

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Glaucimar Lima Dutra

**Estudo Teórico-Experimental do Comportamento
de Barras Compostas Comprimidas Formadas
por Perfis Tubulares Circulares Concêntricos
Laminados de Aço**

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO
DE BARRAS COMPOSTAS COMPRIMIDAS FORMADAS POR
PERFIS TUBULARES CIRCULARES CONCÊNTRICOS
LAMINADOS DE AÇO"**

Glaucimar Lima Dutra

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG

Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza (a distância)
UFSCAR

Belo Horizonte, 05 de abril de 2018

D978e Dutra, Glaucimar Lima.
Estudo teórico-experimental do comportamento de barras compostas comprimidas formadas por perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço [manuscrito] / Glaucimar Lima Dutra. – 2018. xxi, 130 f., enc.: il.

Orientador: Ricardo Hallal Fakury.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 99-130.

Bibliografia: f. 96-98.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Aço - Estruturas - Teses. 3. Carga axial - Teses. 4. Compressores - Teses. I. Fakury, Ricardo Hallal. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Ricardo Hallal Fakury, pela confiança, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, pelo suporte em todas as minhas dúvidas, pelas suas correções e incentivos.

Ao Professor Francisco Carlos Rodrigues pela disponibilidade, pelo imenso suporte e contribuição no desenvolvimento dos ensaios e da pesquisa.

Ao Lucas Figueiredo Grilo pela imensurável colaboração e contribuição na elaboração deste trabalho e pela disponibilidade em me ajudar na montagem dos ensaios e nas simulações numéricas.

Aos colegas do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), Geraldo, Afonso e Heron, pela paciência e pela ajuda nos ensaios.

Aos meus pais, José Dutra e Luiza Helena, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

À minha irmã, Hanna Dutra, que sempre me apoiou diariamente.

Ao meu namorado, Marcos, pelo amor, incentivo, carinho e paciência.

Aos meus familiares, em especial meus primos Maria Aparecida e Milton, pelo acolhimento, incentivo e carinho.

Aos meus amigos, companheiros de estudo e de pesquisa da pós-graduação, pelos momentos de descontração, pela troca de conhecimentos e pela ajuda.

À Vallourec Tubos do Brasil, na figura do Engo. Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo, pelo suporte geral dado à pesquisa, incluindo a doação dos perfis tubulares utilizados nos protótipos, e à Brafer Construções Metálicas, pela fabricação desses protótipos.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPEMIG (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio financeiro.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental do comportamento de barras compostas axialmente comprimidas formadas por perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço. O uso dessas barras é uma solução inovadora para situações nas quais exista restrição de projeto quanto ao diâmetro máximo que pode ser adotado, ou que um único perfil laminado não atinja a força resistente de compressão requerida. Este estudo inicia-se com a apresentação do comportamento das barras comprimidas, abordando os aspectos da estabilidade estrutural, a influência de imperfeições iniciais geométricas e de material, os procedimentos de dimensionamento normativos e o mecanismo de colapso. Foi apresentado o estudo numérico desenvolvido para os perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço, tal como seu processo de montagem e seu procedimento de cálculo. Na análise experimental, foram realizados ensaios de força axial de compressão em barras compostas rotuladas nas duas extremidades, constituídas por dois e três perfis tubulares concêntricos, sem ligação entre os perfis ao longo do comprimento e com ligações fixas e deslizantes, de modo a obter as respostas em termos de capacidade resistente e facilidade de montagem. Nessa etapa, foi desenvolvido um método para medir as imperfeições geométricas dos perfis que compõem o conjunto. A análise numérica foi realizada por meio de simulações via Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa ABAQUS. Nessas simulações, para calibração dos modelos numéricos, foram consideradas as imperfeições iniciais geométricas e relações geométricas obtidas nos modelos experimentais. A formulação proposta para o dimensionamento dos perfis tubulares circulares concêntricos apresentaram valores sempre conservadores. Após a validação da calibração, foi feita uma análise paramétrica, variando-se as dimensões da seção transversal dos tubos que compõem as barras compostas e sentidos das imperfeições geométricas iniciais desses tubos, com o intuito de investigar a influência desses parâmetros no comportamento da barra composta e no valor da força resistente.

Palavras-chave: Estruturas de Aço; Perfis Tubulares Circulares Concêntricos; Compressão Axial; Análise Experimental.

ABSTRACT

This paper presents a theoretical-experimental study on the behavior of built-up members axially compressed formed by concentric hot rolled circular hollow sections. The use of these bars is an innovative solution for situations in which there is project restriction regarding the maximum diameter that can be adopted, or in which a single rolled section does not reach the required compressive strength. This study begins with the presentation of the behavior of compressed bars, approaching the aspects of structural stability, the influence of initial geometrical imperfections and material, the procedures of normative dimensioning and the collapse mechanism. The numerical study developed for concentric hot rolled circular hollow sections, as well as its assemble process and its calculus procedure were presented. During the experimental analysis, there were performed rehearsals of axial compressing strength on compound bars labeled at both their extremities, constituted by two and three concentric hollow sections, with no connection between the sections throughout the length and with sliding and embedded connections, in order to obtain the responses in terms of resistant capacity and assemble facility. In this stage, it was to develop a method to measure the geometrical imperfections of the sections that are part of the assembly. The numerical analysis was performed through simulations via Finite Element Method using the program ABAQUS. In these simulations, for the calibration of numerical models, were considered initial geometrical imperfections and geometrical relations obtained in the experimental models. The formulation proposed for the dimensioning of the concentric circular hollow sections presented conservative valuables. After the calibration validation, a parametric analysis was performed, varying the dimensions of the cross section of the tubes that compose the composed bars and the directions of the initial geometrical imperfections of these tubes, aiming to investigate the influence of these parameters on the behavior of the composed bar and on the valuable of the resistant strength.

Keywords: Steel Structures; Concentric Circular Hollow Sections; Axial Compression; Experimental Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Patente do processo de laminação por perfuração de tubos de aço dos irmãos Mannemmann	1
Figura 1.2. Estrutura tubular em passarela de pedestres em Belo Horizonte (MG)	2
Figura 1.3. Estrutura da Aciaria da Vallourec e Sumitomo Tubos do Brasil em Jeceaba (MG)	2
Figura 1.4. Seções transversais de perfis tubulares	3
Figura 1.5. <i>Shopping</i> Passeio das Água em Goiânia (GO).....	3
Figura 1.6. Processo de laminagem por perfuração.....	4
Figura 1.7. Desenho esquemático do processo de fabricação de tubos laminados	4
Figura 1.8. Seções transversais compostas com dois e três tubos	6
Figura 1.9. Seção transversal de perfis tubulares circulares compostos concêntricos com dois e três perfis	7
Figura 1.10. Perfil tubular circular composto concêntrico com flanges nas extremidades	7
Figura 2.1. Configurações de equilíbrio.	11
Figura 2.2. Teoria clássica de flambagem elástica.	12
Figura 2.3. Comportamento de barras com curvatura inicial.	14
Figura 2.4. Comportamento elastoplástico da barra rotulada nas duas extremidades.....	15
Figura 2.5. Curvas envoltórias baseadas nas curvaturas iniciais indicadas.....	18
Figura 2.6. Curvas de resistência à compressão da ECCS.	18
Figura 2.7. Hipóteses da posição da linha neutra plástica de um perfil tubular circular.....	22
Figura 3.1. Ligação do flange nos PTCCs com dois tubos	25

Figura 3.2. Ligação do flange nos PTCCs triplos.....	26
Figura 3.3. Travamento fixo de PTCCs.....	27
Figura 3.4. Travamento deslizante de PTCCs.....	28
Figura 3.5. Faces do modelo considerando um quarto do tubo.....	29
Figura 3.6. Curvas de resistência à compressão - Numérica <i>versus</i> ABNT NBR 16239:2013	30
Figura 3.7. Diferença Numérica - ABNT NBR 16239:2013.....	30
Figura 3.8. Diferença entre o modelo numérico com travamentos fixos - ABNT NBR 16239:2013.....	33
Figura 3.9. Força de compressão em cada perfil ($\lambda_0=1,07$ e $\lambda =80$).....	34
Figura 3.10. Curva de redução para PTCCs sem travamentos.....	36
Figura 4.1. Posicionamento da linha de <i>nylon</i>	40
Figura 4.2. Medida da distância entre a linha de <i>nylon</i> e a superfície do tubo.....	40
Figura 4.3. Furos para medidas das imperfeições geométricas dos tubos internos do PTCC..	40
Figura 4.4. Eixos adotados no flange para as medidas da imperfeição geométrica.	41
Figura 4.5. Pontos adotados para as medidas de distância nos modelos.	41
Figura 4.6. Esquemas para determinação da flecha dos tubos.	42
Figura 4.7. Pontos de cortes nos modelos.	44
Figura 4.8. Execução dos cortes com serra elétrica.....	44
Figura 4.9. Nomeação das seções dos modelos.....	45
Figura 4.10. Modelo A-L cortado e lixado.....	46
/Figura 4.11. Corte posicionado no cavalete.	46
Figura 4.12. Dimensões aferidas na seção transversal dos modelos.	47

Figura 4.13. Dimensões da seção transversal de PTCCs com dois tubos.	48
Figura 4.14. Dimensões da seção transversal de PTCCs com três tubos.	48
Figura 4.15. Distâncias entre os tubos para PTCCs com dois tubos.	49
Figura 4.16. Distâncias entre os tubos para PTCCs com três tubos.	50
Figura 4.17. Placa de base superior dos modelos do grupo A.	50
Figura 4.18. Placa de base superior dos modelos do grupo B.	51
Figura 4.19. Esquema do pórtico para o ensaio de carga centrada.	52
Figura 4.20. Pórtico utilizado para execução dos ensaios.	53
Figura 4.21. Rótula fixa no atuador.	54
Figura 4.22. Esquema da rótula semiesférica.	54
Figura 4.23. Rótula semiesférica em detalhe.	55
Figura 4.24. Rótula semiesférica fixada ao cilindro do atuador.	55
Figura 4.25. Base do modelo fixada à rótula semiesférica.	56
Figura 4.26. Chapas soldadas ao tubo externo.	57
Figura 4.27. DT posicionado no tubo interno.	57
Figura 4.28. Posicionamento dos DTs nos modelos do grupo A.	58
Figura 4.29. Posicionamento dos DTs nos modelos do grupo B.	58
Figura 4.30. Detalhe do posicionamento dos DTs nos modelos do grupo B.	59
Figura 4.31. DT posicionado na viga de apoio do pórtico.	59
Figura 4.32. DT posicionado no pilar do pórtico.	60
Figura 4.33. Posicionamento dos EERs nos modelos do grupo A.	61

Figura 4.34. Posicionamento dos EERs nos modelos do grupo B.	61
Figura 5.1. Travamentos fixos nos modelos ensaiados.	63
Figura 5.2. Travamentos deslizantes nos modelos ensaiados.....	64
Figura 5.3. Detalhe da chapa soldada no tubo interno do modelo B-F.	65
Figura 5.4. Configurações de deformadas dos modelos do grupo A.....	66
Figura 5.5. Configurações de deformadas dos modelos do grupo B.....	67
Figura 5.6. Gráfico força <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo interno dos modelos do grupo A.	69
Figura 5.7. Gráfico força <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo externo dos modelos do grupo A.	69
Figura 5.8. Gráfico força <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo interno dos modelos do grupo B.	70
Figura 5.9. Gráfico força <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo intermediário dos modelos do grupo B.	70
Figura 5.10. Gráfico força <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo externo dos modelos do grupo B.	71
Figura 5.11. Gráfico força do conjunto <i>versus</i> força do tubo interno dos modelos do grupo A.	72
Figura 5.12. Gráfico força do conjunto <i>versus</i> força do tubo externo dos modelos do grupo A.	72
Figura 5.13. Gráfico força do conjunto <i>versus</i> força do tubo interno dos modelos do grupo B.	73
Figura 5.14. Gráfico força do conjunto <i>versus</i> força do tubo intermediário dos modelos do grupo B.	73

Figura 5.15. Gráfico força do conjunto <i>versus</i> força do tubo externo dos modelos do grupo B.	74
Figura 6.1. Modelo numérico considerado na análise.	77
Figura 6.2. Eixos adotados para cada análise.	78
Figura 6.3. Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação bilinear do aço.	79
Figura 6.4. Faces do modelo numérico.	79
Figura 6.5. Gráfico força total <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo interno dos modelos com dois tubos.....	81
Figura 6.6. Gráfico força total <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo externo dos modelos com dois tubos.....	82
Figura 6.7. Gráfico força total <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo interno dos modelos com três tubos.....	82
Figura 6.8. Gráfico força total <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo intermediário dos modelos com três tubos.....	83
Figura 6.9. Gráfico força total <i>versus</i> deslocamento referente ao tubo externo dos modelos com três tubos.....	83
Figura 7.1. Sentido das imperfeições geométricas nos modelos de PTCCs com dois tubos. ...	88
Figura 7.2. Sentido das imperfeições geométricas nos modelos de PTCCs com três tubos. ...	88
Figura 7.3. Grupo 1 - TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 200$) - travamentos fixos.....	90
Figura 7.4. Passo de carga 35 - TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 200$) travamentos fixos - vista yx.	90
Figura 7.5. Grupo 3 - TC 114,0 x 25,0 + TC 219,0 x 6,4 ($\lambda = 50$) – sem travamentos.....	91
Figura 7.6. Grupo 6 - TC 168,3 x 20,0 + TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 125$) - travamentos fixos.....	92

Figura B.1. Grupo 1 - Modelos 1 a 3 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$).	110
Figura B.2. Grupo 1 - Modelos 4 a 6 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	110
Figura B.3. Grupo 1 - Modelos 7 a 9 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$).	111
Figura B.4. Grupo 1 - Modelos 1 a 3 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	111
Figura B.5. Grupo 1 - Modelos 4 a 6 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	112
Figura B.6. Grupo 1 - Modelos 7 a 9 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$).	112
Figura B.7. Grupo 2 - Modelos 10 a 12 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	113
Figura B.8. Grupo 2 - Modelos 13 a 15 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	113
Figura B.9. Grupo 2 - Modelos 16 a 18 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	114
Figura B.10. Grupo 2 - Modelos 10 a 12 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	114
Figura B.11. Grupo 2 - Modelos 13 a 15 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	115
Figura B.12. Grupo 2 - Modelos 16 a 18 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	115
Figura B.13. Grupo 3 - Modelos 19 a 21 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	116
Figura B.14. Grupo 3 - Modelos 22 a 24 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	116
Figura B.15. Grupo 3 - Modelos 25 a 27 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	117

Figura B.16. Grupo 3 - Modelos 19 a 21 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	117
Figura B.17. Grupo 3 - Modelos 22 a 24 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	118
Figura B.18. Grupo 3 - Modelos 25 a 27 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	118
Figura B.19. Grupo 4 - Modelos 32 a 35 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	119
Figura B.20. Grupo 4 - Modelos 36 a 39 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	119
Figura B.21. Grupo 4 - Modelos 28 a 31 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	120
Figura B.22. Grupo 4 - Modelos 32 a 35 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	120
Figura B.23. Grupo 4 - Modelos 36 a 39 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	121
Figura B.24. Grupo 5 - Modelos 40 a 43 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	121
Figura B.25. Grupo 5 - Modelos 44 a 47 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	122
Figura B.26. Grupo 5 - Modelos 48 a 51 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	122
Figura B.27. Grupo 5 - Modelos 40 a 43 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	123
Figura B.28. Grupo 5 - Modelos 44 a 47 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	123

Figura B.29. Grupo 5 - Modelos 48 a 51 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	124
Figura B.30. Grupo 6 - Modelos 52 a 55 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	124
Figura B.31. Grupo 6 - Modelos 56 a 59 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	125
Figura B.32. Grupo 6 - Modelos 60 a 63 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	125
Figura B.33. Grupo 6 - Modelos 52 a 55 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	126
Figura B.34. Grupo 6 - Modelos 56 a 59 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	126
Figura B.35. Grupo 6 - Modelos 60 a 63 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	127
Figura B.36. Grupo 7 - Modelos 64 a 67 (fixo)- Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	127
Figura B.37. Grupo 7 - Modelos 68 a 71 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	128
Figura B.38. Grupo 7 - Modelos 72 a 75 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	128
Figura B.39. Grupo 7 - Modelos 64 a 67 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)	129
Figura B.40. Grupo 7 - Modelos 68 a 71 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)	129
Figura B.41. Grupo 7 - Modelos 72 a 75 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Tolerâncias dimensionais e propriedades mecânicas do aço para tubos circulares. 5	5
Tabela 3.1. Seções transversais simuladas.29	29
Tabela 4.1. Características dos modelos ensaiados.39	39
Tabela 4.2. Valores das flechas e das amplitudes referentes a cada tubo do modelo.....43	43
Tabela 4.3. Dimensões da seção transversal dos modelos.47	47
Tabela 4.4. Valores médios das distâncias entre os tubos e seus centros.....49	49
Tabela 4.5. Valores referentes ao ensaio de tração.....51	51
Tabela 5.1. Sentidos das curvaturas na configuração deformada.....67	67
Tabela 5.2. Resultados dos ensaios.68	68
Tabela 6.1. Valores de curvatura inicial adotados nos modelos numéricos.....78	78
Tabela 6.2. Restrições aplicadas na simulação dos modelos.....80	80
Tabela 6.3. Resultados das análises numérica e experimental.80	80
Tabela 7.1. Modelos analisados.....87	87

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1 – Área acima da linha neutra plástica

A_2 – Área complementar da semicoroa

A_g – Área bruta da seção transversal

$A_{g,i}$ – Área bruta da seção transversal de um perfil isolado do PTCC, com i variando de 1 a 3

A_{sc} – Área da semicoroa

B – Largura da base da seção transversal

b – Distância entre o topo do perfil e o centroide da área A_1

c_1 – Distância vertical do centroide da área A_1 ao centro do círculo

C_1 – Constante igual à deflexão na metade do comprimento da barra ou centroide da área A_1

c_2 – Distância vertical do centroide da área A_2 ao centro do círculo

C_{2x} – Distância horizontal do centroide da área virtual A_2 em relação ao centro do círculo

C_{2y} – Distância vertical do centroide da área virtual A_2 em relação ao centro do círculo

C_{cs} – Distância vertical do centroide da área virtual A_{sc} em relação ao centro do círculo

C_w – Constante de empenamento da seção transversal

d – Diâmetro externo da seção transversal do tubo

E – Módulo de elasticidade longitudinal do aço

F_{cr} – Força crítica de compressão para o cálculo de $N_{c,Rk}$

f_u – Resistência à ruptura do aço à tração

f_y – Resistência ao escoamento do aço

G – Módulo de elasticidade transversal do aço

H – Altura da seção transversal

I – Momento de inércia da seção transversal

J – Constante de torção

K – Coeficiente de flambagem de barras comprimidas

L – Comprimento da barra

L_e – Comprimento médio do lado do elemento

L_{trav} – Distância mínima entre travamentos

M – Momento de flexão solicitante

N – Força de compressão atuante

n – Fator de multiplicação para curva de resistência à compressão

$N_{c,Sd}$ – Força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_{c,Rk}$ – Força axial de compressão resistente nominal

$N_{c,Rk-i}$ – Força axial de compressão resistente de um perfil isolado, obtida numericamente, com i variando de 1 a 3

$N_{c,Rk}^{Fixo}$ – Força axial de compressão resistente obtida pelo modelo do numérico do PTCC com travamentos fixos

$N_{c,Rk}^{Movel}$ – Força axial de compressão resistente obtida pelo modelo do numérico do PTCC com travamentos deslizantes

$N_{c,Rk}^{Livre}$ – Força axial de compressão resistente obtida pelo modelo numérico do PTCC sem travamentos ao longo dos tubos

N_e – Força crítica de Euler

N_{ex} – Força axial de flambagem elástica em relação ao eixo principal x

N_{ey} – Força axial de flambagem elástica em relação ao eixo principal y

N_{ez} – Força axial de flambagem elástica em relação ao eixo longitudinal z

N_{Rk} – Força de compressão resistente estimada

r – Raio externo da seção transversal do tubo ou raio de giração da seção transversal

r_0 – Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento

r_m – Raio médio do perfil tubular circular

r_{min} – Raio mínimo de giração de um perfil isolado

S_{11} – Tensão normal no eixo axial

t – Espessura da parede

v – Deflexão da barra

v_i – Deslocamento transversal inicial da barra

v_{tc} – Deflexão na metade do comprimento da barra

v_0 – Deflexão inicial na metade do comprimento da barra

x – Coordenada local da barra (alinhada com o eixo longitudinal)

Letras Gregas

α – Fator de imperfeição geométrica o perfil

β – Semiângulo formado pela linha neutra plástica (Figura 2.7)

Φ - Coeficiente adimensional para cálculo de χ

λ – Índice de esbeltez

λ_0 – Índice de esbeltez reduzido

ρ – Diferença percentual entre os fatores de redução associados à resistência à compressão dos perfis que compõe um PTCC duplo

χ – Fator de redução associado à resistência à compressão

$\chi_{ABNT\ NBR\ 16239}$ – Fator de redução associado à resistência à compressão calculado conforme ABNT NBR 16239:2013, considerando A_g e I como a soma das áreas e das inércias das seções transversais e dos perfis que o compõe

$\chi_{Deslizante}$ – Fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC com travamentos deslizantes, calculado numericamente

χ_{Fixo} – Fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC com travamentos fixos, calculado numericamente

χ_{Livre} – Fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC sem travamentos ao longo do comprimento, calculado numericamente

χ_{Soma} – Fator de redução equivalente associado à resistência à compressão do PTCC calculado considerando a soma das forças resistentes dos perfis isolados

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC – *American Institute of Steel Construction*

AISI – *American Iron and Steel Institute*

CSA – *Canadian Standards Association*

CRC – *Column Research Council*

ECSS – *European Convention for Constructional Steelwork*

Eurocode – Comitê Europeu de Normatização

LRFD – *Load Resistance Factor Design*

MEF – Método dos Elementos Finitos

PTCC – Perfis Tubulares Circulares Concêntricos

SSRC – *Structural Stability*

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Processo de Fabricação de Perfis Tubulares Laminados.....	4
1.3 Perfis Tubulares Compostos.....	5
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Metodologia.....	8
1.6 Justificava	9
2. Aspectos do Comportamento Estrutural de Perfis Tubulares Submetidos à Força Axial de Compressão	10
2.1 Considerações Iniciais	10
2.2 Estabilidade Estrutural.....	10
2.2.1 Teoria Clássica de Flambagem Elástica	11
2.2.2 Estabilidade Elástica de Barras com Imperfeições Geométricas.....	13
2.2.3 Instabilidade Elastoplástica de Barras com Imperfeições Geométricas	15
2.3 Tensões Residuais	15
2.4 Imperfeições Geométricas	16
2.5 Curvas de Resistência à Compressão de Projeto	17
2.6 Critérios de Dimensionamento	19
2.6.1 Considerações Gerais	19
2.6.2 Norma EN 1993-1-1:2005	20

2.6.3	Normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360:2016.....	20
2.6.4	Normas ABNT NBR 16239:2008 e CAN/CSA S16:2005.....	21
2.6.5	Análise Comparativa	21
2.7	Mecanismo de Colapso.....	22
3.	Perfis Tubulares Circulares Compostos Concêntricos	24
3.1	Considerações Iniciais	24
3.2	Ligação dos Flanges	24
3.3	Interligação dos Tubos	26
3.4	Calibração dos Modelos Numéricos.....	28
3.5	Resultados das Análises Numéricas	31
3.6	Proposição de Procedimento de Cálculo	35
4.	Análise Experimental	38
4.1	Considerações Iniciais	38
4.2	Modelos	38
4.2	Imperfeições Geométricas	39
4.3	Dimensões da Seção Transversal	43
4.4	Propriedades do Material.....	51
4.4	Dispositivos de Ensaios e Instrumentação	52
5.	Resultados das Análises Experimentais	62
5.1	Considerações Iniciais	62
5.2	Análise das Interligações entre os Perfis	62

5.3	Análise das Imperfeições Geométricas.....	65
5.4	Análise do Ensaio de Compressão.....	68
6.	Análise Numérica e Comparativa.....	76
6.1	Considerações Iniciais	76
6.2	Programa ABAQUS	76
6.3	Modelo Numérico.....	77
6.4	Análise Comparativa dos Resultados Numéricos e Experimentais.....	80
7.	Análise das Imperfeições Geométricas.....	86
7.1	Considerações Iniciais	86
7.2	Seleção dos Modelos	86
7.3	Análises da Distribuição das Forças nos Tubos	89
8.	Conclusões.....	93
8.1	Considerações Finais	93
8.2	Análise Experimental	93
8.3	Modelos Numéricos.....	94
8.4	Imperfeição Geométrica	94
8.5	Sugestões para Estudos Futuros	95
9.	Referências Bibliográficas.....	96
	Apêndice A.....	99
	Apêndice B	109

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Com o declínio do uso do ferro fundido nas construções civis e com a inovação dos processos de fabricação, na segunda metade do século XIX se iniciou o desenvolvimento da transformação de aço em perfis tubulares. Em 1886, os irmãos Mannesmann fabricaram o primeiro perfil tubular circular sem costura a partir de um laminador perfurador, patenteado no ano de 1888, como mostra a Figura 1.1, revolucionando a indústria de tubos.

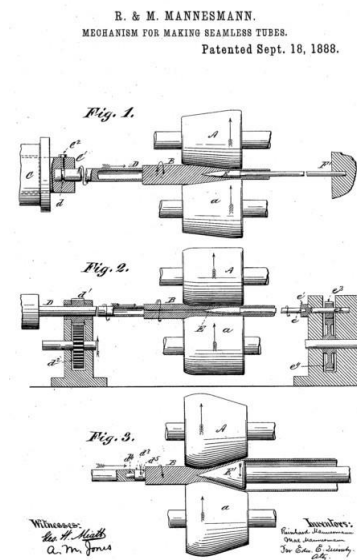


Figura 1.1. Patente do processo de laminação por perfuração de tubos de aço dos irmãos Mannesmann (http://patentpending.blogspot.com/patent_pending_blog/2005/10/steel_tubing_bi.html, 2017)

No Brasil, a utilização de perfis tubulares sem costura (ou, simplesmente, tubos circulares, sigla TC) na construção civil era insignificante, praticamente limitado à indústria petrolífera. Somente com o início da fabricação dos perfis tubulares circulares sem costura pela Vallourec (antiga Vallourec & Mannesmann ou V&M do Brasil), no ano 2000, houve difusão do seu

uso na construção civil. Hoje, existem várias obras pelo país em que são utilizados esses perfis, como pode ser visto nas Figuras 1.2 e 1.3.



Figura 1.2. Estrutura tubular em passarela de pedestres em Belo Horizonte (MG) (www.vallourec.com, 2017)



Figura 1.3. Estrutura da Aciaria da Vallourec e Sumitomo Tubos do Brasil em Jeceaba (MG)
(www.vallourec.com, 2017)

Os perfis tubulares sem costura podem ser fabricados com seções transversais quadrada, retangular e circular, como mostra a Figura 1.4, sendo esta última a mais empregada. As seções quadrada e retangular são produzidas no Brasil pela Vallourec (único fabricante nacional - ver subitem seguinte) a partir da conformação a frio dos tubos com seção circular.

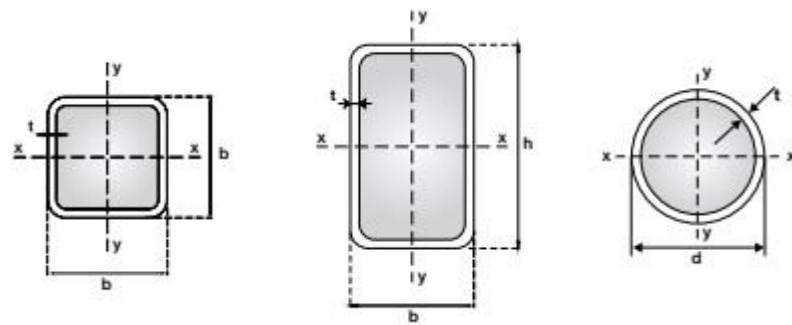


Figura 1.4. Seções transversais de perfis tubulares (www.vallourec.com, 2017)

Nos perfis tubulares circulares, a forma geométrica da seção transversal (fechada e vazada) proporciona uma concentração de material distante do centro geométrico em todas as direções, o que garante boa capacidade resistente às solicitações de compressão axial e de torção. Assim, possuem uma aplicação estrutural bastante competitiva na composição de estruturas treliçadas como pilares e elementos de contraventamento. Além disso, apresentam-se eficientes também em solicitações dinâmicas causadas por vento e maré. Comparados com os perfis abertos, possuem menor área superficial, o que diminui os custos de pintura e tratamento contra a corrosão e de proteção contra incêndio.

A forma geométrica dos perfis tubulares circulares confere-lhes um aspecto visual atrativo, sendo que estruturas constituídas por eles podem se tornar verdadeiras obras de arte, como mostra a Figura 1.5, principalmente se tais estruturas vencem grandes vãos e amplos espaços livres em seu interior, como aeroportos, *shoppings*, pontes e estádios.



Figura 1.5. *Shopping* Passeio das Águas em Goiânia (GO) (www.sonaesierra.com.br, 2016)

1.2 Processo de Fabricação de Perfis Tubulares Laminados

Sucintamente, o processo de fabricação dos perfis tubulares circulares laminados inicia-se com o aquecimento de tarugos cilíndricos de aço em fornos. Em seguida eles são perfurados no laminador perfurador, cujos cilindros produzem tensões trativas no centro do cilindro, que é empurrado contra uma ponta perfurante (Figura 1.6). Ao final, os tubos são submetidos a desempeno, corte e inspeção. Na Figura 1.7, é apresentado o esquema desse processo de produção. Mais detalhes podem ser encontrados na literatura especializada, por exemplo, em Araújo *et al.* (2001).



Figura 1.6. Processo de laminagem por perfuração.

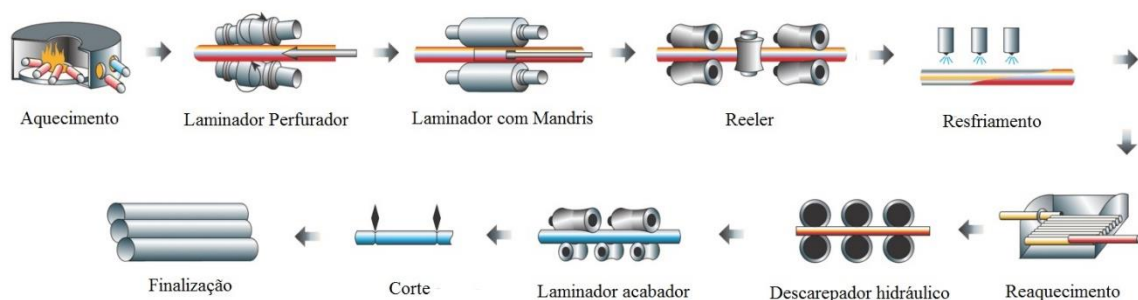


Figura 1.7. Desenho esquemático do processo de fabricação de tubos laminados (adaptado de <http://hardhatengineer.com/pipe-class-piping-specifications-pipeend/pipe-manufacturing-process/>, 2017)

No Brasil, a produção de tubos sem costura para fins estruturais empregados na construção civil é feita apenas pela Vallourec Tubos do Brasil, na Usina Barreiro em Belo Horizonte e na Usina de Jeceaba (nesse caso em associação com a Sumitomo), ambas em Minas Gerais.

A Vallourec produz perfis tubulares circulares com diâmetro variando entre 31,8 e 355,6 mm e espessura entre 3,2 mm e 25,0 mm, respeitando as tolerâncias estabelecidas pela norma ASTM A-501, conforme a Tabela 1.1. No que se diz respeito à retlineidade dos perfis, o fabricante garante uma variação máxima de 2,08 mm/m ou aproximadamente $L/480$, onde L é o comprimento da peça.

As propriedades mecânicas do aço empregados nos tubos laminados ofertados no mercado pela Vallourec são apresentados na Tabela 1.1, na qual se estabelece a especificação ou designação do produto relacionada com a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura (f_u) do aço, como também sua qualidade. O sufixo “cor” em alguns produtos reportam aço classificado como resistente à corrosão atmosférica.

Tabela 1.1. Tolerâncias dimensionais e propriedades mecânicas do aço para tubos circulares

Tolerâncias Dimensionais			
Diâmetro - D (mm)	Variação permitida (mm)		
$D \leq 48,3$	$-0,4 a + 0,8$		
$D > 48,3$	$\pm 1\% D$		
Propriedades Mecânicas			
Designação Comercial	f_y (Mpa)	f_u (Mpa)	Qualidade¹
VMB 250	≥ 250	≥ 400	1
VMB 300	≥ 300	≥ 415	1
VMB 350	≥ 350	≥ 485	2
VMB 250cor	≥ 250	≥ 400	3
VMB 300cor	≥ 300	≥ 415	3
VMB 350cor	≥ 350	≥ 485	4

¹ Composição do aço: 1) aço-carbono; 2) aço de baixa liga e alta resistência mecânica; 3) aço-carbono resistente à corrosão atmosférica; 4) aço-carbono de baixa liga alta resistência mecânica resistente à corrosão atmosférica.

1.3 Perfis Tubulares Compostos

Em situações de projetos em que se deseja o uso de perfis tubulares sem costura, a limitação da capacidade resistente desse perfil pode ser um problema, devido à sua restrição de dimensões pelo equipamento que os produz. Nesses casos, como apresentado no subitem anterior, surge a necessidade de se criar alternativas. As mais comuns delas são as composições de perfis tubulares por justaposição e por meio de barras de treliçamento ou chapas contínuas ou intermitentes, como ilustra Figura 1.8.

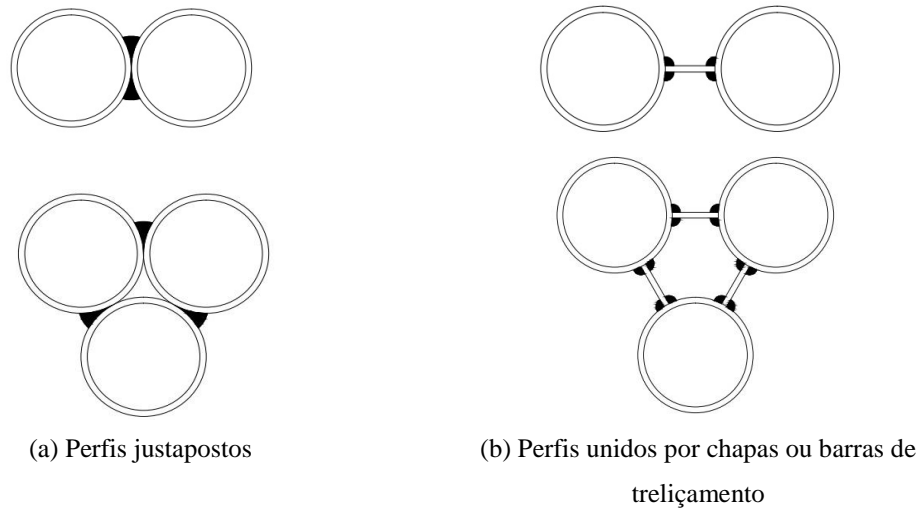


Figura 1.8. Seções transversais compostas com dois e três tubos

Essas alternativas apresentam alguns inconvenientes de fabricação e dimensionamento. As soldas entre os perfis justapostos não são de fácil execução e, nas ligações com outros elementos estruturais, a excentricidade é grande, o que provoca aumento das solicitações. Além disso, podem causar impactos desfavoráveis na arquitetura, além de reduzir a área utilizável.

Há ainda a alternativa de preencher o perfil tubular com concreto. Entretanto, tal solução pode aumentar o tempo de execução e o custo da obra com o preparo, transporte, concretagem e cura do concreto. Além disso, o concreto eleva o peso da estrutura, o que alteraria o seu dimensionamento.

Outra solução é o emprego de perfis tubulares circulares compostos concêntricos, representados pela sigla PTCC, em que tubos são colocados no interior de tubos. Assim, os esforços atuantes podem ser suportados pelos perfis sem a utilização de concreto e praticamente sem modificar o projeto arquitetônico. Essa alternativa é inovadora e foi estudada apenas por Grilo (2015) e Grilo *et al.* (2016), com dois e três tubos, como mostra a Figura 1.9, para solicitação de força de compressão axial.

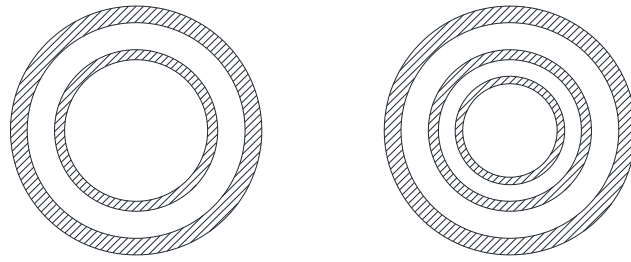


Figura 1.9. Seção transversal de perfis tubulares circulares compostos concêntricos com dois e três perfis (GRILO, 2015)

Nas extremidades, os perfis tubulares circulares compostos concêntricos são unidos por chapas transversais (flanges), como ilustra a Figura 1.10, sendo essas chapas usadas para ligação com outros componentes da estrutura.



Figura 1.10. Perfil tubular circular composto concêntrico com flanges nas extremidades

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar e ajustar o estudo numérico apresentado por Grilo (2015) a respeito do comportamento de barras compostas formadas por perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço, incluindo a determinação da força axial de compressão resistente dessas barras com ensaios de laboratório.

É também objetivo deste trabalho avaliar a influência da variação da direção da imperfeição inicial dos tubos da seção composta (situação em que os tubos têm curvaturas iniciais em direções diferentes) no comportamento.

1.5 Metodologia

Para alcance dos objetivos descritos no subitem 1.4, prevê-se a realização das seguintes etapas:

- 1) revisão bibliográfica sobre o comportamento de perfis tubulares de aço sob compressão axial, e sobre os fatores que o influenciam como tensões residuais e imperfeições geométricas;
- 2) estudo das soluções propostas para a interligação dos tubos concêntricos de um perfil composto, bem como das soluções para fixação dos flanges de extremidade nos tubos;
- 3) estudo da determinação da força axial resistente para perfis tubulares circulares concêntricos compostos;
- 4) desenvolvimento de um programa experimental para os modelos com os métodos e estratégias de montagem dos ensaios e dos equipamentos;
- 5) análise dos resultados obtidos experimentalmente;
- 6) avaliação dos resultados numéricos obtidos por Grilo (2015) e do procedimento para determinação da força axial de compressão resistente e proposição de eventuais ajustes nesse procedimento, se necessário;
- 7) processamento pelo Método dos Elementos Finitos, usando o programa ABAQUS, de diferentes combinações de composição de perfis, variando os índices de esbeltez e as seções transversais, de acordo com a disponibilidade comercial, além da variação das direções da imperfeição inicial dos tubos da barra composta.

1.6 Justificava

Os perfis tubulares circulares compostos evidenciam-se como uma opção para situações em que os perfis tubulares laminados disponíveis no mercado não possuem a capacidade resistente necessária para suportar a força solicitante de compressão axial, quando o uso de perfis soldados não é desejável.

O estudo apresentado por Grilo (2015) consistiu na análise numérica, através do método dos elementos finitos utilizando o programa computacional ABAQUS (SIMULIA, 2013), do comportamento de perfis tubulares circulares concêntricos laminados de aço para diversos arranjos, avaliando sua força axial de compressão resistente. Entretanto, a calibração dos seus modelos foi feita com base com a norma ABNT NBR 16239:2013, para perfis isolados. Assim, de acordo com sua própria sugestão, é importante que seja realizado um estudo experimental calibrando seus estudos para viabilizar a utilização desses perfis com um nível de confiança maior.

2

ASPECTOS DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS TUBULARES SUBMETIDOS À FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO

2.1 Considerações Iniciais

Pilares, sistemas de contraventamento, escoras e estruturas treliçadas são típicos elementos empregados para resistir à força axial de compressão. Pode-se dizer que quando o arranjo do sistema estrutural permite que a restrição à rotação das extremidades do elemento seja desprezável e o carregamento seja simetricamente aplicado por meio dos outros elementos que estão ligados às suas extremidades, a barra poderá ser projetada como elemento sujeito apenas à força axial de compressão (PIMENTA, 1997).

O comportamento estrutural de barras comprimidas é avaliado através do conceito da estabilidade do equilíbrio. Tal comportamento é afetado consideravelmente com a presença de tensões residuais e da curvatura inicial.

2.2 Estabilidade Estrutural

A estabilidade, em análise estrutural, é associada ao conceito de equilíbrio, na medida em que é utilizada para classificar configurações de equilíbrio. Tal conceito está relacionado à capacidade de um corpo adquirir uma configuração de equilíbrio após ser submetido a uma força ou a um deslocamento, dito como perturbação. Para o comportamento estrutural, têm-se as configurações de equilíbrio estável e instável (REIS; CAMOTIM, 2000).

Na Figura 2.1, são apresentados os três tipos de configurações de equilíbrio possíveis: estável, instável e neutro ou indiferente. Ao submeter um corpo rígido sobre uma superfície côncava a uma perturbação qualquer, ele sempre retornará à sua configuração original, definindo o equilíbrio estável (Figura 2.1.a). Ao submeter um corpo sobre uma superfície convexa a uma

perturbação qualquer, ele não conseguirá obter uma configuração de equilíbrio, caracterizando um equilíbrio instável (Figura 2.1.b). No caso de um corpo sobre uma superfície plana, ao submetê-lo a uma perturbação qualquer, ele encontrará uma outra configuração de equilíbrio em uma nova posição, caracterizando um equilíbrio neutro ou indiferente (Figura 2.1.c).

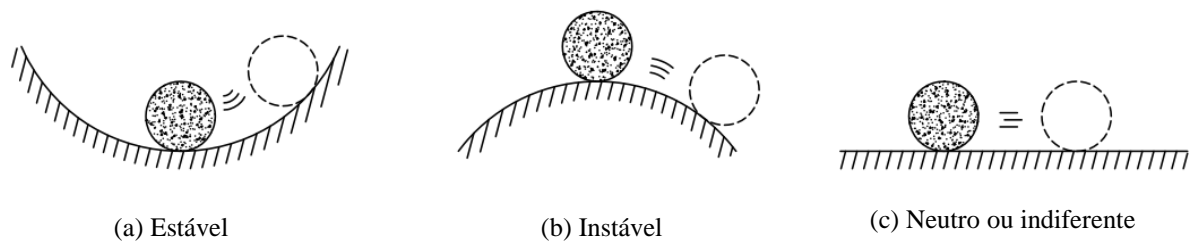


Figura 2.1. Configurações de equilíbrio.

Para a análise estrutural, o equilíbrio neutro ou indiferente é considerado geralmente como a transição entre os equilíbrios estável e o instável. A estabilidade estrutural é um fenômeno importante para o dimensionamento de peças estruturais, principalmente em peças esbeltas, comuns nas estruturas de aço.

A configuração de equilíbrio instável é a condição crítica para um elemento comprimido. Segundo Chen e Lui (1981), a instabilidade é a condição na qual a variação da geometria de uma estrutura ou componente estrutural sob compressão resulta na perda da capacidade de resistir ao carregamento. Para Galambos (1998), a instabilidade é a perda da capacidade de resistir a um aumento na força de compressão por uma estrutura comprimida.

Na prática, a maioria das peças estruturais comprimidas são afetadas pela instabilidade local ou global. A instabilidade local ocorre nos elementos que constituem a peça estrutural, como as chapas em perfis de aço, formando semiondas ao longo do comprimento. Já a instabilidade global ocorre na peça inteira com a sua perda de equilíbrio.

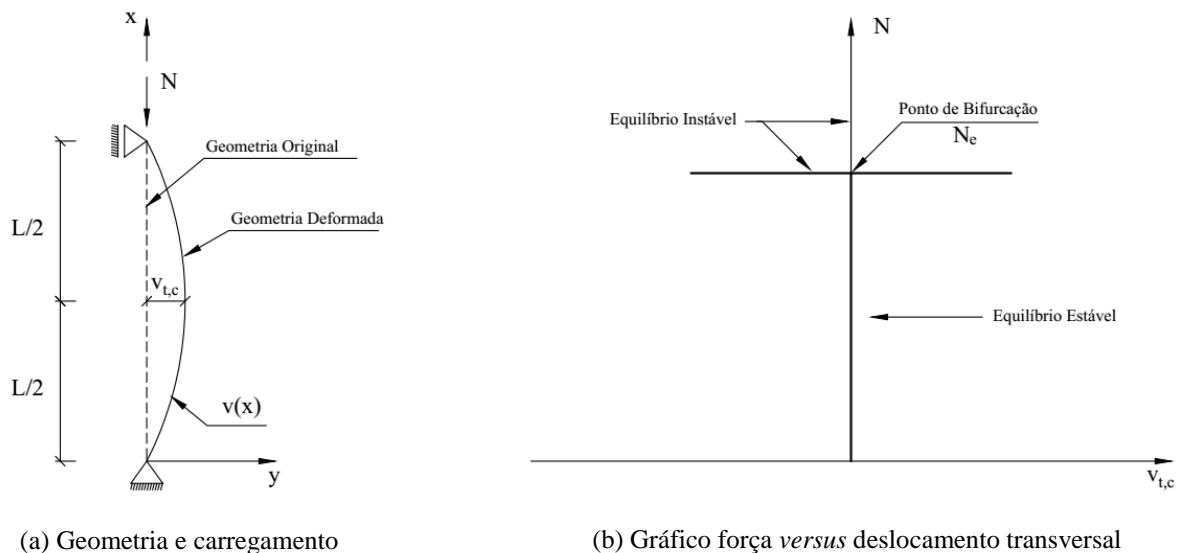
2.2.1 Teoria Clássica de Flambagem Elástica

A teoria clássica de flambagem elástica descreve o comportamento de barras perfeitamente retilíneas, sem imperfeições geométricas iniciais e de material, com a força de compressão atuando sobre o seu eixo longitudinal e em regime de pequenos deslocamentos. Para exemplificar essa teoria, a Figura 2.2.a apresenta uma barra de comprimento L rotulada nas

duas extremidades submetida a uma força axial de compressão N variante. Nela, é representada a configuração deformada, em que o deslocamento máximo da seção transversal ($v_{t,c}$) se encontra na metade do comprimento da barra ($L/2$). De acordo com Chen e Lui (1987), a equação diferencial que descreve o comportamento dessa barra, conforme a teoria clássica, é:

$$EIv'' + Nv = 0 \quad (2.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo de flexão, e v é o deslocamento transversal da barra.



(a) Geometria e carregamento

(b) Gráfico força *versus* deslocamento transversal

Figura 2.2. Teoria clássica de flambagem elástica.

A Equação (2.1) leva a uma situação chamada de problema de bifurcação. Esse problema pode ser entendido através das trajetórias de equilíbrio da barra observada no gráfico de força axial de compressão atuante (N) *versus* o deslocamento transversal da barra (v), mostrado na Figura 2.2.b. À medida que se aumenta a força N , a barra permanece na sua forma reta (equilíbrio estável) até que uma determinada força a torna instável, assumindo uma configuração deformada, apresentando um ponto de bifurcação. A carga que provoca a instabilidade é designada como carga crítica de Euler (N_e), e é definida pela expressão seguinte, na qual L é o comprimento da barra:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.2)$$

A geometria deformada ou curvatura da barra é determinada através da solução da Equação (2.1), na qual se assume a forma senoidal para essa curvatura. Assim, tem-se:

$$v(x) = C_1 \text{sen}(\pi x/L) \quad (2.3)$$

em que C_1 é uma constante de valor igual ao deslocamento transversal na metade do comprimento da barra e x é a coordenada axial da barra.

2.2.2 Estabilidade Elástica de Barras com Imperfeições Geométricas

As barras de aço perfeitamente retilíneas não são consideradas nos projetos de engenharia, devido a fatores inerentes aos processos de fabricação, transporte e montagem (ver subitem 2.4). A curvatura inicial que a barra possui é denominada imperfeição geométrica inicial. Essas imperfeições causam uma variação na curva da força *versus* deslocamento, opondo-se ao problema de bifurcação típico da teoria clássica da flambagem elástica, como será abordado a seguir.

Ao assumir uma curvatura inicial na barra rotulada nas extremidades (Figura 2.3.a), como descrito na seção anterior, na forma de uma meia-onda senoidal, a geometria deformada inicial da barra é descrita pela Equação (2.3). Como a constante C_1 é igual ao valor da imperfeição geométrica inicial da barra na metade do seu comprimento (v_0), vem:

$$v_i(x) = v_0 \text{sen}(\pi x/L) \quad (2.4)$$

Para essa nova configuração, o comportamento da barra passa a ser regido pela seguinte equação diferencial:

$$EIv'' + N(v + v_i) = 0 \quad (2.5)$$

A resolução da Equação (2.5) implica na descrição da geometria deformada final da barra:

$$v(x) = \left(\frac{1}{1 - N/N_e} \right) v_0 \text{sen}(\pi x/L) \quad (2.6)$$

Ao se considerar o valor de x igual à $L/2$ na Equação (2.6), tem-se a equação que descreve a variação da força *versus* o deslocamento transversal na metade do comprimento da barra, expressa na Figura 2.3, dada por:

$$v_{t,c} = \left(\frac{1}{1 - N/N_e} \right) v_0 \quad (2.7)$$

Pode-se observar, pelo gráfico da Figura 2.3.b, que o problema não é mais um caso de bifurcação com mudança repentina da configuração de equilíbrio, como visto anteriormente. Na barra com curvatura inicial, a mudança no estado de equilíbrio ocorre quando há um grande aumento de deslocamento para pequenos incrementos de força de compressão. Também pode ser visto que a força aplicada tende para a carga crítica de Euler na medida em que os deslocamentos aumentam, ou seja, a presença da imperfeição inicial não afeta o valor dessa carga crítica.

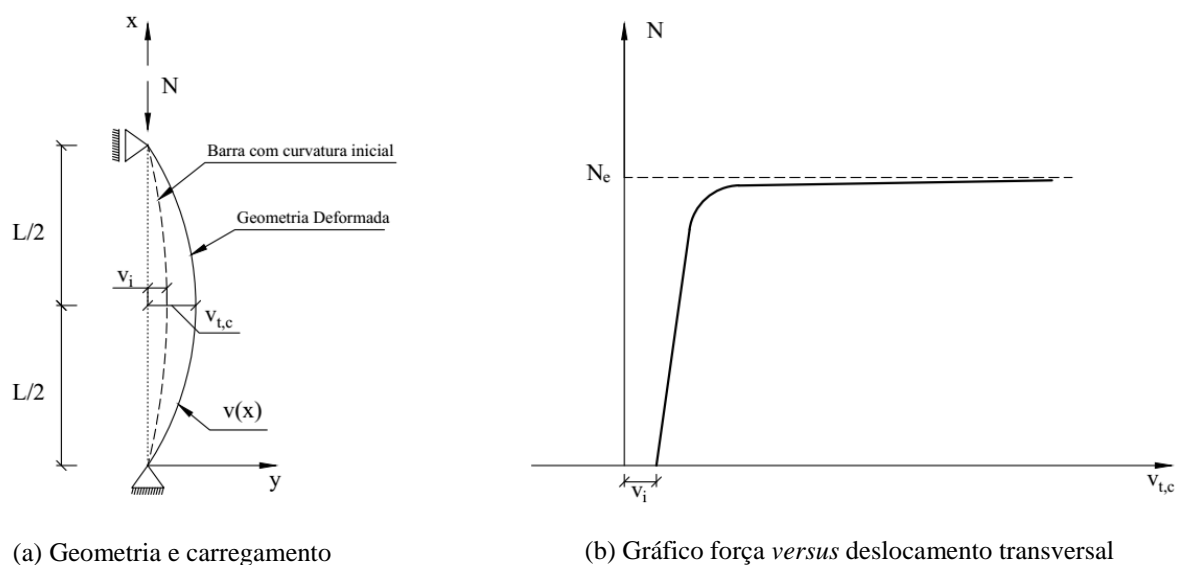


Figura 2.3. Comportamento de barras com curvatura inicial.

Entretanto, o comportamento descrito neste item vale somente para regime elástico. Nos casos reais, o comportamento da barra também é afetado pelas imperfeições do material em regime inelástico.

