



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Chrysthyan Rhayhan Souza de Oliveira

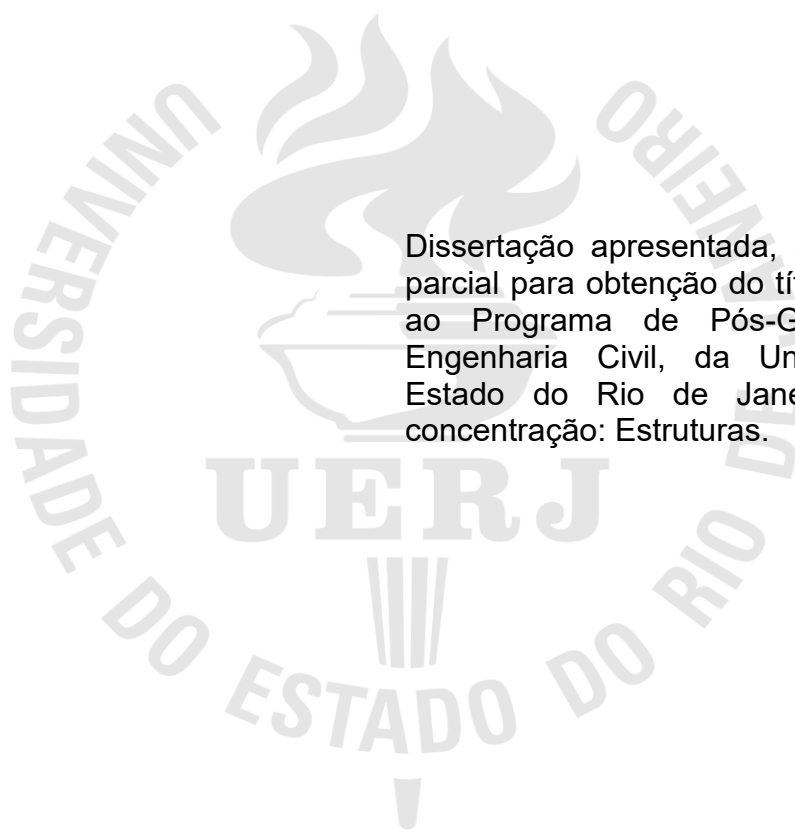
**Avaliação experimental e numérica de ligações tubulares tipo T
constituídas de aço inoxidável austenítico**

Rio de Janeiro

2024

Chrysthyan Rhayhan Souza de Oliveira

**Avaliação experimental e numérica de ligações tubulares tipo T constituídas de
aço inoxidável austenítico**



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

Orientadores: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof^a. Dr^a. Monique Cordeiro Rodrigues

Rio de Janeiro

2024

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

O48 Oliveira, Chrysthyan Rhayhan Souza de.
Avaliação experimental e numérica de ligações tubulares tipo T constituídas de aço inoxidável austenítico / Chrysthyan Rhayhan Souza de Oliveira. – 2024.
216 f.

Orientadores: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Monique Cordeiro Rodrigues.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Aço tubular - Estruturas - Teses. 3. Juntas (Engenharia) - Teses. 4. Aço austenítico - Teses. 5. Análise numérica - Teses. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Rodrigues, Monique Cordeiro. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.014.27

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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



Assinatura

15 de agosto de 2024

Data

Chrysthyan Rhayhan Souza de Oliveira

**Avaliação experimental e numérica de ligações tubulares tipo T constituídas
de aço inoxidável austenítico**

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

Aprovado em: 02 de agosto de 2024.

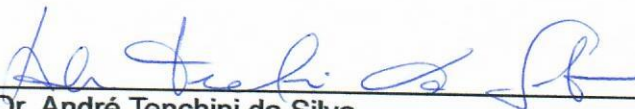
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Dra. Monique Cordeiro Rodrigues (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. André Tenchini da Silva
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

A todos que acreditaram no meu potencial e me ajudaram de alguma forma, desde uma palavra de incentivo até um ensinamento teórico, pois se eu consegui sair de tão longe e chegar até aqui, vocês têm grande participação nisso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ter me guiado com muita coragem, sabedoria, foco, força e fé ao longo desses anos de estudo longe de casa.

A minha mãe, Sandra Barboza de Souza, que nunca mediu esforços para me dar as melhores condições desde pequeno e sempre cuidou de mim mesmo de longe. A senhora é a pessoa mais batalhadora que eu conheço, tenho sorte em ser seu filho.

Ao meu pai, Luiz Claudio de Oliveira, por ser minha primeira referência no mundo da pesquisa e a maior referência profissional que eu poderia ter. Obrigado por confiar e investir em mim, e tenho certeza que iremos trabalhar juntos ainda.

A minha namorada, Lyêssa Viana, por topou esse desafio de dois anos morando em cidades diferentes, para que no futuro possamos ter uma vida melhor juntos. Você é a minha maior confidente, e agradeço todos os dias por ter você do meu lado.

Ao meu orientador, prof. Luciano Lima, que me mostrou o que é ser um pesquisador de excelência. Serei eternamente grato ao senhor pela confiança durante as atividades e congressos, e conselhos durante todo o desenvolvimento do trabalho.

A minha orientadora, prof^a. Monique Cordeiro, que com sua experiência me tranquilizou nos momentos mais difíceis da pesquisa, encontrando ótimas soluções.

A equipe do Laboratório de Engenharia Civil (LEC), entre eles, André, Danilo, Vinícius, Beatriz e Ramon, por toda a ajuda na preparação e nos ensaios dos corpos de prova da minha pesquisa. Vocês foram vitais para que tudo desse certo.

Aos meus amigos do mestrado, em especial, Joel Costa, Julianna Oliveira, Ada Kayser, Vinícius Sardinha, Ingrid Pereira, Mariana Sousa, Mateus Mendes, Mayara Martins e Bruno Guimarães, por todas as resenhas durante as atividades do curso.

Aos meus amigos do doutorado, entre eles, Ana Waldila, Keila Letícia, Fernando Sarquis, Mateus Nogueira, Felipe Coutinho e Danielle Malvaris, que sempre me aconselharam e me ajudaram tanto na parte teórica quanto prática dos assuntos.

Aos meus amigos do Rio de Janeiro, em especial, Antônio Romano, Yakson Chan e Pedro Ferro, por me ajudar na mudança e facilitar com a adaptação a cidade.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por sempre me apresentar as informações que necessitei.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, sendo essencial para que eu pudesse realizar todo o trabalho.

Às vezes a felicidade demora a chegar. Aí é que a gente não pode deixar de sonhar. Guerreiro não foge da luta e não pode correr. Ninguém vai poder atrasar quem nasceu para vencer.

Grupo Revelação

RESUMO

OLIVEIRA, Chrysthyan Rhayhan Souza de. *Avaliação experimental e numérica de ligações tubulares tipo T constituídas de aço inoxidável austenítico*. 2024. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A utilização de perfis com seções tubulares já é uma realidade nas construções ao redor do mundo, em função das diversas vantagens construtivas, como por exemplo, a elevada resistência a esforços axiais, o que leva ao emprego desse tipo de seção em estruturas treliçadas, resultando em ligações tubulares. Aliado a isso, o aço inoxidável apresenta características únicas, como a elevada resistência à corrosão, e caso se utilize o aço austenítico, a elevada resistência mecânica, já sendo visto seu uso em estruturas offshore e dutos industriais. Em função dessas premissas, o presente trabalho tem como objetivo avaliar de maneira experimental e numérica o comportamento de ligações tubulares tipo T entre perfis de seções quadradas em aço inoxidável austenítico com valores propostos de $\beta \leq 0,8$, buscando entender a influência dos parâmetros geométricos β (razão entre as larguras de montante e banzo) e 2γ (razão entre a largura do banzo e sua espessura) na resistência da ligação, além de identificar os modos de falha ocorridos e avaliar a aplicabilidade das equações normativas atuais que se baseiam em premissas do aço carbono. Um programa experimental foi desenvolvido para a realização de doze ensaios em ligações com seis configurações geométricas diferentes, resultando em protótipos com valores de $0,4 \leq \beta \leq 0,8$, abrangendo de maneira gradual o limite preconizado pelo Eurocode 3, parte 1-8 para o modo de falha de plastificação na face superior do banzo (modo A). Juntamente a isso, realizou-se uma modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio do programa ANSYS, em que a partir dos resultados experimentais ocorreu a calibração dos modelos numéricos, garantindo a coerência dos resultados. Na etapa de análise paramétrica, em função dos 348 modelos desenvolvidos, em conjunto com os resultados obtidos experimentalmente, concluiu-se que tanto o parâmetro geométrico β quanto a espessura do banzo (t_0) são críticos e tem influência direta na resistência das ligações tubulares, enquanto que não se encontrou uma relação proporcional para a influência do parâmetro 2γ . Observou-se que o modo de falha de plastificação na face superior do banzo é predominante nas ligações, contudo, existe a possibilidade da interação entre o modo A e a plastificação na face lateral do banzo (modo B), gerando um modo de falha combinado (A+B) para ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$. Após a realização de uma análise de confiabilidade, concluiu-se que tanto as equações para o modo A e modo B indicadas no Eurocode 3, parte 1-8 e pela NBR 16239 quanto em algumas formulações propostas na literatura resultam em dimensionamentos conservadores, não sendo aplicáveis para os casos analisados, e a partir disso, um novo fator de correção foi proposto, garantindo assim um projeto de ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável austenítico viável.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Análise experimental; Análise numérica; Ligação T; Ligações tubulares.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Chrysthyan Rhayhan Souza de. *Experimental and numerical assessment on austenitic stainless steel tubular T-Joints*. 2024. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The use of hollow structural sections is already a reality in construction worldwide due to the various constructive advantages, such as high resistance to axial forces, which allow its use in trusses, resulting in tubular joints. In addition, stainless steel has unique characteristics, such as high resistance to corrosion, and high mechanical resistance. Due to these properties, austenitic stainless steel is being adopted in offshore structures and industrial pipelines. Based on these topics, the present research aims to assess the experimental and numerical behaviour of austenitic stainless steel tubular T-joints with square hollow sections with $\beta \leq 0,8$, seeking to understand the influence of β (ratio of brace width to chord width) and 2γ (ratio of chord width to chord thickness) parameters in joint resistance, in addition to identifying the failure modes that occurred and evaluating the applicability of current design equations that are based on carbon steel assumptions. An experimental programme was developed to carry out twelve tests on joints with six different geometric configurations, resulting in specimens with values of $0,4 \leq \beta \leq 0,8$, gradually covering the limit recommended by Eurocode 3, part 1-8 for chord face failure (mode A). Along with this, numerical modelling was carried out using the Finite Element Method through the software ANSYS, and based on the experimental results, the numerical models were calibrated, ensuring the coherence of the results. In the parametric analysis, based on the 348 models developed, together with the experimental results, it was concluded that both the β parameter and the chord thickness (t_0) are critical and have a direct influence on the resistance of tubular joints. At the same time, a proportional relationship was not found for the influence of the 2γ parameter. It was noticed that the chord face failure is predominant in the joints. However, there is a possibility of interaction between mode A and chord side wall failure (mode B), providing a combined failure mode (A+B) for joints with $0,7 \leq \beta \leq 0,8$. After carrying out a reliability analysis, it was concluded that both the equations for mode A and mode B indicated in Eurocode 3, part 1-8, NBR 16239 and some formulations proposed in the literature result in conservative design, not applying to the cases analyzed, and with that, a new correction factor was proposed, ensuring an economical and safe design of austenitic stainless steel tubular T-joints.

Keywords: Stainless Steel; Experimental analysis; Numerical analysis; T-Joints; Hollow Section Joints.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfis tubulares em diversas edificações [4]	21
Figura 2 – Classificação dos perfis quanto a forma da seção [6]	22
Figura 3 – Comparativo entre seções abertas e fechadas (adaptado) [1]	23
Figura 4 – Ripshorster Bridge (Alemanha), feita com perfis CHS [13]	24
Figura 5 – Allianz Parque (SP), utilizando ligações RHS (Autor)	24
Figura 6 – Ponte Helix, em Singapura [18]	26
Figura 7 – Estação de metrô Erasmus, em Bruxelas (Bélgica) [19]	27
Figura 8 – Padrão de linhas de ruptura para ligações RHS [28]	32
Figura 9 – Curvas obtidas para modos de falha em ligações tipo T [32]	32
Figura 10 – Carga máxima para falha na face lateral do banzo [41]	35
Figura 11 – Carga máxima para falha na face superior do banzo [41]	35
Figura 12 – Séries de aço 200 e 300 [15]	43
Figura 13 – Séries de aço 400 [15]	43
Figura 14 – Correlação entre nomenclaturas para aços (adaptado) [62]	44
Figura 15 – Comparativo entre início da curva tensão-deformação dos aços [62]	45
Figura 16 – Ligação utilizada nos ensaios de Feng e Young [70]	48
Figura 17 – Experimentos realizados em ligações híbridas [72]	50
Figura 18 – Geometria e tipologia de ligações tubulares [10]	54
Figura 19 – Diferenças entre ligação tipo K e N (adaptado) [23]	55
Figura 20 – Modos de falha em ligações tubulares [23]	56
Figura 21 – Dimensões de ligação tipo T com seção SHS [11]	57
Figura 22 – Modo A, ou plastificação na face superior do banzo [1]	60
Figura 23 – Procedimento de corte dos perfis tubulares	71
Figura 24 – Preparação pós-corte dos perfis	72
Figura 25 – Corpo de prova extraído e suas dimensões	74
Figura 26 – Posição de extração dos corpos de prova	75
Figura 27 – Marcação em corpos de prova	75
Figura 28 – Utilização da máquina no ensaio de tração	76
Figura 29 – Comparação de alongamento após ensaio de tração	77
Figura 30 – Ruptura dos corpos de prova das seções estudadas	77
Figura 31 – Reação com a aplicação do gel decapante	77

Figura 32 – Curvas tensão-deformação do aço	79
Figura 33 – Pontos de solda para fixação de montante	81
Figura 34 – Soldagem entre perfis da ligação	81
Figura 35 – Ligações após soldagem.....	81
Figura 36 – Limpeza das marcas de solda.....	82
Figura 37 – Vistas e dimensões dos corpos de prova	83
Figura 38 – Dispositivos para medição de deslocamentos	85
Figura 39 – Dispositivos para medição de deformações.....	85
Figura 40 – Dispositivos para medição de cargas.....	86
Figura 41 – Vistas e posições da instrumentação durante o ensaio	87
Figura 42 – Condições de contorno e instrumentação dos ensaios	88
Figura 43 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,4$	90
Figura 44 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,4$	90
Figura 45 – T1A-C100x3-B40x3 após ensaio.....	91
Figura 46 – T1B-C100x3-B40x3 após ensaio.....	91
Figura 47 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,5$	92
Figura 48 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,5$	92
Figura 49 – T2A-C80x3-B40x3 após ensaio	93
Figura 50 – T2B-C80x3-B40x3 após ensaio	93
Figura 51 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,6$	94
Figura 52 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,6$	94
Figura 53 – T3A-C100x3-B60x3 após ensaio.....	95
Figura 54 – T3B-C100x3-B60x3 após ensaio.....	95
Figura 55 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,7$	96
Figura 56 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,7$	96
Figura 57 – T4A-C100x3-B70x3 após ensaio.....	97
Figura 58 – T4B-C100x3-B70x3 após ensaio.....	98
Figura 59 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,75$	98
Figura 60 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,75$	99
Figura 61 – T5A-C80x3-B60x3 após ensaio	100
Figura 62 – T5B-C80x3-B60x3 após ensaio	100
Figura 63 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,8$	101
Figura 64 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,8$	101

Figura 65 – T6A-C100x3-B80x3 após ensaio.....	102
Figura 66 – T6B-C100x3-B80x3 após ensaio.....	103
Figura 67 – Série A de ensaios	103
Figura 68 – Série B de ensaios	104
Figura 69 – Comparativo entre modos de falha dos ensaios	104
Figura 70 – Curvas carga-deslocamento dos ensaios	105
Figura 71 – Resistências da série A de ligações em termos de β	107
Figura 72 – Resistências da série B de ligações em termos de β	107
Figura 73 – Resistências experimentais e analíticas.....	107
Figura 74 – Razão entre cargas experimentais e numéricas em termos de β	108
Figura 75 – Geometrias do elemento SOLID185 (adaptado) [83]	110
Figura 76 – Malha utilizada nos modelos e seus detalhes	111
Figura 77 – Curva tensão-deformação utilizada nos modelos.....	113
Figura 78 – Condições de contorno utilizadas nos modelos	114
Figura 79 – Calibração para os ensaios T1-C100x3-B40x3.....	116
Figura 80 – Calibração para os ensaios T2-C80x3-B40x3	116
Figura 81 – Calibração para os ensaios T3-C100x3-B60x3.....	117
Figura 82 – Calibração para os ensaios T4-C100x3-B70x3.....	117
Figura 83 – Calibração para os ensaios T5-C80x3-B60x3.....	118
Figura 84 – Calibração para os ensaios T6-C100x3-B80x3.....	118
Figura 85 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T1B	119
Figura 86 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T4A	119
Figura 87 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T6B	120
Figura 88 – Resumo de parâmetros e dimensões dos modelos	122
Figura 89 – Relação entre modelos analisados e limites para 2γ das normas.....	123
Figura 90 – Relação entre modelos analisados e classes dos banzos	123
Figura 91 – Resistência numérica das ligações em termos de β e 2γ	124
Figura 92 – Análise de resistência das ligações em função de 2γ	126
Figura 93 – Análise de resistência das ligações em função de t_0	127
Figura 94 – Comparativo entre curvas dos modelos	129
Figura 95 – Distribuição da tensão de von Mises (em MPa) nos modelos.....	130
Figura 96 – Relação entre resistências numéricas ($N_{3\%b0}$) e analíticas	131
Figura 97 – Relação entre resistências numéricas (N_{Zhao}) e analíticas	132
Figura 98 – Razão entre resistências (com $N_{3\%b0}$) em termos de β	132

Figura 99 – Razão entre resistências (com N_{Zhao}) em termos de β	133
Figura 100 – Relação entre resistências numéricas ($N_{3\%b_0}$) e analíticas (modo B)	136
Figura 101 – Razão entre resistências em termos de β (modo B)	136
Figura 102 – Linha de tendência linear utilizada	138
Figura 103 – Relação entre resistência numérica ($N_{3\%b_0}$) e proposta	138
Figura 104 – Razão entre resistências em termos de β (proposta)	139
Figura 105 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 50 e 90 mm	165
Figura 106 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 100 e 180 mm	166
Figura 107 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 200 e 300 mm	167
Figura 108 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 50 e 90 mm	167
Figura 109 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 100 e 180 mm	168
Figura 110 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 200 e 300 mm	169
Figura 111 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 50 e 90 mm	169
Figura 112 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 100 e 180 mm	170
Figura 113 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 200 e 300 mm	171
Figura 114 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 50 e 90 mm	171
Figura 115 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 100 e 180 mm	172
Figura 116 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 200 e 300 mm	173
Figura 117 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 50 e 90 mm	173
Figura 118 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 100 e 180 mm	174
Figura 119 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 200 e 300 mm	175
Figura 120 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 50 e 90 mm	175
Figura 121 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 100 e 180 mm	176
Figura 122 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 200 e 300 mm	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites geométricos para utilização de normas.....	59
Tabela 2 – Limites geométricos extras para seções quadradas.....	60
Tabela 3 – Dimensões de corte esperadas para perfis utilizados	70
Tabela 4 – Dimensões típicas de corpos de prova planos (em mm) [79]	74
Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova.....	79
Tabela 6 – Medições reais das ligações tubulares ensaiadas.....	83
Tabela 7 – Resistências das ligações ensaiadas (em kN)	106
Tabela 8 – Comparação entre resistências experimentais e de projeto	106
Tabela 9 – Comparativo entre resistências numéricas e experimentais	120
Tabela 10 – Média e coeficiente de variação das análises	132
Tabela 11 – Análise de confiabilidade	142
Tabela 12 – Dimensões das ligações nos modelos numéricos	155
Tabela 13 – Resistências numéricas obtidas nas ligações	178
Tabela 14 – Modos de falha e classes dos membros das ligações.....	188
Tabela 15 – Resistências analíticas dos modelos.....	198
Tabela 16 – Razões entre resistências numéricas e analíticas.....	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
AISI	American Iron and Steel Institute
APDL	Ansys Parametric Design Language
AS	Australian Standard
AWS	American Welding Society
BISO	Bilinear Isotropic
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
CHS	Circular Hollow Section
CIDECT	Committee for International Development and Education on Construction of Tubular Structures
CoV	Coeficiente de Variação
CSM	Continuous Strenght Method
EN	European Standard
EHS	Elliptical Hollow Sections
Eurocode 3	European Code – Design of steel structures
FEM	Finite Element Method
IIW	International Institute of Welding
ISO	International Organization for Standardization
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
MISO	Multilinear Isotropic
NBR	Norma Brasileira
NZS	New Zealand Standard
RHS	Rectangular Hollow Section
SCI	The Steel Construction Institute
SHS	Square Hollow Section
TIG	Tungsten Inert Gas Welding
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área da seção transversal do banzo
A304	Aço inoxidável austenítico grau 304
a_x	Espessura da solda de filete na direção transversal da ligação
a_z	Espessura da solda de filete na direção diagonal da ligação
b_0	Largura da seção transversal do banzo
b_1	Largura da seção transversal do montante
b_i	Largura da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$) para perfis com seções SHS ou RHS
C_P	Fator de correção que considera a influência da quantidade de dados analisados
C_1	Nível de tensão normal no banzo
C_Φ	Coeficiente de calibração da análise de confiabilidade
d_0	Diâmetro da seção transversal do banzo
d_1	Diâmetro da seção transversal do montante
d_i	Diâmetro da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$) para perfis com seções CHS
E	Módulo de Elasticidade
F_M	Valor médio correspondente ao fator de fabricação
F_{DL}	Fator de majoração para carga permanente
F_{LL}	Fator de majoração para carga variável
B_D	Fator estatístico relacionado a carga permanente
B_L	Fator estatístico relacionado a carga variável (50 anos)
$f(n)$	Coeficiente para compressão no banzo
f_b	Resistência a flambagem da parede lateral do banzo
f_u	Tensão última do aço
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_{y0}	Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo
h_0	Altura da seção transversal do banzo
h_1	Altura da seção transversal do montante

h_i	Altura da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$) para perfis com seções SHS ou RHS
k_n	Fator que introduz o efeito de esforços axiais no banzo segundo o Eurocode 3, parte 1-8 e a NBR 16239
L_0	Comprimento do banzo
L_1	Comprimento do montante
M_0	Momento fletor no banzo segundo a ISO 14346 e o CIDECT
$M_{0,Ed}$	Momento fletor aplicado no banzo
$M_{pl,0}$	Momento plástico do banzo
M_M	Valor médio correspondente aos fatores do material adotado
m	Número de análises realizadas
n	Número de análises realizadas - 1
n	Fator relacionado a tensões em banzos retangulares
N_{EXP}	Resistência da ligação obtida experimentalmente
N_{EC3}	Resistência da ligação obtida analiticamente pela equação do Eurocode 3, parte 1-8 para modo A
$N_{EC3(\beta = 1)}$	Resistência da ligação obtida analiticamente pela equação do Eurocode 3, parte 1-8 para modo B
N_{FY}	Resistência da ligação obtida analiticamente pelas equações de Feng e Young
N_{NUM}	Resistência da ligação obtida nos modelos numéricos
N_{PR}	Resistência da ligação utilizando o fator de correção proposto
N_0	Esforço axial no banzo segundo a ISO 14346 e o CIDECT
$N_{0,Ed}$	Esforço axial aplicado no banzo
$N_{1,Rd}$	Resistência de cálculo para ligações tubulares
N_1	Resistência de cálculo para ligação tubular utilizado por Feng e Young
N_{Zhao}	Resistência da ligação obtida nos modelos numéricos utilizando o critério de deformação limite proposto por Zhao
$N_{1\%b0}$	Resistência da ligação obtida para deslocamentos na face superior do banzo correspondentes a 1% de sua largura
$N_{3\%b0}$	Resistência da ligação obtida nos modelos numéricos utilizando o critério de deformação limite atual

Q_f	Parâmetro que introduz o efeito das tensões axiais no banzo segundo a ISO 14346 e o CIDECT
Q_u	Parâmetro usado no cálculo de resistência da ligação tubular segundo ISO 14346 e o CIDECT
P_M	Média da comparação que está sendo considerada
r_0	Raio externo dos cantos da seção transversal do banzo
r_1	Raio externo dos cantos da seção transversal do montante
t_0	Espessura da parede do banzo
t_1	Espessura da parede do montante
t_i	Espessura da parede de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$) para perfis com seções SHS, RHS OU CHS
u	Deslocamento medido por LVDT na direção vertical
v	Deslocamento medido por LVDT na direção horizontal
V_F	Coeficiente de variação para o fator de fabricação
V_M	Coeficiente de variação para o fator do material
V_P	Coeficiente de variação da comparação em consideração
V_Q	Coeficiente de variação para os efeitos de cargas
$W_{el,0}$	Módulo elástico resistente da seção do banzo.
$W_{pl,0}$	Módulo plástico resistente da seção do banzo.
α	Fator de imperfeição
α_A	Fator redutor de resistência das ligações com $\beta < 0,7$ desenvolvido por Feng e Young
α_{A+B}	Fator incrementador de resistência das ligações com $0,7 \leq \beta \leq 0,85$ desenvolvido por Feng e Young
α_{PR}	Fator incrementador de resistência proposto
β	Parâmetro geométrico referente a razão entre a largura (ou diâmetro) da seção transversal do montante (ou diagonal) e a largura (ou diâmetro) da seção transversal do banzo
β_0	Fator incrementador de resistência das ligações com $0,7 \leq \beta \leq 0,85$ desenvolvido por Feng e Young
2γ	Parâmetro geométrico referente a razão entre a largura (ou diâmetro) da seção transversal do banzo e a espessura da seção transversal do banzo

γ_{a1}	Coeficiente de ponderação de resistência presente na NBR 16239 com o valor de 1,1
γ_{M5}	Coeficiente de ponderação de resistência presente no Eurocode 3, parte 1-8 com o valor de 1
ε	Deformação
ε_u	Deformação na tensão última
η	Razão entre altura da seção transversal do montante e largura da seção transversal do banzo
θ_1	Ângulo entre montante e banzo
θ_i	Ângulo entre montante ou diagonais (i = 1, 2, 3) e banzo
λ_0	Índice de esbeltez normalizado
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão
$\sigma_{0,2\%}$	Tensão obtida por meio de uma reta paralela à parte elástica da curva saindo de uma deformação de 0,2%
τ	Parâmetro geométrico referente a razão entre a espessura do montante (ou diagonal) e a espessura do banzo
φ	Fator utilizado na resistência da ligação pela AS/NZS 4673 com o valor de 0,9
φ	Fator para cálculo de redução devido a flambagem
ϕ	Fator de resistência da análise de confiabilidade
χ	Fator de redução para flambagem

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	20
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
1.1	Critérios de deformação limite e análise plástica	31
1.2	Ligações tubulares em aço carbono	36
1.3	Particularidades do aço inoxidável	41
1.4	Ligações tubulares em aço inoxidável	46
2	DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES TUBULARES SOLDADAS	52
2.1	Considerações iniciais	52
2.2	Critérios de dimensionamento e geometrias para ligações tubulares	53
2.3	Modos de falha em ligações tubulares	55
2.4	Parâmetros geométricos em ligações tubulares	57
2.5	Cálculo de ligações tubulares tipo T em aço carbono	58
2.5.1	<u>Diretrizes de uso</u>	58
2.5.2	<u>Eurocode 3, parte 1-8 [10]</u>	60
2.5.3	<u>NBR 16239:2013 [12]</u>	62
2.5.4	<u>ISO 14346 [11] e CIDECT [23]</u>	63
2.6	Cálculo de ligações tubulares tipo T em aço inoxidável	64
2.6.1	<u>Eurocode 3, parte 1-4 [20]</u>	65
2.6.2	<u>AS/NZS 4673 [21]</u>	65
2.6.3	<u>Formulações propostas por Feng e Young [71]</u>	66
3	METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	69
3.1	Considerações iniciais	69
3.2	Definição das geometrias e preparação prévia	69
3.3	Preparação prévia dos perfis	71
3.4	Caracterização do material	72
3.5	Soldagem entre perfis	80
3.6	Configurações geométricas e nomenclatura das ligações	82
3.7	Instrumentação dos ensaios	84
3.8	Condições de contorno e aplicação de carga	87
4	AValiação DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	89
4.1	Considerações iniciais	89

4.2	Ligações com $\beta = 0,4$	89
4.3	Ligações com $\beta = 0,5$	92
4.4	Ligações com $\beta = 0,6$	94
4.5	Ligações com $\beta = 0,7$	96
4.6	Ligações com $\beta = 0,75$	98
4.7	Ligações com $\beta = 0,8$	100
4.8	Resistências obtidas e comparação com normas	105
5	MODELOS NUMÉRICOS	109
5.1	Considerações iniciais	109
5.2	Malha de elementos finitos e análise não linear utilizada	109
5.3	Modelagem do material e não linearidade física	112
5.4	Condições de contorno e de carregamento	114
5.5	Validação do modelo numérico	115
6	ANÁLISE PARAMÉTRICA	121
6.1	Considerações iniciais	121
6.2	Nomenclatura dos modelos	121
6.3	Influência dos parâmetros β e 2γ	123
6.4	Modos de falha	128
6.5	Comparação com as formulações atuais	131
6.6	Proposta de nova equação	137
6.7	Análise de confiabilidade	140
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	144
	REFERÊNCIAS	147
	APÊNDICE A	155
	APÊNDICE B	165
	APÊNDICE C	178
	APÊNDICE D	188
	APÊNDICE E	198
	APÊNDICE F	207

INTRODUÇÃO

Generalidades

O emprego de estruturas metálicas já é uma realidade nas obras ao redor do mundo, em função de sua versatilidade, agilidade de aplicação e precisão de montagem, em comparação a outras técnicas construtivas utilizadas no ramo. Esses pontos positivos sobrepõem a problemática dos orçamentos mais altos que geralmente a utilização desses perfis proporcionam, ou seja, o foco nos resultados tanto estruturais quanto econômicos, a longo prazo, são importantes quando se opta por trabalhar com elementos em aço.

