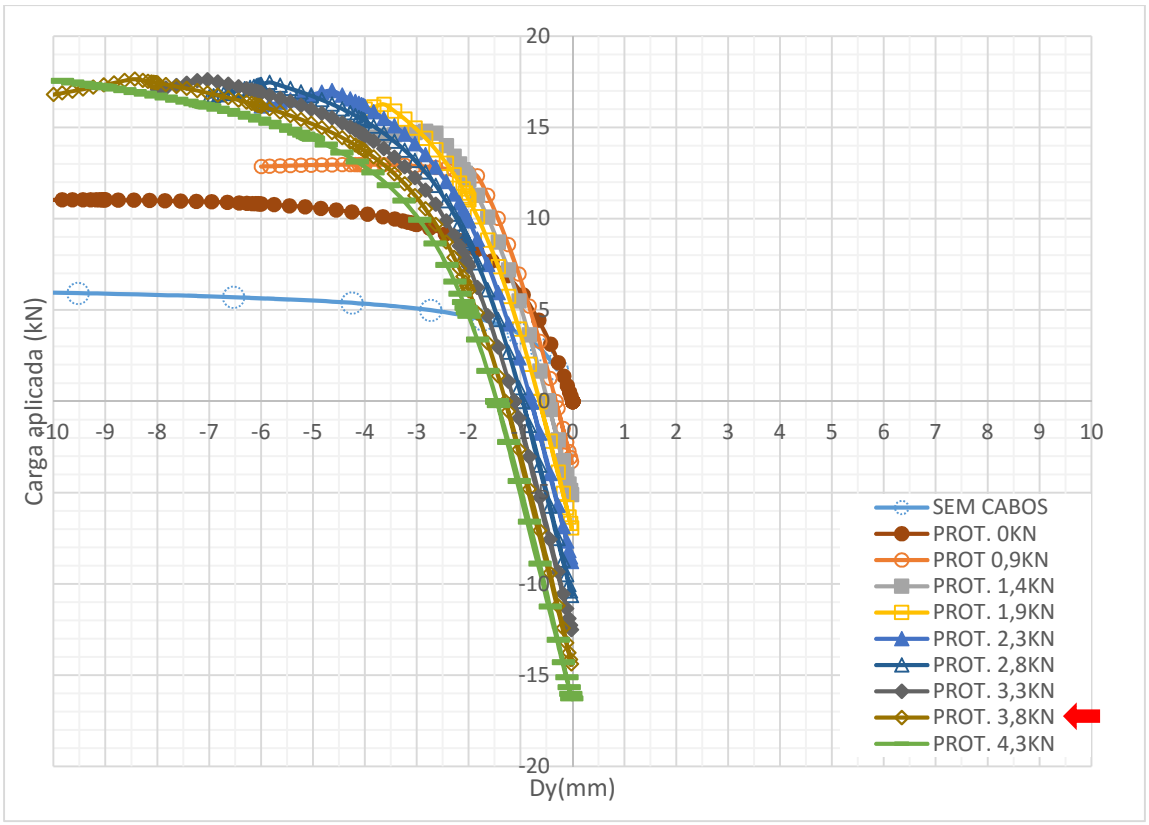


Figura 60 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço carbono com imperfeição de 20 mm.

3.2. AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO

Na **Tabela 10** são apresentados os valores das cargas críticas em função dos níveis de protensão e das imperfeições iniciais consideradas para as colunas em aço inoxidável austenítico. Primeiramente foram realizadas as análises das colunas sem cabos e com cabos esticados. Os resultados obtidos foram comparados com a carga crítica de flambagem teórica (**Tabela 11**), determinada pela teoria de Euler para flambagem de colunas ideais, ou seja, perfeitamente reta antes da aplicação da carga, de material homogêneo e carga aplicada no centroide da seção transversal. De acordo com a tabela, quanto menor o valor da imperfeição, mais o valor da carga crítica de flambagem, obtido dos resultados numéricos, aproxima-se do valor da carga de Euler.

Tabela 10 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço inox austenítico.

IMPERFEIÇÃO DE 8mm			IMPERFEIÇÃO DE 10mm			IMPERFEIÇÃO DE 15mm			IMPERFEIÇÃO DE 20mm		
PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)
VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)	
-		6,05	-		5,90	-		5,62	-		5,37
0,00	-	11,94	0,00	-	11,63	0,00	-	10,96	0,00	-	10,37
0,93	7,79	16,80	0,93	8,00	16,00	0,94	8,58	14,04	0,94	9,06	12,62
1,40	11,73	18,68	1,87	16,08	18,65	1,40	12,77	16,05	1,41	13,60	14,57
1,86	15,58	19,39	2,33	20,03	18,76	1,87	17,06	17,10	1,88	18,13	15,77
2,33	19,51	19,34	2,80	24,08	18,22	2,16	19,71	17,35	2,35	22,66	16,13
2,51	21,02	19,09	3,27	28,12	17,57	2,34	21,35	17,36	2,54	24,49	16,17
2,79	23,37	18,70	3,64	31,30	17,26	2,53	23,08	17,38	2,82	27,19	16,19
2,98	24,96	18,39	3,90	33,53	16,50	2,81	25,64	17,10	3,01	29,03	16,08
3,26	27,30	17,96	4,53	38,95	15,30	3,28	29,93	16,67	3,29	31,73	15,82
3,73	31,24	17,12	5,43	46,69	12,80	3,79	34,58	16,00	3,77	36,35	15,32

Nota-se que as cargas críticas aumentam consideravelmente à medida que são aplicadas protensões às colunas, até que estas protensões alcançam valores máximos de carga crítica de flambagem para cada valor de imperfeição, decrescendo em seguida. Assim é possível destacar para cada imperfeição um valor de protensão ótima, onde são alcançadas as maiores cargas, como apresentado na **Tabela 11**. É possível notar como uma tendência de comportamento, ou seja, enquanto aumenta o valor da imperfeição inicial da coluna, as cargas críticas decrescem.

Tabela 11- Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável austenítico.

Imperfeição (mm)	Carga de Euler (kN)	Pcr (kN)		Variação do valor de Pcr em função da Carga de Euler (%)	
		sem cabos	cabos	sem cabos	cabos
8,00	6,87	6,05	11,94	- 11,94	73,80
10,00		5,90	11,63	- 14,12	69,29
15,00		5,62	10,96	- 18,20	59,53
20,00		5,37	10,37	- 21,83	50,95
Imperfeição (mm)	**Melhor Protensão (kN)**	**Pcr na melhor protensão (kN)**		**Acréscimo de carga em função da protensão (%)**	
8,00	1,86	19,39		220,50	
10,00	2,33	18,76		217,97	
15,00	2,34	17,36		208,90	
20,00	2,82	16,19		201,43	

Verifica-se, através dos resultados obtidos, o acréscimo no valor da carga crítica de flambagem em função do nível de protensão, como mostrado na **Tabela 10**. De acordo com os resultados, a coluna chega a resistir até duas vezes o valor da carga crítica de flambagem da coluna sem estais.

A **Figura 61** apresenta os resultados de cargas críticas para diversos níveis de protensão para cada valor de imperfeição inicial considerada nas colunas em aço inoxidável austenítico. Através do gráfico nota-se que para níveis elevados de protensão as diferenças são menores em termos de cargas críticas.

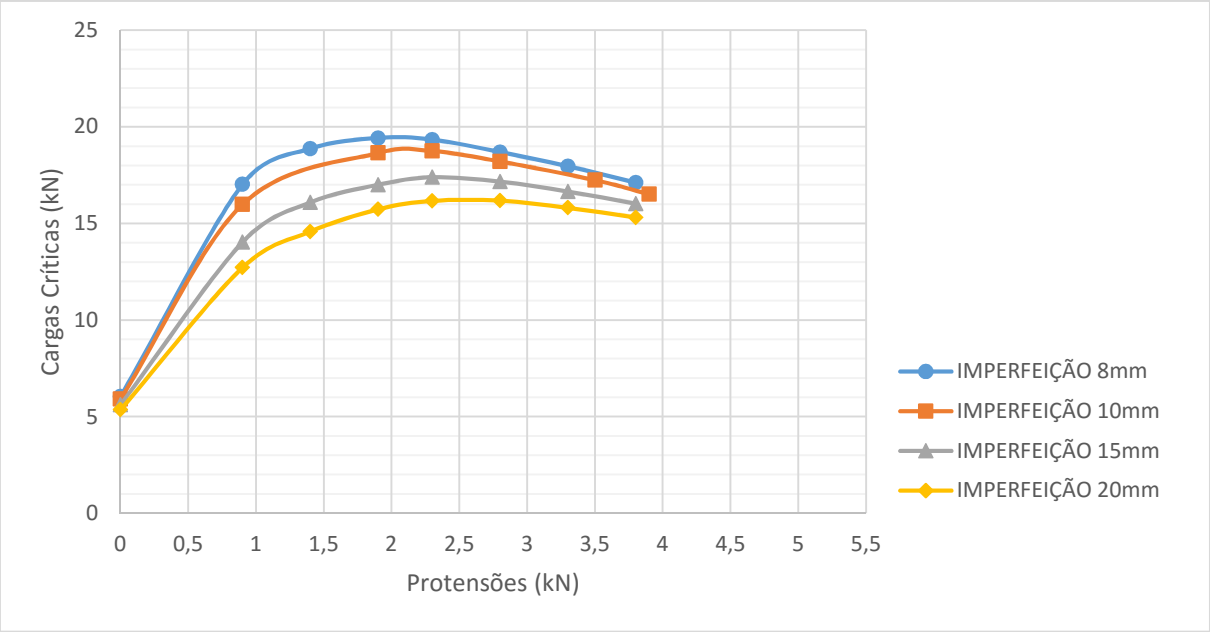


Figura 61 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável austenítico.

As figuras a seguir apresentam resultados em termos de curvas carga externa *versus* deslocamentos laterais ocorridos na metade da coluna (**Figura 62**, **Figura 63**, **Figura 64** e **Figura 65**). As protensões ótimas estão sinalizadas com a seta vermelha.

A respeito dos gráficos com resultados de carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna apresentados, verifica-se que a primeira protensão aplicada (0,9 kN), não permite um maior deslocamento horizontal. Deve-se ao fato da protensão ainda se mostrar insuficiente para alterar significativamente o desempenho da coluna.

Seguem os resultados (**Figura 66**, **Figura 67**, **Figura 68**, **Figura 69**) para as curvas de deslocamento horizontal a ¼ e ¾ da coluna. Serão mostrados os gráficos com valores de imperfeições de 10 mm e 20 mm. Os outros gráficos seguirão no Anexo.

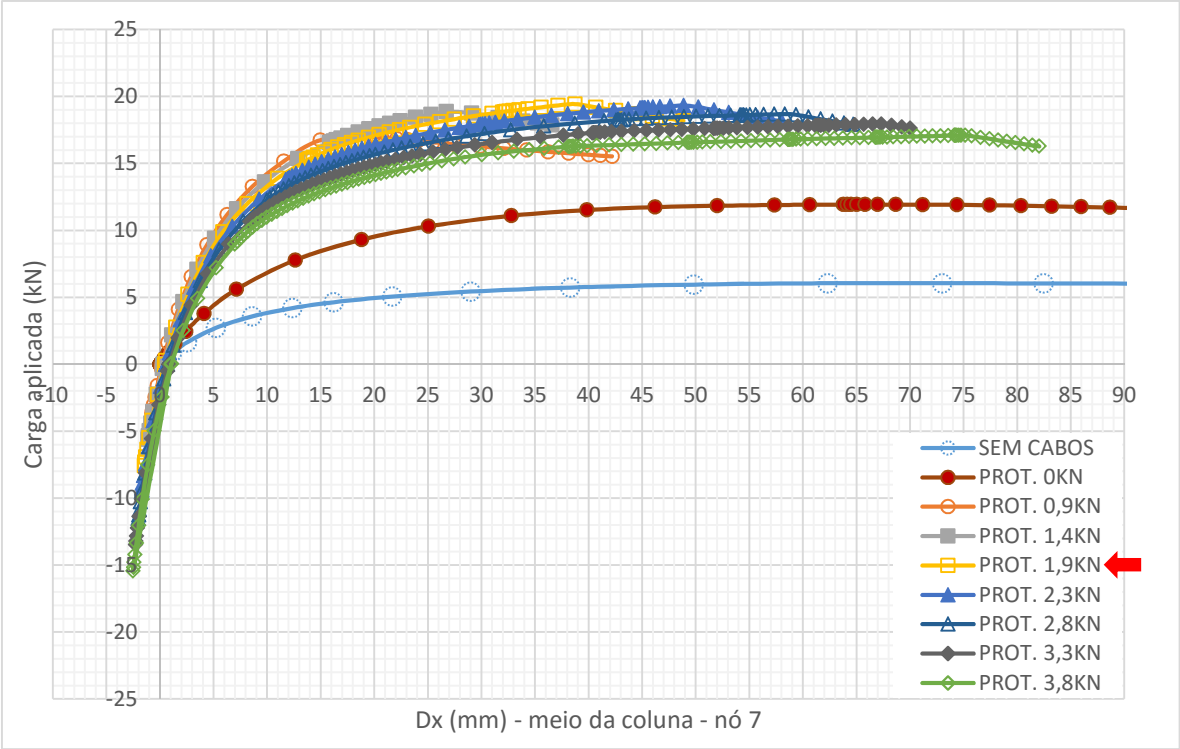


Figura 62 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 8 mm.

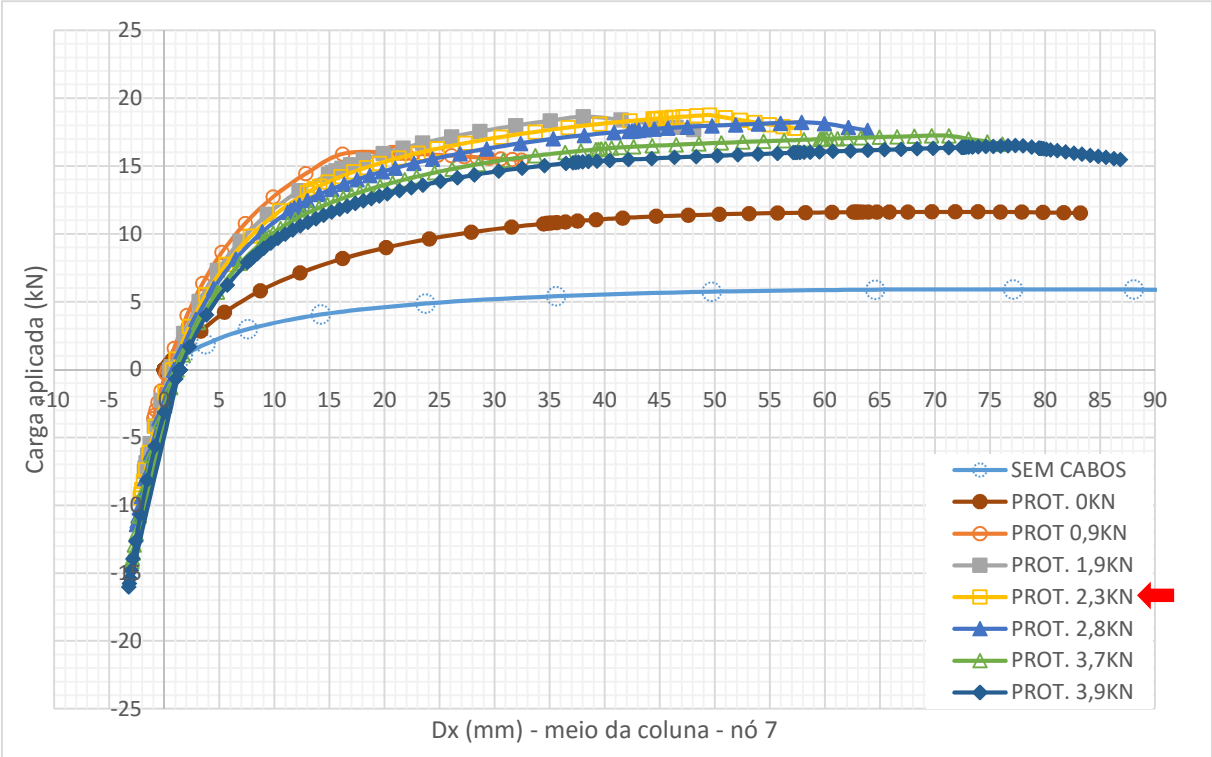


Figura 63 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm.

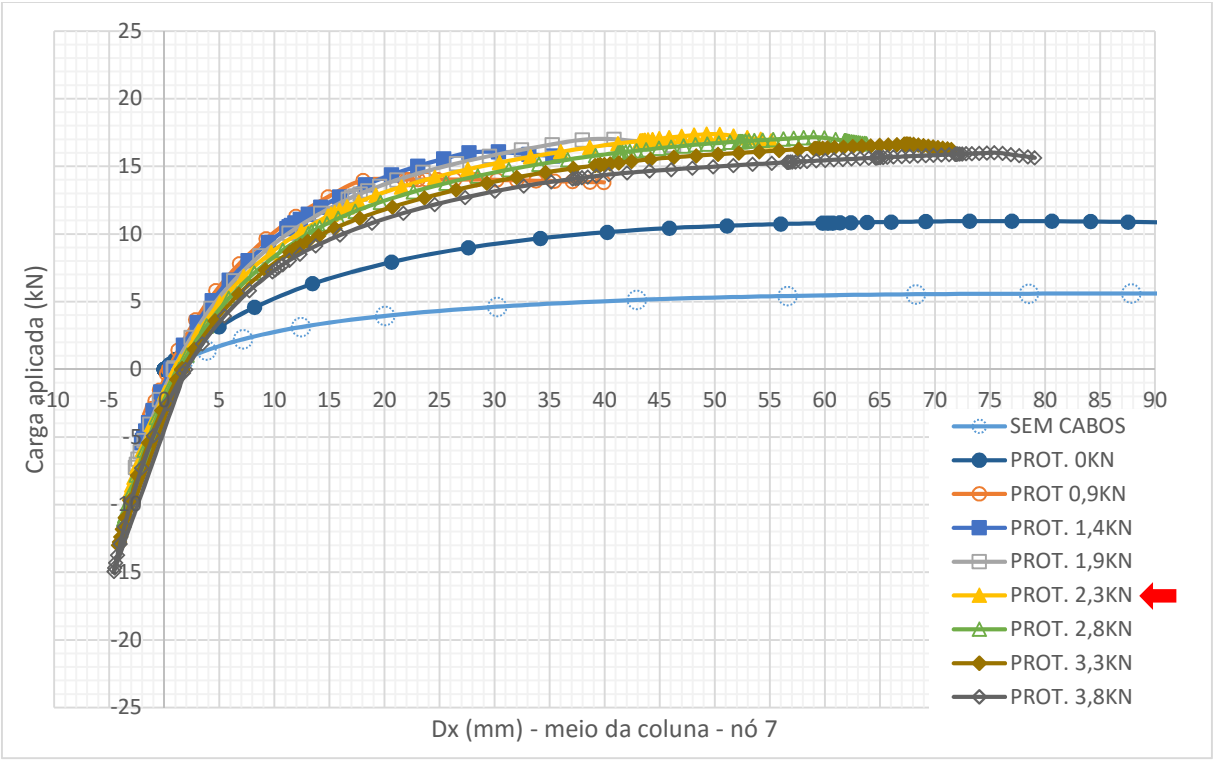


Figura 64 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 15 mm

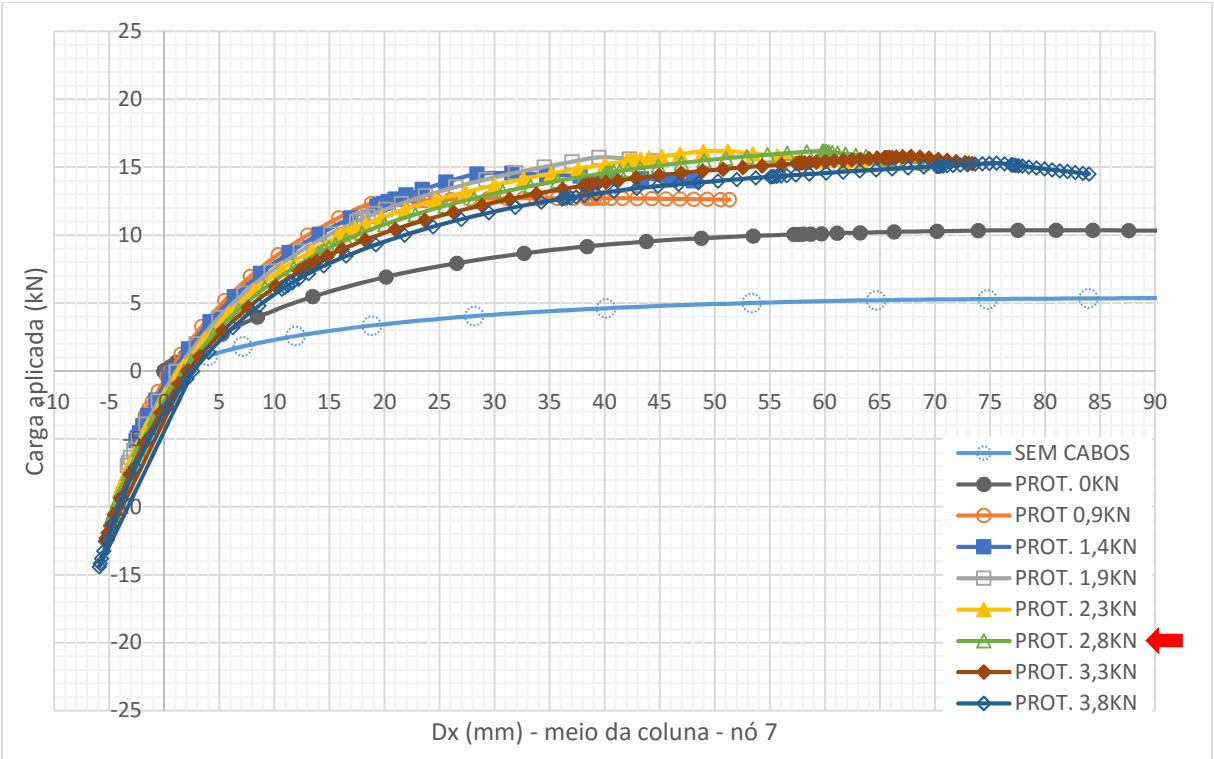


Figura 65 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm.