2.2.3 Instabilidade Elastoplástica de Barras com Imperfeições Geométricas

O comportamento elastoplástico das barras sob compressão está relacionado com a presença dos efeitos das imperfeições geométrica e de material. As imperfeições de material estão associadas ao processo de fabricação das peças estruturais, que ficam suscetíveis às tensões residuais (ver subitem 2.3), que ocasiona perda da rigidez da barra devido ao escoamento precoce de partes da seção transversal. Segundo Pimenta (1997), a instabilidade elastoplástica de barras com curvatura inicial apresenta fenômenos de grande complexidade, pois os efeitos da curvatura inicial e tensão residual não podem ser somados para se obter efeitos combinados na determinação da resistência última. Na Figura 2.4, é apresentada a forma da curva força *versus* deslocamento para a situações reais, levando em conta todas as imperfeições.

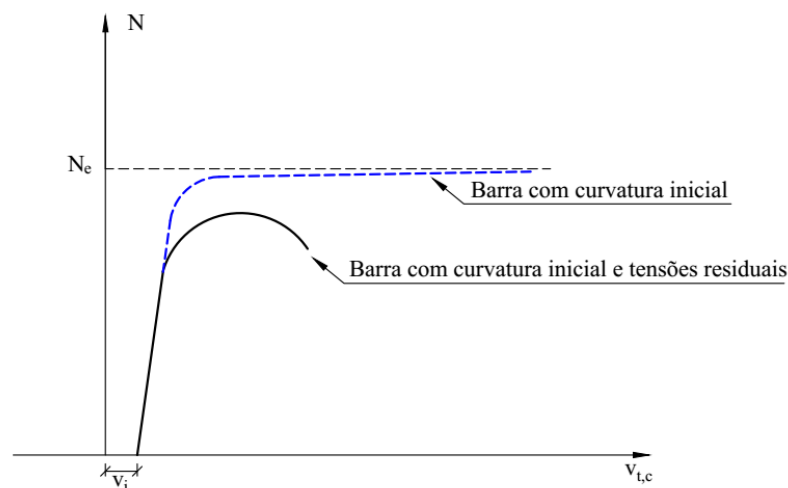


Figura 2.4. Comportamento elastoplástico da barra rotulada nas duas extremidades

2.3 Tensões Residuais

As tensões residuais surgem durante os processos de fabricação dos elementos de aço, tais como laminação a quente, laminação a frio, conformação e soldagem. Essas tensões afetam de maneira significativa o comportamento estrutural.

Na laminação a quente, as tensões residuais são decorrentes do processo de resfriamento desigual ao longo da seção transversal do perfil. Nesse processo, a seção transversal do perfil fica sob o efeito de contração térmica, surgindo tensões autoequilibradas, em que as regiões mais expostas e de resfriamento mais rápido são submetidas a tensões de compressão e as

regiões menos expostas e de resfriamento mais lento são submetidas a tensões de tração (GRILO, 2015).

Em perfis tubulares circulares laminados a quente, as tensões residuais são de baixa magnitude, variando somente ao longo da sua espessura. Isso ocorre devido à geometria da seção transversal desses perfis, cujo resfriamento acontece mais rapidamente na face externa que na face interna (LAW; GARDNER, 2012). Segundo o *European Convention for Constructional Steelwork* (1976), as tensões residuais não afetam de forma considerável os perfis tubulares circulares laminados a quente, como ocorre em outros perfis, pois apresentam uma variação linear máxima entre -15% (na face externa) a +15% (na face interna) da resistência ao escoamento do aço, valores que são considerados aceitáveis até os dias de hoje.

O efeito da tensão residual na análise estrutural é feito por simplificações nas normas de projeto. A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 recomenda a redução do módulo de elasticidade do aço em 20%, independentemente da seção transversal, tal como a norma americana ANSI/AISC 360:2016. Já a norma europeia EN 1993-1-1:2005, equivale a tensão residual a uma imperfeição geométrica com base na seção transversal do perfil, sendo que, para os perfis tubulares circulares laminados a quente, a imperfeição recomendada é de $L/300$.

2.4 Imperfeições Geométricas

Conforme explicitado em 2.2.2, as imperfeições geométricas são variações na geometria idealizada de peças estruturais intrínsecas aos processos de fabricação, transporte e montagem.

A configuração real do elemento comprimido com curvatura inicial é complicada de ser representada, pois é difícil de definir o sentido dessa curvatura, tal como sua variação de amplitude. Assim, admite-se, normalmente, que a curvatura possui forma senoidal com a máxima amplitude da imperfeição inicial ocorrendo na seção central da barra (Equação (2.4)).

A amplitude da imperfeição inicial é expressa, comumente, por uma fração do comprimento da barra e é limitada conforme as normas de fabricação do perfil estrutural. Em perfis tubulares, a norma brasileira ABNT NBR 8261:2010 estabelece que a curvatura máxima resultante de fabricação não ultrapasse o valor de $L/400$.

2.5 Curvas de Resistência à Compressão de Projeto

As curvas de resistência à compressão utilizadas em normas para o dimensionamento de elementos comprimidos se baseiam em vários estudos realizados com intuito de avaliar a influência da forma e amplitude da curvatura inicial, como também, em alguns casos, o efeito das tensões residuais referentes ao processo de fabricação do perfil de aço.

Nos anos 1960, iniciou-se um grande volume de pesquisas relacionadas à resistência de perfis de aço comprimidos que resultaram na definição de curvas múltiplas de resistência à compressão pelo SSRC (*Structural Stability Research Council*) e pela ECCS (*European Convention for Constructional Steelwork*). Desse modo, várias curvas foram estabelecidas para abranger um largo espectro de tipos de seções, aços e tensões residuais, tomando uma curvatura inicial em função do comprimento.

A SSRC, antiga CRC (*Column Research Council*), propôs três curvas de resistência à compressão, curvas 1, 2 e 3, baseando-se em ensaios laboratoriais calibrados para curvatura inicial de $L/1.000$. As curvas da SSRC foram desenvolvidas com base nas envoltórias estudadas a partir de vários perfis com curvaturas iniciais de $L/500$, $L/1.000$ e $L/2.000$, como mostra a Figura 2.5. Em seguida, Bjorhovde (1972), em paralelo com o desenvolvimento das curvas da SSRC, usando curvatura inicial de $L/1.470$, elaborou mais três novas curvas, denominadas de 1P, 2P e 3P.

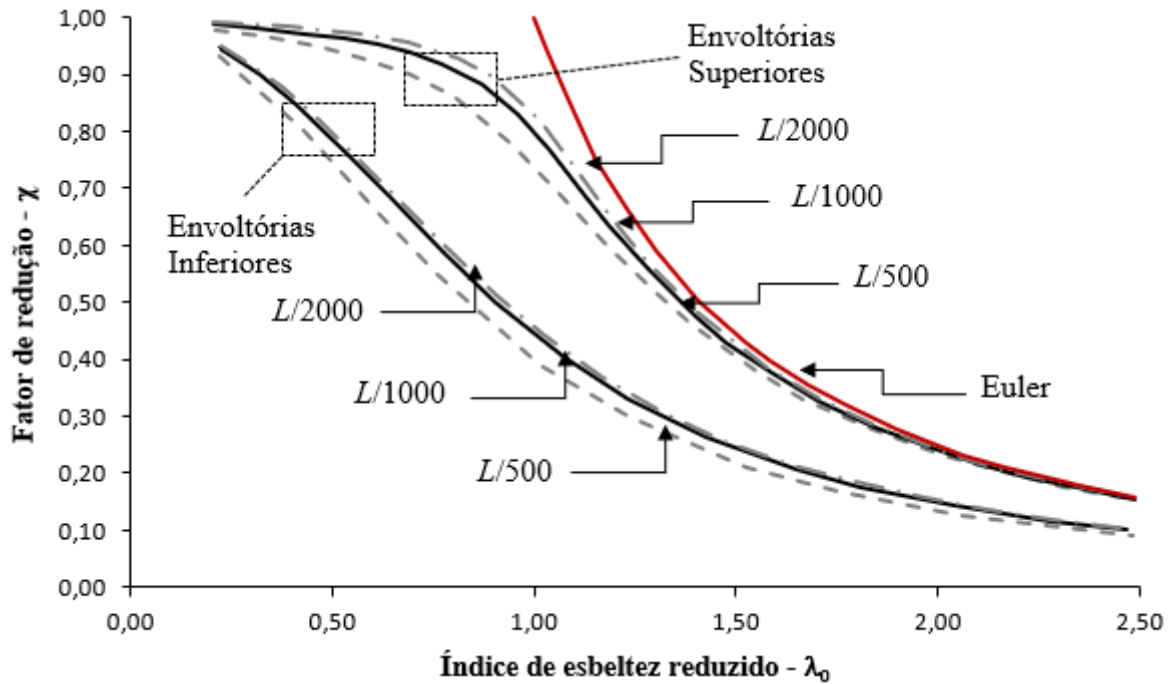


Figura 2.5. Curvas envoltórias baseadas nas curvaturas iniciais indicadas (adaptado de PIMENTA, 1997 e GALAMBOS, 1988).

Em 1976, o ECCS (*European Convention for Constructional Steelwork*), através de estudos baseados na curvatura inicial de $L/1.000$, propôs cinco curvas de resistência à compressão, designadas por “ a_0 ”, “ a ”, “ b ”, “ c ” e “ d ” (Figura 2.6), utilizando-se do mesmo princípio de envoltórias usado pela SSRC.

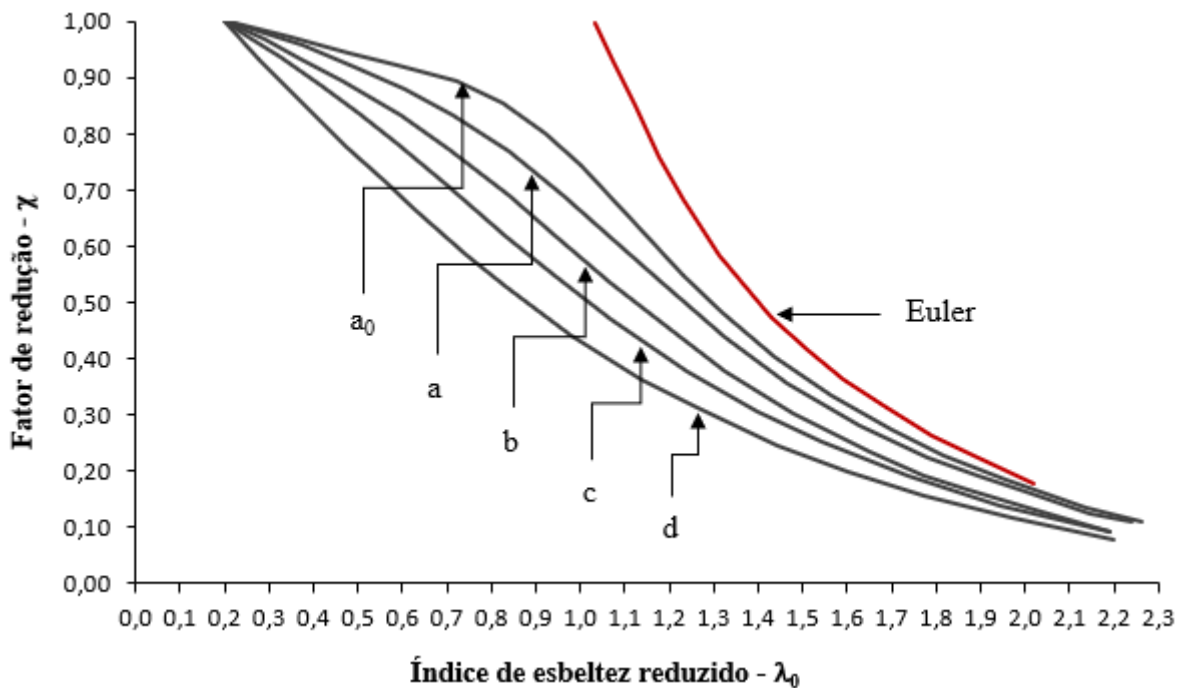


Figura 2.6. Curvas de resistência à compressão da ECCS (adaptado de BEER; SCHULZ, 1975).

2.6 Critérios de Dimensionamento

2.6.1 Considerações Gerais

As normas de projeto de estruturas de aço utilizam, no dimensionamento dos elementos comprimidos, uma ou mais curvas de resistência à compressão definidas pelas instituições competentes (subitem 2.5), em alguns casos, com algumas modificações para se adequarem à realidade da região a qual abrangem. Sucintamente, em todas as normas, o dimensionamento desses elementos consiste no critério do estado-limite último (ELU), pelo qual a força axial resistente nominal ($N_{c,Rk}$), para casos em que a flambagem local não se manifesta, é definida pela seguinte equação:

$$N_{c,Rk} = \chi A_g f_y \quad (2.8)$$

onde χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, A_g é a área bruta da seção transversal e f_y é a resistência ao escoamento do aço.

O fator de redução χ leva em conta os efeitos da tensão residual e das imperfeições geométricas e é função do índice de esbeltez reduzido da barra comprimida, sendo dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (2.9)$$

em que N_e é a força axial de flambagem elástica determinada pelo menor valor dos possíveis modos de flambagem da barra de acordo com o tipo de simetria da seção transversal. Para perfis tubulares, nos quais possuem seção duplamente simétrica, são possíveis as flambagens por flexão e por torção. Como estes perfis possuem grande rigidez a torção (geometria da seção transversal), o valor de N_e é dado pela flambagem por flexão, portanto igual a:

$$N_e = \frac{\pi^2 IE}{(KL)^2} \quad (2.10)$$

em que KL é o maior comprimento de flambagem por flexão.

As curvas de resistência à compressão adotadas pelas normas são definidas pela relação entre o fator de redução χ e o índice de esbeltez reduzido λ_0 . Cada norma aplica uma formulação diferente para χ , como será apresentado nos próximos subitens, utilizando sempre a simbologia e a nomenclatura da norma brasileira ABNT NBR 16239:2013, para facilitar a compreensão.

2.6.2 Norma EN 1993-1-1:2005

A norma europeia para projeto estrutural de aço, EN 1993-1-1:2005, adota as mesmas curvas múltiplas obtidas pelos estudos da ECCS. Essas curvas dependem do tipo de seção transversal e do eixo de flambagem dos perfis mais empregados na prática. Para os perfis tubulares laminados a quente, a norma recomenda o uso da curva “a”, desde que a resistência ao escoamento (f_y) do aço seja inferior a 460 MPa, situação usual na prática.

Assim, o fator de redução χ é determinado conforme equação a seguir:

$$\chi = \frac{1}{\left(\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_0^2} \right)} \quad (2.11)$$

com

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2] \quad (2.12)$$

onde α é um fator relacionado às imperfeições do perfil, no qual se consideram as tensões residuais e a imperfeição inicial da barra, tomada como igual a $L/1.000$. No caso de perfis tubulares laminados a quente, o valor de α é igual a 0,21.

2.6.3 Normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360:2016

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 adota uma única curva de resistência à compressão, a curva 2P do SSRC (ver subitem 2.5), que assume uma curvatura inicial de $L/1.470$ (TIDE, 2001). A rigor, ela seguiu o mesmo procedimento da norma norte americana que a precedeu, a norma ANSI/AISC 360:2005. As normas nortes americanas que vierem depois, a ANSI/AISC 360:2010 e a ANSI/AISC 360:2016 não alteraram esse procedimento. Por essas normas, o valor de χ é definido conforme o valor de λ_0 , de acordo com as seguintes equações:

$$\lambda_0 \leq 1,5: \quad \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (2.13)$$

$$\lambda_0 > 1,5: \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (2.14)$$

2.6.4 Normas ABNT NBR 16239:2008 e CAN/CSA S16:2005

A norma canadense, CAN/CSA S16:2005, baseou-se suas curvas de resistência à compressão em duas curvas do antigo CRC, porém com algumas modificações em sua formulação (CHERNENKO; KENNEDY, 1991).

Atualmente, no Brasil, foi elaborada uma nova norma que trata especificamente dos perfis tubulares, a ABNT NBR 16239:2013, que adotou a mesma curva de resistência à compressão dos perfis tubulares da norma canadense. A norma ABNT NBR 8800:2008, aplicável a todos os perfis de aço, penaliza o uso dos perfis tubulares por não considerar seus baixos níveis de tensões residuais, de maneira que essa nova norma procura corrigir essa inadequação.

Desse modo, a curva de resistência à compressão para tubos laminados a quente ou tratados termicamente para alívio de tensões é obtida através do fator de redução χ definido por:

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \quad (2.15)$$

2.6.5 Análise Comparativa

As curvas de resistências à compressão adotadas em cada norma geram diferenças apreciáveis, pois elas adotam curvaturas iniciais diferentes. Além disso, cada norma utiliza uma filosofia em seus procedimentos de cálculo, como o EN 1993-1-1:2005 que adota cinco curvas, dependendo do tipo de perfil, o oposto da ANSI/AISC 360:2016, que emprega uma única curva a fim de otimizar os cálculos, tal como a ABNT NBR 8800:2008. Já a norma canadense CAN/CSA S16:2005 adota duas curvas, com uma curva específica para perfis tubulares, na qual a ABNT NBR 16239:2013 foi baseada.

2.7 Mecanismo de Colapso

Nos elementos de aço comprimidos, o comportamento elastoplástico é fundamental para compreender o mecanismo de colapso. Para tal, considere uma barra birrotulada com uma curvatura inicial, v_i , submetida à uma força axial de compressão crescente, N . Sabe-se que a barra está também sob flexão devida ao momento causado pela curvatura inicial. A atuação da força no início do carregamento provoca deslocamentos reduzidos, caracterizando o comportamento elástico que se encerra com o início do escoamento na seção transversal central, quando as tensões internas na fibra externa mais solicitada atingem a resistência de escoamento do aço. À medida que a força e os deslocamentos aumentam, o momento interno aumenta, propagando o escoamento para o interior da seção. Em seguida, a fibra externa da outra extremidade inicia também seu escoamento. Com o acréscimo de força, os deslocamentos se tornam mais acentuados, fazendo com que a barra reduza sua rigidez à flexão, até que sua seção esteja totalmente plastificada, formando uma rótula plástica. Nessa situação, a barra se torna um mecanismo plástico, em que as regiões plastificadas não suportam acréscimos de tensões, e entra em colapso.

A determinação do equilíbrio da distribuição plástica de tensões na seção transversal depende da posição da linha neutra plástica (LNP). Em perfis tubulares, há duas hipóteses em relação à posição dessa linha. A primeira hipótese é que ela se situe na seção não vazada (Figura 2.7.a) e a segunda que ela se situe na seção vazada (Figura 2.7.b).

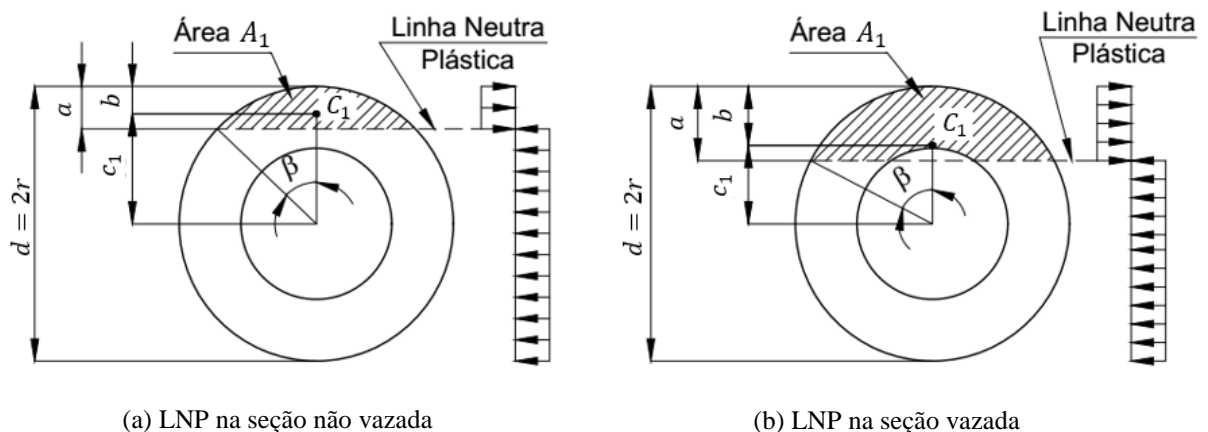


Figura 2.7. Hipóteses da posição da linha neutra plástica de um perfil tubular circular (adaptado de GRILLO, 2015).

Através destas duas hipóteses de localização da linha neutra plástica, pode-se determinar, pelas equações de equilíbrio, o momento fletor (M) e a força axial (N) que levam a seção transversal a plastificação, conforme as Equações (2.16) e (2.17) a seguir:

$$M = f_y[A_1(d - 2b)] \quad (2.16)$$

$$N = f_y[A_g - 2A_1] \quad (2.17)$$

em que A_1 é a área acima da linha neutra plástica, A_g é área da seção transversal do perfil, d é o diâmetro externo do perfil e b é a distância entre o topo do perfil e o centroide da área A_1 , como pode ser visto na Figura 2.7.

3

PERFIS TUBULARES CIRCULARES COMPOSTOS CONCÊNTRICOS

3.1 Considerações Iniciais

Grilo (2015) buscou viabilizar o uso de perfis tubulares circulares concêntricos (PTCC) por meio do estudo do seu comportamento com base em análise numérica. Em seu estudo, o autor propôs a montagem de perfis tubulares circulares concêntricos com dois e três tubos, detalhando soluções para as interligações entre os tubos ao longo do comprimento da barra e, ainda, nas extremidades, as ligações dos tubos com os flanges.

A simulação numérica foi realizada pelo Método dos Elementos Finitos através do programa computacional comercial ABAQUS 2013 (SIMULIA, 2013). A calibração dos modelos numéricos foi executada a partir de tubos isolados sob compressão centrada, com curvatura inicial, e seus resultados comparados com os da norma brasileira ABNT NBR 16239:2013.

As curvas de resistência à compressão foram determinadas para vários PTCCs, e os resultados comparados entre si. Além dessas comparações, também foi feita a comparação entre os resultados dos PTCCs e a curva de resistência à compressão obtida, considerando a soma das resistências dos tubos que compõe os PTCCs analisados isoladamente.

Ao analisar os resultados numéricos, Grilo (2015) propôs procedimentos de dimensionamento para PTCCs com base na formulação da norma ABNT NBR 16239:2013.

3.2 Ligação dos Flanges

Para composição de dois perfis tubulares, foi estabelecida a utilização de flange vazado para a ligação dos perfis nas extremidades, a fim de se obter acesso à solda do tubo interno. Definiu-se o emprego de solda de filete para a ligação entre o tubo externo e o flange. Já para a ligação

entre o tubo interno e o flange foi definido o uso da solda de penetração parcial, faceada com este, com chanfro no flange. Essa ligação pode ser vista com detalhes na Figura 3.1.

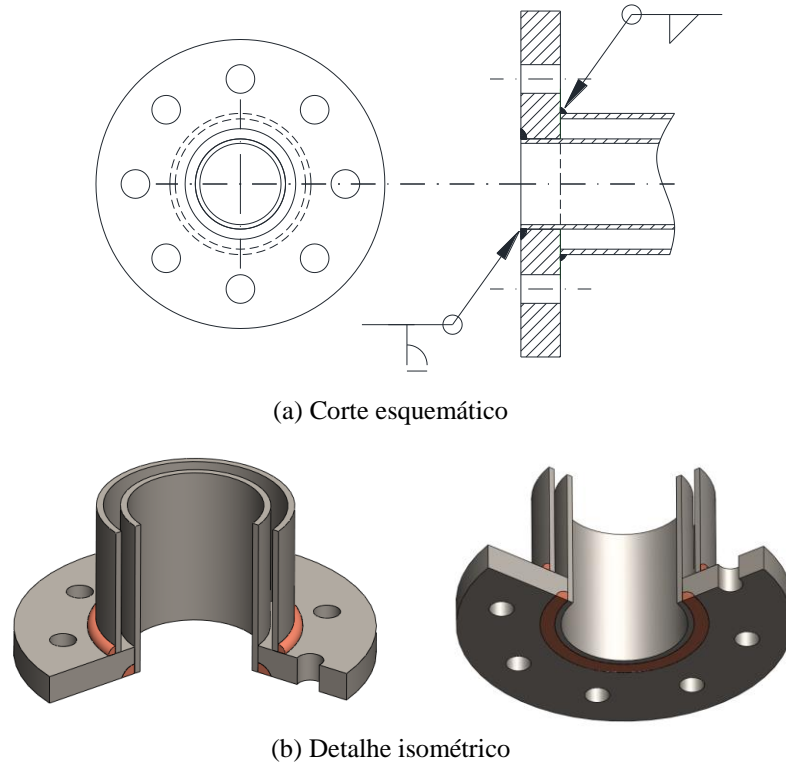


Figura 3.1. Ligação do flange nos PTCCs com dois tubos (GRILO, 2015).

Na composição de três perfis tubulares, as ligações dos perfis externo e interno com o flange são realizadas de modo análogo à composição com dois tubos. Ao introduzir o tubo intermediário, se faz necessário que o flange tenha duas ranhuras, simétricas, nas quais o tubo se encaixe. A ranhura do flange deve ser chanfrada na face inferior desse tubo, para que haja penetração da solda. Na Figura 3.2 é apresentada a configuração dessas ligações.

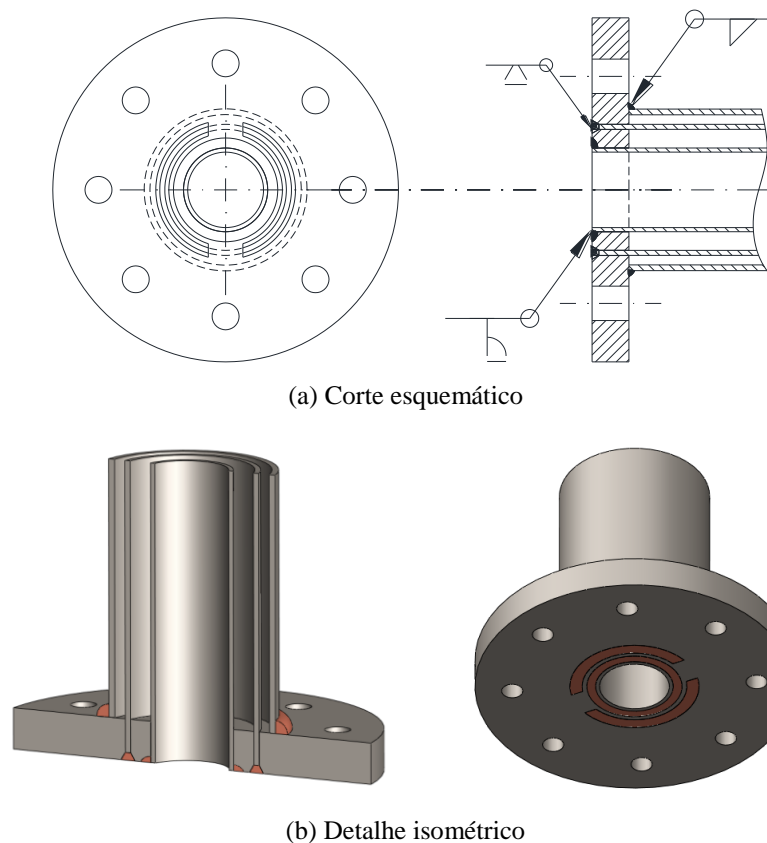
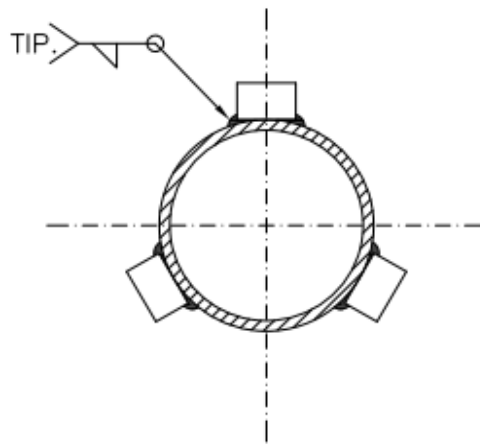


Figura 3.2. Ligação do flange nos PTCCs triplos (GRILLO, 2015).

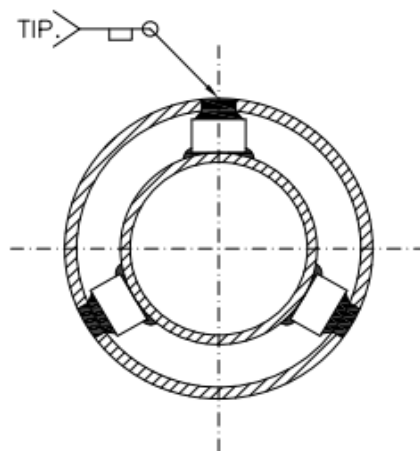
3.3 Interligação dos Tubos

Grillo (2015) analisou dois tipos de soluções de interligação ao longo dos tubos, uma com travamentos fixos e outra com travamentos deslizantes. E ainda estudou o PTCC sem travamentos ao longo dos tubos.

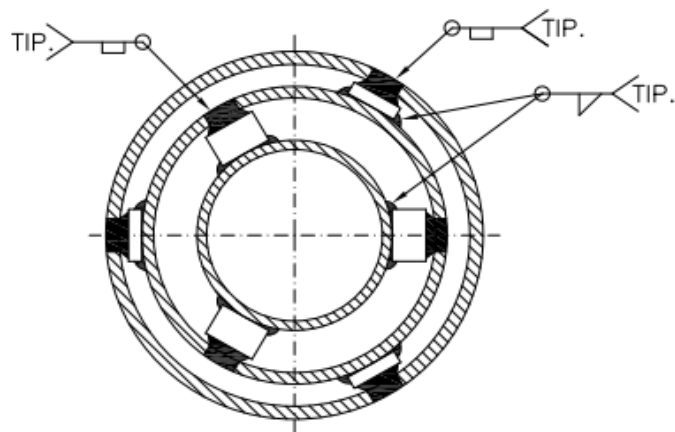
No caso de PTCC com travamentos fixos, são utilizadas peças de conexão soldadas entre as paredes dos tubos. O processo de montagem desses travamentos pode ser dividido em três etapas. Na primeira etapa, as peças de conexão são fixadas, com solda de filete, na parede externa do tubo interno, conforme a Figura 3.3.a. Na segunda etapa, realiza-se a montagem do conjunto, e o tubo externo ou tubo intermediário são perfurados, de acordo com a posição das peças de conexão e, em seguida, monta-se o conjunto. Na terceira etapa, efetua-se uma solda de tampão, ligando as peças de conexão ao tubo externo ou intermediário, como pode ser visto na Figura 3.3.b e na Figura 3.3.c. Observa-se que, para a composição de três tubos, a segunda e a terceira etapas são realizadas duas vezes, para o tubo intermediário e o externo.



(a) Fixação das peças da interligação no tubo interno



(b) Fixação das peças da interligação no tubo interno



(c) Fixação das da interligação nos tubos intermediário e externo

Figura 3.3. Travamento fixo de PTCCs. (GRILO, 2015)

Para PTCC com travamentos deslizantes, visto na Figura 3.4, a interligação entre os tubos é feita pela fixação de pinos nos tubos externo e/ou intermediário, transpassando sua parede de forma que toquem o tubo interno e/ou intermediário. A montagem desse tipo de travamento

consiste em, primeiramente perfurar o tubo externo ou intermediário nos pontos em que os pinos serão transpassados. Logo em seguida, monta-se o conjunto e posicionam-se os pinos de forma que faceiem o tubo interno ou intermediário. Após o posicionamento dos pinos, realiza-se uma solda de filete ligando os pinos à face externa do tubo externo ou intermediário.

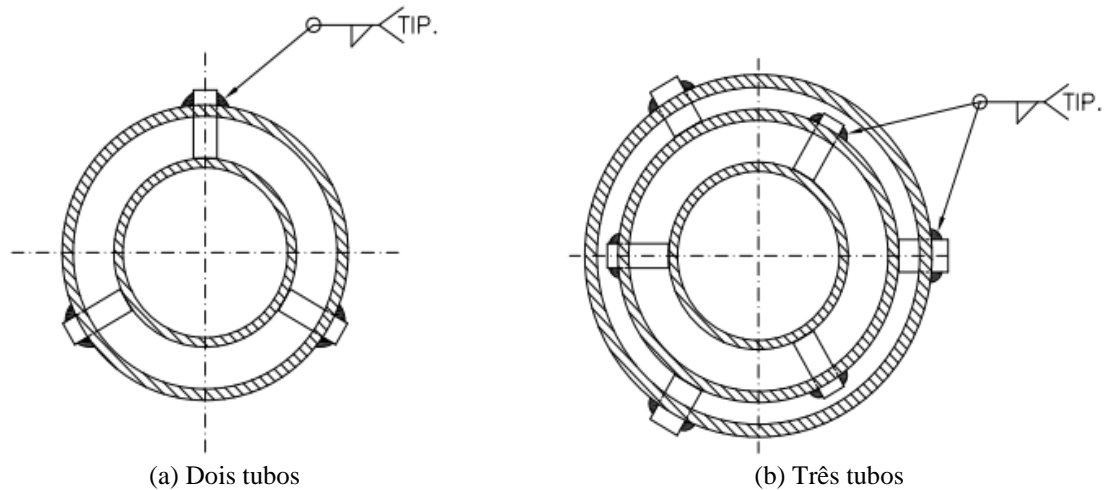


Figura 3.4. Travamento deslizante de PTCCs (GRILLO, 2015)

3.4 Calibração dos Modelos Numéricos

Os modelos numéricos desenvolvidos por Grilo (2015) foram feitos a partir de tubos isolados sob compressão centrada, com imperfeição inicial de $L/1.000$, módulo de elasticidade de 200 GPa e relação tensão-deformação do aço constituída por duas retas, uma representativa do regime elástico, até o alcance da resistência ao escoamento, e outra com inclinação de $1/10.000$, representativa do comportamento após essa resistência (regime plástico).

O autor utilizou o programa ABAQUS 6.13 (SIMULA, 2013), que utiliza o Método dos Elementos Finitos em suas simulações. No teste de elementos, foi definido que o elemento S8R era o mais adequado por apresentar bons resultados e se adaptar perfeitamente à geometria do problema. O elemento S8R é um elemento de casca, de aproximação quadrática, de lados curvos e de integração reduzida, com 6 graus de liberdade por nó e 8 nós por elemento.

Na simulação do problema, Grilo (2015) considerou um quarto do tubo, conforme a Figura 3.5. Um ponto fictício foi criado no centro da seção transversal, na base de borda, com todos seus graus de liberdade solidarizados com os nós das faces de borda e do flange, para aplicação de restrições e da força de compressão. As restrições para esse nó fictício foram os deslocamentos

nas direções dos eixos y e z , e as rotações em torno dos eixos x e y . As faces longitudinais tiveram seus nós restringidos para os deslocamentos na direção do eixo z e para as rotações em torno dos eixos x e y . Os nós da face central tiveram restringidos seus deslocamentos nas direções dos eixos x e z , e suas rotações em torno dos eixos y e z .

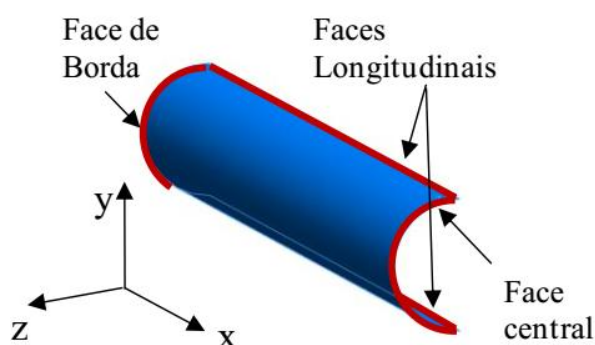


Figura 3.5. Faces do modelo considerando um quarto do tubo (GRILO, 2015).

A partir do teste sensibilidade de malha, os autores determinaram o tamanho médio dos elementos finitos utilizados na análise, baseado na razão entre o perímetro e o comprimento médio do lado do elemento. Assim, foram adotados 15 elementos na seção transversal dos perfis, número que, segundo os autores, se mostrou viável em termos de tempo de processamento.

Em seu trabalho, Grilo (2015) simulou sessenta modelos de calibração, a partir de três seções transversais diferentes (Tabela 3.1), escolhidas para contemplar a variação da razão entre o diâmetro externo e a espessura da parede (d/t) dos perfis tubulares fabricados no Brasil. A partir dos resultados da simulação, os autores obtiveram as curvas de compressão adimensionais (χ versus λ_0) para as três seções transversais, que foram sobrepostas à curva de resistência à compressão da norma ABNT NBR 16239:2013, como mostra a Figura 3.6.

Tabela 3.1. Seções transversais simuladas

d (mm)	t (mm)	d/t
73,0	7,1	10,3
73,0	3,6	20,3
323,8	6,4	50,6

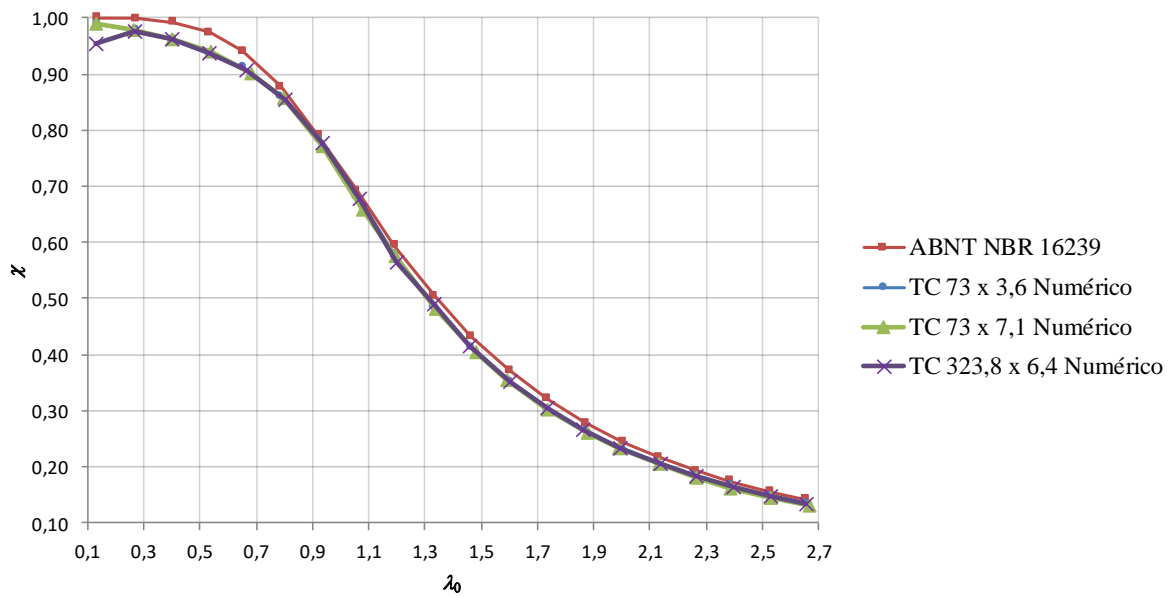


Figura 3.6. Curvas de resistência à compressão - Numérica versus ABNT NBR 16239:2013 (GRILO, 2015)

Também foi estudada a diferença entre os resultados dos modelos numéricos em relação à curva da norma ABNT NBR 16239:2013 (Figura 3.7), em que se percebe uma variação inferior a 6,5%, considerada pelos autores como satisfatória. Nota-se ainda que os resultados da análise numérica foram sempre inferiores aos obtidos pela norma, portanto, conservadores.

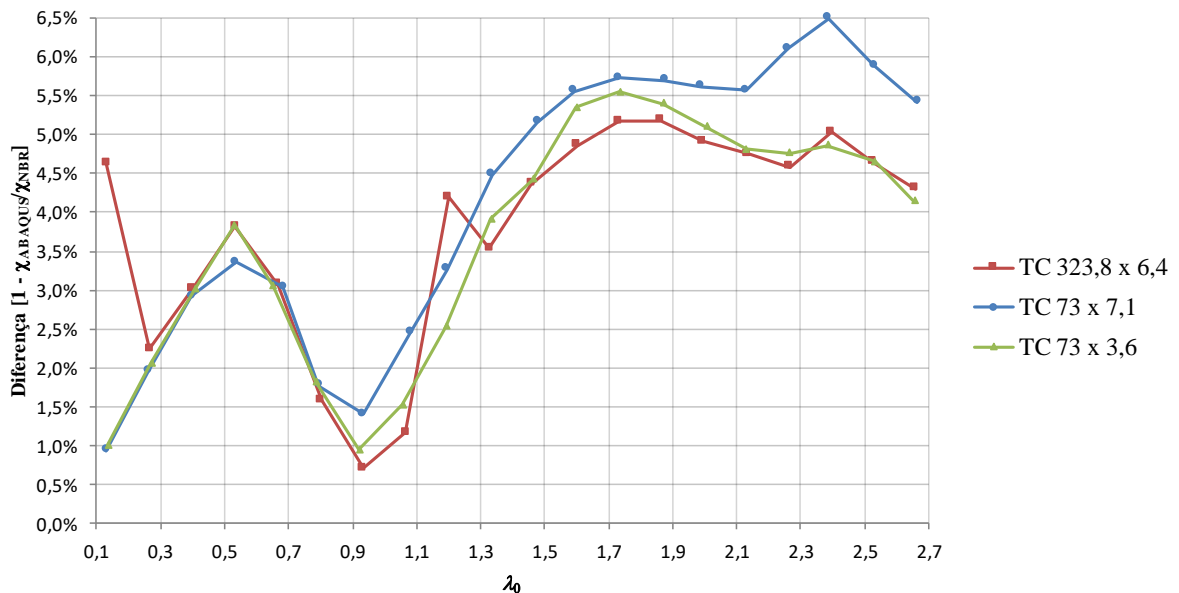


Figura 3.7. Diferença Numérica - ABNT NBR 16239:2013 (GRILO, 2015)

3.5 Resultados das Análises Numéricas

Para análise do comportamento dos PTCCs submetidos à compressão axial, Grilo (2015) estudou a distribuição da força de compressão nos PTCCs ao longo da aplicação do carregamento em cada tubo do PTCC, de acordo com o passo de carga.

Assim, foram simulados 1.146 modelos de PTCCs com esbeltez (λ) variando de 5 a 200. Foram utilizados os diâmetros de tubos laminados a quente comercializados no Brasil. Cada modelo foi analisado com travamentos fixos, deslizantes e sem travamentos ao longo do comprimento. Além desses modelos, foram simulados os tubos isoladamente.

Os modelos foram simulados com as mesmas propriedades de material, imperfeição geométrica, malha e condições de contorno dos modelos de calibração.

Para fins comparativos, foram correlacionados graficamente os valores do fator de redução associado à resistência à compressão χ encontrados na análise numérica e pela formulação da norma ABNT NBR 16239:2013 dos PTCCs, conforme a seguinte expressão:

$$diferença = 1 - \frac{\chi_A}{\chi_B} \quad (3.1)$$

onde χ_A e χ_B são fatores de redução dos casos comparados, definidos conforme se segue:

- $\chi_{(ABNT\ NBR\ 16239)}$: fator de redução associado à resistência do PTCC, calculado conforme ABNT NBR 16239:2013, considerando A_g e I como a soma das áreas e das inércias das seções transversais dos perfis que o compõem;
- $\chi_{Deslizante}$: fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC com travamentos deslizantes, calculado a partir do valor da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}^{Deslizante}$) obtida pelo modelo numérico do PTCC com travamentos deslizantes:

$$\chi_{Deslizante} = \frac{N_{c,Rk}^{Deslizante}}{A_g f_y} \quad (3.2)$$

- χ_{Fixo} : fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC com travamentos fixos, calculado a partir do valor da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}^{Fixo}$) obtida pelo modelo numérico do PTCC com travamentos fixos:

$$\chi_{Fixo} = \frac{N_{c,Rk}^{Fixo}}{A_g f_y} \quad (3.3)$$

- χ_{Livre} : fator de redução associado à resistência à compressão do PTCC sem travamentos, calculado a partir do valor da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rk}^{Livre}$) obtida pelo modelo numérico do PTCC sem travamentos:

$$\chi_{Livre} = \frac{N_{c,Rk}^{Livre}}{A_g f_y} \quad (3.4)$$

- χ_{soma} : fator de redução associado à resistência à compressão equivalente à soma dos tubos isolados que compõem cada PTCC:

$$\chi_{soma} = \frac{N_{c,Rk-1} + N_{c,Rk-2} + N_{c,Rk-3}}{(A_{g,1} + A_{g,2} + A_{g,3}) f_y} \quad (3.5)$$

onde $N_{c,Rk-1}$, $N_{c,Rk-2}$ e $N_{c,Rk-3}$ são as forças de compressão resistentes de cada perfil calculado isoladamente, e $A_{g,1}$, $A_{g,2}$ e $A_{g,3}$ são áreas brutas de cada perfil isolado.

Ao comparar os valores de $\chi_{(ABNT\ NBR\ 16239)}$ com os valores de χ_{Fixo} (Figura 3.8), o autor observou uma diferença inferior a 9%, o que, segundo ele, possibilita calcular a força de compressão resistente dos PTCCs utilizando o equacionamento previsto na norma ABNT NBR 16239:2013.

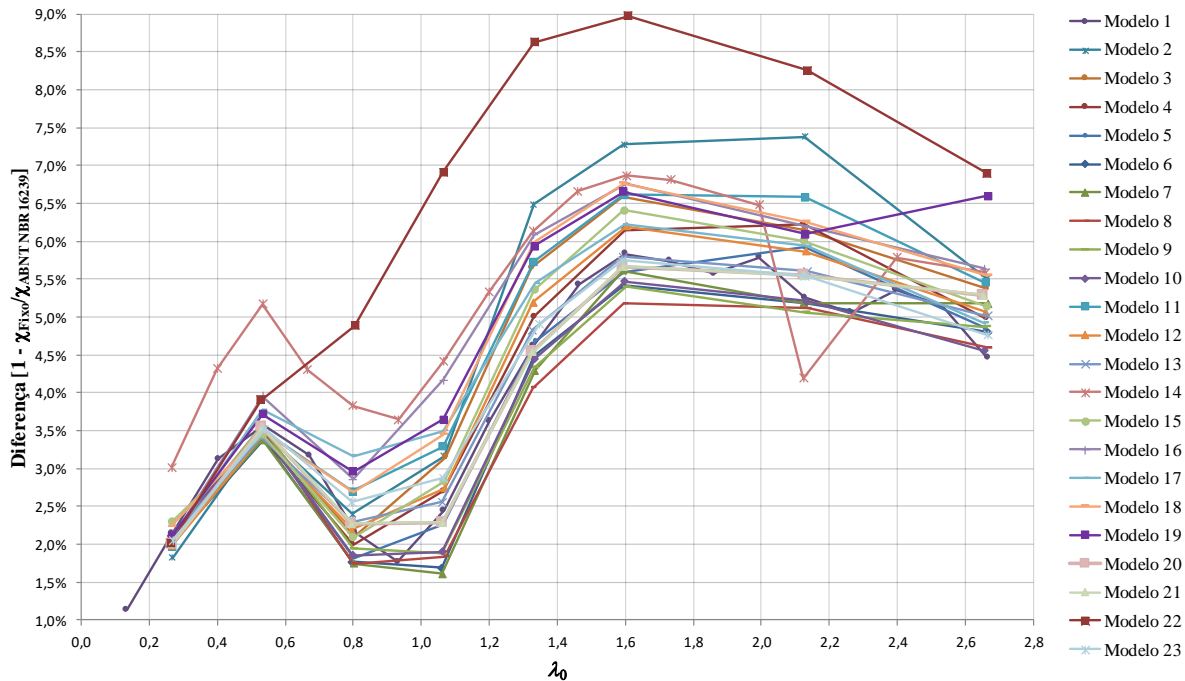


Figura 3.8. Diferença entre o modelo numérico com travamentos fixos - ABNT NBR 16239:2013 (GRILO, 2015)

Ao comparar os casos de travamentos fixos, deslizantes e sem travamentos, Grilo (2015) concluiu que os PTCCs com travamentos fixos e deslizantes possuem comportamentos semelhantes, entretanto, a diferença entre os PTCCs sem travamentos e com travamentos fixos aumenta conforme a razão d/t dos perfis internos diminuem.

Grilo (2015) estudou a distribuição das forças pelos perfis do PTCC com base nas aproximações nas leituras de tensões dos elementos do modelo. O método consiste em selecionar um anel composto pelos elementos mais próximos à base do PTCC onde são lidas as tensões normais (S_{11}) nos centroides das faces interna e externa de cada um desses elementos, e sua média calculada. Assim, ao multiplicar o valor médio da tensão normal axial do tubo pela área da seção transversal deste, podem-se obter, de forma aproximada, as forças atuantes em cada perfil.

Os resultados obtidos foram apresentados em gráficos de força *versus* passo de carga, em que foram mapeadas as curvas de carregamento de cada perfil, para os casos de travamentos fixos, deslizantes e sem travamentos, como mostra a Figura 3.9 referente ao PTCC composto pelos perfis TC 168,0 x 14,2 + 273,0 x 20,0 + 355,6 x 8,0. As linhas horizontais foram inseridas no

gráfico para indicar as forças resistentes de compressão dos perfis isolados, tal como a soma das forças resistentes desses perfis.

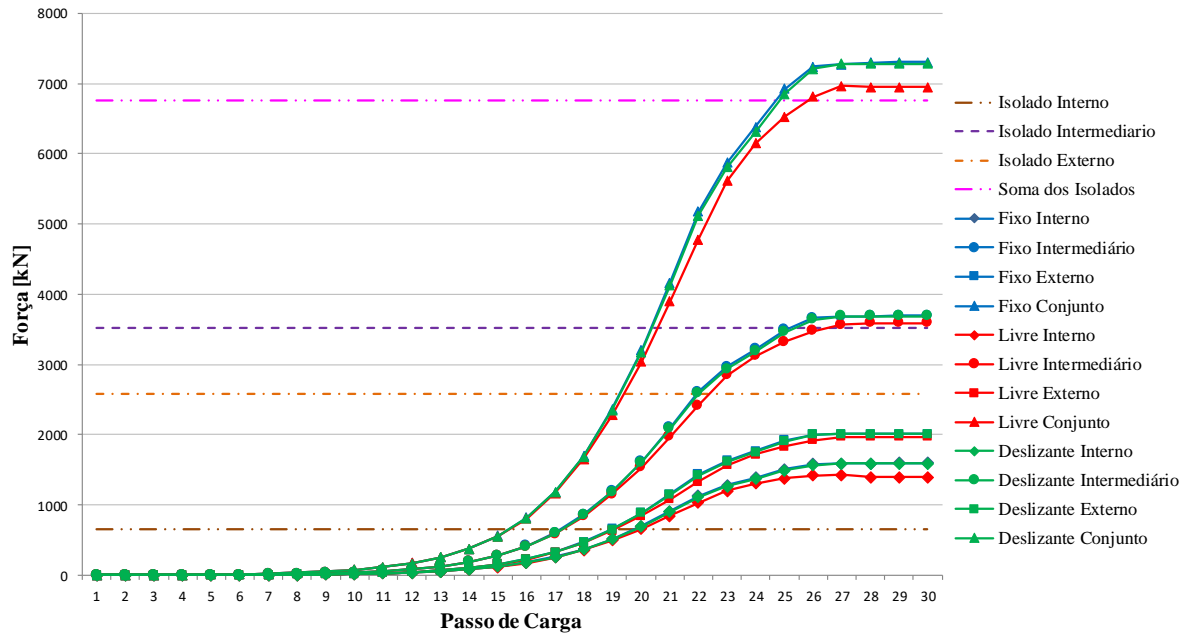


Figura 3.9. Força de compressão em cada perfil ($\lambda_0=1,07$ e $\lambda=80$) (GRILO, 2015)

Segundo Grilo (2015), os tubos internos, com travamentos fixos e deslizantes, suportam mais carga quando trabalham isoladamente. Isso se deve ao fato de que os tubos externo e intermediário estabilizam o tubo interno menos rígido, ampliando sua capacidade de resistência e compatibilizando os deslocamentos ao longo dos perfis. Assim, os travamentos (fixos e deslizantes) aumentam a capacidade resistente do conjunto quando comparada com a soma das capacidades dos tubos isolados.

Já no caso em que não há travamentos ao longo do comprimento do conjunto, os tubos não trabalham totalmente solidarizados. Como o tubo interno é menos rígido que os demais, é possível que a força última nele seja atingida antes. Essa condição faz com que a capacidade resistente do conjunto possa ser inferior à dos PTCCs com travamentos, podendo chegar, em algumas situações, a ser inferior à soma da capacidade resistente dos tubos isolados (GRILO, 2015).