Em função disso, a engenharia buscou otimizar cada vez mais as seções transversais dos perfis metálicos para que se pudesse ter resultados mais satisfatórios e coerentes com o que se desejava. Como consequência, a criação das seções tubulares gerou um grande avanço na área, em função de suas inúmeras vantagens construtivas, que podem ser observadas de maneira primordial na natureza, como por exemplo, em bambus. Dentre essas vantagens, pode-se citar principalmente as grandes resistências aos esforços de compressão, torção e flexão em todas as direções [1], além de garantir uma maior economia na proteção contra corrosão e incêndio em função de sua forma fechada sem cantos retos, o que leva a diminuição da área que necessita de proteção [2]. Quando expostas a ação de carregamentos naturais, como as ondas e o vento, as seções tubulares também têm um desempenho aprimorado [1].

Um outro ponto importante para se citar sobre esse tipo de seção é que por ser fechada, favorece ao preenchimento da mesma com concreto [2], passando a trabalhar como um elemento misto, em que essa interação garante uma maior proteção contra a ação do fogo, além de resistência à flambagem no caso de colunas. Aliado a essa praticidade, a possibilidade de criação de vãos livres de maiores dimensões (reduzindo o número de colunas), com uma montagem industrial de alta precisão (quantidade mínima de desperdício) e com redução do prazo de execução e finalização da construção [3] fez com que os perfis tubulares passassem a ser empregados em diversas áreas, como engenharia civil e mecânica, arquitetura,

offshore, aeronáutica e transportes [1], além de serem usados em sistemas de calor, ventilação e outros fluidos [2], podendo ser traduzido como seções que possibilitam soluções leves, econômicas e competitivas [4]. A Figura 1 apresenta o emprego dos perfis tubulares em diferentes construções.



a) Passarela em Belo Horizonte (MG)



b) Galpão em Belo Horizonte (MG)



c) Cobertura em universidade (SP)



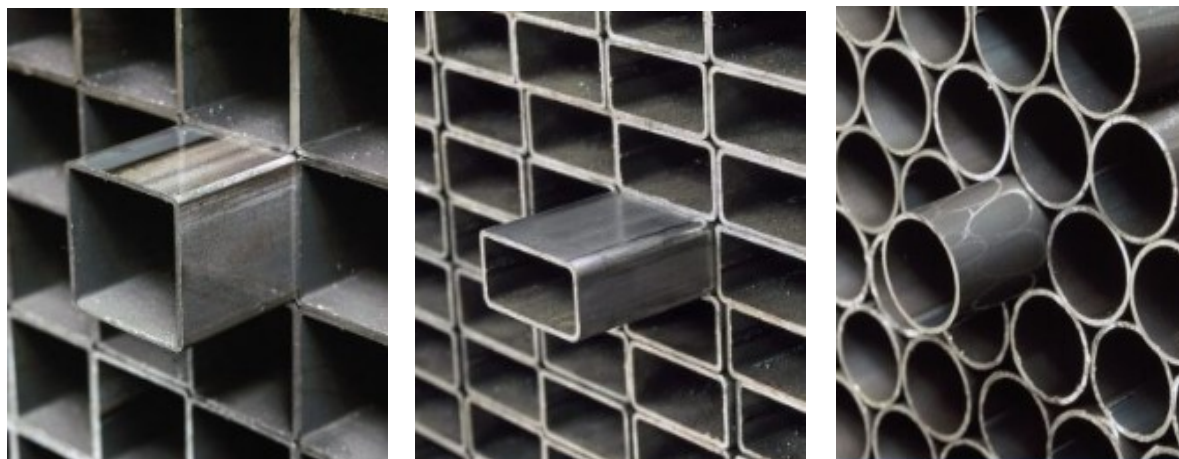
d) Aeroporto em Recife (PE)

Figura 1 – Perfis tubulares em diversas edificações [4]

Os perfis tubulares podem ser classificados de algumas maneiras, em que a principal é o formato da seção transversal. Atualmente, existem três principais tipos de seções: Quadradas (SHS – *Square Hollow Sections*), retangulares (RHS – *Rectangular Hollow Sections*) e circulares (CHS – *Circular Hollow Sections*), em que cada uma delas tem suas particularidades quanto ao uso, sendo exemplificadas na Figura 2. Também existe a seção elíptica (EHS – *Elliptical Hollow Sections*), utilizada em casos especiais, conforme a necessidade de projeto.

Um outro tipo de classificação de seções tubulares é em razão do modo de fabricação do perfil, podendo ser: sem costura (*seamless pipe*), onde por meio do processo de laminação, extrusão e fundição (*rolling*, *extrusion* e *casting*) obtém-se o perfil na forma requerida, ou seja, um bloco maciço é laminado e perfurado por um

equipamento que molda no formato requerido [5], onde esse processo praticamente extingue as tensões residuais em consequência da variação de temperatura [2]; com costura (*welded pipe*), onde chapas do aço requerido são calandradas até o formato desejado, e após isso, ocorre a soldagem na junção das extremidades [5].



a) Perfil SHS

b) Perfil RHS

c) Perfil CHS

Figura 2 – Classificação dos perfis quanto a forma da seção [6]

Quando se trata de perfis tubulares, é notório que sua elevada distribuição de massa afastada do centro de gravidade, sendo também homogênea (para seções quadradas e circulares) em torno do seu eixo longitudinal, garantem aspectos importantes, tais como valores elevados para os raios de giração que passam nos eixos da seção transversal, além de conferir valores iguais (seções SHS e CHS) para as propriedades geométricas, o que garante um aspecto mais uniforme de resistência para os dois eixos, otimizando a resistência da barra [4]. Com isso, quando comparados a perfis de seções abertas (que tem menores raios de giração), tornam-se muito mais proveitosos e recomendados para estruturas com solicitações de compressão, como treliças, colunas e contraventamentos [7].

A Figura 3 resume parte dessas vantagens no comparativo entre seções fechadas (CHS e RHS) e abertas (perfis da classe HEA, IPE, cantoneiras simples e duplas) de elementos estruturais com comprimento de flambagem de 3 metros, comparando-os em determinados níveis de cargas para que se obtenha o consumo dos perfis a serem empregados. Observa-se que para um mesmo nível de carregamento, os perfis abertos necessitam ser mais pesados (consumo maior de aço), enquanto os perfis tubulares são soluções mais leves, podendo gerar um ganho

econômico em outras partes da estrutura em função desse menor uso de material [7]. Aliado a isso, percebe-se que para cargas menores, essa diferença entre seções abertas e fechadas é maior, o que tende a diminuir conforme incrementos de carga sejam aplicados, pois a esbeltez também tende a diminuir [1]. É importante ressaltar que a espessura da parede do tubo influencia diretamente na rigidez e resistência do elemento, e otimizando esses pontos, não é necessário alterar outras dimensões da seção ou da geometria da estrutura [3].

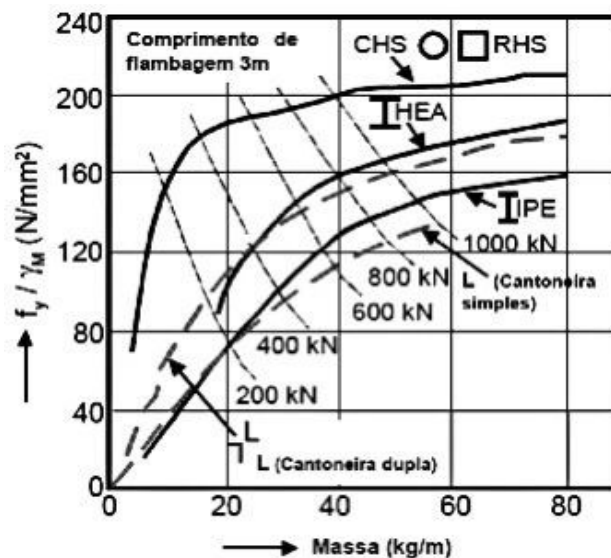


Figura 3 – Comparativo entre seções abertas e fechadas (adaptado) [1]

Em grande parte dos casos, a ligação entre os perfis tubulares que compõem a treliça ocorre por meio do processo de soldagem, ou seja, o tipo de ligação é soldada. Pode-se definir ligação como sendo o conjunto de meios e elementos de ligação cuja função é unir uma barra a outras barras ou a um dispositivo qualquer [8]. Em grande parte das ligações tubulares, utilizam-se os perfis CHS e RHS (incluindo o SHS), onde os perfis circulares tem um melhor apelo estético, além de fornecer uma distribuição eficiente em torno dos eixos da seção e oferecer uma menor resistência ao vento. Contudo, a execução desse tipo de ligação é mais problemática, visto que é necessário realizar um corte para conformar as seções CHS, fazendo que esse tipo de ligação tenha custos maiores, onde os perfis RHS passaram a ser uma solução mais utilizada em situações que se necessita de maiores cuidados com fixação e suporte [9]. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam estruturas reais com elementos tubulares.

Ao observar um sistema treliçado composto de ligações tubulares, é comum que se pense que o problema maior da estrutura ocorra em seus membros, com a possibilidade de flambagem dos mesmos. Contudo, as regiões críticas nesses sistemas de treliças são as ligações, uma vez que a resistência dessas é menor que a dos demais elementos, controlando o dimensionamento [7]. A partir disso, diversos institutos e órgãos regulamentadores iniciaram pesquisas sobre o assunto, sendo o *Committee for International Development and Education on Construction of Tubular Structures*, conhecido como CIDECT, desde a década de 60, o que proporcionou uma grande divulgação dos assuntos por meio de suas instruções técnicas publicadas, onde essas foram amplamente aceitas e adotadas por algumas normas, como o Eurocode 3, parte 1-8 [10], ISO 14346 [11], e a NBR 16239 [12].



Figura 4 – Ripshorster Bridge (Alemanha), feita com perfis CHS [13]

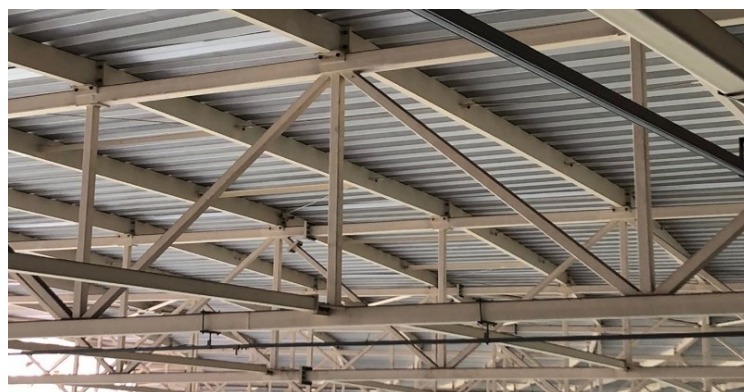


Figura 5 – Allianz Parque (SP), utilizando ligações RHS (Autor)

O Eurocode 3, parte 1-8 [10] apresenta diversos modos de falhas possíveis para as ligações tubulares em aço carbono. Pode-se citar que os principais são a falha (plastificação) da face superior do banzo e a falha da parede lateral do banzo, em que

a ocorrência de cada um depende da geometria das seções utilizadas, do tipo de ligação adotado, e principalmente, das dimensões da seção transversal. Para ligações tubulares do tipo T (banzo e montante a 90°) entre perfis SHS, caso a ligação obedeça uma série de limites geométricos indicados em norma, e que aliado a isso, o parâmetro beta (β), caracterizado pela razão entre a largura do montante (b_1) e a largura do banzo (b_0), esteja em um intervalo de $0,25 \leq \beta \leq 0,85$, admite-se que o modo de falha é a plastificação da face superior do banzo; caso o valor de β seja igual a 1, a falha na face lateral do banzo se torna o estado limite principal.

Observa-se que grande parte das pesquisas desenvolvidas e normas utilizadas atualmente estão relacionadas ao desempenho de ligações tubulares de aço carbono. Contudo, existem outros tipos de materiais que podem ser empregados em perfis tubulares, e conseqüentemente, em suas ligações, como por exemplo, o aço inoxidável, sendo esse um campo que vem desenvolvendo cada vez mais.

O aço inoxidável teve sua criação em torno do início do século XX, na Inglaterra e na Alemanha, em que esse termo não se refere apenas a um único tipo de liga, mas sim a um conjunto de ligas à base de Ferro, ou seja, compostas pelos elementos Ferro (Fe), Carbono (C) e Cromo (Cr), em que se tem um mínimo de 10,5% de Cromo [14]. O Cromo é considerado o principal elemento de um aço inoxidável, visto que é o responsável por garantir a elevada resistência a corrosão típica dessa classe de aço. Diversas pesquisas apresentaram resultados que indicam uma considerável diminuição da velocidade de oxidação desse tipo de liga conforme se aumenta a concentração de Cromo [15], permitindo sua utilização em tubulações de processamentos da indústria em geral (celulose, petróleo) e da área *offshore* [16].

Além da resistência à corrosão, os aços inoxidáveis tem outras vantagens que os tornam tão atrativos, como uma resistência mecânica elevada, em função da adição de Níquel (Ni) na liga especificada [14], além da sua grande capacidade dúctil, o que permite seu uso em máquinas e equipamentos com alta precisão de desempenho, tais como aeronaves [16]. Aliado a esse ponto de resistência mecânica, o apelo estético devido ao seu brilho que se mantém constantemente (caso ocorra manutenção adequada) faz com que os aços inoxidáveis tornem-se atrativos tanto para o lado arquitetônico quanto para o lado estrutural de uma construção [16], podendo ser utilizados em vigas, colunas, e treliças de galpões industriais [7].

Pode-se dividir os aços inoxidáveis em três principais tipos, sendo eles ferríticos, austeníticos e duplex. Os aços ferríticos são magnéticos com estrutura de

corpo centrado, composto basicamente de ligas de Ferro e Cromo [15], tendo propriedades parecidas com classes de aço carbono, ou seja, menos dúcteis que as demais categorias. Já os aços austeníticos são não-magnéticos com estrutura cúbica de faces centradas, sendo composto de ligas de Ferro, Cromo e Níquel [15], onde o último elemento proporciona maior ductilidade e soldabilidade, sendo o tipo mais popular nas obras atuais. Por fim, o aço duplex é caracterizado por uma combinação ferrítica-austenítica, usando o melhor dos dois materiais, ou seja, mesmo sendo menos dúctil que o aço austenítico, apresenta uma alta resistência mecânica [7]. É importante ressaltar que algumas literaturas indicam um quarto tipo de aço inoxidável, nomeado como martensítico, sendo similar a classe dos ferríticos, diferenciando-se principalmente pelos teores de carbono (tem maiores porcentagens desse elemento).

Uma das principais características comportamentais do aço inoxidável é a ausência de um patamar de escoamento bem definido em função de sua não linearidade no regime elástico e plástico, gerando uma curva tensão-deformação em que se adota a tensão de escoamento correspondente a 0,2% da deformação plástica [7]. Aliado a isso, outra propriedade desse tipo de aço é a anisotropia e assimetria no seu comportamento físico para esforços axiais, que é melhor observada quando se extrai diferentes curvas de caracterização do material [17].

Em função dessas características, o aço inoxidável vem se tornando uma realidade em estruturas tubulares, onde na última década, passou-se a usar cada vez mais ligações tubulares com esse tipo de material para que se possa aproveitar suas vantagens a longo prazo, mesmo que o aspecto econômico seja o principal fator impeditivo para a total implementação desse material. A Figura 6 e a Figura 7 mostram estruturas que utilizam perfis tubulares e aços inoxidáveis.



Figura 6 – Ponte Helix, em Singapura [18]



Figura 7 – Estação de metrô Erasmus, em Bruxelas (Bélgica) [19]

O presente trabalho tem o intuito de analisar tanto experimentalmente quanto numericamente os possíveis modos de falha de ligações tubulares tipo T em perfis SHS de aço inoxidável com o valor de $\beta \leq 0,85$, além de comparar as resistências obtidas com as indicadas pelas normas vigentes atuais e formulações propostas na literatura, avaliando para cada caso sua aplicabilidade.

Motivação

É notório que cada vez mais os perfis com seções tubulares têm ocupado espaço nas grandes construções no mundo. Falando especificamente do Brasil, é um método construtivo que vem se consolidando cada vez mais, em consequência do desenvolvimento de pesquisas na área baseadas na parceria entre empresas do ramo e universidades, tais como a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), que proporcionam a formação de profissionais conscientes no setor, onde os mesmos passam a empregar esse tipo de tecnologia em suas obras.

A partir disso, diversos trabalhos, recomendações e instruções normativas foram formalizadas e apresentadas a comunidade científica ao redor do mundo, evidenciando vantagens claras dos perfis tubulares, além da influência que as ligações entre os perfis podem promover no comportamento global da estrutura, visto que nessa região é que em grande maioria dos casos surgem as falhas estruturais decorrentes dos esforços nos elementos conectados. Contudo, grande parte dessas

pesquisas e normas abordam o comportamento de ligações tubulares entre perfis de aço carbono, e muito pouco ainda se tem (em forma de recomendações normativas) acerca da utilização do aço inoxidável nesses elementos, onde conforme já mencionado anteriormente, são evidentes as suas vantagens construtivas.

Dito isso, já existem os primeiros exemplos de construções que utilizam ligações entre perfis tubulares de aço inoxidável, tais como a Ponte Helix, em Singapura, e a estação de metrô Erasmus, na Bélgica, indicando a urgência em analisar se os modos de falha que são descritos para ligações de aço carbono e aço inoxidáveis são os mesmos, pois as recomendações que realmente citam o uso desse material em seções tubulares, tais como o Eurocode 3, parte 1-4 [20] e a AS/NZS 4673 [21] surgem apenas como uma alternativa complementar, ou seja, as equações que essas recomendações apresentam têm como base as premissas comportamentais do aço carbono, uma vez que a gama de ensaios experimentais nessa área é infinitamente maior que os realizados em aço inoxidável, fazendo que o dimensionamento possa ser realizado de maneira equivocada, em função da caracterização elasto-plástica perfeita adotada [22], além da grande capacidade dúctil que essa classe de aço proporciona, podendo trabalhar com maiores margens de deformações do que o aço carbono.

É a partir disso que surge o principal foco do presente estudo, para que futuramente, o trabalho venha a agregar na elaboração de uma norma que realmente atenda as especificações do aço inoxidável.

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento de ligações tubulares tipo T em perfis quadrados (SHS) de aço inoxidável com o parâmetro $0,25 \leq \beta \leq 0,85$ de maneira experimental e numérica, em que o montante da estrutura estará submetido à compressão axial.

Aliado a isso, existem diversos objetivos específicos da pesquisa. Primeiramente, busca-se entender se os modos de falha, atuantes em ligações com perfis SHS de aço inoxidável, são os mesmos que ocorrem em uma estrutura com mesma geometria, mas com o aço carbono sendo o material usado, uma vez que para

esse segundo caso, as falhas já estão definidas por norma. Juntamente a esse ponto, realizar um comparativo entre os valores resistentes obtidos pelas análises experimentais e numéricas com as recomendações de projeto de diversos países, além de formulações propostas a partir de outras pesquisas na área de ligações tubulares em aços inoxidáveis, utilizando diferentes critérios de deformação limite. Após isso, analisar a influência dos parâmetros geométricos β e 2γ na resistência da ligação. Por fim, propor uma formulação que melhor se adeque para indicar a resistência de ligações tubulares tipo T entre perfis de aço inoxidável austenítico, difundindo essa técnica construtiva de maneira correta.

Estrutura da dissertação

A dissertação inicia-se com a introdução do trabalho, apresentando conceitos gerais que serão expostos ao decorrer do texto, tais como vantagens estruturais e classificações dos perfis tubulares, especificações iniciais acerca dos aços inoxidáveis, utilização de ligações tubulares nas estruturas atuais, entre outros. Além disso, a introdução apresenta a motivação da pesquisa e os objetivos gerais e específicos do trabalho.

O capítulo um tem como intuito apresentar uma revisão bibliográfica sobre a temática do trabalho, indicando parte dos principais trabalhos desenvolvidos ao decorrer dos anos na área de ligações tubulares em aço carbono e ligações tubulares em aço inoxidável, com o foco nos mais variados esforços e condições de contorno em torno da estrutura. Juntamente a isso, apresenta-se as principais características físicas, químicas e comportamentais dos aços inoxidáveis em perfis tubulares, de acordo com a literatura.

O capítulo dois explica as particularidades de cada uma das principais recomendações normativas para ligações tubulares tipo T entre perfis SHS, com o foco nos possíveis modos de falha, formulações e critérios de geometria que devem ser obedecidos para ligações soldadas com $0,25 \leq \beta \leq 0,85$. As principais normas referenciadas são o Eurocode 3, parte 1-8 [10], a ISO 14346 [11] e a NBR 16239 [12], além das recomendações técnicas do CIDECT [23]. Aliado a isso, apresenta-se as instruções para o dimensionamento de ligações tubulares em aço inoxidável indicadas

pelo Eurocode 3, parte 1-4 [20], AS/NZS 4673 [21] e formulações decorrentes de outras pesquisas presentes na literatura.

O capítulo três descreve a metodologia elaborada para a realização dos ensaios experimentais em ligações tubulares de aço inoxidável, que ocorreram no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Dentre as etapas realizadas, pode-se citar a preparação dos corpos de prova, a caracterização do material baseado no ensaio de tração, a soldagem entre perfis SHS, o programa experimental e o modo de captação de dados, juntamente de todos os equipamentos utilizados e suas especificações.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios experimentais, indicando as curvas carga-deslocamento extraídas dos LVDTs e as curvas carga-deformação extraídas dos extensômetros. Essa etapa teve como foco analisar os modos de falha obtidos e resistências alcançadas, realizando uma primeira comparação dos resultados com as normas vigentes atualmente.

O capítulo cinco tem como foco a descrição do modelo numérico desenvolvido utilizando o Método dos Elementos Finitos, que foi baseado e calibrado no comportamento dos ensaios. Apresenta-se as condições de contorno adotadas, tipo de elemento utilizado, tamanho de malha definido, curva do material escolhida, calibração do modelo numérico, entre outros tópicos.

O capítulo seis apresenta a análise paramétrica realizada a partir dos modelos numéricos desenvolvidos, com uma extensa gama de dimensões utilizadas para que se possa aumentar o escopo das ligações estudadas. Os resultados foram comparados com os valores de resistência obtidos pelas principais recomendações normativas atuais, além de formulações já desenvolvidas em estudos da área, sendo possível estabelecer relações entre os parâmetros geométricos considerados críticos e as resistências encontradas. Por fim, após a realização de uma análise de confiabilidade, foi proposto um novo fator de correção que indica valores mais adequados para resistência de ligações tubulares tipo T entre perfis de aço inoxidável austenítico.

O capítulo sete traz as principais conclusões obtidas a partir do estudo desenvolvido por meio das análises experimentais e numéricas, bem como sugestões para as futuras pesquisas desenvolvidas na área.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Critérios de deformação limite e análise plástica

Quando se analisa um tipo de estrutura ou elemento, existem parâmetros universais que devem ser utilizados em seu dimensionamento, e em função disso, as normas tem o intuito de estabelecer essa regulamentação. Pode-se observar bem esse aspecto no Eurocode 3, parte 1-8 [10], em que grande parte das ligações são dimensionadas utilizando o Método das Componentes, porém, as ligações soldadas entre perfis tubulares são uma exceção a essa regra.

Segundo Kostasiki *et al.* [24], o projeto de ligações tubulares pode ser fundamentado por meio de uma análise plástica ou de critérios de deformação limite. Quando se fala sobre análise plástica, entende-se que existem alguns mecanismos de colapso cineticamente admissíveis, onde cada um deles está relacionado a um fator multiplicador de cargas da estrutura, que pode ser igual ou maior do que seu multiplicador de colapso [25]. A solução encontrada vai ser precisa ou não em consequência da escolha do mecanismo mais correto para a ligação, visto que a relação entre ambos é diretamente proporcional [5], ou seja, caso se escolha o mecanismo adequado, tem-se uma resposta mais exata [9].

A base da formação dos mecanismos plásticos são as charneiras plásticas, ou seja, partem da formação de linhas de rupturas (*yield lines*), onde esses princípios foram aplicados em diversas ligações soldadas entre perfis RHS para determinar sua resistência, utilizando o princípio das rótulas plásticas e o da deformação da face conectada [25]. Inúmeros trabalhos já foram apresentados sobre essa temática, entre os quais se destacam: Kato e Nishiyama [26], Packer [27], Cao *et al.* [28], [29], Kostasiki *et al.* [24], Davies e Packer [30], além de Zhao e Hancock [31]-[33]. Enquanto isso, a pesquisa desenvolvida por Liu *et al.* [34] teve como foco as linhas de ruptura em ligações tubulares entre perfis CHS. A Figura 8 mostra um exemplo de linhas de rupturas formadas.

Kostasiki [24] afirma que existem situações onde pode-se observar modos de falha na face conectada de ligações tubulares que não geram pico (cargas de falha) bem definidos em suas curvas carga-deslocamento (ou momento-rotação). Isso

dificulta a observação de um ponto de resistência máxima na ligação, já que ocorrem grandes deformações (que usualmente são intoleráveis nas estruturas) em consequência do efeito de membrana e do encruamento do aço, gerando assim, um ganho de resistência contínuo. Basicamente, a curva carga-deslocamento tem uma rigidez inicial, que sofre uma redução ao início do escoamento do material, e quando esse processo encerra-se, a rigidez não se torna nula, mas sim, assume valores de inclinação positiva devido ao efeito de membrana [25]. Esse é o principal motivo para que se use critérios de deformação limite para definir a capacidade resistente das ligações. A Figura 9 indica as curvas obtidas para os principais modos de falha observados em ligações tipo T.