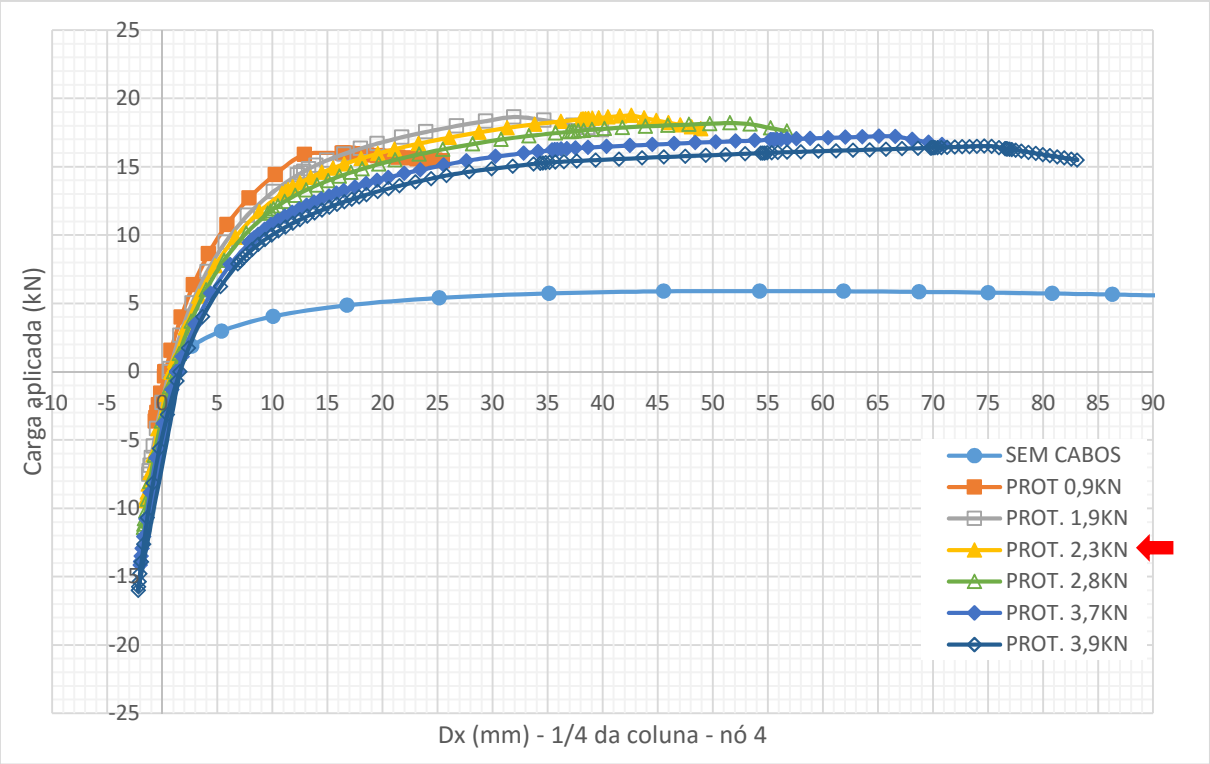


Figura 66 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm.

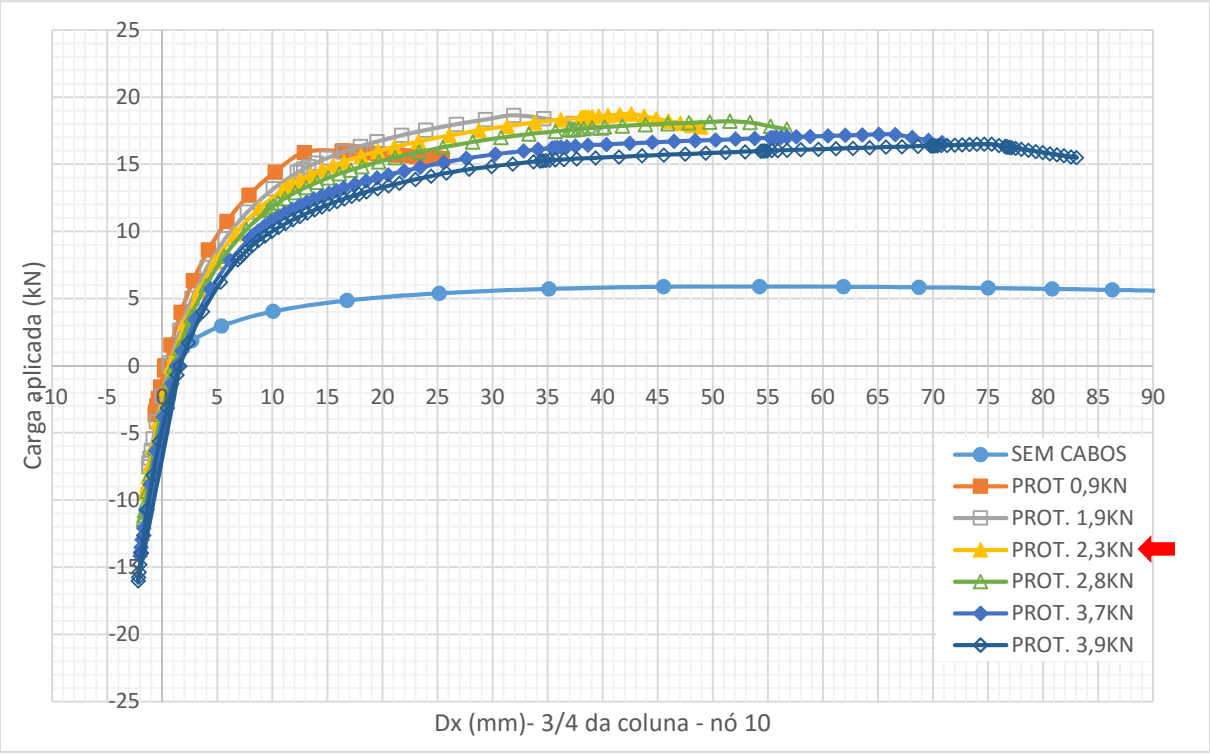


Figura 67 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm.

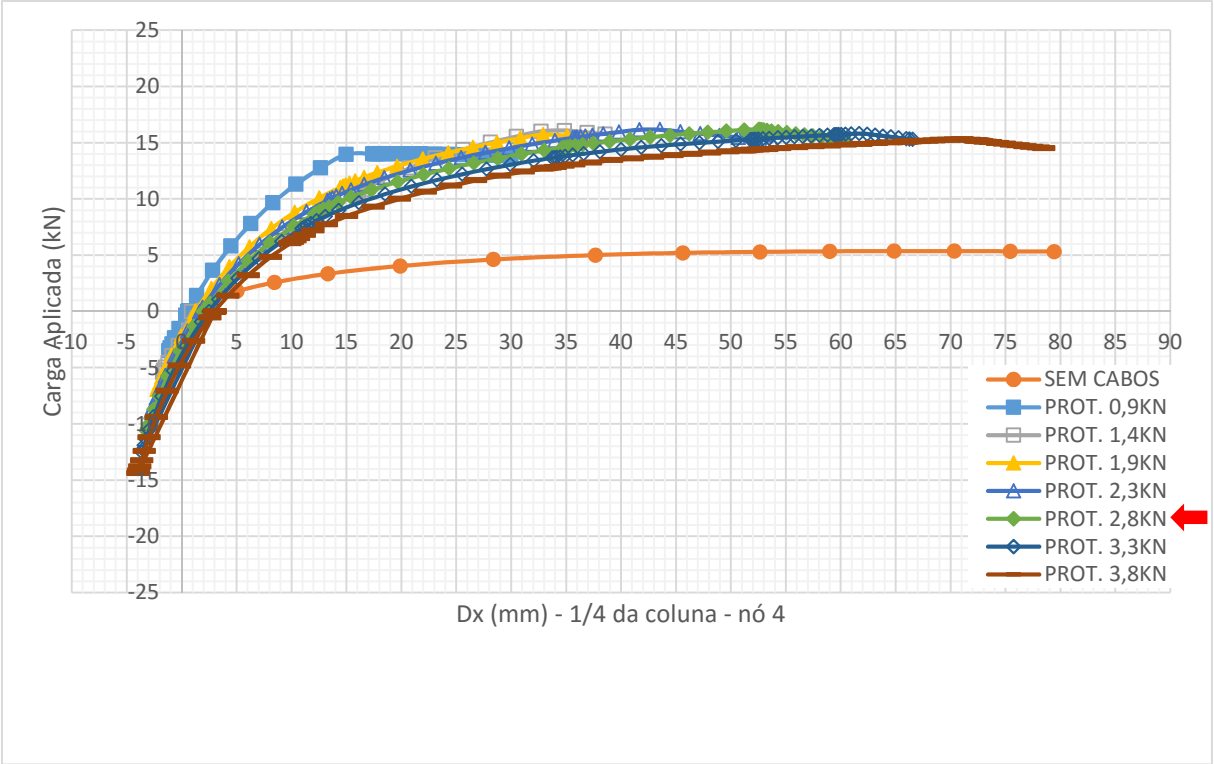


Figura 68 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm.

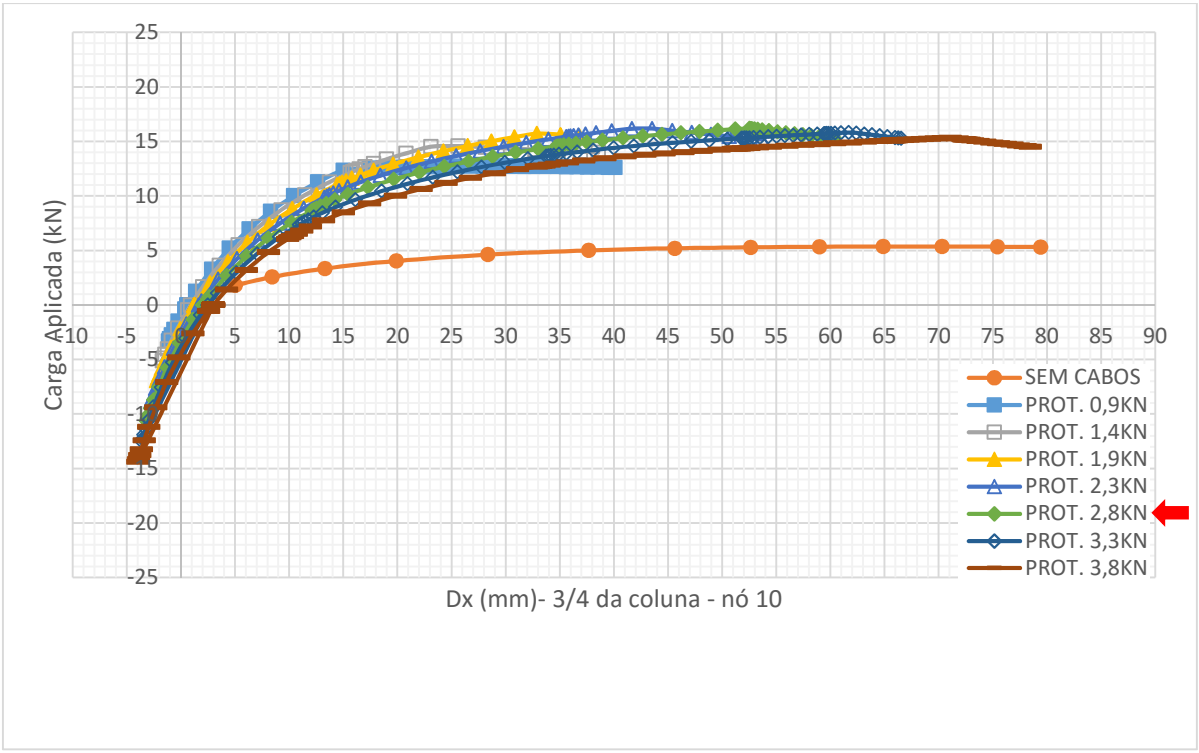


Figura 69 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm.

Com as informações dos gráficos anteriores que mostram o deslocamento a ¼ da altura da coluna, no meio da coluna e a ¾ da coluna, foi elaborado um gráfico, que segue na **Figura 70**, mostrando os deslocamentos nestes três pontos para um nível de protensão. A imperfeição mostrada é a de 10 mm e a protensão escolhida foi a de 2,3 kN, por se tratar da protensão ótima. Verifica-se que as curvas a ¼ e ¾ sobrepõem-se. A curva na metade da coluna vai além das duas citadas anteriormente, sinalizando que no meio da coluna, os deslocamentos são maiores. Constata-se que o modo de flambagem para este caso é o Modo 1, com uma deformada correspondente a meia onda de seno.

A **Figura 71** e a **Figura 72** apresentam os gráficos referentes aos deslocamentos verticais com relação a aplicação de carregamento externo, para as imperfeições iniciais de 10 mm e 20 mm, respectivamente. Os mesmos gráficos das outras imperfeições são apresentados no Anexo.

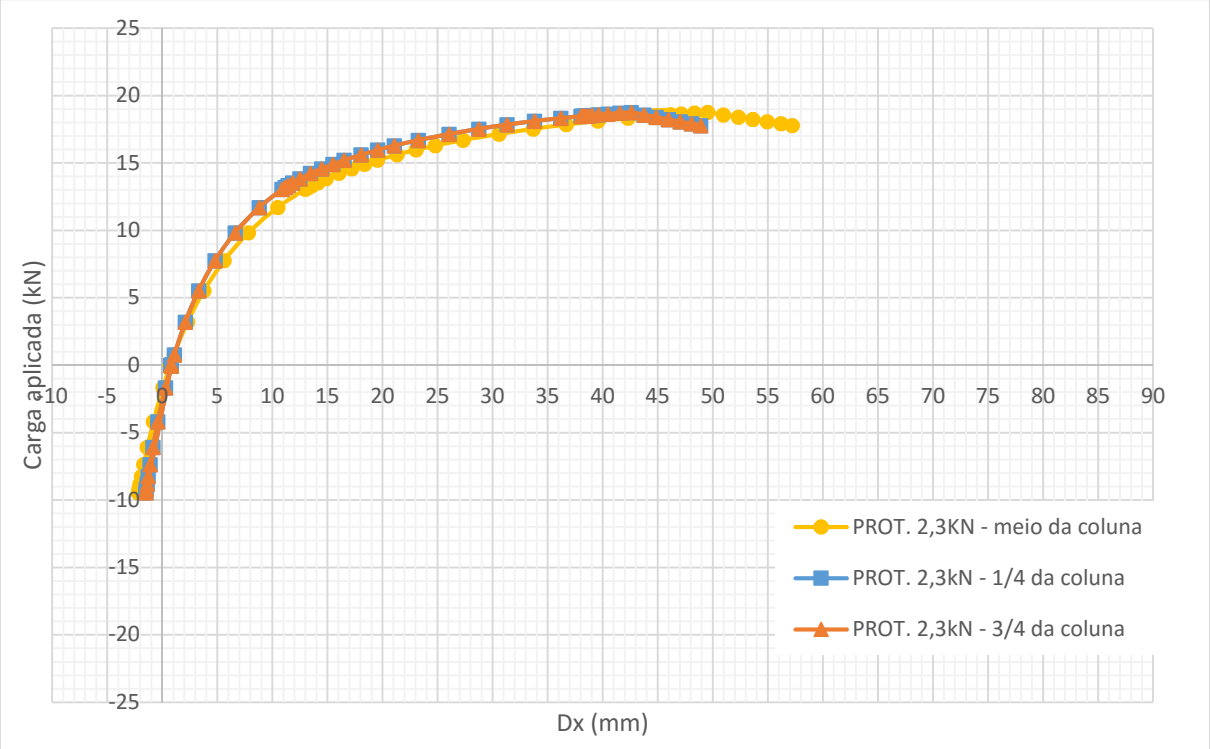


Figura 70 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal ¼, no meio e a 3/4 da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm.

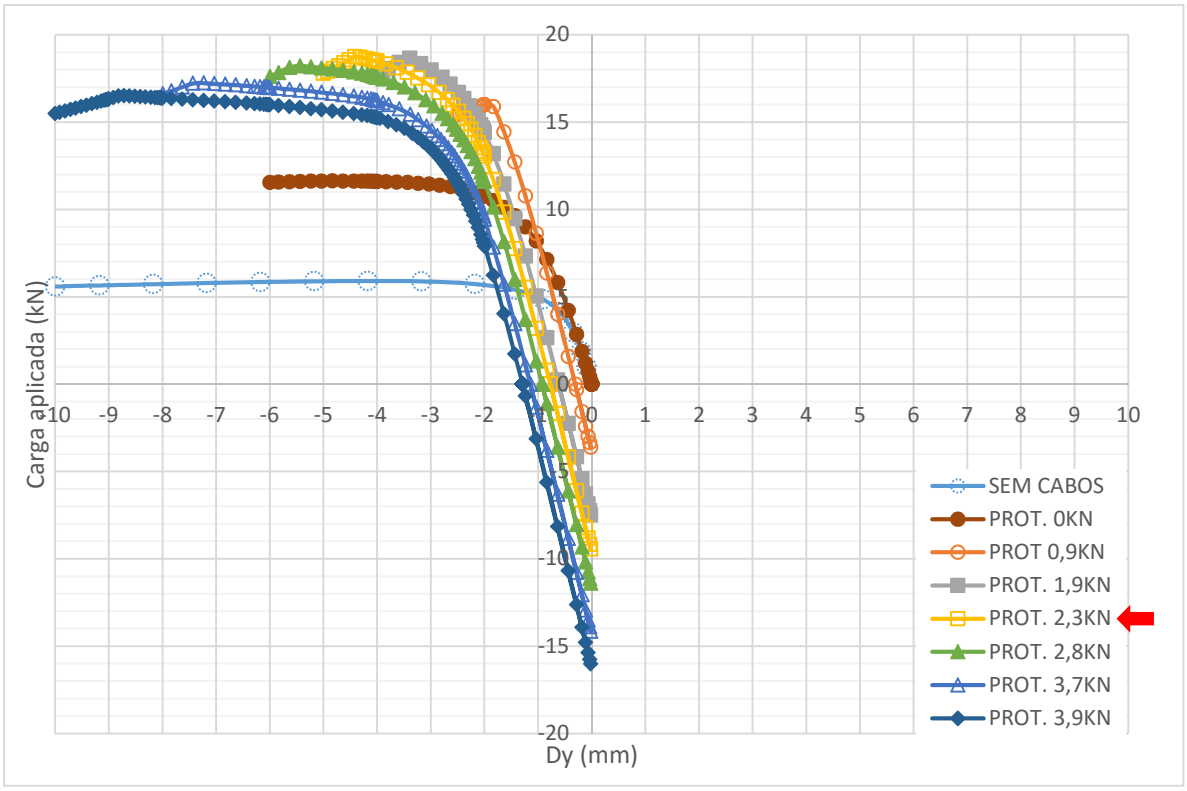


Figura 71 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm.

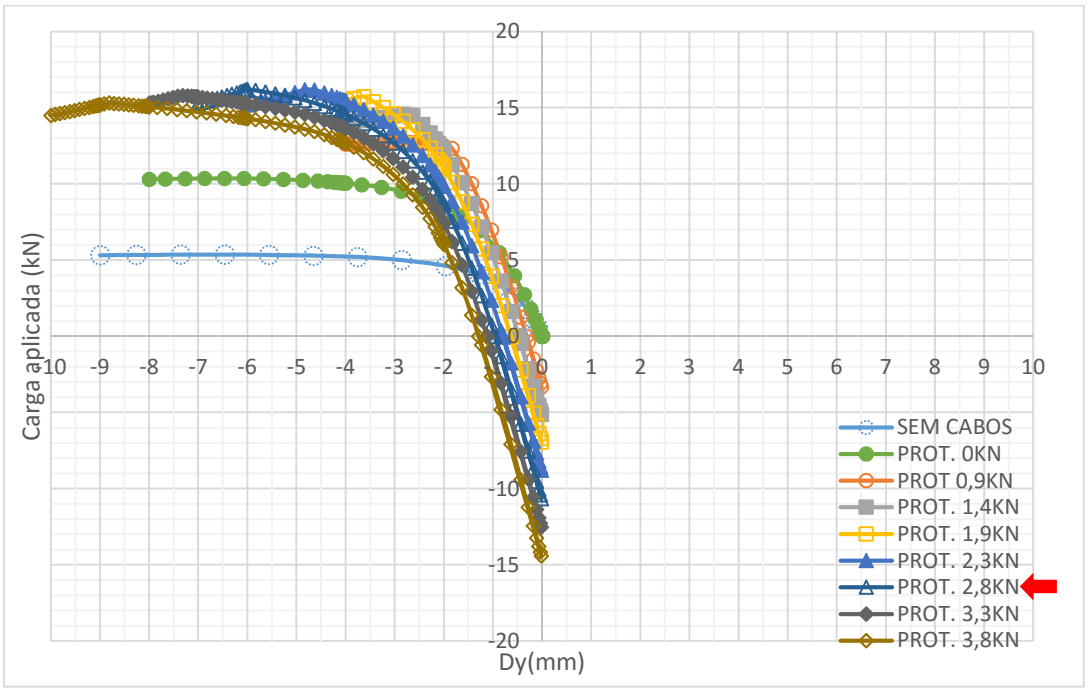


Figura 72 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 20 mm.

A **Figura 73** e **Figura 74** apresentam o comportamento dos estais e braços do modelo que apresentou o maior desempenho para a imperfeição de 10mm. Como pode ser observado, com o aumento de carga na coluna, ocorre também o acréscimo da força dos braços 17 e 20 e consequentemente o decréscimo nos braços 18 e 19. O mesmo efeito é verificado nos estais. À medida que os estais 21, 24, 25 e 28, aumentam a força com incremento de carga, os estais 22, 23, 26 e 27, sofrem decréscimo de força, ou seja, são aliviados.

A Figura 75 e Figura 76 mostram a configuração deformada da coluna estaiada e protendida com uma deformada correspondente a meia onda de seno.

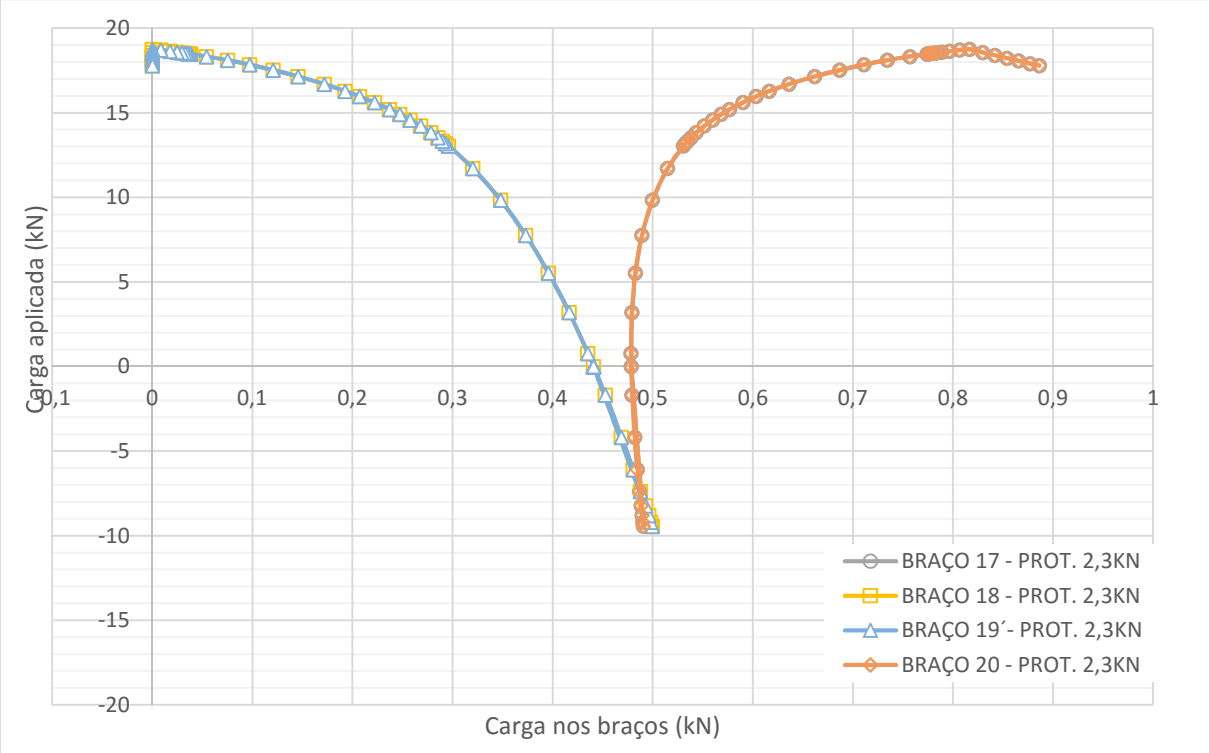


Figura 73 – Gráfico da carga externa *versus* carga nos braços da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm na protensão ótima.