3.6 Proposição de Procedimento de Cálculo

Os estudos de Grilo (2015) mostram que é viável dimensionar os perfis tubulares circulares concêntricos compostos por dois ou três tubos, fazendo uso de modelos numéricos via métodos dos elementos finitos. Entretanto, há um custo computacional elevado.

Dessa forma, o autor propôs uma simplificação dos cálculos para o dimensionamento dos PTCCs baseado na formulação da ABNT NBR 16239:2013, dispensando a utilização de recursos computacionais robustos.

Como os comportamentos dos PTCCs com travamentos fixo e deslizante são semelhantes ao comportamento de um perfil calculado com as propriedades geométricas equivalentes, os valores do momento de inércia (I_{eq}) e da área bruta da seção transversal ($A_{g,eq}$) do PTCC podem ser calculados conforme as equações a seguir:

$$I_{eq} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.6)$$

$$A_{g,eq} = A_{g,1} + A_{g,2} + A_{g,3} \quad (3.7)$$

onde I_1 , I_2 e I_3 são os momentos de inércia e $A_{g,1}$, $A_{g,2}$ e $A_{g,3}$ as áreas brutas de cada perfil isolado.

Em seguida, aplica-se a formulação apresentada pela norma ABNT NBR 16239:2013 para o dimensionamento dos PTCCs.

Para os PTCCs sem travamentos, o autor propôs uma forma de dimensioná-los através da relação entre a força axial de compressão resistente dos perfis isolados com a força resistente dos PTCCs, sem o uso de métodos computacionais. A formulação tem como base a envoltória inferior das curvas de redução dos PTCCs sem travamentos, como mostra a Figura 3.10, em que são traçadas as curvas de ρ versus a diferença entre χ_{soma} e χ_{Livre} . Os fatores χ_{soma} e χ_{Livre} são, respectivamente, a soma dos χ calculados para cada perfil isoladamente e o valor de χ calculado considerando o conjunto, a diferença entre eles é determinada pela Equação (3.8). Já o coeficiente ρ foi definido para relacionar os valores de χ de cada perfil isoladamente, conforme a Equação (3.9).

$$Diferença = 1 - \frac{\chi_{soma}}{\chi_{Livre}} \quad (3.8)$$

$$\rho = 1 - \frac{\chi_1}{\chi_2} \quad (3.9)$$

onde χ_1 e χ_2 , são respectivamente, o maior e o menor valor de χ para os perfis que compõem o PTCC, calculados isoladamente conforme a ABNT NBR 16239:2013.

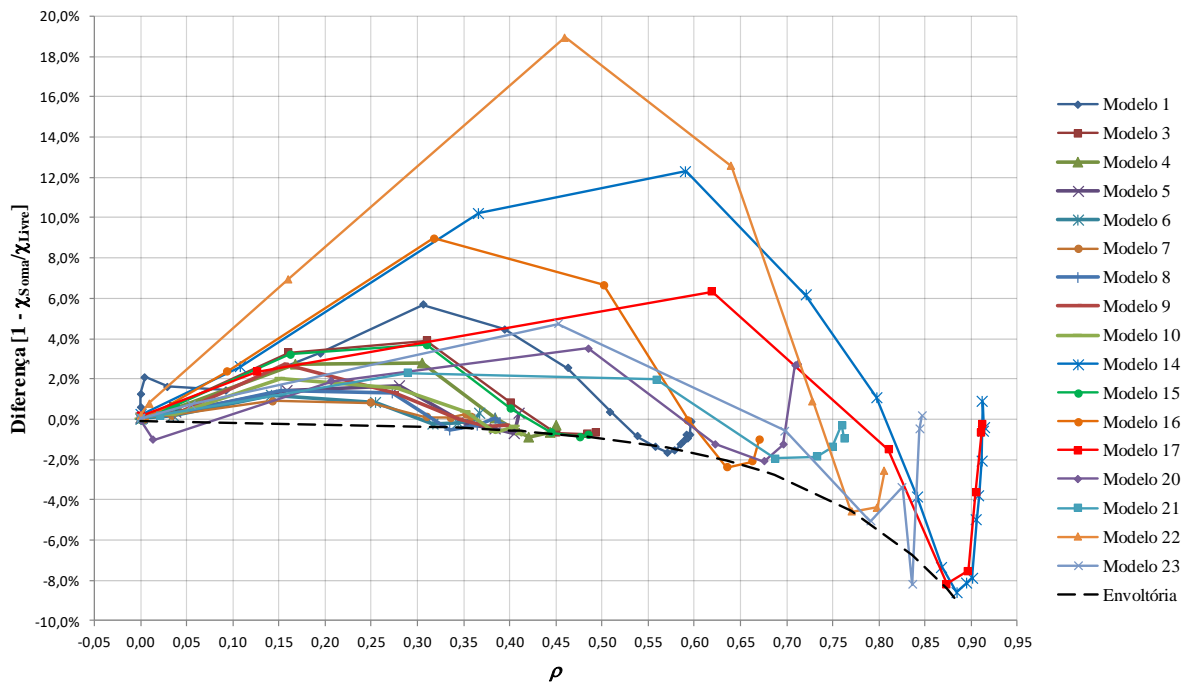


Figura 3.10. Curva de redução para PTCCs sem travamentos (GRILO, 2015)

Grilo (2015) observou que uma diferença negativa na curva significava que χ_{soma} é maior que χ_{Livre} , sendo necessário reduzir o valor de χ_{soma} para o dimensionamento do PTCC como medida de segurança. Quando a diferença é positiva, o valor de χ_{soma} utilizado no dimensionamento do PTCC despreza parte da força resistente advinda do trabalho conjunto dos perfis.

Diante disso, o autor determinou uma curva ajustada à envoltória inferior das curvas dos perfis, de modo que permitisse a redução de χ_{soma} . E, então, propôs a seguinte expressão para a determinação da força de compressão resistente nominal de PTCCs com dois tubos sem travamentos:

$$N_{c,Rk} = \frac{N_{c,Rk-1} + N_{c,Rk-2}}{\mu} \quad (3.10)$$

com

$$\mu = 1,00079 + 0,00043e^{6\rho} \quad (3.11)$$

onde $N_{c,Rk-1}$ e $N_{c,Rk-2}$ são as forças axiais de compressão resistentes dos perfis do PTCC, calculados isoladamente, com o mesmo comprimento do PTCC.

O autor não recomenda a utilização dessa expressão para valores de ρ acima de 0,88 devido ao caráter exponencial da curva. Ressalta também que esta despreza, em alguns casos, o ganho de resistência de 19% dos modelos analisados, sendo necessária uma análise mais detalhada.

Essa formulação não é válida para PTCCs com três tubos, para os quais o autor propõe um estudo numérico para que se obtenha a formulação.

4

ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Considerações Iniciais

O intuito deste capítulo é apresentar os procedimentos de ensaios realizados para se obter a força de compressão resistente de perfis tubulares circulares concêntricos compostos por dois e por três tubos.

Por se tratar de um estudo recente, não foram realizados ensaios com perfis tubulares circulares concêntricos de aço, como explicitado anteriormente. Assim, os ensaios foram desenvolvidos com base em conhecimento teórico e prático de ensaios de compressão axial já executados com outros perfis.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Esses ensaios têm por finalidade de propor e calibrar a curva de resistência à compressão de perfis tubulares circulares concêntricos por dois e três tubos com três tipos de travamentos diferentes: fixos, deslizantes e inexistentes.

Para essa investigação experimental, foram fabricados pela Brafer, na cidade do Rio de Janeiro, seis modelos de perfis tubulares circulares concêntricos, com os tubos produzidos pela Vallourec Tubos do Brasil.

4.2 Modelos

A fabricação dos modelos consistiu no uso de perfis tubulares sem costura com aço VMB 350, com valores nominais da resistência ao escoamento (f_y) e da resistência à ruptura do aço na tração (f_u) de 350 MPa e 485 MPa, respectivamente.

Os seis modelos foram separados em dois grupos, contendo três amostras cada, sendo o grupo A com perfis compostos por dois tubos e o outro B com perfis compostos por três tubos, conforme a Tabela 4.1, que apresenta, ainda, as dimensões dos tubos dos modelos, a área da seção transversal do conjunto (A), o comprimento (L), o parâmetro de esbeltez (λ) e a força de compressão resistente nominal de cada conjunto (N_{Rk}). O valor de λ foi obtido conforme a Equação (4.1), onde r é o raio de giração e I é o momento de inércia do conjunto. A força N_{Rk} foi calculada utilizando a Equação (2.8) (ver subitem 2.6) aplicando as propriedades equivalentes da seção transversal do PTCC como apresentado no subitem 3.6. O N_{Rk} foi obtido considerando o conjunto com travamento.

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad \therefore \quad r = \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1. Características dos modelos ensaiados.

Grupo	Diâmetro x Espessura dos Tubos da Composição			A (mm ²)	L (mm)	λ	N_{Rk} (kN)
	Interno (mm)	Intermediário (mm)	Externo (mm)				
A	73,0 x 3,6	-	114,3 x 4,5	2337	2500	72	625
B	73,0 x 3,6	114,3 x 4,5	141,3 x 5,0	4478	3600	86	980

Em cada grupo há três modelos, um sem travamentos (L), um com travamentos fixos (F) e um com travamentos deslizantes (D). Assim, os modelos são nomeados conforme seu grupo e o tipo de travamentos: A-L, A-F, A-D, B-L, B-F, B-D.

4.2 Imperfeições Geométricas

Para medir as imperfeições geométricas em perfis tubulares circulares, tem-se a dificuldade da geometria da seção transversal real ser axissimétrica, ou seja, a seção apresenta simetria em relação a um eixo, além de o modelo ser constituído por tubos internos. A solução adotada foi medir a distância entre a superfície do tubo até uma linha de *nylon* previamente tracionada, tomando como referência nas placas de base nas extremidades dos tubos, como mostra a Figura 4.1. Essa distância foi medida por meio de um paquímetro digital amparado por uma base magnética para garantir sua retilidade (Figura 4.2). Em relação aos tubos internos, foram executados pequenos furos (diâmetro de 6 mm) nas extremidades do modelo e na região central, sendo que estes já tinham sido executados para o posicionamento do DTs. Isto foi realizado de maneira que fosse possível a passagem da haste do paquímetro (Figura 4.3).



(a) Linha de *nylon* previamente tracionada posicionada no modelo. (b) Linha de *nylon* fixa na placa de base do modelo.

Figura 4.1. Posicionamento da linha de *nylon*



(a) Paquímetro digital – instrumento de medida.

(b) Base magnética para o apoio da haste do paquímetro.

Figura 4.2. Medida da distância entre a linha de *nylon* e a superfície do tubo.



(a) Furo no centro do PTCC.

(b) Furos executados em PTCC com três tubos.

Figura 4.3. Furos para medidas das imperfeições geométricas dos tubos internos do PTCC.

Essas medidas foram realizadas nos quatro lados da placa de base dos modelos, segundos os eixos $x-x'$ e $y-y'$ (Figura 4.4). Em cada lado, eram aferidas as distâncias da superfície do tubo à linha das duas extremidades (pontos A e B) e na região central (ponto C), conforme mostra o esquema da Figura 4.5.

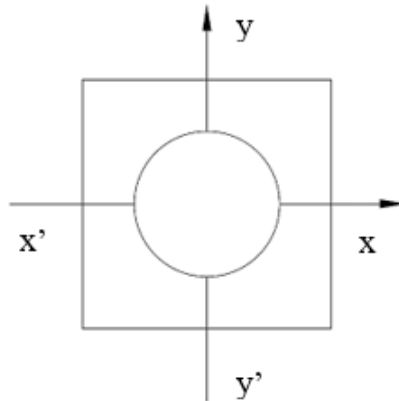


Figura 4.4. Eixos adotados no flange para as medidas da imperfeição geométrica.

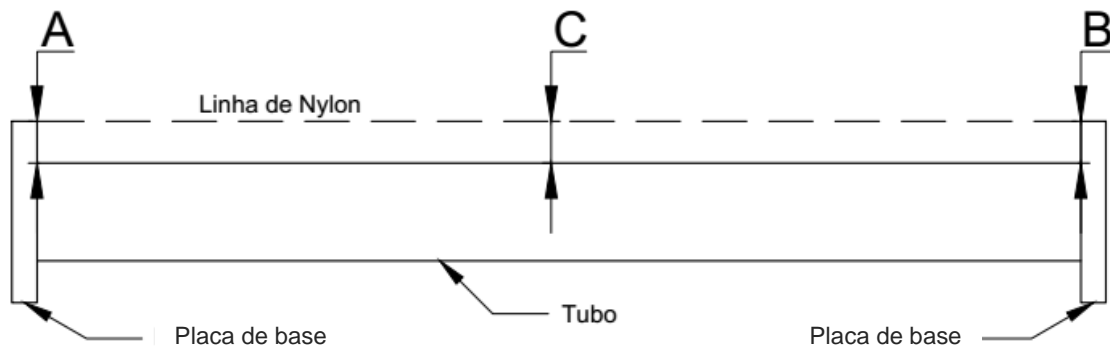


Figura 4.5. Pontos adotados para as medidas de distância nos modelos.

Para determinar a amplitude da imperfeição dos tubos, foi necessário obter a flecha inicial (δ), que é a distância entre a linha reta formada entre as extremidades do tubo com a superfície do tubo no seu ponto central. Nesse caso, utilizou-se o conceito de semelhança de triângulos para definir a flecha teórica (δ_T). Como a variação dessa distância não é linear, a flecha foi calculada pela diferença entre os pontos c' e a flecha teórica. O ponto c' é definido pela diferença entre o ponto C e o menor valor de distância encontrado nas extremidades.

Na Figura 4.6 é apresentado o desenho esquemático para o cálculo da flecha dos tubos, considerando a distância medida no ponto A menor que a medida no ponto B. Assim, na Figura

4.6.a, a curvatura do tubo é definida com o valor negativo e na Figura 4.6.b, com o valor positivo.

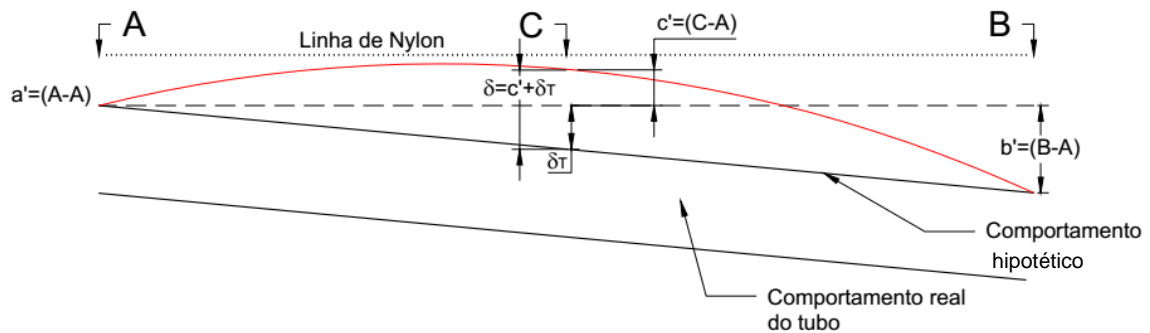
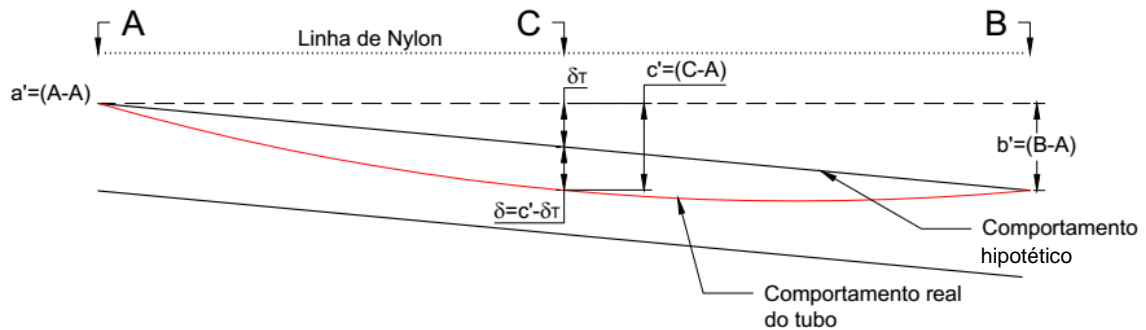


Figura 4.6. Esquemas para determinação da flecha dos tubos.

Os valores das flechas obtidos para cada lado dos tubos constituintes de cada modelo são apresentados na Tabela 4.2, juntamente com os valores da amplitude da imperfeição adotada para cada tubo.

Tabela 4.2. Valores das flechas e das amplitudes referentes a cada tubo do modelo.

Modelo	Eixo	Flecha (δ)			Amplitude			Amplitude Crítica		
		T. Externo	T. Intermed.	T. Interno	T. Externo	T. Intermed.	T. Interno	T. Externo	T. Intermed.	T. Interno
A-F	x	0,80	-	-0,14	L/3.112	-	L/17.857			
	x'	0,15	-	0,27	L/17.045	-	L/9.259	L/2.799	-	L/3.401
	y	-0,75	-	0,74	L/3.348	-	L/3.401			
	y'	0,89	-	-0,64	L/2.799	-	L/3.906			
A-D	x	0,22	-	1,26	L/11.194	-	L/1.976			
	x'	0,05	-	-1,25	L/46.875	-	L/2.000	L/6.198	-	L/751*
	y	0,37	-	-3,33	L/6.757	-	L/751			
	y'	0,40	-	3,11	L/6.198	-	L/805			
A-L	x	-0,39	-	-0,79	L/6.410	-	L/3151			
	x'	-0,27	-	1,33	L/9.375	-	L/1880	L/2.517	-	L/1.057
	y	-0,64	-	-2,10	L/3.886	-	L/1193			
	y'	0,99	-	2,37	L/2.517	-	L/1057			
B-F	x	-0,17	-0,38	-0,08	L/21.176	L/9.474	L/45.000			
	x'	1,25	0,60	-0,74	L/2.876	L/6.050	L/4.832	L/2.876	L/1.440	L/3.337
	y	0,72	-2,49	1,08	L/5.012	L/1.446	L/3.337			
	y'	0,13	2,50	-0,82	L/27.342	L/1.440	L/4.364			
B-D	x	-0,25	3,15	-0,35	L/14.694	L/1.143	L/10.286			
	x'	0,84	-2,53	-0,06	L/4.269	L/1.425	L/55.385	L/1.695	L/1.143	L/5.806
	y	2,12	0,07	0,62	L/1.695	L/49.091	L/5.822			
	y'	0,39	2,52	-0,62	L/9.153	L/1.430	L/5.806			
B-L	x	-0,67	0,25	-0,48	L/5.387	L/14.305	L/7.448			
	x'	2,31	0,26	0,49	L/1.557	L/13.846	L/7.423	L/1.557	L/10.141	L/7.423
	y	-0,18	-0,36	0,23	L/20.000	L/10.141	L/16.000			
	y'	1,34	-0,09	-0,23	L/2.697	L/39.273	L/16.000			

Observa-se que os valores encontrados são, de modo geral, bastante inferiores a $L/1.000$, adotado por Grilo (2015) conforme a ABNT NBR 16239:2013. Somente um valor, destacados com asterisco (*), é superior a $L/1.000$.

Pode-se observar, ainda, que o sentido das curvaturas iniciais consideradas críticas (maior valor da flecha) em cada tubo da composição dos modelos do grupo B diverge (a curvatura de todos os tubos desse grupo não foi posicionada no mesmo sentido durante a fabricação). Já os modelos do grupo A tiveram as curvaturas iniciais de todos os tubos no mesmo sentido (y-y').

4.3 Dimensões da Seção Transversal

As dimensões das seções transversais dos tubos que compõem cada modelo foram medidas após os ensaios, utilizando paquímetro; para isso, foram executados cortes nos modelos.

Os cortes foram executados em quatro pontos, dois próximos aos flanges e os outros antes da região central do modelo, como mostra a Figura 4.7. Para tal, utilizou-se uma serra elétrica com disco de corte adequado para aço (Figura 4.8). Tomou-se o cuidado para que os cortes não fossem realizados sobre os travamentos nos modelos, de modo que fosse possível visualizar o estado e a execução desses travamentos.

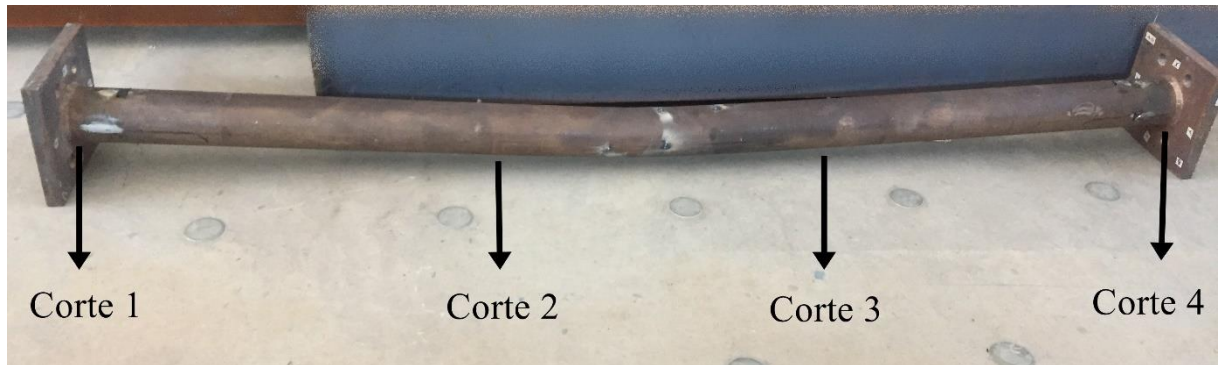


Figura 4.7. Pontos de cortes nos modelos.



Figura 4.8. Execução dos cortes com serra elétrica.

Os modelos foram seccionados em três partes como mostra a Figura 4.9. A seção 2 representa a região central na qual houve maior deformação devido à carga de compressão axial e não foi utilizada para medidas. As seções 1 e 3 encontravam-se próximas das placas de base, sendo que a seção 3 era a região adjacente à placa de aplicação da carga.



Figura 4.9. Nomeação das seções dos modelos.

Após os cortes, como pode ser visto na Figura 4.10, as seções e os flanges eram lixados nos pontos dos cortes e nos pontos das medidas. As medidas foram realizadas nas placas de base e nas extremidades das seções 1 e 3 de cada tubo. Para tal, as partes cortadas foram posicionados em um cavalete (Figura 4.11) e suas extremidades nomeadas de A e B. Em cada tubo, eram aferidos, através de quatro posições diferentes, na seção da transversal, o diâmetro externo (d_e) e a espessura (t), além da distância entre os tubos, como apresentado na Figura 4.12. O mesmo procedimento foi realizado para as placas de base.



Figura 4.10. Modelo A-L cortado e lixado.



Figura 4.11. Corte posicionado no cavalete.

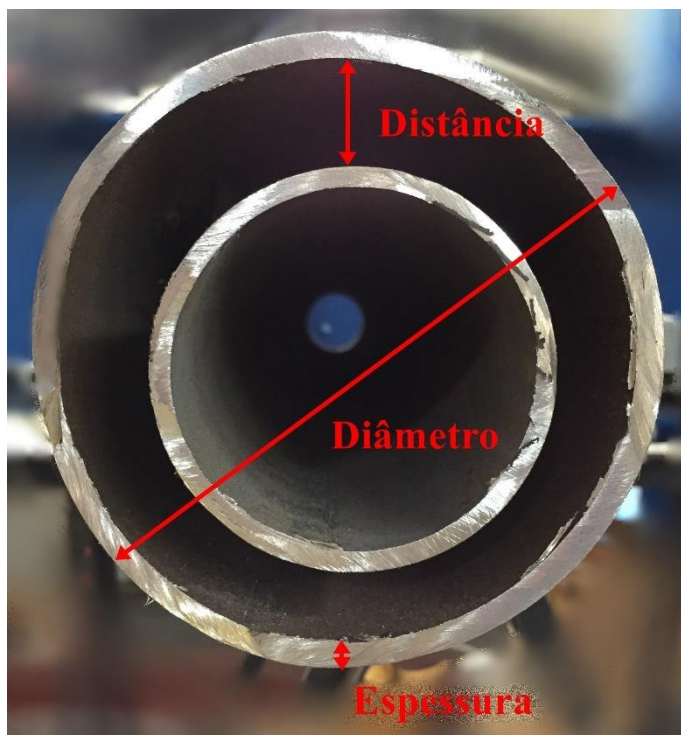


Figura 4.12. Dimensões aferidas na seção transversal dos modelos.

Na Tabela 4.3, conforme as Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados os valores médios resultantes das medidas das dimensões (d_e e t) da seção transversal de cada modelo, além dos valores das áreas (A), tanto de cada tubo quanto do conjunto, e do comprimento (L). Os valores do comprimento foram obtidos pela média das medidas de quatro pontos nos modelos antes da execução dos ensaios de carga centrada.

Tabela 4.3. Dimensões da seção transversal dos modelos.

Modelo	Diâmetro Externo			Espessura			Diâmetro Interno			Área				L
	$d_{e,1}$	$d_{e,2}$	$d_{e,3}$	t_1	t_2	t_3	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	$d_{i,3}$	A_1	A_2	A_3	A_c	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	
A-F	73,5	-	114,6	3,7	-	4,5	66,1	-	105,5	811,0	-	1.566,4	2.377,4	2.501,0
A-D	73,6	-	114,8	3,6	-	4,5	66,4	-	105,8	788,6	-	1.562,8	2.351,4	2.502,0
A-L	73,6	-	114,9	3,9	-	4,6	65,8	-	105,7	854,1	-	1.583,6	2.437,8	2.499,5
B-F	73,5	114,7	141,8	3,6	4,5	5,0	66,3	105,7	131,7	793,5	1.557,3	2.166,6	4.517,4	3.599,3
B-D	73,6	114,8	141,7	3,7	4,5	5,1	66,2	105,7	131,5	820,1	1.565,0	2.186,9	4.572,0	3.600,0
B-L	73,5	114,8	141,9	3,6	4,5	5,2	66,3	105,8	131,4	790,7	1.555,5	2.240,2	4.586,4	3.602,5

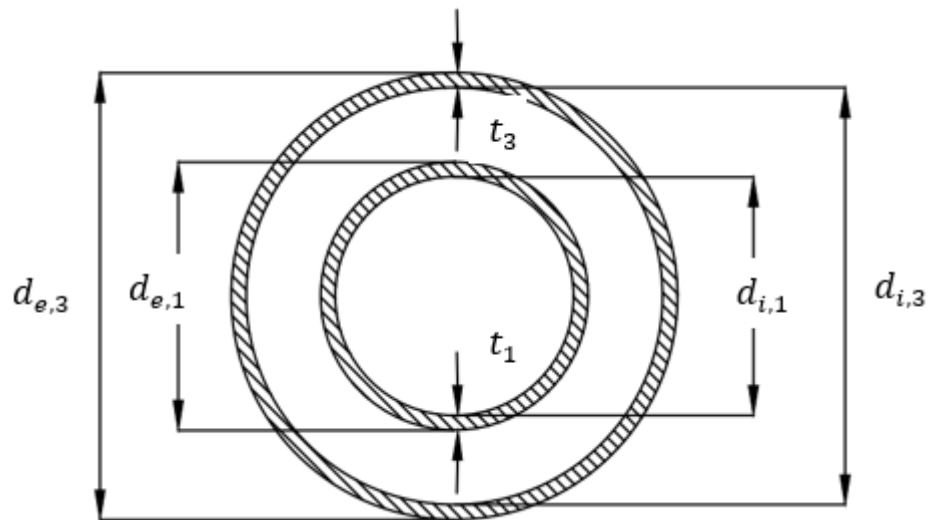


Figura 4.13. Dimensões da seção transversal de PTCCs com dois tubos.

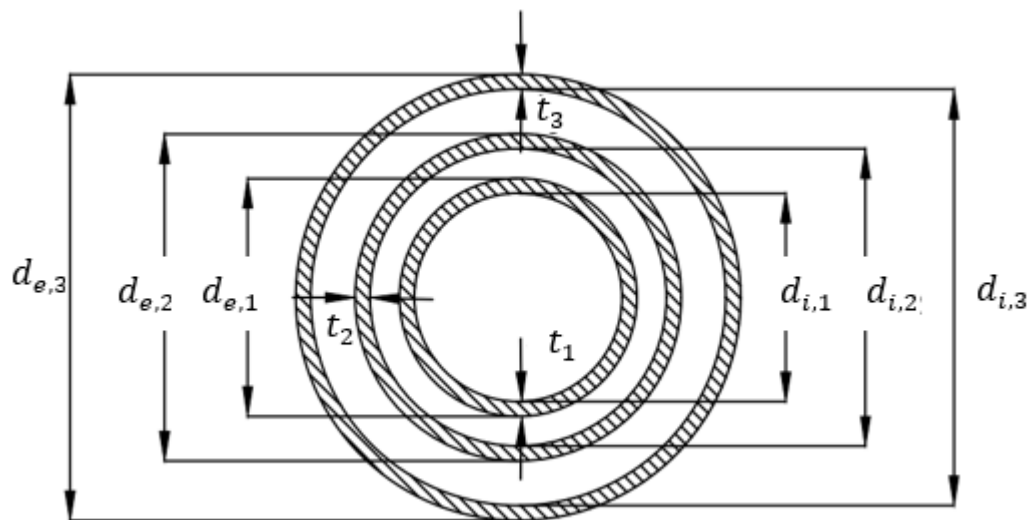


Figura 4.14. Dimensões da seção transversal de PTCCs com três tubos.

Observa-se que a diferença entre os valores médios medidos e os valores nominais dos diâmetros externos estão de acordo com a tolerância estabelecida (ver Tabela 1.1), inferiores a $\pm 1\%$. As espessuras também diferiram pouco dos valores nominais, com erro máximo de 8%. (Figura 4.4), possibilitando determinar o centro de cada tubo em relação ao tubo externo. Os valores médios dessas distâncias, como mostrado nas Figuras 4.15 e 4.16, e os centros dos tubos são apresentados na Tabela 4.4, onde os tubos são denominados por números, tubo interno (1), tubo intermediário (2) e tubo externo (3).

Tabela 4.4. Valores médios das distâncias entre os tubos e seus centros.

Modelos	Eixo	Distância entre os tubos			Centro dos tubos em relação ao tubo externo		
		(1)-(2)	(1)-(3)	(2)-(3)	c_1	c_2	c_3
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
A-F	x	-	15,7	-	0,3	-	0,0
	x'	-	16,6	-	-	-	-
	y	-	17,2	-	-1,2	-	0,0
	y'	-	15,4	-	-	-	-
A-D	x	-	16,3	-	-0,2	-	0,0
	x'	-	16,2	-	-	-	-
	y	-	16,2	-	-0,1	-	0,0
	y'	-	16,0	-	-	-	-
A-L	x	-	16,4	-	-0,4	-	0,0
	x'	-	16,1	-	-	-	-
	y	-	17,2	-	-1,2	-	0,0
	y'	-	14,7	-	-	-	-
B-F	x	17,3	-	10,5	-3,1	-2,0	0,0
	x'	14,8	-	6,3	-	-	-
	y	18,9	-	5,3	1,0	3,2	0,0
	y'	13,9	-	9,9	-	-	-
B-D	x	14,1	-	9,1	1,2	-0,8	0,0
	x'	16,8	-	7,6	-	-	-
	y	14,5	-	7,2	2,8	1,2	0,0
	y'	16,6	-	9,5	-	-	-
B-L	x	14,2	-	9,4	0,9	-1,1	0,0
	x'	17,0	-	6,1	-	-	-
	Y	14,7	-	8,4	1,4	-0,1	0,0
	y'	16,6	-	7,8	-	-	-

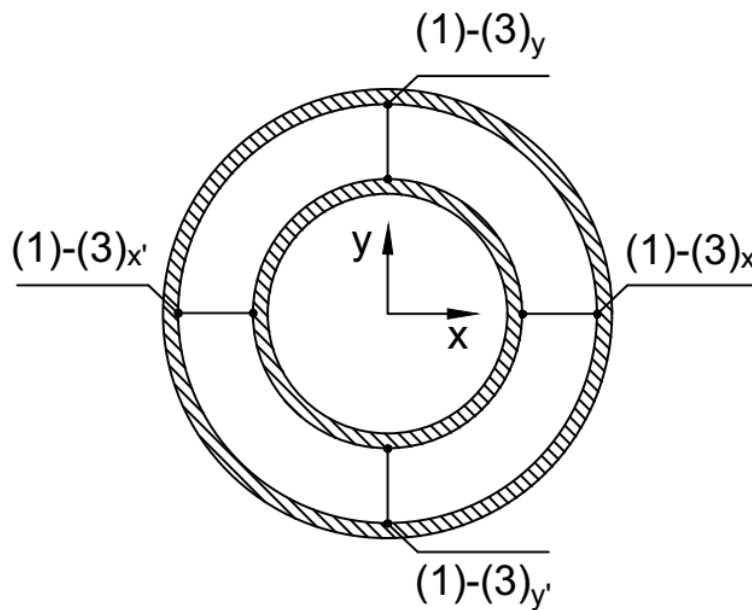


Figura 4.15. Distâncias entre os tubos para PTCCs com dois tubos.

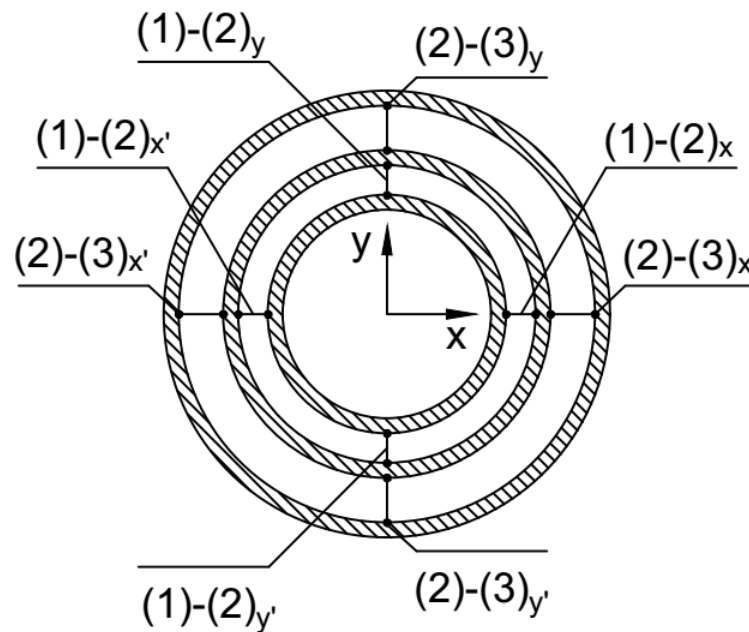
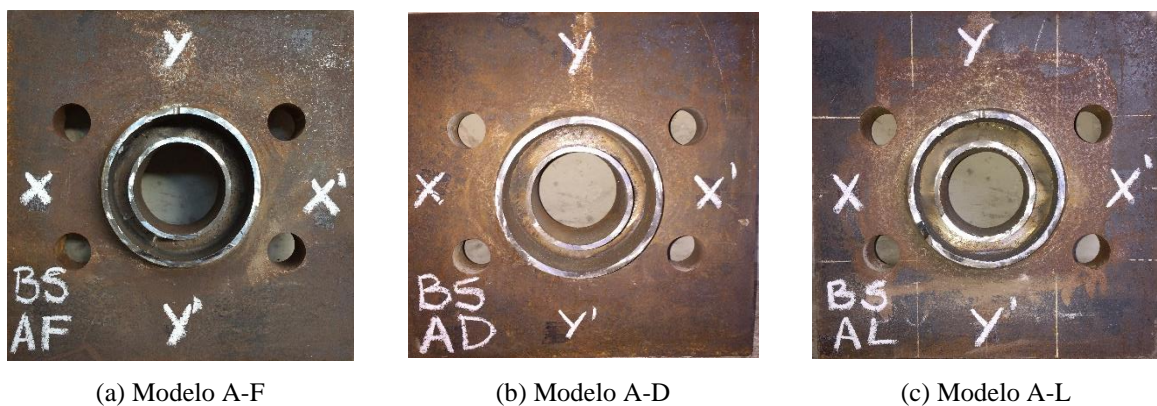


Figura 4.16. Distâncias entre os tubos para PTCCs com três tubos.

Pode ser visto que os tubos no conjunto não estavam centrados, posto que, nos tubos mais próximos, havia maior descentralização, como no caso dos tubos intermediários em relação aos tubos externos, (2)-(3). Entretanto, o modelo A-D apresentou-se mais uniforme e centrado. Essa descentralização pode ser melhor visualizada nos cortes das placas de base superiores, nos quais foram aplicadas as cargas, como mostram as Figuras 4.17 e 4.18, (os eixos dessas placas estão espelhados com relação à placa inferior de referência).



(a) Modelo A-F

(b) Modelo A-D

(c) Modelo A-L

Figura 4.17. Placa de base superior dos modelos do grupo A.



(a) Modelo B-F

(b) Modelo B-D

(c) Modelo B-L

Figura 4.18. Placa de base superior dos modelos do grupo B.

4.4 Propriedades do Material

Os ensaios de caracterização do aço consistem em submeter um corpo de prova, retirado dos tubos, à tração axial a fim de se determinar as resistências ao escoamento e à ruptura do aço. As dimensões dos corpos de prova e o procedimento dos ensaios são estabelecidos pela norma ABNT NBR 6152:2002.

Os resultados da caracterização do aço dos tubos dos PTCCs foram obtidos através do relatório de inspeção fornecido pela Vallourec Tubos do Brasil, conforme Apêndice A. Os corpos de prova foram extraídos em tiras longitudinais e usinados. Os ensaios foram executados em temperatura ambiente. Na Tabela 4.5, encontram-se os valores da resistência ao escoamento (f_y), resistência à ruptura (f_u), alongamento e as dimensões do corpo de prova referentes aos tubos componentes dos modelos. O valor de L_0 é o comprimento de medida original do corpo de prova e Δ indica o percentual de diferença em relação aos valores nominais.

Tabela 4.5. Valores referentes ao ensaio de tração.

Tubo	Peças	Dimensões do Corpo de Prova			f_y		f_u		Alongamento
		L_0	Largura	Área	Δ	Δ			
		(mm)	(mm)	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	
73,0x3,6	8	50,0	19,1	95,1	450	29%	539	11%	36
114,3x4,5	8	50,0	25,4	122,8	435	24%	572	18%	34
141,3x5,0	12	50,0	25,4	125,9	411	17%	549	13%	38

Os valores de f_y e f_u , como sempre ocorre, variaram, sempre para mais, em relação aos valores nominais, por isso a importância desses ensaios. Observa-se que os valores de f_y apresentaram as maiores diferenças, que chegaram próximas a 30%.

4.4 Dispositivos de Ensaio e Instrumentação

Para execução dos ensaios, utilizou-se um pórtico que suporta o atuador hidráulico responsável pela aplicação da força centrada de compressão no modelo, como pode ser observado nas Figuras 4.19 e 4.20. Os modelos foram fixados em suas bases por rótulas semiesféricas, que configuram um sistema birrotulado.

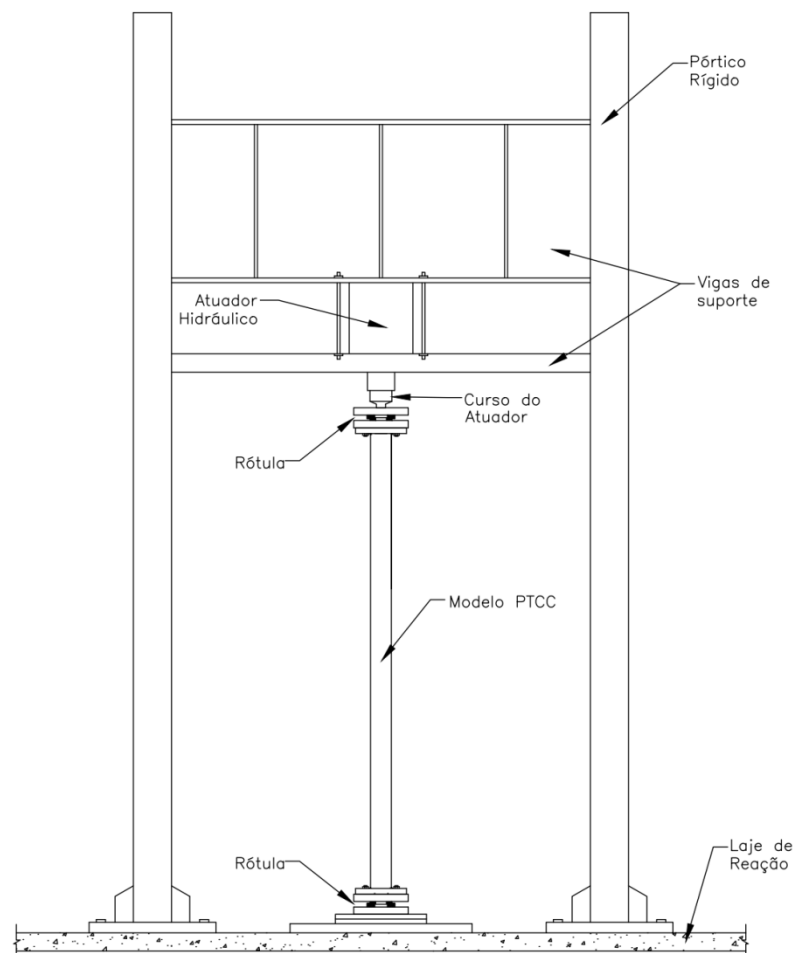


Figura 4.19. Esquema do pórtico para o ensaio de carga centrada.



Figura 4.20. Pórtico utilizado para execução dos ensaios.

A carga foi aplicada nos modelos por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 2.000 kN e pressão máxima de trabalho de 700 bar (Figura 4.21). O curso do atuador era fixo à chapa constituinte da rótula semiesférica, que, por sua vez, estava fixa aos modelos, transmitindo, assim, a estes, a carga.



Figura 4.21. Rótula fixa no atuador.

A rótula semiesférica é constituída por duas chapas metálicas, que servem de apoio, e entre elas há uma rótula, como mostram as Figuras 4.22 e 4.23. A rótula propriamente dita é formada por duas superfícies que se acoplam, uma com o formato côncavo e a outra com o formato convexo, permitindo movimentos circulares. Assim, ela permite somente a rotação das extremidades do modelo, mas impede o seu deslocamento lateral e axial. As chapas de apoio servem para a fixação das extremidades do modelo tal como o curso do atuador (Figuras 4.24 e 4.25). Nesse caso, os modelos foram fabricados com bases (flanges) apropriadas para essa rótula.

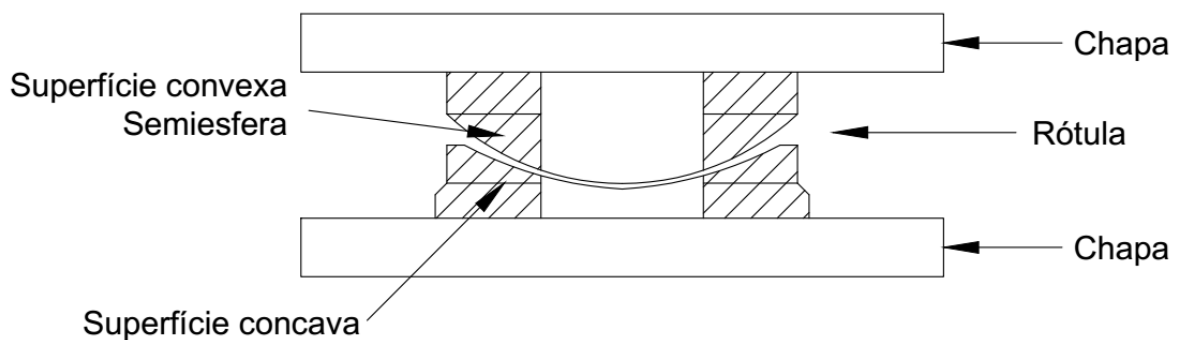


Figura 4.22. Esquema da rótula semiesférica.



Figura 4.23. Rótula semiesférica em detalhe.

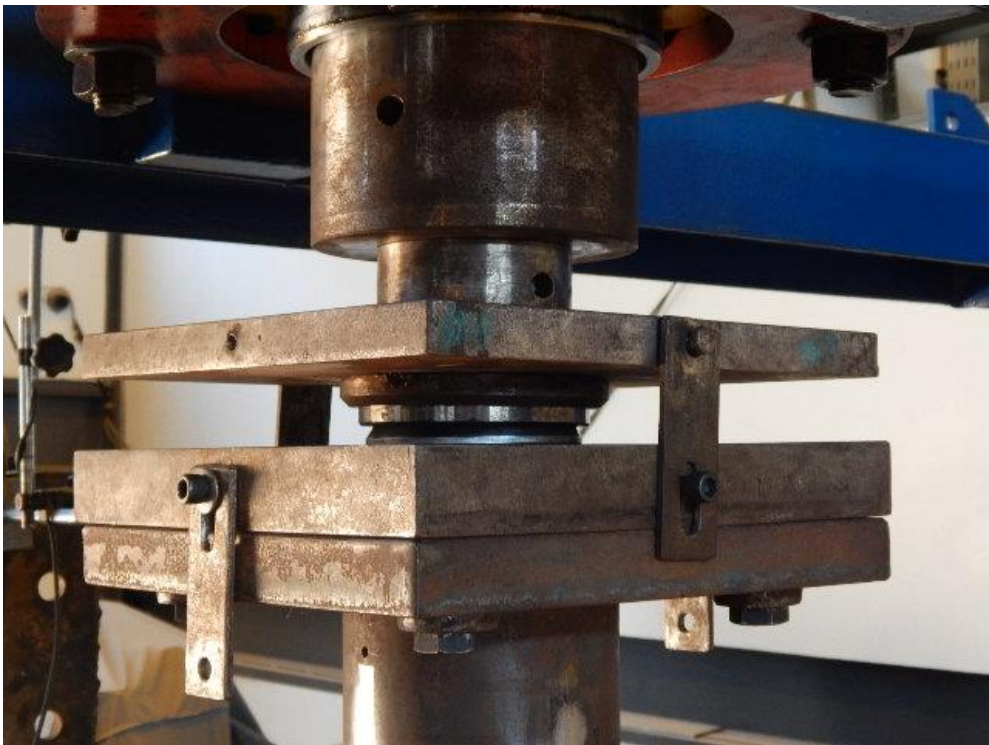


Figura 4.24. Rótula semiesférica fixada ao cilindro do atuador.



Figura 4.25. Base do modelo fixada à rótula semiesférica.

Nos ensaios, as medidas dos deslocamentos laterais na região central dos modelos foram obtidas através de transdutores de deslocamentos (DTs), baseados na tecnologia LVDT (*linear variable differential transformer*). Como a seção transversal é circular, há inúmeras possibilidades de direção que o deslocamento lateral pode assumir quando o perfil é solicitado. Portanto, houve a necessidade de se estudar uma forma de posicionar os DTs de maneira que se pudessem medir os deslocamentos em qualquer direção, para os tubos interno, intermediário e externo. As seguintes configurações foram adotadas:

- **tubo externo:** utilizou-se dois DTs apoiados em uma coluna metálica fixa, com os seus cursores posicionados sobre chapas soldadas no modelo, posicionados a 90° um do outro, como mostra a Figura 4.26. Essas chapas visam garantir que os cursores dos DTs não percam a base de medidas dos deslocamentos laterais no tubo;
- **tubos intermediário e interno:** empregou-se dois DTs apoiados sobre o tubo externo, posicionados nos furos a 0° e 90° feitos no próprio tubo externo (Figura 4.27). Esse posicionamento dos DTs permite um maior grau de acerto sobre a direção do deslocamento do tubo por dois pontos medidos. Esse deslocamento foi subtraído do deslocamento do tubo externo para se obter o deslocamento efetivo.



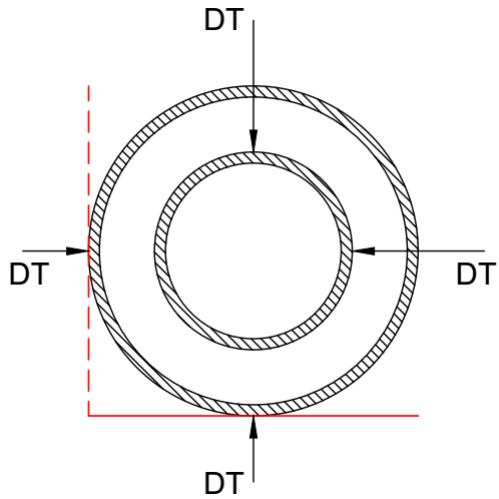
Figura 4.26. Chapas soldadas ao tubo externo.



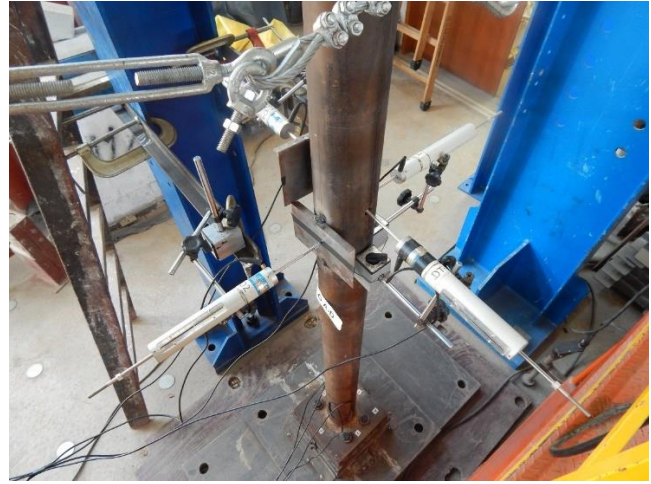
Figura 4.27. DT posicionado no tubo interno.

Nas Figuras 4.28 e 4.29, são apresentados os esquemas e as configurações das disposições dos DTs nos modelos de PTCCs, conforme a quantidade de tubos na sua composição. Para os

modelos do grupo B com três tubos, alguns DTs foram posicionados um sobre o outro, como mostra a Figura 4.30.

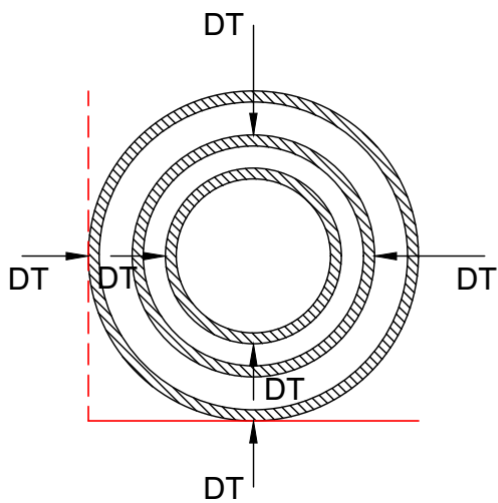


(a) Esquema dos DTs com dois tubos



(b) Posicionamento dos DTs no modelo

Figura 4.28. Posicionamento dos DTs nos modelos do grupo A.



(a) Esquema dos DTs com três tubos



(b) Posicionamento dos DTs no modelo

Figura 4.29. Posicionamento dos DTs nos modelos do grupo B.



Figura 4.30. Detalhe do posicionamento dos DTs nos modelos do grupo B.

Para o monitoramento da movimentação do pórtico, foram utilizados dois DTs posicionados na viga de apoio e em um pilar do pórtico, de modo que se pudessem obter os deslocamentos horizontais, como mostram as Figuras 4.31 e 4.32.



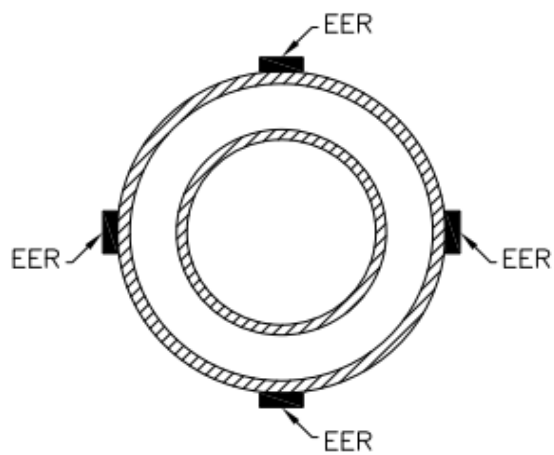
Figura 4.31. DT posicionado na viga de apoio do pórtico.