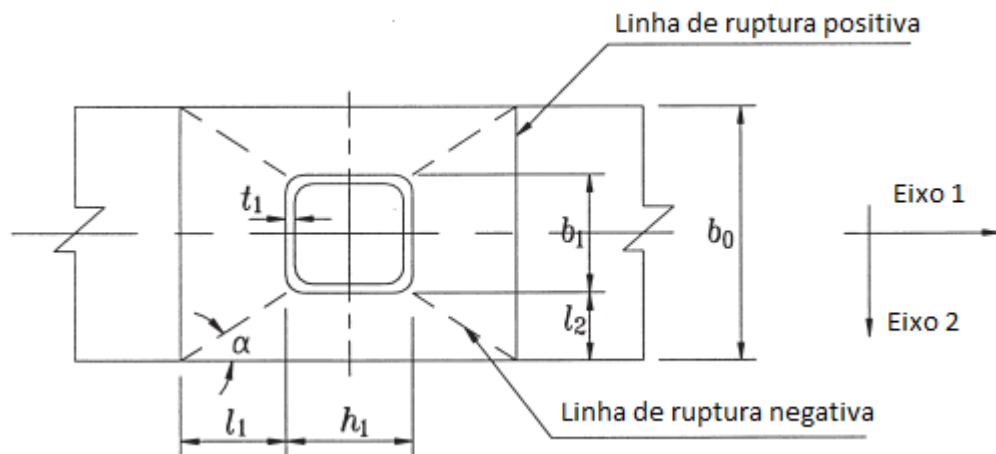


Figura 8 – Padrão de linhas de ruptura para ligações RHS [28]

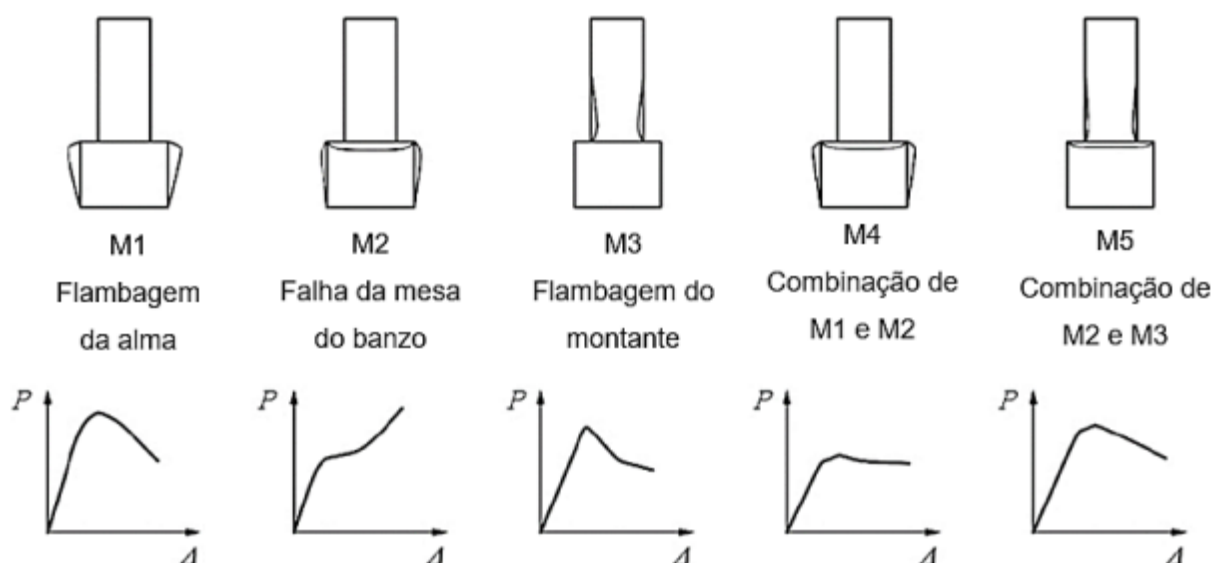


Figura 9 – Curvas obtidas para modos de falha em ligações tipo T [32]

Diversos pesquisadores, tais como Mouty ([35], [36]), Yura *et al.* ([37], [38]), além de Korol e Mirza [39], propuseram critérios de deformação limite para ligações em aço carbono, mas cada pesquisa teve como foco casos específicos. Mouty ([35], [36]) percebeu que a carga de escoamento prevista pela análise plástica tinha uma concordância com uma carga obtida experimentalmente, sendo correspondente a uma deformação da face conectada de 1% da largura do banzo (b_0), para ensaios realizados em ligações tipo K com afastamento. Com isso, propôs exatamente esse critério de deformação limite para se obter a carga máxima de dimensionamento em ligações com essa geometria específica.

Yura *et al.* ([37], [38]), após avaliarem 137 testes de ligações tubulares CHS do tipo T, Y, DT e K, indicaram que o dobro da deformação de escoamento do membro (montante ou diagonal) deveria ser considerado como deformação limite última da face conectada, em que o comprimento do membro deveria ser de aproximadamente 30 vezes o seu diâmetro (d_1).

Korol e Mirza [39] realizaram uma pesquisa que trouxe um grande avanço na área. Utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio de elementos de casca em seus modelos, obtiveram avanços não só sobre a deformação adotada como critério, mas também sobre os parâmetros geométricos influentes na resistência da ligação tipo T em seções RHS. Primeiramente, sugeriram que o critério apresentado por Mouty [35], [36] mostrou-se conservador para valores de β reduzidos, enquanto que para valores maiores, pode-se levar a dimensionamentos contra a segurança, em função da possibilidade de flambagem local nas paredes do banzo [39]. Com isso, foi proposto um novo critério de deformação limite para ligações em que não se observa uma carga de pico, sendo ele baseado no estado limite último de deformação da face conectada limitado em 25 vezes a sua deformação no regime elástico, que corresponde em torno de 1,2 vezes a espessura do banzo (t_0) [39]. Paralelamente a isso, Korol e Mirza [39] afirmaram que os parâmetros β (b_1/b_0) e 2γ , sendo esse a razão entre a largura do banzo e sua espessura (b_0/t_0), estão relacionados a resistência das ligações tubulares soldadas entre perfis RHS.

Outro trabalho de extrema importância para a área foi o realizado por Lu *et al.* [40], sendo um dos primeiros trabalhos a propor um critério de deformação limite que cobriu todos os tipos de ligações tubulares. Os pesquisadores, baseado no que foi proposto por Korol e Mirza [39], indicaram a partir de ensaios experimentais e modelos numéricos existentes, que caso a razão entre a carga última e a carga de serviço da

ligação (N_u/N_s) fosse menor do que 1,5 (ocorre geralmente em banzos CHS), o estado limite último controlaria o dimensionamento, ou seja, a carga que gera uma deformação para fora do plano correspondente a 3% da largura ou diâmetro do membro (montante ou diagonal) é considerada como carga resistente [40]. Caso a razão (N_u/N_s) fosse maior que 1,5 (ocorre geralmente em banzos RHS com valores reduzidos de β), a carga resistente da ligação seria indicada pelo estado limite de serviço, que é equivalente a uma deformação para fora do plano de 1% da largura de b_0 ou d_0 , em função da geometria da seção [40].

Um outro estudo relevante na área foi o proposto em 2000 por Zhao [41], onde buscou-se analisar se o critério de deformação limite proposto por Lu *et al.* [40] é válido para ligações soldadas tipo T entre perfis RHS conformados a frio, e os resultados da pesquisa indicaram que o parâmetro β tem grande influência no limite de deformação. A partir disso, definiu-se que, para o modo de falha na face lateral do banzo (flambagem na alma), o critério indicado por Lu *et al.* [40], que considera a carga última em uma deformação de $3\%b_0$, pode ser aplicado em ligações com $0,8 \leq \beta \leq 1$ [41].

Quando se considera a plastificação da face superior do banzo, Zhao [41] afirma que existem duas possibilidades: para intervalos de $0,6 \leq \beta \leq 0,8$ ou $2\gamma \leq 15$, a carga última controla o dimensionamento, em que a deformação limite é equivalente a $3\%b_0$, ou seja, a carga de falha (P_{ult}) é correspondente a carga encontrada na deformação de $3\%b_0$ ($P_{3\%b_0}$); para intervalos de $0,3 \leq \beta \leq 0,6$ ou $2\gamma > 15$, a carga de serviço controla o dimensionamento, em que a deformação limite é equivalente a $1\%b_0$, e diferentemente do caso anterior, a carga de falha (P_{ult}) é correspondente 1,5 vezes a carga encontrada na deformação de $1\%b_0$ ($1,5P_{1\%b_0}$) [41]. Essa análise está de acordo com as observações experimentais indicadas por Kato e Nishiyama [26] e Zhao [42], que mostraram maiores deformações para ligações com menores valores de β (maiores valores de 2γ) em função do efeito de membrana mais atuante. A partir disso, foram propostas equações para as resistências correspondentes a cada um dos modos de falha investigados no trabalho. O gráfico carga-deslocamento utilizado por Lu *et al.* [40] e por Zhao [41] para indicar as deformações limites estão apresentados na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente.

A subcomissão do Instituto Internacional de Soldagem (IIW) [43] adotou as cargas últimas (deformação de $3\%b_0$) e de serviço (deformação de $1\%b_0$) indicadas por Lu *et al.* [40] como padrões em suas recomendações. Nos dias atuais, utiliza-se apenas o critério de deformação limite relacionado a deformação de $3\%b_0$ para fora

do plano da face conectada do banzo, em que o consenso geral foi definido com a adição da determinação na 3ª edição do *International Institute of Welding (IIW)*, *Sub-comission XVE* [44] para que se alinhasse com as formulações propostas pela segunda edição do CIDECT [23], em que os argumentos para a escolha foram brevemente expostos nos trabalhos de Zhao *et al.* [45] e Wardenier *et al.* [46]. Nessa edição do IWW ocorreram outras mudanças importantes, como por exemplo, passou-se a considerar normativamente ligações com escoamento de até 460 MPa, desde que se aplicasse um fator redutor na resistência. Aliado a isso, adotou-se o limite de validade para os parâmetros geométricos do banzo, onde para a falha na parede lateral do mesmo, indicou-se a razão entre a altura e espessura do banzo (h_0/t_0) ser menor ou igual a 40, além de necessitar estar enquadrada nas classes 1 ou 2 [45].

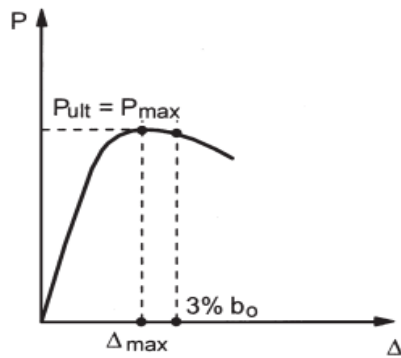
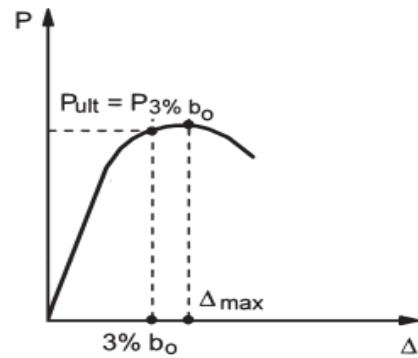
a) $\Delta_{max} < 3\%b_0$ b) $\Delta_{max} > 3\%b_0$

Figura 10 – Carga máxima para falha na face lateral do banzo [41]

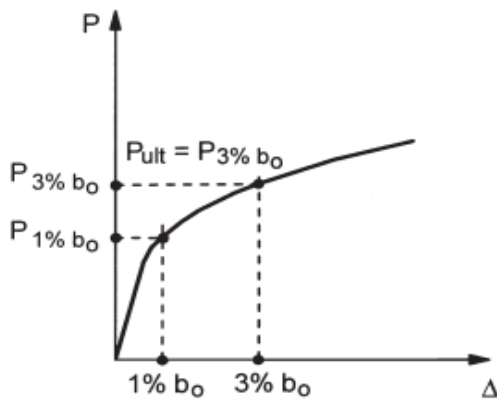
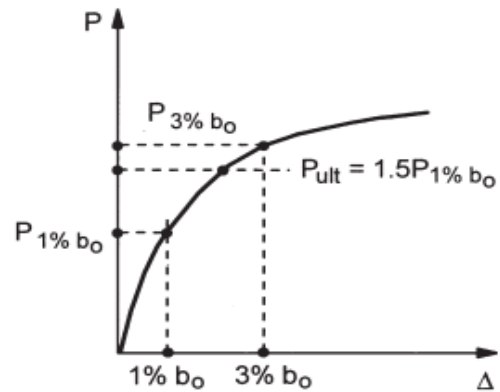
a) $P_{3\%b_0}/P_{1\%b_0} < 1,5$ b) $P_{3\%b_0}/P_{1\%b_0} > 1,5$

Figura 11 – Carga máxima para falha na face superior do banzo [41]

1.2 Ligações tubulares em aço carbono

Existem diversas pesquisas desenvolvidas no âmbito experimental (a partir da década de 50) e numérico em ligações entre perfis SHS, RHS E CHS soldados. Os trabalhos pontuados no item 1.1 da presente dissertação também se encaixam nessa temática, e devem ser considerados como essenciais quando se trata do entendimento do histórico de dimensionamento de ligações entre perfis tubulares.

Aprofundando sobre alguns dos trabalhos citados, Kato e Nishiyama [26] realizaram em 1980, ensaios experimentais em ligações tubulares tipo T conformadas a frio, onde se observou três principais modos de falhas recorrentes, ou seja, a falha na face lateral (alma) do banzo, falha na face superior (mesa) do banzo, e a flambagem local do montante, além de um modo secundário, que seria a interação entre a falha na alma e na mesa do banzo. Comparou-se os resultados com a teoria dos mecanismos plásticos utilizados na época, esclarecendo possíveis adaptações nos limites indicados. Para analisar o efeito das tensões residuais, foram ensaiados perfis sem essas tensões e comparados aos seus semelhantes conformados a frio, onde apenas pequenas reduções de resistência ocorreram, sendo possível concluir que esse efeito poderia ser negligenciado [26].

Zhao e Hancock [47] conduziram ensaios experimentais em ligações soldadas entre perfis tubulares tipo T de aço carbono conformados a frio com seções quadradas e retangulares que estavam submetidos a esforços combinados, no caso, flexão e forças concentradas. Os comprimentos adotados foram variados para que se pudesse determinar uma relação da interação entre os esforços, e a espessura do banzo foi variada para produzir um intervalo de esbeltez e de modos de falha, entre eles, a flambagem e a plastificação, cujos resultados foram comparados com as normas vigentes, além dos mecanismos plásticos propostos na época. Observou-se que para valores de $\beta = 0,5$ o aumento da esbeltez da seção do banzo resultou em maiores interações entre a flexão e as forças concentradas [47].

Wardenier *et al.* [48] apresentaram pela primeira vez, um guia geral para ligações tubulares soldadas entre perfis com seção circular, que ficou conhecido como a primeira edição do CIDECT. O intuito era definir formulações e restrições para o dimensionamento de ligações com diferentes configurações, por meio da resistência máxima em vários modos de falha da ligação, em que essas indicações foram

validadas por outros pesquisadores posteriormente, e com isso, passaram a ser incorporadas na versão do Eurocode anterior a atual [48].

Packer e Wardenier [49] revisaram algumas pesquisas da época relacionadas ao projeto de soldas em treliças com seção RHS e ligações do tipo K, T, Y e X. Foi proposto um método baseado no comprimento efetivo da perna de solda para o projeto de ligações K e N, de acordo com os resultados experimentais apresentados, onde um novo procedimento para o cálculo do comprimento da solda, aliado aos métodos de cálculo já consolidados, foi apresentado, sendo essas recomendações válidas para soldas de filete e de penetração sujeitas a cargas estáticas [49].

Kosteski *et al.* [50] apresentaram um estudo numérico acerca de ligações T com banzos RHS e CHS e montante em chapa de topo, onde se buscou reproduzir as propriedades dos materiais, estrutura geométrica, condições de contorno, entre outros. Após a validação dos modelos, efetuou-se uma análise paramétrica, que teve como foco entender situações em que a carga de plastificação da ligação é indicada, não tendo uma curva carga-deslocamento com pico definido, adotando-se o critério de deformação limite, e concluindo-se que a carga de escoamento das ligações estava conforme prevista nos modelos que abordam linhas de ruptura na literatura [50].

Mashiri e Zhao [51] realizaram uma pesquisa relacionada a ligações tubulares tipo T, em que os perfis eram conformados a frio e de parede finas, onde a configuração geométrica era composta de seções CHS nos montantes e seções RHS no banzo, sendo conhecida atualmente como seções tubulares híbridas. O foco do trabalho foi baseado na aplicação de momentos fletores nos elementos. Foi constatado que a falha principal para essa configuração é a plastificação da face do banzo, contudo, a fissuração do banzo também foi observada em valores maiores de deformação. Além disso, observou-se que a carga de serviço ($1\% b_0$) controla o dimensionamento, propondo-se um novo limite para utilização dessa indicação [51].

Liu *et al.* [52] propuseram uma equação geral para que se pudesse prever os efeitos da carga axial e do momento fletor em ligações tubulares tipo X e T, onde a precisão da mesma foi validada a partir de resultados experimentais já existentes e pelo desenvolvimento de modelos numéricos, concluindo-se que a formulação apresenta previsões confiáveis para medição de tensões no banzo.

Shao [53] analisou a distribuição de tensões na região da solda em ligações tubulares tipo T e K submetidas a esforços axiais no montante e diagonais, observando a influência de determinados parâmetros geométricos. Sabe-se que a

região ao longo da base da solda é crítica, em que a vida útil da ligação pode ser reduzida por problemas de fadiga, e por isso a pesquisa teve como foco essa região, variando os parâmetros β , 2γ e τ . Concluiu-se que o tipo de carregamento e a geometria da ligação afetam a distribuição de tensões, o que anteriormente não era considerado nas pesquisas da área. Observou-se que a espessura do banzo é um parâmetro muito influente na distribuição de tensões para as ligações T e K, ao contrário da espessura do montante, que tem efeito pouco significativo, e aliado a isso, novamente percebeu-se a importância do parâmetro β nas tensões da solda [53].

Em 2020, Bu e Packer [54] desenvolveram um estudo numérico de 264 modelos com a validação de 14 ensaios experimentais, onde o foco foi entender o efeito da distância das extremidades até a região da ligação tubular em perfis RHS. Com os resultados obtidos, propuseram uma distância mínima necessária para que a ligação não fosse afetada e conseguisse utilizar sua total capacidade resistente, onde caso esse limite não fosse respeitado, utiliza-se um fator redutor para resistência [54].

Ao longo do tempo, as pesquisas realizadas no Brasil sobre ligações soldadas entre perfis tubulares de aço carbono se desenvolveram exponencialmente, gerando diversos trabalhos sobre as mais variadas configurações. Entre eles, pode-se citar o realizado por Nunes [55], em 2012, que realizou um estudo numérico em ligações tipo K, T e KT, em que o banzo teria seções RHS e os montantes e diagonais teriam seções CHS. Realizou-se a calibração com estudos experimentais já existentes, e a partir disso, desenvolveu-se um estudo variando os parâmetros β , 2γ , além de se verificar a influência de possíveis carregamentos no banzo, comparando os resultados com as normas vigentes. Concluiu-se que o modo de falha predominante foi a plastificação na face superior do banzo, e que tanto para o caso de carregamento no banzo quanto para a estrutura apenas com carregamento do montante obteve-se uma boa relação entre resistências numéricas e normativas [55].

Pode-se citar também o trabalho de Nizer [5], que realizou análises experimentais e numéricas para identificar a influência do esforço normal no banzo em ligações tubulares tipo T, em que os perfis do montante tinham seções quadradas, enquanto os banzos tinham seções retangulares, ambos conformados a frio. Realizou-se ensaios com esforços de tração, compressão e sem esforço no banzo, obtendo a resistência da ligação pelo critério de deformação limite, e comparando-a com os resultados adquiridos nos modelos numéricos para calibrá-los, além de comparar com os valores indicados nas principais normas. Observou-se valores a favor da segurança

para banzo sem carga axial, e com compressão de 60% e 80% da carga de plastificação obtida pelas normas, também ocorrendo para resistências para carga de tração no banzo de 20% da carga de plastificação, em que se observou um ganho de resistência, diferentemente de que alguns guias de projeto tais como o CIDECT [23] indicam, gerando projetos com gastos excessivos [5].

Guerreiro [3] realizou estudos experimentais e numéricos em ligações tubulares tipo T com seções SHS no banzo e montante com valores de $\beta \leq 0,85$, onde o ponto principal foi o comparativo de resistência na ligação caso ela tenha ou não reforço de chapa. Obteve-se a resistência da ligação utilizando o critério de deformação limite, além de se incorporar as não linearidades físicas e geométricas nos modelos, para que se tivesse uma resposta mais coerente com a realidade, conseguindo analisar o comportamento global da ligação. Comparando os resultados de resistência com as normas vigentes, observou-se valores muito conservadores para ligações com reforço, em que em determinados casos houve o dobro de resistência, mesmo com o comprimento mínimo de chapa preconizando em norma [3].

Nunes [56] realizou um estudo experimental, teórico e numérico em ligações soldadas tipo T entre perfis tubulares RHS no banzo e CHS no montante de sistemas treliçados, onde considerou-se carregamentos axiais de compressão no montante e tração ou compressão no banzo, para que se pudesse avaliar os efeitos desses carregamentos na ligação. Variou-se os parâmetros β e 2γ , além de diversificar o nível de carga que estava sendo aplicada no banzo, onde se buscou medir o deslocamento da face desse elemento para que, usando o critério de deformação limite, conseguisse identificar a carga resistente. Os modelos numéricos foram calibrados a partir dos resultados experimentais, em que a falha na face superior do banzo foi o modo mais observado. Comparando os resultados obtidos com as recomendações normativas, observou-se que para ligações com banzos não comprimidos se tem uma boa correlação de resistência com a norma, ao contrário de quando existe forças axiais atuantes nesse elemento da ligação, tendo reduções de resistência na compressão e aumento na tração, em que a partir disso, foram propostas novas equações de dimensionamento [56].

Gomes [9] realizou análises experimentais e numéricas em ligações tubulares tipo T formadas de perfis quadrados conformados a frio, com o foco na avaliação dos efeitos de reforço de chapa nas paredes laterais do banzo, uma vez que suas ligações teriam como modo de falha inicial a plastificação da face lateral do banzo, por ter

adotado o parâmetro β igual a 1. Os reforços tiveram suas dimensões variadas na espessura e no comprimento, e a partir dos resultados experimentais, calibrou-se os modelos numéricos, onde os resultados foram comparados com as normas e trabalhos similares. O comparativo foi disperso, uma vez que ligações sem o reforço apresentaram resultados conservadores, em função do incremento de esbeltez na parede do banzo, enquanto que para os modelos com chapa de espessura igual a parede do banzo, obteve-se resultados contra a segurança, e em função disso, novas formulações foram propostas para esse caso [9].

Pereira [57] apresentou em sua pesquisa um estudo experimental e numérico acerca do comportamento de ligações soldadas tipo T em perfis tubulares com banzos de parede esbelta e montantes sob compressão axial, com o foco de entender a influência de uma alta esbeltez nos elementos da ligação, aliado a diferenciação que o tamanho do cordão de solda pode gerar no comportamento da ligação. Os modelos numéricos foram calibrados em cima dos resultados experimentais, onde se concluiu que banzos com menores espessuras apresentaram maiores diferenciações com o que é previsto normativamente, onde o estado limite de serviço passava a ser a referência nessas situações, além de se observar que com um aumento na perna da solda obtém-se um ganho de na resistência da ligação [57].

Correia [25] analisou numericamente ligações tubulares tipo T entre perfis quadrados e retangulares com β igual a 1 e com tensões normais no banzo, calibrando os modelos em cima de ensaios experimentais presentes na literatura. Simulou-se ligações com e sem reforço de chapa lateral, onde se aplicou diferentes níveis de esforços axiais no banzo, concluindo que em perfis sem reforço, tanto esforço de compressão quanto de tração geram reduções na resistência da ligação, sendo o segundo caso mais problemático, enquanto que em perfis com reforço, existe uma menor redução na resistência, ou seja, ligações com chapa de reforço tem menos ação dos efeitos provenientes das tensões no banzo. Indicou-se que a equação proposta pela ISO 14346 [11] é a que melhor se adapta as situações estudadas, contudo, para ligações com banzo tracionado, diversas vezes esteve contra a segurança, e por isso, foram propostos dois novos métodos de cálculo [25].

Neto [58] realizou um estudo numérico acerca de ligações tubulares tipo T, em que os montantes eram compostos de seções CHS comprimidas axialmente, enquanto as seções do banzo eram RHS, carregadas axialmente com esforços de compressão ou de tração, com o foco propor equações que se adequem mais ao

comportamento real da estrutura, o que foi realizado com um extenso estudo paramétrico. Observou-se que nas ligações com banzos comprimidos se teve uma divergência maior entre resistências propostas e normativas, enquanto para tração as diferenças não foram significativas. Para os modelos que não estavam dentro nos parâmetros normativos, obteve-se boa correlação com as resistências e valores indicados pelas equações propostas [58].

Guerra [59], em 2020, apresentou uma análise experimental e numérica sobre ligações tubulares tipo T, sendo seções esbeltas RHS para o banzo e CHS para o montante, buscando avaliar a capacidade de carga (a partir do critério de deformação limite) e comprimento das ligações, que estariam submetidas à compressão no montante e tração ou compressão no banzo. A validação dos modelos ocorreu em cima dos ensaios experimentais, e após isso, os parâmetros β , 2γ e o nível de carregamento foram variados. Os resultados conseguiram indicar a sugestão da adequação dos fatores de redução presentes nas normas vigentes, onde a equação proposta apresentou resultados mais apropriados, além do modo de falha observado continuar sendo a plastificação na face superior do banzo [59].

1.3 Particularidades do aço inoxidável

Conforme já dito, os aços inoxidáveis vêm cada vez mais ganhando espaço na construção civil, em função de sua versatilidade e propriedades que permitem o emprego de elementos estruturais constituídos desse material. Mesmo que com um custo inicial mais alto, pensando-se a longo prazo, pode-se gerar economias consideráveis quando se fala em reparos e até mesmo trocas de perfis em função do desgaste, além de proporcionar estruturas mais leves.

Os aços inoxidáveis são compostos basicamente de ligas de Ferro, Carbono e Cromo, onde esse último elemento é o que garante a resistência contra a corrosão, sendo essa a característica marcante do material. Grande parte dos metais tem uma tendência de sofrer reações no ambiente que estão inseridos, ocasionando a formação de compostos químicos como óxidos, hidróxidos, entre outros, e em função disso, buscou-se alternativas para evitar essa corrosão na superfície do material, tais como pinturas, revestimentos, metalizações, e até mesmo desenvolver ligas que

sejam mais resistentes, como o aço inoxidável [15]. O processo de proteção que ocorre nesse tipo de aço é conhecido como passividade, onde são formados filmes passivos com espessuras microscópicas, a partir da reação entre água e metal base, e que em meios oxidantes se tornam mais resistentes que o dos demais aços, uma vez que há a conservação dos filmes [15]. É importante salientar que em meios redutores os aços inoxidáveis têm problemas em formar e manter os filmes, sendo poucos resistentes a corrosão nessas situações [15].

Quando se necessita de características específicas (principalmente relacionadas a resistência mecânica), são adicionadas ligas diferentes na composição principal do aço inoxidável, variando conforme a necessidade de uso. Sabe-se que existem diversos tipos de ligas de aço inoxidável reconhecidas pelas instruções norte-americanas, sendo divididas por séries com números de três dígitos (200, 300 e 400). A série 200 apresenta em sua liga principalmente os elementos Cromo, Níquel e Manganês adicionado, enquanto a série 300 apresentam principalmente Cromo e Níquel como adição na composição. Essas duas séries caracterizam os aços inoxidáveis austeníticos, que tem excelente resistência a corrosão, grande ductilidade e soldabilidade [15]. Já a série 400 incluem os aços ferríticos, com teor de Cromo mais alto e Carbono mais baixo, e martensíticos, com teor de Cromo mais baixo e de Carbono mais alto [7]. A Figura 12 e a Figura 13 apresentam diagramas com alguns dos principais exemplos de séries de aços inoxidáveis existentes comercialmente, além das porcentagens de cada liga dentro da composição química.

É importante salientar que essa classificação não é a única utilizada comumente. O EN 10088-1 [60] indica os diferentes tipos de aço inoxidável transformando as séries (ou graus) anteriormente vistas em números de aço, onde por exemplo, o aço austenítico grau 304L tem um número de aço 1.4307, em que o número na primeira posição (no caso, 1) representa que o material é um aço, os números da segunda e terceira posição, em conjunto (no caso, 43), representam que o aço é do grupo dos aços inoxidáveis (além do 43, tem-se o 40, 41, 44, 45 e 46), e o números da quarta e quinta posição, em conjunto (no caso, 07), indicam especificação individual daquele aço, sendo todos esses valores apresentados no EN 10027-2 [61]. Além disso, existe a classificação como nome do aço, também apresentada no EN 10088-1 [60], que apresenta melhor a composição química do material, em que por exemplo, o aço número 1.4307 tem o nome de X2CrNi18-9, onde a letra X indica um aço de alta liga, o número 2 indica 100 vezes a porcentagem de Carbono, CrNi indica

que os elementos químicos adicionados são Cromo e Níquel, e por fim, 18-9 indica que essa são as porcentagens dos elementos, respectivamente, na composição geral do aço [62]. A Figura 14 apresenta alguns exemplos de graus e suas nomenclaturas usadas na Europa e na América do Norte para os três principais tipos de aço inoxidável encontrados.