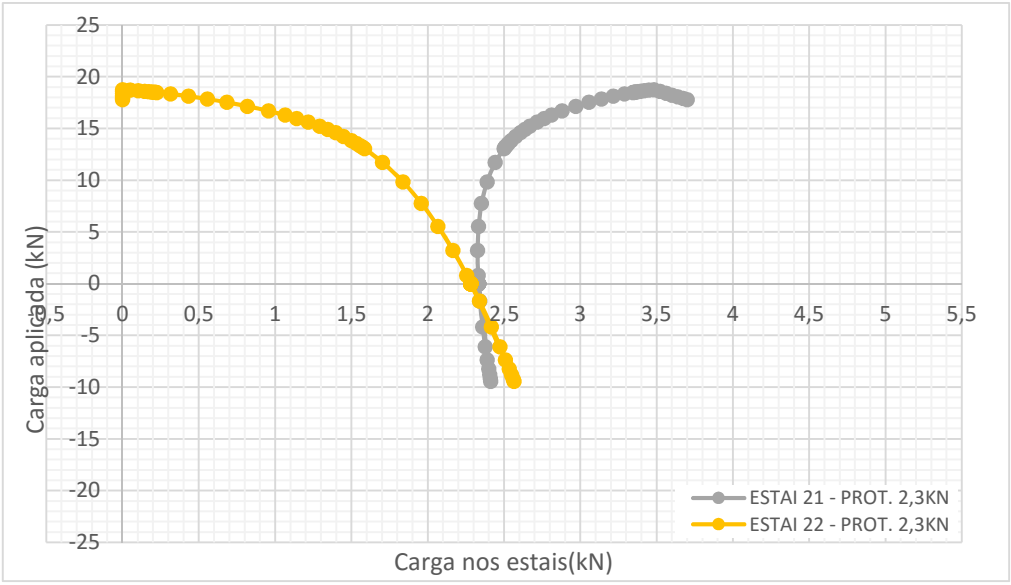


Figura 74 – Gráfico da carga externa *versus* carga nos estais da coluna do aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm na protensão ótima.

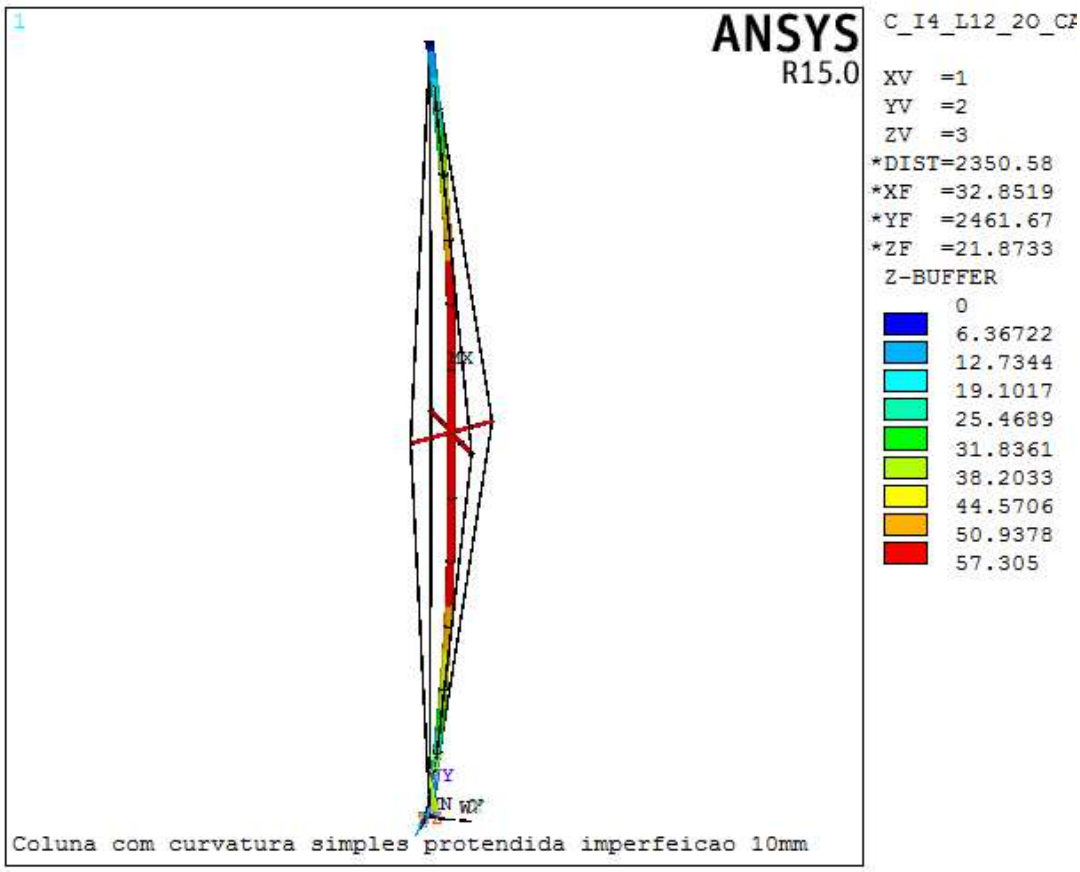


Figura 75 – Deformada da coluna de aço inoxidável austenítico com imperfeição de 10 mm e protensão de 2,3 kN (fator de escala 2).

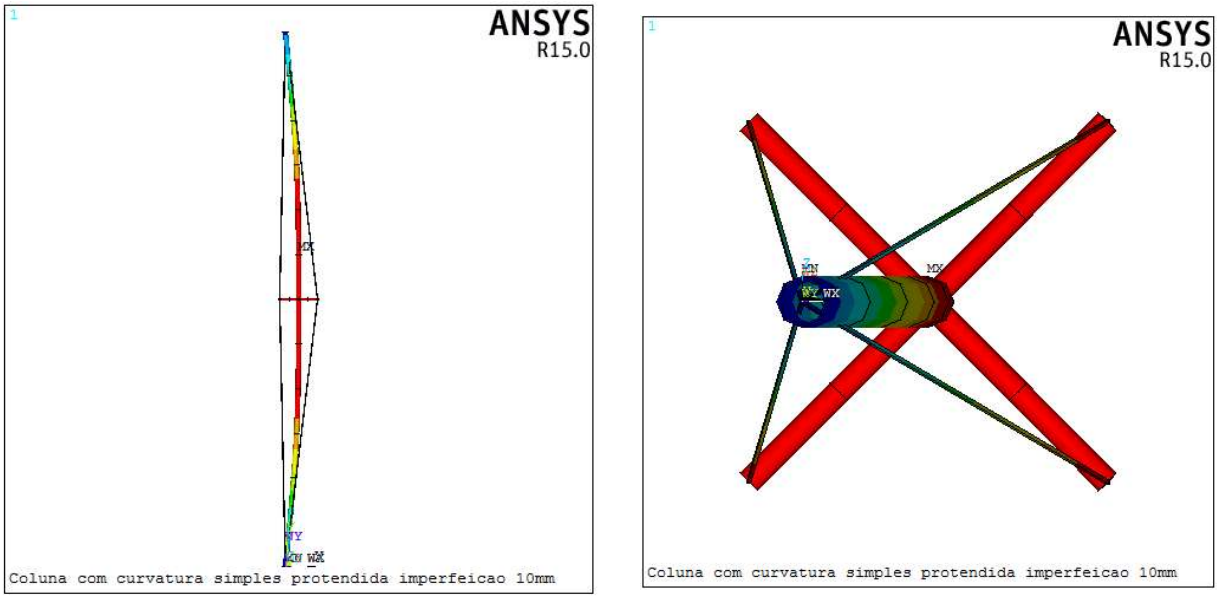


Figura 76 – Deformada da coluna em corte e na vista superior.

3.3. AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

De forma análoga ao aço inoxidável austenítico, inicialmente para o aço inoxidável ferrítico foram rodados os modelos sem cabos, com cabos esticados e posteriormente os modelos com cabos protendidos. A **Tabela 12** apresenta os valores das cargas críticas das colunas sem cabos, com cabos esticados e com cabos protendidos, respectivamente. Os resultados das cargas críticas das colunas obtidas foram comparados a Carga de Euler. Apresenta-se a variação da carga crítica de flambagem em função dos níveis de protensão nos cabos (**Tabela 13**).

Tabela 12 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão do aço inoxidável ferrítico.

IMPERFEIÇÃO DE 8mm			IMPERFEIÇÃO DE 10mm			IMPERFEIÇÃO DE 15mm			IMPERFEIÇÃO DE 20mm		
PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)
VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)	
-		6,26	-		6,16	-		5,94	-		6,05
0,00	-	12,25	0,00	-	11,98	0,00	-	11,33	0,00	-	10,77
0,90	7,35	16,87	0,90	7,51	15,85	0,90	7,94	13,93	0,90	8,36	12,80
1,40	11,43	19,10	1,40	11,69	18,06	1,40	12,36	16,24	1,40	13,00	14,60
1,90	15,51	19,86	1,90	15,86	18,95	1,90	16,77	17,39	1,90	17,64	15,94
2,30	18,78	20,10	2,30	19,20	19,55	2,30	20,30	18,12	2,30	21,36	16,78
2,50	20,41	20,13	2,80	23,37	19,45	2,80	24,71	18,20	2,80	26,00	17,09
2,80	22,86	19,95	3,30	27,55	19,07	3,30	29,13	18,00	3,30	30,64	17,04
3,30	26,94	19,53	3,80	31,72	18,63	3,80	33,54	17,68	3,80	35,28	16,80
3,80	31,02	19,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 13- Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável ferrítico.

Imperfeição (mm)	Carga de Euler (kN)	Pcr (kN)		Variação do valor de Pcr em função da Carga de Euler (%)	
		sem cabos	cabos	sem cabos	cabos
8,00	6,87	6,26	12,25	- 8,88	78,31
10,00		6,16	11,98	- 10,33	74,38
15,00		5,94	11,33	- 13,54	64,92
20,00		6,05	10,77	- 11,94	56,77
Imperfeição (mm)	**Melhor Protensão (kN)**	**Pcr na melhor protensão (kN)**		**Acréscimo de carga em função da protensão (%)**	
8,00	2,50	20,13		221,57	
10,00	2,30	19,55		217,37	
15,00	2,80	18,20		206,40	
20,00	3,30	17,04		181,65	

Verifica-se que à medida que são aumentados os níveis de protensões nos estais, as cargas críticas tendem a crescer até a protensão ótima, ou seja, a melhor protensão para cada valor de imperfeição. De acordo com os resultados, na protensão ótima a coluna pode resistir até duas vezes mais. Nota-se que as cargas críticas se tornam mais baixas à medida que o valor das imperfeições iniciais cresce.

A **Figura 77** reproduz as cargas críticas referentes a cada nível de protensão, separadas pelas curvas de cada imperfeição inicial considerada para as colunas de aço inoxidável ferrítico.

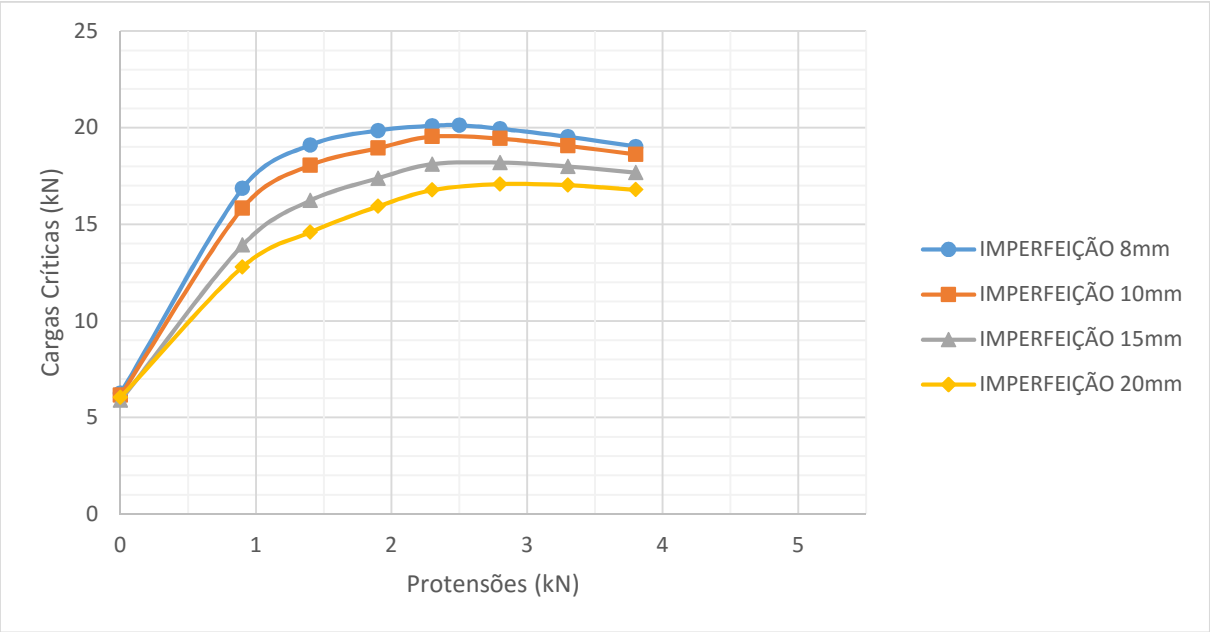


Figura 77 – Gráfico de comparação entre as imperfeições das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável ferrítico.

Apresenta-se o comportamento das colunas através dos gráficos dos deslocamentos horizontais no meio da coluna em função das cargas externas aplicadas para as quatro imperfeições (**Figura 78**, **Figura 79**, **Figura 80** e **Figura 81**).

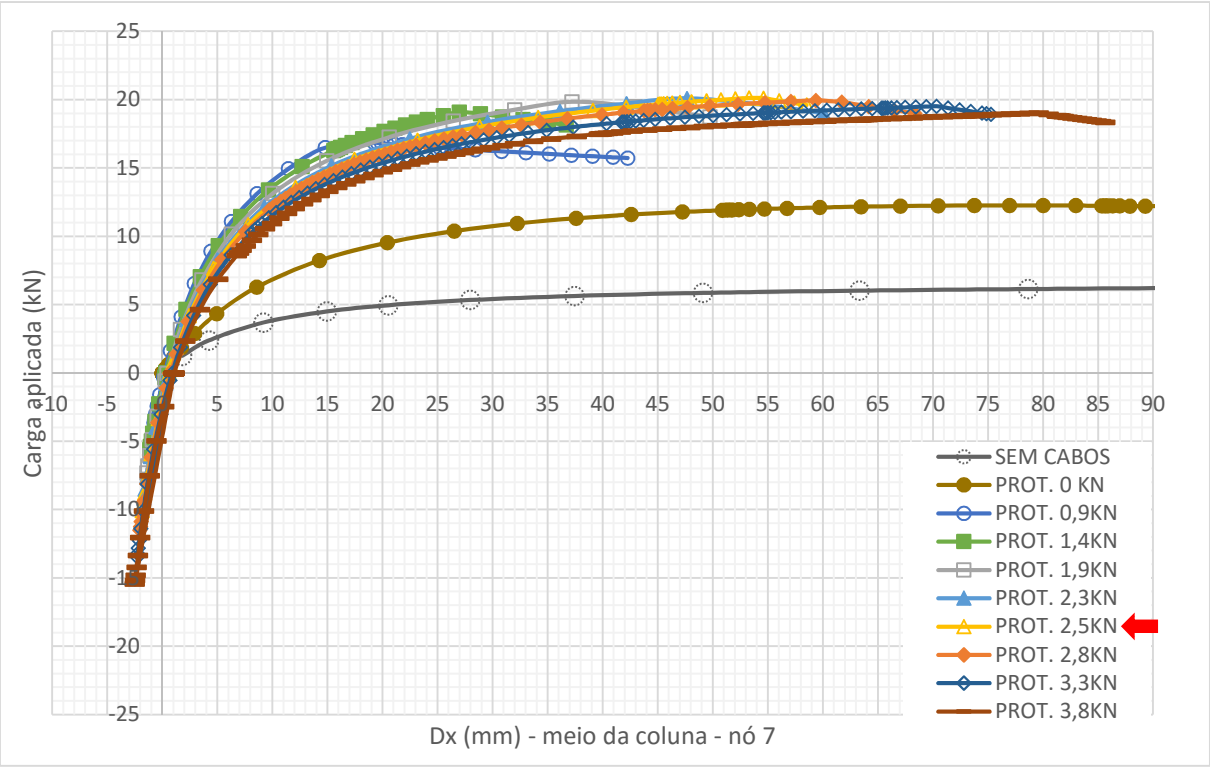


Figura 78 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 8 mm.

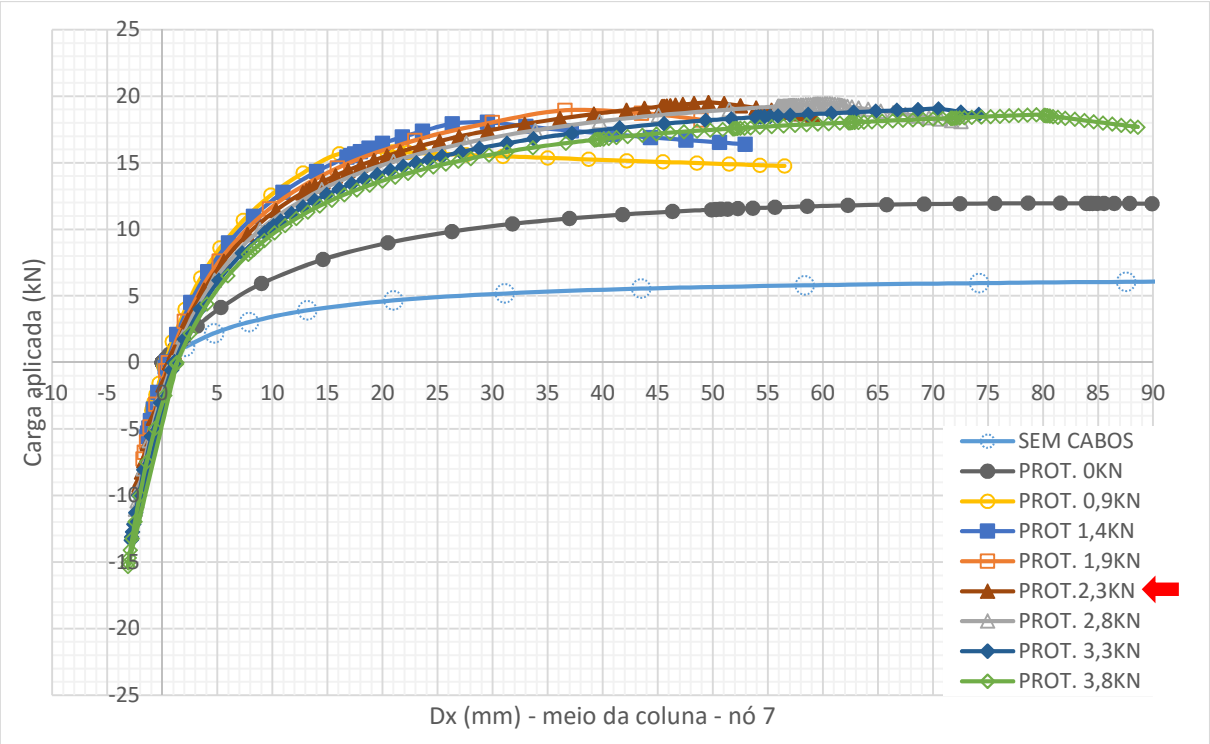


Figura 79 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.

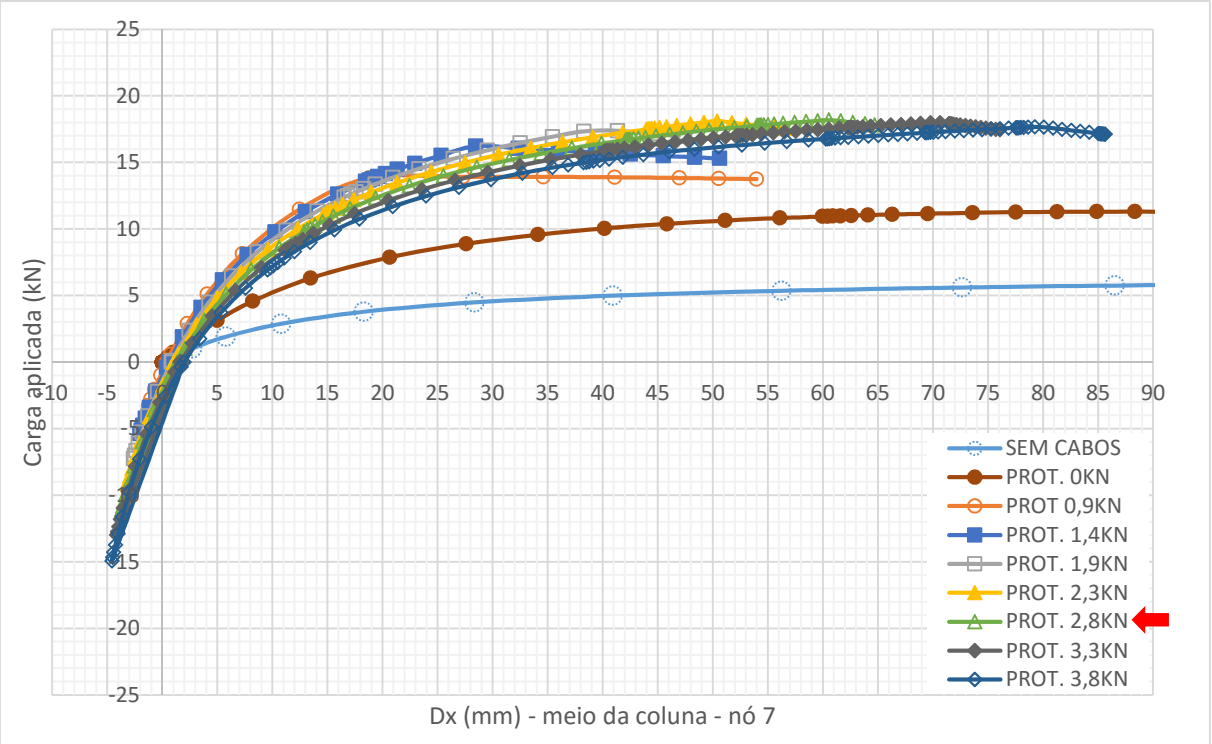


Figura 80 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 15 mm.

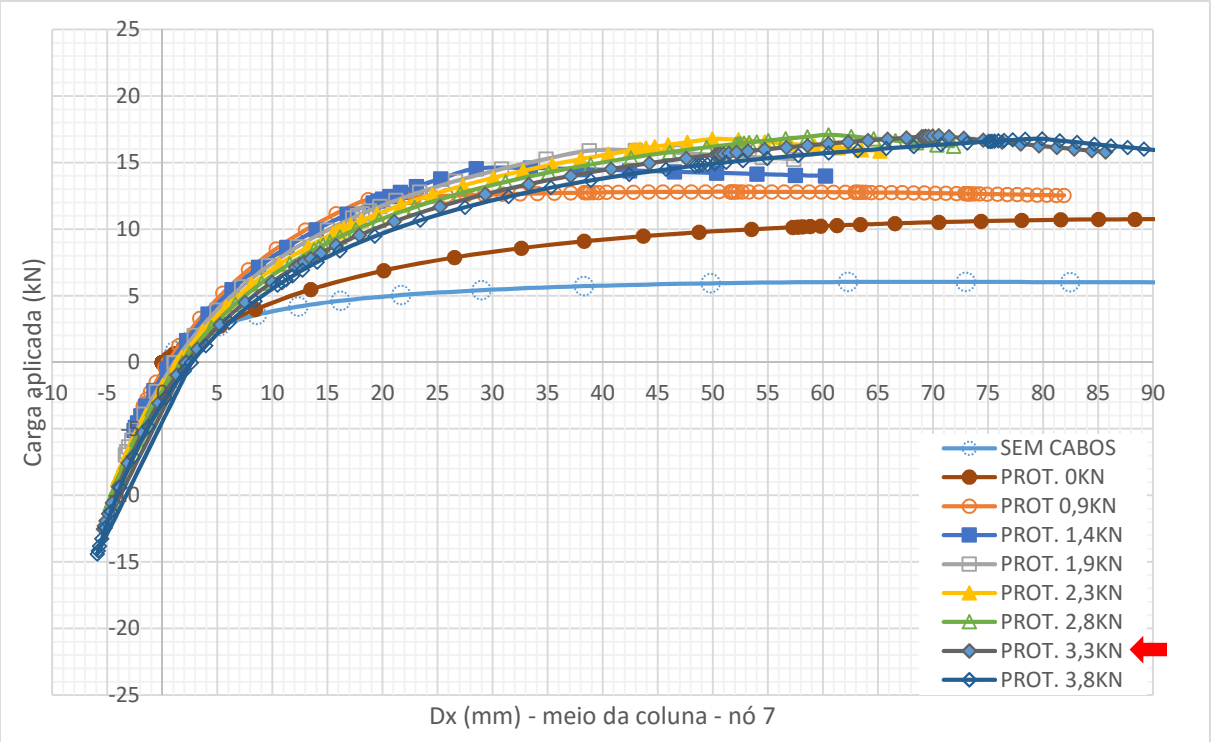


Figura 81 - Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.