Figura 4.32. DT posicionado no pilar do pórtico.

As leituras das deformações foram determinadas por meio de extensômetros elétricos de resistência (EERs), ligados a três cabos condutores, sendo dois deles conectados a um fio condutor. Foram utilizados EER do tipo uniaxial, dispostos nas direções longitudinais, posicionados nas extremidades dos perfis nas proximidades das bases. Além de medir as deformações, os EERs também serviram para monitorar o alinhamento do pilar no início do carregamento, onde os quatro EERs posicionados na mesma seção deviam apresentar valores próximos entre si nas etapas iniciais. As disposições dos EERs são apresentadas nas Figuras 4.33 e 4.32, conforme as considerações a seguir:

- **grupo A (perfis compostos por dois tubos):** as deformações foram medidas através de quatro EERs posicionados em cada extremidade do tubo externo (totalizando oito EERs);
- **grupo B (perfis compostos por três tubos):** as deformações foram medidas através de quatro EERs posicionados em cada extremidade do tubo externo (totalizando oito EERs) e outros dois EERs posicionados em cada extremidade do tubo intermediário (totalizando quatro EERs).

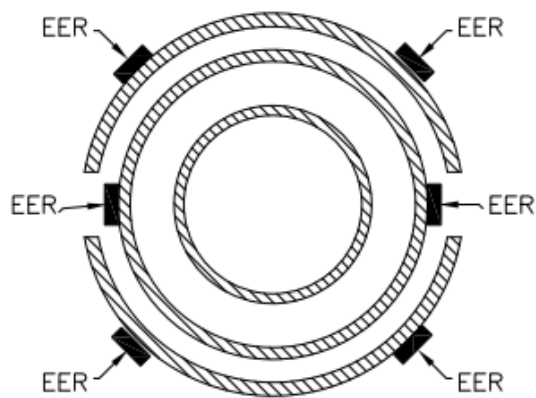


(a) Esquema dos EER nos modelos com dois tubos



(b) EERs fixos nos modelos com dois tubos

Figura 4.33. Posicionamento dos EERs nos modelos do grupo A.



(a) Esquema dos EER nos modelos com três tubos



(b) EERs fixos nos modelos com três tubos

Figura 4.34. Posicionamento dos EERs nos modelos do grupo B.

Os tubos externos dos modelos foram fabricados com os devidos furos e aberturas previstos para permitir o posicionamento dos DTs e dos EERs nos tubos internos dos modelos.

Um sistema de aquisição de dados Spider 8-600 Hz, modelo SR 30, foi utilizado para coletar os dados dos dispositivos citados, com o *software* Catman 4.5. Cada sistema de aquisição de dados possui 8 canais, tendo sido utilizados 3 módulos acoplados, resultando em até 24 canais simultâneos.

5

RESULTADOS DAS ANÁLISES EXPERIMENTAIS

5.1 Considerações Iniciais

A análise experimental efetuada neste trabalho visou verificar o comportamento estrutural dos perfis tubulares circulares concêntricos por dois e por três tubos quando submetidos à força axial de compressão, de modo a avaliar seus deslocamentos e sua capacidade resistente para garantir seu correto dimensionamento. Nesse contexto, é fundamental compreender os resultados obtidos na análise experimental através de gráficos e tabelas, além das deformações apresentadas nos modelos.

Nos ensaios, foram determinadas as forças últimas juntamente com os deslocamentos transversais no centro dos perfis. Além disso, os resultados das deformações em cada tubo forneceram valores para obtenção da força atuante em cada um.

5.2 Análise das Interligações entre os Perfis

O corte dos perfis após os ensaios possibilitou visualizar a integridade das interligações ao longo dos modelos. Nas Figuras 5.1 e 5.2, podem ser observados os travamentos fixos e deslizantes dos modelos com dois e três tubos.

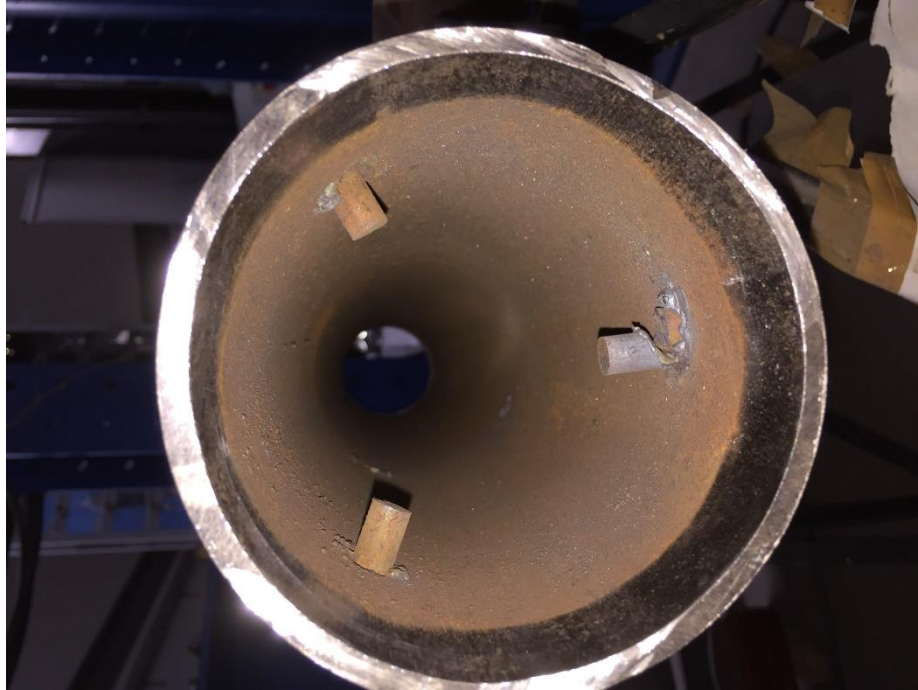


(a) Chapas fixas aos tubos interno e externo.

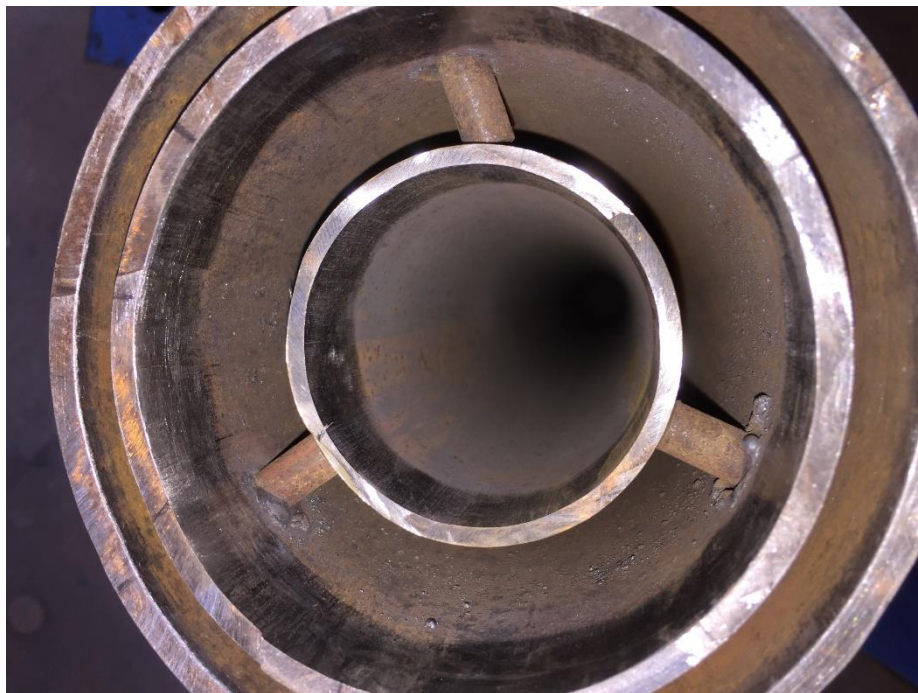


(b) Detalhe do travamento fixo para o modelo com três tubos.

Figura 5.1. Travamentos fixos nos modelos ensaiados.



(a) Pinos fixos no tubo externo.



(b) Pinos fixo ao tubo intermediário travando o tubo interno.

Figura 5.2. Travamentos deslizantes nos modelos ensaiados.

Pode ser visto que os travamentos foram executados conforme os procedimentos descritos no subitem 4.2. Os pinos foram transpassados e soldados nos tubos externo e intermediário como previsto (Figura 5.2.b). Para os modelos com travamentos fixos, as chapas foram soldadas nos tubos interno e externo conforme o projeto (Figura 5.1.a), porém, para o modelo com três tubos

(Modelo B-F), os travamentos entre os tubos interno e intermediário não foram executados, como pode ser verificado na Figura 5.3.



Figura 5.3. Detalhe da chapa soldada no tubo interno do modelo B-F.

Pode-se perceber que a solda entre a chapa e o tubo intermediário não foi executada, deixando o tubo interno livre. Entretanto, esse detalhe não comprometeu o comportamento total do PTCC

5.3 Análise das Imperfeições Geométricas

A instabilidade global dos PTCCs comprimidos se caracteriza pela curvatura da peça devido aos deslocamentos transversais acentuados, avaliados com base na sua seção central transversal. A imperfeição inicial define para qual sentido se movimentará o modelo.

Entretanto, como os PTCCs possuem mais de um perfil em sua composição, as imperfeições iniciais de cada perfil podem apresentar sentidos diferentes, até diametralmente opostos. Isso afeta o comportamento do conjunto, sendo importante, portanto, analisar essas imperfeições juntamente com os deslocamentos laterais medidos nos ensaios.

Na Figura 5.4 são mostradas as configurações deformadas dos modelos do grupo A logo após o colapso, antes do descarregamento. As curvaturas dos modelos A-F e A-L foram diagonais em relação ao flange no sentido dos eixos $x'-y'$ (ver Figura 4.17). Já o modelo A-D apresentou curvatura na diagonal em relação ao flange no sentido dos eixos $x-y'$.



Figura 5.4. Configurações de deformadas dos modelos do grupo A.

Para os modelos do grupo B, as configurações deformadas para os modelos B-F e B-L foram diagonais em relação ao flange no sentido dos eixos $x-y'$ e para o modelo B-D no sentido do eixo $y-y'$, como apresenta a Figura 5.5 (ver Figura 4.18).



(a) Modelo B-F.

(b) Modelo B-D.

(c) Modelo B-L.

Figura 5.5. Configurações de deformadas dos modelos do grupo B.

Na Tabela 5.1, é apresentada a comparação entre a previsão do sentido da curvatura da deformada com base na curvatura inicial medida e pela obtida no ensaio. Os sentidos estão relacionados com os eixos indicados nos flanges (ver Figuras 4.17 e 4.18). Para determinar os sentidos previstos, foram utilizados os valores críticos medidos para cada tubo, de acordo com a Tabela 4.2 do subitem 4.2.

Tabela 5.1. Sentidos das curvaturas na configuração deformada.

Modelos	Previsão baseado na Imperfeição Inicial			Ensaio
	T. Externo	T. Intermediário	T. Interno	Conjunto
A-F	x-y'	-	x'-y	x'-y'
A-D	x-y'	-	x-y'	x-y'
A-L	y-y'	-	x'-y'	x'-y'
B-F	x'-y	x'-y'	y-y'	x-y'
B-D	x'-y	x-y'	y-y'	y-y'
B-L	x'-y'	x-x'	x'-y	x-y'

Observa-se que, nos modelos do grupo A, o sentido da curvatura da deformada foi determinado pela curvatura inicial dos tubos internos, exceto pelo modelo A-D, o qual os dois tubos tinham curvatura no mesmo sentido. Já para os modelos do grupo B, os tubos intermediários tiveram

maior influência na forma da deformada, porém não se consegue definir com precisão qual dos tubos rege a curvatura final da deformada.

5.4 Análise do Ensaio de Compressão

Na Tabela 5.2, são mostrados os resultados dos ensaios de compressão com os valores de forças última (força última experimental). Nessa tabela encontram-se também as forças última teóricas determinadas conforme o procedimento apresentado no subitem 3.6, exceto para o modelo com três tubos sem travamentos (modelo B-L), para o qual não há uma formulação elaborada.

Tabela 5.2. Resultados dos ensaios.

Modelo	Tipo de Travamento	Força Última Teórica - Grilo (2015)	Força Última Experimental	Diferença	
		$N_{u,Teo}$ (kN)	$N_{u,Exp}$ (kN)	$1 - \frac{N_{u,Exp}}{N_{u,Teo}}$	$1 - \frac{N_{u,Exp}}{N_{u,Exp}^{Fixo}}$
A-F	Fixos	625	794	-0,270	-
A-D	Deslizantes	625	706	-0,130	0,111
A-L	Sem Travamentos	588	792	-0,347	0,003
B-F	Fixos	980	1080	-0,102	0,063
B-D	Deslizantes	980	1153	-0,177	-
B-L	Sem Travamentos	-	1108	-	0,039

A centralização do carregamento inicial nos ensaios foi verificada por meio de oito extensômetros instalados nas extremidades da seção do tubo externo (quatro em cada extremidade), de modo que esses quatro apresentassem valores semelhantes entre si.

Podem ser vistos nas Figuras 5.6 e 5.7, referentes respectivamente aos tubos interno e externo dos modelos do grupo A, como também nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, referentes, respectivamente, aos tubos interno, intermediário e externo dos modelos do grupo B, as respostas dos ensaios em termos de força total *versus* deslocamento transversal em cada tubo. O início da instabilidade global dos modelos foi detectado através dos DTs, instalados para medir os deslocamentos transversais da seção central dos tubos da composição, quando esses deslocamentos apresentavam uma grande variação para um pequeno intervalo de força. A força na qual se detecta a instabilidade do modelo é dita força última, sendo, portanto, a força máxima que o perfil resiste antes do seu colapso.

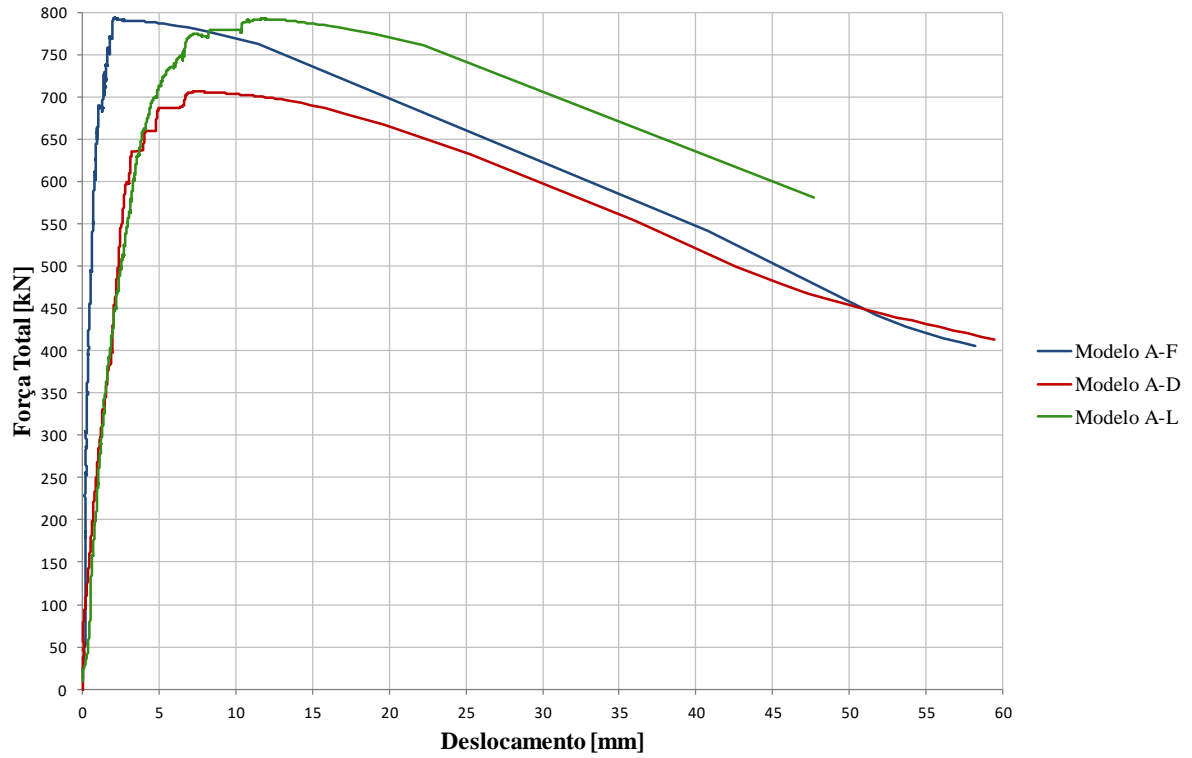


Figura 5.6. Gráfico força *versus* deslocamento referente ao tubo interno dos modelos do grupo A.

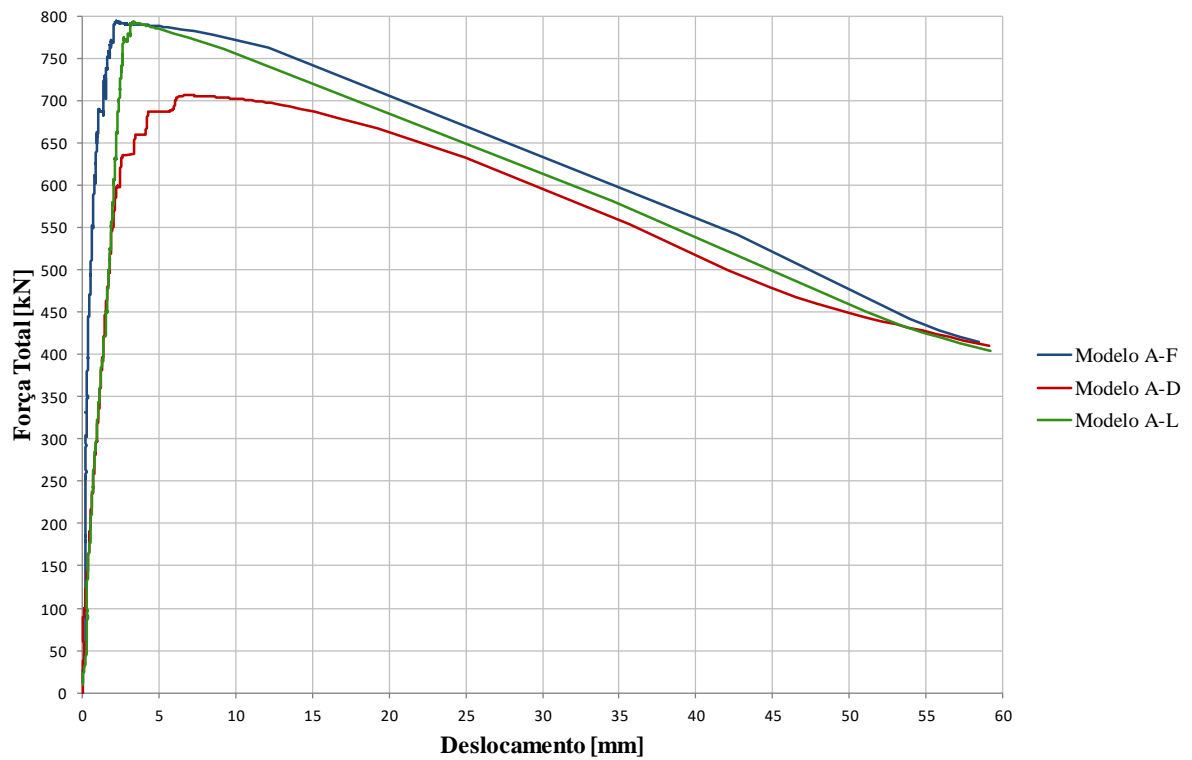


Figura 5.7. Gráfico força *versus* deslocamento referente ao tubo externo dos modelos do grupo A.

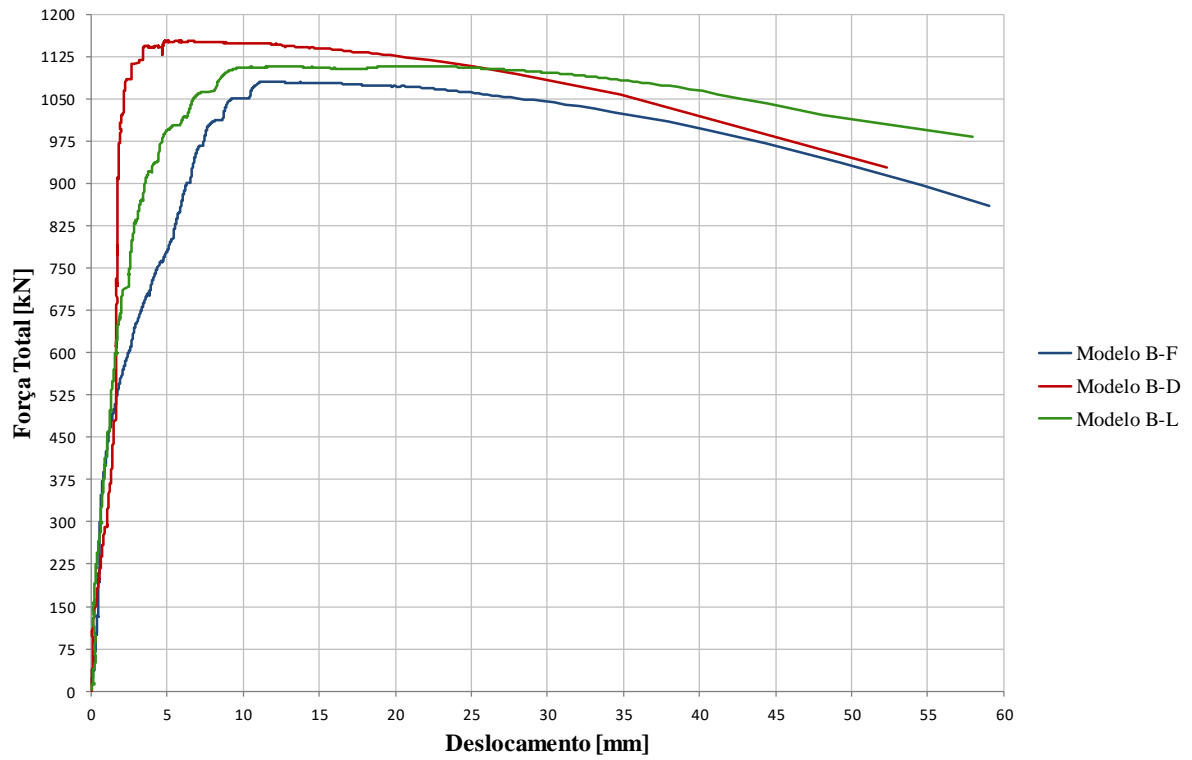


Figura 5.8. Gráfico força *versus* deslocamento referente ao tubo interno dos modelos do grupo B.

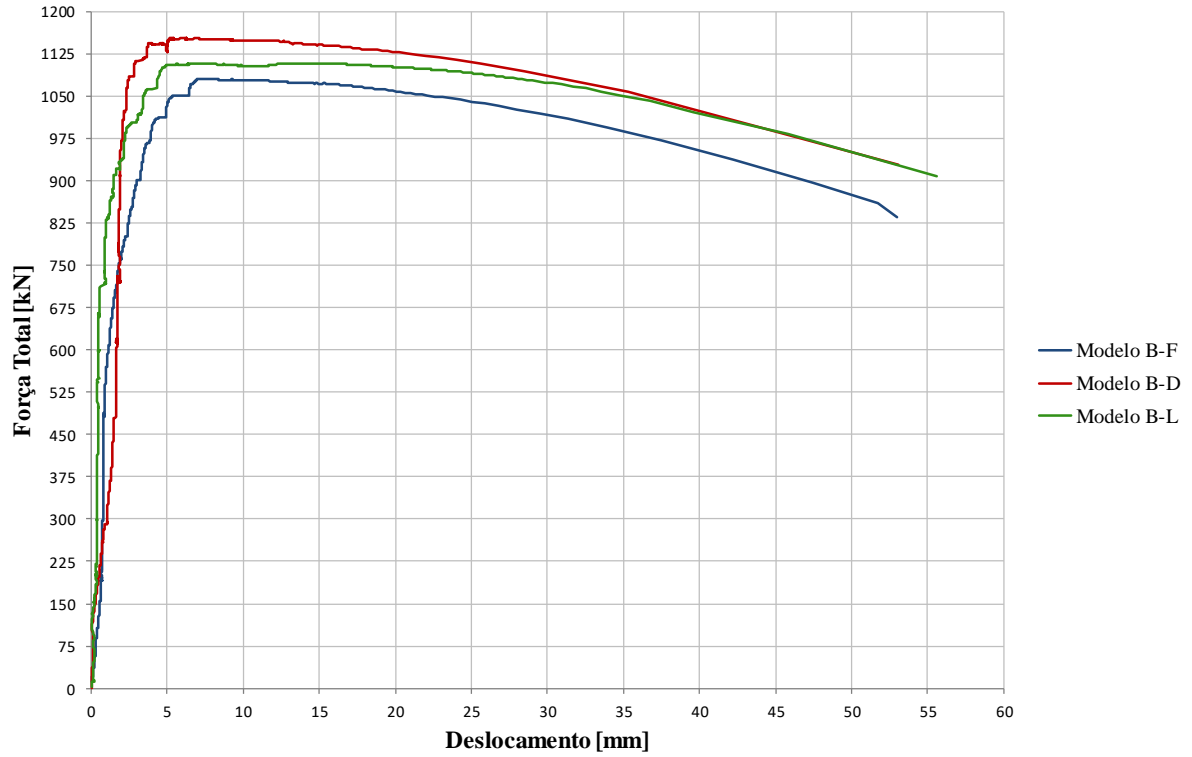


Figura 5.9. Gráfico força *versus* deslocamento referente ao tubo intermediário dos modelos do grupo B.

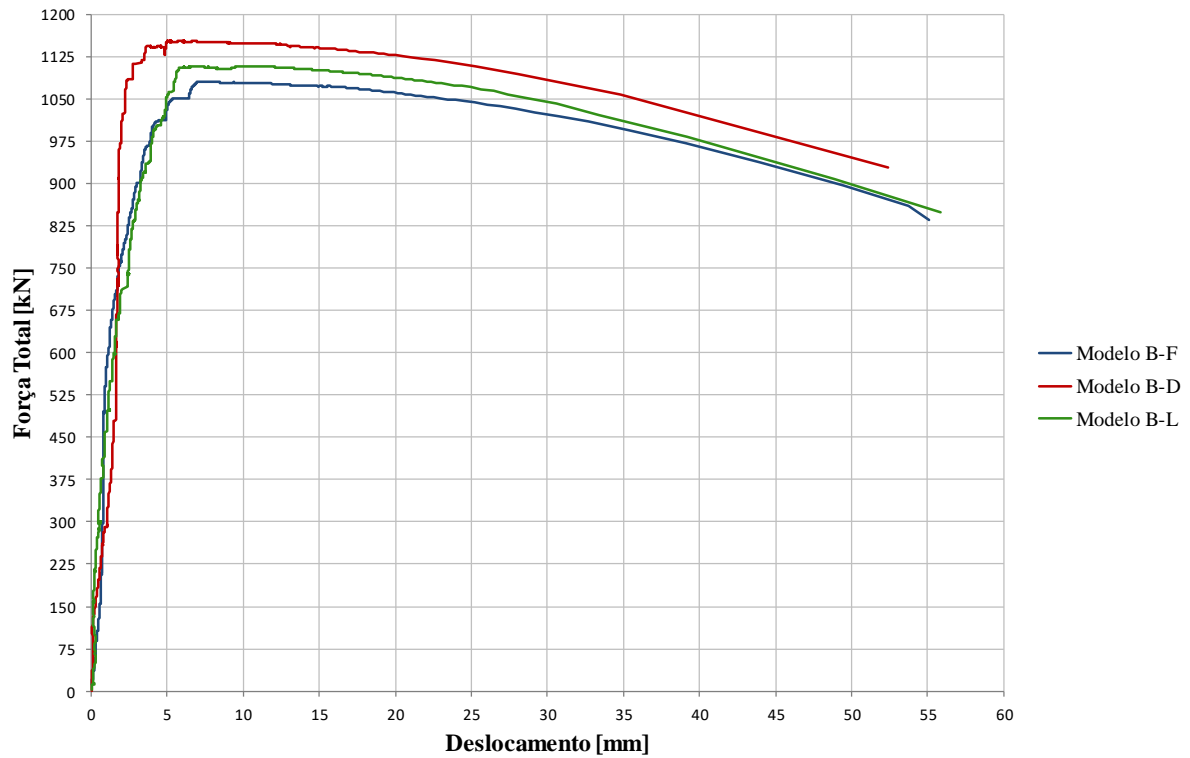


Figura 5.10. Gráfico força *versus* deslocamento referente ao tubo externo dos modelos do grupo B.

Os gráficos de força total do conjunto *versus* força em cada tubo dos modelos ensaiados são apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12, para os tubos interno e externo dos modelos do grupo A, respectivamente, e nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, para os tubos interno, intermediário e externo dos modelos do grupo B, respectivamente. A força exercida em cada tubo foi obtida a partir das deformações medidas pelos extensômetros instalados nos tubos externo e intermediário. Para o tubo interno, a força foi determinada pela subtração entre a força total do conjunto e as forças dos outros tubos.

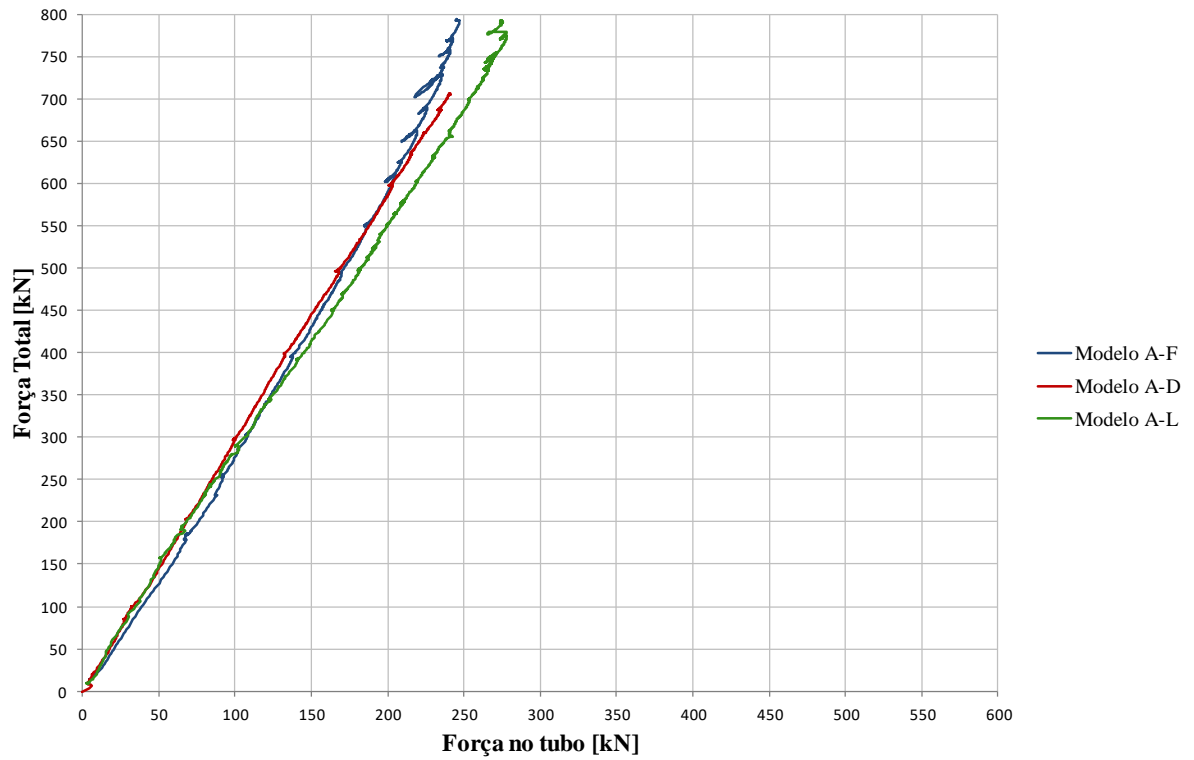


Figura 5.11. Gráfico força do conjunto *versus* força do tubo interno dos modelos do grupo A.

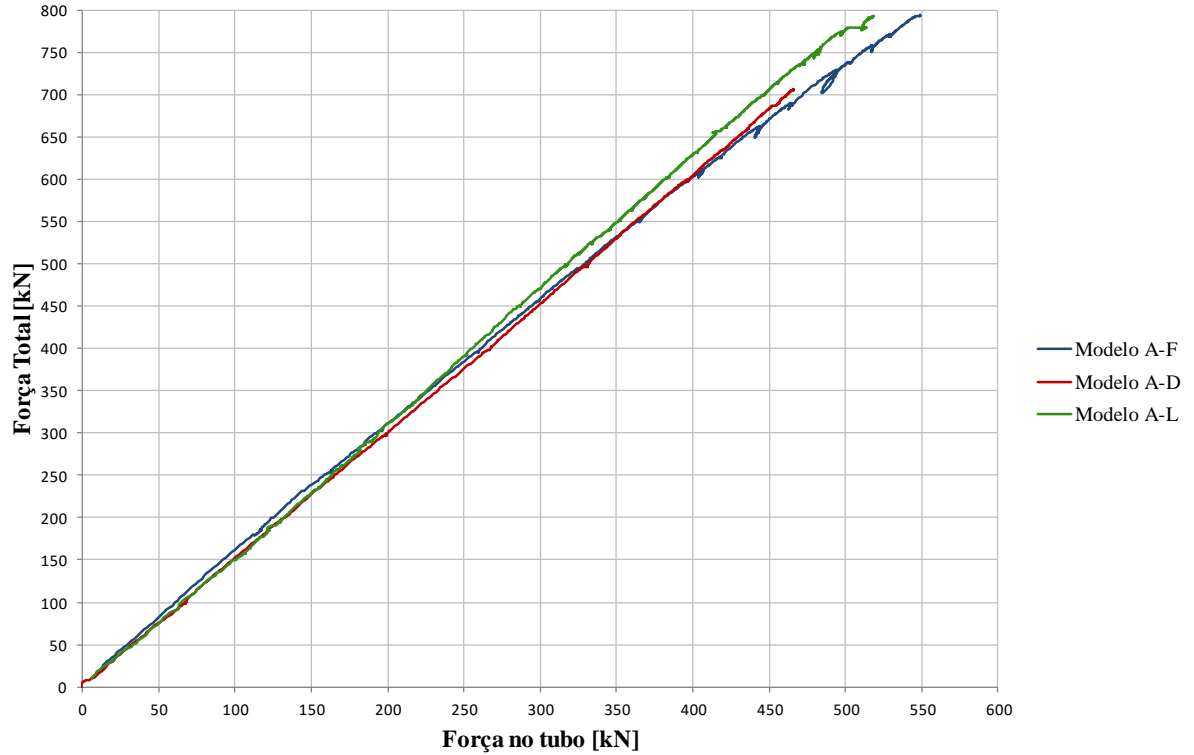


Figura 5.12. Gráfico força do conjunto *versus* força do tubo externo dos modelos do grupo A.

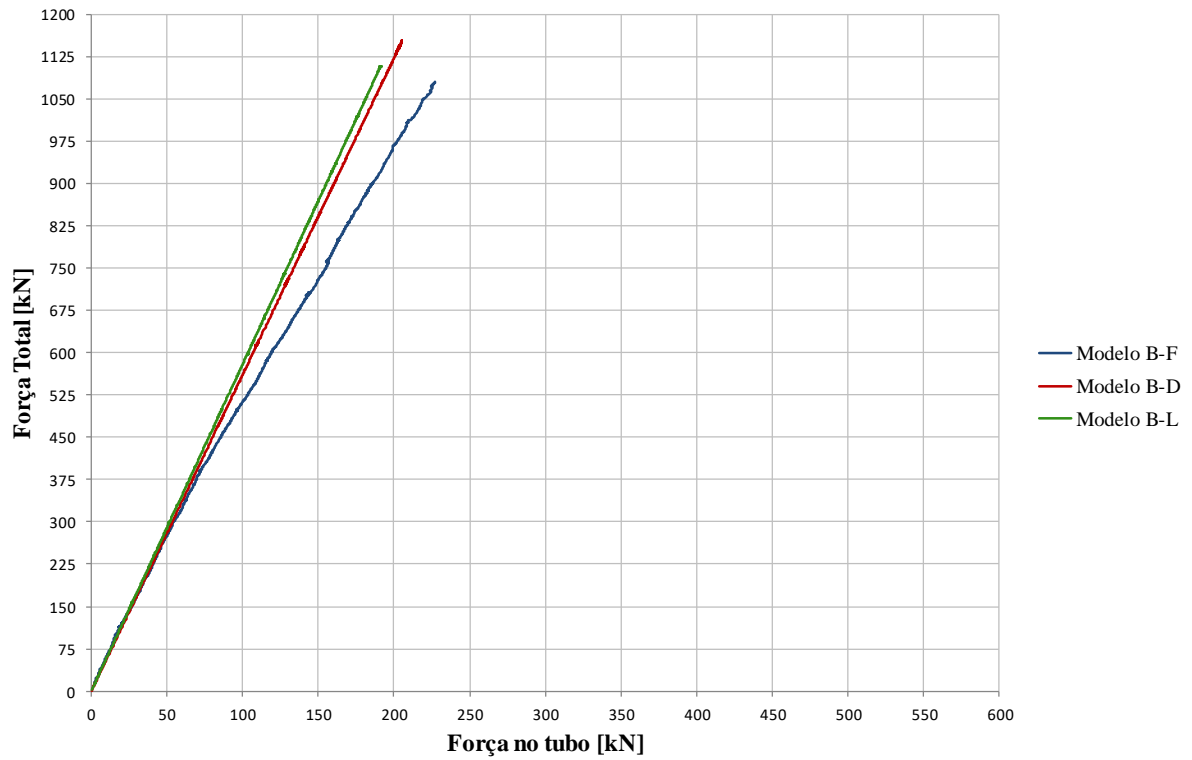


Figura 5.13. Gráfico força do conjunto *versus* força do tubo interno dos modelos do grupo B.

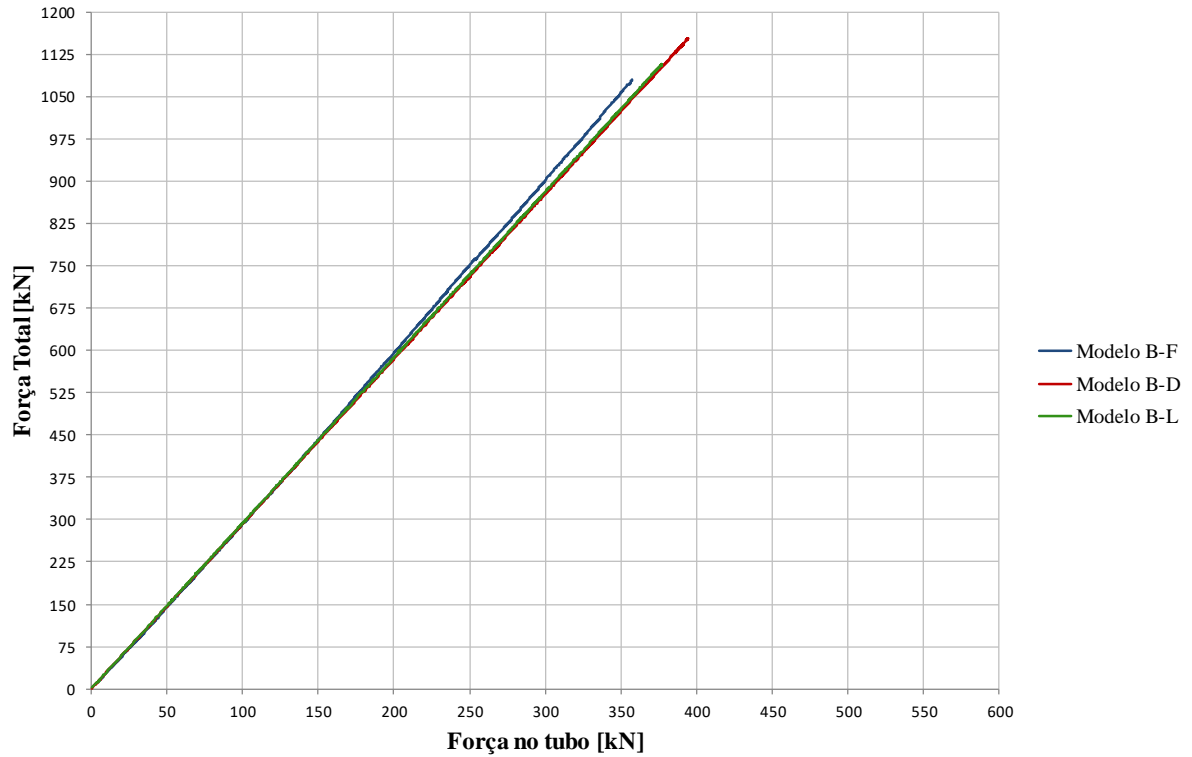


Figura 5.14. Gráfico força do conjunto *versus* força do tubo intermediário dos modelos do grupo B.

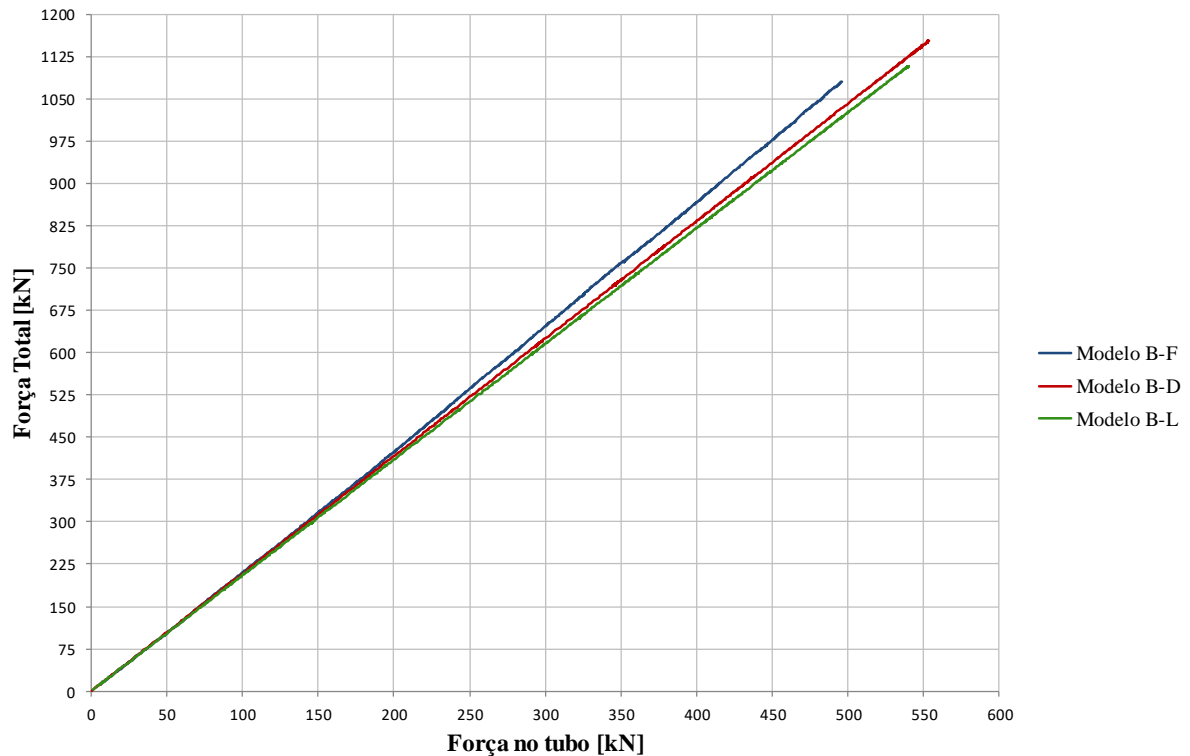


Figura 5.15. Gráfico força do conjunto *versus* força do tubo externo dos modelos do grupo B.

Na Tabela 5.2, observa-se que as diferenças entre as forças últimas teórica e experimental são inferiores a 35% para os modelos do grupo A (dois tubos) e inferiores a 18% para os modelos do grupo B (três tubos). Os valores negativos referentes à diferença entre os resultados indicam que a força última experimental é maior que a força última teórica.

Também se pode aferir que os modelos possuem valores de forças últimas próximas entre si. Na análise experimental, tem-se uma diferença entre os modelos com dois tubos (grupo A) de cerca de 11% e entre os modelos com três tubos (grupo B) inferior a 7%.

As forças em cada tubo dos modelos foram, de maneira geral, praticamente proporcionais às suas áreas, do início da aplicação das forças até o colapso, como pode ser observado nas Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

Nota-se, nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, que os modelos compostos por três tubos com travamentos deslizantes (modelo B-D) e sem travamentos (modelo B-L) obtiveram distribuição de força similares entre si. O modelo B-F, supostamente com travamentos fixos, não apresentou o mesmo comportamento, pois, por um defeito de fabricação, ficou sem esse tipo de travamentos entre os tubos interno e intermediário.

Pode ser observado pelas Figuras 5.6 e 5.7 que os modelos compostos por dois perfis e com travamentos fixos e deslizantes (modelos A-F e A-D) exibem um comportamento compatibilizado entre seus perfis, ou seja, há uma solidarização entre os tubos conciliando seus deslocamentos. Isso também pode ser visto no modelo com três tubos e travamento deslizante (modelo B-D) nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Já nos modelos com dois e três tubos sem travamentos (modelos A-L e B-L) ou com três tubos com travamentos “parciais” (modelo B-F), pode ser visto que os perfis da composição trabalham isoladamente, como mostrado nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10. No caso do modelo A-L, é evidente que o perfil externo suporta a maior parte do carregamento até o seu colapso. Entretanto, nos modelos B-L e B-F observa-se que o perfil intermediário entra em colapso antes ou no mesmo instante que o perfil externo. Isso pode ser explicado pela imperfeição geométrica inicial de cada perfil.

Percebe-se, pelas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 e pela Tabela 5.2, que a falta dos travamentos entre os perfis interno e intermediário no modelo B-F não comprometeu significativamente sua capacidade resistente e seu comportamento foi satisfatório. Sua força última foi relativamente próxima à do modelo com travamentos deslizantes (modelo B-D), apenas cerca de 6% inferior.

Com relação às forças última, como pode ser visto na Tabela 5.2, entre os modelos do grupo A, os modelos A-F e A-L apresentam valores semelhantes pela análise experimental seguidos pelo modelo A-D. Já para os modelos do grupo B, tem-se o modelo B-D com maior força última seguido pelos modelos B-L e B-F.

6

ANÁLISE NUMÉRICA E COMPARATIVA

6.1 Considerações Iniciais

Os resultados obtidos na análise experimental têm como objetivo subsidiar as análises numéricas, a partir das quais pode ser feita a complementação do estudo do comportamento estrutural e da força resistente de compressão dos PTCCs.

O modelo numérico utilizado neste trabalho foi baseado no modelo criado por Grilo (2015), conforme subitem 3.4, incorporando os parâmetros obtidos na análise experimental, incluindo as medições de imperfeições iniciais. Nessa nova condição, os modelos numéricos foram testados e seus resultados comparados aos obtidos na análise experimental.

6.2 Programa ABAQUS

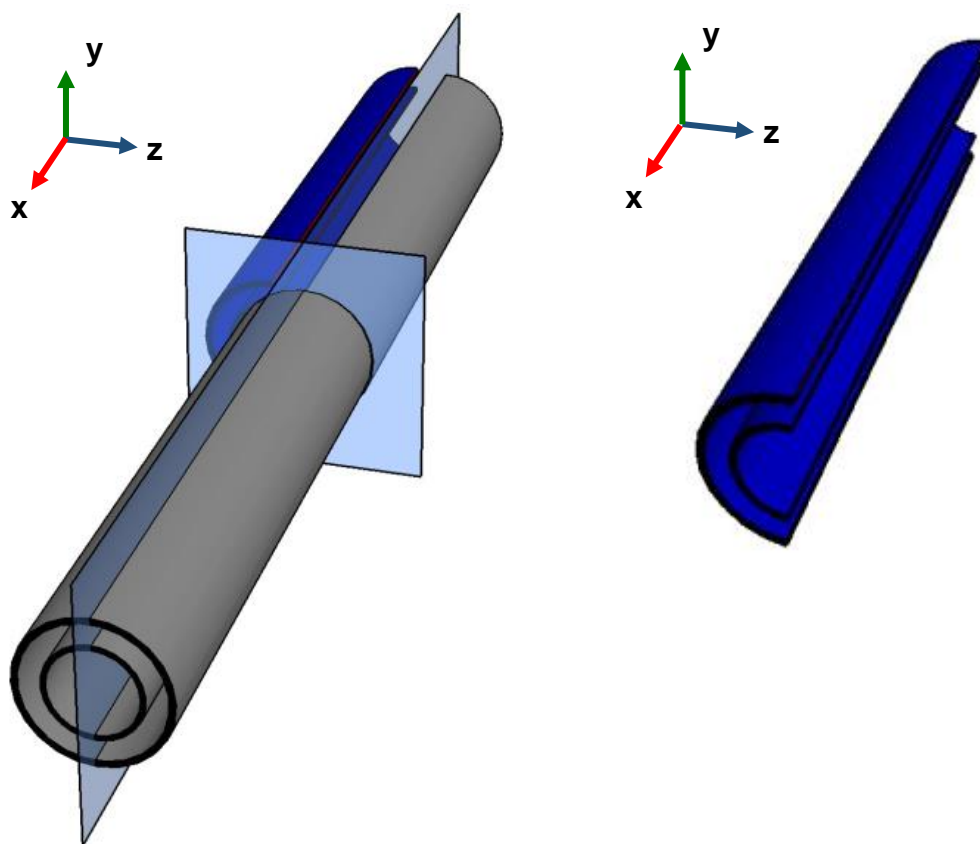
O ABAQUS (SIMULIA, 2013) é um programa comercial de simulação de engenharia de grande potencialidade, baseado no Método dos Elementos Finitos, que realiza análises lineares e não lineares de estruturas. A aplicação dos Método dos Elementos Finitos utilizado no ABAQUS consiste em aproximar as condições de equilíbrio de um corpo sob perspectiva lagrangeana, isto é, cada ponto do corpo é avaliado em função do tempo e de suas coordenadas, e as equação de equilíbrio são determinadas através do princípio dos trabalhos virtuais.

A solução da análise não linear é obtida utilizando um processo incremental e iterativo pelo método de Newton-Raphson. Para se obter a curva força *versus* deslocamento total de uma estrutura, para análise de estabilidade e de força última, o ABAQUS utiliza o método de Riks, que permite alcançar estados de equilíbrio estático durante a fase instável de resposta da estrutura (CASTRO e SILVA, 2006).

O comportamento plástico de materiais como aço é incorporado na análise do ABAQUS através da introdução das coordenadas dos pontos da curva de tensão *versus* deformação do material.

6.3 Modelo Numérico

Para a simulação numérica, devido a simetria geométrica dos modelos, tanto na longitudinal quanto na transversal, considerou-se um quarto de tubo, como mostrado na Figuras 6.1, referente a um modelo com dois tubos sem travamentos.



(a) Secionamento do modelo na longitudinal e transversal

(b) Modelo simulado na análise numérica

Figura 6.1. Modelo numérico considerado na análise.

O modelo B-F foi feito com travamentos fixos somente entre os tubos externo e intermediário e sem travamentos entre os tubos intermediário e interno, conforme verificado na análise experimental.

Na Tabela 6.1 encontram-se os valores das curvaturas iniciais adotadas para os modelos. Para cada tubo, foi estabelecida a sua imperfeição inicial conforme os valores medidos na análise experimental, em que foi determinado o valor resultante da imperfeição conforme o maior valor

da flecha. Vale ressaltar que, na análise experimental, a base dos tubos considerava os eixos x e y , entretanto, nessa análise, o eixo x foi convertido para eixo z , como mostra a Figura 6.2.