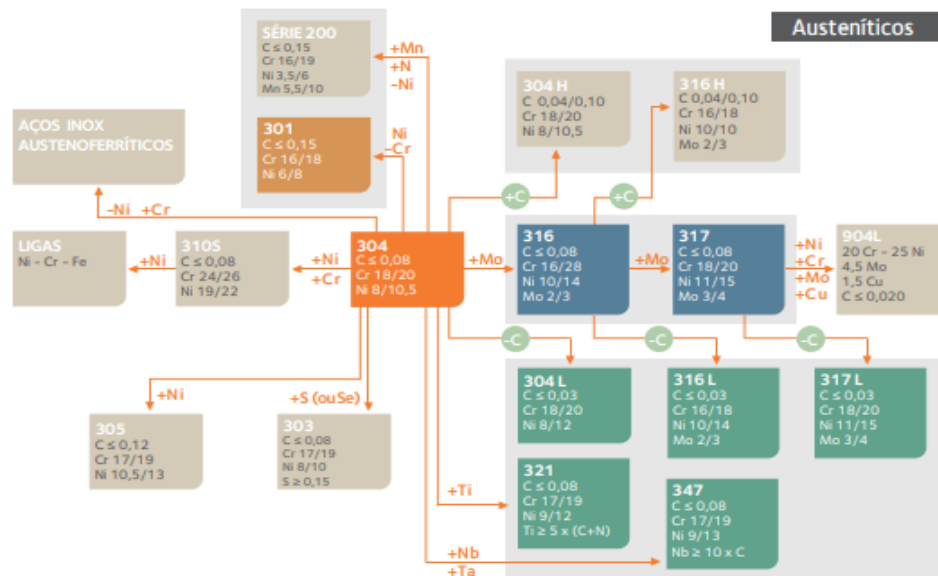


Figura 12 – Séries de aço 200 e 300 [15]

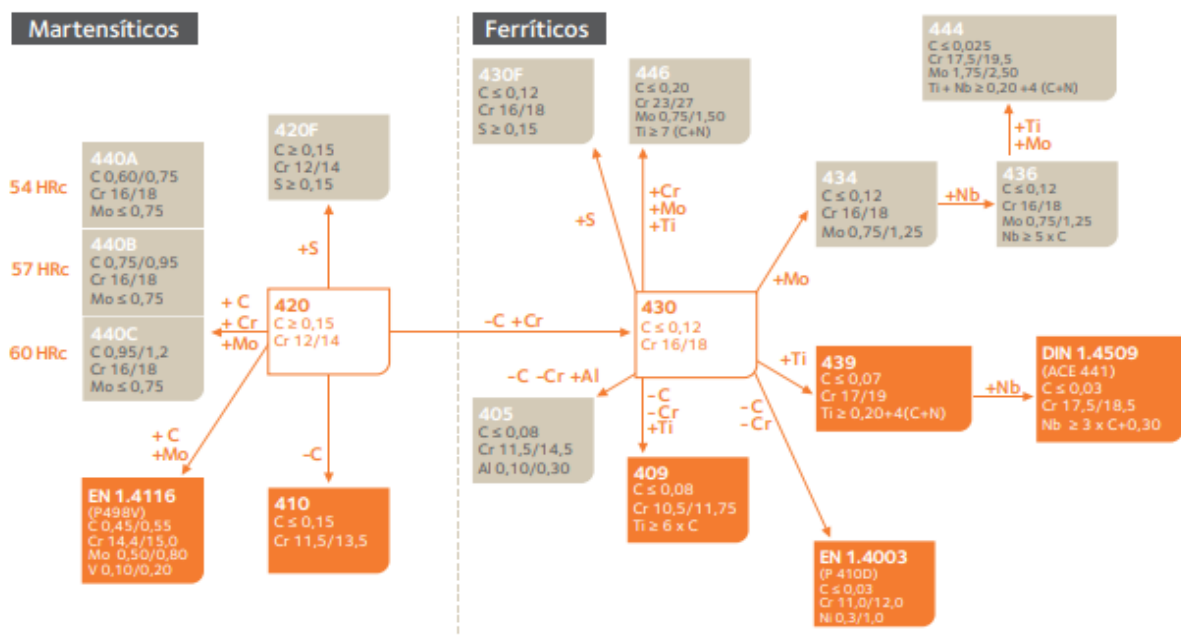


Figura 13 – Séries de aço 400 [15]

SÉRIES DE AÇO PARA EN10088		US	
No.	Nome	ASTM	UNS
Austenítico			
1.4301	X5CrNi18-10	304	S30400
1.4306	X2CrNi19-11	304L	S30403
1.4307	X2CrNi18-9	304L	S30403
1.4311	X2CrNi18-10	304LN	S30453
Duplex			
1.4062 *	X2CrNiN22-2--		S32202
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1		S32101
1.4362	X2CrNiN23-4	2304#	S32304
Ferrítico			
1.4003	X2CrNi12	-	S41003
1.4016	X6Cr17	430	S43000
1.4509	X2CrTiNb18	441+	S43940

Figura 14 – Correlação entre nomenclaturas para aços (adaptado) [62]

É de extrema importância conhecer as propriedades do material que será utilizado como elemento estrutural, uma vez que se analisa a estrutura por meio de suas condições limites e últimas, ou seja, situações comuns de uso da peça e de sobrecarga, onde a falha repentina não deve ocorrer [14]. Como essas condições estão referenciadas em normas, é necessário entender a relação entre tensões e deformações, desde estágios iniciais até etapas mais avançadas.

Afshan [63] afirma que a resposta obtida para a curva tensão-deformação entre aços carbonos estruturais e aços inoxidáveis é diferente. O aço carbono tem uma região elástica e um ponto em que se inicia o escoamento de maneira bem definida, seguido tipicamente de um patamar de escoamento (pode ser afetado pela conformação a frio e tensões residuais), enquanto o aço inoxidável tem uma curva tensão-deformação não linear, com um baixo limite de proporcionalidade, além de não ter um ponto definido para o início do escoamento, em que comumente se adotou o valor de tensão obtido por meio de uma reta paralela à parte elástica da curva saindo de uma deformação de 0,2% [63], sendo conhecida como tensão $\sigma_{0,2\%}$. Outra característica particular dos aços inoxidáveis (austeníticos e duplex) é sua grande ductilidade, alcançando deformações entre 40% e 60% antes da fratura [63]. A Figura 15 mostra um comparativo entre curvas tensão-deformação para alguns tipos de aços.

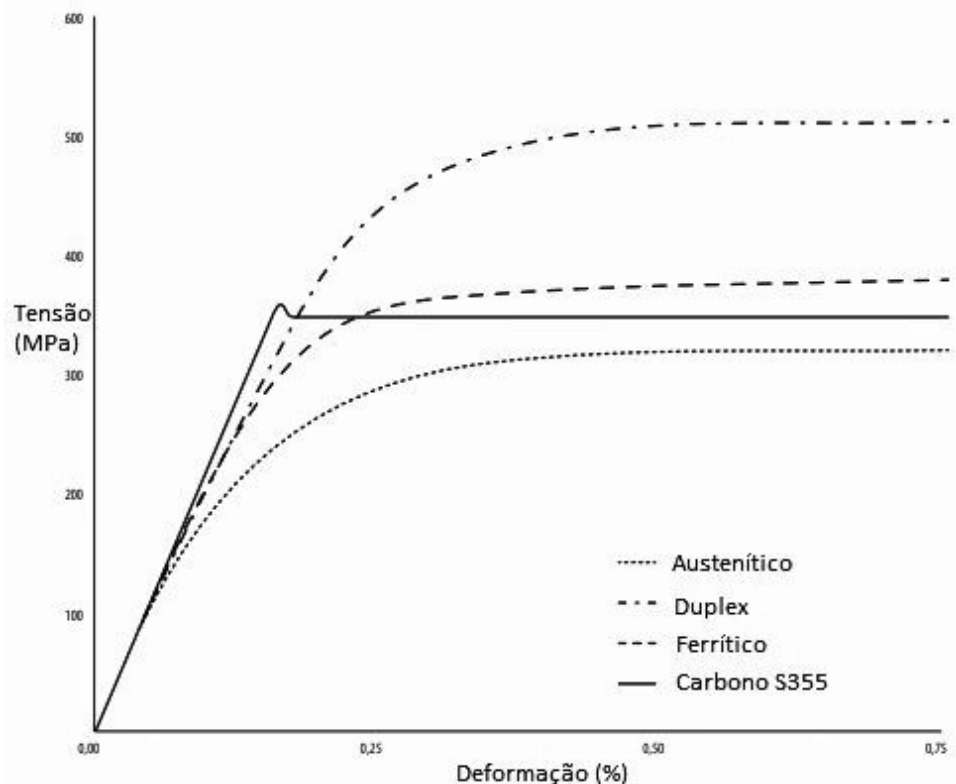


Figura 15 – Comparativo entre início da curva tensão-deformação dos aços [62]

É importante frisar que o aço inoxidável é anisotrópico, ou seja, tem diferentes comportamentos em função da direção de sua laminação ou conformação [62]. Isso é evidenciado quando um aço desse tipo alinhado transversalmente a direção de laminação possui um maior encruamento do que o material paralelo a dimensão da laminação [63], ou seja, a resposta do material não depende apenas de qual classe ele é, mas também do tipo de carregamento aplicado, embora o grau do material influencie na não linearidade, na anisotropia e assimetria do aço [64].

Atualmente, grande parte das normas ou guias que abordam o uso de aços inoxidáveis em estruturas utilizam as recomendações para aço carbono, com alguns pontos minimamente diferentes. Isso não favorece o desenvolvimento do uso desse material, uma vez que além de seus custos serem maiores, não se dimensiona utilizando suas próprias características, limitando o uso efetivo das propriedades mecânicas. A partir disso, Afshan e Gardner [22] propuseram um método de cálculo mais eficiente, já que o dimensionamento elasto-plástico perfeito usado para o aço carbono pode gerar resultados conservadores para o aço inoxidável. Esse método ficou conhecido como Método da Resistência Contínua (CSM), em que resumidamente altera-se algumas definições comumente utilizadas, por exemplo, a

classificação da seção transversal é alterada para a capacidade de deformação, e a suposição elasto-plástica perfeita é alterada para a possibilidade de deformação até o encruamento, onde os resultados dos ensaios foram mais precisos quando comparados aos métodos vigentes previstos normativamente [22].

1.4 Ligações tubulares em aço inoxidável

A partir de todas as vantagens já apresentadas sobre o aço inoxidável, o seu uso deixou de ser apenas no âmbito convencional e utilitário, e cada vez mais vem se desenvolvendo para a parte estrutural na construção civil. Já existem ligações tubulares sendo utilizadas em estruturas *offshore* e em dutos de indústrias, uma vez que esses ambientes são propícios para a problemática da corrosão. Em função disso, estudos relacionados a ligações soldadas entre perfis tubulares compostos de aço inoxidável passaram a ser cada vez mais realizados a partir da década passada para que se pudesse entender o seu real potencial nas ligações das estruturas.

Pode-se citar, inicialmente, o trabalho de Rasmussen [65], que em 2000 publicou um resumo sobre diversas pesquisas que estavam sendo desenvolvidas na Austrália durante os anos 90 em perfis tubulares de aço inoxidável, incluindo o estudo de ligações. Os perfis eram conformados a frio, austeníticos grau 304, em que se realizou ensaios experimentais em colunas e vigas com seções SHS, RHS e CHS, além de experimentos em ligações tubulares tipo X e K com seções SHS e CHS, onde a partir dos resultados, conseguiu-se propor formulações e parâmetros que serviram de base para a norma australiana de aço inoxidável publicada na época [65].

Rasmussen e Hassam [66] realizaram análises experimentais em ligações tubulares tipo X e K entre perfis com seção circular de aço inoxidável austenítico 304L. Aplicou-se cargas axiais de tração e compressão, onde definiu-se três valores de β e três valores para angulação entre diagonais e banzo, para que se pudesse ter uma maior gama de concepções geométricas. Percebeu-se que as ligações em questão podem ser dimensionadas usando as fórmulas presentes na primeira edição do CIDECT [48], substituindo a tensão de escoamento pela tensão $\sigma_{0,2\%}$ ou $\sigma_{0,5\%}$. Concluiu-se que não é necessário checar as deformações em ligações tubulares para

estado limite de serviço, uma vez que o estado limite último controlava o dimensionamento em grande maioria dos casos. [66].

Rasmussen e Young [67] investigaram novamente ligações tubulares tipo X e K em perfis de aço inoxidável A304L, contudo, utilizando seções RHS dessa vez. As ligações tiveram carga axiais de compressão e tração aplicadas em suas diagonais, onde as principais variações nas ligações tipo X foram no parâmetro β , enquanto que nas ligações tipo K, variou-se esse parâmetro, a angulação entre banzo e diagonal, além de ter sido aplicado diferentes níveis de cargas no banzo. Os resultados das resistências foram comparados com a versão do CIDECT [68] adotada na época. Concluiu-se que ao utilizar a tensão $\sigma_{0,2\%}$ consegue-se obter resultados adequados para a resistência última comparados aos valores do CIDECT [68], e que o estado limite de serviço não necessita ser verificado, contudo, caso se adote a tensão $\sigma_{0,5\%}$ no dimensionamento, as equações do CIDECT [68] passam a ir contra a segurança em casos de elevados níveis de esforços de compressão no banzo [67].

Um dos mais importantes trabalhos da área foi a tese desenvolvida por Feng [69], que deu origem a dois trabalhos, um de caráter experimental, publicado em 2008 por Feng e Young [70], e outro de caráter numérico, realizado novamente por Feng e Young [71] em 2011. Falando primeiramente da série experimental, Feng e Young [70] buscavam investigar o comportamento estrutural de ligações tubulares tipo T conformadas a frio com seções RHS e SHS de aço inoxidável, realizando um total de 22 ensaios. A classe de material utilizada variou entre aço austenítico 304 (EN 1.4301), austenítico de alta resistência (HSA) e duplex (EN 1.4462), conseguindo dessa maneira distinguir o modo de atuação de cada tipo de aço inoxidável. O parâmetro β variou entre 0,5 e 1 buscando observar principalmente os modos de falha na face superior e lateral do banzo, e além disso, variou-se o parâmetro 2γ entre 10 e 50 (extrapolando o limite que geralmente é indicado pelas normas) e o parâmetro τ entre 0,5 e 2, para que se pudesse analisar a influência dos mesmos na resistência da ligação. Sobre as condições de contorno, adotou-se o banzo totalmente apoiado em seu comprimento, e houve a aplicação de cargas axiais no montante. A obtenção das cargas resistentes por meio da curva carga-deslocamento extraída dos ensaios teve como princípio o critério de deformação limite adotado por Zhao [41], onde esses resultados foram comparados com a resistência proposta pelas normas australiana e europeia, além do obtido pelo guia do CIDECT [23] da época. Concluiu-se inicialmente

que a tensão $\sigma_{0,2\%}$ é adequada para a obtenção das resistências, e que grande parte das indicações normativas são conservadoras em relação aos valores experimentais. Aliado a isso, observou-se discrepâncias na ocorrência dos modos de falha que eram esperados em função do parâmetro β [70]. A Figura 16 exemplifica os ensaios feitos.



Figura 16 – Ligação utilizada nos ensaios de Feng e Young [70]

Após isso, para complementar a pesquisa, Feng e Young [71] realizaram análises numéricas em ligações tubulares tipo T e X em perfis conformados a frio de aço inoxidável, com seções SHS e RHS. Considerou-se as não linearidades geométricas e do material nas análises, para que se pudesse obter respostas mais adequadas com a realidade. A calibração dos modelos numéricos se deu a partir dos resultados experimentais anteriormente citados [69], considerando as mesmas condições de apoio e aplicação de carga, exceto para algumas ligações tipo X que além de carga no montante, também tiveram cargas axiais aplicadas no banzo, obtendo uma boa correlação de resultados. Cerca de 172 modelos foram utilizados, em que o foco foi encontrar a resistência das ligações e compará-las com as normas vigentes na época, além de verificar se os modos de falha indicados pelas mesmas também ocorreriam nas análises. Concluiu-se que além do modo de falha da face superior e lateral do banzo, entre os valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,85$, tem-se o modo combinado, que engloba esses dois tipos de falha. Aliado a isso, observou-se que para modos de falha de plastificação na face superior do banzo, o dimensionamento proposto pelas normas vigentes na época é contra a segurança, e para a falha na face

lateral do banzo torna-se conservador. A partir dessas premissas, novas formulações foram previstas, indicando fatores redutores e amplificadores da resistência em função de cada caso previsto de ligações tubulares T e X em aço inoxidável [71].

Existem pesquisas realizadas mais recentemente na área, com algumas particularidades. Em 2019, Feng *et al.* [72] realizaram ensaios experimentais em ligações tubulares tipo T, Y e X de perfis conformados a frio de aço inoxidável, onde as seções do banzo eram quadradas e as seções dos montantes ou diagonais eram circulares, ou seja, ligações híbridas, totalizando 18 corpos de prova utilizados. A utilização de ligações desse tipo é descrita em função das vantagens relacionadas ao corte necessário para a junção entre perfis CHS, além de melhores respostas a fadiga (menores concentrações de tensões) do que as que ocorrem em ligações entre perfis SHS ou RHS. Buscou-se analisar a influência dos parâmetros β , 2γ , τ e as angulações das diagonais nas resistências da ligações, além de comparar os resultados com diferentes indicações normativas vigentes. Concluiu-se que a rigidez inicial e a carga resistente das ligações ensaiadas eram diretamente proporcionais ao parâmetro β , e inversamente proporcionais a angulação das diagonais, enquanto os outros parâmetros tinham influência mínima, e aliado a isso, observou-se que todas as normas indicavam resultados conservadores, contudo, a norma australiana apresentou os melhores resultados para esse tipo de ligações [72]. A Figura 17 apresenta o sistema montado para os ensaios experimentais efetuados.

Para complementar esse estudo, Feng *et al.* [73] realizaram análises numéricas em ligações tubulares tipo T, Y e X de perfis formados a frio de aço inoxidável, que tinham as mesmas características abordadas experimentalmente por Feng *et al.* [72], ou seja, utilizando ligações híbridas, em que modelos foram calibrados justamente com esses resultados experimentais. A pesquisa teve como foco indicar a importância dos parâmetros críticos β , 2γ , τ e as angulações das diagonais na capacidade resistente das ligações, baseando-se nos modelos constitutivos presentes em outros estudos, além de buscar avaliar o grau de conservadorismo presente nas normas vigentes de dimensionamento de ligações. Conseguiu-se observar que o parâmetro β é o que tem maior influência na resistência da ligação, sendo essa consideração diretamente proporcional. Aliado a isso, observou-se quatro tipos de modos de falha, sendo eles a falha da face superior do banzo, a falha da face lateral do banzo, flambagem local do montante e falha por punção, em que cada uma delas ocorreu em faixas específicas das configurações geométricas dos modelos analisados. Por fim,

concluiu-se que algumas normas vigentes apresentam boa correlação no que se refere a resistência das ligações híbridas verificadas nos modelos numéricos, contudo, observou-se muitos valores dispersos, tendendo a trazer resultados contra a segurança, e a partir disso, indicou-se formulações que apresentam resistências mais condizentes com as análises obtidas [73].



a) Ligação tipo T



b) Ligação tipo X

Figura 17 – Experimentos realizados em ligações híbridas [72]

Os trabalhos focados em ligações tubulares híbridas apresentados até aqui ([72], [73]) tinham a particularidade de ter em sua configuração geométrica banzos com seções quadradas e montantes com seções circulares. Para abranger todas as possibilidades, Feng *et al.* [74], realizaram estudos experimentais em ligações tubulares tipo T, Y e X em aço inoxidável austenítico grau 304, mas agora com banzos CHS e montantes RHS sob carregamento axial, totalizando 18 ensaios. Buscou-se entender os efeitos dos parâmetros geométricos críticos na resistência das ligações, além de observar os modos de falhas atuantes, comparando suas resistências com as normas vigentes. Concluiu-se que para valores pequenos de β , tem-se a plastificação da face superior do banzo, enquanto que para valores maiores, tem-se a plastificação na face lateral do banzo. Além disso, observou-se que apenas a norma australiana [21] apresentava resultados contra a segurança, e mesmo assim, com diferenças mínimas (considerando a norma como adequada para uso), enquanto as demais regulamentações analisadas apresentavam resultados conservadores de resistência da ligação [74].

Como complemento do estudo, novamente Feng *et al.* [75], realizaram análises numéricas em cima da mesma configuração geométrica adotada nas ligações tubulares tipo T, Y e X em aço inoxidável ensaiadas experimentalmente [74], calibrando os modelos de maneira coerente com os resultados obtidos anteriormente. Cerca de 288 análises foram realizadas, buscando-se mais uma vez indicar quais parâmetros geométricos apresentam maior influência na capacidade resistente, além de comparar essa resistência com a designada pelas normas vigentes. Como conclusão, percebeu-se que o parâmetro β é o mais influente na resistência da ligações, sendo ambos diretamente proporcionais, e aliado a isso, observou-se que as normas apresentam resultados geralmente contra a segurança, propondo-se novas equações para indicar a resistência dessas configurações de ligações tubulares [75].

No Brasil, ainda é muito recente o estudo nessa área. Pode-se citar o trabalho apresentado por Nogueira [7], que buscou desenvolver formulações semi-analíticas que conseguissem indicar a resistência de ligações tipo T entre perfis tubulares SHS em aço inoxidável com o banzo carregado axialmente, com o foco na configuração de β igual a 1. Determinou-se os campos de tensão nas paredes laterais do banzo e aplicou-se o princípio da energia de Ritz, além de desenvolver modelos numéricos que foram calibrados utilizando resultados experimentais apresentados por Feng e Young [70]. Concluiu-se que em casos onde o banzo está comprimido, a ligação tem uma redução de resistência, enquanto que para banzos tracionados, observou-se um pequeno acréscimo de capacidade resistente até determinado limite, onde após isso, ocorria a diminuição da mesma, e a partir disso, propôs-se um fator de correção que leva em conta a esbeltez da parede lateral e o nível de carga axial aplicada no banzo. Comparando os resultados numéricos com a formulação proposta e as normas vigentes, observou-se boa relação com a norma brasileira e o método de cálculo proposto, enquanto as demais regulamentações são conservadoras. Por fim, indicou-se que o critério de deformação limite atual, que considera 3% da largura do banzo como deslocamento para fora do plano, é conservador para essa configuração, onde se propôs um novo limite, utilizando 5% da largura do banzo para esse tipo de ligação tubular [7].

Comparando as conclusões observadas entre as literaturas de ligações tubulares em aço carbono e de aço inoxidável, percebe-se claras diferenças nas resistências obtidas e modos de falha, em função das diferentes composições desses materiais, principalmente no que se refere a capacidade dúctil de ambos.

2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES TUBULARES SOLDADAS

2.1 Considerações iniciais

Para o desenvolvimento de uma norma e de recomendações relacionadas a determinado tema, diversos ensaios experimentais e análises numéricas devem ser desenvolvidas, fomentando o conhecimento sobre tal pauta tão importante. E quando se fala de ligações tubulares soldadas, isso não foi diferente, uma vez que desde o século passado pesquisas vem sendo realizadas por diversos institutos, como o *American Iron and Steel Institute* (AISI), *American Welding Society* (AWS), *International Institute of Welding* (IIW) e principalmente pelo *Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire* (CIDECT), que foram vitais para o surgimento das regulamentações atuais.

Conforme já dito, as ligações têm o intuito de conectar elementos entre si, gerando uma transferência adequada, e no caso de ligações tubulares soldadas, garantir que se tenha resistência adequada a esforços axiais em seus elementos, de maneira que não comprometa a integridade dos mesmos. Relacionado a isso, sabe-se que a resistência da ligação pode ser determinada utilizando uma análise plástica ou critérios de deformação limite (mais utilizado recentemente), contudo, considerar possíveis efeitos de flexão, punção, cisalhamento ou membrana pode elevar ainda mais a precisão do dimensionamento.

Grande parte das recomendações normativas atuais da área de ligações tubulares levam em conta o método dos estados limites, que considera o desempenho estrutural adequado como consequência da não ultrapassagem de determinados estados limites, sendo eles: Estado Limite Último (ELU), que está relacionado com a segurança da estrutura sujeita a combinações desfavoráveis possíveis em sua vida útil, na construção ou sob atuação de ação específicas (especiais ou excepcionais); Estado Limite de Serviço (ELS), que está relacionado ao desempenho da estrutura sob condições normais de utilização, com o foco no bom funcionamento da mesma, sendo relacionada muitas vezes ao aspecto visual apresentado [76].

As principais normas referentes ao dimensionamento de ligações soldadas entre perfis tubulares de aço carbono são o Eurocode 3, parte 1-8 [10] e a ISO 14346

[11], além do guia proposto pelo CIDECT [23]. A NBR 16239 [12] tem grande influência da norma europeia. Já quando se fala de normas e guias que abordam o dimensionamento em perfis de aço inoxidável, percebe-se uma grande escassez em função da quantidade de pesquisas desenvolvidas, que cresceu de maneira exponencial apenas na década passada. Pode-se citar a AS/NZS 4673 [21], que traz alguns fatores para as fórmulas propostas pelo Eurocode 3, assim como a quarta edição do *Design Manual for Structural Stainless Steel* [62], desenvolvido pelo *The Steel Construction Institute* e o manual da AISI conhecido como *Specification for Structural Stainless Steel Buildings* [77]. Aliado a isso, as formulações propostas por Feng e Young [71] são de extrema importância para o desenvolvimento da área.

É importante salientar que o Eurocode 3, parte 1-8 [10] apresenta de maneira geral (viga-coluna, viga-viga e placa de base), para o dimensionamento de ligações, o Método das Componentes, utilizando o conceito de caminho de forças entre os elementos da ligação, porém, no caso de ligações tubulares existem diversas particularidades, como a transferência de esforços complexa em função da distribuição não linear da rigidez no perímetro conectado [4]. Isso faz com que o dimensionamento de ligações tubulares utilize modelos analíticos simplificados, juntamente com fórmulas empíricas extraídas de ensaios experimentais [4].

2.2 Critérios de dimensionamento e geometrias para ligações tubulares

Existem diversas indicações iniciais feitas pelas principais normas da área de ligações tubulares em aço carbono que são determinantes para se entender os limites de utilização dessas recomendações, além de que a geometria, dimensões e carregamentos das ligações são vitais para se prever qual modo de falha ocorrerá.

Tanto o Eurocode 3, parte 1-8 [10], quanto a ISO 14346 [11], e NBR 16239 [12] apresentam critérios de dimensionamento dessas ligações, sendo eles muito semelhantes entre si. Os principais pontos prévios para o dimensionamento de ligações tubulares uniplanares ou multiplanares tipo T com seções SHS, RHS ou CHS laminadas ou conformadas a frio são [10]:

- a) A tensão de escoamento dos perfis tubulares não deve ultrapassar 460 MPa, e que caso essa tensão seja maior do que 355 MPa, um fator redutor na resistência de 0,9 deve ser utilizado.
- b) A espessura nominal das paredes dos perfis tem como limite inferior 2,5 mm e como limite superior 25 mm (para o limite superior pode-se abrir exceções a partir da realização de procedimentos específicos).
- c) Para a compressão axial, os elementos devem estar dentro dos limites estabelecidos pela classe 1 ou pela classe 2 (para o caso do EC3-1-8 [10]).
- d) Ângulos entre banzos e diagonais ou montantes e diagonais adjacentes não devem ser menores que 30°.
- e) As extremidades dos elementos da ligação devem ser preparadas de uma maneira que não se altere a forma da seção transversal, ou seja, ligações de tubos com extremidades amassadas não são previstas.

Existem diversas geometrias utilizadas comumente em ligações tubulares, cada uma com sua tipologia específica. A Figura 18 apresenta os principais casos.