Seguem os resultados representados nas curvas de deslocamento horizontal a ¼ e a ¾ da coluna na Figura 82 a Figura 85, representando as imperfeições de 10mm e 20mm. A Figura 86 apresenta um comparativo do deslocamento nos três locais, a ¼ da coluna, meio e ¾ da coluna, em função da carga aplicada. Os demais gráficos estarão disponíveis no Anexo.

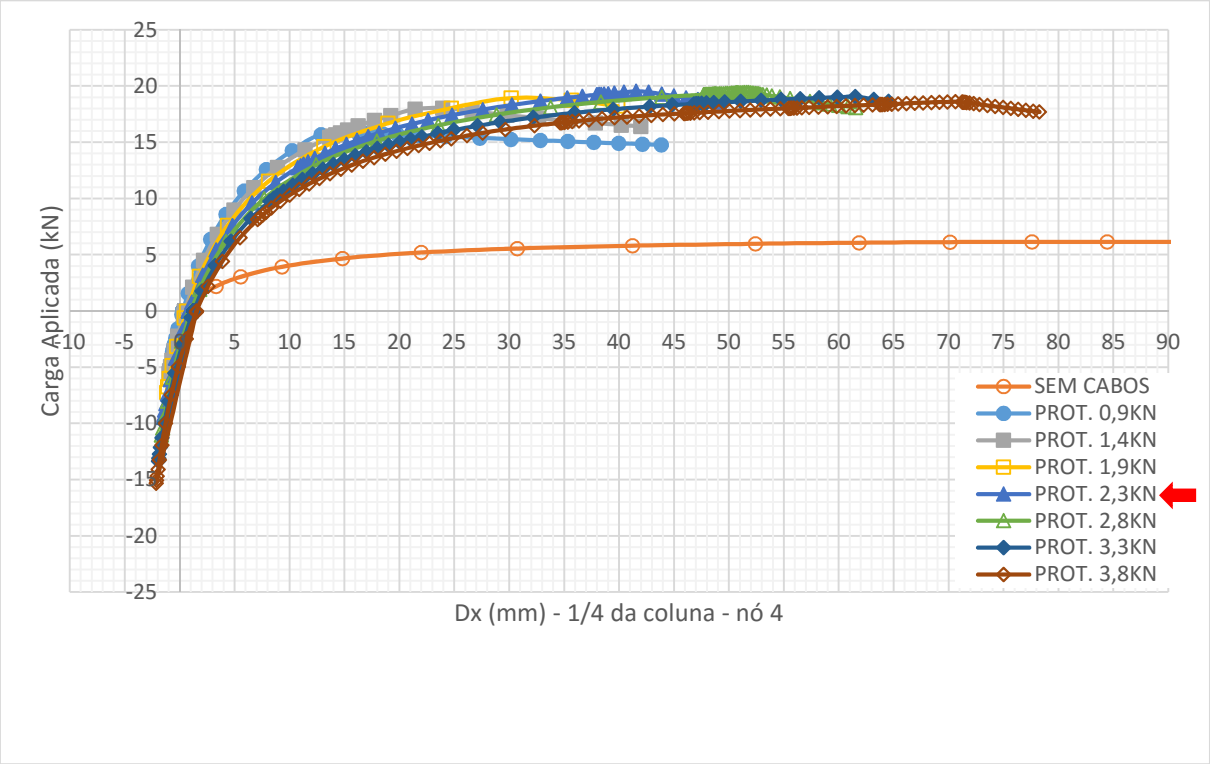


Figura 82 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm

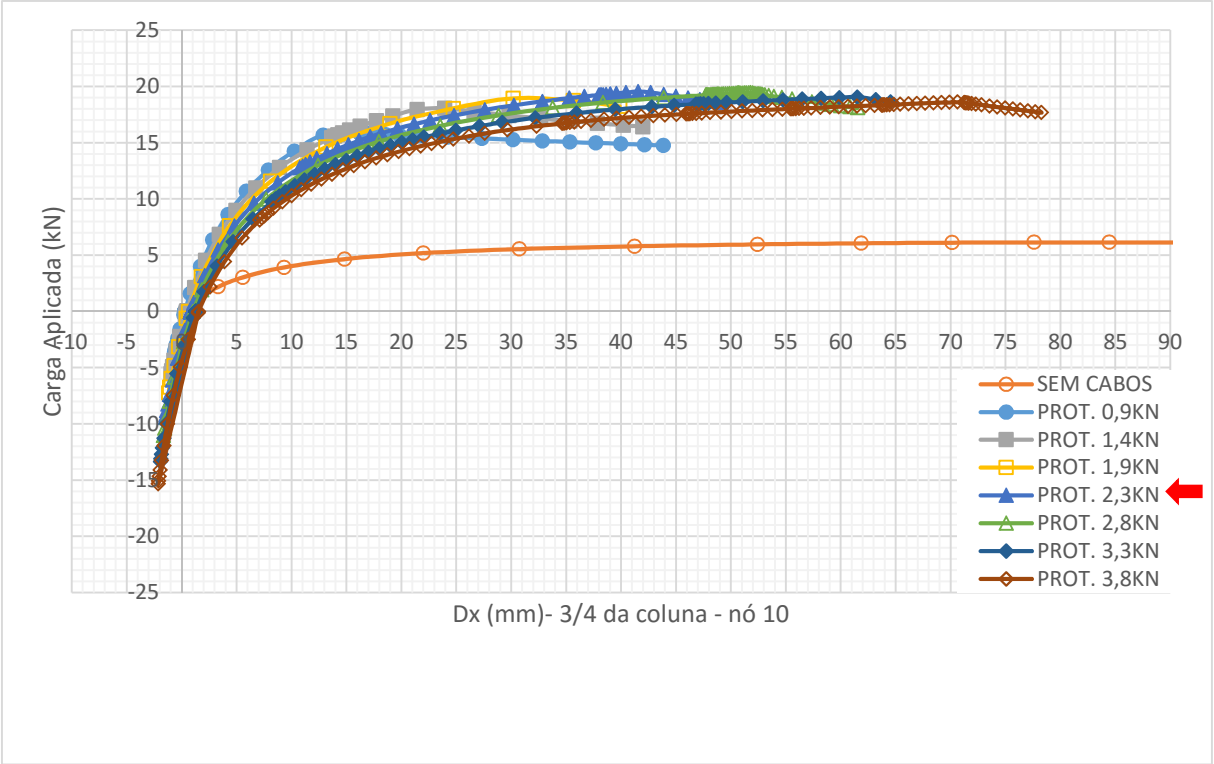


Figura 83 - Gráfico de carga externa versus deslocamento horizontal a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.

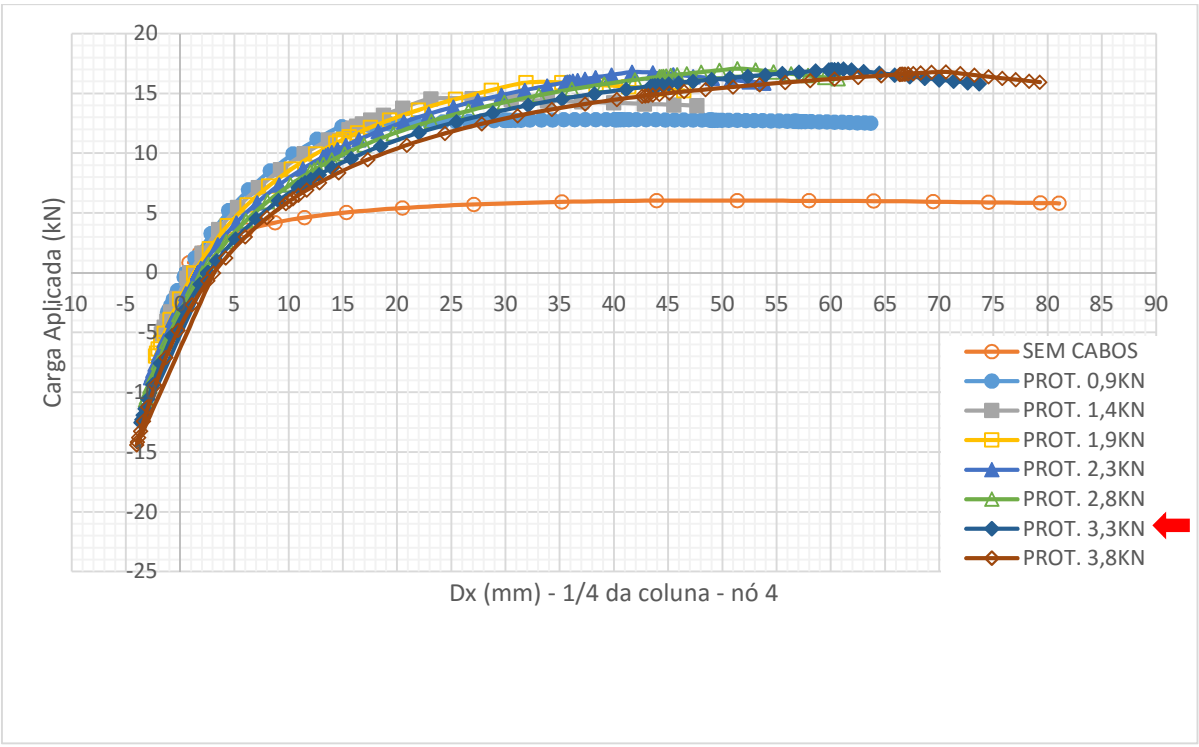


Figura 84 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.

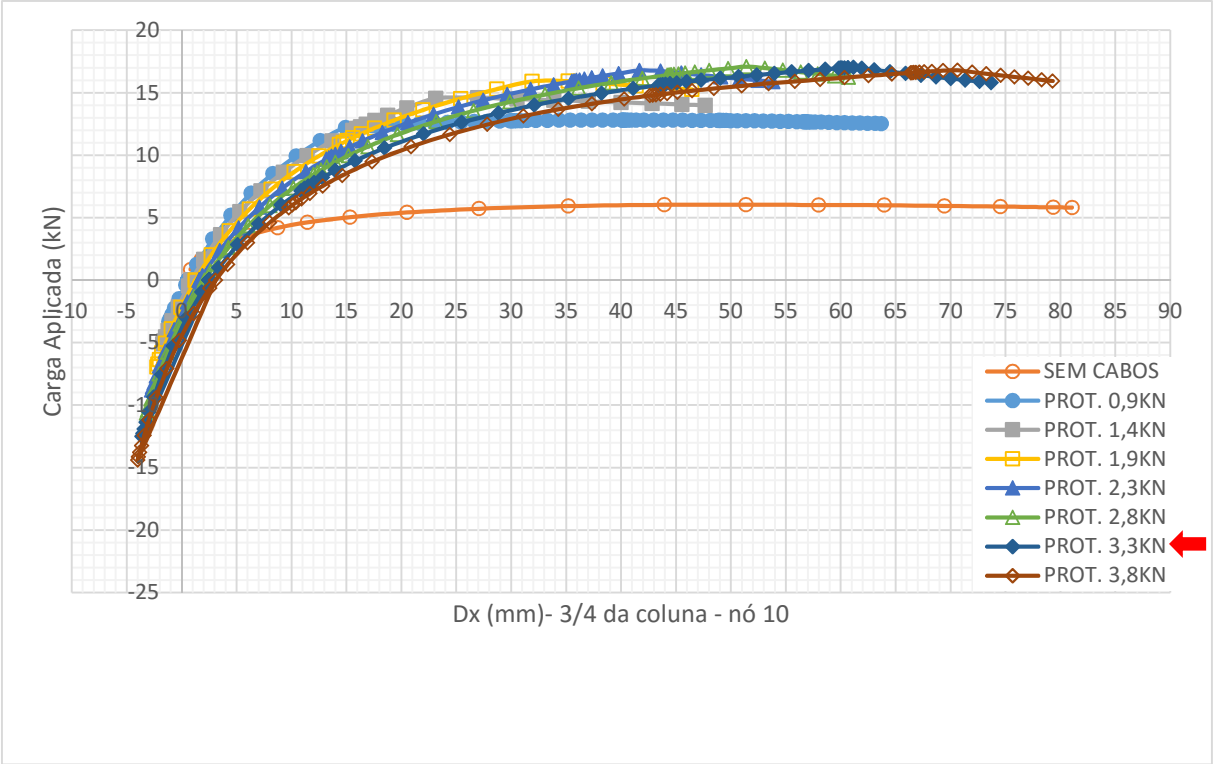


Figura 85 - Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.

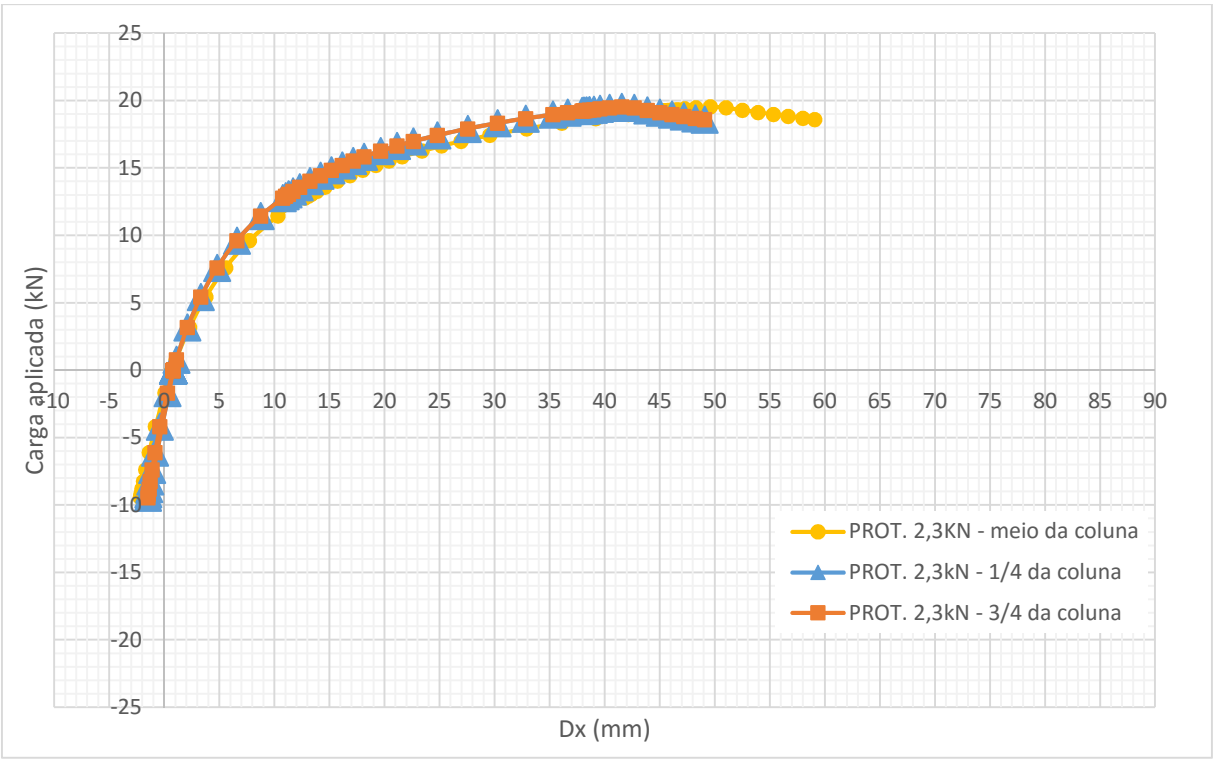


Figura 86 – Gráfico de carga externa *versus* deslocamento horizontal ¼, no meio e a ¾ da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.

Nas próximas figuras (**Figura 87** e **Figura 88**) serão apresentados os gráficos que representam os deslocamentos verticais em função do carregamento externo para as imperfeições de 10mm e 20mm.

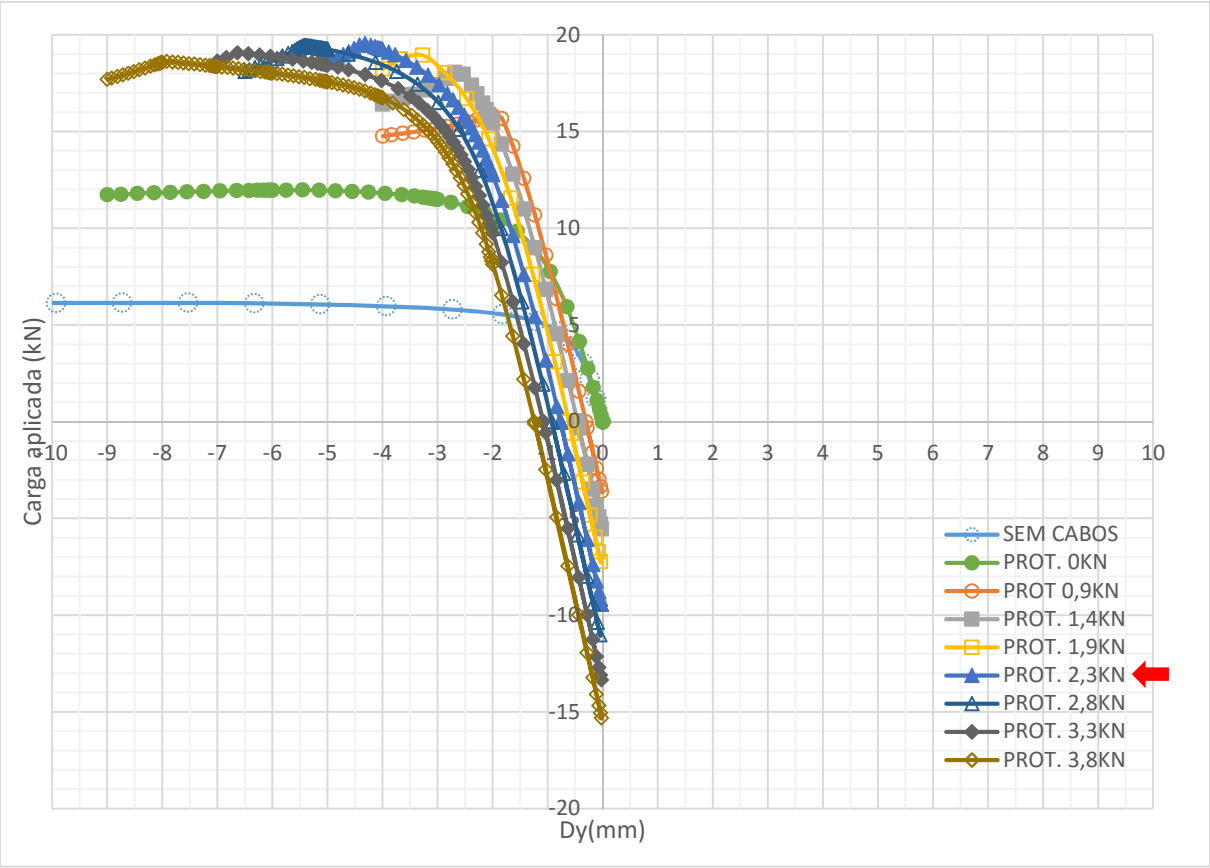


Figura 87 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 10 mm.

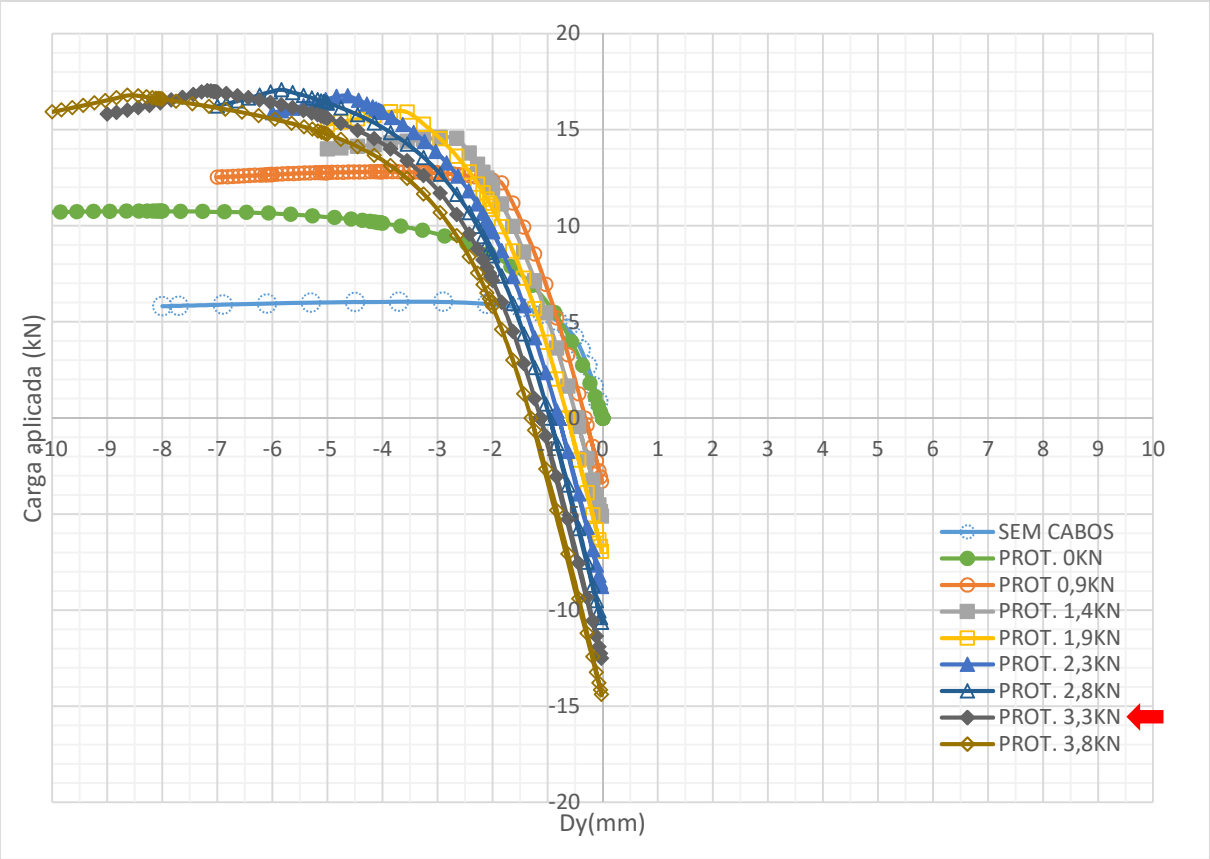


Figura 88 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável ferrítico com imperfeição de 20 mm.

3.4. AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

Utilizou-se dos mesmos critérios adotados para os outros dois tipos de aço inoxidável. Na Tabela 14 **são apresentadas as cargas críticas para as colunas sem cabos, com cabos esticados e com níveis de protensão para cada valor de imperfeição inicial. A**

Tabela 15 mostra a variação do valor da crítica nas colunas sem cabo e com cabo esticado em relação da carga de Euler. Apresenta as melhores protensões para cada imperfeição inicial com os acréscimos de carga crítica de flambagem em função da aplicção da protensão.