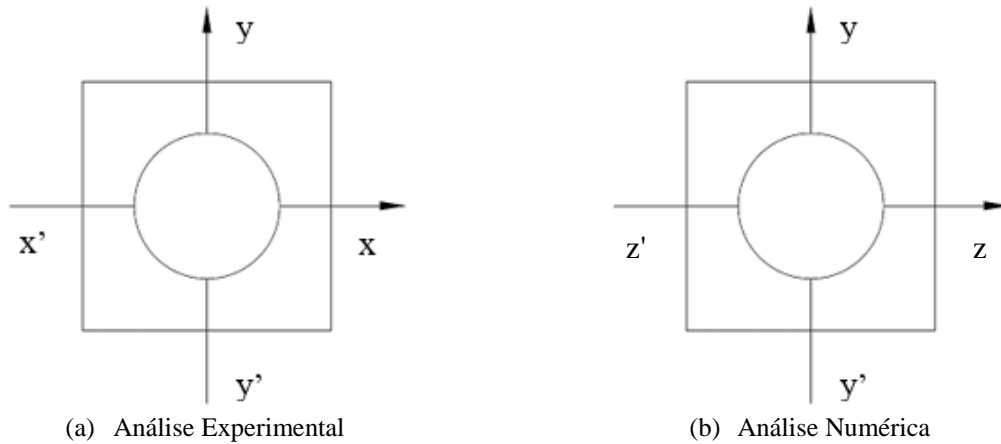


Figura 6.2. Eixos adotados para cada análise.

Tabela 6.1. Valores de curvatura inicial adotados nos modelos numéricos.

Modelo	Imperfeição Inicial					
	Tubo Externo		Tubo Intermediário		Tubo Interno	
	Sentido	Resultante (mm)	Sentido	Resultante (mm)	Sentido	Resultante (mm)
A-F	$z-y'$	1,20	-	-	$z'-y$	0,79
A-D	$z-y'$	0,43	-	-	$z-y'$	3,56
A-L	$z'-y'$	1,03	-	-	$z'-y'$	2,72
B-F	$z'-y$	0,74	$z'-y'$	2,52	$z-y'$	1,08
B-D	$z'-y$	2,13	$z-y'$	3,15	$z-y'$	0,71
B-L	$z'-y'$	1,50	$z-y$	0,44	$z'-y$	0,53

O elemento adotado para simulação do modelo foi o S8R, que é um elemento de casca de quatro nós de aproximação quadrática e integração reduzida com quatro pontos de integração. Cada nó do elemento possui seis graus de liberdade, sendo três de translações e três de rotações, os quais são associados à superfície de referência (SIMULIA, 2013).

Esse elemento é constituído por oito nós, com quatro pontos de integração na superfície, os quais são necessários para descrever o comportamento linear das tensões e deformações ao longo da espessura.

O diagrama de tensão *versus* deformação utilizado para o aço foi bilinear com inclinação no trecho plástico da curva igual a 1/10.000, como mostra a Figura 6.3. As propriedades do aço, como as resistências ao escoamento e à ruptura do aço na tração, foram aquelas obtidas na análise experimental determinadas para cada tubo. Considerou-se o módulo de elasticidade (E)

igual a 200 GPa. As tensões residuais foram desconsideradas na análise, com base nas considerações exposta no subitem 2.3.

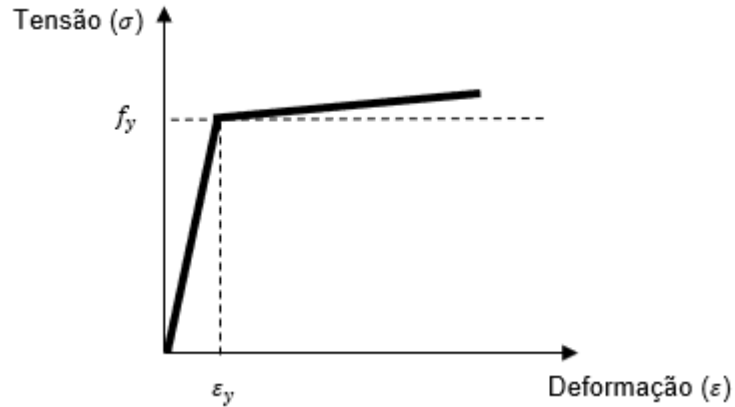


Figura 6.3. Diagrama de tensão *versus* deformação bilinear do aço.

A simulação foi referente a um sistema estrutural birrotulado submetido à força axial de compressão. Para isso, foram aplicadas as mesmas condições de restrições e de força utilizadas no trabalho de Grilo (2015), como apresentado no subitem 3.4. Na Tabela 6.2 e na Figura 6.4 são exibidas as aplicações de restrições no modelo. Um nó fictício foi criado no centro dos tubos na face de borda para aplicação da força de compressão e das restrições.

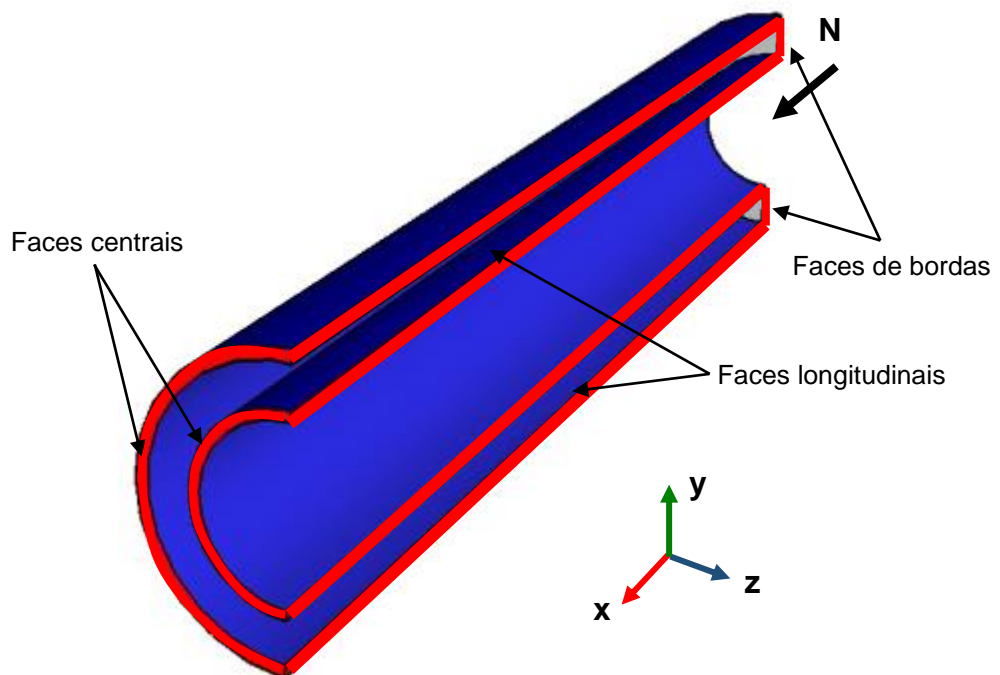


Figura 6.4. Faces do modelo numérico.

Tabela 6.2. Restrições aplicadas na simulação dos modelos.

Nós	Restrições	
	Deslocamento	Rotação
Fictício	y, z	x, y
Faces Longitudinais	z	x, y
Face central	x, z	y, z

Os modelos numéricos tiveram as malhas constituídas com 35 elementos na seção transversal do perfil, por apresentar um tempo de processamento viável em relação às demais malhas, conforme o teste de malha realizado por Grilo (2015).

6.4 Análise Comparativa dos Resultados Numéricos e Experimentais

A análise numérica permitiu determinar a força última dos PTCCs simulados. Assim, os valores de força última nesta análise foram comparados aos valores de força última obtidos na análise experimental, como exposto na Tabela 6.3. Além disso, foram também comparadas aos valores de força última teóricos calculados com base no procedimento apresentado no subitem 3.6, exceto para o modelo com três tubos sem travamentos (modelo B-L). Ainda são comparadas as forças últimas experimental e teórica.

Tabela 6.3. Resultados das análises numérica e experimental.

Modelo	Tipo de Travamento	Força Última Teórica – Grilo (2015)	Força Última Numérica	Força Última Experimental	Diferença		
		$N_{u,Teo}$ (kN)	$N_{u,Num}$ (kN)	$N_{u,Exp}$ (kN)	$1 - \frac{N_{u,Num}}{N_{u,Teo}}$	$1 - \frac{N_{u,Exp}}{N_{u,Teo}}$	$1 - \frac{N_{u,Num}}{N_{u,Exp}}$
A-F	Fixos	625	781	794	-0,250	-0,270	0,016
A-D	Deslizantes	625	715	706	-0,144	-0,130	-0,013
A-L	Sem Travamentos	588	726	792	-0,235	-0,347	0,083
B-F	Fixos	-	1060	1080	-	-0,102	0,019
B-D	Deslizantes	980	1144	1153	-0,167	-0,177	0,008
B-L	Sem Travamentos	-	1103	1108	-	-	0,005

Pode-se inferir da Tabela 6.3, em relação a formulação analítica, que seus resultados foram bastante conservadores para todos os modelos em comparação com as outras análises realizadas. Verifica-se também que para o modelo sem travamento esse valor é ainda mais conservador em relação aos demais devido à formulação aplicada.

A partir dos resultados das duas análises numérica e experimental foram traçados gráficos de força total *versus* deslocamento da seção transversal central para cada tubo dos PTCCs estudados, como mostra as Figuras 6.5 e 6.6, para os modelos com dois tubos, e as Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, para os modelos com três tubos. Na análise numérica, os deslocamentos foram obtidos por meio dos nós dos elementos medidos nas direções dos eixos y e z de cada perfil do conjunto.

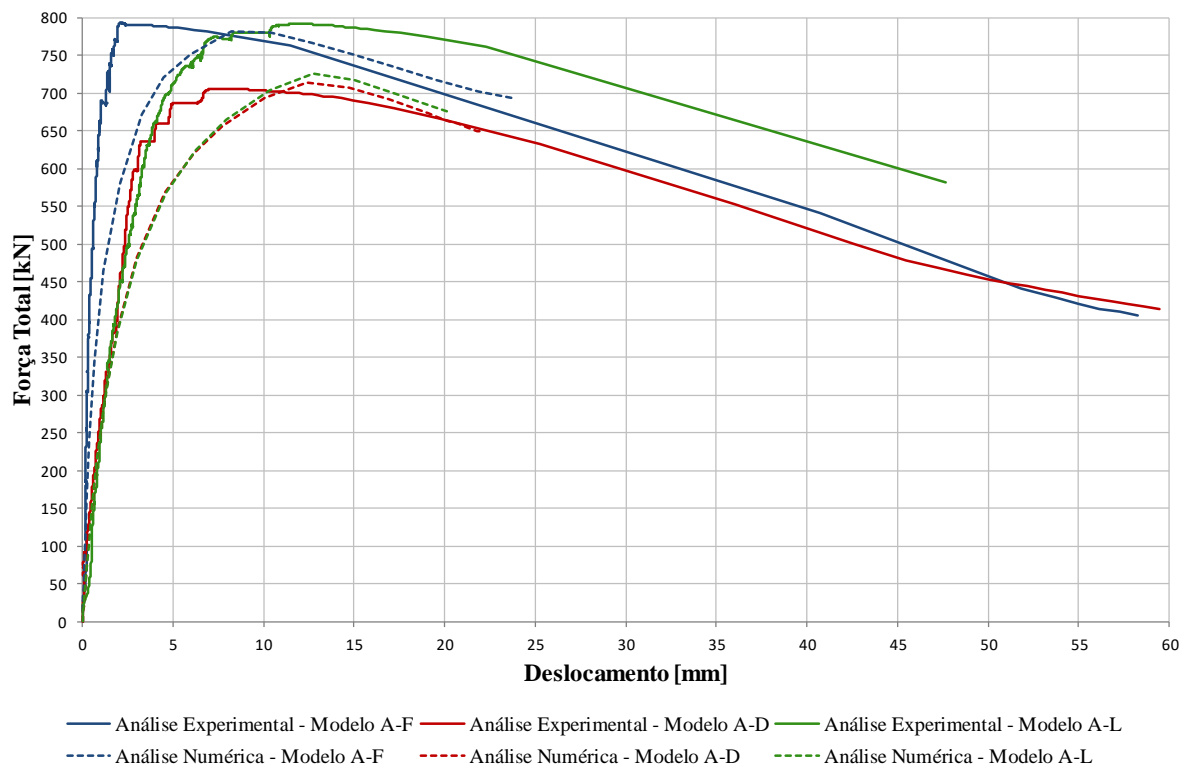


Figura 6.5. Gráfico força total *versus* deslocamento referente ao tubo interno dos modelos com dois tubos.

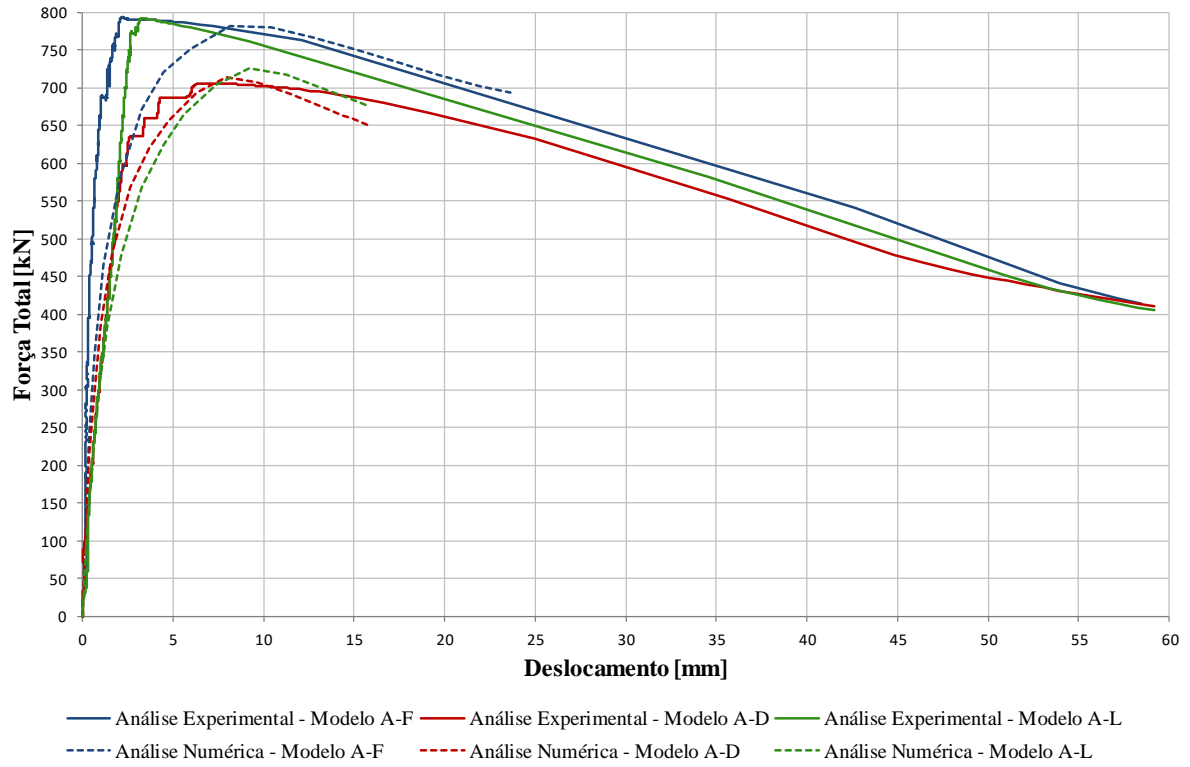


Figura 6.6. Gráfico força total *versus* deslocamento referente ao tubo externo dos modelos com dois tubos.

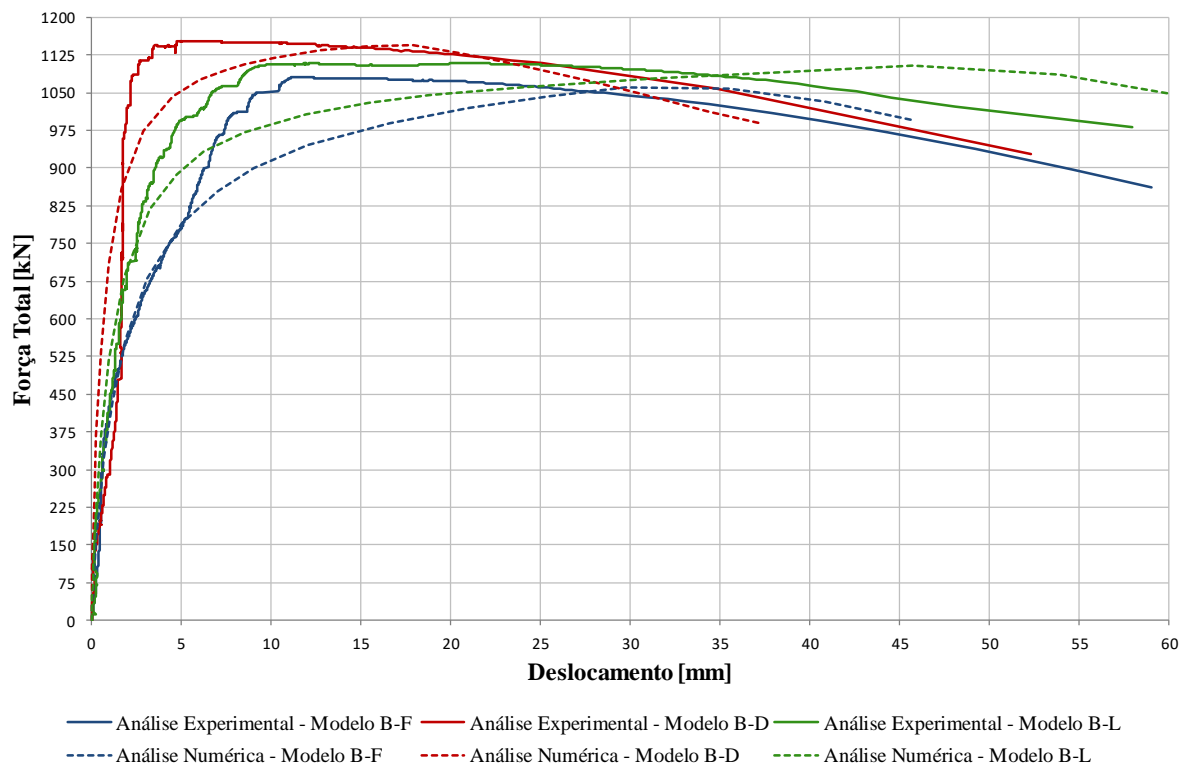


Figura 6.7. Gráfico força total *versus* deslocamento referente ao tubo interno dos modelos com três tubos.

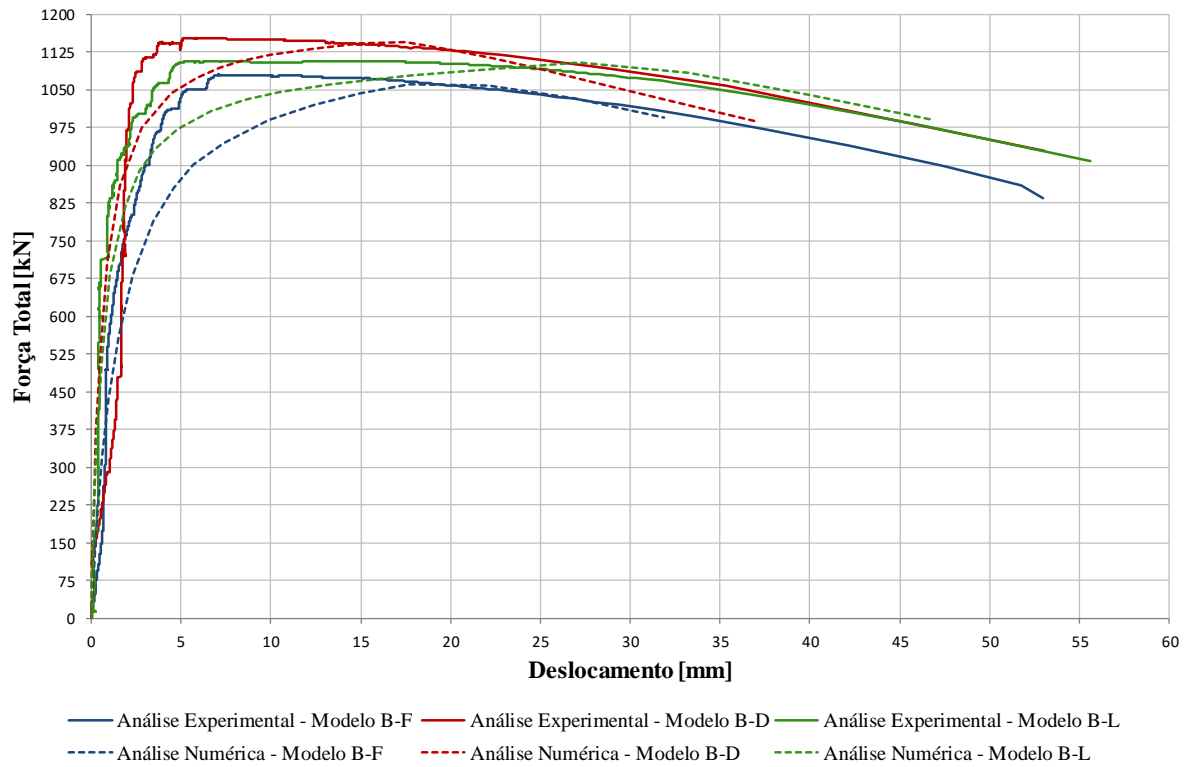


Figura 6.8. Gráfico força total *versus* deslocamento referente ao tubo intermediário dos modelos com três tubos.

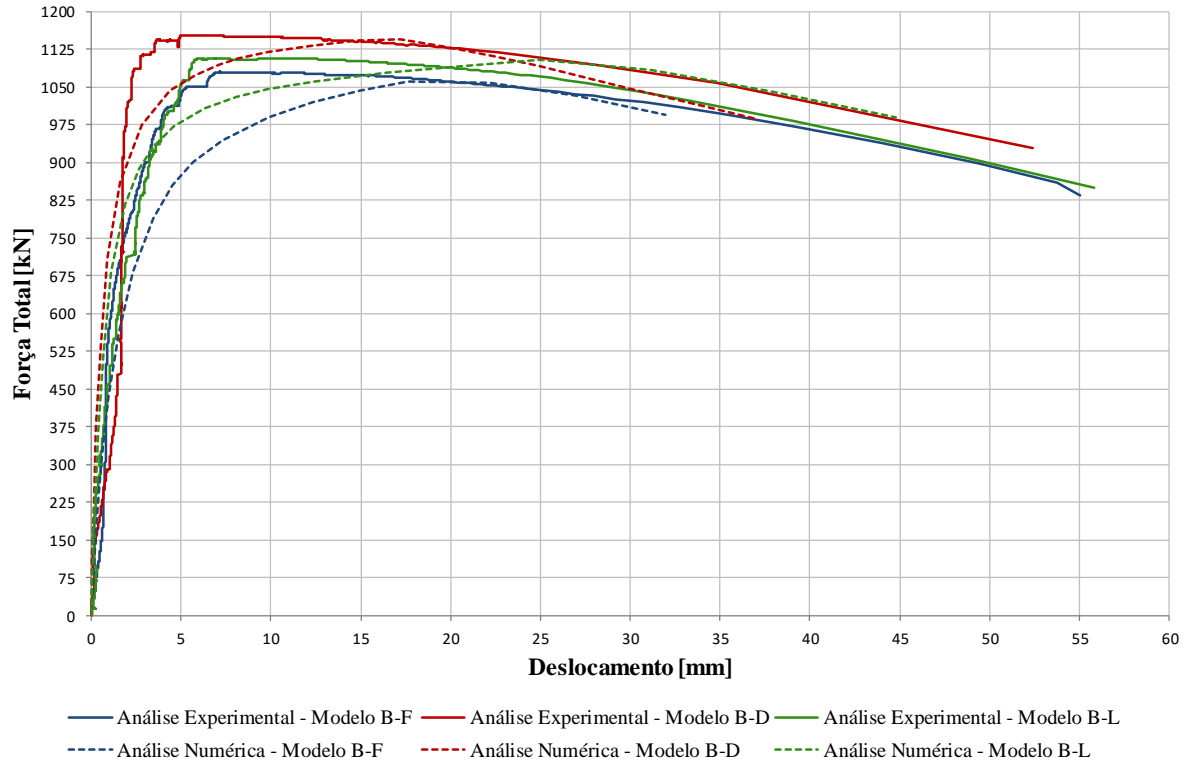


Figura 6.9. Gráfico força total *versus* deslocamento referente ao tubo externo dos modelos com três tubos.

Nota-se pelas Figuras 6.5 e 6.6, em relação aos comportamentos dos perfis interno e externo do modelo A-F com travamentos fixos, que os resultados experimentais apresentam comportamento mais rígido em relação aos resultados numéricos. Entretanto, os modelos numéricos apresentam uma variação de deslocamento maior em relação os modelos experimentais. De modo geral, antes do colapso dos perfis, os modelos numéricos exibem resultados conservadores, ou seja, inferior ou igual aos resultados experimentais. Além disso, a força última da análise numérica foi bastante semelhante à da experimental, com diferença igual a 1,6%, conforme a Tabela 6.3. Esta força última é definida tanto na análise experimental como na numérica, como o ponto de força máxima da curva do gráfico.

Com relação ao modelo A-D, referente ao PTCC com dois tubos e travamentos deslizantes, pode ser aferido pelo comportamento do tubo interno (Figura 6.5), que, na análise experimental, perdeu a estabilidade de forma mais brusca em relação à análise numérica. Já para o tubo externo (Figura 6.6), as duas análises exibiram comportamentos semelhantes. Entretanto, a força última da análise numérica é um pouco superior à da análise experimental, como mostrado na Tabela 6.3, sendo este comportamento explicado pelas imperfeições dos tubos, principalmente ao que se refere à curvatura inicial, pois o tubo interno apresentava uma curvatura considerável, acima de $L/1.000$ (ver Tabela 4.2).

Os tubos do modelo A-L, como pode ser observado nas Figuras 6.5 e 6.6, apresentam um comportamento mais rígido na análise experimental quando comparado com a análise numérica, possivelmente devido ao conservadorismo da última análise. Presume-se que, na prática, haja compartilhamentos de força e de deslocamentos entre os tubos, mesmo sem travamento. No modelo numérico este comportamento, pela modelagem, não é possível de simular. Entretanto, a diferença é pequena, principalmente em relação a força última que foi de aproximadamente 8%.

Pode ser visto nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, a respeito do comportamento dos três tubos do modelo B-F, que a análise numérica apresenta resultados bem aproximados àqueles obtidos experimentalmente com travamentos fixos e sem travamentos (ver subitem 5.2). As forças últimas obtidas pelas duas análises foram bastante próximas, com uma diferença entre elas menor que 2%, como mostrado na Tabela 6.3. Isso pode significar que PTCCs com três tubos e travamentos somente entre os tubos mais externos podem ser utilizados, já que é possível prever seu comportamento numericamente.

Para os tubos componentes do modelo B-D, nota-se que a análise numérica apresenta comportamento mais rígido no início do carregamento em comparação com a análise experimental, como mostra as Figuras 6.7, 6.8 e 6.9. Contudo, observou-se uma anomalia nas curvas referentes à análise experimental no trecho entre as cargas de 150 kN a 825 kN, justamente onde a análise numérica exibe maior rigidez. Essa anomalia pode estar relacionada a alguma falha ou interferência não identificada durante a execução do ensaio de compressão. No entanto, a análise numérica representa aceitavelmente o comportamento do modelo, com a força última bem semelhante à da análise experimental (diferença de 0,8%).

Pode ser observado pela Figura 6.9 que o perfil externo do modelo numérico, referente ao conjunto com três perfis sem travamentos (modelo B-L), exibe comportamento ligeiramente mais rígido que o do modelo experimental. O perfil intermediário (Figura 6.8) do modelo B-L, como discutido no subitem 5.4, apresenta um comportamento mais rígido que o do perfil externo, entrando em colapso antes que os dos demais perfis. Isso indica que a influência da curvatura inicial do perfil intermediário se sobressaiu em relação à do perfil externo, o que não foi detectado pela simulação numérica. Além disso, nas simulações, após o intervalo de 750 kN a 1050 kN, que indica a instabilidade da barra, houve ganho de capacidade resistente, sugerindo o instante em que cada perfil é requisitado em sua capacidade máxima. Contudo, o modelo numérico foi bastante representativo, obtendo uma força última similar à do modelo experimental (diferença de 0,5%), de acordo com Tabela 6.3.

Pode-se concluir, conforme os resultados indicam, que o modelo numérico desenvolvido com base nos parâmetros da norma ABNT NBR 16239:2013 desenvolvido por Grilo (2015) apresenta resultados muito bons perante a comparação com os resultados da análise experimental e, portanto, pode ser considerado calibrado e validado. Os resultados da formulação analítica, apesar de conservadores, apresentam-se também válidos.

7

ANÁLISE DAS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

7.1 Considerações Iniciais

Os resultados das análises dos perfis tubulares circulares concêntricos mostram que a imperfeição inicial exerce uma grande influência no comportamento estrutural. Dessa forma, o sentido da curvatura inicial dos tubos implica na maior ou menor força resistente dessas barras.

Neste capítulo, é apresentado um estudo das imperfeições geométricas no comportamento dos perfis tubulares circulares concêntricos com dois e com três tubos. A análise consistiu de simulações numéricas, utilizando o Método Elementos Finitos com o programa ABAQUS (SIMULIA, 2013). Para tal, foram gerados modelos de PTCCs variando as dimensões da seção transversal dos tubos e a esbeltez do conjunto.

7.2 Seleção dos Modelos

Os PTCCs foram selecionados com base na variação da relação diâmetro/espessura (d/t) dos perfis tubulares de cada modelo, como apresentado na Tabela 7.1. Os modelos foram analisados com travamentos fixos e sem travamentos ao longo do comprimento. Para cada modelo analisado, foram tomados valores de esbeltez (λ) do conjunto iguais a 50 (baixa), 125 (intermediária) e 200 (alta).

Os modelos de PTCCs analisados foram divididos em grupos de 1 a 7. Os grupos de 1 a 3 consistiam em modelos com dois perfis, em que cada grupo as dimensões desses perfis eram fixas. No grupo 1, os perfis possuem seções transversal semelhantes. Já no grupo 2, a seção transversal do perfil interno é bastante reduzida em relação à do perfil externo. No grupo 3, a seção transversal do perfil externo é reduzida em relação à do perfil interno. Os demais grupos

referem-se aos modelos com três perfis, em que são fixos os diâmetros desses perfis, variando-se as espessuras de cada perfil de um grupo para o outro.

Tabela 7.1. Modelos analisados.

Grupo	Modelo	PTCC			d/t	Imperfeições
		Interno	Intermediário	Externo		
1	1 a 9	273,0x30,0	-	355,6x25,0	9, 18	Iguais Perpendiculares Opostos
2	10 a 18	273,0x8,0	-	355,6x25,0	34, 18	Iguais Perpendiculares Opostos
3	19 a 27	114,0x25,0	-	219,0x6,4	5, 34	Iguais Perpendiculares Opostos
4	28 a 39	168,3x20,0	273,0x20,0	355,6x25,0	8, 14, 18	Iguais T.I. ¹ oposto T.I. ¹ + T.Int. ² Opostos T.Int. ² Oposto
5	40 a 51	168,3x5,0	273,0x20,0	355,6x25,0	34, 14, 18	Iguais T.I. ¹ Oposto T.I. ¹ + T.Int. ² Opostos T.Int. ² Oposto
6	52 a 63	168,3x20,0	273,0x30,0	355,6x25,0	8, 9, 18	Iguais T.I. ¹ Oposto T.I. ¹ + T.Int. ² Opostos T.Int. ² Oposto
7	64 a 75	168,3x20,0	273,0x20,0	355,6x8,0	8, 14, 44	Iguais T.I. ¹ Oposto T.I. ¹ + T.Int. ² Opostos T.Int. ² Oposto

¹: T.I.: Tubo Interno

²: T.Int.: Tubo Intermediário

A análise consistiu na variação do sentido das imperfeições iniciais dos tubos dos PTCCs, conforme as Figuras 7.1 e 7.2, em que se fixou a curvatura inicial do tubo externo acentuada sempre para direção do eixo y positivo. Para os modelos com dois tubos, foram determinadas três configurações de imperfeições variando o sentido da curvatura inicial do tubo interno, sendo a primeira no mesmo sentido do tubo externo (Figura 7.1.a), a segunda no sentido perpendicular à direção do tubo externo, ou seja, na direção do eixo z (Figura 7.1.b) e a terceira no sentido oposto (eixo y negativo) ao do tubo externo (Figura 7.1.c). Já para os modelos com três tubos, variou-se os sentidos das curvaturas dos tubos interno e intermediário, sendo que, no primeiro caso, têm-se todas as curvaturas no mesmo sentido (Figura 7.2.a); no segundo caso, tem-se a curvatura do tubo interno no sentido da do eixo y negativo, oposta à dos demais tubos

(Figura 7.2.b); no terceiro caso, os tubos interno e intermediário possuem curvaturas no sentido do eixo y negativo (Figura 7.2.c); e, no quarto caso, somente o tubo intermediário tem a curvatura no sentido do eixo y negativo, oposta à dos tubos interno e externo (Figura 7.2.d).

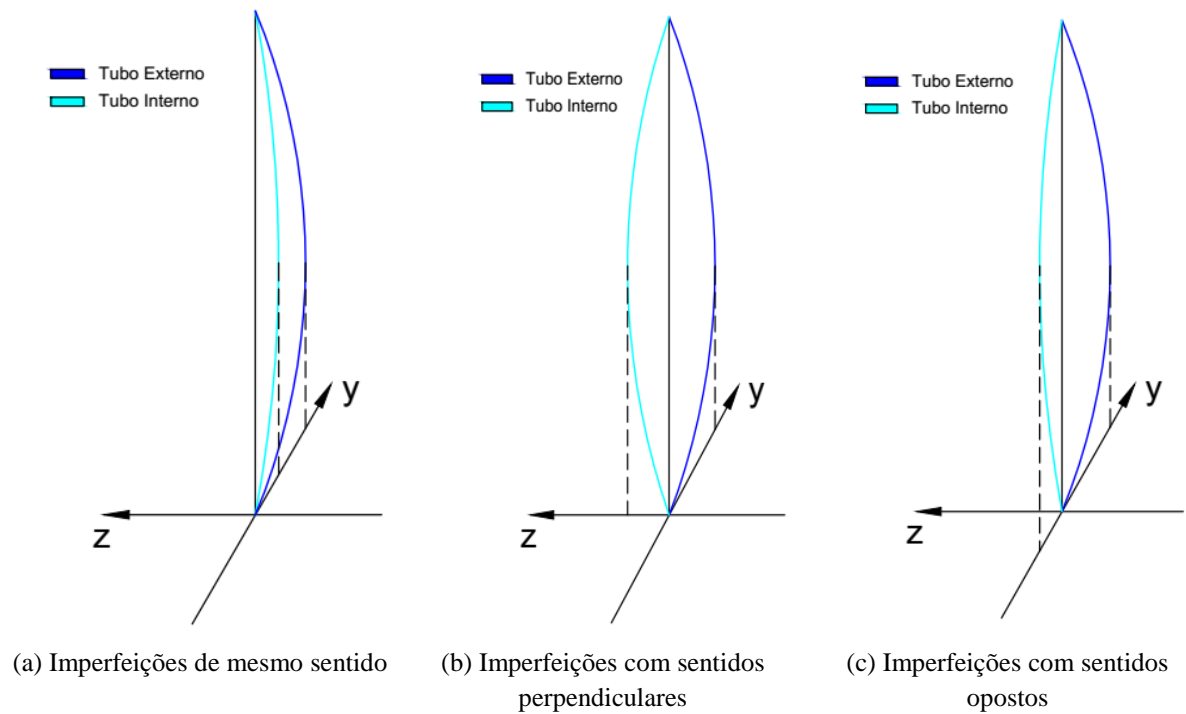


Figura 7.1. Sentido das imperfeições geométricas nos modelos de PTCCs com dois tubos.

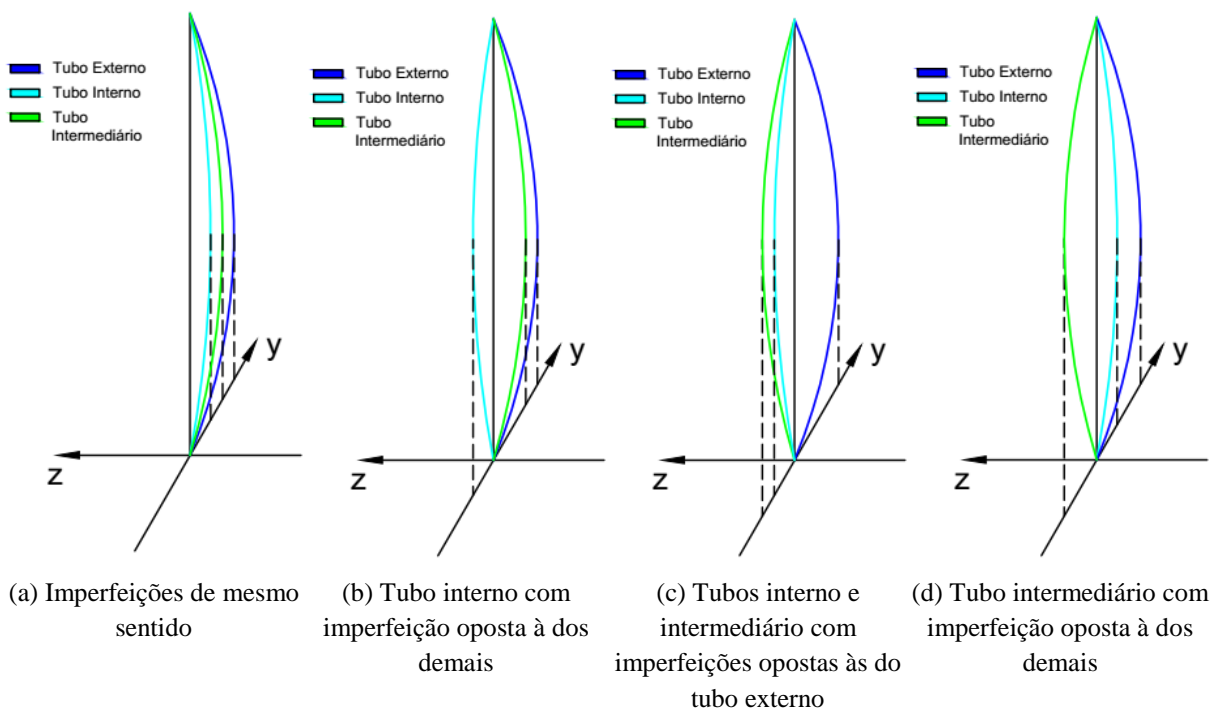


Figura 7.2. Sentido das imperfeições geométricas nos modelos de PTCCs com três tubos.

As simulações dos modelos foram realizadas utilizando os valores de resistência ao escoamento do aço (f_y) de 350 MPa e módulo de elasticidade (E) de 200 GPa. Adotou-se $L/1.000$ para as imperfeições geométricas dos perfis. Além disso, foi estabelecido diagrama de tensão *versus* deformação bilinear com inclinação no trecho plástico de $1/10.000$.

7.3 Análises da Distribuição das Forças nos Tubos

A análise da influência das imperfeições iniciais geométricas no comportamento dos PTCCs consistiu no estudo da distribuição da força de compressão pelos perfis componentes. Para tal, foram traçadas curvas de força de compressão em cada tubo do PTCC, conforme o passo de carga.

A força atuante em cada tubo foi obtida de acordo com o procedimento descrito por Grilo (2015), conforme descrito no subitem 3.5. Para tal, foram determinadas as tensões normais para uma faixa de elementos e calculada a sua média. Com a área do perfil tubular, se obtém a força.

Desse modo, para cada modelo, foram traçados gráficos de força *versus* passo de carga, nos quais é possível analisar a distribuição da força no conjunto e em cada perfil tubular. Em um gráfico, é observada a variação da imperfeição inicial nos modelos, como pode ser visto no Apêndice B. Serão abordados, neste capítulo, os modelos considerados mais representativos dentre as análises.

Pode ser observado na Figura 7.3, para os PTCCs com imperfeições perpendiculares e diametralmente opostas, que, ao aplicar a carga no conjunto, o perfil externo resiste à maior parte até o instante em que entra em colapso. A partir desse instante, o perfil interno passa a resistir ao carregamento. Isso ocorre possivelmente porque a curvatura inicial do perfil interno é divergente da do perfil externo de maneira que a curvatura da instabilidade do conjunto segue o sentido da curvatura inicial do perfil externo (Figura 7.4), e, portanto, o perfil interno adquire maior capacidade resistente. Esse caso é apenas visualizado nos modelos com travamentos fixos e se reduz com o aumento da esbeltez do conjunto.

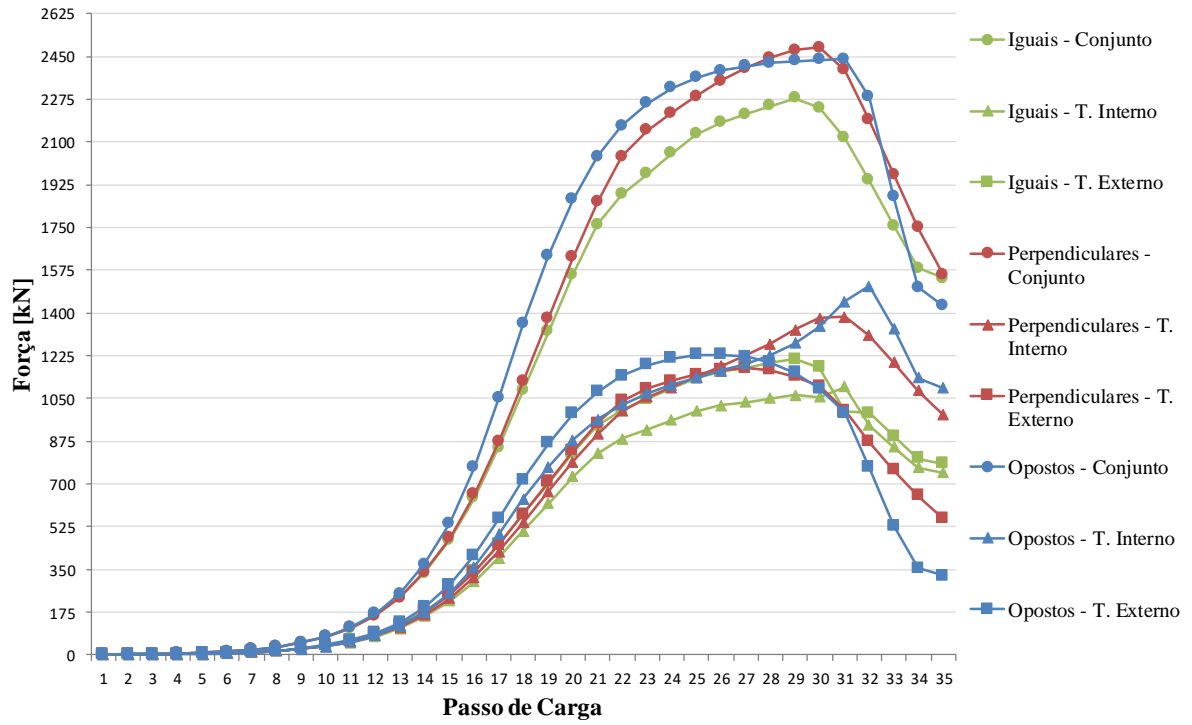


Figura 7.3. Grupo 1 - TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 200$) - travamentos fixos.

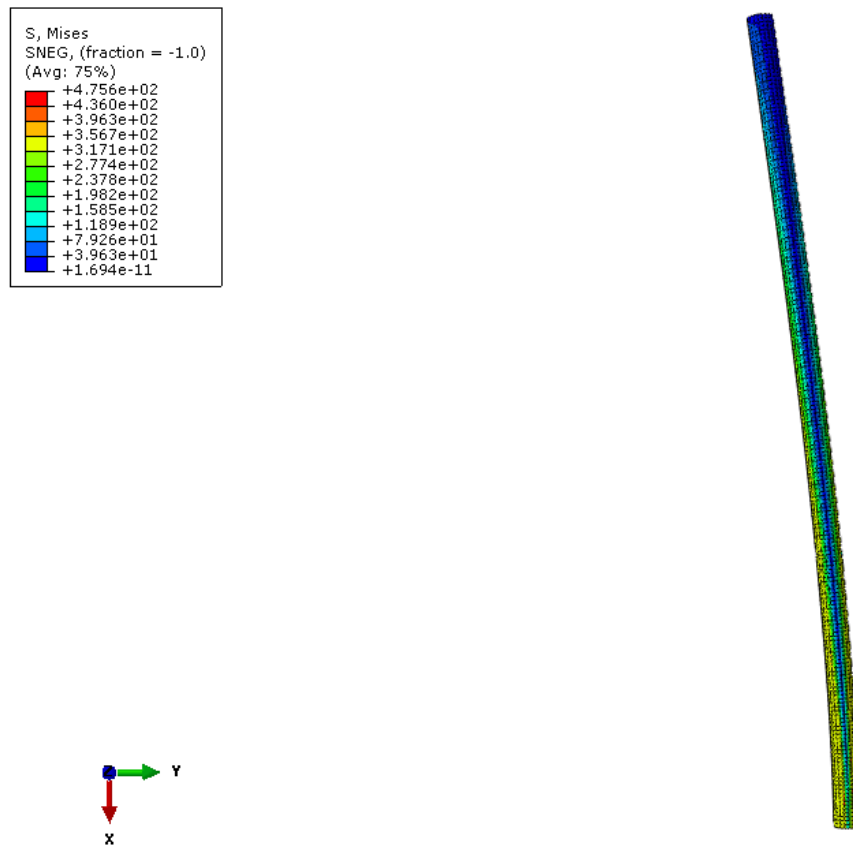


Figura 7.4. Passo de carga 35 - TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 200$) travamentos fixos - vista yx.

Nota-se, na Figura 7.5, que quanto maior a área da seção transversal do perfil interno, maior é sua capacidade resistente. Ao comparar os modelos com travamentos e sem travamentos, observa-se que, ao reduzir a esbeltez do conjunto, os comportamentos das curvas dos perfis vão se tornando semelhantes para imperfeições iniciais iguais. Entretanto, os conjuntos com travamentos apresentam maior capacidade resistente. Também foi observado que, nos modelos sem travamentos, os perfis resistiam isoladamente ao carregamento.

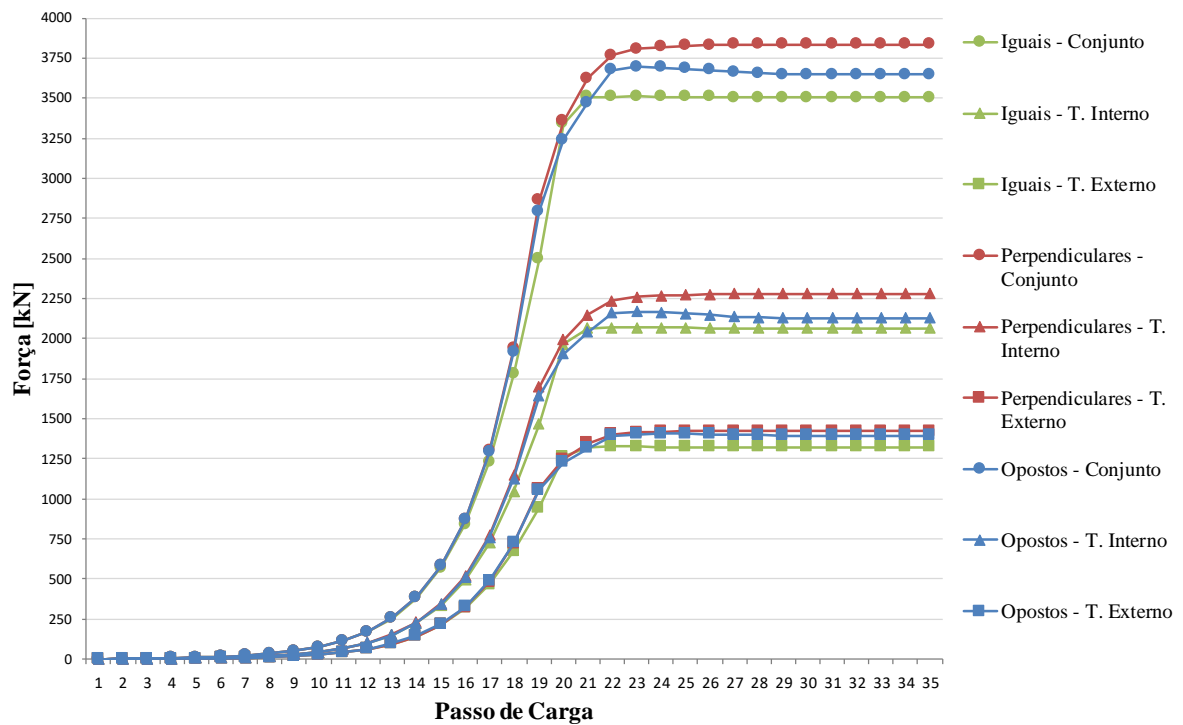


Figura 7.5. Grupo 3 - TC 114,0 x 25,0 + TC 219,0 x 6,4 ($\lambda = 50$) – sem travamentos.

Pode ser observado que os PTCCs que contêm perfis com áreas da seção transversal relativamente próximas exibem maior capacidade resistente, quando os perfis possuem imperfeições iniciais perpendiculares entre si. Quando as áreas dos perfis são diferentes, independente de qual seja a maior, se são os tubos externos ou internos, o conjunto apresenta maior capacidade resistente com imperfeições em sentidos opostos.

Os PTCCs com três tubos apresentam maior capacidade resistente, de maneira geral, para imperfeições iniciais dos perfis externos com sentidos opostos aos perfis interno e intermediário. As mesmas observações para os PTCCs com dois tubos são válidas para aqueles com três tubos, porém o ganho de capacidade resistente é adquirido para o perfil intermediário

com área da seção transversal semelhante ao perfil externo e imperfeição do mesmo oposta à dos demais, como pode ser visto na Figura 7.6.

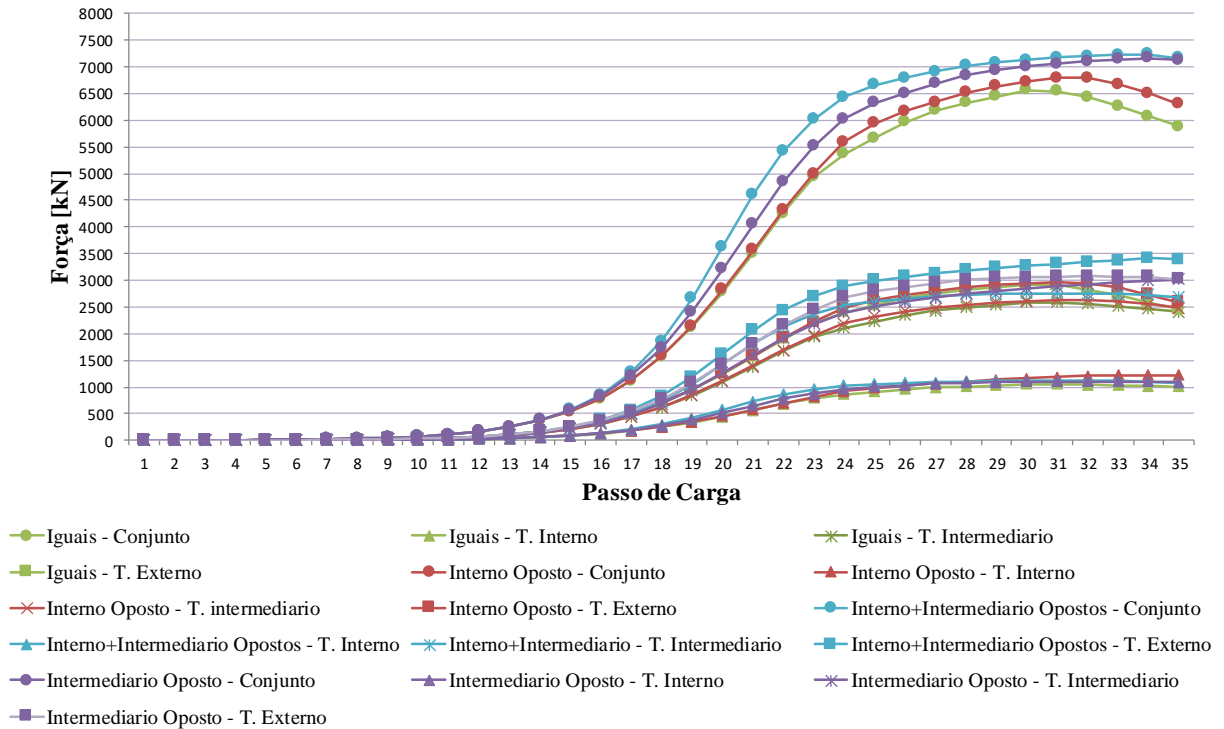


Figura 7.6. Grupo 6 - TC 168,3 x 20,0 + TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0 ($\lambda = 125$) - travamentos fixos.