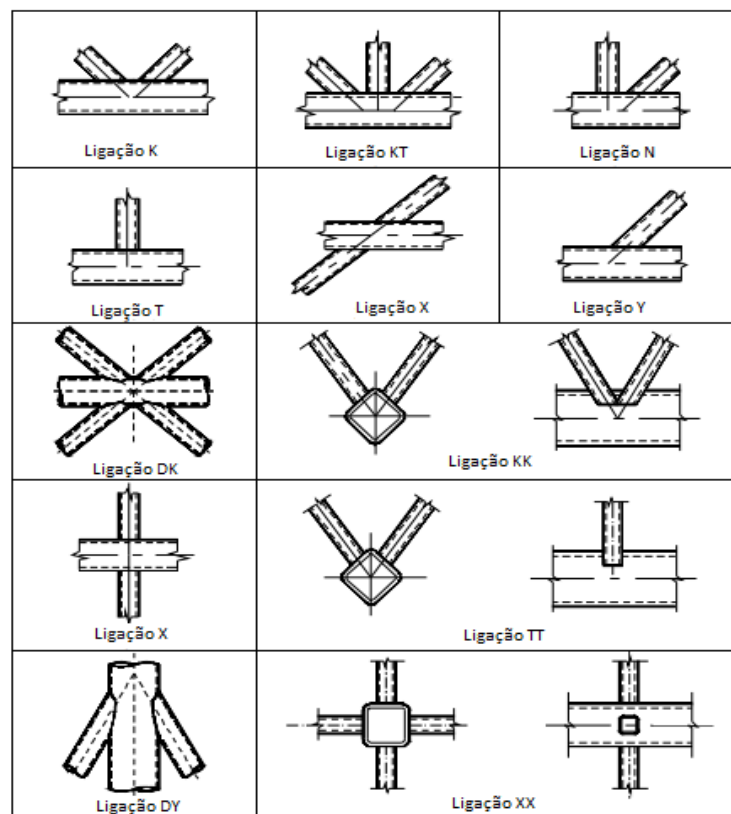


Figura 18 – Geometria e tipologia de ligações tubulares [10]

Para normas como o Eurocode 3, parte 1-8 [10] observa-se que a tipologia da ligação é indicada apenas pela sua característica geométrica, sendo possível ser classificada como tipo T, K, X, Y, N e suas variantes. Contudo, para o CIDECT [23], não basta apenas a configuração visual da ligação para classificá-la, mas sim a união desse ponto com a direção da transferência de forças entre os elementos. Por exemplo, caso exista forças externas aplicadas no nó possuindo resultante perpendicular ao banzo com valor superior a 20% da maior projeção perpendicular ao banzo das forças das diagonais ou montantes, a ligação deve ser classificada com X [12]. A Figura 19 apresenta uma típica diferenciação desses casos.

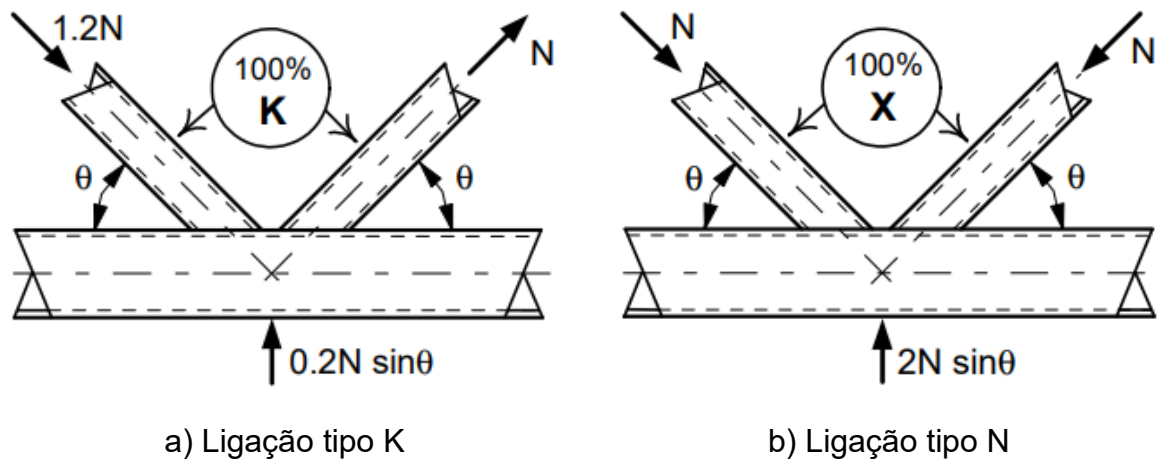


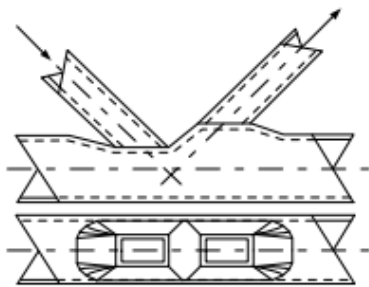
Figura 19 – Diferenças entre ligação tipo K e N (adaptado) [23]

2.3 Modos de falha em ligações tubulares

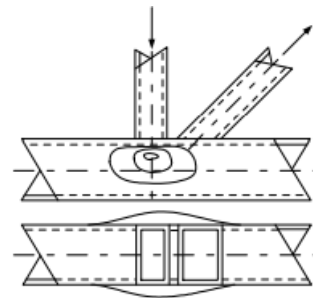
Sabe-se que a região da ligação é uma das mais vulneráveis em um sistema treliçado, uma vez que existem diversos tipos de falhas que podem ocorrer na ligação, ou seja, esses modos passam a ser os responsáveis por indicar a capacidade resistente das ligações entre perfis tubulares soldados.

O Eurocode 3, parte 1-8 [10] e a NBR 16239 [12] apresentam diversos casos de mecanismos de falha possíveis de se ocorrer nas ligações, em que diferentemente do código europeu, a norma brasileira os denomina variando letras do alfabeto (de A até F). Os modos de falha indicados para ligações com seções RHS no banzo e CHS ou RHS no montante sob esforços axiais estão indicados na Figura 20 e são [12]:

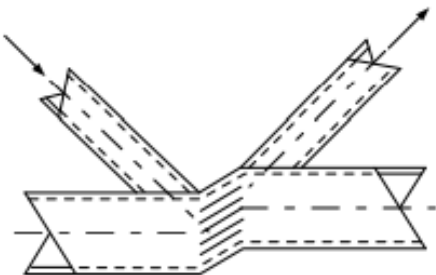
- a) Modo A: Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto a diagonais ou montantes.
- b) Modo B: Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes sob compressão.
- c) Modo C: Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo, junto a diagonais ou montantes.
- d) Modo D: Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes.
- e) Modo E: Ruptura ou plastificação de diagonais ou montantes na região da solda oriunda da distribuição não uniforme de tensão.
- f) Modo F: Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação.



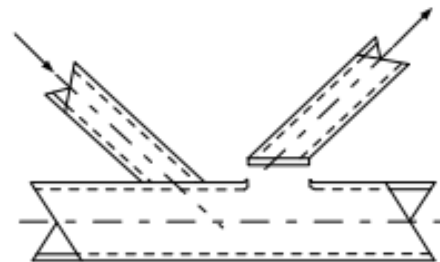
a) Modo A



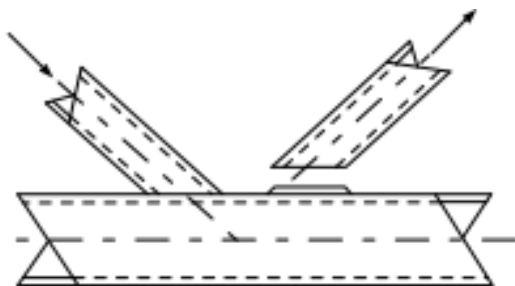
b) Modo B



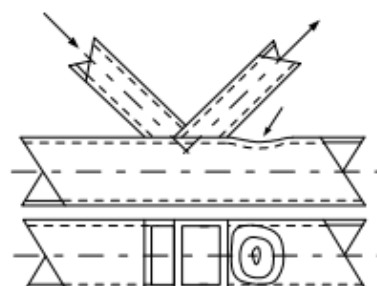
c) Modo C



d) Modo D



e) Modo E



f) Modo F

Figura 20 – Modos de falha em ligações tubulares [23]

2.4 Parâmetros geométricos em ligações tubulares

É perceptível que existem diversas configurações geométricas possíveis de se executar em uma ligação tubular soldada. Em função disso, as normas vigentes apresentam parâmetros geométricos específicos, que em grande maioria dos casos, tem influência na resistência da ligação. Tratando-se de ligações tubulares tipo T entre perfis com seções SHS, conforme configuração apresentada na Figura 21, alguns desses parâmetros tem destaque. As letras b , h e t estão relacionadas a largura, altura e espessura dos elementos, respectivamente, e os índices 0 e 1 estão relacionados aos elementos de banzo e montante, nessa sequência.

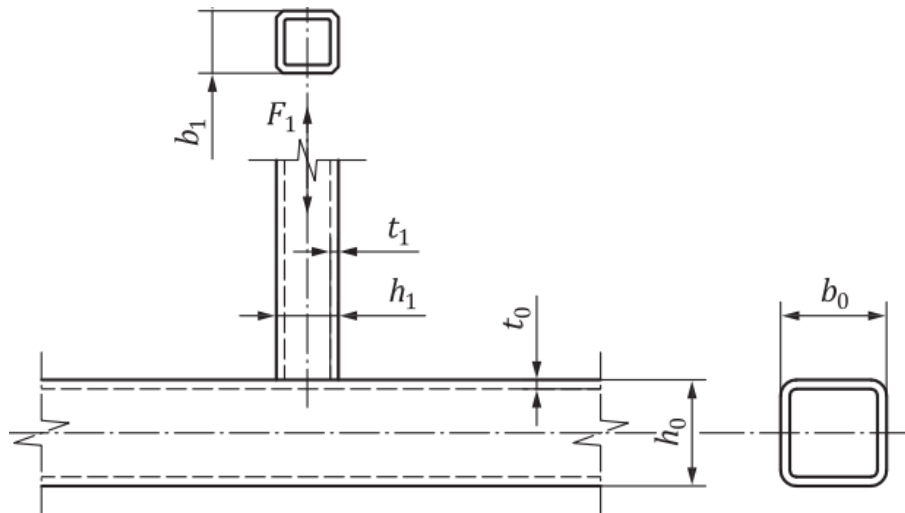


Figura 21 – Dimensões de ligação tipo T com seção SHS [11]

Primeiramente, quando se fala da razão entre a largura do montante e a largura do banzo, tem-se o parâmetro β , que é indicado pela Equação (1) [10].

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (1)$$

Onde:

b_1 : Largura do montante;

b_0 : Largura do banzo.

Outro parâmetro importante é a razão entre a largura do banzo e a sua espessura, sendo conhecido como parâmetro 2γ , indicado pela Equação (2) [10]:

$$2\gamma = \frac{b_0}{t_0} \quad (2)$$

Onde:

b_0 : Largura do banzo;

t_0 : Espessura do banzo.

Por fim, existe outro parâmetro descrito em diversos trabalhos em que comumente se observa sua influência, sendo esse o τ , que representa a razão entre a espessura do montante e a espessura do banzo, conforme indicado pela Equação (3) [70]:

$$\tau = \frac{t_1}{t_0} \quad (3)$$

Onde:

t_1 : Espessura do montante;

t_0 : Espessura do banzo.

2.5 Cálculo de ligações tubulares tipo T em aço carbono

2.5.1 Diretrizes de uso

As principais normas vigentes, tais como Eurocode 3, parte 1-8 [10], NBR 16239 [12], ISO 14346 [11], além do guia do CIDECT [23], apresentam diversas diretrizes para o dimensionamento de ligações tubulares soldadas tipo T, X e Y com banzos e montantes retangulares sob cargas axiais. Primeiramente, elas indicam limites geométricos para utilização das recomendações presentes na mesma, ou seja,

caso a configuração geométrica se encaixe nesses limites, pode-se utilizar as suas equações para determinar a resistência da ligação. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais diretrizes.

Tabela 1 – Limites geométricos para utilização de normas		
Eurocode 3, parte 1-8 [10]	NBR 16239 [11]	ISO 14346 [12]
$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/b_0 \geq 0,1 + 0,001 \times \frac{b_0}{t_0}$ e $b_i/b_0 \geq 0,25$
$0,5 \leq h_0/b_0 \leq 2$ e $0,5 \leq h_i/b_i \leq 2$	$h_0/t_0 \leq 36$ e $h_0/t_0 \leq 1,45 \times (E/fy)^{0,5}$	$0,5 \leq h_i/b_i \leq 2$
$b_0/t_0 \leq 35$, $h_0/t_0 \leq 35$ e <i>Classe 1 ou 2</i>	$b_0/t_0 \leq 36$ e $b_0/t_0 \leq 1,45 \times (E/fy)^{0,5}$	Elementos comprimidos: $b_0/t_0 \leq 40$, $h_0/t_0 \leq 40$, $b_i/t_i \leq 40$, $h_i/t_i \leq 40$ e <i>Classe 1 ou 2</i>
Montantes comprimidos: $b_i/t_i \leq 35$, $h_i/t_i \leq 35$ e <i>Classe 1 ou 2</i>	Montantes comprimidos: $b_i/t_i \leq 36$, $b_i/t_i \leq 1,45 \times (E/fy)^{0,5}$, $h_i/t_i \leq 35$ e $h_i/t_i \leq 1,45 \times (E/fy)^{0,5}$	Elementos tracionados: $b_0/t_0 \leq 40$, $h_0/t_0 \leq 40$, $b_i/t_i \leq 40$ e $h_i/t_i \leq 40$
Montantes tracionados: $b_i/t_i \leq 35$ e $h_i/t_i \leq 35$	Montantes tracionados: $b_i/t_i \leq 35$ e $h_i/t_i \leq 35$	$\theta_i \geq 30^\circ$

Onde:

b_i : Largura da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$)

h_i : Altura da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$)

t_i : Espessura da seção transversal de diagonais ou montantes ($i = 1, 2, 3$)

θ_i : Ângulo entre diagonais ou montantes e banzo ($i = 1, 2, 3$)

Conforme já dito, existem diversos modos de falha (modo A até modo F) que devem ser considerados como possibilidades de ocorrência nas ligações tubulares. Contudo, existem exceções quando se trata de ligações com seções SHS tanto no banzo quanto no montante, ou seja, caso essa configuração geométrica cumpra os requisitos extras indicados, que estão apresentados na Tabela 2, pode-se verificar apenas determinados modos de falha em função do tipo de ligação e de parâmetros geométricos específicos. Para o caso de ligações tipo T com valor de $\beta \leq 0,85$, o modo atuante é a plastificação na face superior do banzo, também conhecido segundo a norma brasileira como modo A, conforme indicado na Figura 22.

Tabela 2 – Limites geométricos extras para seções quadradas		
Eurocode 3, parte 1-8 [10]	NBR 16239 [11]	ISO 14346 [12]
$b_i/b_0 \leq 0,85$	$b_i/b_0 \leq 0,85$	$b_1/b_0 \leq 0,85$
$b_0/t_0 \geq 10$	$b_0/t_0 \geq 10$	

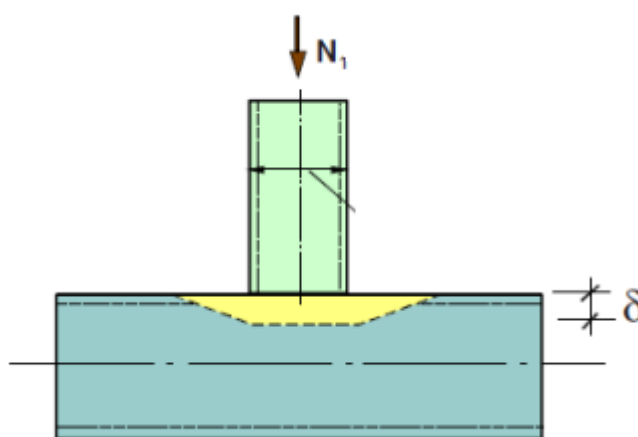


Figura 22 – Modo A, ou plastificação na face superior do banzo [1]

2.5.2 Eurocode 3, parte 1-8 [10]

O Eurocode 3, parte 1-8 [10] apresenta uma fórmula específica para resistência de ligações tubulares soldadas tipo T com seções SHS em aço carbono e com $\beta \leq 0,85$, considerando como modo de falha a plastificação da face superior do banzo

caso os requisitos da Tabela 1 e Tabela 2 forem obedecidos. Essa capacidade resistente da ligação ($N_{1,Rd}$) está indicada na Equação (4).

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n \times f_{y0} \times t_0^2}{(1 - \beta) \times \sin \theta_1} \times \left(\frac{2 \times \beta}{\sin \theta_1} + 4 \times \sqrt{(1 - \beta)} \right) / \gamma_{M5} \quad (4)$$

Onde:

k_n : Fator relacionado a tensões em banzos retangulares;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

γ_{M5} : Coeficiente de segurança.

O fator k_n tem certa particularidade no Eurocode 3, parte 1-8 [10]. Caso o nível de tensão normal no banzo, que é indicado pelo parâmetro n apresentado na Equação (5) seja maior que zero (tensões de compressão), determina-se k_n por meio da Equação (6), em que o mesmo se torna um fator redutor da resistência. Contudo, caso o valor de n seja menor que zero (a norma indica tensões de tração) ou caso não haja esforços atuantes no banzo, assume-se que não há fator incrementador ou redutor da resistência, assim, $k_n = 1$ para essa situação.

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 \times f_{y0}} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0} \times f_{y0}} \quad (5)$$

$$se\ n > 0: k_n = 1,3 - \frac{0,4 \times n}{\beta}, mas\ k_n \leq 1 \quad (6)$$

Onde:

n : Nível de tensão normal no banzo;

$N_{0,Ed}$: Esforço normal no banzo;

A_0 : Área da seção transversal do banzo;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

$M_{0,Ed}$: Momento fletor aplicado no banzo;

$W_{el,0}$: Módulo elástico resistente da seção do banzo.

2.5.3 NBR 16239:2013 [12]

De maneira semelhante a norma europeia, a NBR 16239 [12] indica uma formulação específica para resistência de ligações tubulares soldadas tipo T com seções SHS em aço carbono e com $\beta \leq 0,85$, considerando o modo A como falha preponderante caso os requisitos da Tabela 1 e Tabela 2 forem obedecidos. A resistência da ligação ($N_{1,Rd}$) é obtida segundo a Equação (7):

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n \times f_{y0} \times t_0^2}{(1 - \beta) \times \sin \theta_1} \times \left(\frac{2,2 \times \beta}{\sin \theta_1} + 4,4 \times \sqrt{(1 - \beta)} \right) / \gamma_{a1} \quad (7)$$

Onde:

k_n : Fator relacionado a tensões em banzos retangulares;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

γ_{a1} : Coeficiente de segurança.

Percebe-se que a Equação (4) e a Equação (7) são bastante similares, com algumas pequenas mudanças em valores de coeficientes. Primeiramente, o índice γ_{M5} equivale a 1, enquanto o índice γ_{a1} equivale a 1,1. Além disso, a consideração feita para o coeficiente k_n é diferente, uma vez que ao contrário da norma europeia, a NBR 16239 [12] considera valores de $n < 0$ para banzos comprimidos, enquanto valores de $n \geq 0$ são indicados para banzos tracionados (n maiores que zero) ou sem esforços solicitantes (n iguais a zero), considerando $k_n = 1$. Com isso, a formulação apresentada pela norma brasileira para o coeficiente n permanece a mesma da Equação (5), contudo, a formulação para k_n é modificada, conforme mostrado na Equação (8).

$$se\ n < 0: k_n = 1,3 + \frac{0,4 \times n}{\beta} \quad (8)$$

Onde:

n : Nível de tensão normal no banzo.

2.5.4 ISO 14346 [11] e CIDECT [23]

A formulação empregada pela ISO 14346 [11] é diretamente ligada a equação apresentada pelo CIDECT [23], uma vez que uma foi totalmente parametrizada em função da outra. Ambas as designações indicam a resistência de ligações tubulares soldadas tipo T com seções SHS em aço carbono de seus elementos com $\beta \leq 0,85$ a partir do modo de falha de plastificação na face superior do banzo, caso os requisitos da Tabela 1 e da Tabela 2 forem obedecidos. A capacidade resistente da ligação ($N_{1,Rd}$) é obtida segundo a Equação (9), Equação (10) e Equação (11):

$$N_{1,Rd} = Q_u \times Q_f \times \frac{f_{y0} \times t_0^2}{\text{sen } \theta_1} \quad (9)$$

$$Q_u = \frac{2 \times \eta}{(1 - \beta) \times \text{sen } \theta_1} + \frac{4}{\sqrt{1 - \beta}} \quad (10)$$

$$Q_f = (1 - |n|)^{C_1} \quad (11)$$

Onde:

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

η : Razão entre altura da seção do montante e largura do banzo (h_1/b_0), podendo ser substituído pelo valor de β em ligações com montantes de seção quadrada;

n : Fator relacionado a tensões em banzos retangulares

C_1 : Nível de tensão normal no banzo

Da mesma maneira que o código europeu e a norma brasileira, o CIDECT [23] e a ISO 14346 [11] apresentam diretrizes para o caso de banzos submetidos a esforços axiais, por meio dos parâmetros n e C_1 . A Equação (12) e a Equação (13) apresentam as formulações dessas variáveis, onde se considera que caso o esforço de tração esteja sendo aplicado no banzo, C_1 é positivo e assume-se como 0,1, e caso

seja aplicado esforço de compressão (considera-se negativo), tem-se a formulação apresentada a seguir.

$$se\ n < 0: C_1 = 0,6 - 0,5 \times \beta \quad (12)$$

$$n = \frac{N_0}{A_0 \times f_{y0}} + \frac{M_0}{W_{pl,0} \times f_{y0}} \quad (13)$$

Onde:

N_0 : Esforço normal no banzo;

A_0 : Área da seção transversal do banzo;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

M_0 : Momento fletor aplicado no banzo;

$W_{pl,0}$: Módulo plástico resistente da seção do banzo.

Aliado a isso, tanto as normas do CIDECT [23] quanto do Eurocode 3, parte 1-8 [10] indicam um fator redutor em função das tensões de escoamento, onde caso essa variável tenha valores entre 355 MPa e 460 MPa, multiplica-se $N_{1,Rd}$ por 0,9, grande parte em função do aço carbono não ter uma ductilidade elevada [69]. Contudo, isso não se torna um problema para o aço inoxidável austenítico, devido aos altos valores de razão entre tensão última e tensão em $\sigma_{0,2\%}$ e altos valores de alongamento após a fratura [67], fazendo que essa consideração não seja necessária para ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável conformados a frio.

2.6 Cálculo de ligações tubulares tipo T em aço inoxidável

Conforme já citado, o estudo de ligações tubulares em aço inoxidável é recente, e ainda são poucos os manuais ou normas que se referenciam sobre o assunto. Em função disso, alguns pesquisadores passaram a propor formulações que indicassem a resistência das ligações de maneira mais adequada. A seguir, apresenta-se as

principais instruções de dimensionamento para ligações em aço inoxidável presentes na literatura.

2.6.1 Eurocode 3, parte 1-4 [20]

O Eurocode 3, parte 1-4 [20], conforme seu próprio título diz, apresenta regras suplementares para o dimensionamento de estruturas compostas de aço inoxidável, entre elas, as ligações tubulares. Em seu capítulo que fala especificamente de projetos de ligações, a norma indica que os apontamentos apresentados pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] podem ser aplicados diretamente em ligações entre perfis de aço inoxidável, exceto em situações específicas relacionadas a projetos de ligações aparafusadas e detalhes relacionados a fatores em projetos de soldagem.

A partir disso, pode-se concluir que a norma europeia permite o uso das equações relacionadas a ligações tubulares em aço carbono para o dimensionamento de ligações tubulares em aço inoxidável.

2.6.2 AS/NZS 4673 [21]

A instrução normativa referente ao dimensionamento de estruturas formadas a frio de aços inoxidáveis da Austrália e Nova Zelândia, conhecida como AS/NZS 4673 [21], teve uma atualização em 2001, que está vigente até os dias atuais. Essa norma contempla, em um dos seus anexos, recomendações para o projeto de ligações tubulares soldadas.

Da mesma maneira que o Eurocode 3, parte 1-8 [10], a AS/NZS 4673 [21] apresenta limites geométricos (que são semelhantes aos do código europeu) para o emprego das indicações para resistências das ligações. Caso esses parâmetros sejam obedecidos, pode-se utilizar a formulação para indicar a capacidade resistente ligações tipo T com banzos quadrados e montantes quadrados ou redondos em aço inoxidável, apresentada pela Equação (14).

$$\varphi N_{1,Rd} = \frac{k_n \times f_{y0} \times t_0^2}{(1 - \beta) \times \sin \theta_1} \times \left(\frac{2 \times \beta}{\sin \theta_1} + 4 \times \sqrt{(1 - \beta)} \right) \times \left(\frac{\varphi}{0,9} \right) \quad (14)$$

Onde:

- k_n : Fator relacionado a tensões em banzos retangulares;
- f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;
- t_0 : Espessura da parede do banzo;
- θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);
- φ : Coeficiente para correção de resistência, que é igual a 0,9.

Percebe-se que a Equação (4) e a Equação (14) são semelhantes, diferenciando-se principalmente em relação aos coeficientes utilizados em ambas. Feng [69] afirma que comparando os resultados de resistências calculadas dessas equações, pode-se concluir que, de maneira genérica, ambas indicam os mesmos valores resistentes no dimensionamento de ligações tubulares.

2.6.3 Formulações propostas por Feng e Young [71]

Uma das principais formulações para a capacidade resistente de ligações tubulares tipo T em aços inoxidáveis é advinda do estudo numérico e paramétrico realizado por Feng e Young [71], que utilizaram seus resultados experimentais [70] como parâmetro de calibração.

Conforme já citado no item 1.5 do presente trabalho, Feng e Young [71] observaram que para ligações com valores de $0,2 \leq \beta < 0,7$, percebe-se claramente que o modo de falha principal atuante é a plastificação na face superior do banzo, e em função disso, propuseram a Equação (15) como melhor indicação para a resistência de ligações com essa falha.

$$N_{1np} = \alpha_A \times N_1 \times 1,1 \quad (15)$$

$$N_1 = \frac{f_{y0} \times t_0^2}{(1 - \beta) \times \sin \theta_1} \times \left[\frac{2 \times \eta}{\sin \theta_1} + 4 \times (1 - \beta)^{0,5} \right] \times f(n) \quad (16)$$

$$\alpha_A = 1 - \frac{b_0}{100 \times t_0} \quad (17)$$

Onde:

N_1 : Resistência nominal da ligação;

α_A : Fator redutor proposto para valores entre $0,2 \leq \beta < 0,7$;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

η : Razão entre altura da seção do montante e largura do banzo (h_1/b_0);

$f(n)$: Coeficiente para compressão no banzo, que vale $f(n) = 1 - \frac{0,1n}{\beta}$

Para ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,85$, Feng e Young [71] observaram a ocorrência de uma interação entre os modos de falha A e B, ou seja, em ligações tubulares entre perfis aço inoxidável que tem valores de larguras de banzo e montante mais próximos, observou-se a plastificação da face superior do banzo e a falha da face lateral do banzo atuando de maneira conjunta, diferentemente do que era indicado nas normas de aço carbono vigentes na época. Em função disso, propuseram uma formulação que representasse essa situação, que está apresentada a seguir na Equação (18).

$$N_{1np} = \alpha_{A+B} \times N_1 \times 1,1 \quad (18)$$

$$\alpha_{A+B} = 1 + \frac{3 \times b_0}{1000 \times t_0} \quad (19)$$

Onde:

N_1 : Resistência nominal da ligação, conforme Equação (16);

α_{A+B} : Fator incrementador proposto para valores entre $0,7 \leq \beta \leq 0,85$;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

η : Razão entre altura da seção do montante e largura do banzo (h_1/b_0);

$f(n)$: Coeficiente para compressão no banzo, que vale $f(n) = 1 - \frac{0,1n}{\beta}$

Percebe-se que, ao contrário da Equação (15), a Equação (18) apresenta um fator incrementador da resistência, sendo o principal ponto de diferença entre as duas formulações.

3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Considerações iniciais

Conforme já dito, o objetivo geral da presente dissertação é analisar os modos de falha e cargas resistentes de ligações tubulares tipo T com seções quadradas de aço inoxidável austenítico grau 304 que tenham valores de β menores que 0,85. Para que essa determinação seja alcançada de maneira mais confiável, é necessário realizar ensaios experimentais com configurações geométricas que se adequem as recomendações presentes nas normas técnicas e na literatura.