Tabela 14 - Carga crítica de flambagem em função do valor de imperfeição e do nível de protensão nos cabos da coluna de aço inoxidável duplex.

IMPERFEIÇÃO DE 8mm			IMPERFEIÇÃO DE 10mm			IMPERFEIÇÃO DE 15mm			IMPERFEIÇÃO DE 20mm		
PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)	PROTENSÃO		CARGA CRÍTICA Pcr (kN)
VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)		VALOR (kN)	% sobre Pcr - cabo esticado (%)	
-		6,07	-		6,00	-		5,84	-		5,70
0,00		11,97	0,00		11,69	0,00		11,07	0,00		10,54
0,90		16,54	0,90		15,54	0,90		13,67	0,90		12,56
1,40		18,62	1,40		17,74	1,40		15,85	1,40		14,41
1,90		19,48	1,90		18,64	1,90		17,08	1,90		15,69
2,30		19,84	2,30		19,11	2,30		17,73	2,30		16,45
2,80		19,79	2,80		19,25	2,80		17,98	2,80		16,84
3,30		19,60	3,30		19,12	3,30		17,99	3,30		17,01
3,80		19,23	3,80		18,81	3,80		17,83	3,80		16,91

Tabela 15 - Variação da carga crítica de flambagem (Pcr) em função da Carga de Euler das colunas sem cabos e com cabos esticados. Acréscimos de carga em função do nível de protensão dos cabos para a coluna de aço inoxidável duplex.

Imperfeição (mm)	Carga de Euler (kN)	Pcr (kN)		Variação do valor de Pcr em função da Carga de Euler (%)	
		sem cabos	cabos	sem cabos	cabos
8,00	6,87	6,07	11,97	- 11,64	74,24
10,00		6,00	11,69	- 12,66	70,16
15,00		5,84	11,07	- 14,99	61,14
20,00		5,70	10,54	- 17,03	53,42
Imperfeição (mm)	**Melhor Protensão (kN)**	**Pcr na melhor protensão (kN)**		**Acréscimo de carga em função da protensão (%)**	
8,00	2,30	19,84		226,85	
10,00	2,80	19,25		220,83	
15,00	3,30	17,99		208,05	
20,00	3,30	17,01		198,42	

A **Figura 89** apresenta, como para os outros aços, as curvas das cargas críticas em função das protensões para os diversos níveis de protensão.

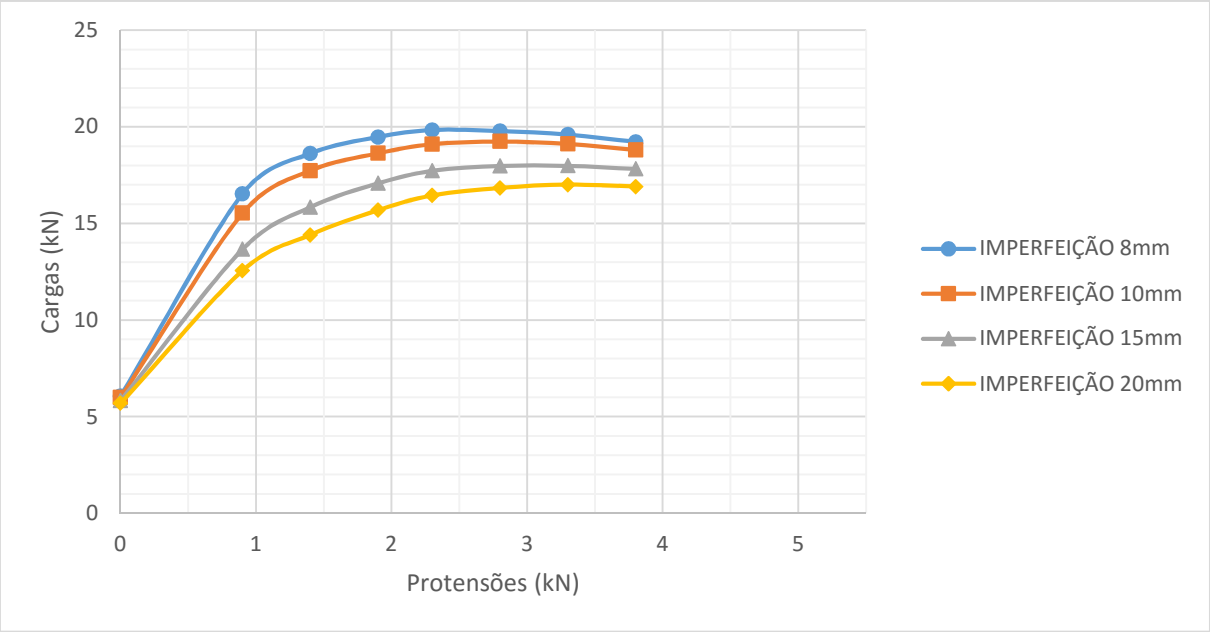


Figura 89 – Gráfico de comparação entre as imperfeições iniciais das colunas na relação protensão *versus* carga crítica de flambagem do aço inoxidável duplex.

Os gráficos das figuras que seguem apresentam o comportamento das colunas quanto ao deslocamento horizontal com o carregamento aplicado. A **Figura 90** a **Figura 93** mostram o deslocamento horizontal no meio da coluna. A **Figura 94** a **Figura 97** apresenta o deslocamento horizontal a ¼ e ¾ da coluna nas imperfeições de 10 mm e 20 mm. A **Figura 98** apresenta o deslocamento horizontal nas três posições: ¼, meio e ¾, para a protensão de 2,80 kN com imperfeição de 10 mm.

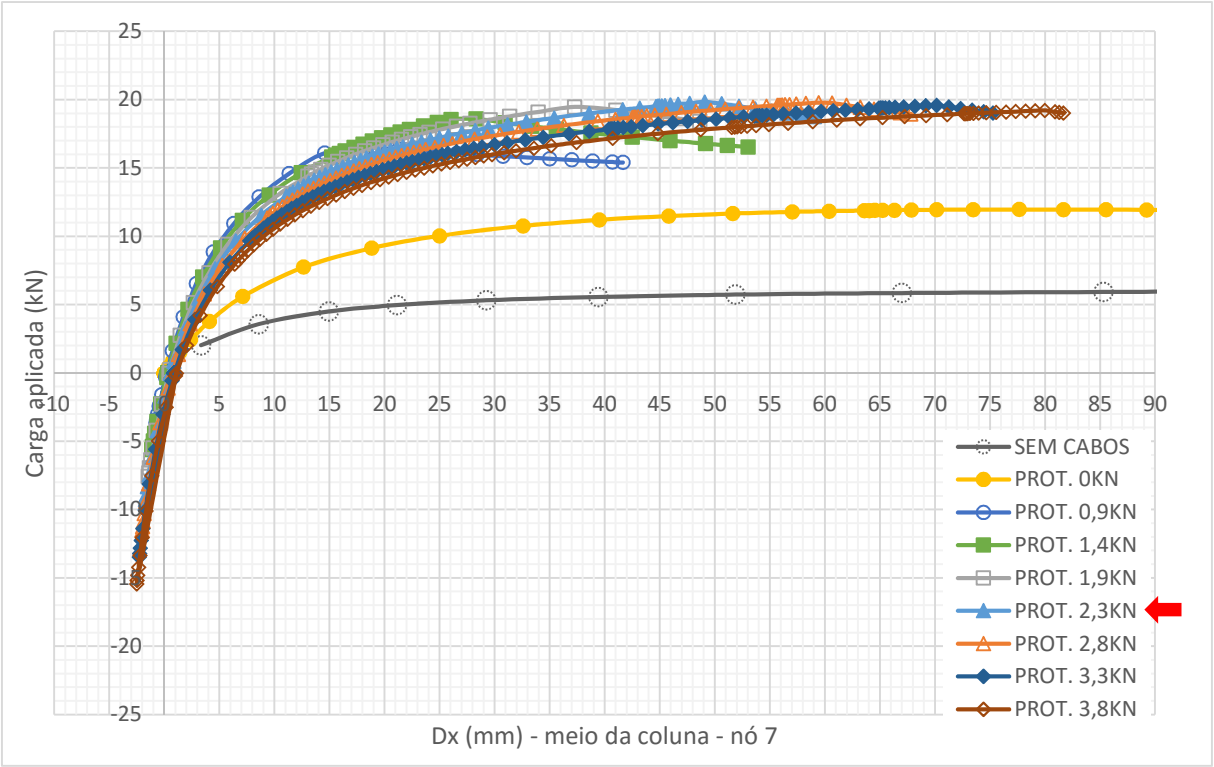


Figura 90 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 8 mm.

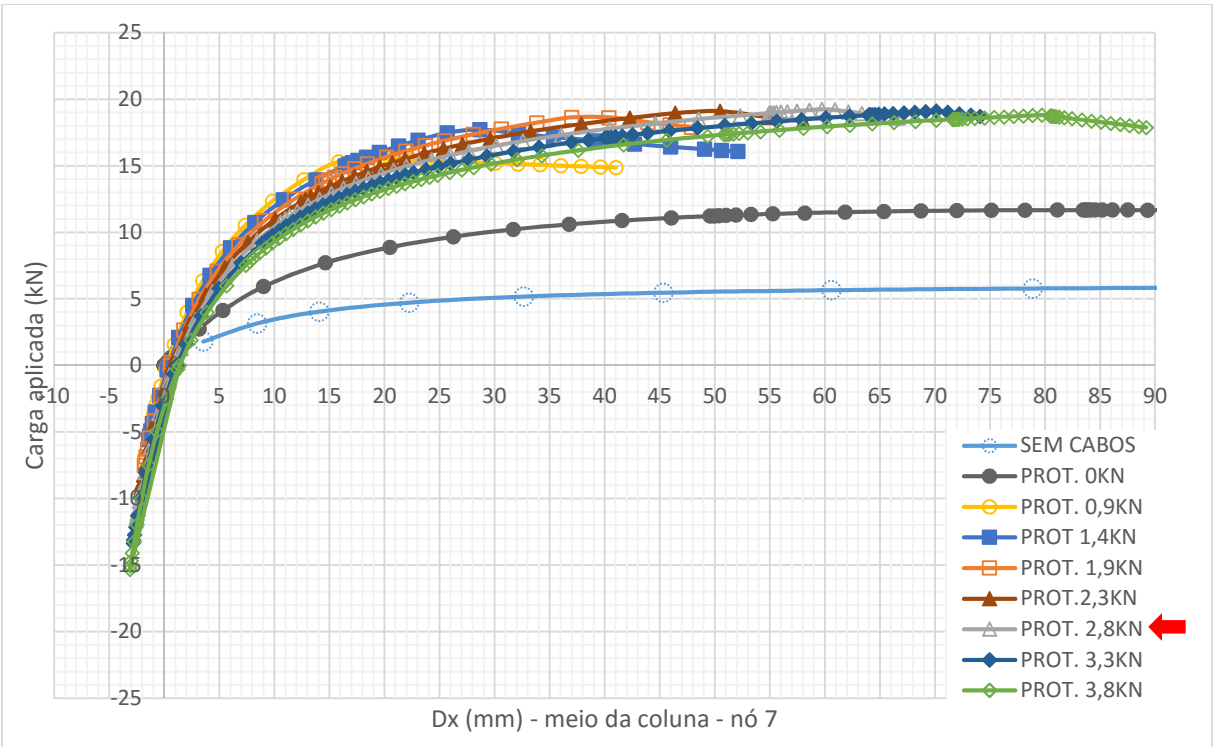


Figura 91 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.

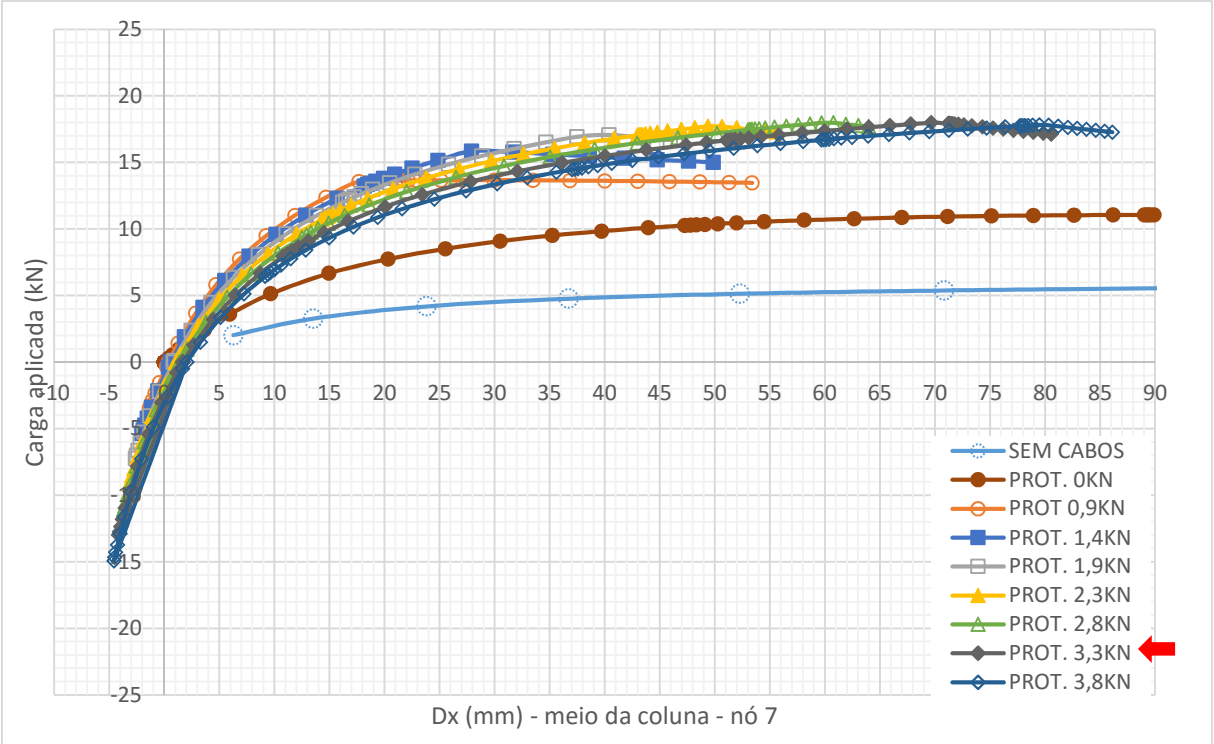


Figura 92 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 15 mm.

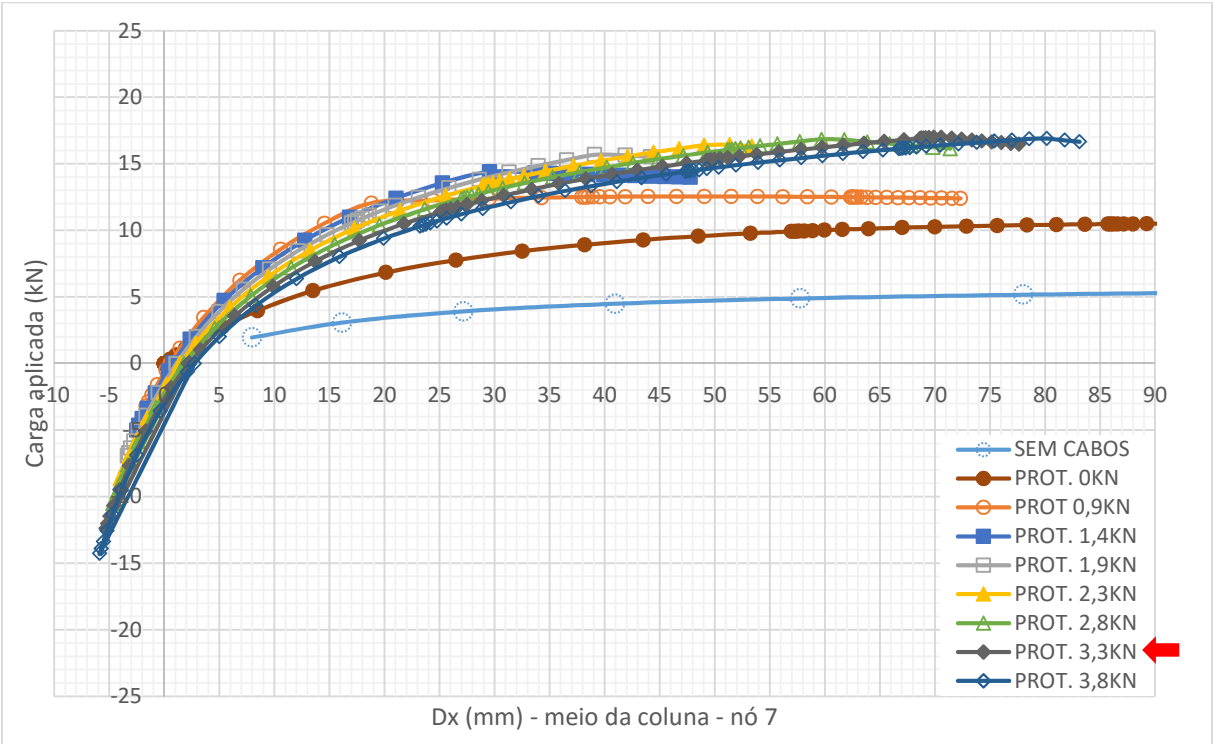


Figura 93 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm.

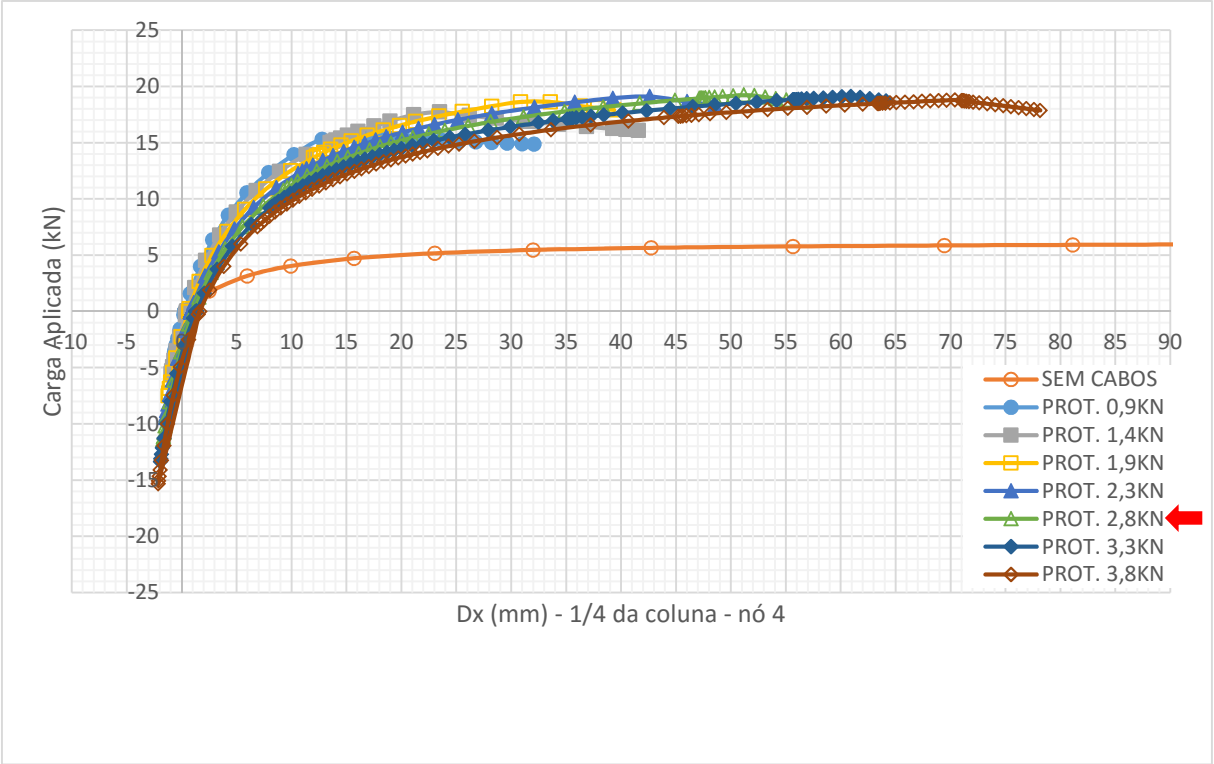


Figura 94 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.

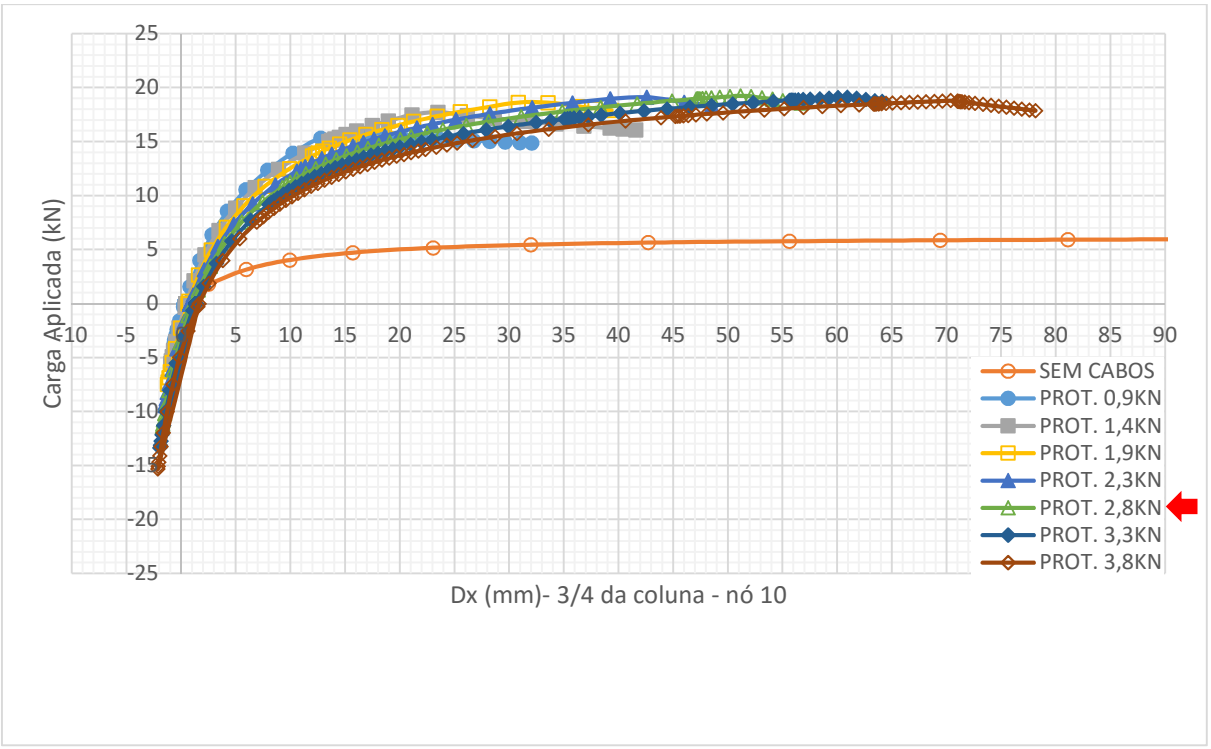


Figura 95 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.