Os resultados indicam, como era de se esperar, que os PTCCs formados por perfis com imperfeições no mesmo sentido possuem menor força resistente que nas demais situações. A formulação para o dimensionamento dos PTCCs considera a situação mais desfavorável, que é aquela em que as curvaturas iniciais estão no mesmo sentido. Obviamente, em situações que exigem uma maior força resistente, isso pode ser alcançado posicionando as curvaturas iniciais de cada perfil em posições opostas, embora, em termos práticos, garantir essa condição seja quase impossível.

8

CONCLUSÕES

8.1 Considerações Finais

O estudo experimental do comportamento de perfis tubulares circulares concêntricos (PTCCs) é importante para evidenciar sua eficiência quando solicitados à compressão centrada, considerando as situações reais. A possibilidade de viabilização do uso desses perfis tubulares compostos foi alcançada por meio de ensaios laboratoriais cujos resultados foram comparados com os estudos teórico e numérico. Assim, esse conceito inovador permite uma nova opção para engenheiros e arquitetos quando defrontados com situações em que se deseje utilizar perfis de aço laminados à quente, sem que haja alterações significativas no projeto.

8.2 Análise Experimental

O método desenvolvido para medição das imperfeições geométricas dos modelos foi eficiente e atingiu os objetivos desejados. Os dispositivos e a metodologia aplicados no ensaio de compressão axial foram adequados, levando a resultados aceitáveis para os modelos ensaiados.

A análise experimental dos modelos de perfis tubulares circulares concêntricos com dois e com três tubos resultou em forças última relativamente superiores aos valores teóricos e numéricos.

Pode-se verificar que, nos ensaios realizados com PTCCs com dois e três tubos, os modelos sem travamentos forneceram forças últimas semelhantes às dos conjuntos com travamentos. O conjunto com dois perfis e com travamentos deslizantes apresentou um resultado inferior ao da análise numérica. Isso pode ser explicado por diversos aspectos que influenciaram os ensaios, como as magnitudes e sentidos das curvaturas iniciais dos tubos de cada conjunto.

Os resultados indicam que, em PTCCs com relações geométricas similares às seções transversais dos tubos ensaiados: (a) um mesmo procedimento de projeto pode ser usado para as três condições de ligação entre os tubos, e (b) não há necessidade de se efetuar ligação entre os tubos ao longo do comprimento da barra composta, o que simplifica muito o processo de fabricação. É importante observar que essa conclusão não deve ser extrapolada para PTCCs compostos por perfis com relações geométricas diferentes das ensaiadas neste trabalho.

8.3 Modelos Numéricos

Para validação dos modelos numéricos calibrados utilizando como parâmetros o equacionamento previsto na norma ABNT NBR 16239:2013, foram realizadas simulações numéricas conforme os seis modelos de PTCCs ensaiados experimentalmente. Os resultados determinaram uma diferença inferior a 8,3% com relação os resultados obtidos pela análise experimental.

Pode-se inferir que os valores de força última teóricos determinados para os PTCCs utilizados nos ensaios foram sempre inferiores às das análises numérica e experimental. A formulação teórica engloba fatores que minoram, por questão de segurança, a força última dos perfis. Assim, nas análises numérica e experimental estes fatores não são considerados na definição da força última.

Os resultados da análise numérica foram coerentes com as respostas da análise experimental, apesar de algumas de suas divergências, isso evidenciou que o modelo numérico expõe o comportamento aproximado dos modelos reais. Assim, a calibração do modelo numérico é válida juntamente com a formulação teórica proposta.

8.4 Imperfeição Geométrica

A imperfeição geométrica influi diretamente na capacidade resistente da barra comprimida, tanto sua magnitude como seu sentido. Para os perfis tubulares circulares concêntricos, tem-se o inconveniente do posicionamento dos perfis e de sua curvatura inicial no processo de fabricação, podendo levar a maior ou menor força axial de compressão resistente.

Observou-se que PTCCs com perfis internos com sentido da curvatura inicial de sentido diferente ao do perfil externo possuem maior força resistente, fato que é mais significativo para maiores valores de esbeltez. Quando se diminui o valor da esbeltez, a interferência do sentido das curvaturas iniciais dos perfis na capacidade resistente do conjunto também se reduz. Os conjuntos com travamentos apresentam-se com forças bem distribuídas entre os perfis, diferentemente dos conjuntos sem travamentos. Entretanto, com esbeltez reduzida, isso se torna pouco evidente.

Pode-se verificar que, de maneira geral, os PTCCs com curvaturas iniciais no mesmo sentido possuem menor capacidade resistente, conforme era esperado. Isso ocorre porque nenhum tubo impõe resistência adicional ao sentido da instabilidade do conjunto.

8.5 Sugestões para Estudos Futuros

Para o complemento do estudo dos perfis tubulares circulares concêntricos, sugere-se que sejam realizados mais ensaios de força axial de compressão para uma gama maior e mais variada de seções transversais de perfis tubulares, variando-se também a esbeltez do conjunto.

Com o surgimento de uma nova opção de travamento, composições com travamentos fixos e sem travamentos entre os perfis ao longo do seu comprimento, é interessante realizar um estudo mais amplo de seu comportamento tanto experimental como numericamente.

Os perfis tubulares circulares concêntricos sem travamentos apresentaram um comportamento muito semelhante aos conjuntos com travamentos. Devido a esse fato, uma nova abordagem simplificada na formulação do dimensionamento de PTCCs com relações geométricas entre os perfis semelhantes às estudadas neste trabalho pode ser investigada.

9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: ANSI/AISC 360, 2005.

_____. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: ANSI/AISC 360, 2010.

_____. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: ANSI/AISC 360, 2016.

ARAÚJO, A. H. M.; REQUENA, J. A. V.; MINCHILLO, D. G. V.; THOMAZ, S. A. M. Projeto, Fabricação e Montagem de Estruturas – Seção Circular. Congresso Internacional da Construção Metálica. *Anais...* São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais Metálicos: Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente - NBR 6152*. São Paulo: ABNT, 2002.

_____. *Perfil Tubular, de Aço Carbono, Formado a Frio, com e sem Costura, de Seção Circular, Quadrada ou Retangular para Usos Estruturais - NBR 8261*. São Paulo: ABNT, 2010.

_____. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas e de Aço e Concreto de Edifícios - NBR 8800*. São Paulo: ABNT, 2008.

_____. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares - NBR 16239*. São Paulo: ABNT, 2013.

BEER, H.; SCHULZ, G. Bases Théoriques des Courbes Européennes de Flambement. *Construction Métallique*, v. 7, n. 3, p. 37-53, 1970.

BJORHOVDE, R. *Deterministic and Probabilistic Approaches to the Strength of Steel Columns*. Ph.D. Thesis - Department of Civil Engineering, Lehigh University, Bethlehem, 1972.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. *CAN/CSA-S16 Limit States Design of Steel Structures*. Ontario: Mississauga, 2005.

CASTRO E SILVA, A. L. R. *Análise Numérica Não-Linear da Flambagem Local de Perfis de Aço Estrutural Submetidos à Compressão Uniaxial*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CHEN, W. F.; LUI, E. M. L. *Structural Stability: Theory and Implementation*. 1ª ed. New York: Prentice-Hall, 1987.

CHERNENKO, D. E.; KENNEDY, D. J. L. An Analysis for the Performance of Welded Wide Flange Columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 537-555, 1991.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK. *Manual on Stability of Steel Structures*. 2ª ed. Zurich: ECCS, 1976.

EUROPEAN UNION PER REGULATION. *EN 1993-1-1: Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings - Eurocode 3*, 2005.

_____. *EN 1993-1-1: Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings - Eurocode 3*, 1992.

GALAMBOS, T. V. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. 5ª ed. New York: John Willey & Sons, 1998.

GRILO, L. F. *Estudo do Comportamento de Barras Compostas Comprimidas Formadas por Perfis Tubulares Circulares Concêntricos Laminados de Aço*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GRILO, L. F.; FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R.; RODRIGUES, F. C.; DALDEGAN, V. P.; ARAÚJO, A. H. M. *Comportamento e Projeto de Barras Compostas*

Formadas por Perfis Tubulares Circulares Concêntricos Laminados de Aço. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. *Anais...* São Paulo, 2016.

LAW, K. H.; GARDNER, L. Lateral Instability of Elliptical Hollow Section Beams. *Engineering Structures*, v. 37, p. 152-166, 2012.

PIMENTA, R. J. *Proposição de uma Curva de Flambagem para Perfis I Soldados Formados por Chapas Cortadas a Maçarico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

REIS, A.; CAMOTIM, D. *Estabilidade Estrutural*. 1ª Ed. MacGraw-Hill.

SIMULIA, D. S. *ABAQUS 6.13 User's manual*. Dassault Systems, Providence, RI, 2013

TIDE, R. H. R. A Technical Note: Derivation of the LRFD Column Design Equations. *Engineering Journal*, v. 40, n. 3, p. 177-178, 2001.



APÊNDICE A

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DOS TUBOS DE AÇO SEM COSTURA LAMINADOS A QUENTE

A.1 Introdução

De acordo com o discutido no Capítulo 4 – Análise Experimental –, os resultados das propriedades mecânicas do aço dos tubos utilizados nos modelos ensaiados foram obtidos através dos relatórios de inspeção fornecidos pela Vallourec Tubos do Brasil. Para cada tubo, há um relatório com as suas devidas descrições e resultados de inspeção.

A.2 Tubo – 73,0 mm x 3,6 mm

 <p>Vallourec Tubos do Brasil S.A. Av. Olinto Meireles, 65 Barreiro de Baixo 30640-010 - Belo Horizonte - MG FONE: (31)33282121 FAX: 3133334471</p>		<p>DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0 - Entrada 1 - Saída <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Nº 000.420.819 - Série: 1 FL 1/1</p>		 <p>CHAVE DE ACESSO 3114 0817 1701 5000 0146 5500 1000 4208 1910 5850 0453</p> <p>Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora</p>																													
NATUREZA DA OPERAÇÃO Remessa de amostra grátis		PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 131141522469960 20.08.2014 22:59:18																															
INSCRIÇÃO ESTADUAL 062.000051.0083		INSC. EST. DO SUBST. TRIBUT.		CNPJ 17.170.150/0001-46																													
DESTINATÁRIO / REMETENTE																																	
Nome / Razão Social BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS S A			CNPJ/CPF 77.153.773/0004-85		DATA EMISSÃO 20.08.2014																												
ENDEREÇO AV. BRASIL 49691		BAIRRO/DISTRITO PACIENCIA		CEP 23065-480	DATA DA SAÍDA/ENTRADA 20.08.2014																												
MUNICÍPIO RIO DE JANEIRO		FONE/FAX 21 32183600	UF RJ	INSCRIÇÃO ESTADUAL 78.418.96-6	HORA DA SAÍDA 22:59:10																												
FATURA																																	
VENCIMENTO ***** ***** ***** *****		VALOR ***** ***** ***** *****																															
VALOR POR EXTENSO (UM MIL OITOCENTOS E NOVE REAIS E QUARENTA E CINCO CENTAVOS.)																																	
O PAGAMENTO APÓS O VENCIMENTO IMPORTARÁ EM ENCARGOS FINANCEIROS A RAZÃO DE 4% A.M., CALCULADOS PRÓ-RATA DIA, SISTEMA DE JUROS SIMPLES, TENDO COMO BASE O MÊS DE 30 DIAS.																																	
CÁLCULO DE IMPOSTOS																																	
B.C. ICMS 1.809,45		VALOR DO ICMS 217,13		B.C. DO ICMS SUBSTITUIÇÃO *****																													
VALOR DO FRETE *****		VALOR DO SEGURO *****		VALOR TOTAL PRODUTOS 1.809,45																													
DESCONTO *****		OUTRAS DESPESAS *****		VALOR DO IPI *****																													
VALOR TOTAL DA NOTA 1.809,45																																	
TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS																																	
RAZÃO SOCIAL TORA TRANSPORTES INDUSTRIAIS			FRETE POR CONTA 0 - Emitente <input checked="" type="checkbox"/>	CÓD ANT 0	PLACA VEÍCULO JQQ-4658																												
ENDEREÇO AV APIO CARDOSO 20			MUNICÍPIO CONTAGEM		UF MG																												
QUANTIDADE 00001	ESPÉCIE Tonelada	MARCA	NUMERAÇÃO	PESO BRUTO 534,000	PESO LÍQUIDO 534,000																												
CNPJ 20.468.310/0001-42	INSCR. ESTADUAL 186624007.09-82																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>COD. PROD.</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>NCM/SH</th> <th>CST</th> <th>CFOP</th> <th>JNID</th> <th>QTD.</th> <th>V.UNITÁRIO</th> <th>VALOR TOTAL</th> <th>B.C.ICMS</th> <th>VALOR ICMS</th> <th>VALOR IPI</th> <th>ICMS</th> <th>IPI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>396089</td> <td>Tubos de aço s/cost. SL Construção 0013027084 - 73x 3,6 /MB350COR 8000-13000 PL</td> <td>73089010</td> <td>000</td> <td>5911</td> <td>TN</td> <td>0,534</td> <td>3.388,48</td> <td>1.809,45</td> <td>1.809,45</td> <td>217,13</td> <td>12,00</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	CST	CFOP	JNID	QTD.	V.UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI	396089	Tubos de aço s/cost. SL Construção 0013027084 - 73x 3,6 /MB350COR 8000-13000 PL	73089010	000	5911	TN	0,534	3.388,48	1.809,45	1.809,45	217,13	12,00		
COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	CST	CFOP	JNID	QTD.	V.UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI																				
396089	Tubos de aço s/cost. SL Construção 0013027084 - 73x 3,6 /MB350COR 8000-13000 PL	73089010	000	5911	TN	0,534	3.388,48	1.809,45	1.809,45	217,13	12,00																						
DADOS ADICIONAIS																																	
PEDIDO USINA: 0000367164/30	CERTIFICADO: 0050640027-	PEDIDO CLIENTE: E-mail Iara 31/07/2014-0	MATERIAL: 396089	TOTAL PECAS: 0000000008	TOT.METROS 85,30	TOTAL PES 0,00	MAPA: 919133																										
<p>* COFINS - OUTRAS OPERAÇÕES ENTRADA/SAÍDA * PIS - Outras Operações Entrada/Saída * Vr unit p/cálculo = 3388,463146 POR TN * Doc. Fat. 0091171390 * Frete: ICMS relativo à prestação de responsabilidade do alienante/remetente</p>				RESERVADO AO FISCO																													



Vallourec Tubos do Brasil S.A.
 USINA BARREIRO - Belo Horizonte - MG - Brasil
 CEP: 30161-970 - Caixa Postal: 1453



Certificado de Inspeção

(De acordo com DIN EN 10204.3.1)

N°.: 0050640027

Folhas: 1 / 2

Cliente: BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS S A

País: Brasil

Cod.Material: 396089

Pedido Usina: 367164 / 30

Pedido Cliente: E-mail lara.31/07/2014

Inspeção: VALLOUREC TUBOS DO BRASIL S.A.

PRODUTO: TUBO DE AÇO SEM COSTURA, LAMINADO À QUENTE, PONTA LISA, LAMINADO

DIMENSÕES: 73,00 mm X 3,60 mm GRAU DO AÇO: VMB 350 COR

NORMAS: DIMENSIONAL: ASTM A 501 - 07

PROTEÇÃO SUPERFICIAL: EXTERNA: SEM PROTEÇÃO DE PONTAS; S/ PROTEÇÃO

TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): -0,730 mm / +0,730 mm PAREDE: -0,450 mm / +0,540 mm

COMPRIMENTO: FAIXA 8000,00 mm - 13000,00 mm

Corrida	Amarrado	Peças	Comprimento(m)	Peso (Kgf)
124800	0013027084	8	85,30	534
		8	85,30	534
Total				534

T. S. J. - R. J.

O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTES TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE DE CORRENTES PARASITAS : COM TESTE DE EDDY-CURRENT #

Composição Química (%)

Processo: Forno básico a oxigênio, aço acalmado

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb			
Análise de Corrida	Min	0,500			0,150		0,400		0,250				
	Max	0,180	0,030	0,030	0,400	0,400	0,650	0,100	0,500	0,060			
Corrida	Lote Controle	124800	03000272622	0,12	0,96	0,019	0,003	0,28	0,11	0,54	0,02	0,320	0,031

Ensaio de Tração

Direção do Corpo Prova: Longitudinal

Temperatura: Ambiente

Medida L₀: L₀=50MM

	Tempo de Prova	Área (MM2)	LE (MPA)	RT (MPA)	AL (%)
Especificado: Min			350	485	20
Max					
Corrida	Lote Controle				
124800	03000272622	TIRA LARGURA 19,05 MM	450	539	36

Mário Alberto Mendes
 Inspetor de Soldagem Nível 2
 FBTS IS0064N2

LE-Limite de Escoramento; RT-Resistência a Tração; AL-Alongamento;

Observações:

NOTA FISCAL: 000420819

TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS CONFORME ASTM A 500, EXCETO TOLERÂNCIA DE PAREDE QUE É CONFORME INDICADO



ISO 9001
 ISO 14001
 OHSAS 18001
 ISO 50001
 BUREAU VERITAS
 Certification





Certificado de Inspeção
 (De acordo com DIN EN 10204.3.1)
 N°.: 0050640027
 Folha: 2 / 2

Mário Alberto Mendes
 Inspetor de Soldagem Nível 2
 FBTS IS0064N2

<p>Certificamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências destas normas e especificações, e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado é processado por sistema informatizado e é válido sem assinatura.</p>	<p>DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE FAX: (31) 3328-2575 e-mail: luiz.silva@vallourec.com</p>	<p>DATA 20.08.2014</p>
<p>ENG. LUIZ FERNANDO DA SILVA - OREA NS-88834-D RESPONSÁVEL TÉCNICO</p>		

TUBOS VERDES: Os tubos da Vallourec do Brasil S.A. são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o carvão vegetal como fonte de energia. Este processo e o acúmulo de mais de 100,000 ha de florestas plantadas pela Vallourec Florestal Ltda.. Com a aquisição de 0,5 tonelada(s) de tubo de aço da Vallourec do Brasil S.A., sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 0,9 tonelada(s) de CO2 na atmosfera.

A.3 Tubo – 114,3 mm x 4,5 mm

 <p>Vallourec Tubos do Brasil S.A. Av. Olinto Meireles, 65 Barreiro de Baixo 30640-010 - Belo Horizonte - MG FONE: (31)33282121 FAX: 313334471</p>		<p>DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0 - Entrada 1 - Saída <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Nº 000.420.817 - Série: 1 FL 1/1</p>		 <p>CHAVE DE ACESSO 3114 0817 1701 5000 0146 5500 1000 4208 1710 5806 1706</p> <p>Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora</p>																													
NATUREZA DA OPERAÇÃO Remessa de amostra grátis		PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 131141522469777 20.08.2014 22:58:44																															
INSCRIÇÃO ESTADUAL 062.000051.0083		INSC. EST. DO SUBST. TRIBUT.		CNPJ 17.170.150/0001-46																													
DESTINATÁRIO / REMETENTE																																	
Nome / Razão Social BRAFER CONSTRUCOES METALICAS S A			CNPJ/CPF 77.153.773/0004-85		DATA EMISSÃO 20.08.2014																												
ENDEREÇO AV. BRASIL 49691		BAIRRO/DISTRITO PACIENCIA		CEP 23065-480	DATA DA SAIDA/ENTRADA 20.08.2014																												
MUNICÍPIO RIO DE JANEIRO		FONE/FAX 21 32183600	UF RJ	INSCRIÇÃO ESTADUAL 78.418.96-6	HORA DA SAIDA 22:58:36																												
FATURA																																	
VENCIMENTO ***** 08 *****		VALOR ***** 362,31 *****																															
VALOR POR EXTENSO (TRÊS MIL E DEZENOVE REAIS E VINTE E NOVE CENTAVOS.) O PAGAMENTO APÓS O VENCIMENTO IMPORTARÁ EM ENCARGOS FINANCEIROS A RAZÃO DE 4% A.M., CALCULADOS PRÓ-RATA DIA, SISTEMA DE JUROS SIMPLES, TENDO COMO BASE O MÊS DE 30 DIAS.																																	
CÁLCULO DE IMPOSTOS																																	
B.C. ICMS 3.019,29		VALOR DO ICMS 362,31		VALOR TOTAL PRODUTOS 3.019,29																													
VALOR DO FRETE *****		VALOR DO SEGURO *****		VALOR TOTAL DA NOTA 3.019,29																													
TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS																																	
RAZÃO SOCIAL TORA TRANSPORTES INDUSTRIAIS			FRETE POR CONTA 0 - Emitente <input checked="" type="checkbox"/>	CÓD ANT 0	PLACA VEÍCULO JQQ-4658																												
ENDEREÇO AV APIO CARDOSO 20			MUNICÍPIO CONTAGEM		UF MG																												
QUANTIDADE 00001	ESPÉCIE Tonelada	MARCA	NUMERAÇÃO	PESO BRUTO 958,000	PESO LÍQUIDO 958,000																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>COD. PROD.</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>NCM/SH</th> <th>GST</th> <th>CFOP</th> <th>UNID</th> <th>QTD.</th> <th>V.UNITÁRIO</th> <th>VALOR TOTAL</th> <th>B.C.ICMS</th> <th>VALOR ICMS</th> <th>VALOR IPI</th> <th>ICMS</th> <th>IPI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>389483</td> <td>Tubos de aço s/const. SL Construção 0012990131 - 114,3x 4,4 /MB350COR 6000-13000 PL</td> <td>73089010</td> <td>000</td> <td>5911</td> <td>TN</td> <td>0,958</td> <td>3.151,66</td> <td>3.019,29</td> <td>3.019,29</td> <td>362,31</td> <td></td> <td>12,00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Seja OK</i> <i>Data: 21-08-2014</i></p> <p><i>10/2014</i></p>						COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	GST	CFOP	UNID	QTD.	V.UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI	389483	Tubos de aço s/const. SL Construção 0012990131 - 114,3x 4,4 /MB350COR 6000-13000 PL	73089010	000	5911	TN	0,958	3.151,66	3.019,29	3.019,29	362,31		12,00	
COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	GST	CFOP	UNID	QTD.	V.UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI																				
389483	Tubos de aço s/const. SL Construção 0012990131 - 114,3x 4,4 /MB350COR 6000-13000 PL	73089010	000	5911	TN	0,958	3.151,66	3.019,29	3.019,29	362,31		12,00																					
DADOS ADICIONAIS																																	
PEDIDO USINA: 0000367164/10	CERTIFICADO: 0050640025-	PEDIDO CLIENTE: E-mail lara 31/07/2014-0	MATERIAL: 389483	TOTAL PECAS: 000000008	TOT.METROS 79,10	TOTAL PES 0,00	MAPA: 919133																										
<p>* COFINS - OUTRAS OPERAÇÕES ENTRADA/SAÍDA * PIS - Outras Operações Entrada/Saída * Vr unit p/cálculo = 3151,659708 POR TN * Doc. Fat. 0091171388 * Frete: ICMS relativo à prestação de responsabilidade do alienante/remetente</p>						RESERVADO AO FISCO																											



Vallourec Tubos do Brasil S.A.
USINA BARREIRO - Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP: 30161-970 - Caixa Postal: 1453



Certificado de Inspeção
(De acordo com DIN EN 10204.3.1)
N°.: 0050640025

Folha: 1 / 2

Cliente: BRAPER CONSTRUÇÕES METÁLICAS S A

País: Brasil

Cod.Material: 389483
Pedido Usina: 367164 / 10
Pedido Cliente: E-mail lara 31/07/2014

Inspeção: VALLOUREC TUBOS DO BRASIL S.A.

PRODUTO: TUBO DE AÇO SEM COSTURA, LAMINADO À QUENTE, PONTA LISA, LAMINADO
DIMENSÕES: 114,30 mm X 4,40 mm GRAU DO AÇO: VMB 350 COR
NORMAS: DIMENSIONAL: ASTM A 501 - 07
PROTEÇÃO SUPERFICIAL: EXTERNA: SEM PROTEÇÃO DE PONTAS: S/ PROTEÇÃO
TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): -1,143 mm / +1,143 mm PAREDE: -0,550 mm / +0,660 mm
COMPRIMENTO: FAIXA 8000,00 mm - 13000,00 mm

Corrida	Amarrado	Peças	Comprimento(m)	Peso (Kgf)
121861	0012990131	8	79,10	958
		8	79,10	958
	Total			

T. 569-12J

9.3.00

O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTE TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE ELETROMAGNÉTICO : ASTM E 570 #

Composição Química (%) Processo: Forno básico a oxigênio, aço acalmado

Análise de Corrida	Min	Max	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb
	0,500	1,300	0,030	0,030	0,030	0,400	0,400	0,400	0,650	0,100	0,500	0,060
Corrida	121861	03000226141	0,13	0,96	0,019	0,002	0,32	0,12	0,55	0,05	0,300	0,034

Ensaio de Tração

Direção do Corpo Prova: Longitudinal	Temperatura: Ambiente	Medida L0: L0=50MM	
		Área (MM2)	LE (MPA)
Corpo de Prova		RT (MPA)	AL (%)
Especificado: Min		350	485
Max		122,8	572
Corrida	Lote Controle	TIRA LARGURA 25,4 MM	34
121861	03000226141		

LE-Limite de Escoramento; RT-Resistência a Tração; AL-Alongamento;

Observações:

NOTA FISCAL: 000420817

TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS CONFORME ASTM A 500, EXCETO TOLERÂNCIA DE PAREDE QUE É CONFORME INDICADO

Mário Alberto Mendes
Inspetor de Soldagem Nível 4
FBTS ISO9004:2012



ISO 9001
ISO 14001
ISO/TS 16949
ISO 50001
BUREAU VERITAS
CERTIFICADO



Certificado de Inspeção
(De acordo com DIN EN 10204.3.1)
Folha: 2 / 2

Nº.: 0050640025

Mário Alberto Mendes
Inspetor de Soldagem Nível 2
FBTS IS0054N2

DATA
20.08.2014



ENG. LUIZ FERNANDO DA SILVA - 07674163-0
RESPONSÁVEL TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE
FAX: (31) 3328-2575
e-mail: luiz.silva@vallourec.com

Certificamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências destas normas e especificações, e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado é processado por sistema informatizado e é válido sem assinatura.

TUBOS VERDES: Os tubos da Vallourec do Brasil S.A. são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o carvão vegetal como fonte de energia. Este aço é oriundo de mais de 100.000 ha de florestas plantadas pela Vallourec Florestal Ltda.. Com a aquisição de 1,0 tonelada(s) de tubo de aço da Vallourec do Brasil S.A., sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 1,8 tonelada(s) de CO2 na atmosfera.

A.4 Tubo – 141,3 mm x 5,0 mm

 <p>Vallourec Tubos do Brasil S.A. Av. Olinto Meireles, 65 Barreiro de Baixo 30640-010 - Belo Horizonte - MG FONE: (31)33282121 FAX: 313334471</p>		<p>DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica</p> <p>0 - Entrada 1 - Saída <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Nº 000.420.818 - Série: 1 FL 1/1</p>																																													
<p>CHAVE DE ACESSO 3114 0817 1701 5000 0146 5500 1000 4208 1810 5831 2420</p> <p>Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora</p>																																															
<p>NATUREZA DA OPERAÇÃO Remessa de amostra grátis</p>		<p>PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 131141522469878 20.08.2014 22:58:56</p>																																													
<p>INSCRIÇÃO ESTADUAL 062.000051.0083</p>		<p>INSC. EST. DO SUBST. TRIBUT.</p>		<p>CNPJ 17.170.150/0001-46</p>																																											
<p>DESTINATÁRIO / REMETENTE</p>																																															
<p>Nome / Razão Social BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS S A</p>			<p>CNPJ/CPF 77.153.773/0004-85</p>		<p>DATA EMISSÃO 20.08.2014</p>																																										
<p>ENDEREÇO AV. BRASIL 49691</p>		<p>BAIRRO/DISTRITO PACIENCIA</p>		<p>CEP 23065-480</p>	<p>DATA DA SAIDA/ENTRADA 20.08.2014</p>																																										
<p>MUNICÍPIO RIO DE JANEIRO</p>		<p>FONE/FAX 21 32183600</p>	<p>UF RJ</p>	<p>INSCRIÇÃO ESTADUAL 78.418.95-6</p>	<p>HORA DA SAIDA 22:58:51</p>																																										
<p>FATURA</p>																																															
<p>VENCIMENTO ***** ***** ****</p>		<p>VALOR ***** ***** *****</p>		<p>VALOR POR EXTENSO (QUATRO MIL OITOCENTOS E VINTE E UM REAIS E SETENTA E UM CENTAVOS.) O PAGAMENTO APÓS O VENCIMENTO IMPORTARÁ EM ENCARGOS FINANCEIROS A RAZÃO DE 4% A.M., CALCULADOS PRÓ-RATA DIA, SISTEMA DE JUROS SIMPLES, TENDO COMO BASE O MÊS DE 30 DIAS.</p>																																											
<p>CÁLCULO DE IMPOSTOS</p>																																															
<p>B.C. ICMS 4.821,71</p>		<p>VALOR DO ICMS 578,61</p>	<p>B.C. DO ICMS SUBSTITUIÇÃO *****</p>		<p>VLR.ICMS SUBSTITUIÇÃO *****</p>																																										
<p>VALOR DO FRETE *****</p>		<p>VALOR DO SEGURO *****</p>	<p>DESCONTO *****</p>	<p>OUTRAS DESPESAS *****</p>	<p>VALOR DO IPI *****</p>																																										
					<p>VALOR TOTAL PRODUTOS 4.821,71</p>																																										
					<p>VALOR TOTAL DA NOTA 4.821,71</p>																																										
<p>TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS</p>																																															
<p>RAZÃO SOCIAL TORA TRANSPORTES INDUSTRIAIS</p>			<p>FRETE POR CONTA 0 - Emitente <input checked="" type="checkbox"/></p>	<p>CÓD ANTT</p>	<p>PLACA VEÍCULO JQQ-4658</p>																																										
<p>ENDEREÇO AV APOIO CARDOSO 20</p>			<p>MUNICÍPIO CONTAGEM</p>		<p>UF MG</p>																																										
<p>QUANTIDADE 00002</p>			<p>ESPÉCIE Tonelada</p>	<p>MARCA</p>	<p>NUMERAÇÃO</p>																																										
					<p>PESO BRUTO 1.500,000</p>																																										
					<p>PESO LÍQUIDO 1.500,000</p>																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>COD. PROD.</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>NCM/SH</th> <th>CST</th> <th>CFOP</th> <th>UNID</th> <th>QTD.</th> <th>V.JUNITÁRIO</th> <th>VALOR TOTAL</th> <th>B.C.ICMS</th> <th>VALOR ICMS</th> <th>VALOR IPI</th> <th>ICMS</th> <th>IPI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>396148</td> <td>Tubos de aço a/cost. SL Construção 0013062983 - 141,3x 5</td> <td>73089010</td> <td>000</td> <td>9911</td> <td>TN</td> <td>0,624</td> <td>3.214,47</td> <td>2.005,63</td> <td>2.005,63</td> <td>240,70</td> <td></td> <td>12,00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>396148</td> <td>0013062988 - 141,3x 5 VMB350COR 5000-MULT PL</td> <td>73089010</td> <td>000</td> <td>9911</td> <td>TN</td> <td>0,876</td> <td>3.214,47</td> <td>2.815,88</td> <td>2.815,88</td> <td>337,91</td> <td></td> <td>12,00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	CST	CFOP	UNID	QTD.	V.JUNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI	396148	Tubos de aço a/cost. SL Construção 0013062983 - 141,3x 5	73089010	000	9911	TN	0,624	3.214,47	2.005,63	2.005,63	240,70		12,00		396148	0013062988 - 141,3x 5 VMB350COR 5000-MULT PL	73089010	000	9911	TN	0,876	3.214,47	2.815,88	2.815,88	337,91		12,00	
COD. PROD.	DESCRIÇÃO	NCM/SH	CST	CFOP	UNID	QTD.	V.JUNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.C.ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ICMS	IPI																																		
396148	Tubos de aço a/cost. SL Construção 0013062983 - 141,3x 5	73089010	000	9911	TN	0,624	3.214,47	2.005,63	2.005,63	240,70		12,00																																			
396148	0013062988 - 141,3x 5 VMB350COR 5000-MULT PL	73089010	000	9911	TN	0,876	3.214,47	2.815,88	2.815,88	337,91		12,00																																			
<p><i>5ca-OK</i></p>																																															
<p>DADOS ADICIONAIS</p>																																															
<p>PEDIDO USINA: 0000367164/20</p>	<p>CERTIFICADO: 0050640026-</p>	<p>PEDIDO CLIENTE: E-mail Iara 31/07/2014-0</p>	<p>MATERIAL: 396148</p>	<p>TOTAL PECAS: 0000000012</p>	<p>TOT.METROS 87,88</p>																																										
					<p>TOTAL PES 0,00</p>																																										
					<p>MAPA: 919133</p>																																										
<p>* COFINS - OUTRAS OPERAÇÕES ENTRADA/SAÍDA * PIS - Outras Operações Entrada/Saída * Vr unit gicálculo = 3214,47333 POR TN * Doc. Fat. 0091171389 * Frete: ICMS relativo à prestação de responsabilidade do alienante/remetente</p>				<p>RESERVADO AO FISCO</p>																																											



Vallourec Tubos do Brasil S.A.
USINA BARREIRO - Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP: 30161-970 - Caixa Postal: 1453



Certificado de Inspeção

(De acordo com DIN EN 10204.3.1)

N°.: 0050640026

Folha: 1 / 2

Cliente: BRAFER CONSTRUÇÕES METÁLICAS S A

País: Brasil

Cod.Material: 396148

Pedido Usina: 367164 / 20

Pedido Cliente: E-mail Iara 31/07/2014

Inspeção: VALLOUREC TUBOS DO BRASIL S.A.

PRODUTO: TUBO DE AÇO SEM COSTURA, LAMINADO À QUENTE, PONTA LISA, LAMINADO
DIMENSÕES: 141,30 mm X 5,00 mm GRAU DO AÇO: VMB 350 COR

NORMAS: DIMENSIONAL: ASTM A 501 - 07

PROTEÇÃO SUPERFICIAL: EXTERNA: SEM PROTEÇÃO DE PONTAS; S/ PROTEÇÃO

TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): -1,413 mm / +1,413 mm PAREDE: -0,625 mm / +0,750 mm

COMPRIIMENTO: MULTIPLO 5000,00 mm TOLERÂNCIAS: -0,00 mm \ +100,00 mm

Corrida	Amarrado	Peças	Comprimento(m)	Peso (Kgf)
121425	0013062983	7 ✓	36,56	624
	0013062988	5 ✓	51,32	876
		12	87,88	1500
	Total			

T. 570-RJ

O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTES TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE ELETROMAGNÉTICO : ASTM E 570 #

Composição Química (%)

Processo: Forno básico a oxigênio, aço aacidado

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb			
Análise de Corrida	Min	0,500			0,150		0,400		0,250				
	Max	1,300	0,030	0,030	0,400	0,400	0,650	0,100	0,500	0,060			
Corrida	Lote Controle	121425	03000272444	0,12	0,95	0,018	0,004	0,28	0,15	0,56	0,03	0,520	0,032

Mário Alberto Mendes
Inspetor de Soldagem Nível 2
FRTS ISRO64N2

Ensaio de Tração

Direção do Corpo Prova: Longitudinal

Temperatura: Ambiente

Corpo de Prova

Especificado: Min
Max

Medida L0: L0=50MM	Área (MM2)	LE (MPA)	RT (MPA)	AL (%)
350	125,9	485	549	20

Corrida Lote Controle
121425 03000272444

TIRA LARGURA 25,4 MM

38

LE-Limite de Escoramento; RT-Resistência a Tração; AL-Alongamento;

Observações:

NOTA FISCAL: 000420818

TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS CONFORME ASTM A 500, EXCETO TOLERÂNCIA DE PAREDE QUE É CONFORME INDICADO



ISO 9001
ISO 14001
SISTEMAS DE
GESTÃO DE
QUALIDADE
E AMBIENTE
CERTIFICADO



Certificado de Inspeção
(De acordo com DIN EN 10204.3.1)
Nº.: 0050640026 Folha: 2 / 2

Mário Alberto Mendes
Inspetor de Soldagem Nível 2
FBTS IS0064N2

<p>Certificamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências destas normas e especificações, e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado é processado por sistema informatizado e é válido sem assinatura.</p>	<p>DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE FAX: (31) 3328-2575 e-mail: luiz.silve@vallourec.com</p>	<p>DATA 20.08.2014</p> <p><i>Luiz Fernando da Silva</i> ENGR. LUIZ FERNANDO DA SILVA - 07874163-0 RESPONSÁVEL TÉCNICO</p>
---	---	---

TUBOS VERDES: Os tubos da Vallourec do Brasil S.A. são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o carvão vegetal como fonte de energia. Este aço é oriundo de mais de 100,000 ha de florestas plantadas pela Vallourec Florestal Ltda.. Com a aquisição de 1,5 tonelada(s) de tubo de aço da Vallourec do Brasil S.A., sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 2,7 tonelada(s) de CO2 na atmosfera.

APÊNDICE B

CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS NOS PERFIS

B.1 Introdução

De acordo com o discutido no Capítulo 7 – Análise das Imperfeições Geométricas –, foram traçados gráficos de distribuição da força nos perfis que compõe os PTCCs ao longo dos passos de carga comparados com os sentidos das curvaturas iniciais destes. A seguir, são apresentados os gráficos dos modelos processados.

B.2 Grupo 1 - TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 x 25,0

a) Travamentos Fixos

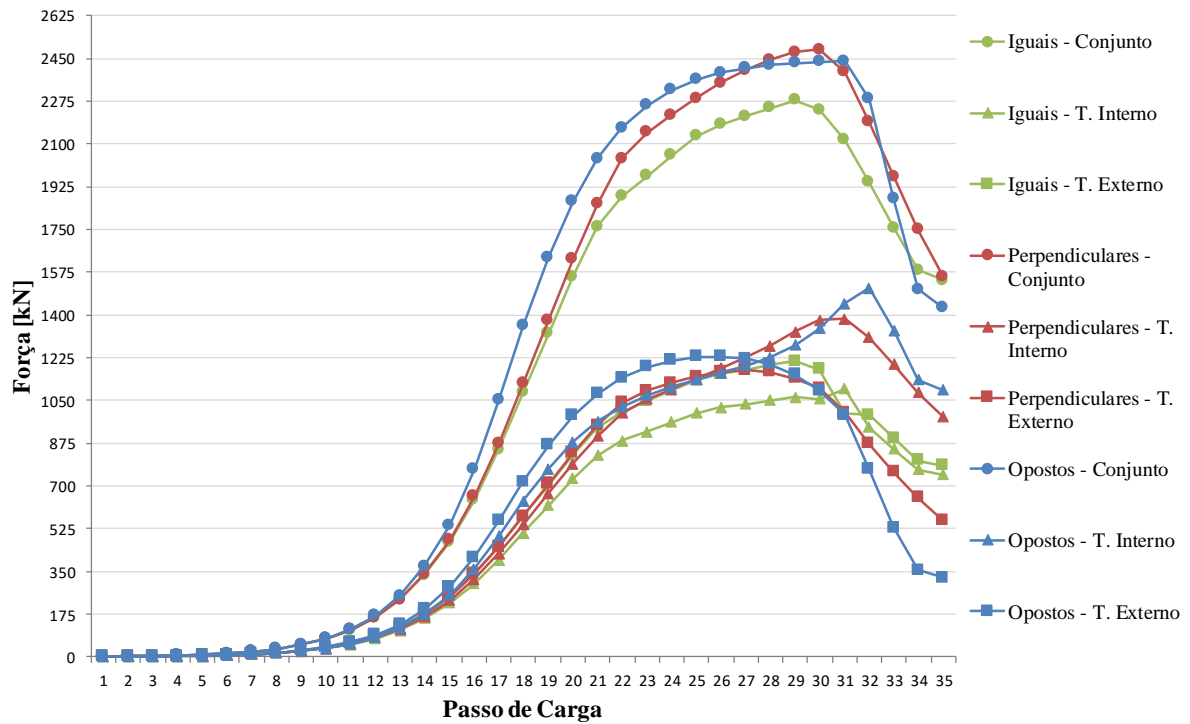


Figura B.1. Grupo 1 - Modelos 1 a 3 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

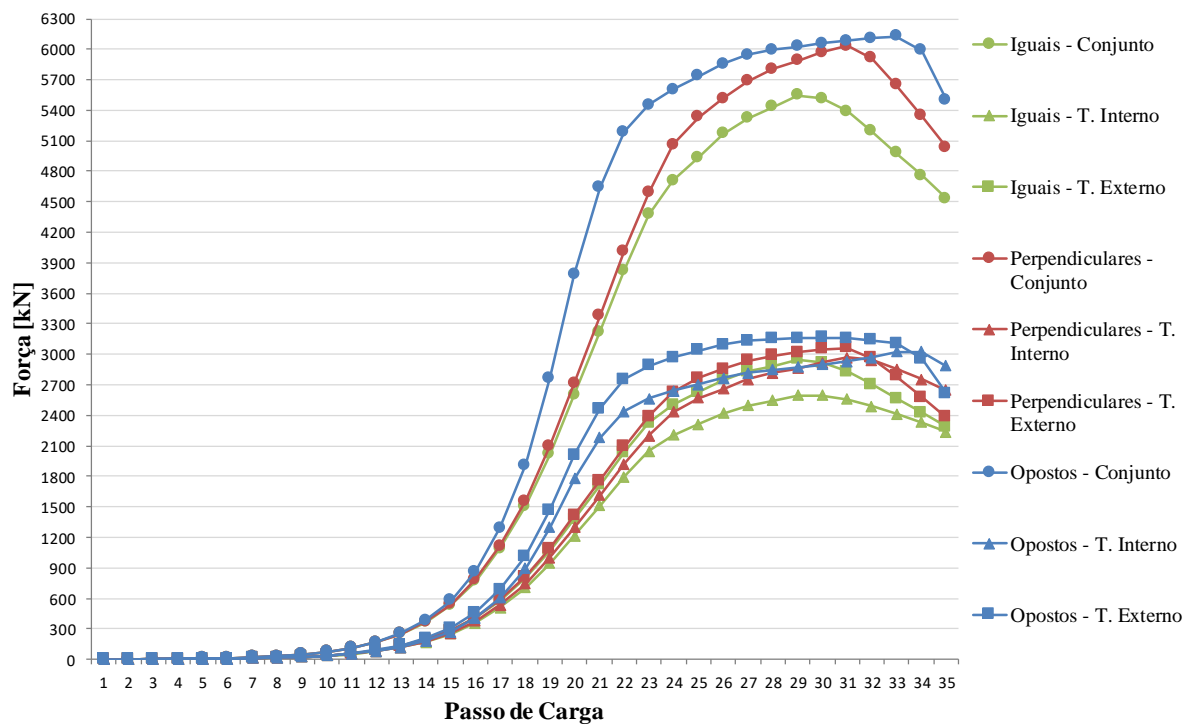


Figura B.2. Grupo 1 - Modelos 4 a 6 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

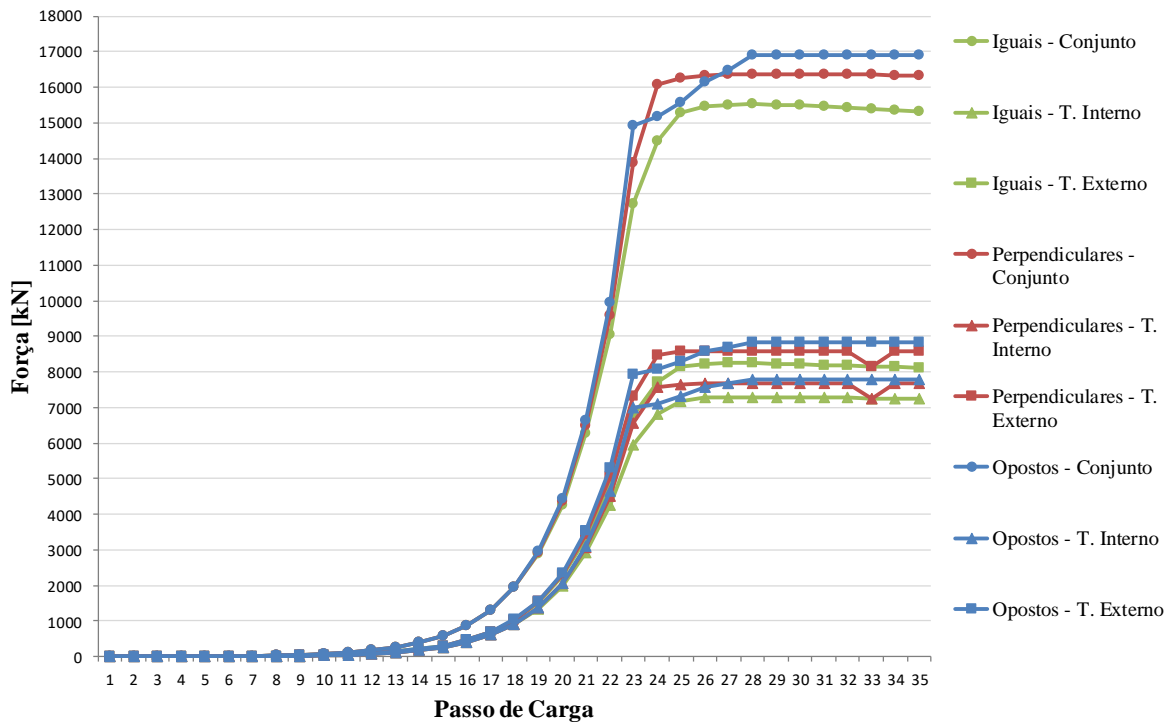


Figura B.3. Grupo 1 - Modelos 7 a 9 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

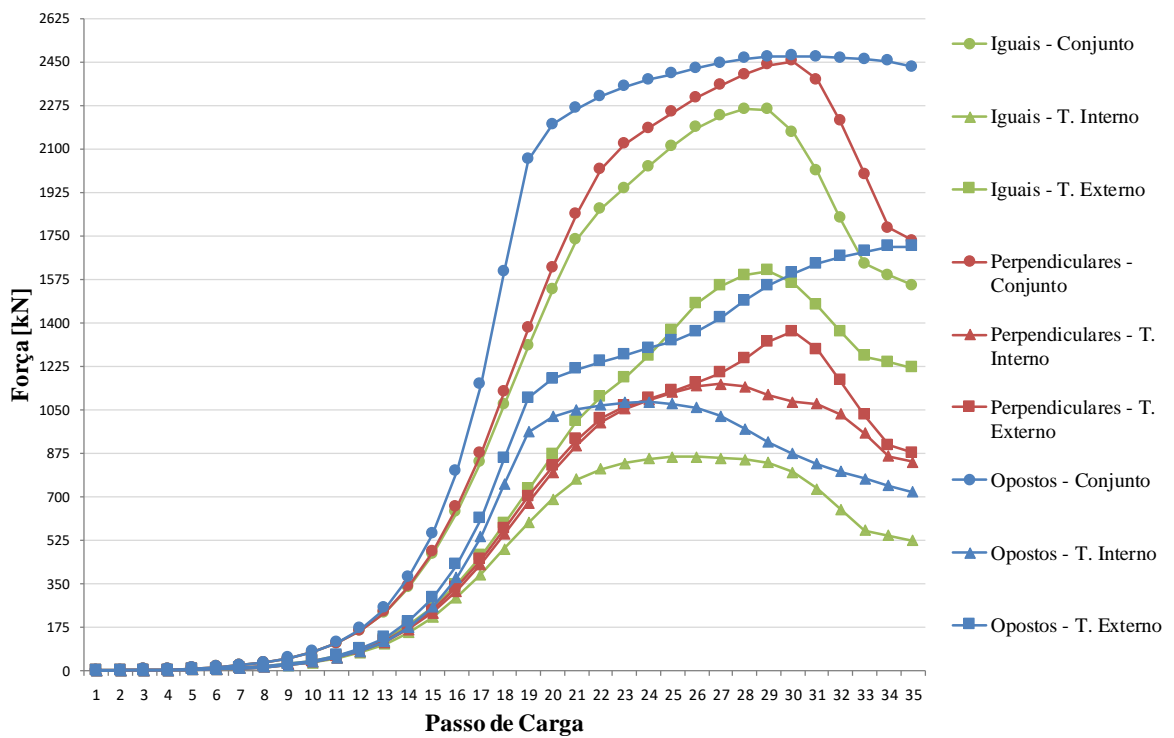


Figura B.4. Grupo 1 - Modelos 1 a 3 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

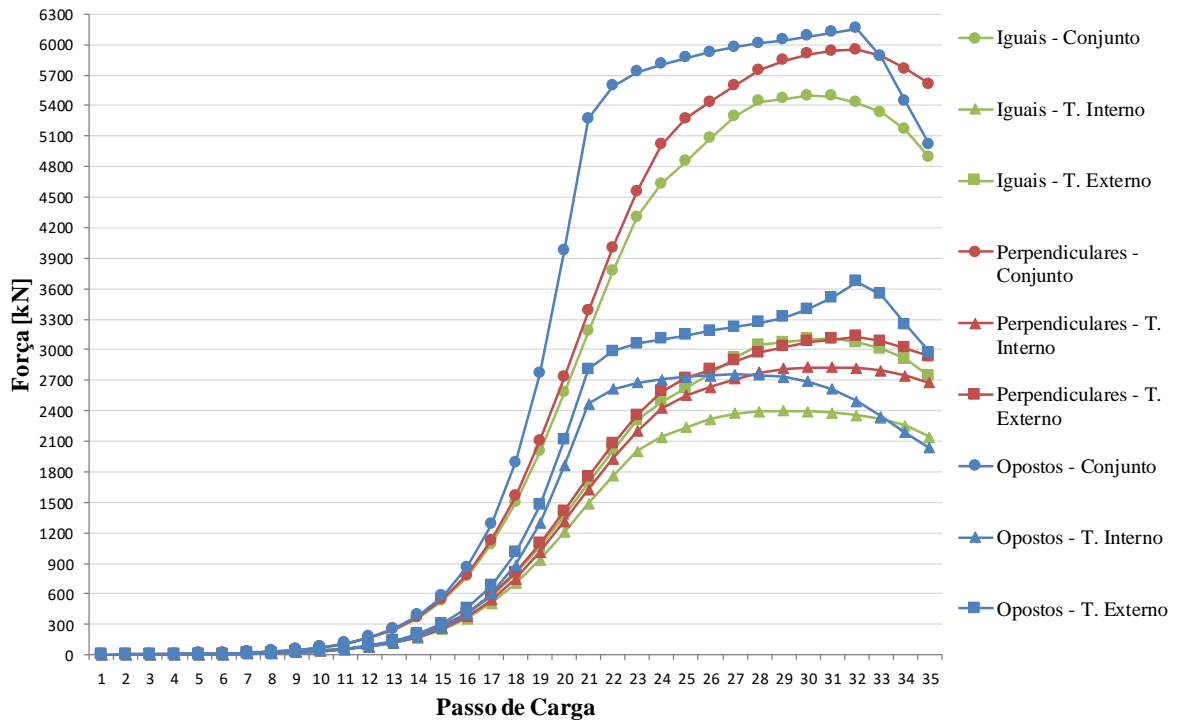


Figura B.5. Grupo 1 - Modelos 4 a 6 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