Dito isso, observa-se a necessidade de uma sequência de ações bem definida para as atividades de preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios. A partir dessa questão, apresenta-se a metodologia utilizada para o programa experimental desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em que se buscou variar as dimensões das seções de doze protótipos, de maneira que se pudesse avaliar os parâmetros geométricos críticos na ligação tubular entre perfis de aço inoxidável.

Os principais pontos da metodologia experimental podem ser divididos em: definição das geometrias; preparação prévia dos perfis; caracterização do material; soldagem dos perfis; verificação final das dimensões; realização dos ensaios.

3.2 Definição das geometrias e preparação prévia

A escolha das dimensões das seções dos perfis utilizados nas ligações teve como princípio garantir uma amplitude de valores para o parâmetro β , de maneira que se pudesse avaliar o comportamento em função dos modos de falha na faixa indicada de $0,25 \leq \beta \leq 0,85$, além de se respeitar a faixa indicada pela ISO 14346 [11] para valores de $10 \leq 2\gamma \leq 40$, uma vez que o Eurocode 3, parte 1-8 [10] apresenta limites de $10 \leq 2\gamma \leq 35$, sendo mais propício ter limites maiores dessa variável nas análises.

Dito isso, foram adotadas determinadas seções transversais tubulares quadradas que seriam utilizadas para compor as ligações, sendo elas: SHS 40x3, SHS 60x3, SHS 70x3, SHS 80x3 e SHS 100x3. O primeiro número da sequência indica as dimensões de largura (b_0) e altura (h_0) da seção, enquanto o último número apresenta a espessura (t_0) dos perfis. Aliado a essa determinação, a escolha do aço inoxidável austenítico grau 304 para a composição das ligações deve-se a alguns fatores principais. Entre eles, pode-se citar a sua maior ductilidade e soldabilidade em relação aos aços ferríticos, e seu preço reduzido em comparação aos aços duplex [7], o que faz com que essa classe de aço inoxidável seja a mais utilizada na atualidade, tanto na construção civil quanto nas pesquisas da área presentes na literatura.

As dimensões de comprimento indicadas para o corte dos banzos e montantes tem uma lógica, ou seja, utilizou-se as premissas aplicadas por Feng *et al.* [72] para essa definição, onde os autores propuseram que o comprimento do banzo (L_0) deveria ser igual a seis vezes a largura da sua seção transversal (b_0) e que o comprimento do montante (L_1) deveria ser igual a três vezes a largura da sua seção transversal (b_1). A definição do comprimento do banzo ($L_0 = 6b_0$) tem como objetivo garantir que a distribuição de tensões na ligação esteja livre da influência das condições de contorno nas extremidades desse elemento, e para o montante, definiu-se essas dimensões ($L_1 = 3b_1$) para que se previna uma flambagem prematura do montante antes da falha da ligação. A Tabela 3 apresenta os perfis utilizados, sua definição de atuação como banzo ou montante e a dimensão indicada para corte (L_i , onde i é definido como 0 para o banzo e 1 para o montante), sendo geradas as doze ligações que foram ensaiadas. É importante salientar que essas dimensões foram escolhidas para que se obtivesse protótipos com valores de β em um range abrangente (entre 0,4 e 0,8), diferentemente das pesquisas desenvolvidas na área, em que se utilizou geralmente um ou dois valores desse parâmetro a nível experimental.

Tabela 3 – Dimensões de corte esperadas para perfis utilizados

PERFIL UTILIZADO	FUNÇÃO	$b_i = h_i$ (mm)	t_i (mm)	L_i (mm)
40x3	Montante	40	3	120
60x3	Montante	60	3	180
70x3	Montante	70	3	210
80x3	Montante	80	3	240
80x3	Banzo	80	3	480
100x3	Banzo	100	3	600

3.3 Preparação prévia dos perfis

Conforme já citado, a realização de cortes nos perfis foi necessária para se obter as dimensões desejadas. A partir dessa premissa, utilizou-se dois equipamentos para essa etapa, sendo o primeiro, uma serra fita da marca Starrett, em que o processo de corte está apresentado na Figura 23. Grande parte dos perfis foram cortados nesse dispositivo em função do mesmo possibilitar a continuidade das propriedades físicas do material devido a redução do aumento de temperatura durante o corte. Contudo, em consequência de um problema na máquina de serra fita, uma pequena quantidade de perfis foi cortada em uma esmerilhadeira com disco de corte próprio para aço inoxidável, onde todo o processo foi realizado de maneira controlada e lenta para tentar evitar ao máximo o aumento de temperatura.



a) Máquina de corte utilizada



b) Corte do perfil

Figura 23 – Procedimento de corte dos perfis tubulares

Apesar de todos os cuidados e precauções, tanto a máquina de serra fita quanto a esmerilhadeira não garantem um corte com extrema precisão e planicidade, o que é necessário nos ensaios para os montantes que serão comprimidos, evitando excentricidades que possam gerar momentos secundários indesejados. Em função disso, optou-se por realizar alguns procedimentos nos perfis para que se garantisse o nível requerido de planificação, conforme apresentado na Figura 24. Entre eles, pode-

se citar a fresagem dos perfis por meio de lima, lixa e máquina fresadora, fora a realização de cortes a laser (feitos em empresa especializada) em alguns perfis.



a) Fresagem com lima



b) Fresagem com fita



c) Fresagem com máquina



d) Perfis após fresagem

Figura 24 – Preparação pós-corte dos perfis

3.4 Caracterização do material

Sabe-se que a etapa de caracterização do material por meio de ensaios de tração é vital para que se possa obter suas propriedades mecânicas, tais como módulo

de elasticidade, tensão de escoamento e tensão última, que permitem uma avaliação mais segura do comportamento da estrutura quando submetida aos mais diversos tipos de esforços.

A característica anisotrópica presente no aço inoxidável (o material apresenta diferentes propriedades mecânicas para cada direção) faz com que se necessite considerar diversos pontos específicos. Aliado a isso, caso o perfil seja laminado, existe um comportamento mecânico distinto na direção transversal e paralela ao sentido de laminação, e conseqüentemente, faz com que a caracterização tanto a tração quanto a compressão torne-se a ideal [14]. Em consequência desses aspectos, o aço inoxidável não apresenta apenas uma única curva tensão-deformação, e as diferentes curvas não tem relações simétricas, e com isso, afirma-se que a curva tende a ter características mais não lineares na tração do que na compressão [78]. As normas vigentes da área indicam um dimensionamento baseado na curva de tração e deformação paralela à dimensão da laminação [14].

Conforme já dito, o aço inoxidável é um material com característica não linear, ou seja, não apresenta um patamar de escoamento bem definido, o que gera a necessidade de se adotar um ponto limite para essa propriedade. Atualmente, entende-se que a tensão relacionada a deformação de 0,2% ($\sigma_{0,2\%}$) é a mais adequada para indicar o escoamento do material, sendo considerado o ponto correspondente a uma deformação permanente na estrutura. Para o presente trabalho, adotou-se a caracterização do aço austenítico grau 304 por meio do ensaio de tração, considerando o $\sigma_{0,2\%}$ como tensão de escoamento.

O ensaio de tração é o método mais difundido para obter as propriedades mecânicas do aço, em que se aplica uma força de maneira incremental e uniaxial de tração em corpos de prova com dimensões padronizadas por norma, gerando um alongamento até que ocorra a ruptura do material. Para se realizar o ensaio, é necessário fabricar corpos de prova seguindo as recomendações indicadas na NBR ISO 6892-1 [79], cujo Anexo D apresenta as dimensões requeridas para chapas e produtos planos de espessura igual ou superior a 3 mm. É importante frisar que essa recomendação é específica para aço carbono, e foi utilizada por ainda não se ter uma norma que apresenta as mesmas características para o aço inoxidável. A Tabela 4 apresenta as dimensões típicas de corpos de prova planos segundo esse anexo.

Tabela 4 – Dimensões típicas de corpos de prova planos (em mm) [79]

Largura (b_0)	Comprimento de medida inicial (L_0)	Comprimento paralelo mín. (L_c)	Comprimento total aproximado (L_t)
40	200	220	450
25	200	215	450
20	80	90	300

Dito isso, para realizar o processo de extração do corpo de prova, cortou-se na máquina de serra fita uma peça com 400 mm de comprimento para a seção tubular 100x3 mm e outra peça, também com 400 mm, para a seção 80x3 mm. Apenas essas seções foram escolhidas justamente por serem os perfis que estarão no banzo, onde se espera que os modos de falha ocorram. Após esse corte, utilizando a Tabela 4, determinou-se a dimensão do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 25, e logo após, os perfis foram enviados para uma empresa especializada em cortes tipo hidrojato (conhecido como jato de água). Essa técnica consiste em um corte realizado por meio de água em alta pressão, proporcionando um corte totalmente a frio e que não altera as propriedades mecânicas do material.

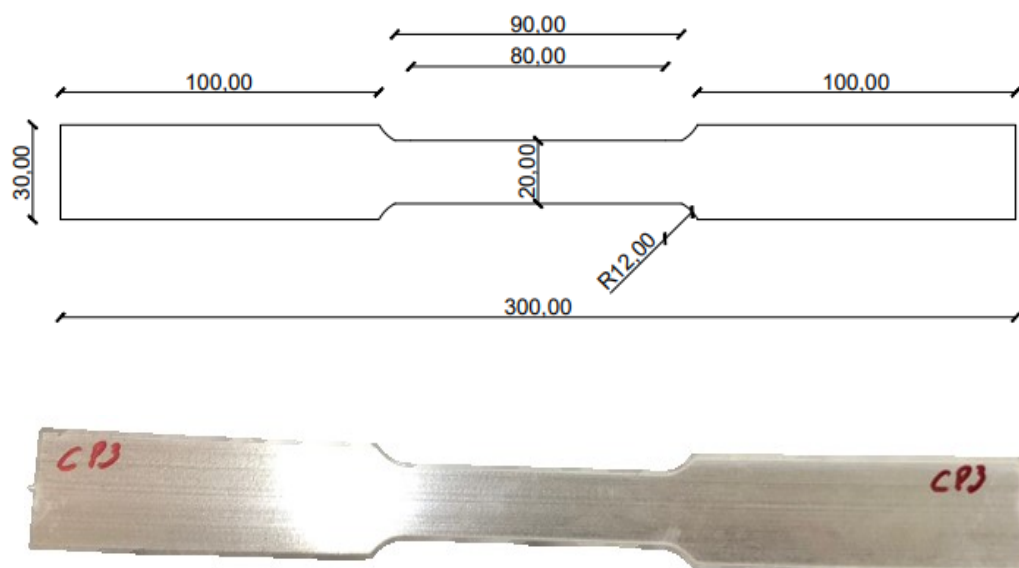


Figura 25 – Corpo de prova extraído e suas dimensões

Quatro cortes foram realizados em cada perfil, sendo um em cada lado da seção quadrada, de maneira que os cortes fossem equidistantes a partir das

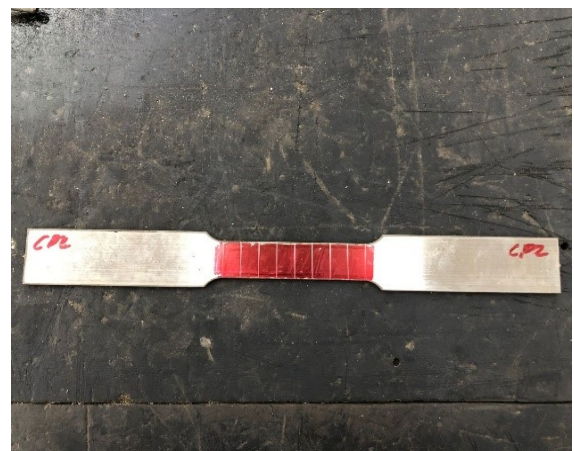
extremidades dos lados, além de serem extraídos longitudinalmente à direção de laminação, conforme a Figura 26. Após isso, os corpos de prova foram marcados em sua faixa mais estreita com espaços de 10 mm por meio de máquina marcadora presente no LEC, apresentada na Figura 27, para que se pudesse ter uma indicação visual do alongamento realizado após o ensaio. Os corpos de prova dos banzos de 80x3 mm foram marcados com a cor vermelha, e os corpos de prova dos banzos de 100x3 mm foram marcados com a cor azul. Além disso, foram enumerados de 1 a 8, sendo os CPs (corpo de prova) de 1 a 4 referentes ao perfil 80x3 mm e os CPs de 5 a 8 referentes ao perfil 100x3 mm.



Figura 26 – Posição de extração dos corpos de prova



a) Máquina de marcação



b) Corpo de prova após marcação

Figura 27 – Marcação em corpos de prova

A realização dos ensaios de tração ocorreu na máquina INSTRON 3382, conforme apresentado na Figura 28, com o auxílio do *software* de aquisição de dados BLUEHILL 3, onde se define o tipo de ensaio que será realizado, a característica geométrica dos corpos de prova e suas dimensões (espessura do corpo de prova, largura da parte central mais estreita, distância entre garras da máquina), além das velocidades de aplicação de carga. A partir disso, consegue-se extrair uma curva tensão-deformação do material. Para a medição de deformação de uma maneira mecânica, a máquina possui um instrumento chamado de *clip gage*, de forma a trazer uma redundância nessa aferição do sistema, onde para valores de até 5% de deformação, as leituras são precisas, e após isso é necessário retirar essa instrumentação do ensaio.

Utilizou-se o padrão de velocidade definido por Huang e Young [80], que indicam 0,05 mm/min até que se atinja 0,2% de deformação e de 0,8 mm/min para o restante do ensaio em corpos de prova de aço inoxidável. A Figura 29 faz uma comparação do alongamento que ocorreu entre corpos de prova não ensaiados e já rompidos, enquanto a Figura 30 compara os alongamentos obtidos para corpos de prova das seções 80x3 mm e 100x3 mm.



a) Máquina INSTRON 3382



b) Fixação do corpo de prova

Figura 28 – Utilização da máquina no ensaio de tração



Figura 29 – Comparação de alongamento após ensaio de tração

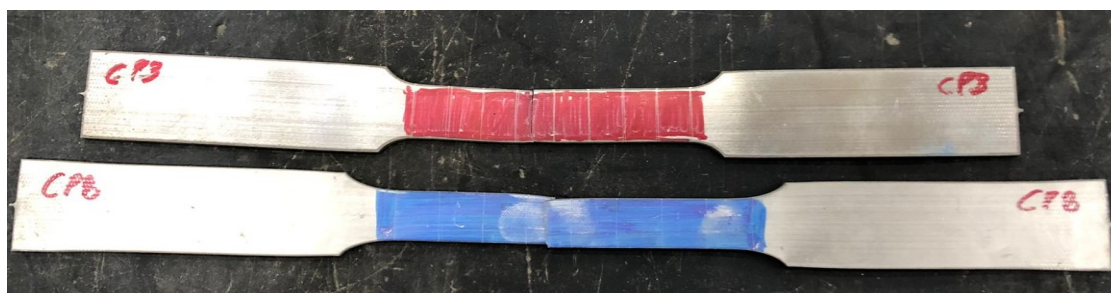


Figura 30 – Ruptura dos corpos de prova das seções estudadas

Com a obtenção dos primeiros resultados dos ensaios, percebeu-se um problema. Os corpos de prova dos perfis com seção 80x3 mm estavam rompendo com valores de deformação entre 12% e 15% (pode-se observar na Figura 30 que o alongamento do exemplar CP3 é menor do que o do CP8), o que não corresponde à realidade de um aço austenítico grau 304, que tem como uma de suas principais características a ductilidade e capacidade de desenvolver grandes deformações (valores acima de 35%). A partir disso, deu-se preferência em realizar um teste de verificação de classe de aço inoxidável por meio do gel decapante desenvolvido pela *APERAM*, aplicando esse produto nos perfis, obtendo-se uma reação química quase instantânea para a seção 80x3 mm, mudando a tonalidade da cor do gel de transparente para esverdeado, enquanto o produto aplicado no perfil 100x3 mm manteve seu aspecto natural, conforme apresentado na Figura 31.

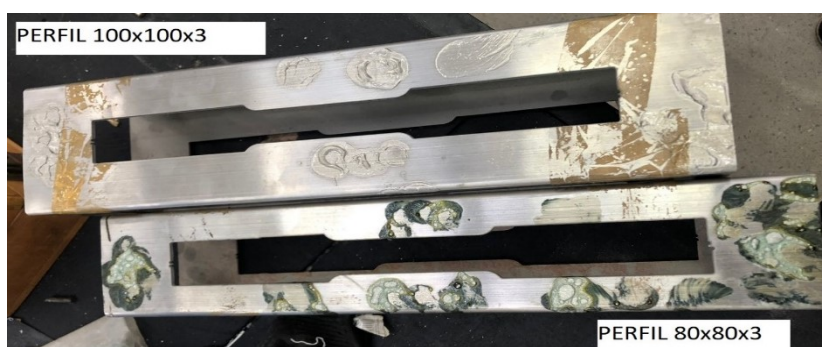


Figura 31 – Reação com a aplicação do gel decapante

A partir dessa reação química, conseguiu-se afirmar que o perfil 80x3 mm não era grau 304, mas sim pertencia a família 200 dos aços inoxidáveis, mais especificamente ao grau 201. Isso ocorre por duas razões que estão diretamente ligadas as diferenças de composição química do material. Primeiramente, o aço inoxidável austenítico grau 304 tem maiores teores de cromo e níquel do que o grau 201 [15], o que faz com que a sua resistência a corrosão seja maior, e por isso a reação química que retira a camada protetora contra esse problema não ocorreu de maneira instantânea. Além disso, o aço grau 201 tem maior presença de carbono em sua composição química do que o aço grau 304 [15], tornando-o menos dúctil a esforços mecânicos, e por isso que seus níveis de deformação não atingiram o que se espera de aços inoxidáveis com propriedades altamente dúcteis.

A partir dessa situação, utilizou-se outro perfil 80x3 mm disponível no LEC, onde se realizou o teste do gel decapante no mesmo e se concluiu que o aço era da série 304, assim como era planejado desde o início. A caracterização desse aço já havia sido feita, e atingiu deformações máximas antes da ruptura na casa dos 40%, valor que é aceitável e esperado para um aço inoxidável dessa classe. Aliado a isso, e como forma de garantia, o teste do gel decapante também foi realizado nos perfis que teriam função de montante, onde se confirmou que todos eles também pertenciam ao grau 304 dos aços inoxidáveis, de maneira a conferir em toda a configuração geométrica da ligação, uma uniformidade no que se diz ao tipo de material utilizado.

Após uma análise dos dados obtidos pelos ensaios de tração, juntamente com a correção de valores e indicação de tensões e deformações plausíveis de serem utilizadas, conseguiu-se obter os valores de propriedades mecânicas das seções 100x3 mm e 80x3 mm. As propriedades mecânicas obtidas foram: módulo de elasticidade (E); tensões obtidas por meio da inclinação correspondente ao módulo de elasticidade em 0,1% de deformação ($\sigma_{0,1\%}$), em 0,2% de deformação ($\sigma_{0,2\%}$, considerada como tensão de escoamento), em 0,5% de deformação ($\sigma_{0,5\%}$) e em 1% de deformação ($\sigma_{1,0\%}$), tensão máxima (σ_u), também conhecida como tensão última, e a deformação correspondente a tensão máxima (ε_u). A Figura 32 apresenta as curvas tensão-deformação para as duas seções analisadas, e a Tabela 5 indica os resultados das propriedades mecânicas extraídas dos ensaios.

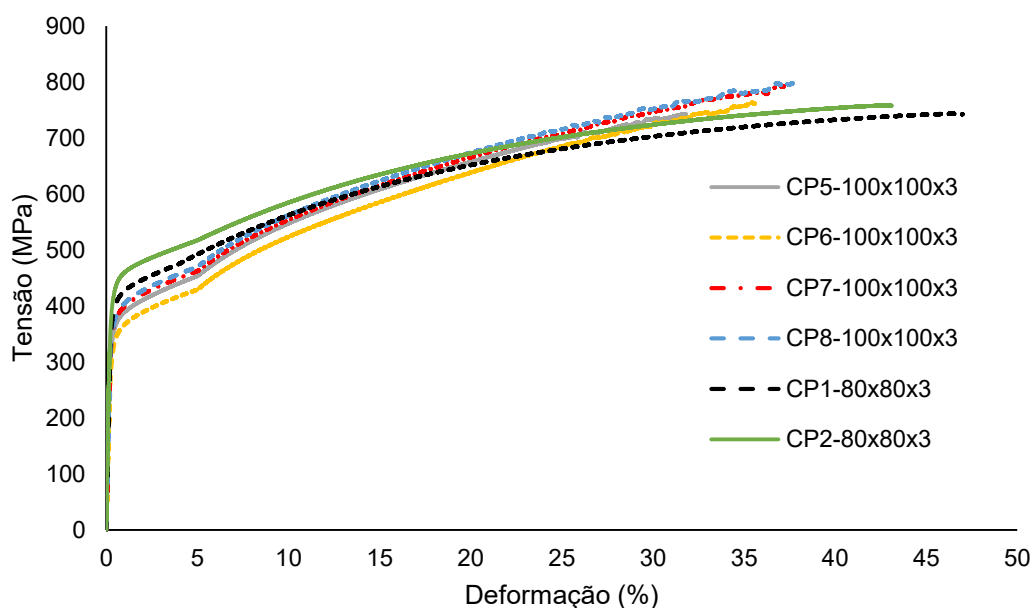


Figura 32 – Curvas tensão-deformação do aço

Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos corpos de prova

Corpo de prova	E (MPa)	$\sigma_{0,1\%}$ (MPa)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	$\sigma_{0,5\%}$ (MPa)	$\sigma_{1,0\%}$ (MPa)	$\sigma_{u\%}$ (MPa)	ϵ_u (%)
CP5-100x3	153496	332,68	357,36	378,40	395,13	743,20	31,79
CP6-100x3	138046	308,19	332,00	356,88	373,25	762,98	35,44
CP7-100x3	171380	338,27	363,98	388,96	406,07	792,73	37,15
CP8-100x3	202732	328,77	366,42	392,41	409,72	800,36	37,76
CP1-80x3	209223	353,59	387,06	414,26	431,00	743,89	46,51
CP2-80x3	215227	383,62	416,06	447,61	464,22	758,86	42,89

Pode-se observar que os corpos de prova CP5 e CP6 apresentaram valores de propriedades mecânicas discrepantes com o que se espera para um aço inoxidável austenítico, no que se refere as suas medições de deformação última e de módulo de elasticidade. Esses problemas podem ter sido causados porque, após os ensaios, verificou-se em uma nova medição que alguns dos corpos de prova tinham espessuras abaixo de 3 mm, o que indicaria a utilização do anexo B da NBR ISO 6892-1 [79], provendo corpos de prova com dimensões menores, o que foi ajustado para os corpos de prova CP1 e CP2, que tiveram indicações de propriedades mecânicas mais adequadas

3.5 Soldagem entre perfis

Após realizar o corte dos perfis e a caracterização do tipo de aço e suas propriedades mecânicas, deu-se prosseguimento ao desenvolvimento da metodologia experimental com a etapa de soldagem dos perfis. Esse processo ocorreu na cidade de Serra – ES, onde se contratou uma empresa especializada em solda TIG entre perfis de aço inoxidável, garantindo assim, um melhor controle tecnológico dessa etapa tão importante no que diz respeito a capacidade resistente da ligação.

A soldagem com gás inerte de tungstênio, conhecida como soldagem TIG, baseia-se na corrente recebida por meio de um eletrodo de tungstênio (resistente à altas temperaturas) que gera um arco voltaico, aquecendo e liquefazendo o material, o que gera uma camada protetora de reações químicas provenientes do ar a partir de misturas de gases presentes no processo, tais como Hélio e Argônio. Uma vez que o eletrodo de tungstênio não derrete, é necessário ter um material de adição na soldagem TIG, podendo ser usado em forma de vareta (manual) ou arame (automatizada) [81]. Existem diversas vantagens de se utilizar a solda TIG em aços inoxidáveis, como por exemplo, a formação do cordão sem respingo de solda, com uma qualidade tanto resistente quanto esteticamente muito acima dos demais tipos de técnicas de soldagem, além de que todas as posições de soldagem são plausíveis de serem realizadas [81], mesmo que com isso, necessite-se de uma mão de obra extremamente qualificada, sendo esse o principal motivo de deslocamento dos perfis usados na presente pesquisa para uma fábrica que tivesse essa *expertise*.

Para a soldagem realizada nos perfis da pesquisa, utilizou-se como material de adição, alguns eletrodos E308-L, específicos para aplicação em aço inoxidável. Primeiramente, utilizou-se um esquadro e trenas para alinhar o montante e posicioná-lo no centro do banzo, e em seguida, realizou-se a fixação da extremidade da seção de montante e da face superior do banzo por meio de pontos de solda. Por fim, realizou-se o passe de soldagem ao redor da ligação, que foi caracterizada como solda de filete, onde se indicou ao profissional de soldagem que a perna da solda deveria ter espessuras que variassem entre t_0 e $2t_0$, por serem valores rotineiramente utilizados e previstos em manuais, além de que com a instrumentação presente na fábrica, não se conseguia medir com exatidão esse valor, e com isso, preferiu-se abrir

uma margem de aplicação. Da Figura 33 a Figura 36 são mostradas as principais etapas do processo de soldagem TIG realizada entre os perfis das ligações propostas.

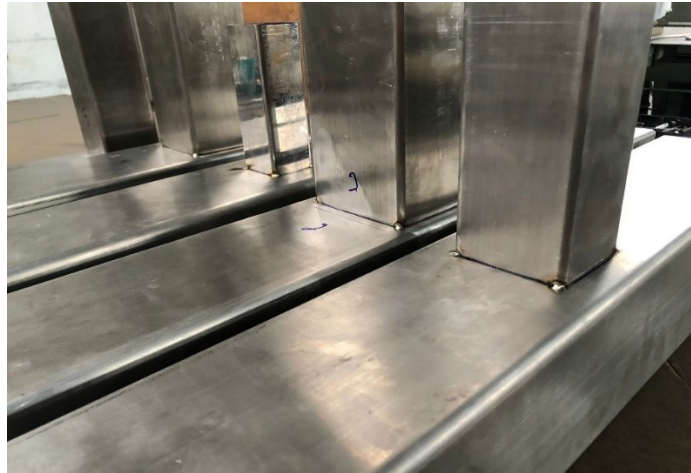


Figura 33 – Pontos de solda para fixação de montante



Figura 34 – Soldagem entre perfis da ligação



Figura 35 – Ligações após soldagem



Figura 36 – Limpeza das marcas de solda

3.6 Configurações geométricas e nomenclatura das ligações

Com o processo de soldagem finalizado, obteve-se todas as doze ligações requeridas para a realização dos ensaios experimentais da pesquisa. A partir disso, medições foram realizadas por meio de paquímetro digital para a conferência final das dimensões dos perfis da ligação, além das espessuras de perna das soldas.

Definiu-se uma nomenclatura para os corpos de prova que seriam ensaiados, facilitando assim, a identificação das principais dimensões da seção que compõem a ligação. Como exemplo, pode-se citar o corpo de prova T1A-C100x3-B40x3: a letra T refere-se à configuração da ligação, que é tipo T; o número 1 e a letra A são referentes a ordem do corpo de prova ensaiado, uma vez que foram fabricados seis configurações geométricas com dimensões diferentes, e cada uma com um par correspondente em suas medidas para que se tenha uma redundância de resultados, totalizando assim os doze corpos de prova; a letra C e os números subsequentes representam as dimensões do banzo da ligação, que para o exemplo, tem largura e altura de 100 mm, e espessura de 3 mm; a letra B e os números seguintes representam as dimensões do montante da ligação, que para o exemplo, tem largura e altura de 40 mm, e espessura de 3 mm. A Figura 37 indica as vistas superior, lateral e frontal da ligação, enquanto a Tabela 6 apresenta as configurações geométricas escolhidas para os ensaios, bem como suas reais dimensões (em milímetros) obtidas por medição. Percebe-se que tanto os valores de β quanto o de 2γ estão nas proximidades dos limites apresentados na Tabela 1 e Tabela 2. É importante frisar

que as dimensões escolhidas para os ensaios resultaram em ligações com configurações geométricas que ainda não foram pesquisadas na literatura atual, passando a ser o diferencial da pesquisa e tornando-a única nesse quesito.