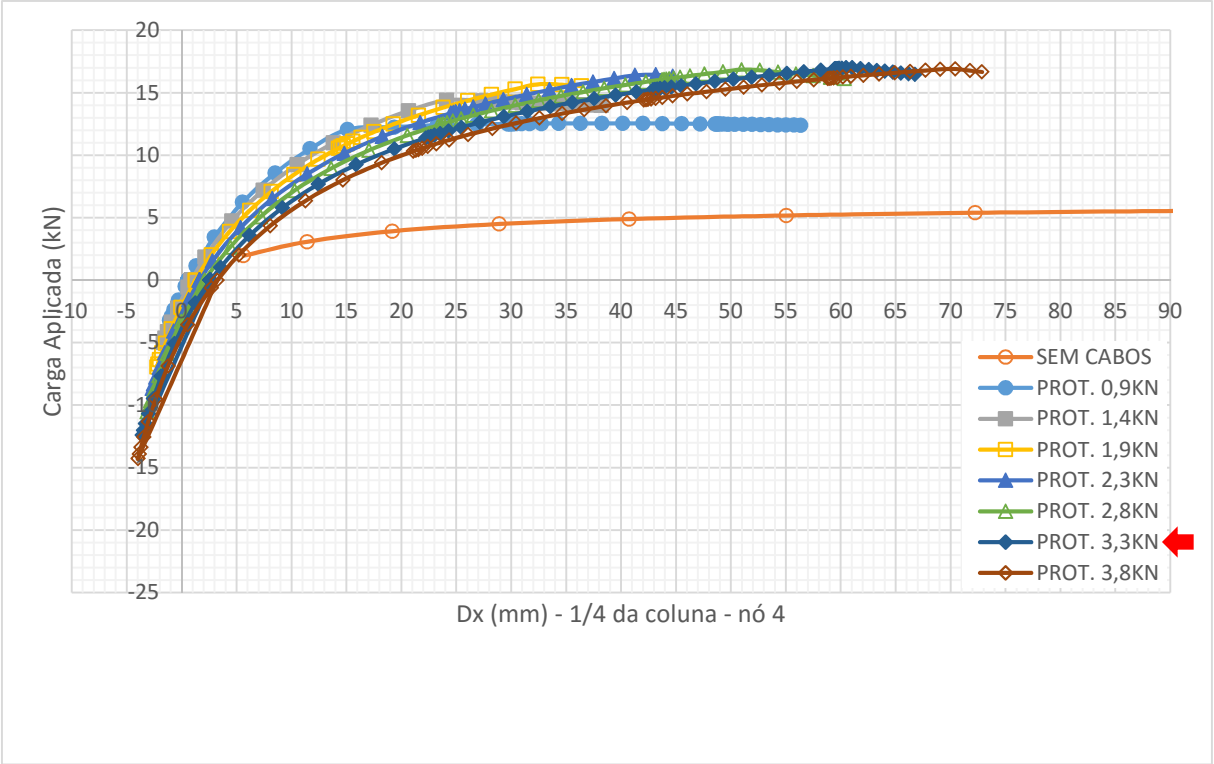


Figura 96 – Gráfico da carga externa *versus* deslocamento horizontal a ¼ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm.

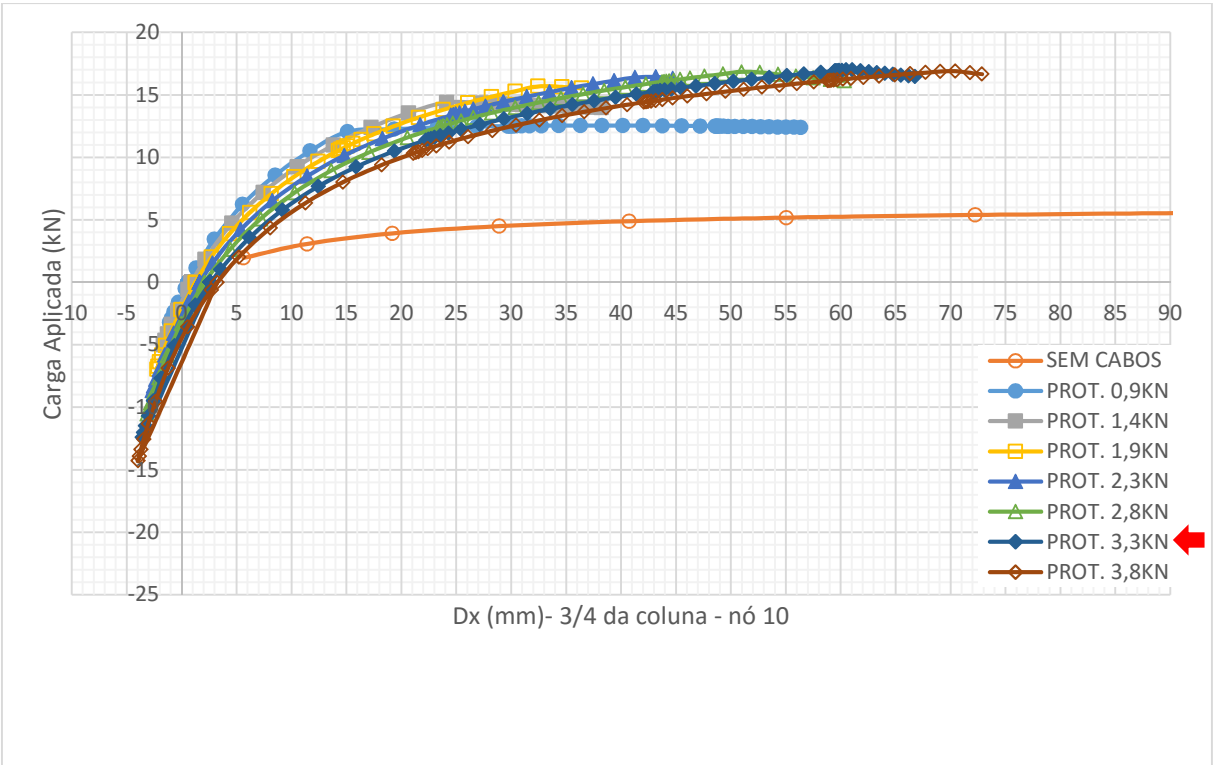


Figura 97 – Gráfico da carga externa versus deslocamento horizontal a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm.

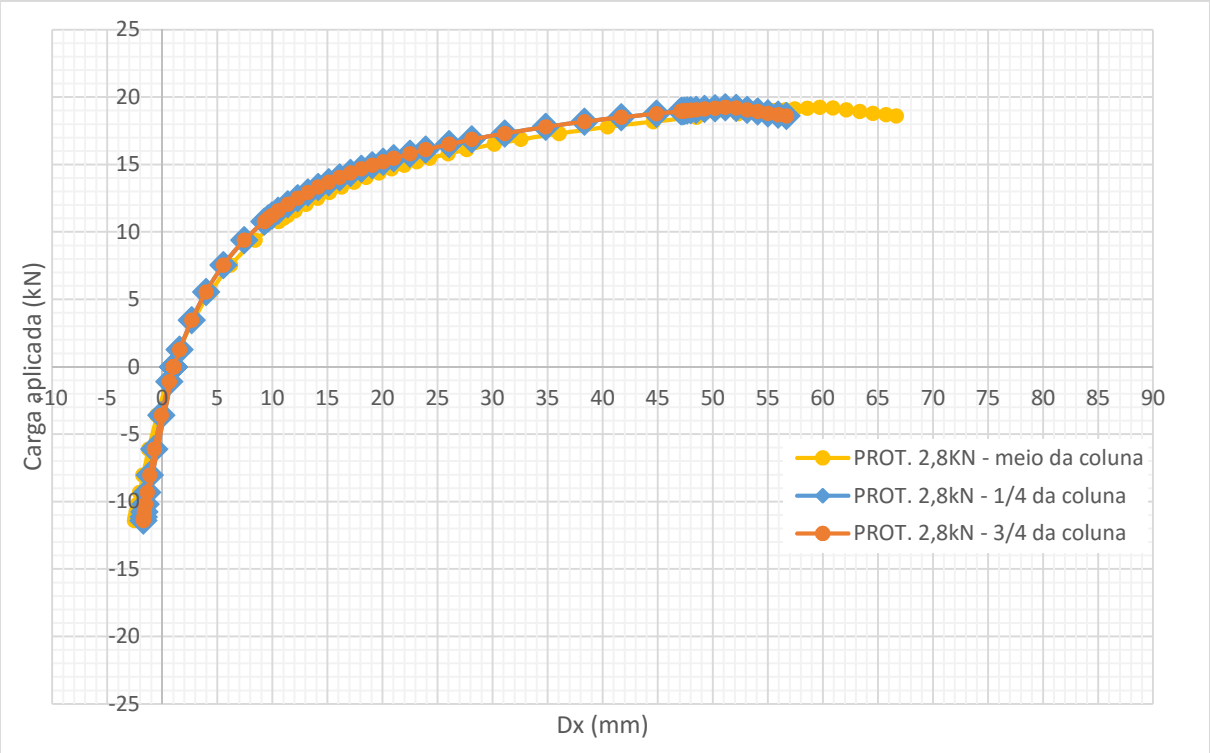


Figura 98 – Gráfico da carga externa versus deslocamento horizontal a ¼, no meio e a ¾ da coluna de aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.

Os gráficos mostrados a seguir, a partir da **Figura 99** e **Figura 100**, referem-se aos deslocamentos verticais das colunas com relação ao carregamento externo.

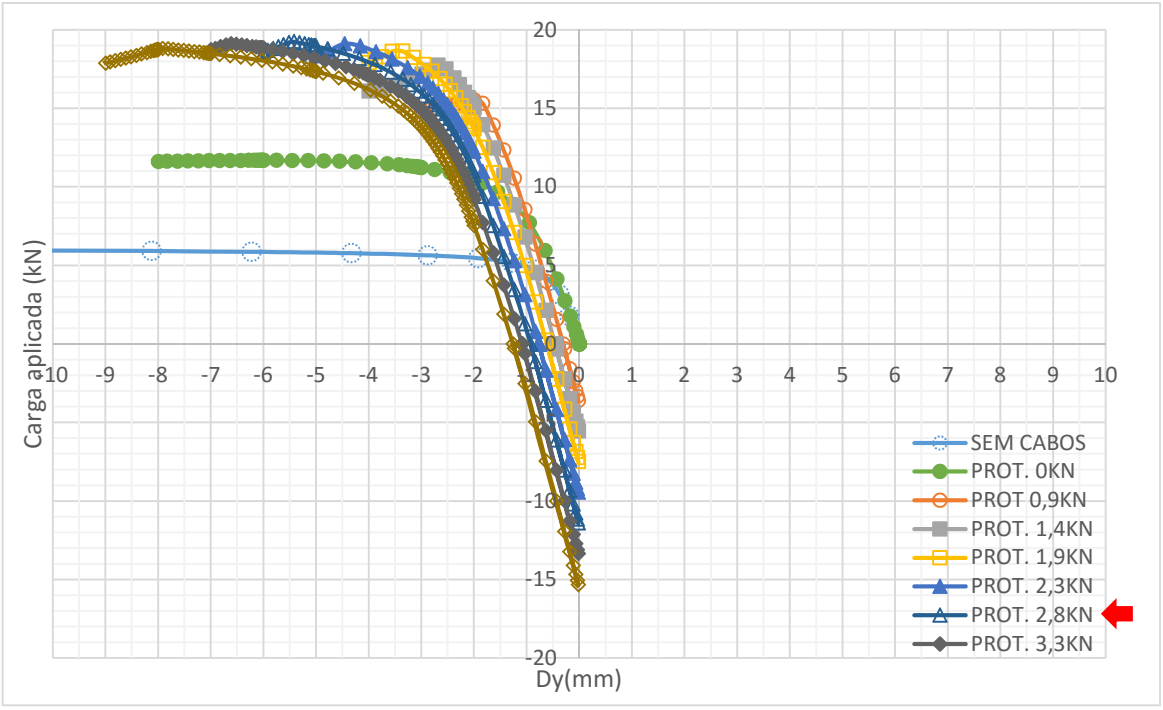


Figura 99 – Gráfico de carga externa versus deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 10 mm.

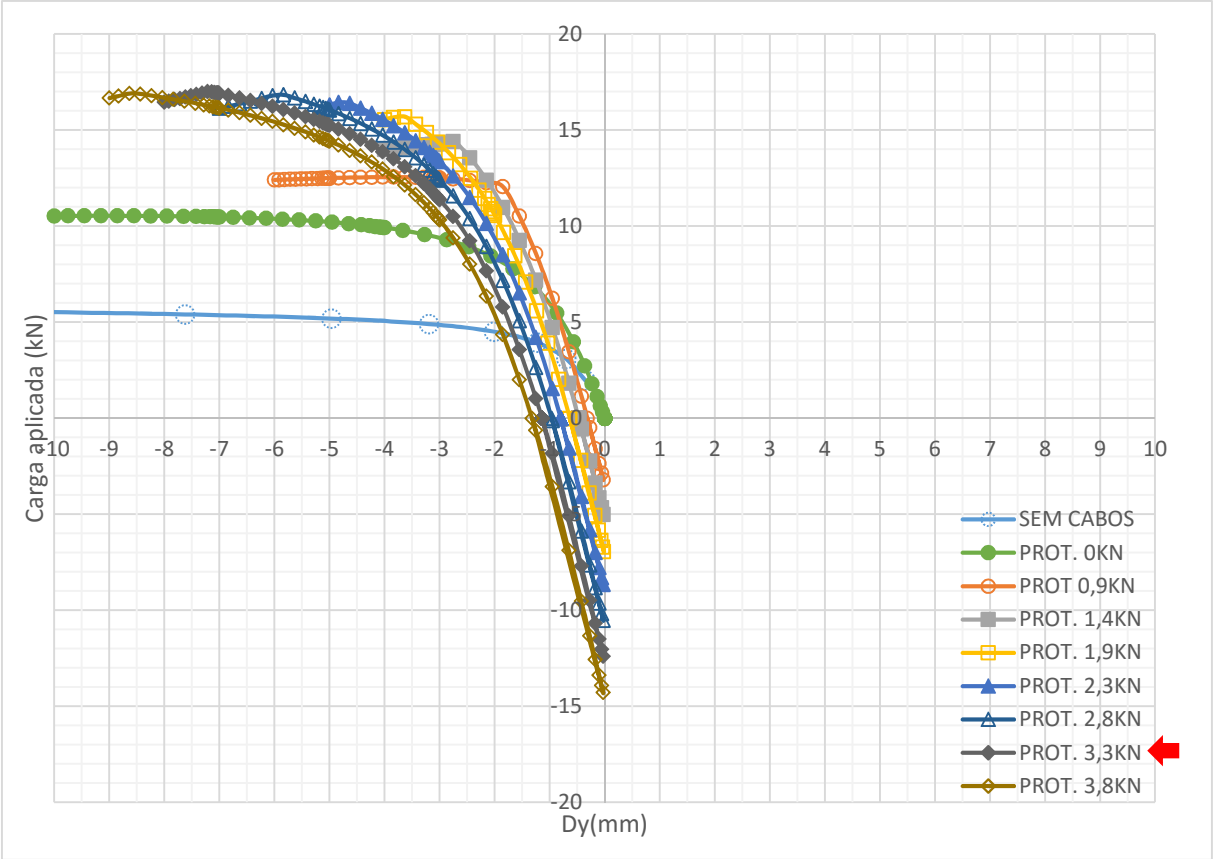


Figura 100 – Gráfico de carga externa versus deslocamento vertical da coluna do aço inoxidável duplex com imperfeição de 20 mm.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aço inoxidável tem se mostrado uma interessante solução para diversas aplicações na construção civil. A resistência a corrosão, em especial, é a característica primordial quando se pensa em substituir o aço inoxidável pelo aço carbono. Existe ainda uma série de vantagens onde o aço inoxidável supera a utilização do aço carbono, contudo o alto custo do aço inoxidável, além da falta de conhecimento dos benefícios de sua utilização como elemento estrutural, leva os projetistas a não utiliza-los. Os elementos estruturais avaliados neste trabalho, colunas de aço estaiadas e protendidas, sobre a ótica de diversos autores, em diversos estudos, mostrou-se uma solução eficiente e promissora, visto que consegue proporcionar um ganho de resistência considerável em função dos estais.

A coluna em aço inoxidável estaiada e protendida, visto que o comportamento do aço inoxidável se dá de forma semelhante ao do aço carbono, pode ser empregada com finalidade estrutural em elementos de fachada, em plataformas de petróleo ou qualquer outro ambiente corrosivo como em regiões litorâneas, pois, comprovadamente, apresenta maior resistência a corrosão que o aço carbono, além de agregar valor estético. Este contexto a torna atrativa para o mercado, onde apesar de o custo inicial superar o do aço carbono, deve-se considerar os gastos com manutenção e a aparência diferenciada.

O presente trabalho além de apresentar o comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável, fez uma comparação com o desempenho das mesmas em aço carbono. O estudo apontou as principais referências bibliográficas sobre o assunto, assim como as considerações necessárias para a elaboração de um modelo numérico. Com isso, o modelo numérico proposto foi calibrado em função de uma coluna de aço carbono e outra de aço inoxidável. Foram feitas análise paramétricas para três tipos de aço inoxidáveis e para o aço carbono, considerando variação nas imperfeições iniciais da coluna e diversos níveis de protensão.

Principais conclusões

Efeito da protensão nas colunas

Conclui-se que o efeito de protensão nas colunas diminui seu comprimento de flambagem e gera um acréscimo de até 200 % sobre o valor da carga crítica de flambagem. A **Tabela 16** apresenta o efeito dos da utilização de cabos (estais) na coluna, mesmo sem protensão com uma variação em percentual referente a mesma coluna sem cabos. A **Tabela 17** mostra a variação em percentual referente ao acréscimo de carga na coluna para os melhores níveis de protensão para cada imperfeição dos aços estudados.

Tabela 16 – Acréscimo de carga na coluna em função da utilização de cabos (estais) ainda sem protensão.

Aço	Imperfeição	Pcr (kN)		Acréscimo de Carga em função dos Cabos (%)
	(mm)	sem cabo	cabo esticado	
Austenítico	8	6,05	11,94	97,36
	10	5,9	11,63	97,12
	15	5,62	10,96	95,02
	20	5,37	10,37	93,11
Ferrítico	8	6,26	12,25	95,69
	10	6,16	11,98	94,48
	15	5,94	11,33	90,74
	20	6,05	10,77	78,02
Duplex	8	6,07	11,97	97,20
	10	6	11,69	94,83
	15	5,84	11,07	89,55
	20	5,7	10,54	84,91
Carbono	10	6,6	12,19	84,70
	20	6,28	11,05	75,96

Tabela 17 – Acréscimo de carga na coluna em função da protensão dos cabos (estais).

Aço	Imperfeição (mm)	Pcr da coluna sem cabos (kN)	Melhor Protensão (kN)	Pcr da melhor protensão (kN)	Acréscimo de Carga em função da Protensão (%)
Austenítico	8	6,05	1,86	19,39	220,50
	10	5,90	2,33	18,76	217,97
	15	5,62	2,16	17,39	209,43
	20	5,37	2,82	16,19	201,43
Ferrítico	8	6,26	2,50	20,13	221,57
	10	6,16	2,30	19,55	217,37
	15	5,94	2,80	18,20	206,40
	20	6,05	3,30	17,04	181,65
Duplex	8	6,07	2,30	19,84	226,85
	10	6,00	2,80	19,25	220,83
	15	5,84	3,30	17,99	208,05
	20	5,70	3,30	17,01	198,42
Carbono	10	6,60	2,80	19,87	201,06
	20	6,28	3,80	17,65	181,05

Verificou-se que nas colunas estaiadas e protendidas utilizadas como modelo do presente trabalho, houve flambagem no primeiro modo, assim como as de Araújo [6], [7], onde a flambagem no segundo modo ocorreu quando utilizou vergalhão como estai, concluindo que a maior rigidez dos cabos é responsável pela flambagem no segundo modo.

Comparação entre os tipos de aços

Com o intuito de observar o comportamento dos diversos tipos de aço utilizando-se os mesmos parâmetros, foram elaborados gráficos comparativos sobre diversos aspectos.

Nas **Figura 101** a **Figura 104** são apresentadas as curvas de cargas críticas em função de diversos tipos de protensão para cada tipo de aço nas imperfeições de 8 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm respectivamente.

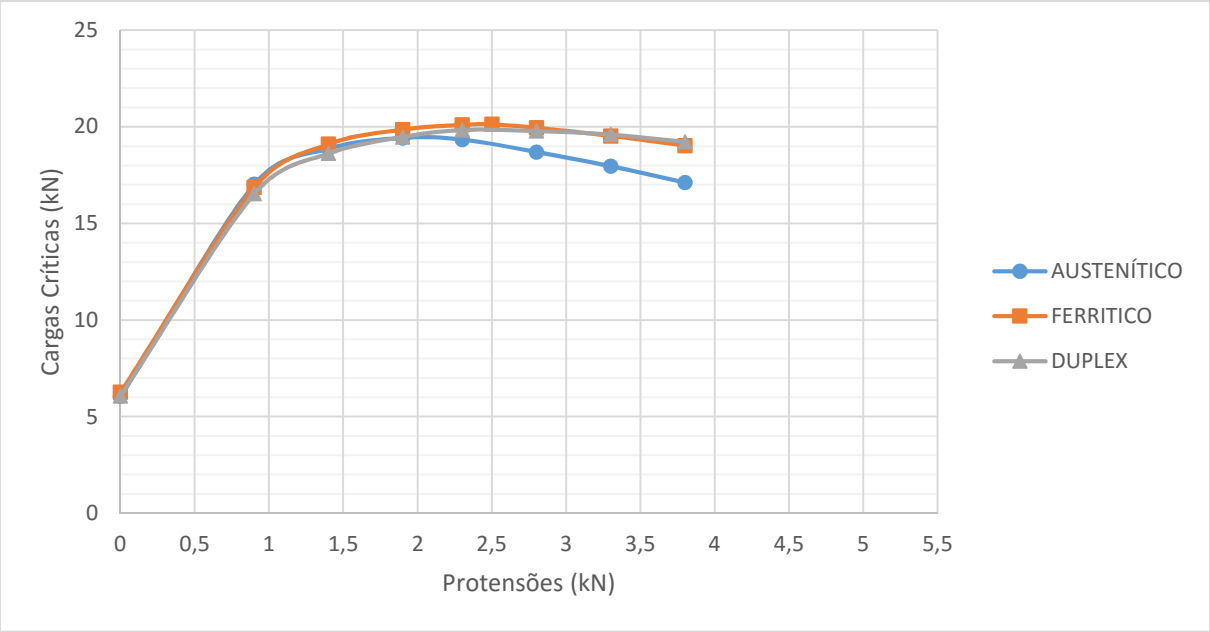


Figura 101 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 8mm.

Na Figura 101 nota-se o comportamento similar dos aços, com exceção da queda mais acentuada na carga crítica de flambagem dos modelos em aço inoxidável austenítico após a carga ótima.

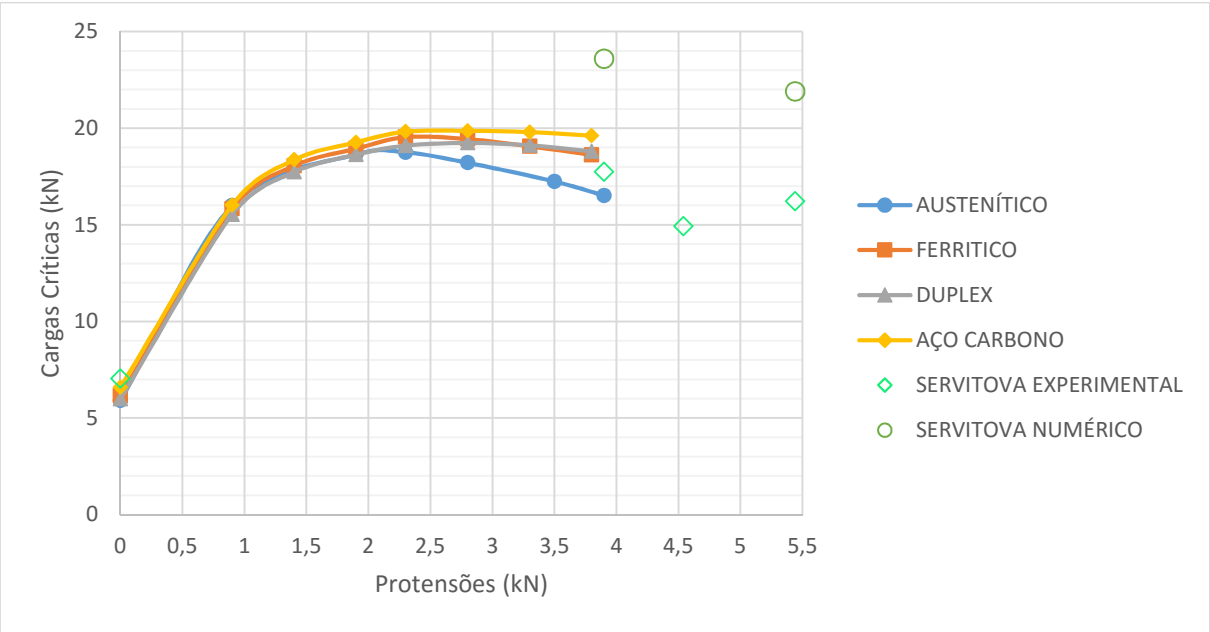


Figura 102 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 10mm.