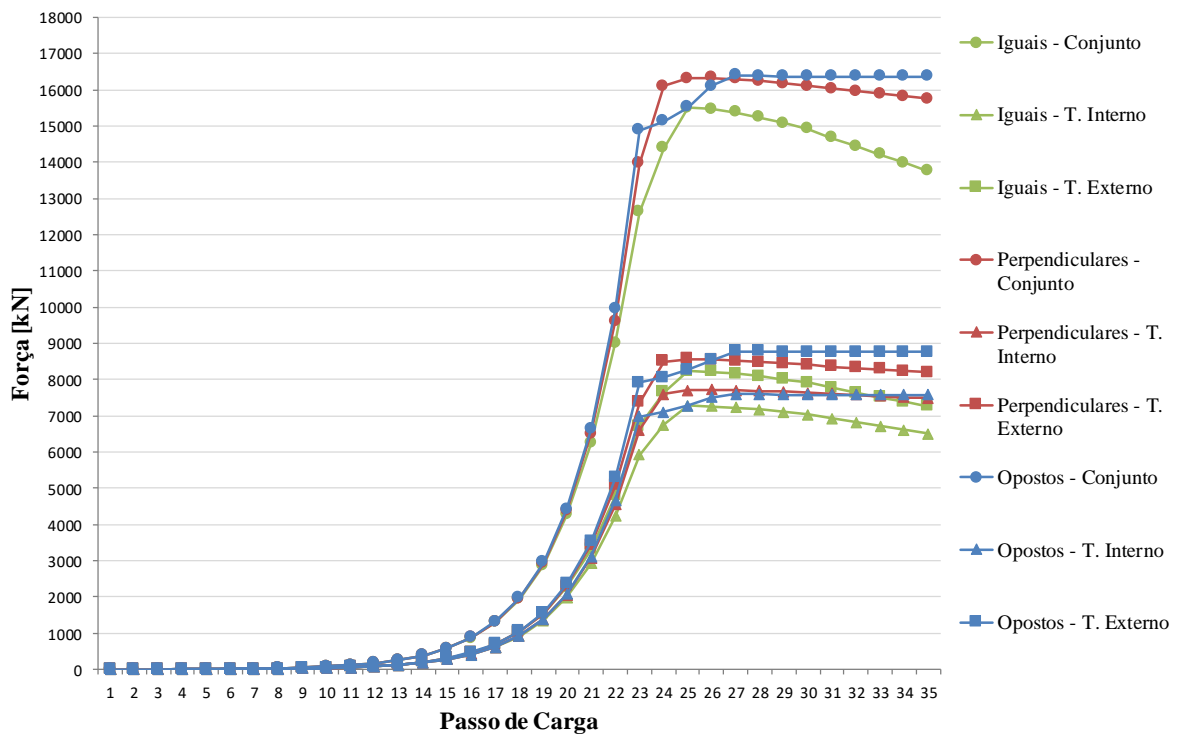


Figura B.6. Grupo 1 - Modelos 7 a 9 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.3 Grupo 2 - TC 273,0 x 8,0 + TC 355,6 x 25,0

a) Travamentos Fixos

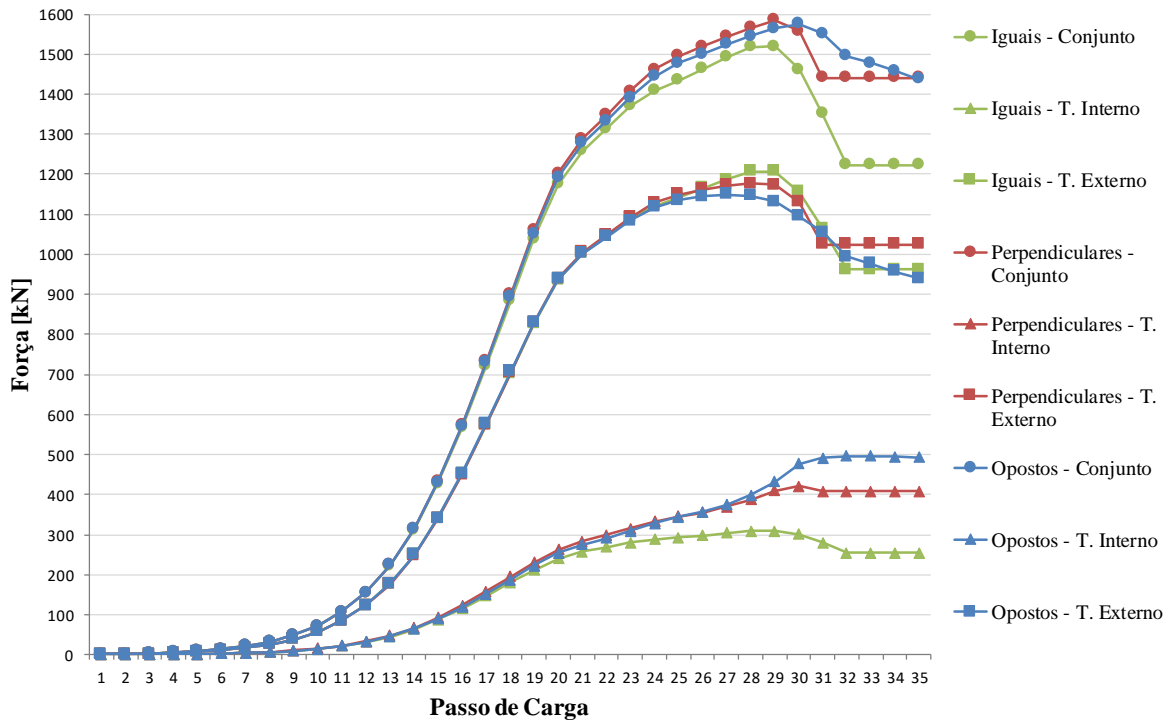


Figura B.7. Grupo 2 - Modelos 10 a 12 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

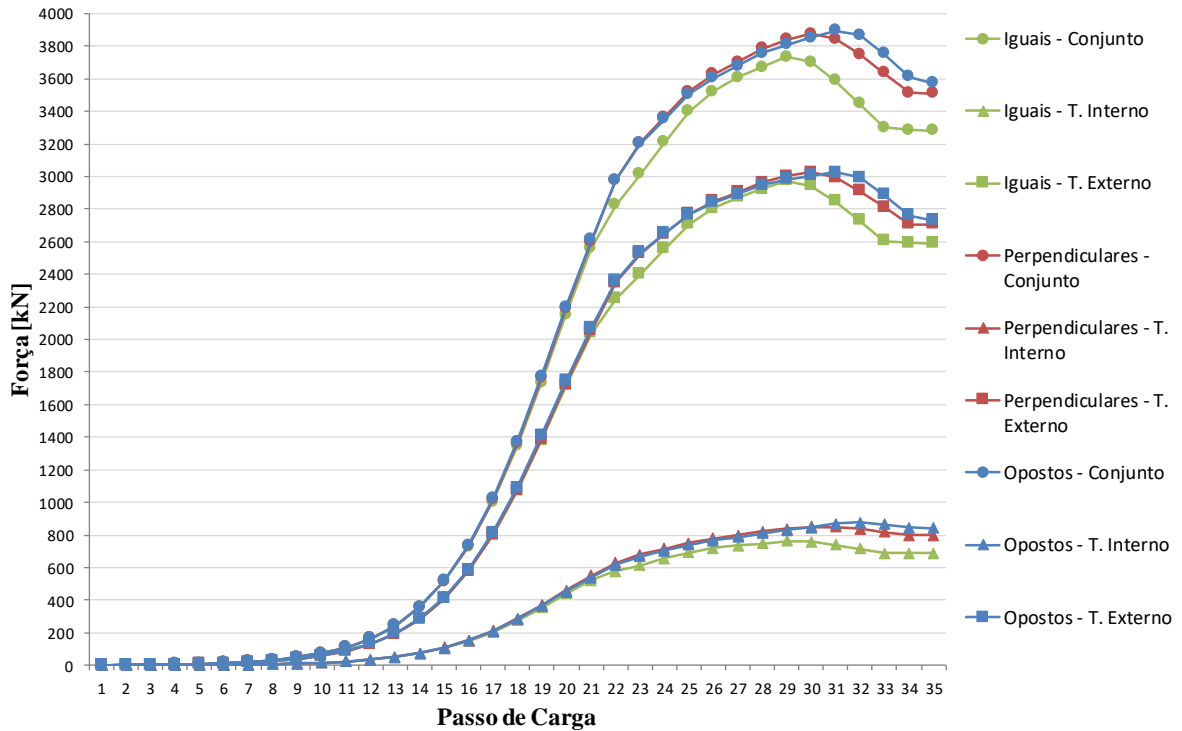


Figura B.8. Grupo 2 - Modelos 13 a 15 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

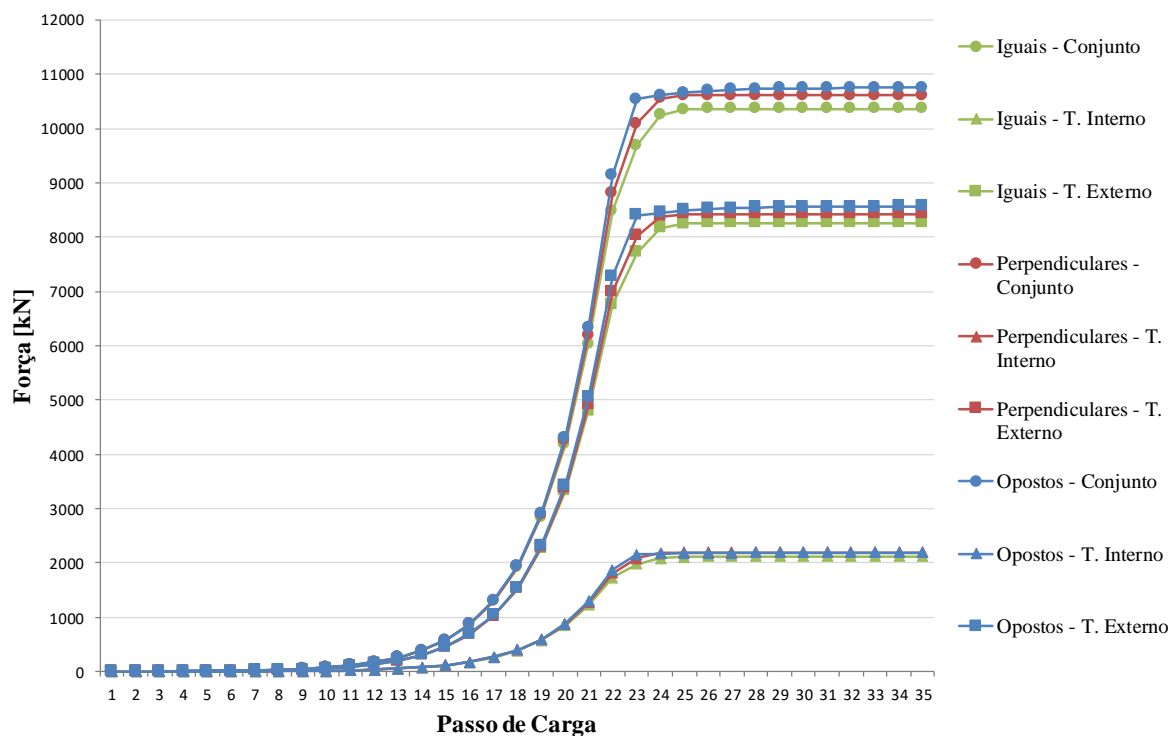


Figura B.9. Grupo 2 - Modelos 16 a 18 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

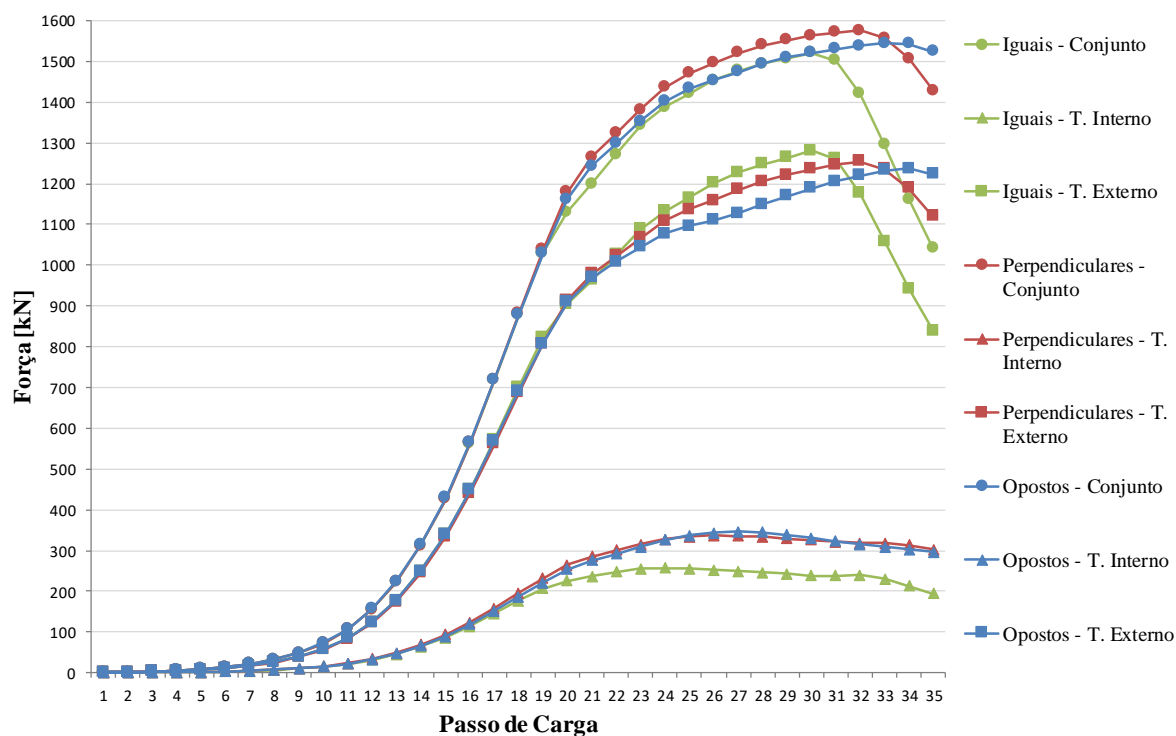


Figura B.10. Grupo 2 - Modelos 10 a 12 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

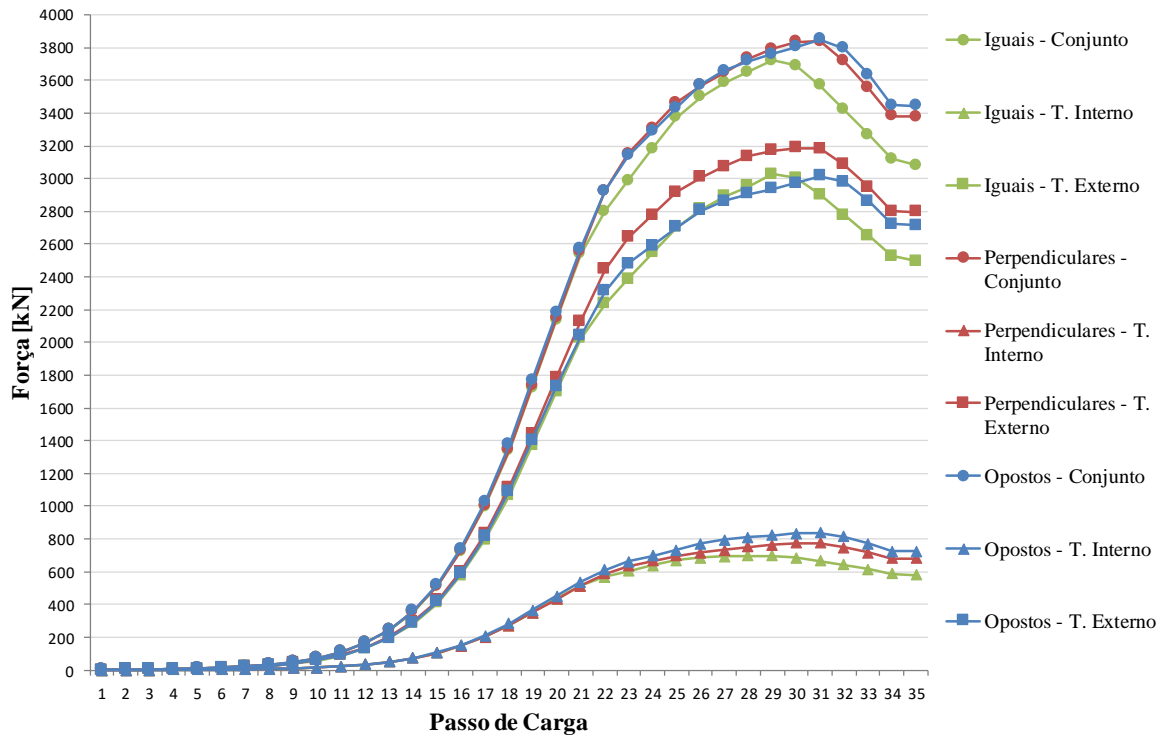


Figura B.11. Grupo 2 - Modelos 13 a 15 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

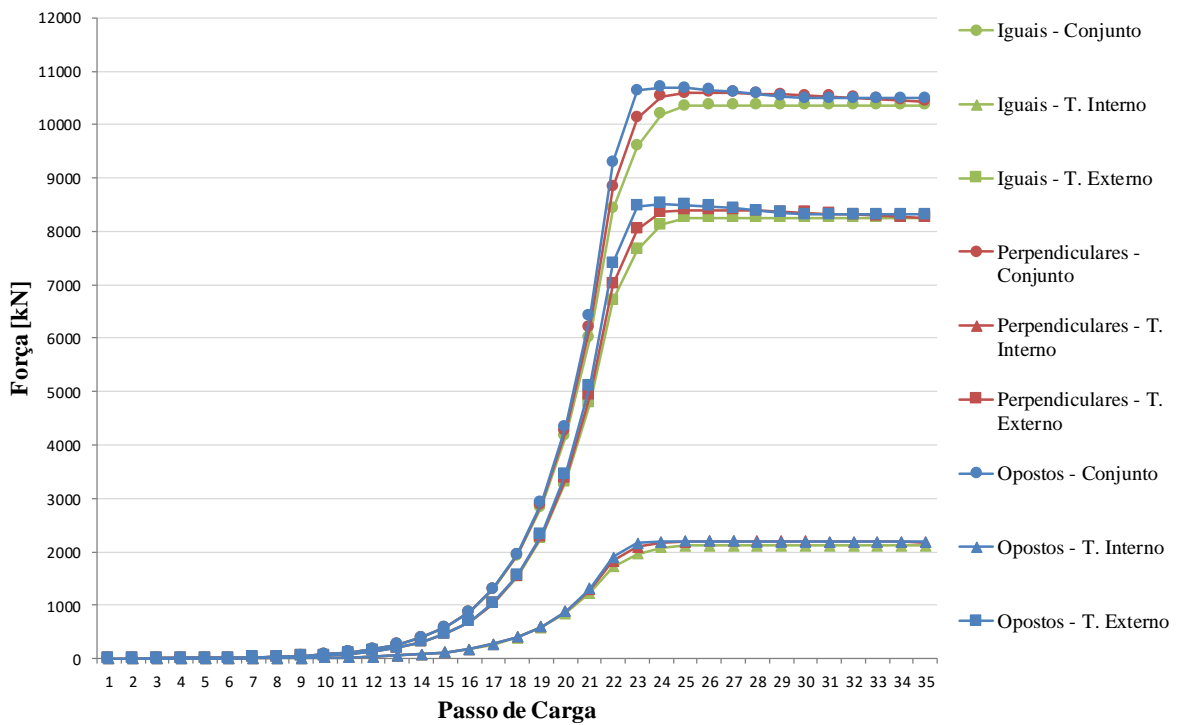


Figura B.12. Grupo 2 - Modelos 16 a 18 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.4 Grupo 3 - TC 144,0 x 25,0 + TC 219,0 x 6,4

a) Travamentos Fixos

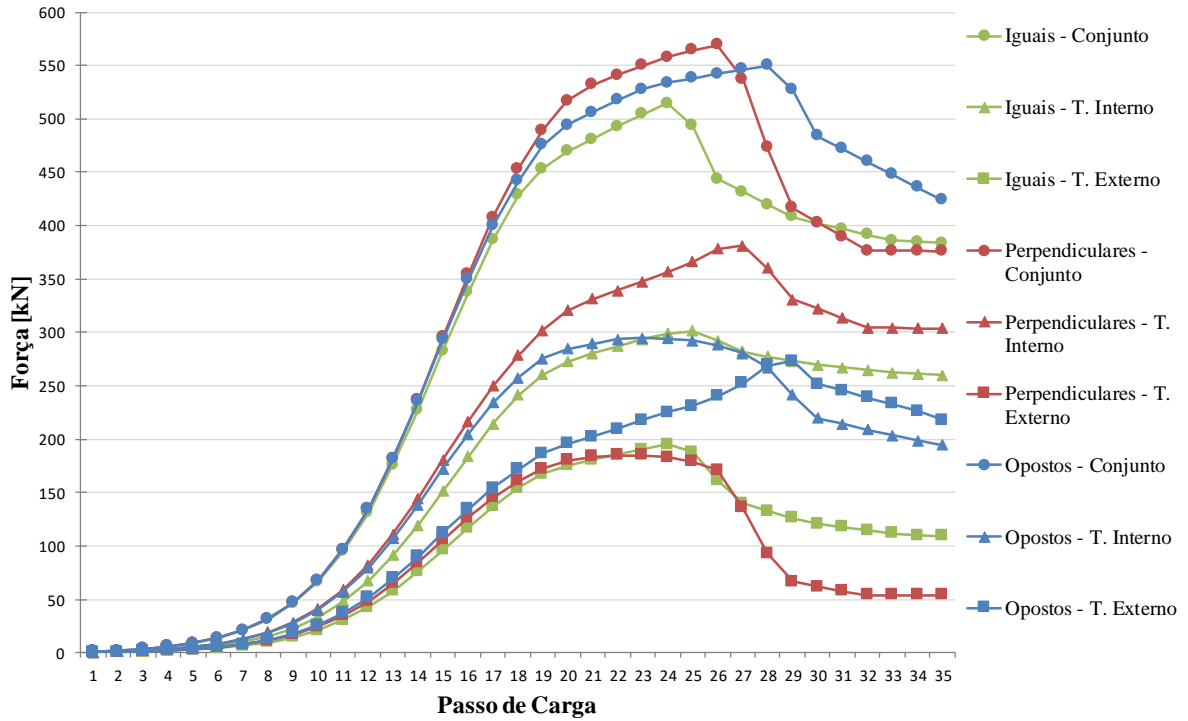


Figura B.13. Grupo 3 - Modelos 19 a 21 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

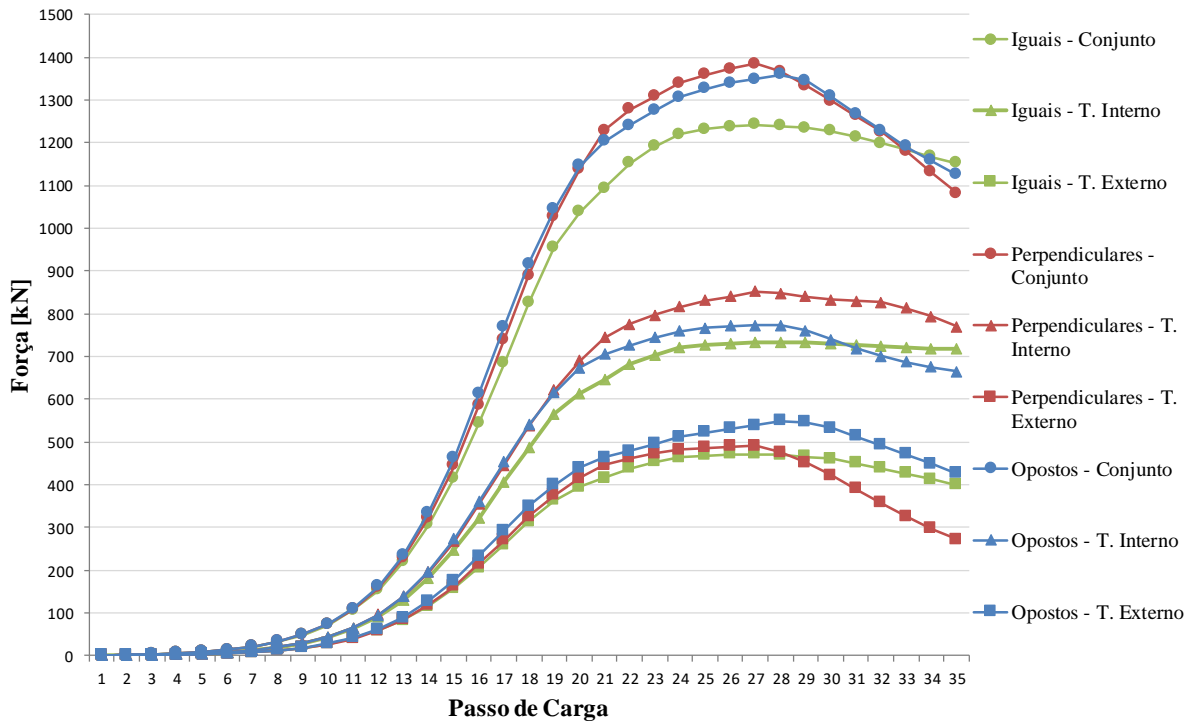


Figura B.14. Grupo 3 - Modelos 22 a 24 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

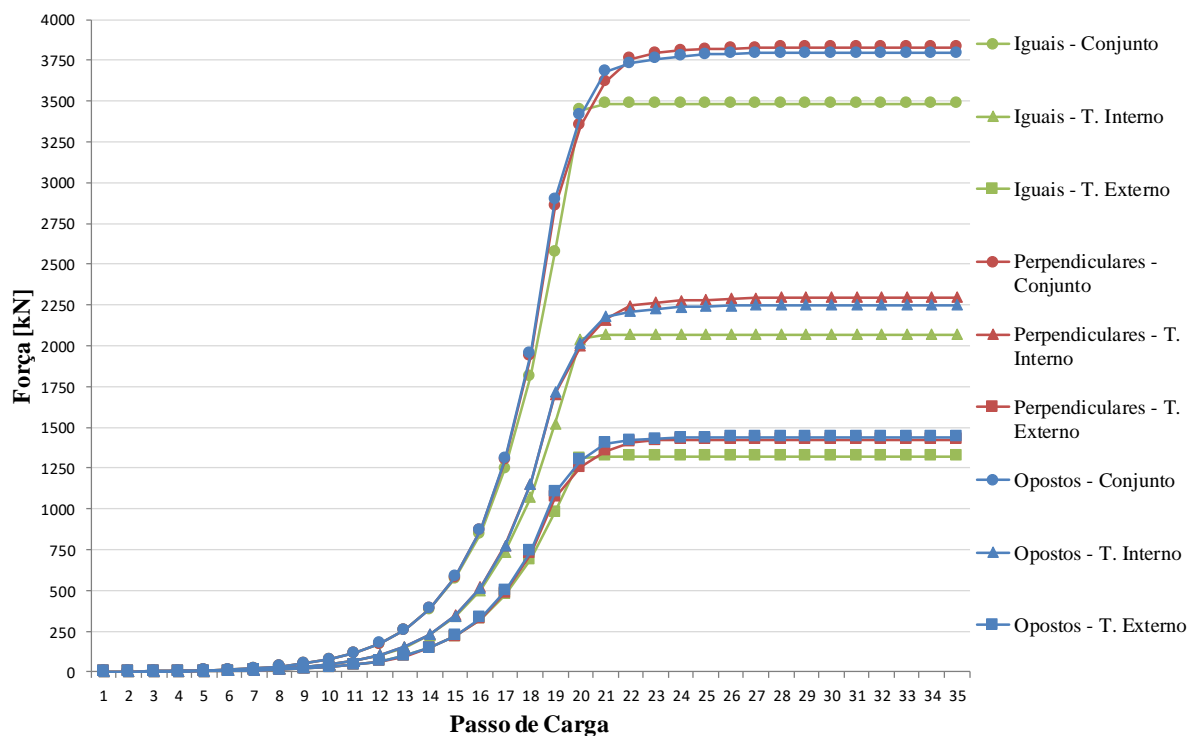


Figura B.15. Grupo 3 - Modelos 25 a 27 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

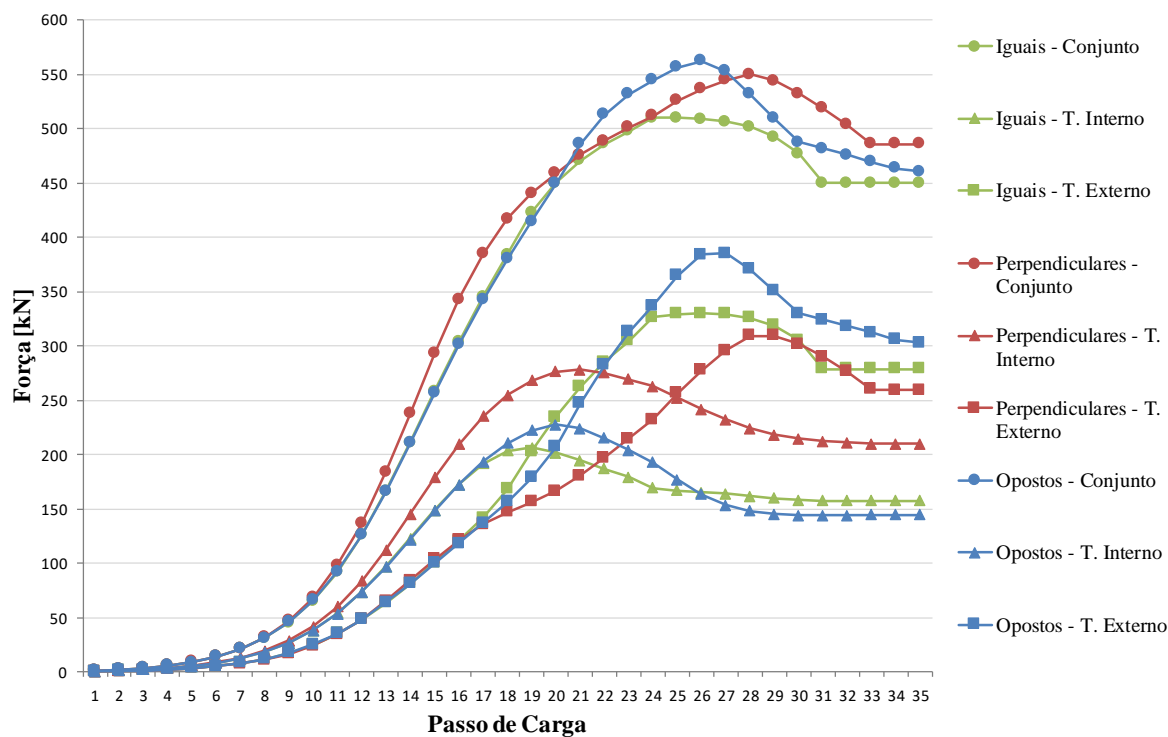


Figura B.16. Grupo 3 - Modelos 19 a 21 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

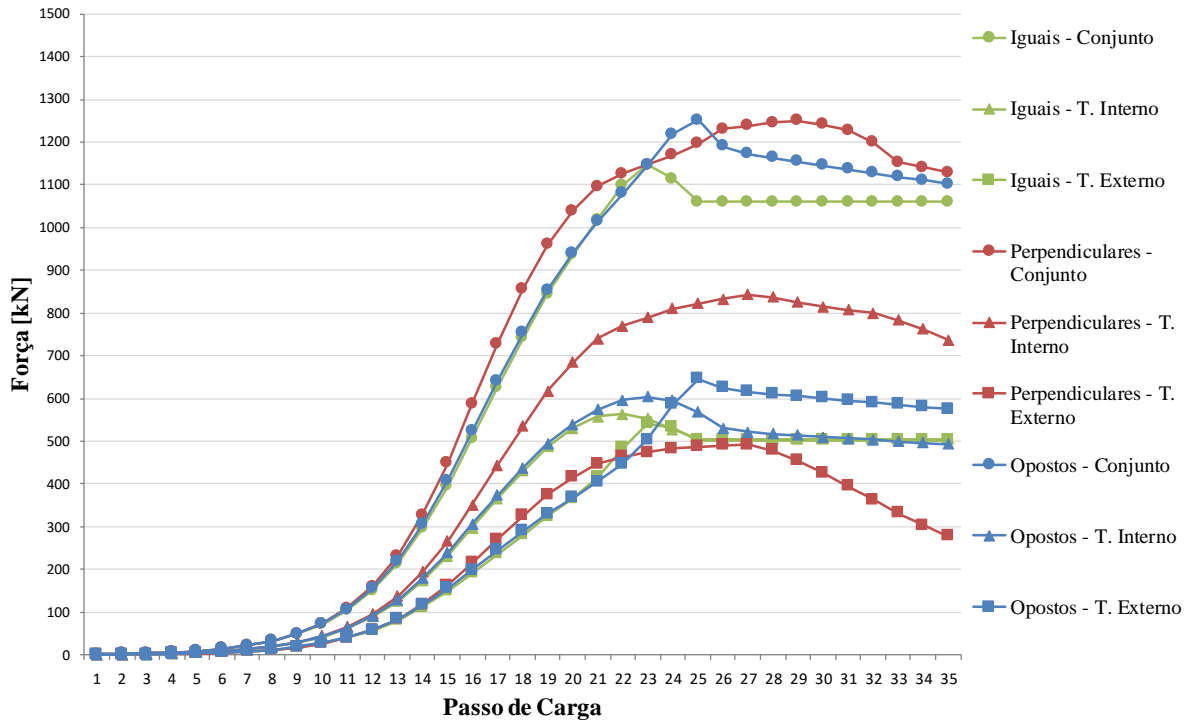


Figura B.17. Grupo 3 - Modelos 22 a 24 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

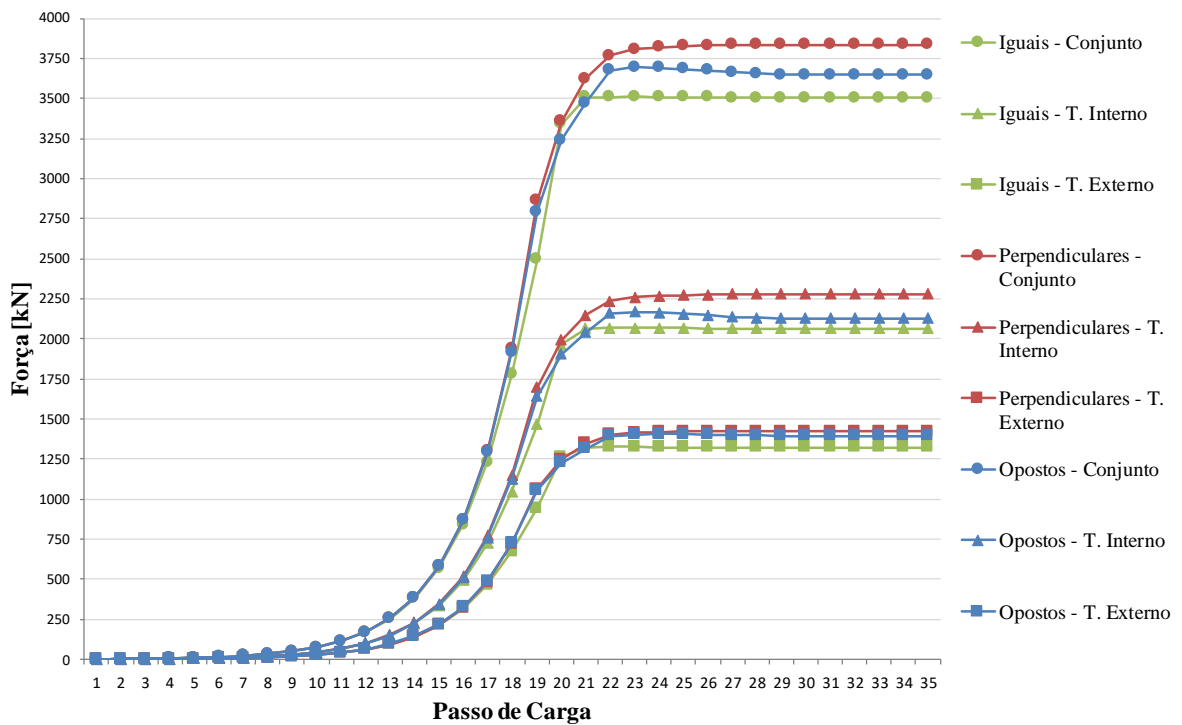


Figura B.18. Grupo 3 - Modelos 25 a 27 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.5 Grupo 4 - TC 168,3 x 20,0 + TC 273,0 x 20,0 + TC 355,6 + 25,0

a) Travamentos Fixos

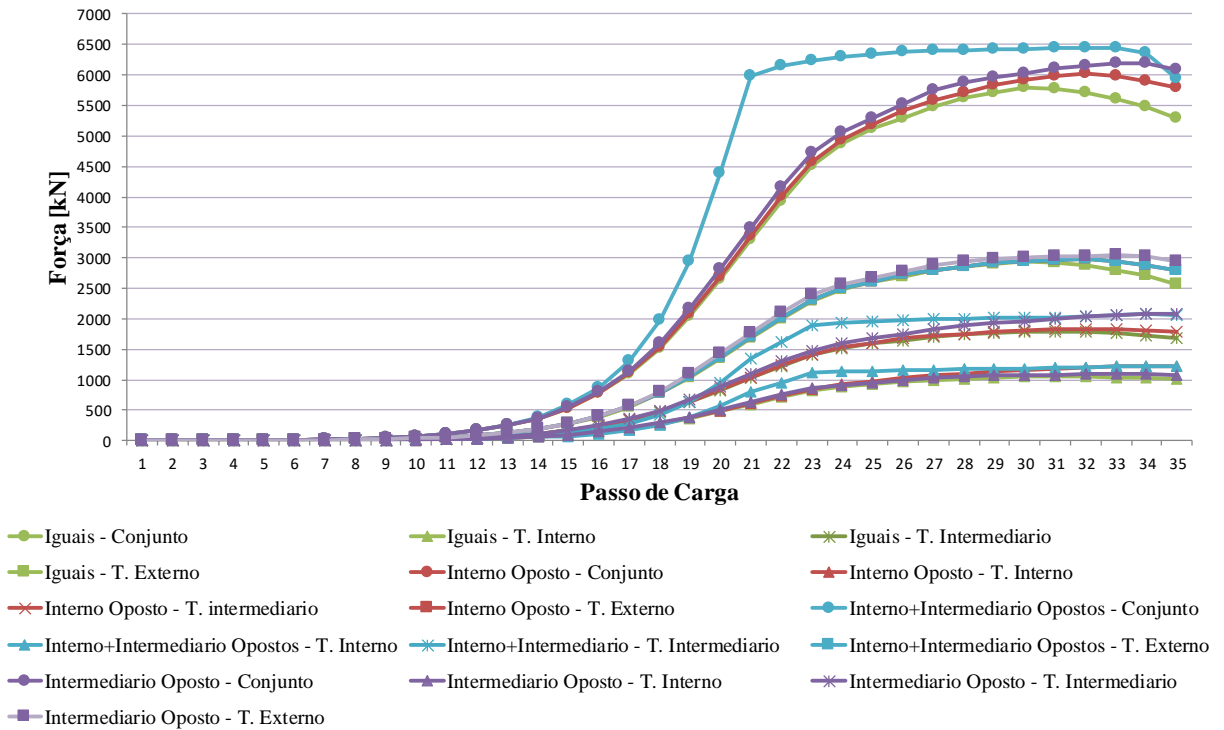


Figura B.19. Grupo 4 - Modelos 32 a 35 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

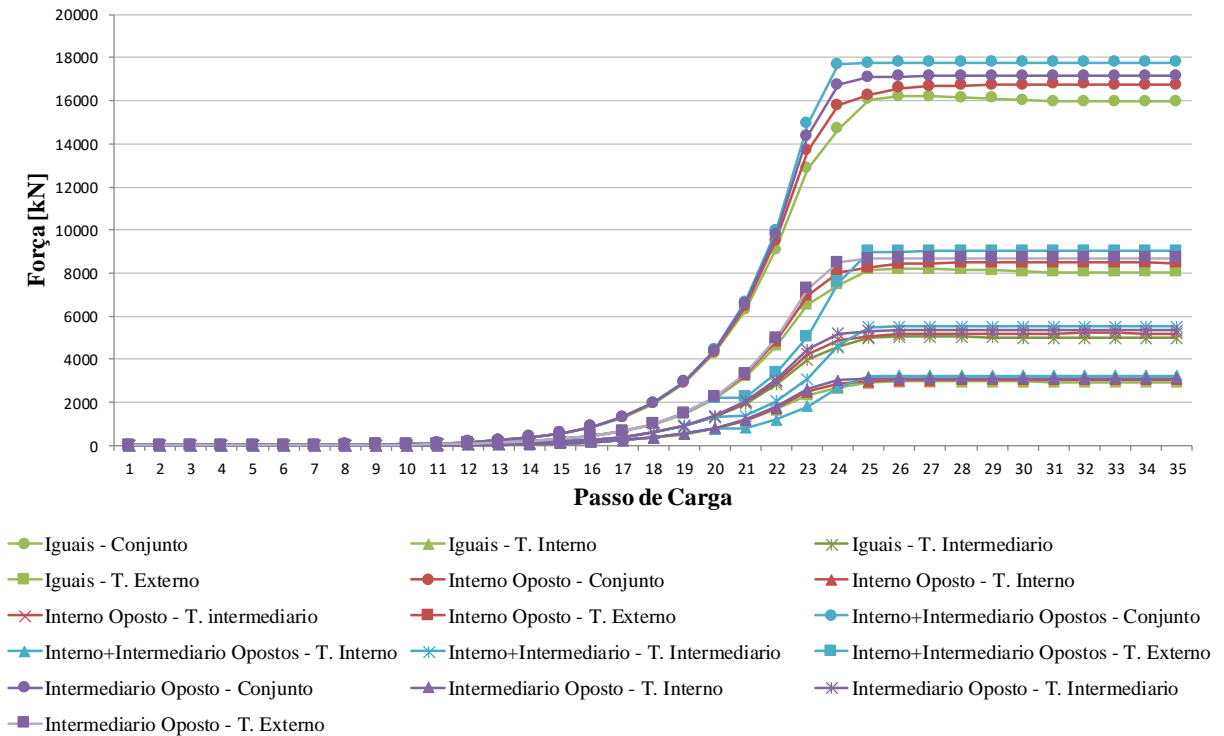


Figura B.20. Grupo 4 - Modelos 36 a 39 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

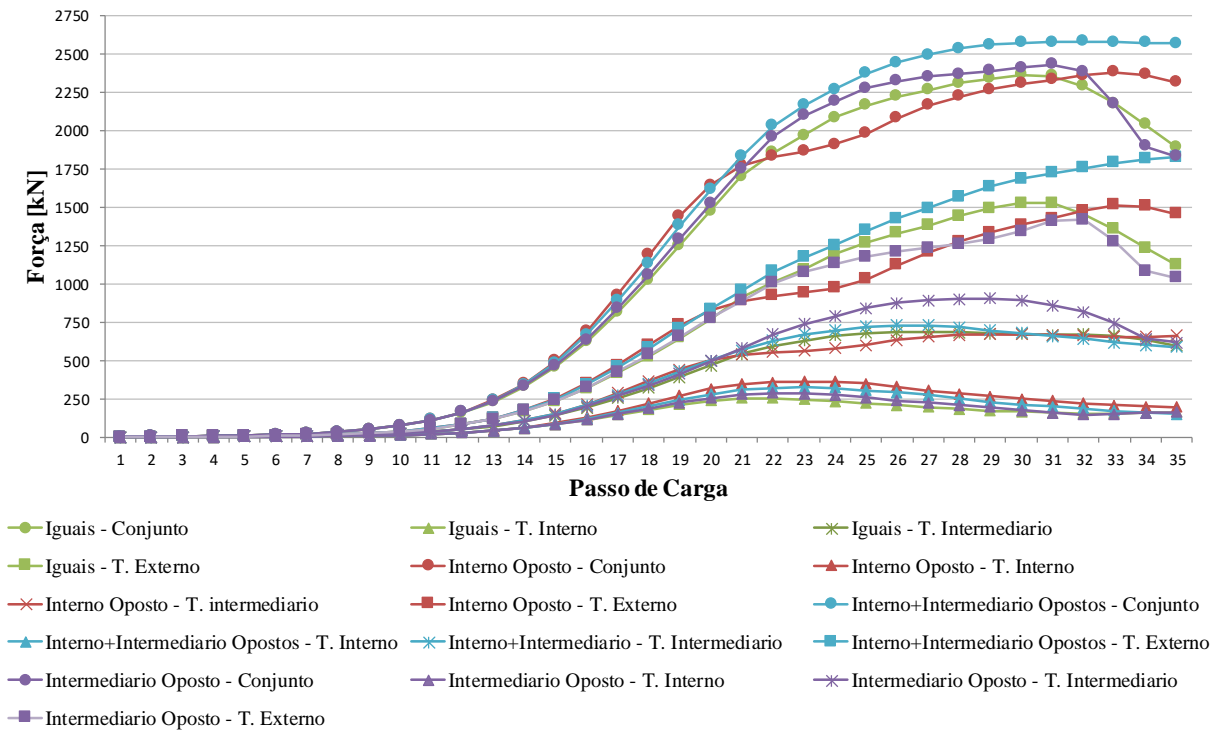


Figura B.21. Grupo 4 - Modelos 28 a 31 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

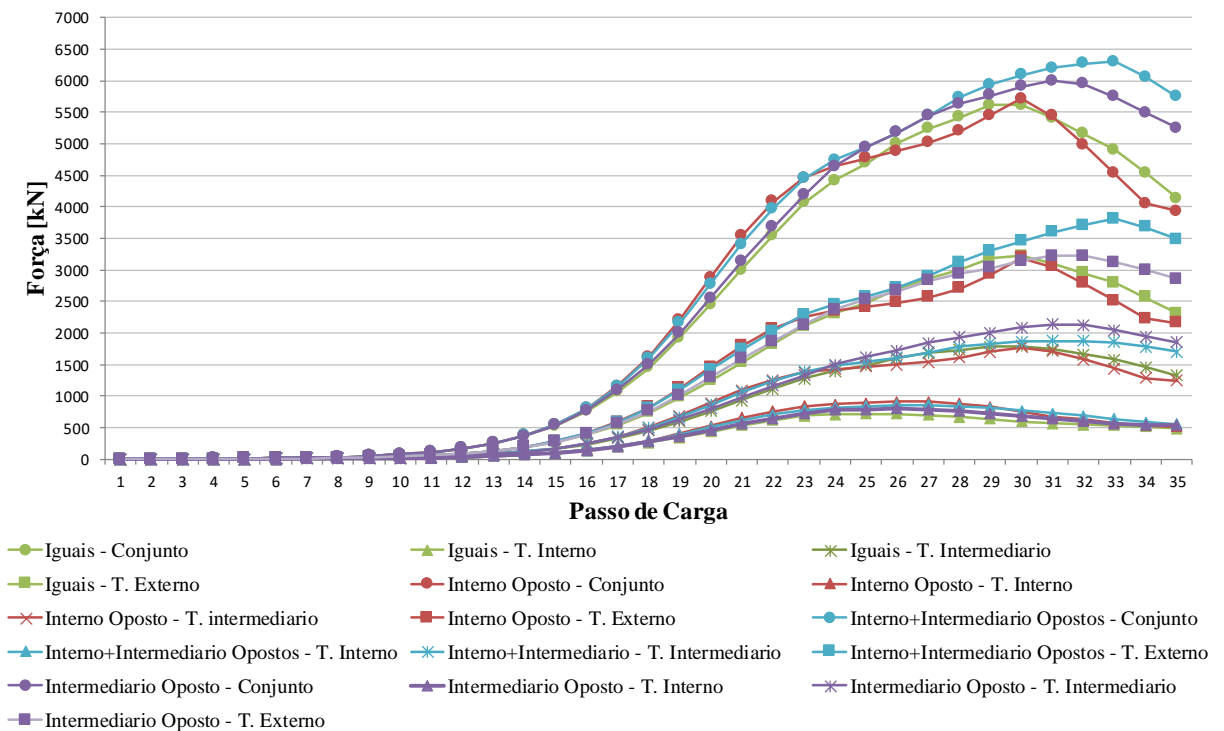


Figura B.22. Grupo 4 - Modelos 32 a 35 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

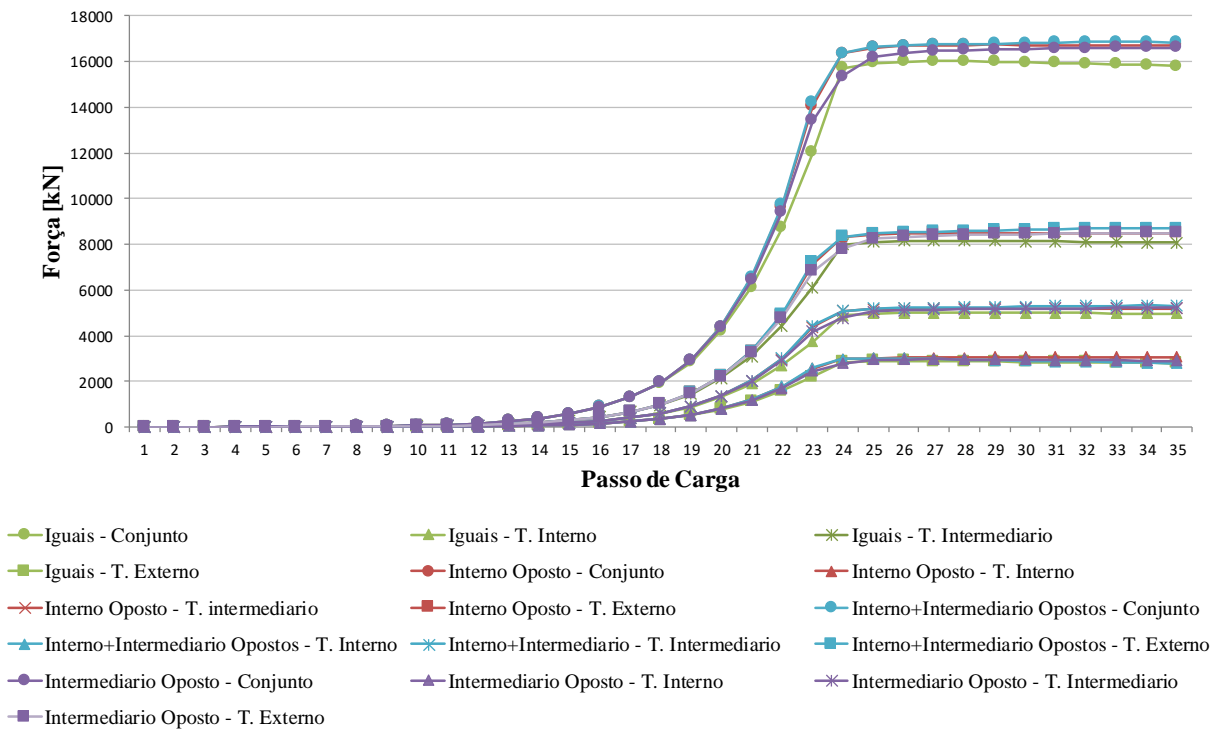


Figura B.23. Grupo 4 - Modelos 36 a 39 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.6 Grupo 5 - TC 168,3 x 5,0 + TC 273,0 x 20,0 + TC 355,6 + 25,0

a) Travamentos Fixos

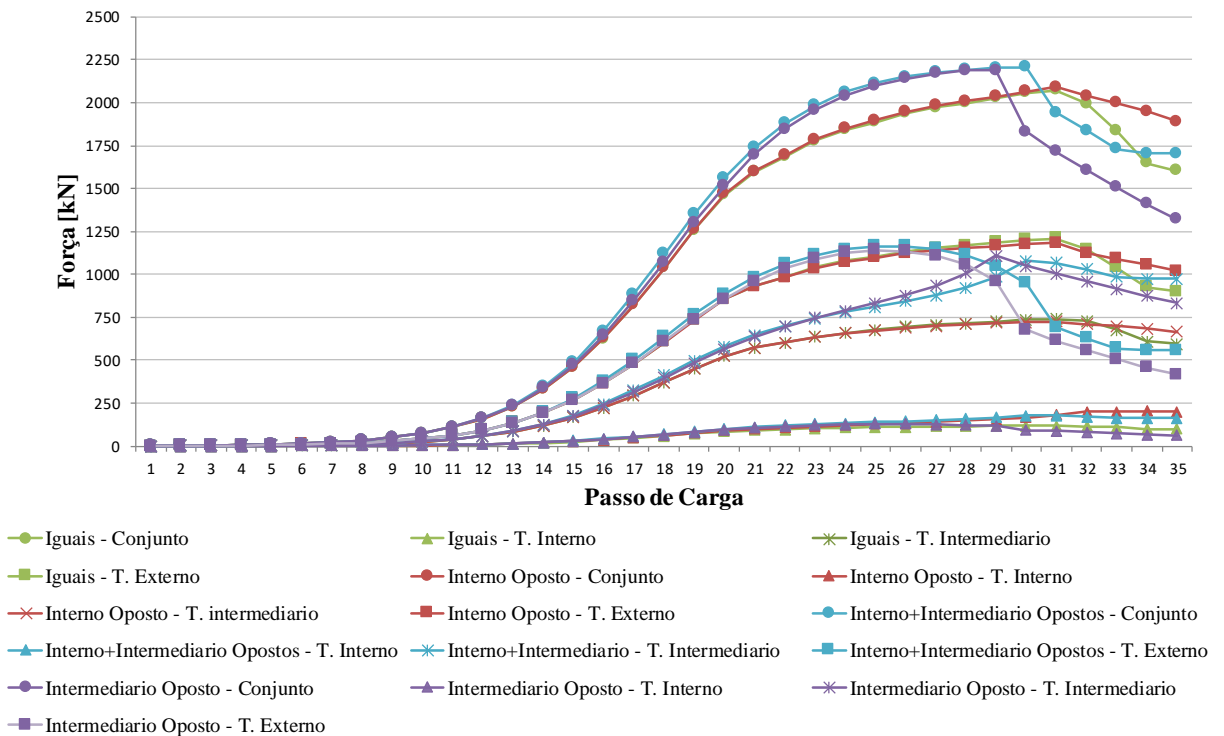


Figura B.24. Grupo 5 - Modelos 40 a 43 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