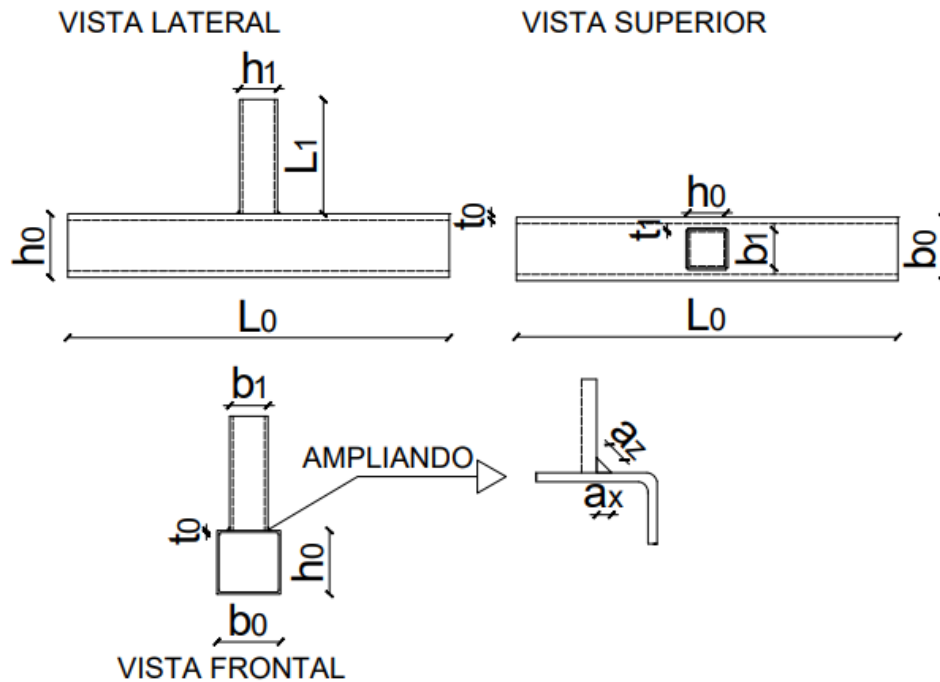


Figura 37 – Vistas e dimensões dos corpos de prova

Tabela 6 – Medições reais das ligações tubulares ensaiadas

Corpo de prova	b ₀ (mm)	b ₁ (mm)	t ₀ (mm)	t ₁ (mm)	L ₀ (mm)	L ₁ (mm)	a _z (mm)	a _x (mm)	β	2γ
T1A-C100x3-B40x3	102,16	40,03	2,80	2,98	601,00	120,00	6,08	4,50	0,40	36,49
T1B-C100x3-B40x4	100,13	40,09	2,76	2,90	602,00	120,00	6,70	3,93	0,40	36,28
T2A-C80x3-B40x3	80,13	40,04	2,80	3,05	483,00	120,00	6,30	3,82	0,50	28,62
T2B-C80x3-B40x3	80,78	39,91	2,81	2,96	480,00	120,00	6,00	3,22	0,50	28,75
T3A-C100x3-B60x3	100,43	60,18	2,78	2,86	602,00	180,00	6,45	3,05	0,60	36,13
T3B-C100x3-B60x3	101,20	60,90	2,90	3,22	601,00	180,00	6,48	3,40	0,60	34,90
T4A-C100x3-B70x3	101,44	70,46	2,80	2,72	602,00	210,00	6,82	4,50	0,70	36,23
T4B-C100x3-B70x3	100,42	70,05	2,90	2,77	600,00	210,00	6,74	4,02	0,70	34,63
T5A-C80x3-B60x3	80,33	60,66	2,83	2,82	484,00	180,00	7,40	3,63	0,75	28,39
T5B-C80x3-B60x3	80,74	60,42	2,77	3,30	480,00	180,00	6,46	3,90	0,75	29,15
T6A-C100x3-B80x3	100,15	80,09	2,76	2,78	600,00	240,00	6,56	4,00	0,80	36,29
T6B-C100x3-B80x3	100,18	80,08	2,84	2,83	601,00	240,00	6,80	3,50	0,80	35,27

3.7 Instrumentação dos ensaios

A instrumentação adotada nos ensaios teve como foco, a obtenção dos dados relativos a deformações lineares, deslocamentos e cargas durante o progresso no experimento, uma vez que com esses dados, pode-se analisar a capacidade de carga e os modos de falha que ocorrem na ligação tubular.

O controle de deslocamentos nas ligações ocorreu por meio da utilização de transdutores de deslocamento (LVDTs) da marca *Gefran* (modelo PY2 com ponta de esfera). Para cada ligação ensaiada, seis LVDTs eram posicionados, sendo dois referentes a leitura do deslocamento (indentação) na face superior do banzo (numerados como 1 e 2), outros dois responsáveis pela leitura do deslocamento (deflexão) na face lateral do banzo (numerados como 3 e 4), e os últimos dois eram posicionados no próprio sistema da estrutura montada para o ensaio (numerados como 5 e 6), medindo o deslocamento total do conjunto e servindo como um *backup* do ensaio.

É importante ressaltar que os LVDTs numerados como 1 e 2 foram posicionados no centro do eixo longitudinal do banzo, e para que se conseguisse captar os deslocamentos no ponto mais próximo do montante, criou-se um prolongador de acrílico, que foi fixado na ponta do LVDT, facilitando essa captação. Aliado a isso, os LVDTs numerados como 3 e 4 tiveram fixados em suas extremidades uma pequena placa de acrílico, com o intuito de se captar o maior deslocamento naquela região, e não em apenas um único ponto, o que ocorreria caso a ponta de esfera tivesse sido mantida. Pandey e Young [82] fizeram um dispositivo semelhante em seus ensaios e foram a inspiração para a criação do mesmo. A Figura 38 apresenta os dispositivos utilizados na medição dos deslocamentos.

O controle de deformações lineares nas ligações teve os extensômetros de resistência elétrica (ou *strain gauges*) como instrumentação aferidora, utilizando a marca *Excel Sensores* como fornecedores do mesmo, dando preferência a cinco extensômetros unidirecionais do tipo PA-09-250BA-350-L, feitos especificamente para serem utilizados em estruturas de aço inoxidável. Cinco extensômetros foram utilizados para cada ligação, sendo dois posicionados na face superior do banzo, outros dois posicionados nas faces laterais do banzo e um posicionado no montante da ligação. A objetivo da utilização dessa instrumentação foi de analisar possíveis

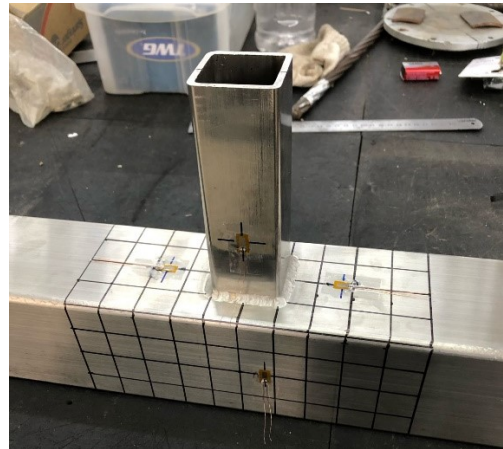
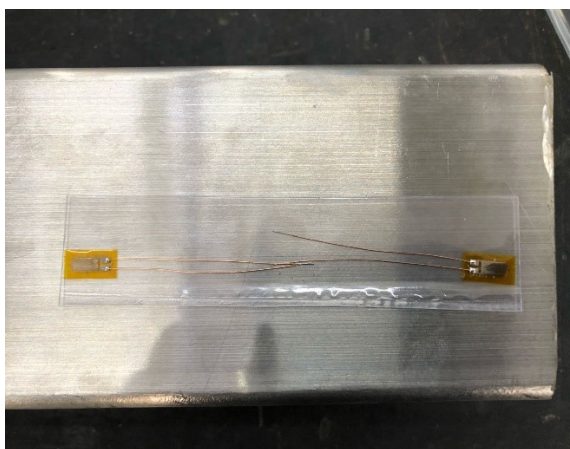
excentricidades na aplicação de carga, além de observar os locais com maiores incidências das deformações nas ligações. A Figura 39 apresenta um exemplo de colagem de *strain gauges*, em que antes dessa etapa, limpou-se a região pretendida para posicioná-lo, e após isso, aplicou-se a cola tipo 496 da marca *Loctite*, que é específica para a superfície do material. Pode-se observar nessa figura que linhas de grade foram desenhadas nos corpos de prova, de maneira a facilitar o posicionamento da instrumentação, além de melhorar a observação da deformada que ocorreu após os ensaios, buscando representar de maneira experimental malha de elementos finitos, contudo, em escala de maior proporção.



a) Acrílico para LVDTs da face superior

b) Acrílico para LVDTs da face lateral

Figura 38 – Dispositivos para medição de deslocamentos



a) Extensômetro unidirecional

b) Colagem dos extensômetros

Figura 39 – Dispositivos para medição de deformações

Por fim, a máquina que realizou a aplicação da carga (por meio de controle de aplicação de deslocamentos) nos montantes da ligação foi a prensa hidráulica *Universal Lousenhausen*, com um range que possibilita a atuação de cargas de até 3000 kN. Para a leitura dos valores de carga durante os ensaios, utilizou-se os leitores digitais e analógicos do próprio sistema interligado no ensaio, da marca *MOOG*, além da leitura do transdutor de pressão acoplado a prensa. Para que se conseguisse ter uma redundância na leitura das cargas, a série A de ensaios (6 testes) também contou com uma célula de carga da marca *Gefran*, com um range de leituras chegando até 500 kN. A Figura 40 apresenta a instrumentação de aplicação e medição de carga.



a) Prensa hidráulica



b) Célula de carga

Figura 40 – Dispositivos para medição de cargas

É importante ressaltar que todo o sistema de controle de deslocamento, deformações e cargas foi conectado a um sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments*, juntamente ao software *Labview*, o que proporcionou a leitura de todos os dados de maneira direta e simultânea. A Figura 41 apresenta o posicionamento dos LVDTs e *strain gauges* durante os ensaios, em que os transdutores de deslocamentos foram fixados em estruturas independentes do sistema de ensaio, para que as leituras não sofressem interferência, garantindo maior confiabilidade nos dados obtidos.

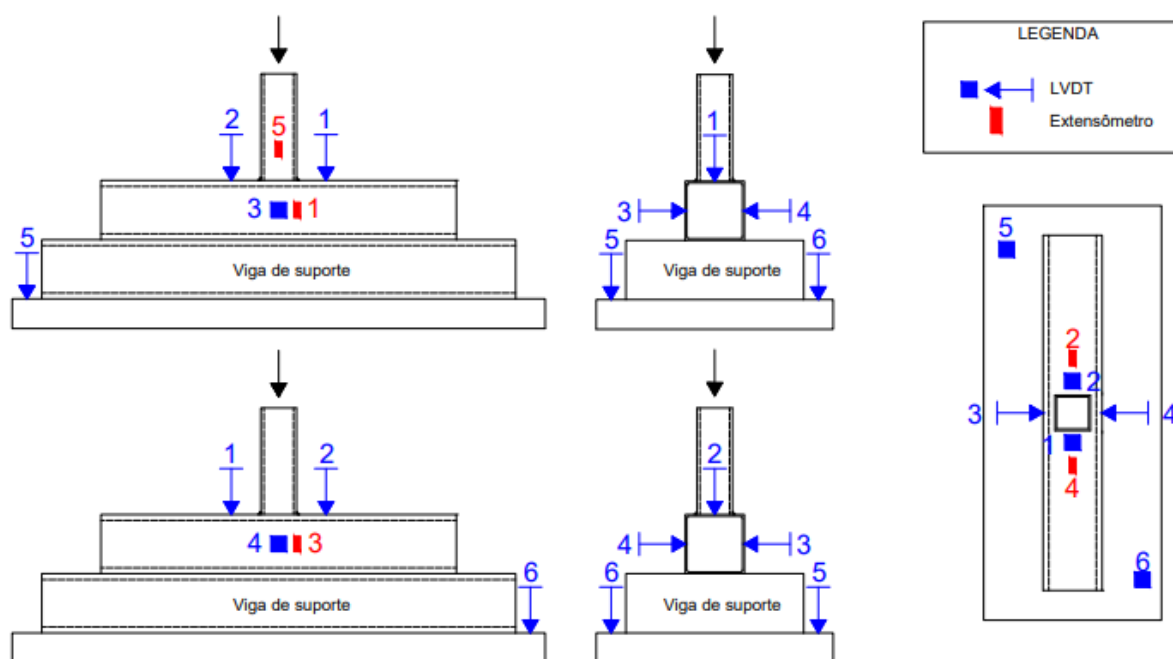


Figura 41 – Vistas e posições da instrumentação durante o ensaio

3.8 Condições de contorno e aplicação de carga

As condições de contorno adotadas nos ensaios foram definidas de acordo com a *expertise* de outras pesquisas da área já realizadas no LEC. Primeiramente, buscou-se posicionar o protótipo no centro da prensa hidráulica usando trena manual e nível a laser, para que garantisse uma distribuição dos esforços mais centrada no montante.

A face inferior do banzo foi totalmente apoiada em uma viga de suporte que foi alocada na prensa hidráulica para garantir maior estabilidade na hora dos ensaios, conforme representado na Figura 41. Após isso, utilizou-se grampos para fixar as extremidades do banzo, com o intuito de evitar a ocorrência do efeito de alavanca [9]. Com isso, os deslocamentos dessas extremidades foram restringidos nas três direções (x, y e z), além de se impedir o deslocamento vertical na face inferior do banzo. Na extremidade do montante, apenas o deslocamento vertical estava livre, para que a aplicação da carga de compressão pudesse ocorrer. Prolongadores foram utilizados à medida que o comprimento do montante diminuía, para que a prensa conseguisse ter um ponto de contato com esse elemento e assim, realizar a compressão. A Figura 42 apresenta o esquema de condição de contorno dos ensaios,

em que da mesma forma que na Figura 41, os números com a cor azul representam as posições dos LVDTs, enquanto os números com a cor vermelha representam as posições dos extensômetros.

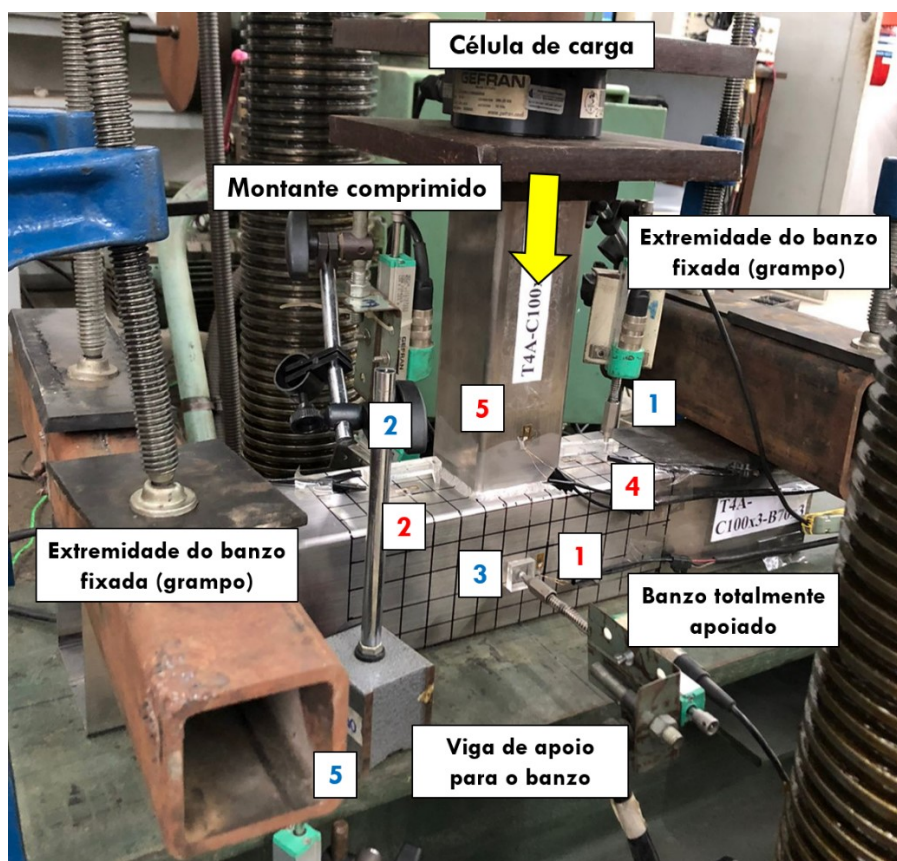


Figura 42 – Condições de contorno e instrumentação dos ensaios

No início de todos os ensaios, pré-cargas foram aplicadas na ligação em forma de ciclos, onde geralmente usa-se um parâmetro de 10% da carga de ruptura prevista. Contudo, como a previsão de carga limite para os ensaios era relativamente baixa (em função das dimensões dos corpos de prova), definiu-se uma pré-carga de 10 kN para as ligações com o parâmetro β igual a 0,4 e 0,5, e para as demais ligações, adotou-se uma pré-carga de 20 kN. Após alcançar esses valores, o sistema ajustou-se para conseguir manter esse nível de carga, até que comando de início do ensaio fosse autorizado, onde após isso, a aplicação de carga (em forma de deslocamentos) ocorreu até a ruptura do elemento ou a um comando de finalização do operador da máquina. A velocidade de aplicação de deslocamentos no sistema iniciou-se com 0,002 mm/s, e foi ajustada durante o andamento do ensaio conforme a necessidade, sendo acompanhada em tempo real pela tela do sistema de aquisição de dados.

4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Considerações iniciais

A análise dos dados obtidos nos ensaios das doze ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável austenítico é vital para a compreensão do real comportamento da estrutura, sendo esse o foco do presente capítulo. O principal ponto de observação é referente as resistências obtidas a partir das curvas carga-deslocamento de cada ensaio, utilizando e comparando os critérios de deformação limite propostos atualmente na literatura. Nessas curvas, deformações côncavas estão relacionadas a deslocamentos negativos (face superior), e deformações convexas estão relacionadas a deslocamentos positivos (face lateral).

Outro fator importante para a avaliação nos resultados experimentais são os modos de falha ocorridos nas ligações tubulares. É importante frisar que Feng e Young [70] observaram que nem sempre os modos de falha preconizados pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] e pela NBR 16239 [12] ocorriam em ligações tubulares em aço inoxidável, sendo um ponto de atenção durante o estudo. Por fim, a análise dos extensômetros indica se as maiores deformações atingidas ocorreram na face superior ou lateral do banzo, além do montante, e também possibilita analisar possíveis excentricidades na aplicação da carga no corpo de prova.

4.2 Ligações com $\beta = 0,4$

As ligações com valores de $\beta = 0,4$ foram nomeadas como T1A-C100x3-B40x3 e T1B-C100x3-B40x3, onde suas dimensões já foram apresentadas na Tabela 6. A Figura 43 apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas dos LVDTs 1 até 4, e a Figura 44 apresenta as curvas carga-deformação extraídas dos *strain gauges* fixados nas ligações.

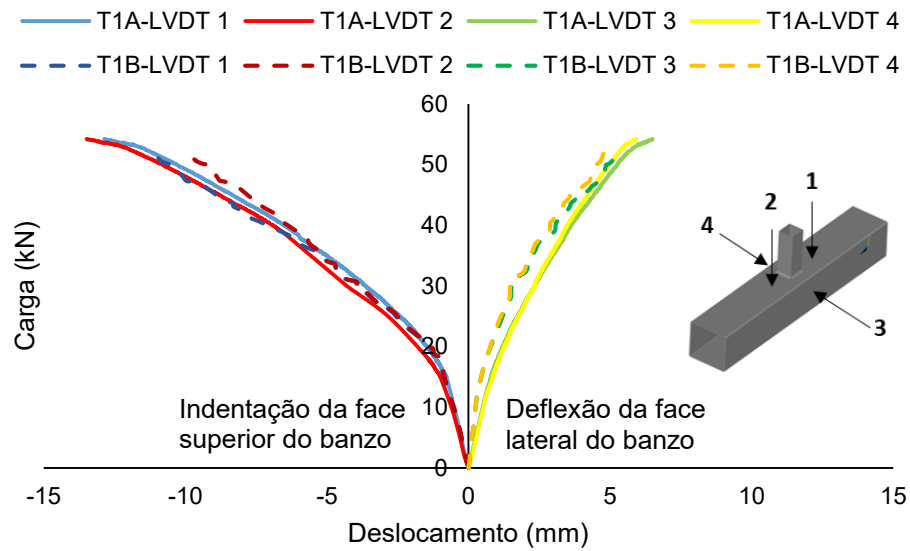


Figura 43 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,4$

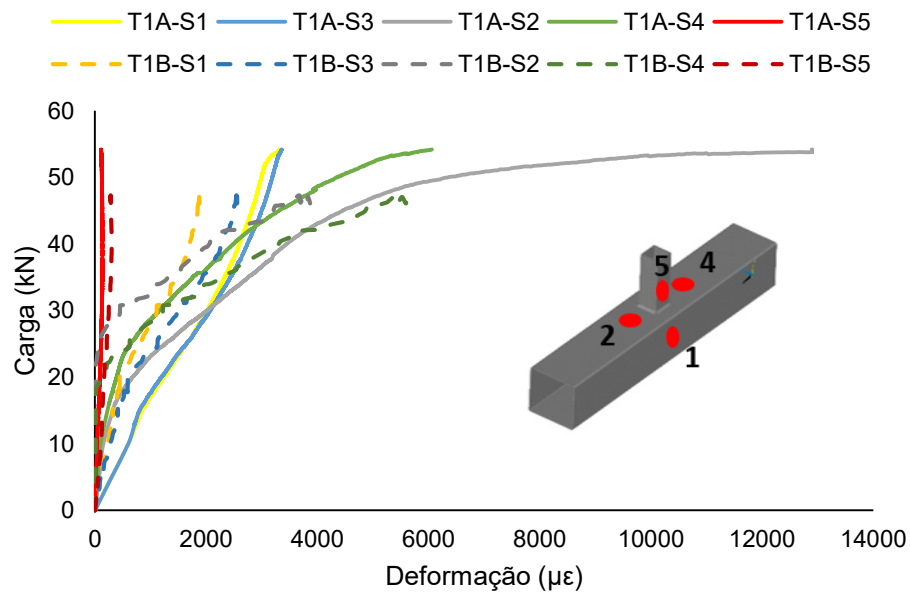


Figura 44 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,4$

Observando inicialmente a Figura 43, pode-se concluir que tanto os resultados da série A (T1A-C100x3-B40x3) quanto os da série B (T1B-C100x3-B40x3) de ensaios para ligações com $\beta = 0,4$ foram bastante similares e coerentes com o que se esperava a partir de análises prévias, onde as curvas que indicam os deslocamentos dos LVDTs praticamente se sobrepõem. Percebe-se também que a face superior do banzo teve maiores deslocamentos, um fator característico da falha nessa região.

Juntamente a isso, analisando a Figura 44, observa-se que as deformações medidas pelos extensômetros da série A e B tiveram boa coerência entre si, com valores relativamente próximos e curvas semelhantes. A maior diferença ocorreu no extensômetro S2 da série A, que atingiu uma deformação desproporcional em função de um contato do instrumento com o acrílico do LVDT nos momentos finais do ensaio, pressionando-o e gerando essas maiores deformações.

Por fim, conforme apresentado na Figura 45 e na Figura 46, a falha na face superior do banzo foi o modo preponderante nas duas ligações com $\beta = 0,4$, sendo esse modo o indicado para ligações em aço carbono com as mesmas características geométricas, segundo o Eurocode 3, parte 1-8 [10].

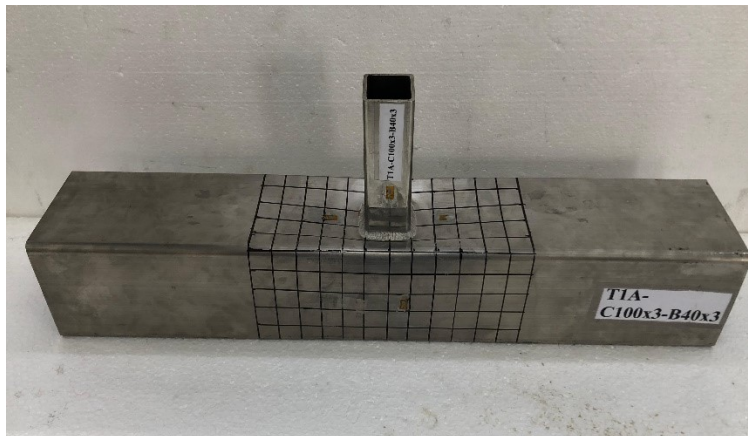


Figura 45 – T1A-C100x3-B40x3 após ensaio



Figura 46 – T1B-C100x3-B40x3 após ensaio

4.3 Ligações com $\beta = 0,5$

Conforme indicado na Tabela 6, os corpos de prova com valores de $\beta = 0,5$ foram especificados como T2A-C80x3-B40x3 e T2B-C80x3-B40x3. A Figura 47 apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas dos LVDTs, e a Figura 48 apresenta as curvas carga-deformação extraídas dos *strain gauges*.

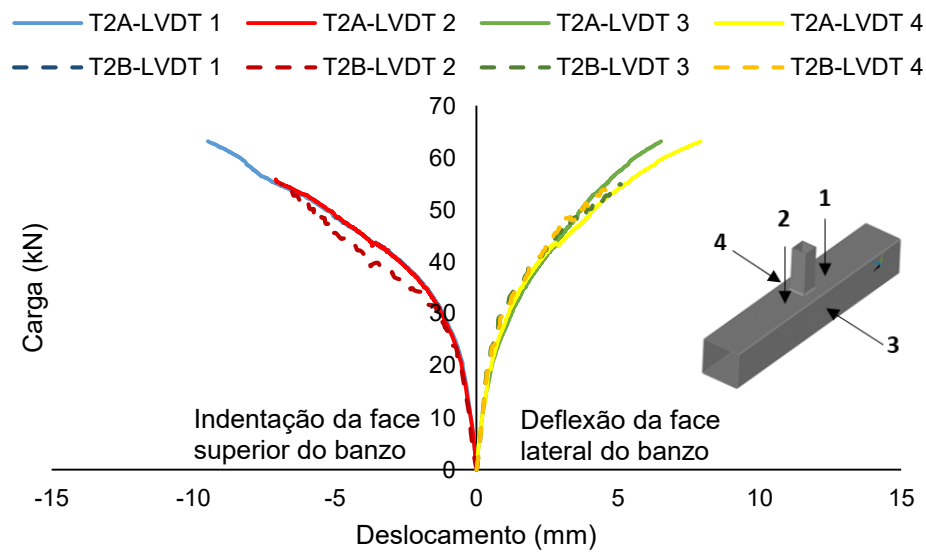


Figura 47 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,5$

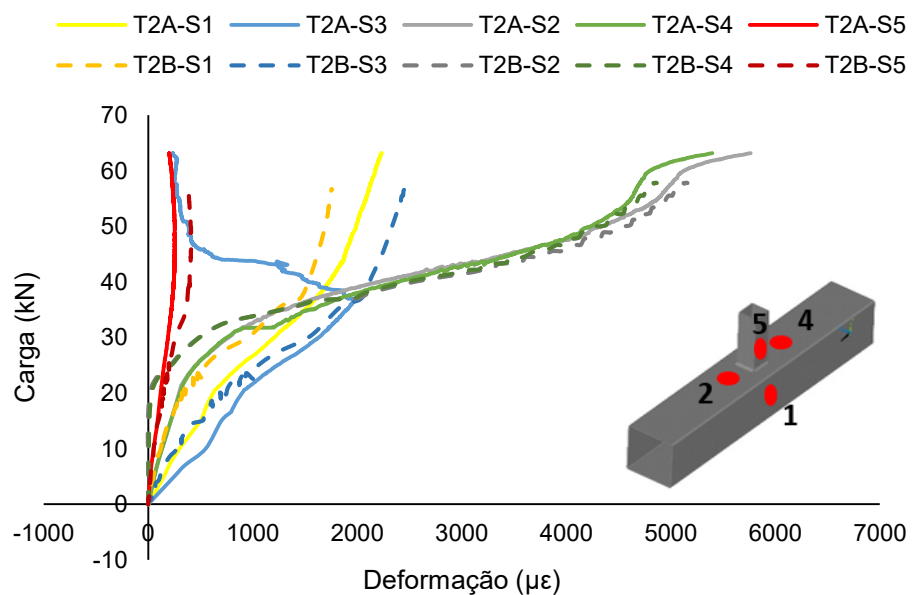


Figura 48 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,5$

Analisando a Figura 47, observa-se novamente que existe uma convergência entre as curvas carga-deslocamento dos dois ensaios, mostrando similaridade entre os resultados, e da mesma maneira, maiores deslocamentos foram observados na face superior do banzo, indicando o possível modo de falha. É importante frisar que ocorreram problemas na leitura do transdutor de deslocamento 1 da série A, e por isso, seus dados foram desconsiderados. Juntamente a isso, percebe-se que na Figura 48 os valores de deformação dos dois ensaios novamente foram próximos, com as curvas carga-deformação tendo trajetórias similares em sua grande parte.