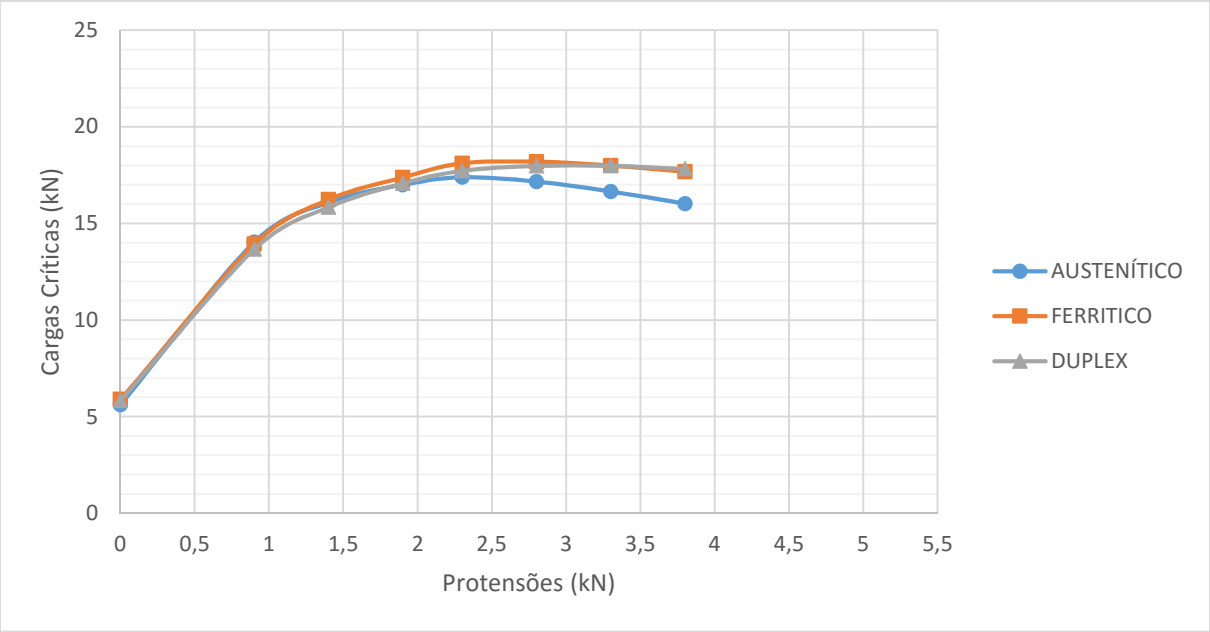


Figura 103 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 15mm.

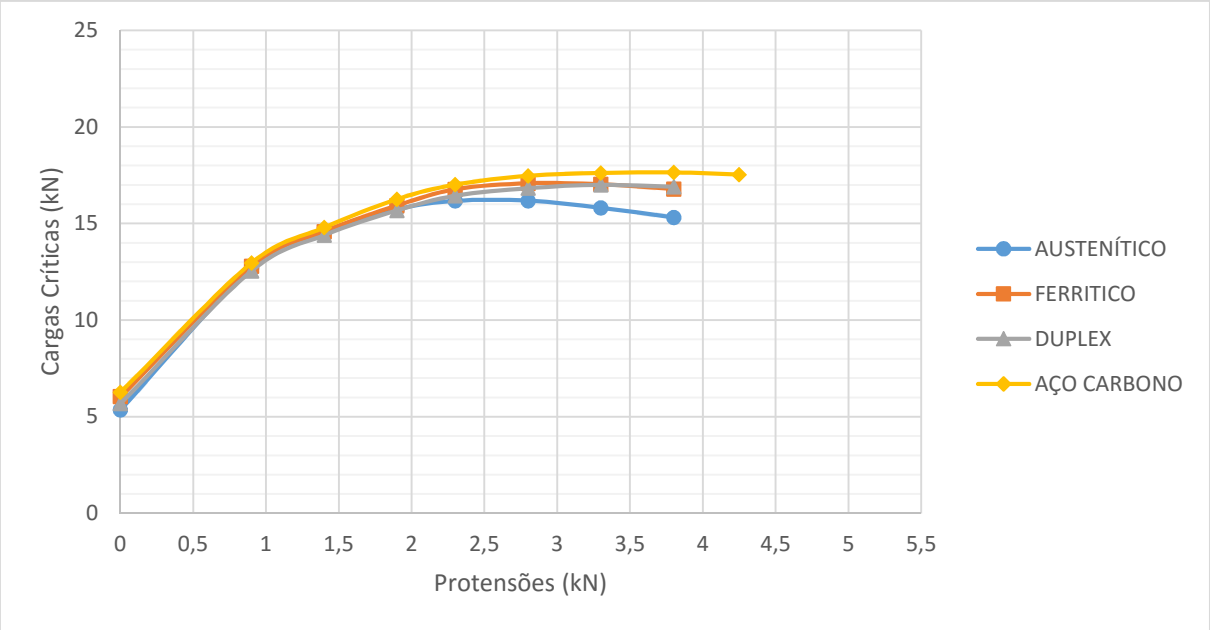


Figura 104 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e protensões para cada tipo de aço na imperfeição de 20mm.

Nota-se que existe uma protensão ótima para cada tipo de aço, onde a carga crítica de flambagem alcança um valor máximo, decaindo logo após, pois para cada nível de protensão aplicada é determinada uma carga crítica de flambagem, onde as

curvas do gráfico carga aplicada *versus* deslocamento, apresentam um pico, logo decaindo.

Na **Figura 102** foram acrescentados ao gráfico os valores das análises numéricas e experimentais de Servitova e Machacek [10]. Visto que são poucas as informações a respeito de suas análises, marcou-se os pontos, considerando insuficiente para o traçado de uma curva. Verifica-se que os seus resultados experimentais condizem com a curva dos modelos numéricos do presente trabalho. Contudo, seus resultados numéricos não tiveram um bom desempenho, admitindo cargas críticas bem superiores, o que compromete sua validação. Presume-se que os altos valores referidos ocorreram por Servitova e Machacek [10] utilizarem um modelo numérico mais rígido. Ainda neste gráfico, percebe-se que a variação da carga crítica de flambagem final apresenta dois extremos, como valor mínimo, o aço inoxidável austenítico e como valor máximo o aço carbono.

A **Tabela 18** descreve os resultados das análises numéricas e experimentais de Servitova e Machacek [10], comparadas com os resultados obtidos no presente trabalho.

Tabela 18 - Comparação dos valores das cargas obtidas com as cargas dos modelos numérico e experimental de Servitova [10].

PROTENSÃO (KN)	CARGA DO MODELO NUMÉRICO (KN)	SERVITOVA		ERRO MOD.NUMÉRICO / SERVITOVA EXP. (%)	CARGA DE EULER (KN)
		CARGA EXPERIMENTAL (KN)	CARGA DO MODELO NUMÉRICO (KN)		
-	6,60	7,04		6,25	6,63
3,90	16,50	17,75	23,60	7,04	-
4,54	15,30	14,93	CARGAS INFERIORES	- 2,48	-
5,44	12,80	16,23	21,90	21,13	-

A **Figura 105** mostra a relação da protensão ótima com imperfeição para cada tipo de aço.

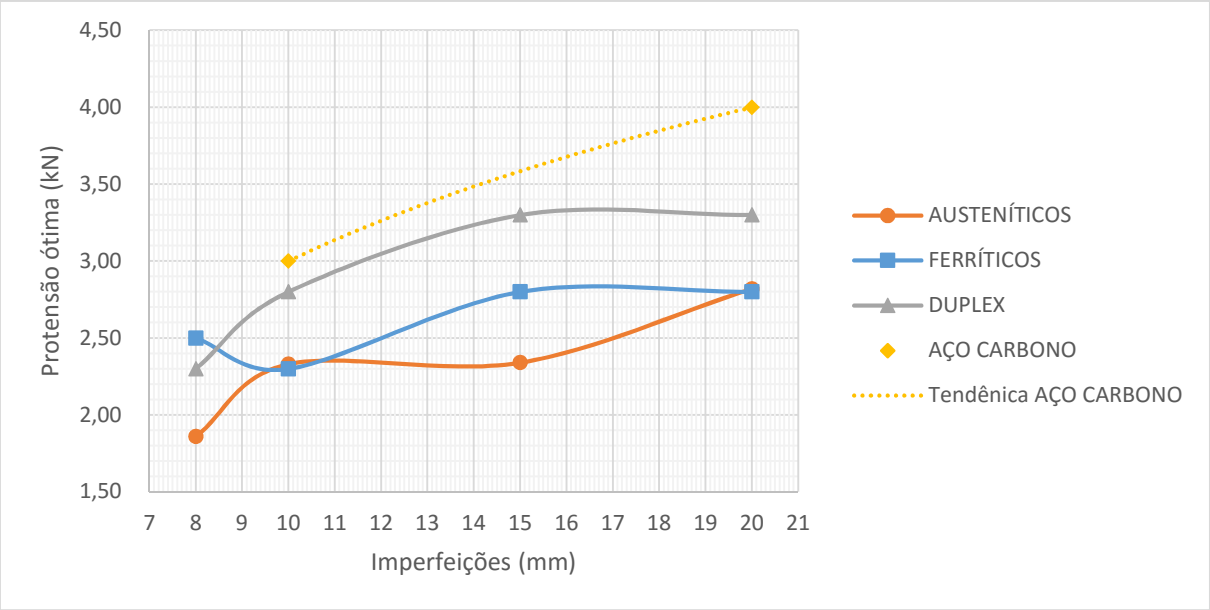


Figura 105 – Gráfico de comparação entre imperfeições e protensões para cada tipo de aço.

Nota-se, quanto as imperfeições da coluna, quanto maior o nível de imperfeição, em geral, para alcançar sua carga ótima necessita de uma maior protensão.

Ainda pode-se concluir que com o aumento no valor da imperfeição, o valor da carga crítica de flambagem para cada tipo de aço decresce, como mostra a **Figura 106**.

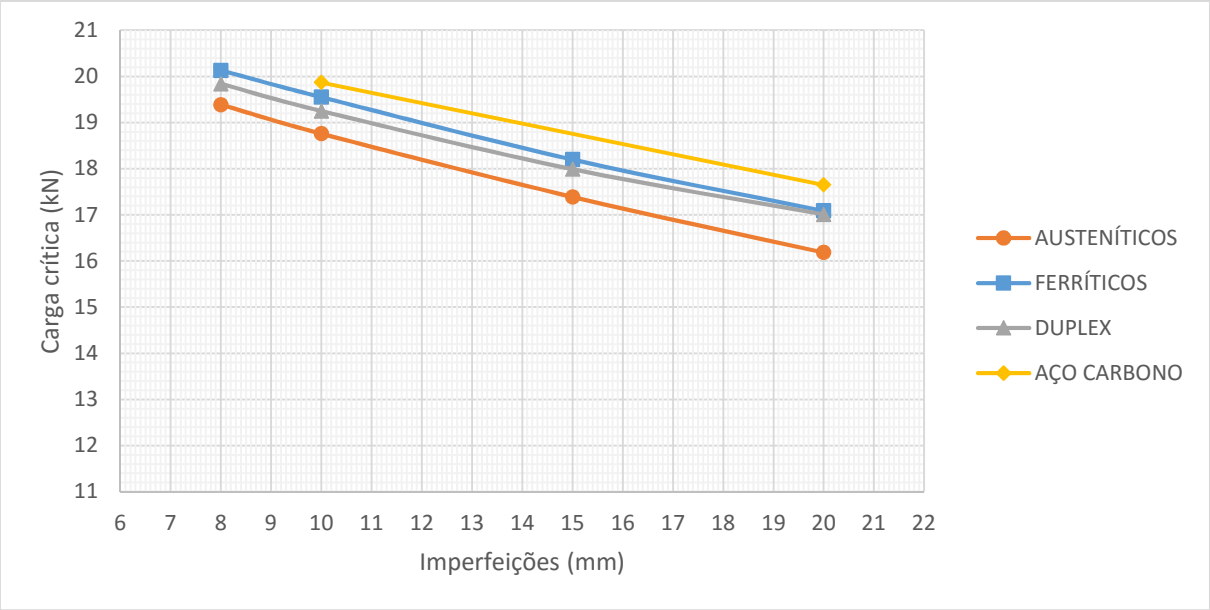


Figura 106 – Gráfico de comparação entre cargas críticas e imperfeições para cada tipo de aço.

Coeficientes de flambagem

A **Tabela 19** mostra as verificações para as condições de contorno na coluna estudada, de 5m de comprimento. A coluna proposta apresenta-se rotulada nas duas extremidades. Foi simulado através da fórmula de Euler, qual tipo de restrição pode ser considerado nas extremidades da coluna em função do coeficiente de flambagem (k). Considerando-se que a fórmula de Euler é aplicada para a coluna ideal, e que uma destas condições é que se apresente perfeitamente reta, foi adotada a menor imperfeição (10 mm).

Tabela 19 - Determinação do coeficiente de flambagem (k) para a coluna.

Tipo de aço (imperfeição de 10mm)	Pcr (kN) (sem cabos)	Cálculo de k	Pcr (kN) (cabos esticados)	Cálculo de k	Protensão (kN)	Pcr (kN)	Cálculo de k
Carbono	6,60	1,02	12,19	0,75	2,80	19,87	0,59
Austenítico	5,90	1,08	11,63	0,77	2,33	18,76	0,61
Ferrítico	6,16	1,06	11,98	0,75	2,30	19,55	0,59
Duplex	6,00	1,07	11,69	0,77	2,80	19,25	0,60

Nota-se que para o modelo com a coluna sem cabos o coeficiente de flambagem aproxima-se da condição rotulada nas duas extremidades, onde o k é igual a 1. Nas colunas com estais esticados, sem protensão, verificou-se o k próximo de 0,7, condição engastada e rotulada. Nas colunas protendidas (com protensão ótima), notou-se o k beirando a condição de biengastada. Conclui-se, portanto, que à medida que a coluna é protendida seu comprimento de flambagem diminui e consequentemente sua carga crítica de flambagem aumenta.

Pode-se verificar mais uma vez a eficiência da protensão nas colunas estaiadas, de modo que, comprovadamente, a carga crítica de flambagem aumenta significativamente de valor quando a coluna é protendida através de cabos (estais).

Quanto às imperfeições iniciais, quanto maior o valor da imperfeição, a coluna deve ser mais protendida para alcançar a carga crítica de flambagem máxima. Do mesmo modo, quanto menor a imperfeição, maiores são as cargas críticas.

Com base nos resultados alcançados, constatou-se a similaridade no comportamento mecânico das estruturas de aço inoxidável com as de aço carbono, apesar do aço inoxidável possuir diferenças suficientes em termos de propriedades físicas e mecânicas. Faz-se necessário explorar as capacidades do aço inoxidável, tornando-o mais atrativo para projetistas e construtores. Contudo, o maior diferencial do aço inoxidável é a resistência corrosão, apesar de apresentar outras inúmeras vantagens como a leveza, o aspecto estético, a fácil manutenção, durabilidade e melhor resistência a fogo. Em situações onde a resistência mecânica é o fator determinante de escolha do material, o aço inoxidável certamente será dispensado, devido ao seu alto custo.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros podem ser considerados os seguintes assuntos:

- Colunas com outros comprimentos;
- Colunas com outros tipos de estais;
- Colunas com diâmetros diferentes do tubo principal e do tubo secundário;
- Colunas com outras configurações de braços;
- Estudo de sensibilidade das imperfeições;
- Tubos preenchidos de concreto normal, concreto leve ou com outros tipos de materiais;
- Modificação da fórmula proposta por Serra *et al.* [30].

REFERÊNCIAS

[1] New York Architecture. Chrysler Building. Disponível em < http://www.nyc-architecture.com/MID/MID021.htm > Acesso em 22/02/2015.

[2] La Dèfense – História do La Dèfense. Disponível em <http://www.ladefense.com.br/historia-do-la-defense/> Acesso em 22/02/2015.

[3] HIBBELER, R. C. Resistência de Materiais. [S.I.] Editora Parson.

[4] Portal Metálica. Ponte de Millau: O Arranha-céu Estaiado. Disponível em <http://www.metalica.com.br/ponte-de-millau-a-construcao-da-maior-ponte-estaiada-do-mundo> Acesso em 13/12/2014.

[5] Imprensa Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Ponte do Saber ganha iluminação sustentável. Disponível em <http://www.ioerj.com.br/portal/modules/news/article.php?storyid=1902> Acesso em 07/11/2014.

[6] ARAUJO, R. R. de; Estudo teórico-experimental de colunas de aço estaiadas e protendidas. Rio de Janeiro, 2005. 128p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[7] ARAUJO, R. R. de; Estudo do comportamento estrutural de colunas de aço estaiadas e protendidas. Rio de Janeiro, 2009. 301p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[8] ARAUJO, R. R., Vellasco, P, Lima, L, Silva, JG, Andrade, S, Silva, L.; An Experimental Investigation of prestressed stayed steel columns. Eurosteel 2011, August 31 September 2, 2011, Budapest, Hungary.

[9] Levolux. Disponível em <http://www.levolux.com/L_image_pages/chiswickpark3.htm> Acesso em 07/11/2014.

[10] SERVITOVA, K; Machacek, J. Prestressed stainless steel stayed columns. Eurosteel 2011, August 31 September 2, 2011, Budapest, Hungary.

[11] ROMEIRO, S. B. B. Quimica na Siderurgia. Área de Educação Química do Instituto de química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, p. 15-29, 1997. Série Química e Tecnologia.

[12] Arcelor Mittal inox Brasil. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações, 2008. Disponível em: http://www.grupohumma.com.br/biblioteca/literatura/aplicacaoeespecificacao.pdf

[13] Portal Metalica. Tipos de aço inoxidável, 2013. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=686>. Acesso em 2016.

[14] ARAUJO, L. S.; Modelagem de colunas de aço inoxidável estaiadas e protendidas. Projeto Final (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia , Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

[15] Instituto Aço Brasil. Processo siderúrgico. Instituto Aço Brasil. 2009. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/. Acesso em 2015.

[16] VELLASCO, P. C. G. da S.; Andrde, S. A. L. de; Silva, J. G. S. da. Concepção e Projeto Estrutural do Palco Principal do Rock in Rio III. Construção Magazine, v. 6, p. 4-11, 2003.

[17] VELLASCO, P. C. G. da S.; Andrade, S. A. L. de ; Silva, J. G. S. da . Sistema Construtivo e Montagem do Palco Principal do Rock in Rio III. Construção Magazine, v. 7, p. 30-55, 2003.

[18] LIMA, L. R. O. et al. Numerical modelling of prestressed stayed stainless steel columns. In: TAYLOR & FRANCIS GROUP Tubular Structures XIV. London: (s.n.), 2012. P. 377-382.

[19] OSOFERO AI, Wadee MA, Gardner L. Design of prestressed stayed columns. Journal of Constructional Steel Research 80; 2013: 287-298.

[20] ANSYS. Basic Analysis Procedures Guide, Release 11 (www.ansys.com).

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

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

[23] HAFEZ, H. H.; Temple, M. C.; Ellis, J. S.; Pretensioning of single-cross-arm stayed columns, Journal of the Structural Division, ASCE, 108(7), 1623-1640, 1982.

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

[25] CHAN, S.; Shu, G.;Lu, Z.; Stability analysis and parametric study of prestressed stayed columns, Engineering Structures, Elsevier, 24, 115-124, 2002.

[26] STEIRTEGHEM, J. V.; Wilde, W. P. de; Samyn, P.; Verbeeck, B. P.; Wattel, F.; Optimum design of stayed columns with split-up cross arm, Advanced in Engineering Software, Elsevier, 36, 614-625, 2005.

[27] SAITO, D.; Wadee, M. A.; Post-buckling behavior of prestressed steel stayed columns, Engineering Structures, Elsevier, 30, 1224-1239, 2008.

[28] SAITO, D.; Wadee, M. A.; Numerical studies of interactive buckling in prestressed steel stayed columns, Engineering Structures, Elsevier, 31, 432-443, 2009.

[29] WADEE, MA, Gardner L, Osofero AI. Design of prestressed stayed columns. J. Constr Steel Res 2013;80:287–98.

[30] SERRA, MIGUEL ; Shahbazian, Ashkan ; Da Silva, Luís Simões ; Marques, Liliana ; Rebelo, Carlos ; Da Silva Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves . A full scale experimental study of prestressed stayed columns. Engineering Structures , v. 100, p. 490-510, 2015.

[31] YU J, Wadee M. A., 2015, Numerical and analytical studies of prestressed stayed columns with multiple cross-arms. Eighth International Conference on Advances in Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 22-24, 2015.

[32] LI P, Wadee M. A., YU J., Christie N. G., Wu M. et al.. Stability of prestressed stayed steel columns with a three branch crossarm system. Journal of Constructional Steel Research, Vol: 122, Pages: 274-291, 2016.

[33] ABNT. NBR 8800; Projeto de estruturas de aço e ABNT NBR 8800. Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil, 237 p. 2008.

[34] EUROCODE 3. EN 1993, Design of steel structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, CEN-European Committee for Standardisation; 2005.

[35] ALMEIDA, S.R.de; Vellasco, P.C.G.daS.; e, Araujo R.Rde, Modelagem Computacional de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas In, 32º Congresso Íbero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (CILAMCE), 2011, Ouro Preto-MG, 12pp CDRom.

[36] ALMEIDA, S. R. de; Vellasco, P.C.G.daS.; e, araujo R.Rde, Modelagem Computacional de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas In, Semana de Iniciação Científica (SEMIC), 20., 2011, Rio de Janeiro. Resumos. CDRom.

[37] ALMEIDA, S. R. de, Araujo, R. R. de, Vellasco, P. C. G. da S., Lima, L. R. O. de, Andrade, S. A. L. de, Numerical Finite Element Modelling of Prestressed Stayed Steel Columns, 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, CC2013, 2013, Cagliari, 16pp CDRom.

[38] ALMEIDA, S. R. de, Araujo, R. R. de, Vellasco, P. C. G. da S., Lima, L. R. O. de, Andrade, S. A. L. de, Modelagem em Elementos Finitos de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas. Tecnologia & Cultura (CEFET/RJ), v.15, p. 58-69, 2013.