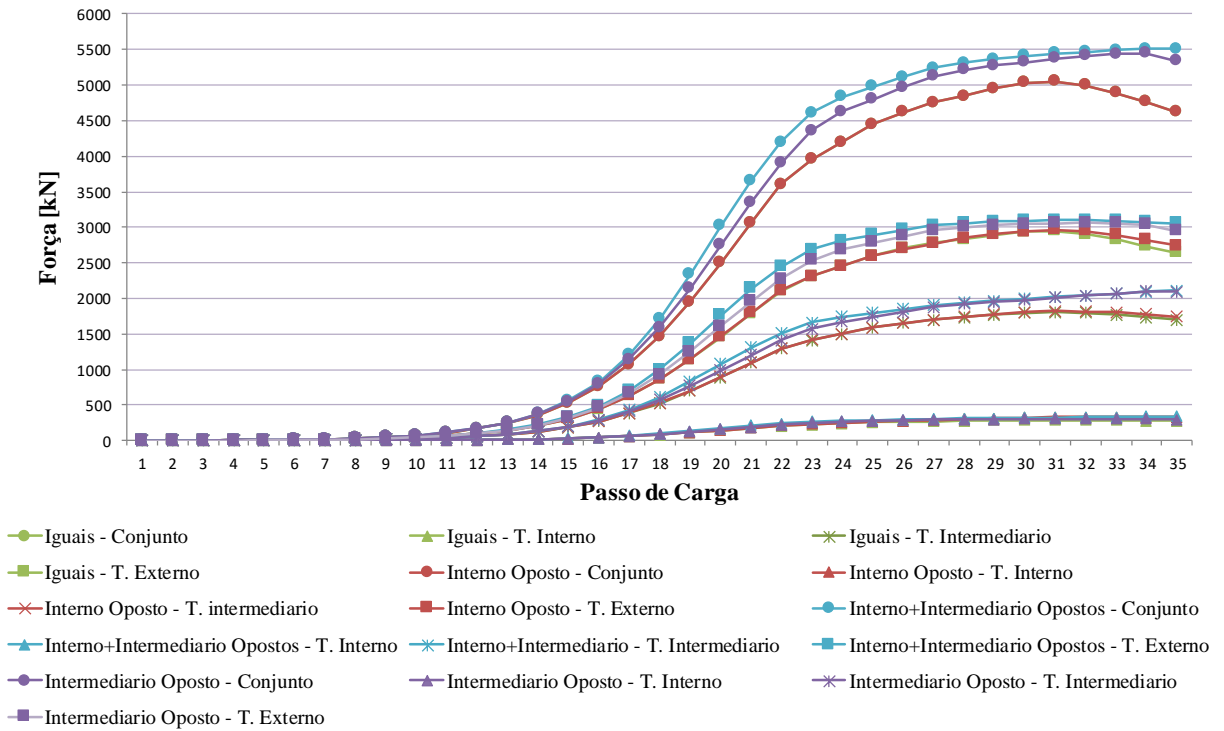


Figura B.25. Grupo 5 - Modelos 44 a 47 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

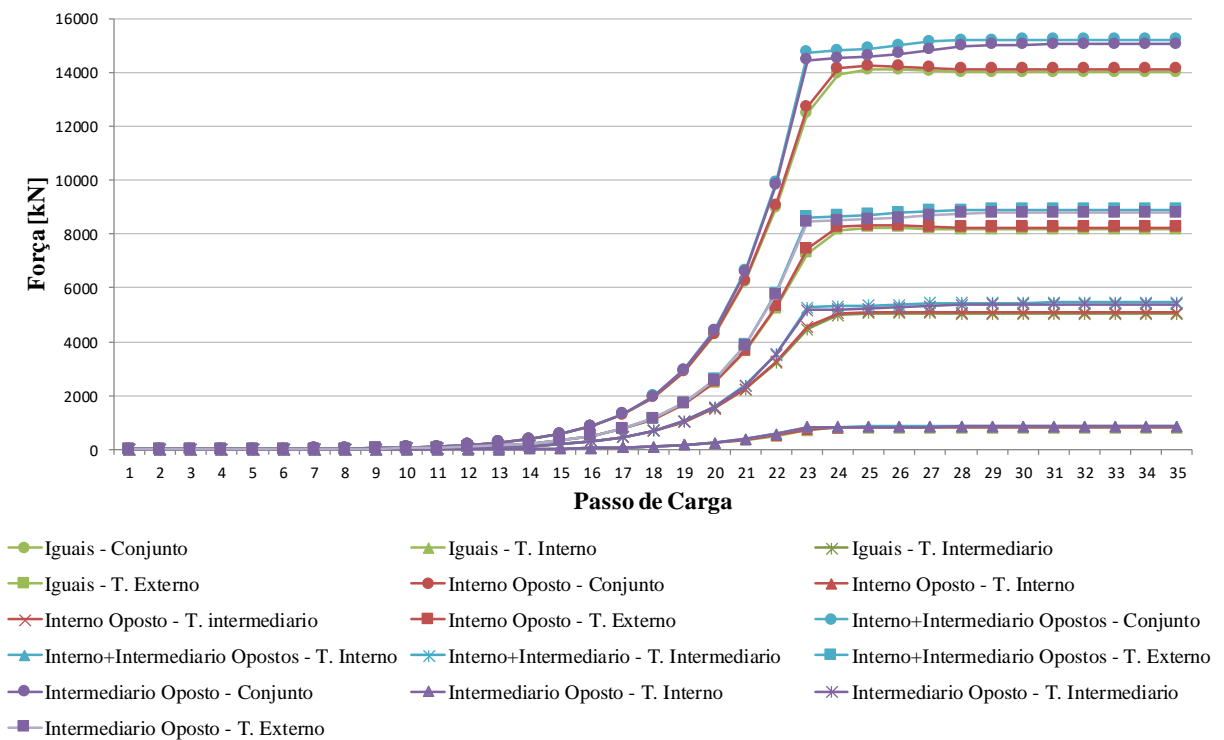


Figura B.26. Grupo 5 - Modelos 48 a 51 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

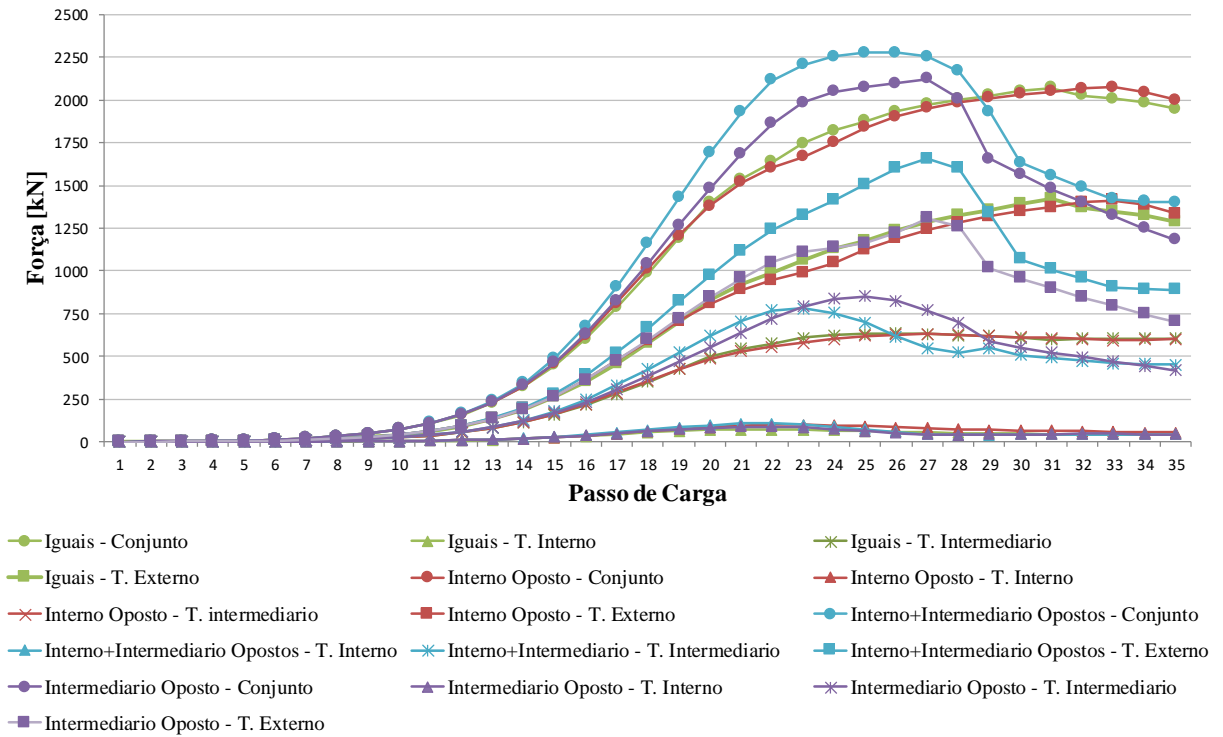


Figura B.27. Grupo 5 - Modelos 40 a 43 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

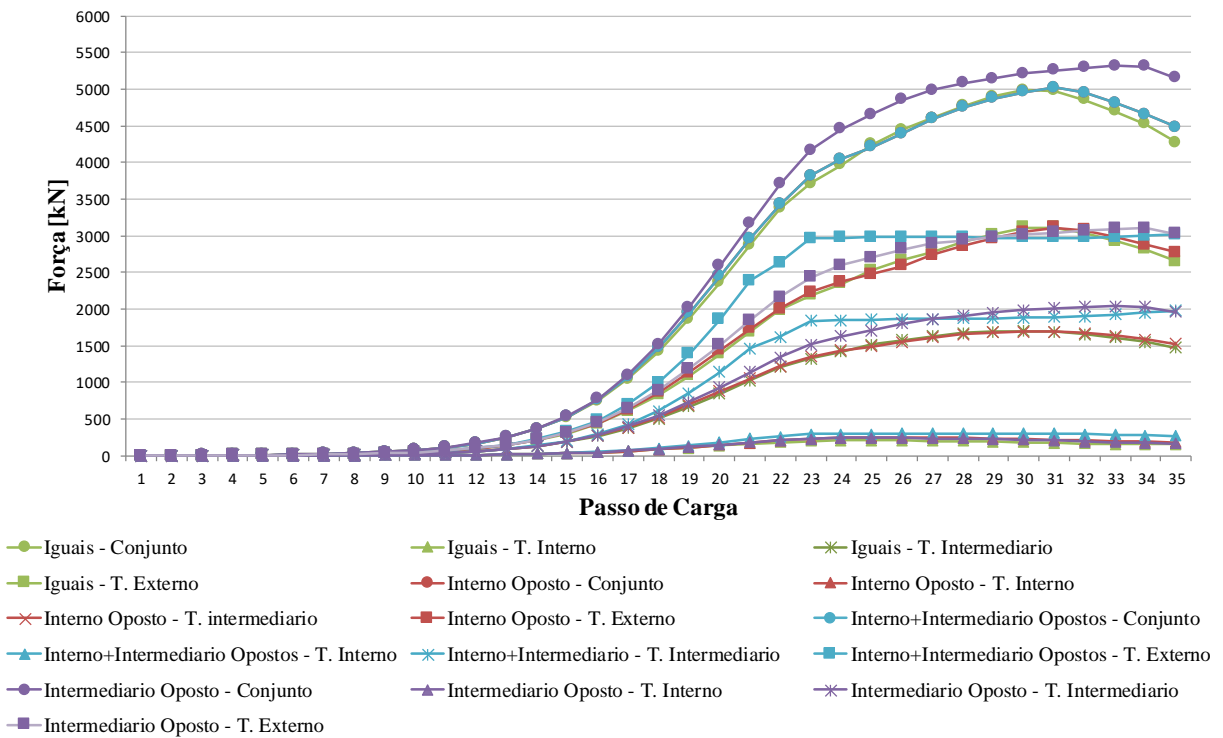


Figura B.28. Grupo 5 - Modelos 44 a 47 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

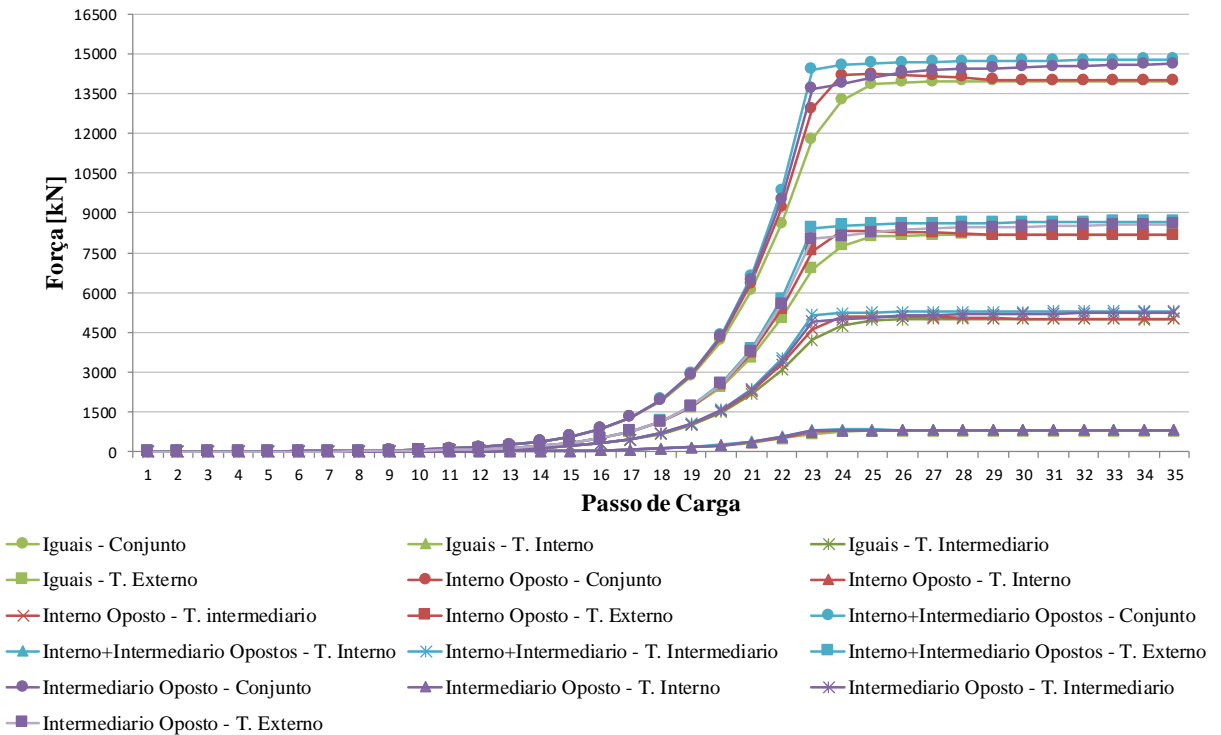


Figura B.29. Grupo 5 - Modelos 48 a 51 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.7 Grupo 6 - TC 168,3 x 20,0 + TC 273,0 x 30,0 + TC 355,6 + 25,0

a) Travamentos Fixos

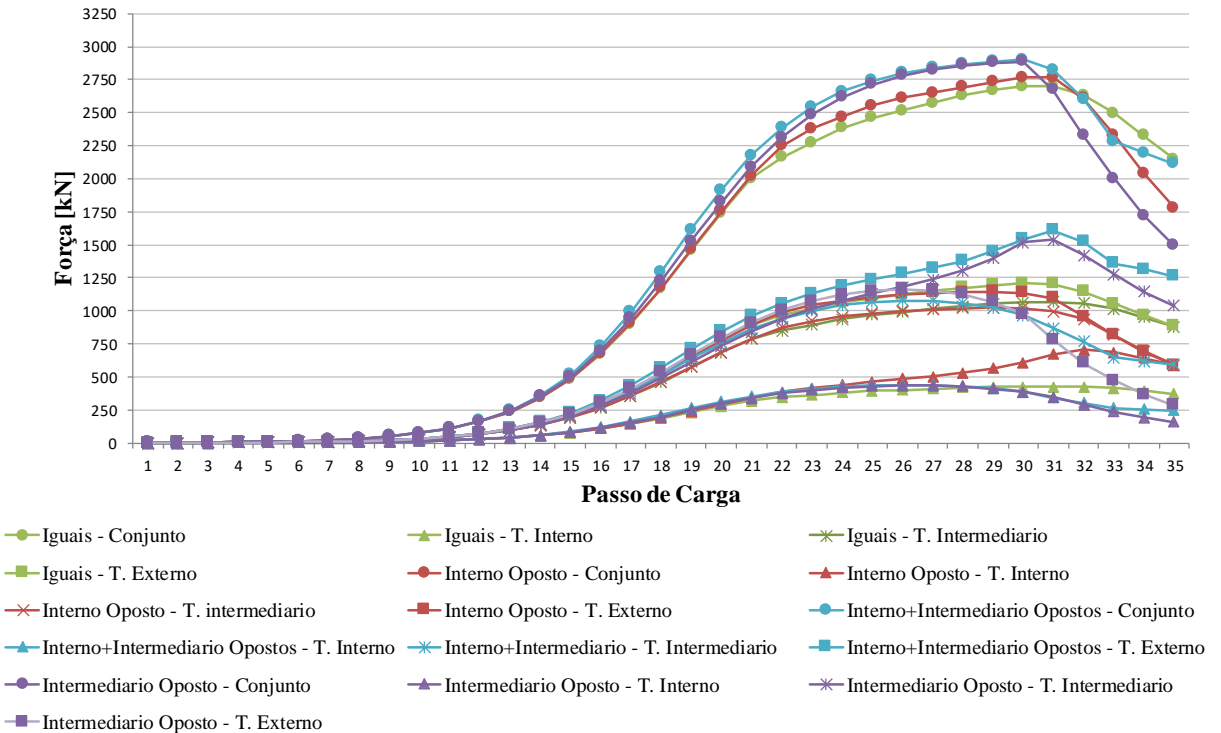


Figura B.30. Grupo 6 - Modelos 52 a 55 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

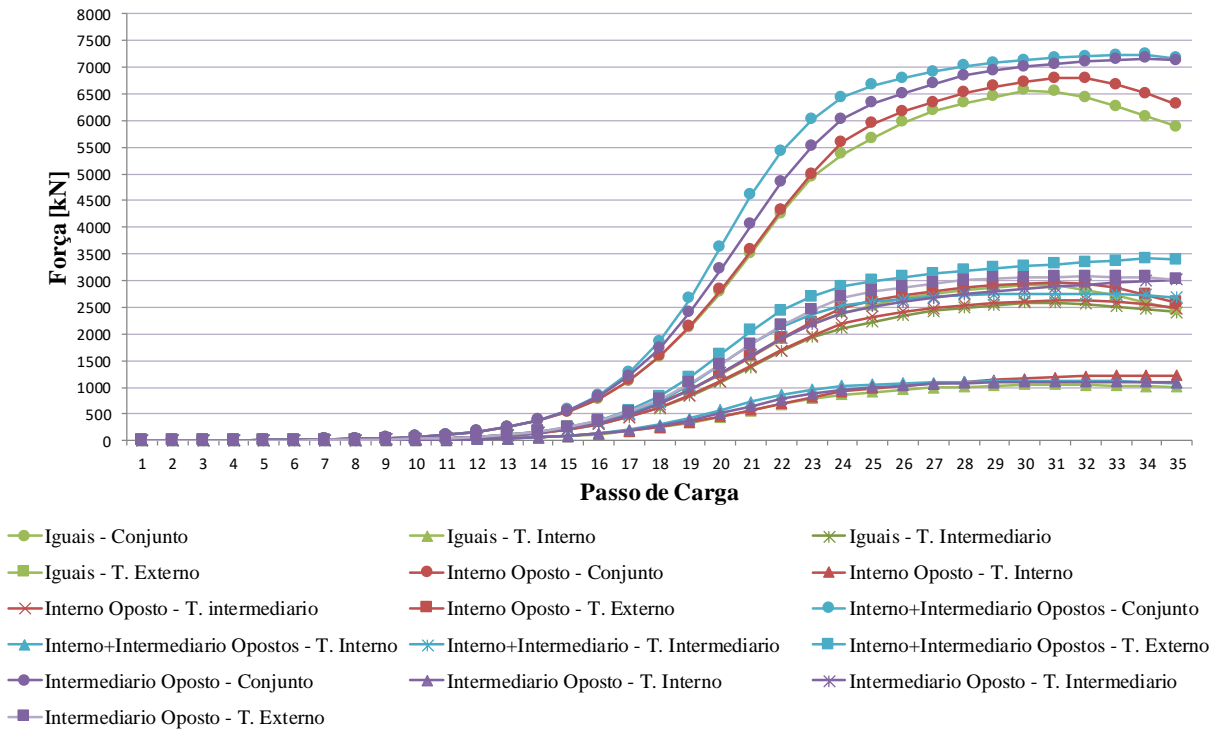


Figura B.31. Grupo 6 - Modelos 56 a 59 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

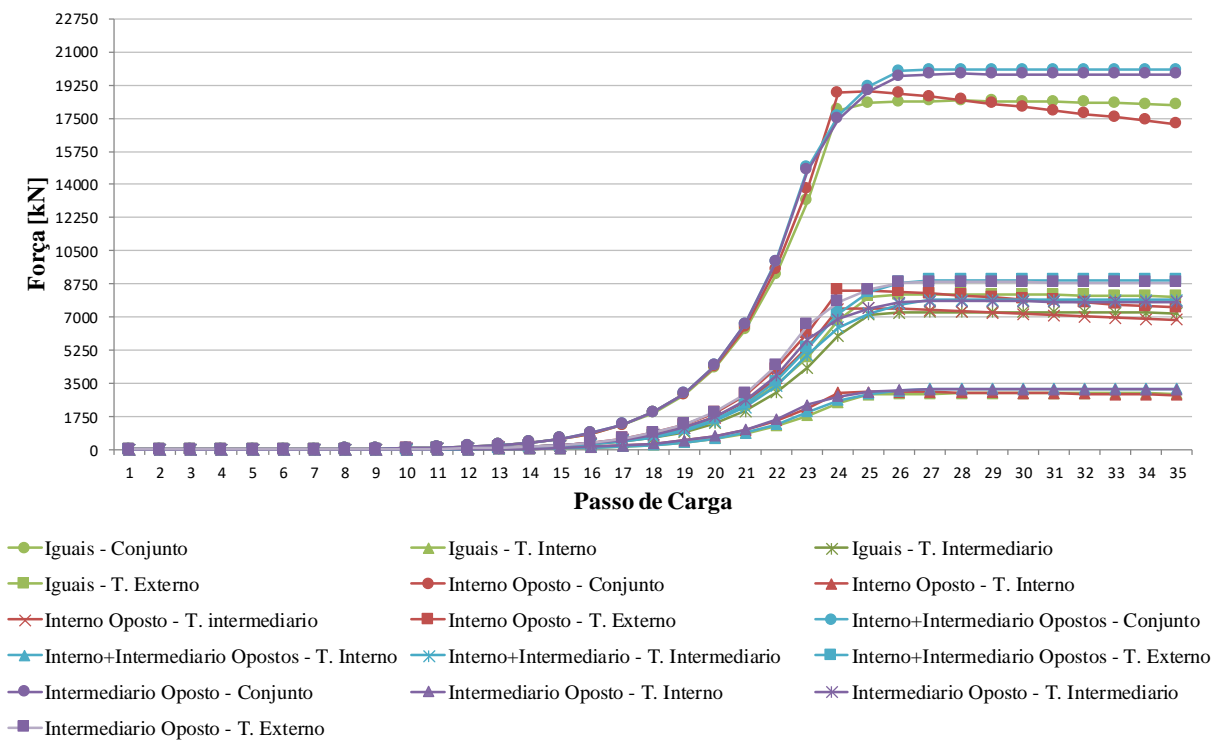


Figura B.32. Grupo 6 - Modelos 60 a 63 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

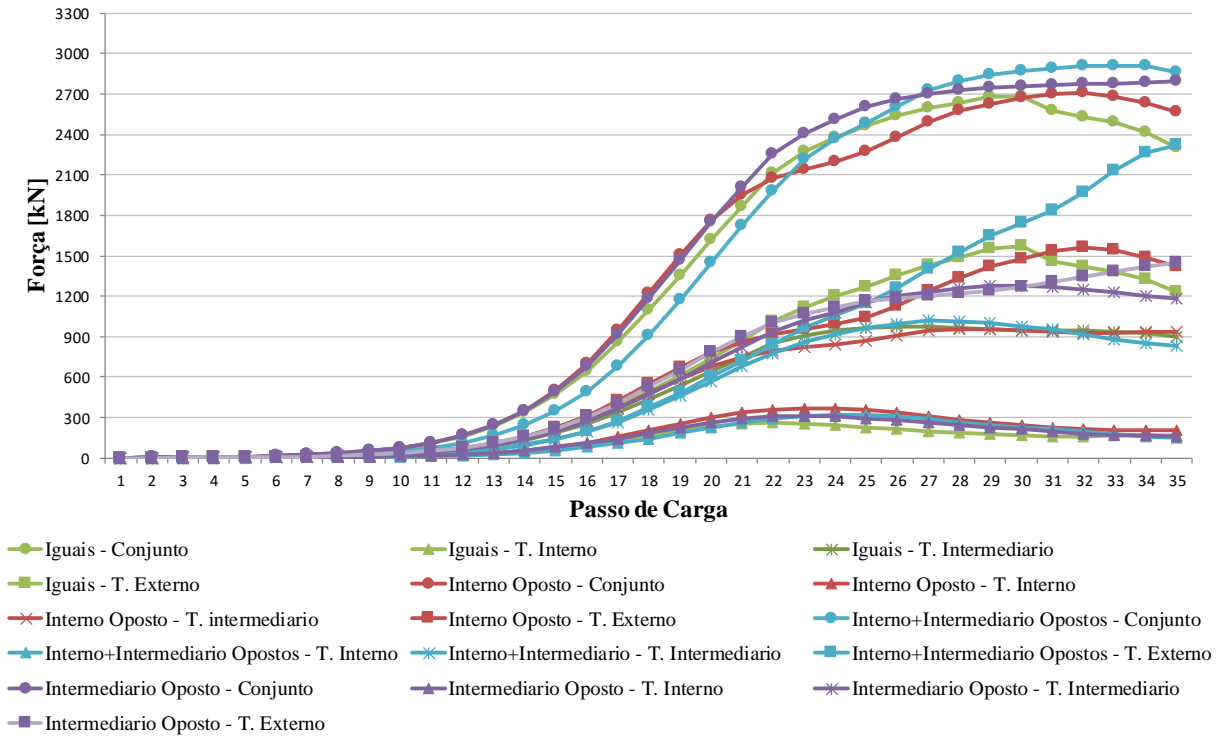


Figura B.33. Grupo 6 - Modelos 52 a 55 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

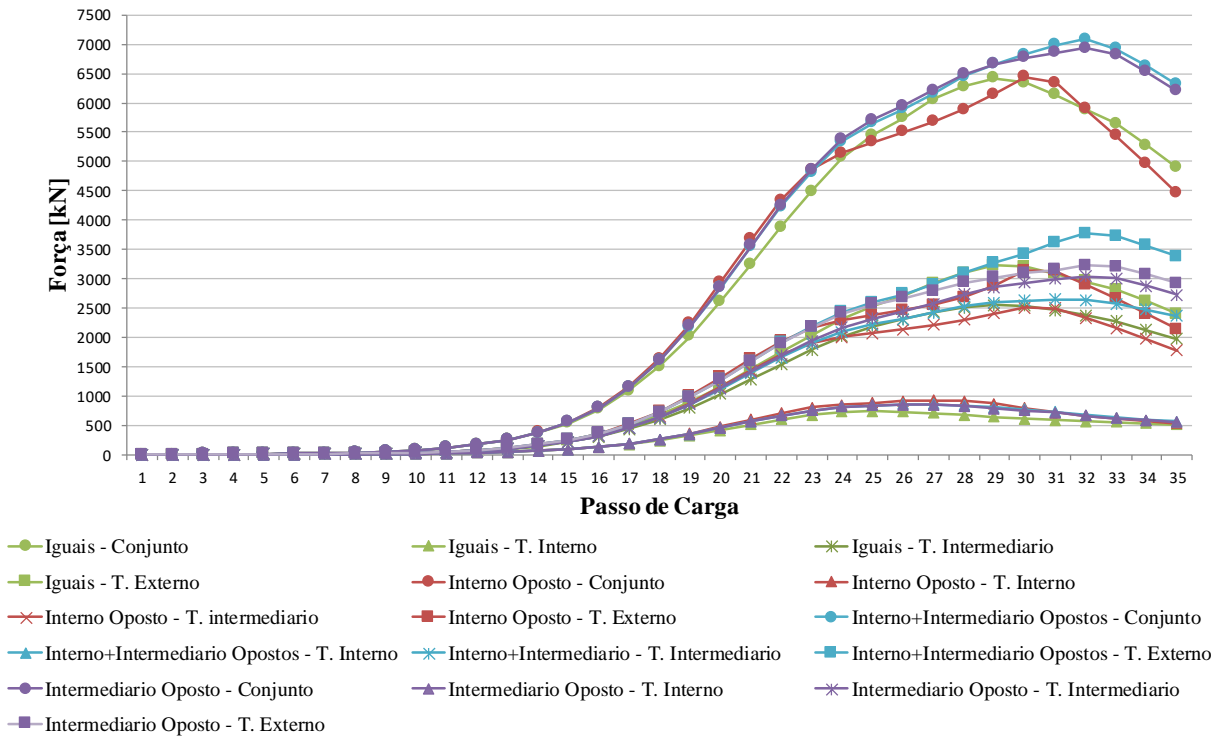


Figura B.34. Grupo 6 - Modelos 56 a 59 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

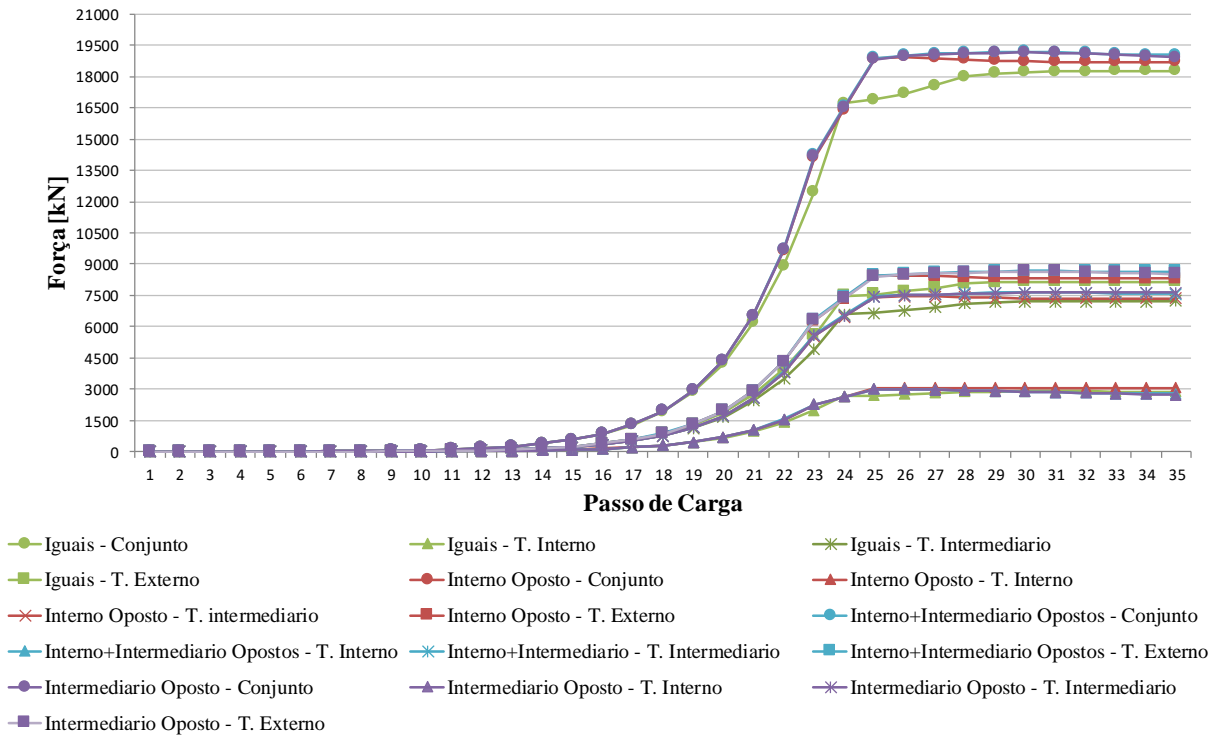


Figura B.35. Grupo 6 - Modelos 60 a 63 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

B.7 Grupo 6 - TC 168,3 x 20,0 + TC 273,0 x 25,0 + TC 355,6 + 8,0

a) Travamentos Fixos

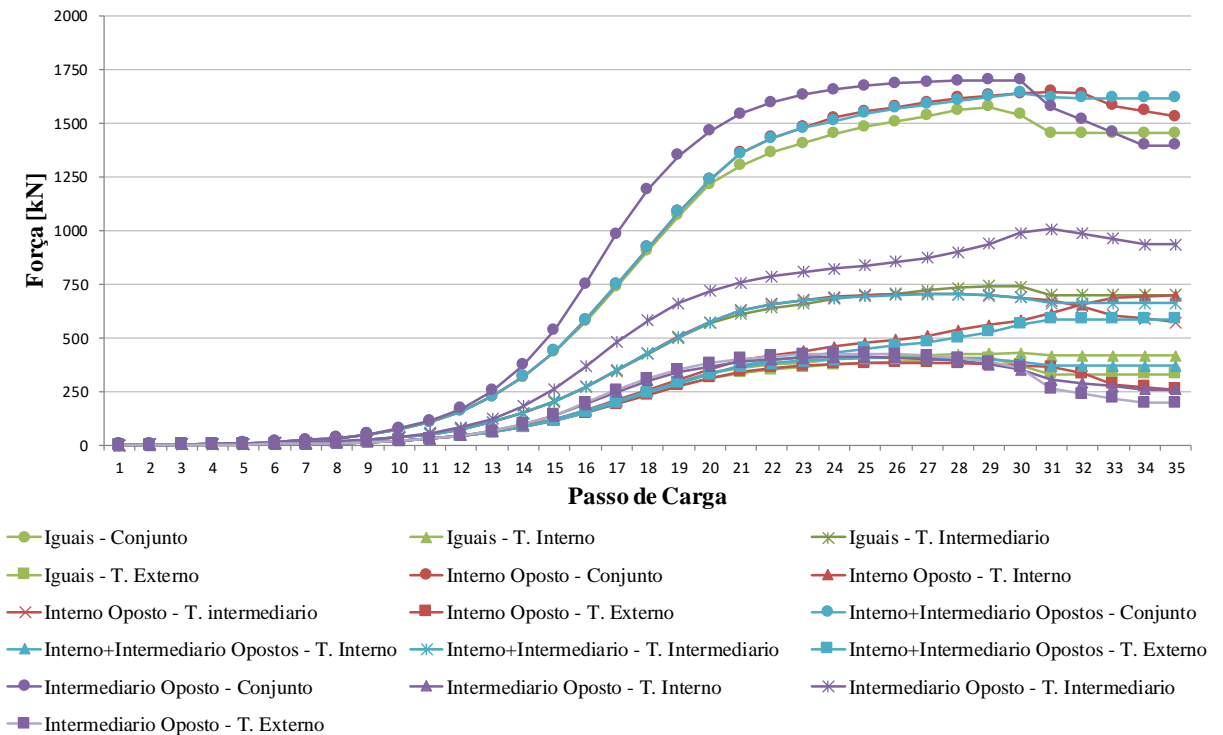


Figura B.36. Grupo 7 - Modelos 64 a 67 (fixo)- Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

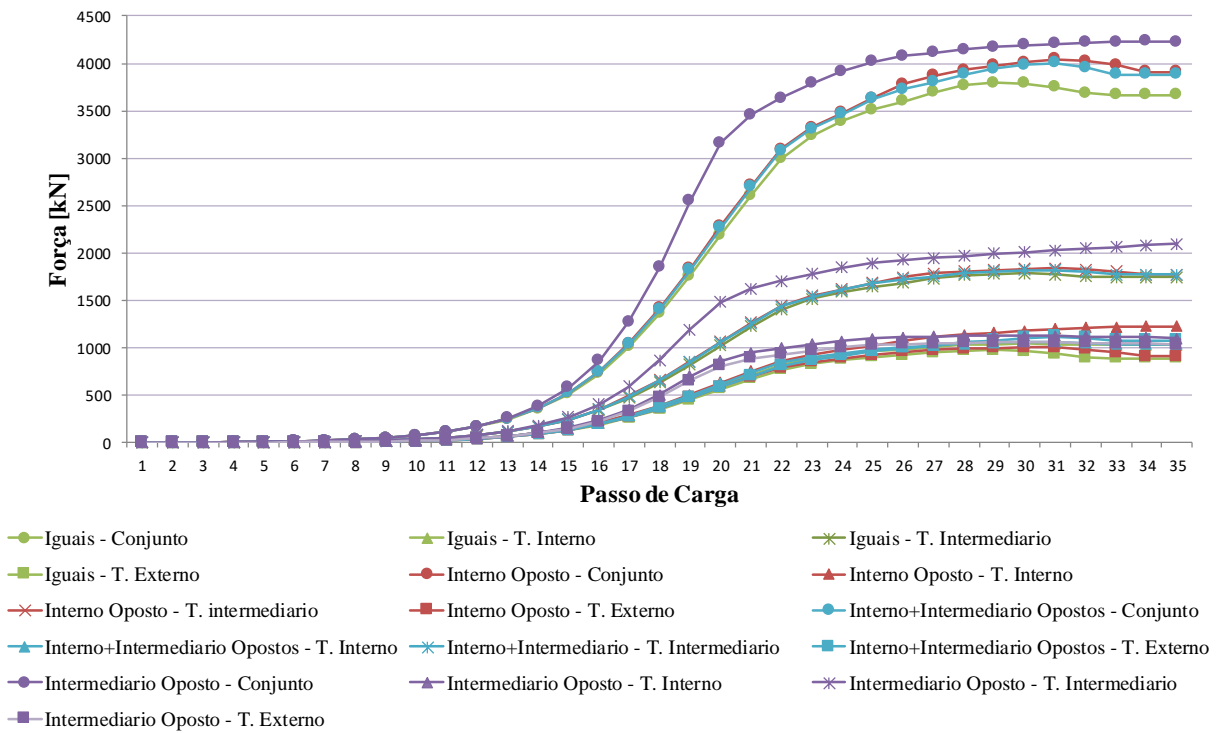


Figura B.37. Grupo 7 - Modelos 68 a 71 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

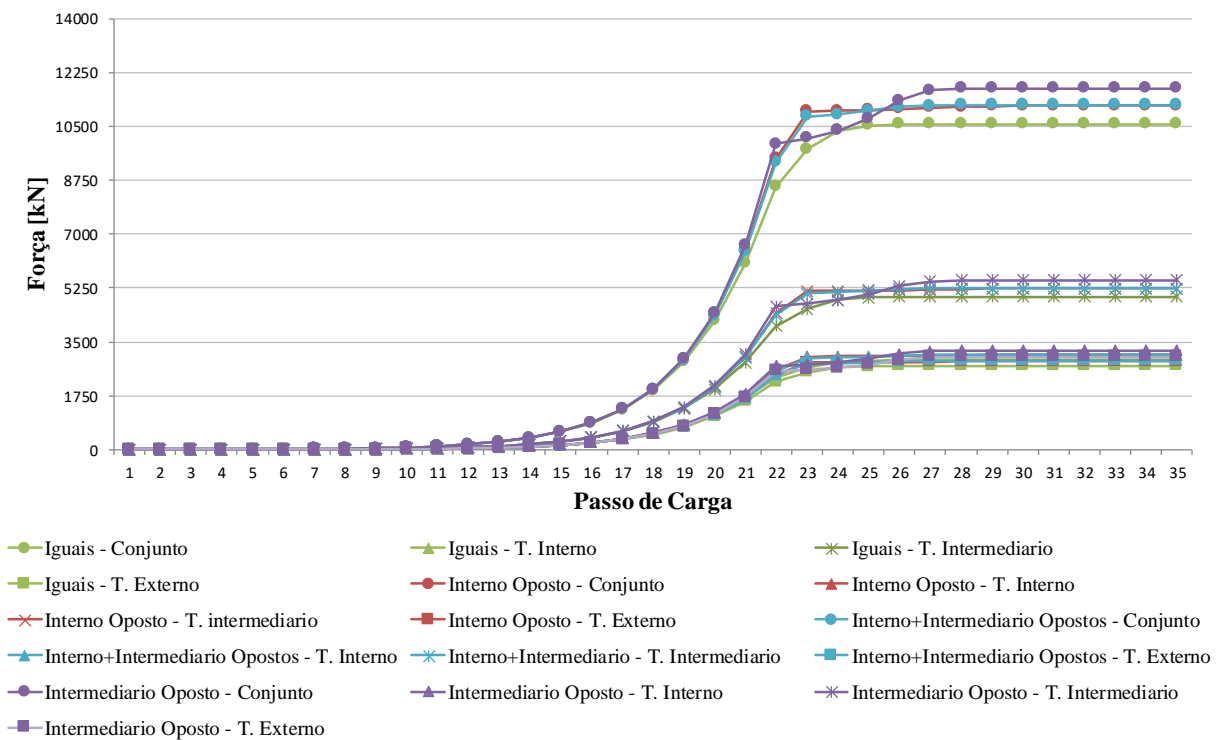


Figura B.38. Grupo 7 - Modelos 72 a 75 (fixo) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)

b) Sem Travamentos

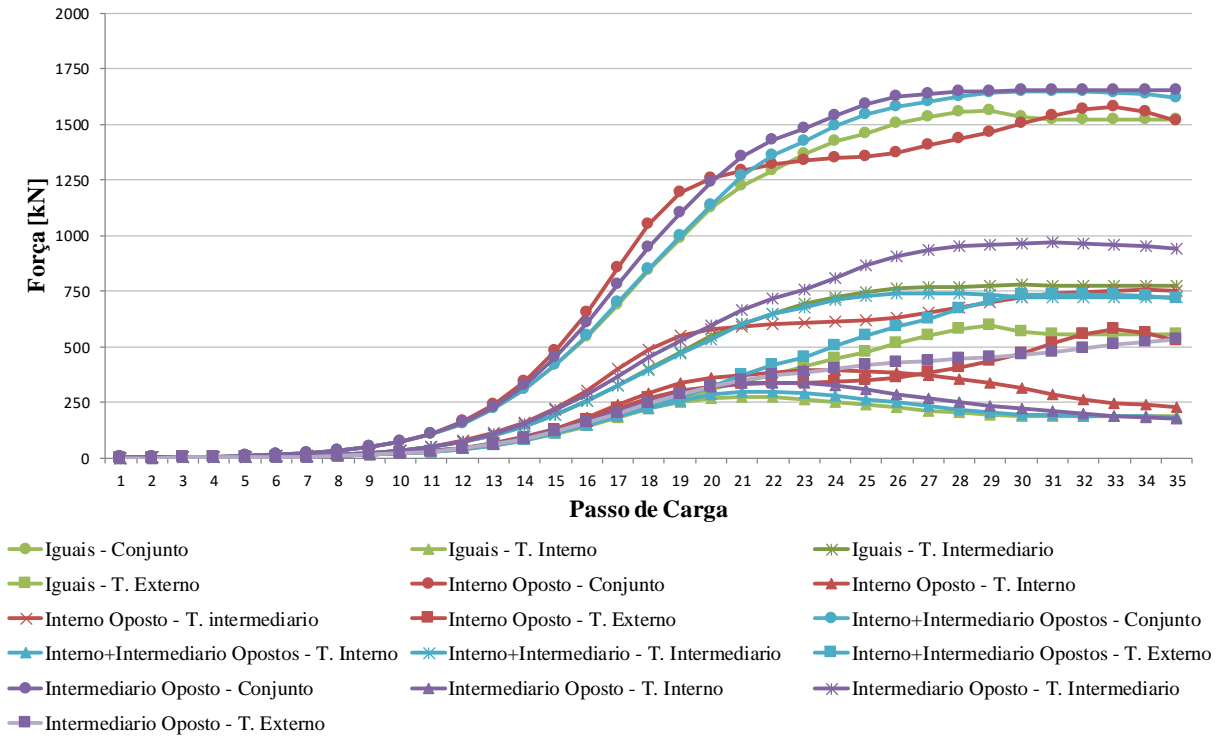


Figura B.39. Grupo 7 - Modelos 64 a 67 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=200$)

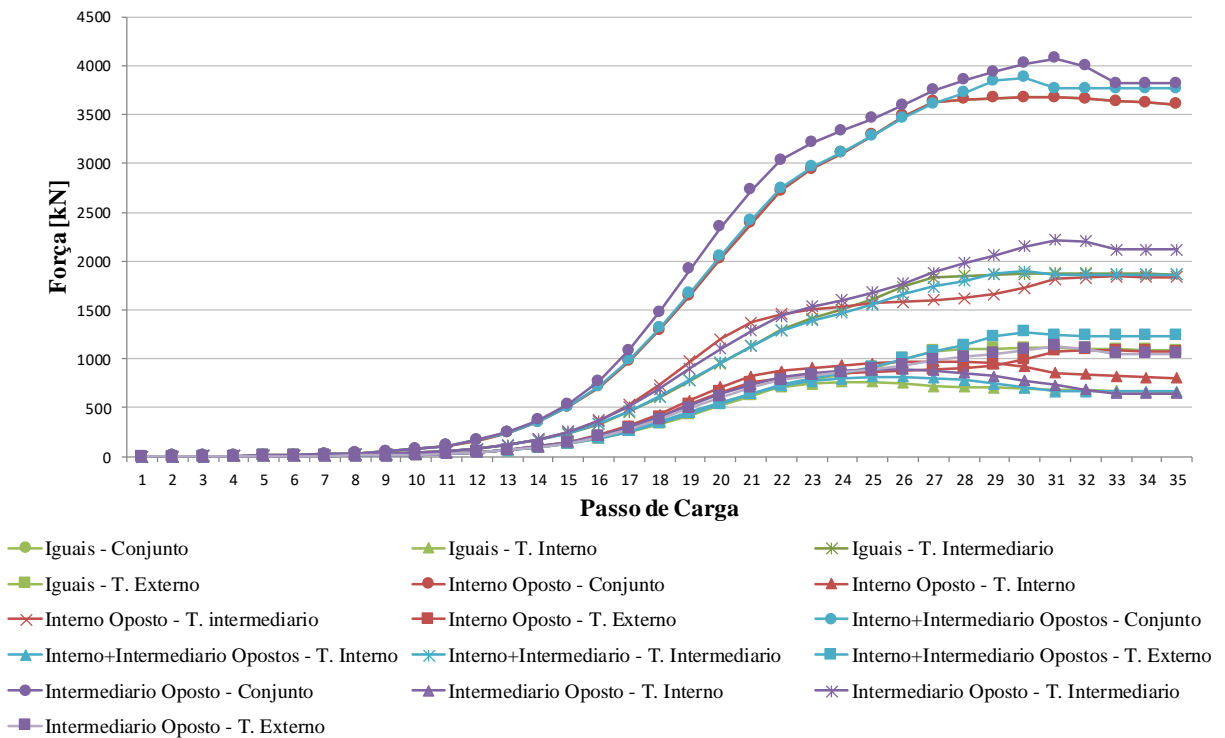


Figura B.40. Grupo 7 - Modelos 68 a 71 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=125$)

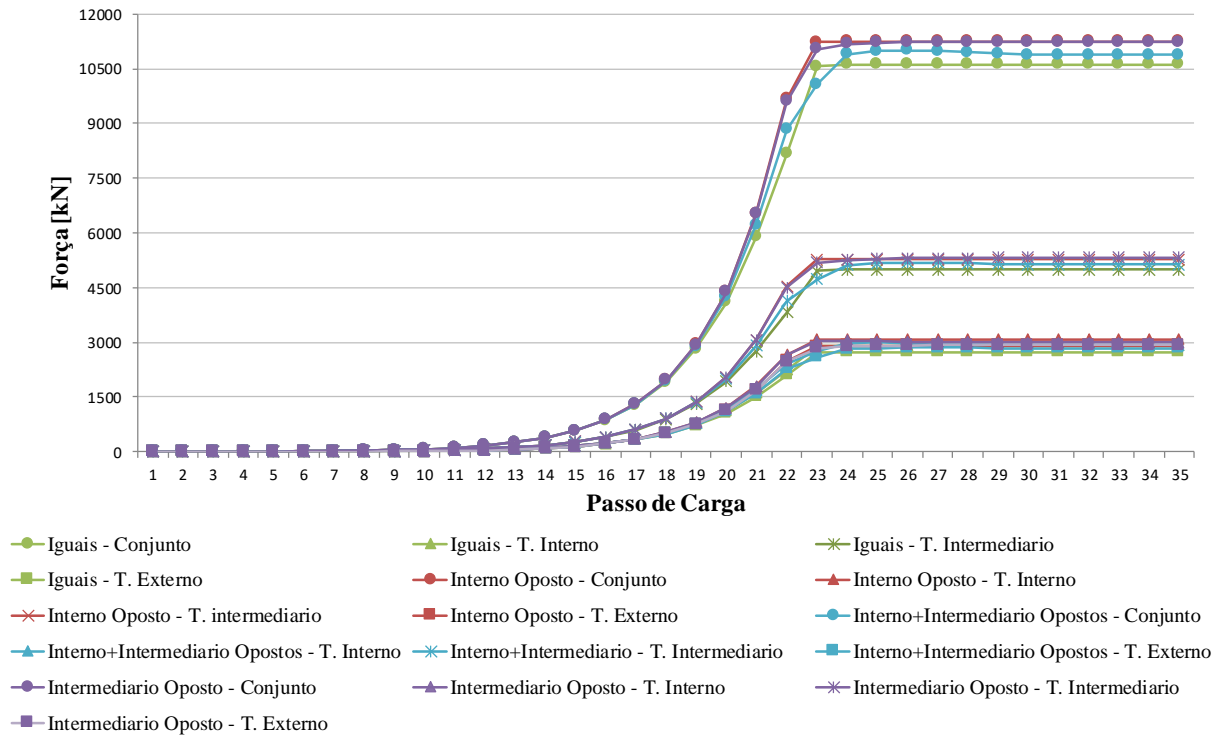


Figura B.41. Grupo 7 - Modelos 72 a 75 (livre) - Força de compressão em cada perfil ($\lambda=50$)