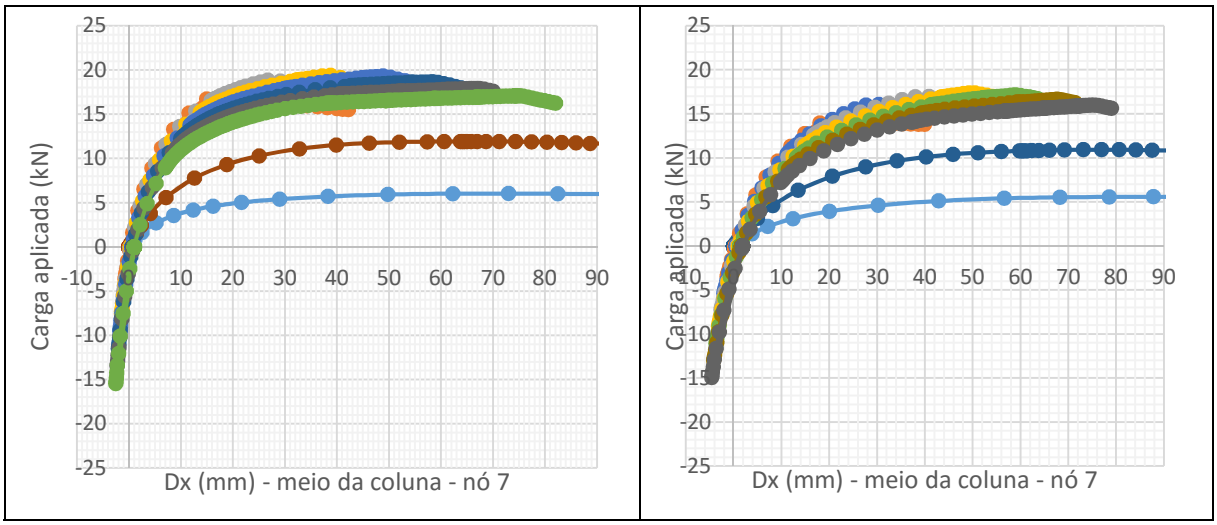
[39] ALMEIDA, S. R. ; Modelagem Numérica de Colunas de Aço Esbeltas Estaiadas e Protendidas. Projeto de Graduação; Depto de Estruturas e Fundações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Rio de Janeiro. 2014.

[40] Microsoft Office Excel versão 2013.

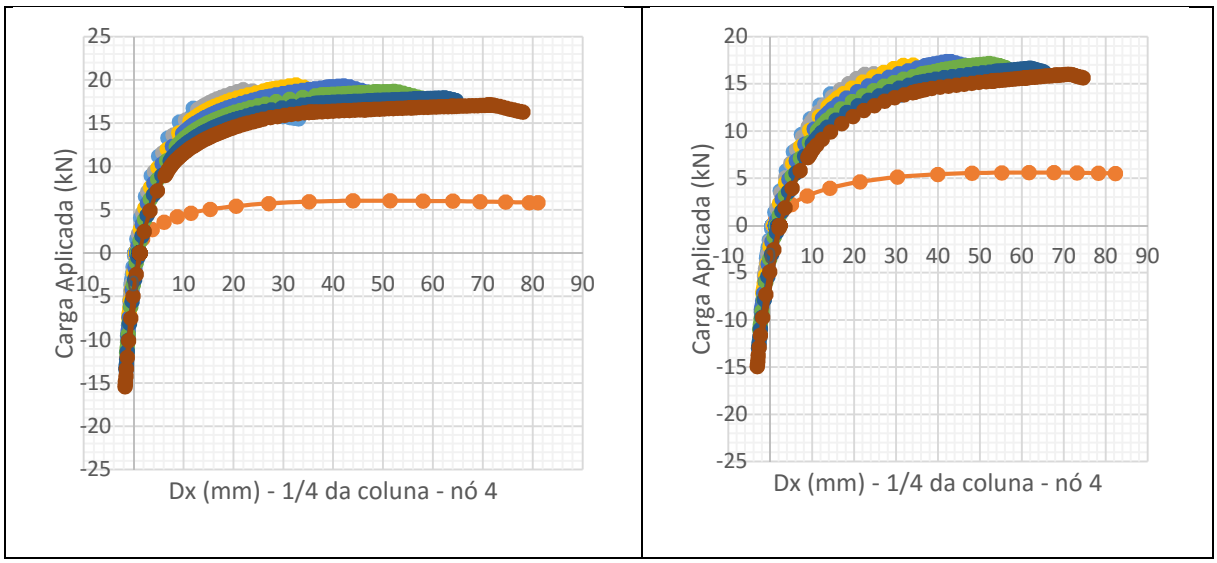
ANEXO

- **Aço Inoxidável Austenítico**

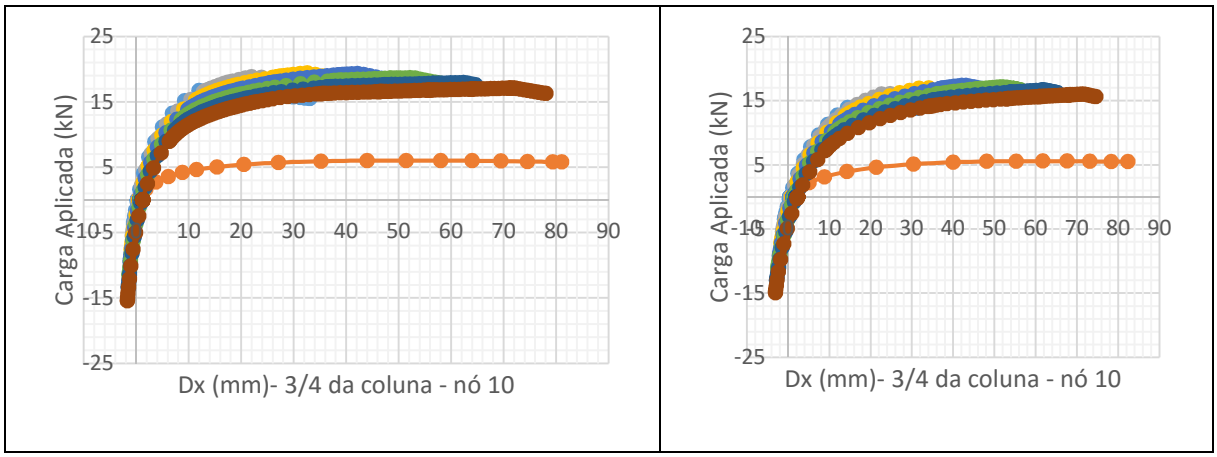
Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço inoxidável austenítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



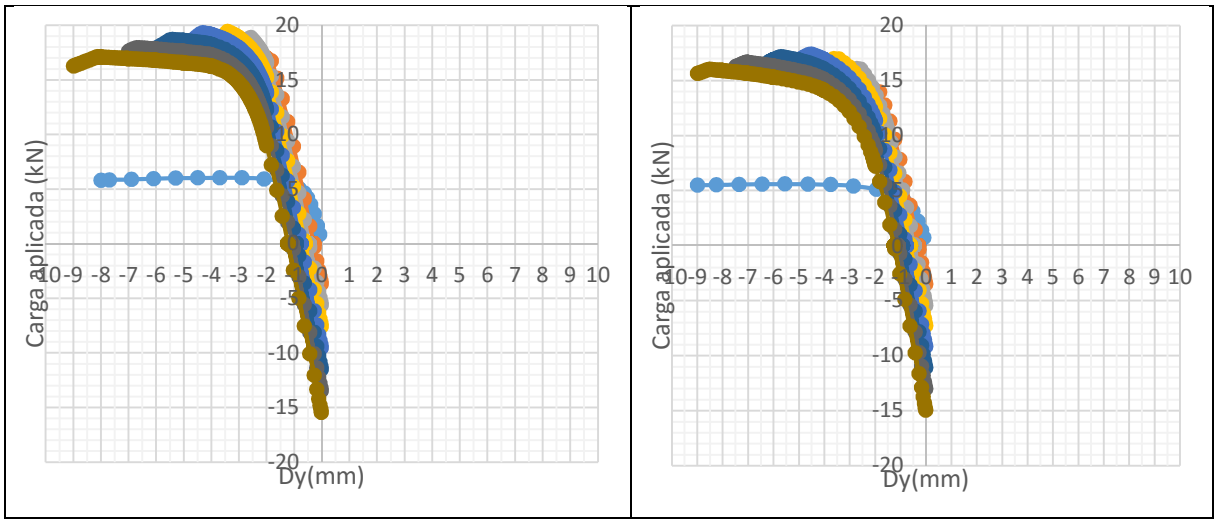
Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna de aço inoxidável austenítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna de aço inoxidável austenítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.

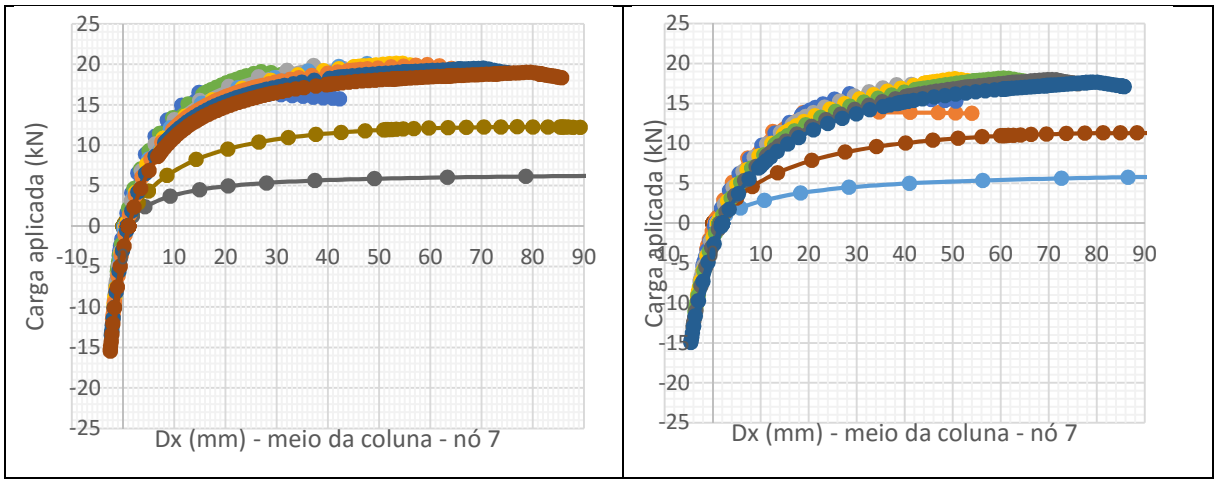


Gráficos de carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço inoxidável austenítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.

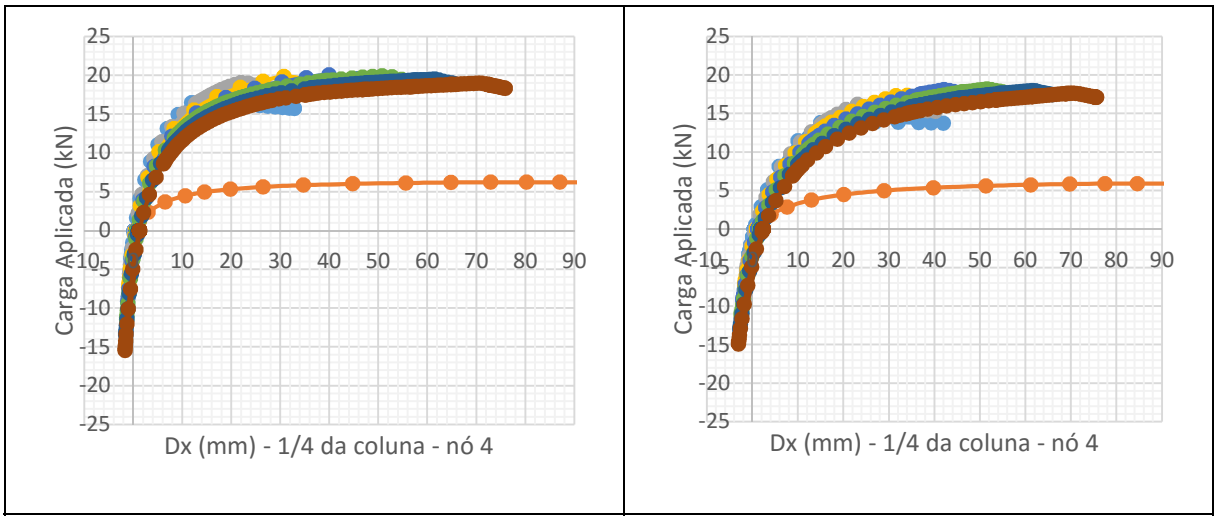


- **Aço Inoxidável Ferrítico**

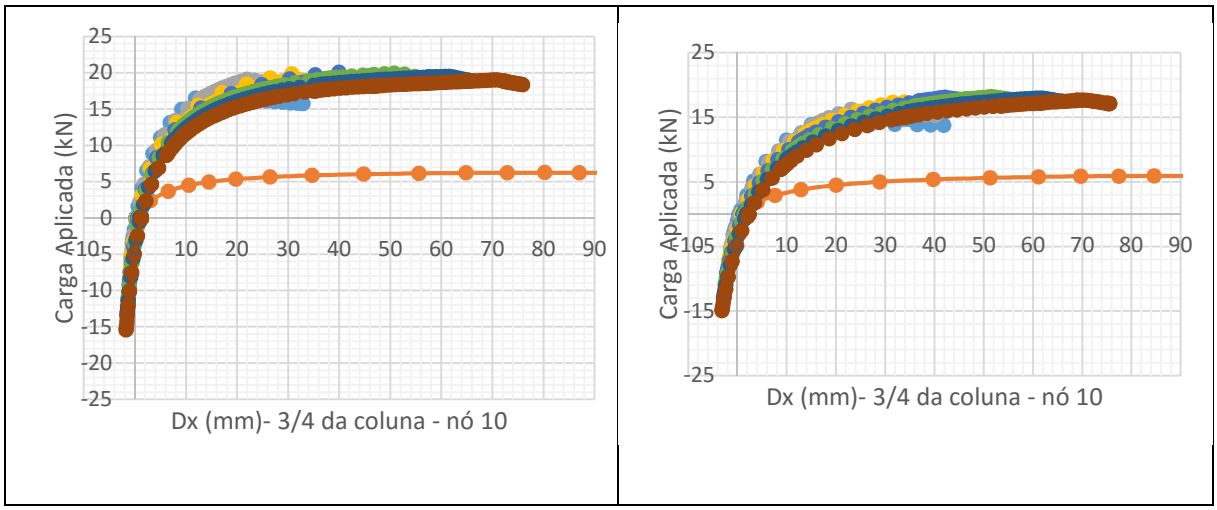
Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço inoxidável ferrítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



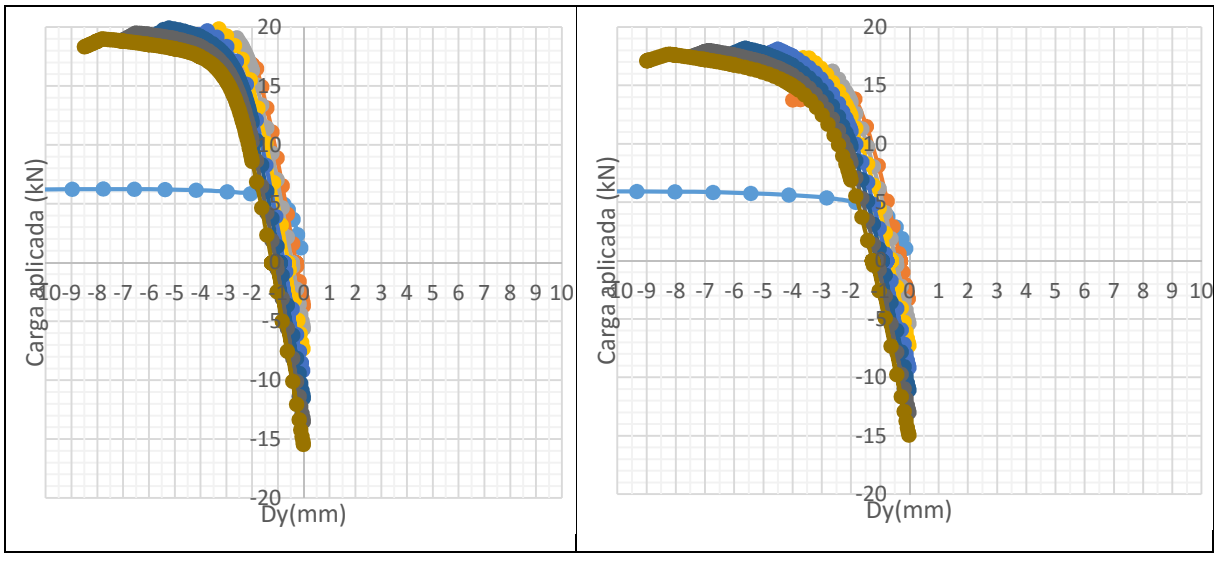
Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna de aço inoxidável ferrítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna de aço inoxidável ferrítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.

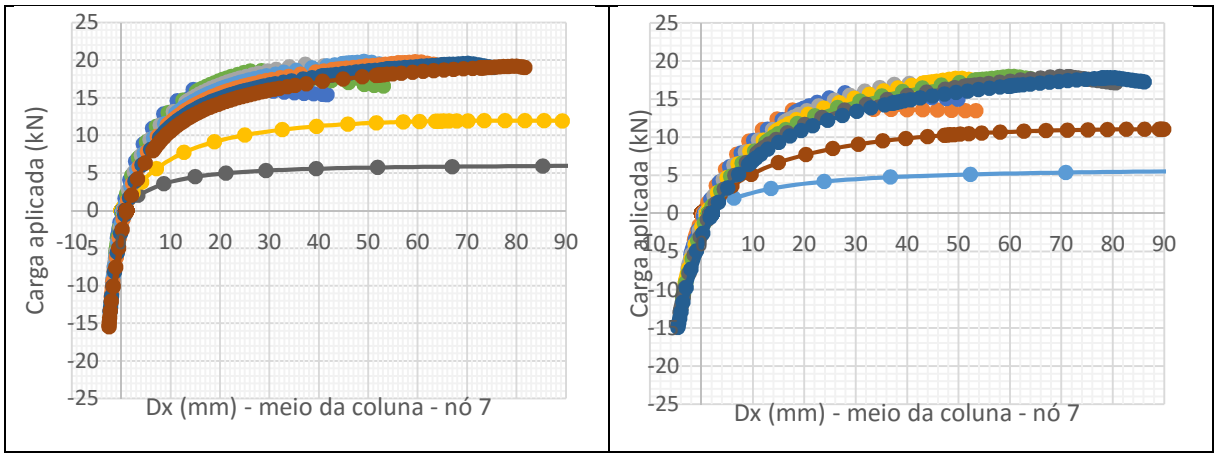


Gráficos de carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço inoxidável ferrítico para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.

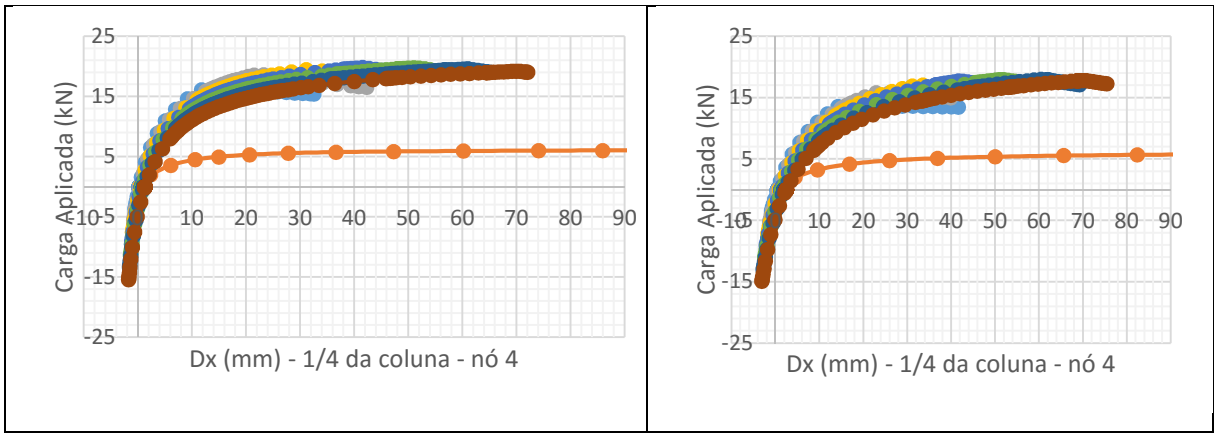


- **Aço Inoxidável Duplex**

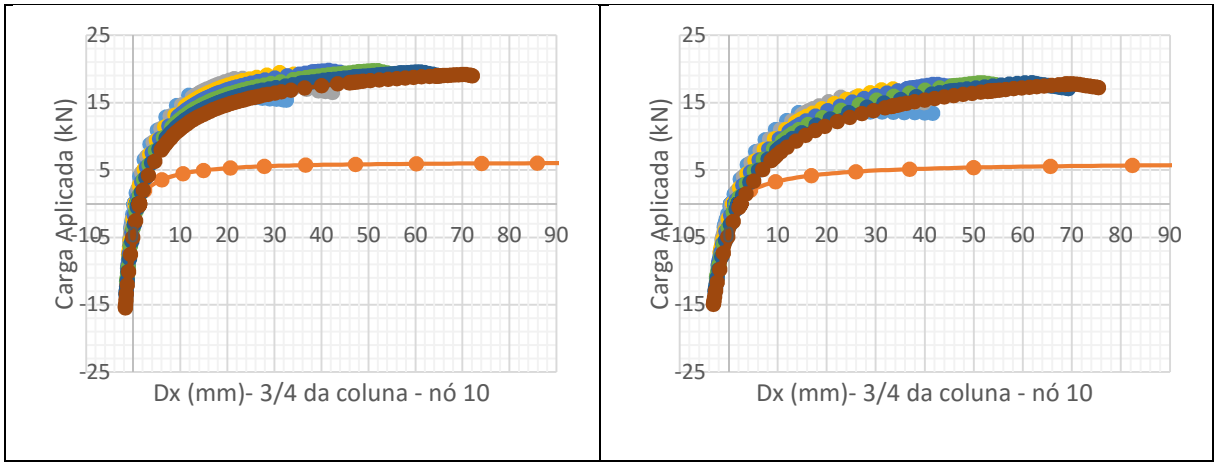
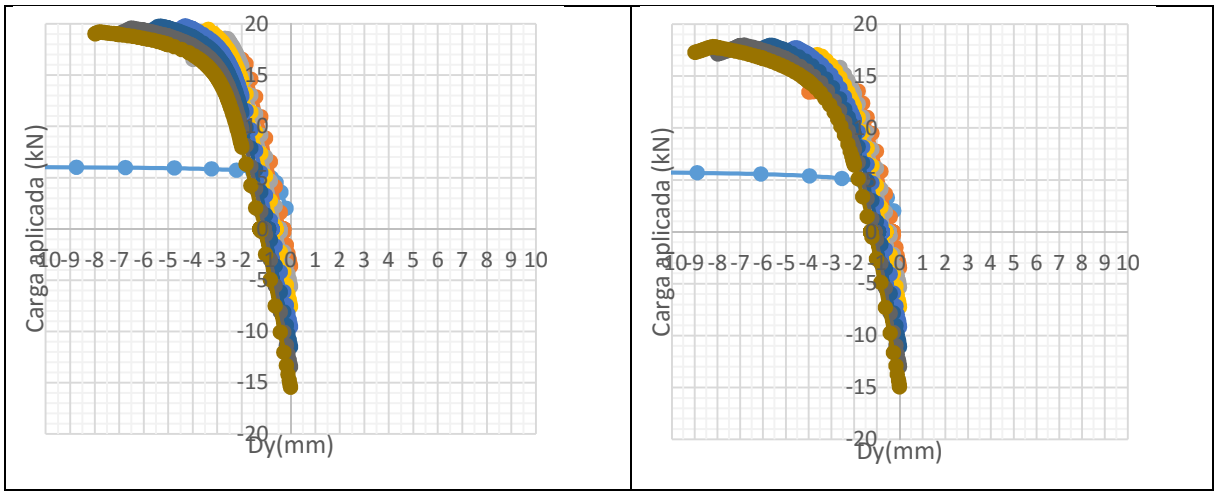
Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna de aço inoxidável duplex para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 1/4 da coluna de aço inoxidável duplex para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



Gráficos de carga externa *versus* deslocamento horizontal a 3/4 da coluna de aço inoxidável duplex para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.



Gráficos de carga externa *versus* deslocamento vertical da coluna de aço inoxidável duplex para as imperfeições de 8mm e 15mm, respectivamente.