A falha na face superior do banzo foi novamente o modo preponderante para o caso das duas ligações com $\beta = 0,5$, seguindo a delimitação indicada pelas normas de ligações em aço carbono, como o Eurocode 3, parte 1-8 [10], conforme apresentado na Figura 49 e Figura 50.

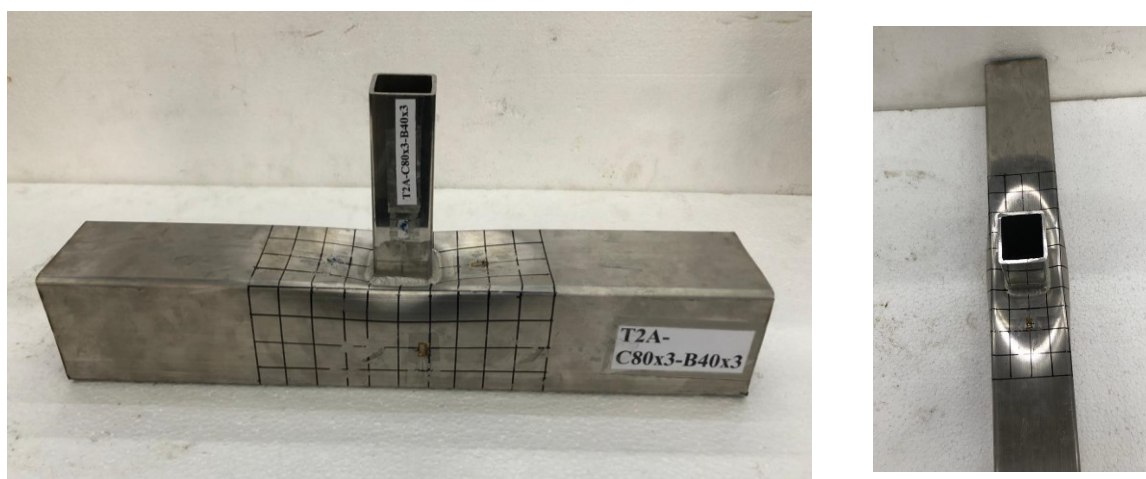


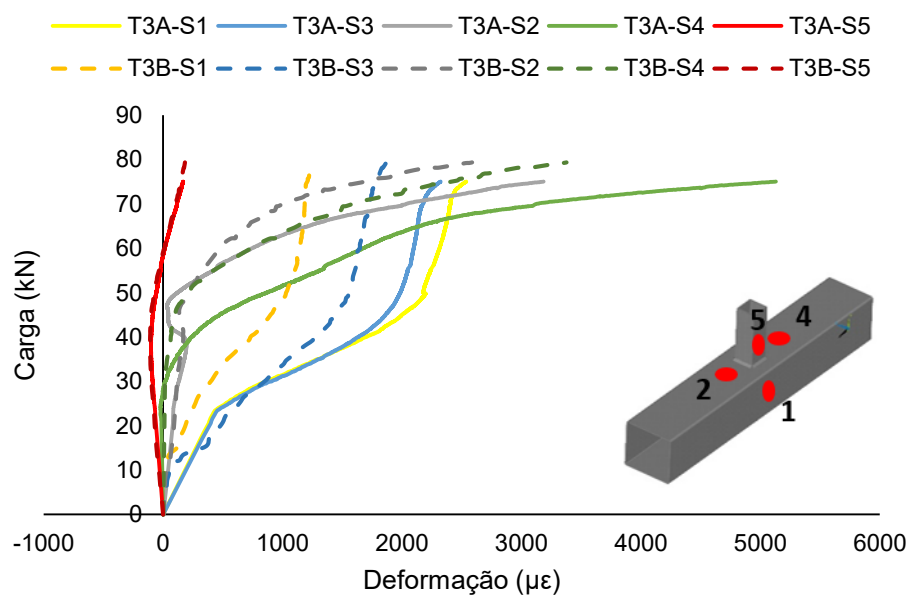
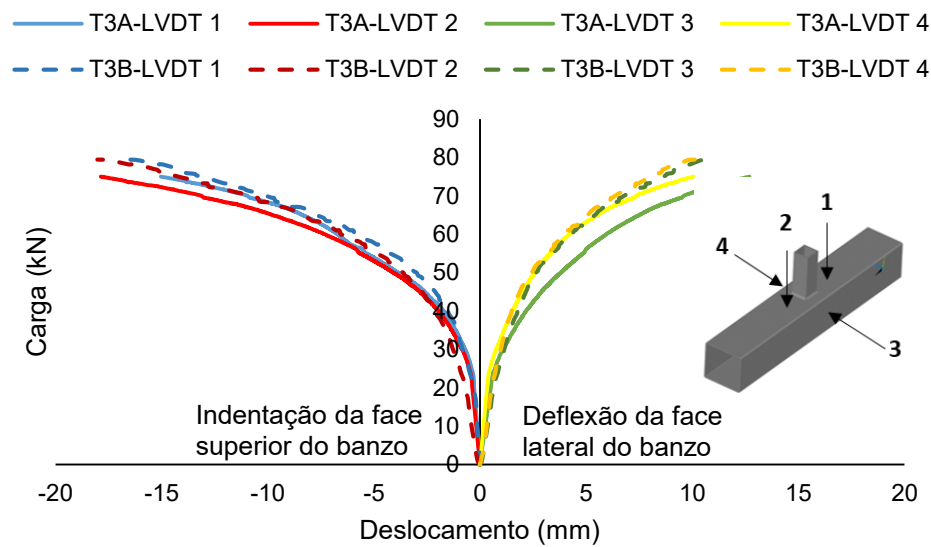
Figura 49 – T2A-C80x3-B40x3 após ensaio



Figura 50 – T2B-C80x3-B40x3 após ensaio

4.4 Ligações com $\beta = 0,6$

As ligações com valores de $\beta = 0,6$ foram nomeadas como T3A-C100x3-B60x3 e T3B-C100x3-B60x3, com suas medidas especificadas na Tabela 6. A Figura 51 apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas dos transdutores de deslocamento, e a Figura 52 apresenta as curvas carga-deformação extraídas dos extensômetros.



Observando inicialmente a Figura 51, nota-se que as curvas carga-deslocamento das séries A e B para os ensaios com valores de $\beta = 0,6$ foram novamente similares, com uma pequena diferença no LVDT 3 da série A em relação aos outros responsáveis por verificar a face lateral do banzo. Mais uma vez, a face superior do banzo sofreu maiores deslocamentos, indicando que a falha ocorreu nesse local. Partindo para a análise da Figura 52, novamente foram observados comportamentos similares no que se refere a deformação das duas ligações, principalmente no que se diz ao extensômetro S2 da série A com o S2 e S4 da série B, além do *strain gauge* S3 da série B com o S1 e S3 da série A.

Conforme esperado, o local de falha preponderante nas duas ligações tubulares com $\beta = 0,6$ foi na face superior do banzo, conforme especificados em recomendações normativas da área, sendo apresentada na Figura 53 e na Figura 54.

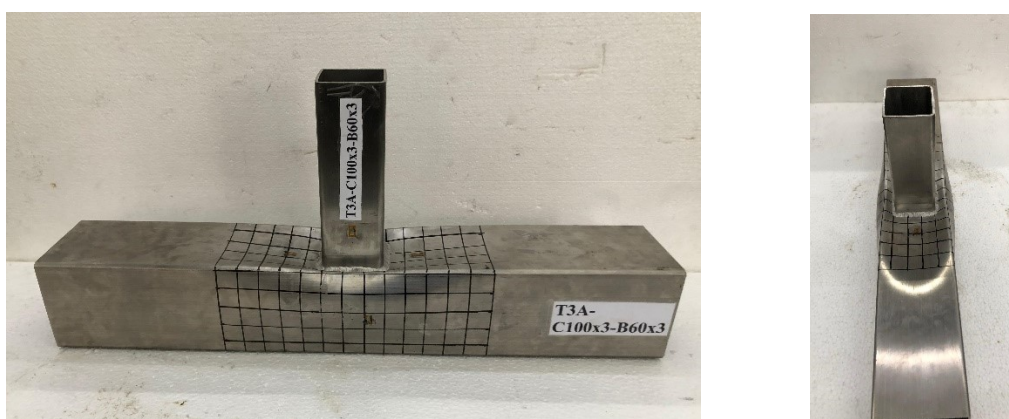


Figura 53 – T3A-C100x3-B60x3 após ensaio

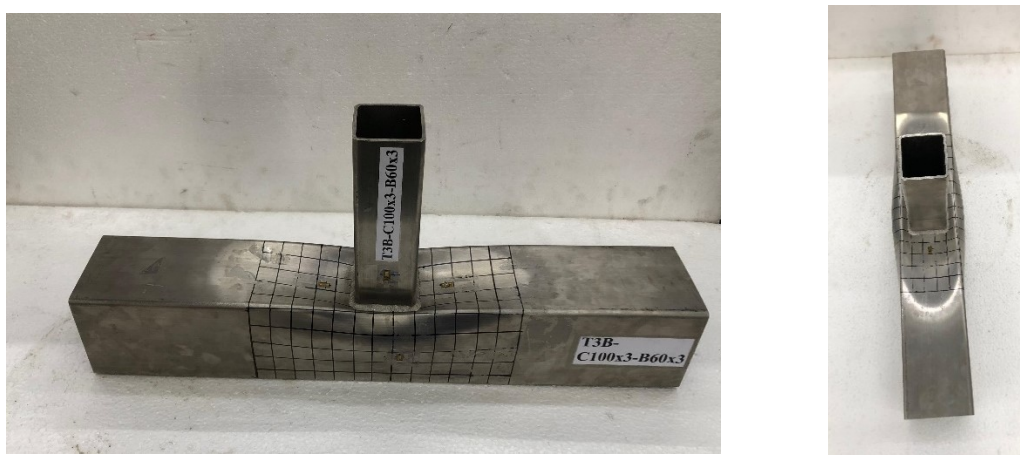


Figura 54 – T3B-C100x3-B60x3 após ensaio

4.5 Ligações com $\beta = 0,7$

As ligações com valores de $\beta = 0,7$ tem suas dimensões apresentadas na Tabela 6. A Figura 55 apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas com as medições dos LVDTs 1 até 4, e a Figura 56 apresenta as curvas carga-deformação extraídas dos *strain gauges* fixados nas ligações.

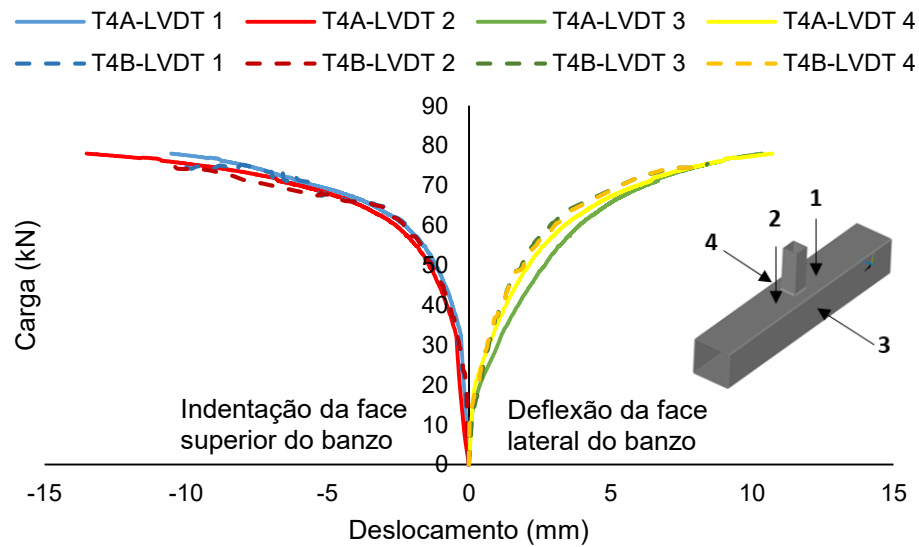


Figura 55 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,7$

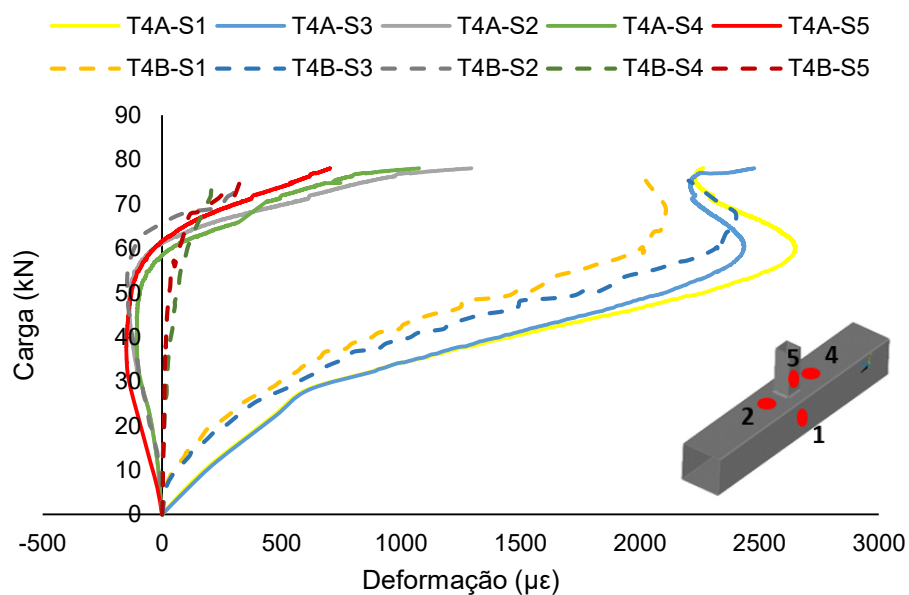


Figura 56 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,7$

Analisando a Figura 55, percebe-se mais uma vez uma boa coerência entre os dois protótipos, uma vez que as curvas carga-deslocamento praticamente se sobrepõem. Aliado a isso, duas diferenças começam a surgir nas medições, sendo elas: primeiramente, a indentação da face superior e a deflexão da face lateral, quando comparadas uma com a outra, passam a ter valores mais próximos; aliado a isso, observa-se um princípio de diminuição de rigidez da ligação após aplicação de parte dos deslocamentos, causando uma queda da curva, o que não ocorreu nos protótipos menores valores de β , em função da atuação ativa do efeito de membrana.

Observando a Figura 56, mais uma vez, observa-se uma coerência entre os valores dos resultados obtidos para deformações nos dois ensaios, com uma maior variação na medição dos montantes, que pode ter sido causada por alguma pequena excentricidade. Outro ponto importante desses resultados é a medição de maiores deformações nos extensômetros S1 e S3 (face lateral) do que nos extensômetros S2 e S4 (face superior), o que não ocorreu nos ensaios com valores menores de β .

Considerando esses pontos relacionados tanto as medições de deslocamento quanto as medições de deformação, além do aspecto visual obtido após a finalização dos ensaios, pode-se concluir que as duas ligações com valores de $\beta = 0,7$ tiveram a ocorrência de uma interação entre os modos de falha na face superior e na face lateral do banzo, diferentemente do que preconiza o Eurocode 3, parte 1-8 [10], e de acordo com o que foi observado por Feng e Young experimentalmente e numericamente [71]. A Figura 57 e a Figura 58 apresentam as configurações deformadas obtidas nos ensaios das ligações tubulares.

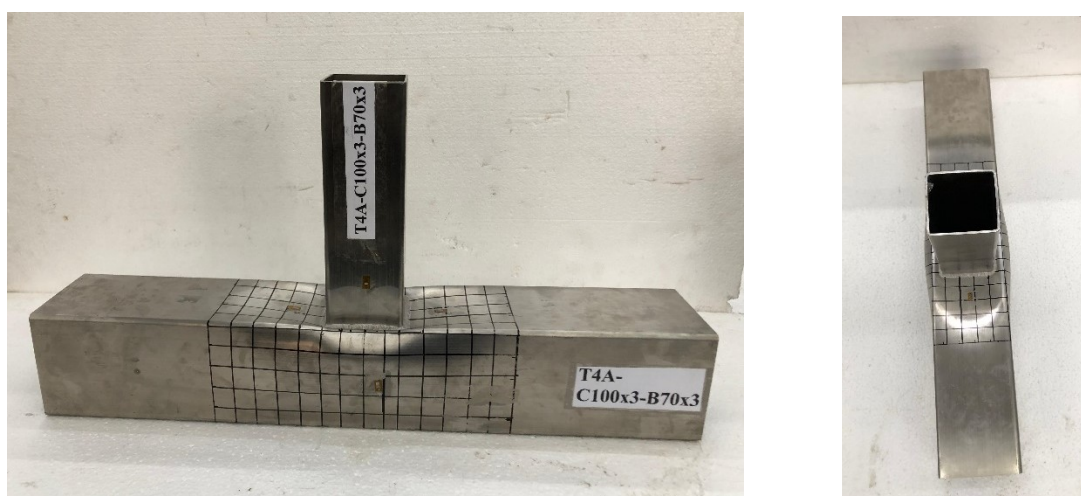


Figura 57 – T4A-C100x3-B70x3 após ensaio

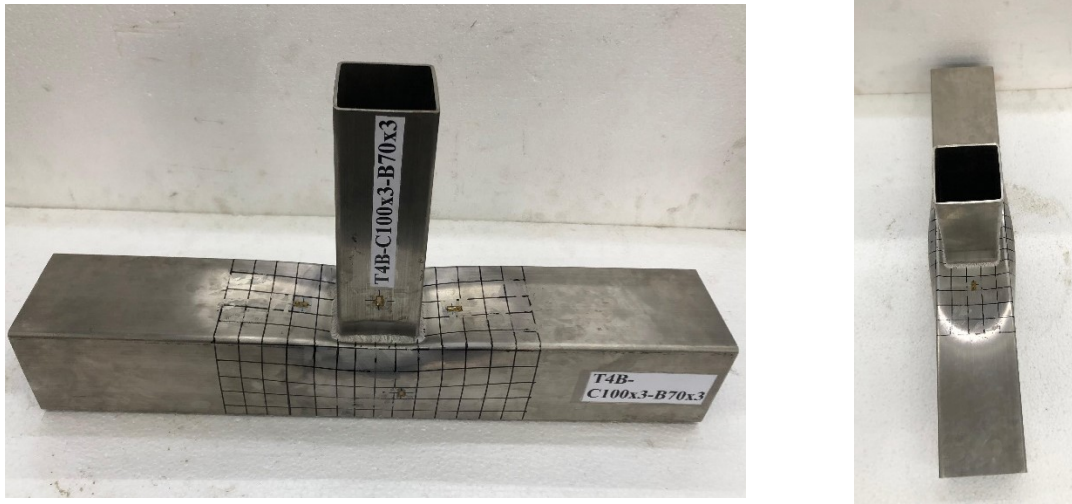


Figura 58 – T4B-C100x3-B70x3 após ensaio

4.6 Ligações com $\beta = 0,75$

As ligações com valores de $\beta = 0,75$ foram nomeadas como T5A-C80x3-B60x3 e T5B-C80x3-B60x3, onde suas dimensões estão apresentadas na Tabela 6. A Figura 59 apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas dos transdutores de deslocamento 1 até 4, e a Figura 60 apresenta as curvas carga-deformação extraídas dos extensômetros fixados nas ligações tubulares.

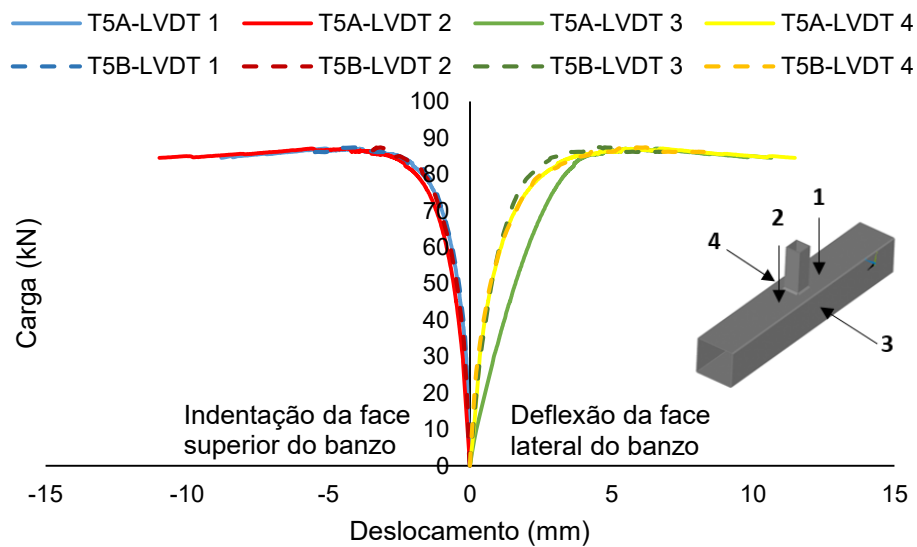


Figura 59 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,75$

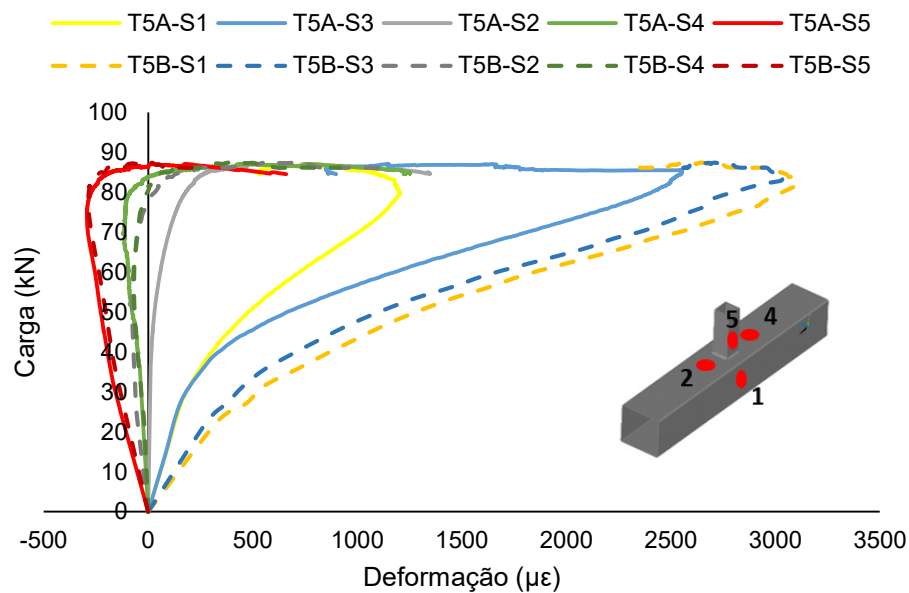


Figura 60 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,75$

Quando se observa a Figura 59, percebe-se novamente uma boa similaridade de resultados entre os dois ensaios, com uma pequena diferença no transdutor de deslocamento 3 que pode ter sido ocasionada por uma pequena excentricidade, o que é demonstrado na diferença de deformações entre S1 e S3 na série A de ensaios, exemplificado na Figura 60. Da mesma maneira que nas ligações com $\beta = 0,7$, observa-se uma aproximação dos valores de deslocamento medidos na face superior e lateral, além de uma perda de rigidez na curva, o que caracteriza o comportamento de interação entre modos. Percebe-se que o formato da curva assemelha-se muito ao preconizado por Zhao e Hancock [32], conforme apresentado na Figura 9.

Analisando a Figura 60, mais uma vez nota-se uma boa similaridade entre os valores de leitura dos extensômetros, com exceção da leitura S1 da série A, conforme já mencionado anteriormente. E novamente, observa-se que as maiores deformações foram atingidas nos extensômetros da parede lateral do banzo, o que não ocorreu em valores menores de β .

Com a afirmação dessas premissas e também pelo aspecto visual após os ensaios, pode-se confirmar que os dois protótipos referentes às ligações com parâmetro $\beta = 0,75$ também tiveram uma interação entre o modo A e o modo B de falha, sendo contrário ao preconizado pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10], e de acordo com o que foi observado por Feng e Young experimentalmente e numericamente [71]. A Figura 61 e a Figura 62 apresentam as deformadas dessas ligações.

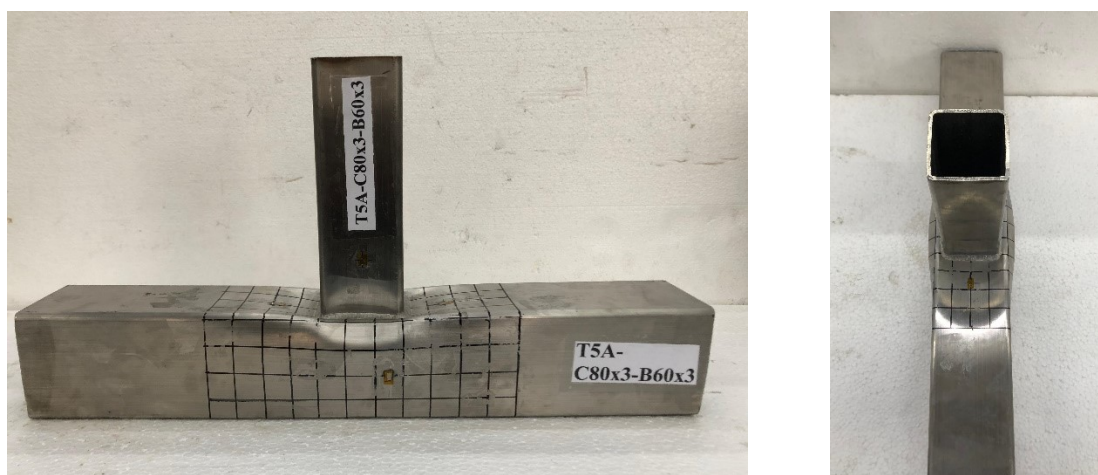


Figura 61 – T5A-C80x3-B60x3 após ensaio

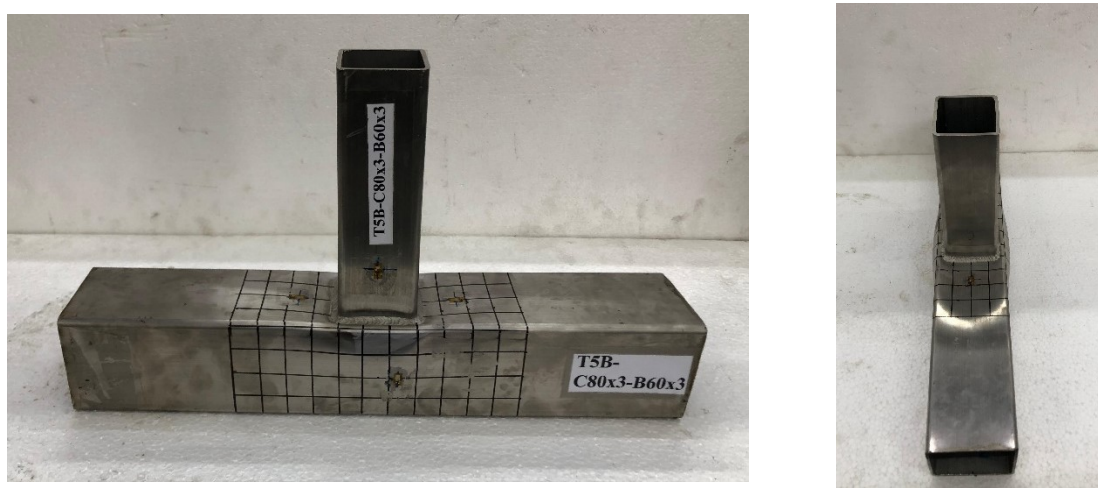


Figura 62 – T5B-C80x3-B60x3 após ensaio

4.7 Ligações com $\beta = 0,8$

Por fim, para as ligações com valores de $\beta = 0,8$, cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 6, observa-se as curvas carga-deslocamento extraídas dos LVDTs e as curvas carga-deformação obtidas dos *strain gauges* posicionados nas ligações tubulares na Figura 63 e na Figura 64, respectivamente.

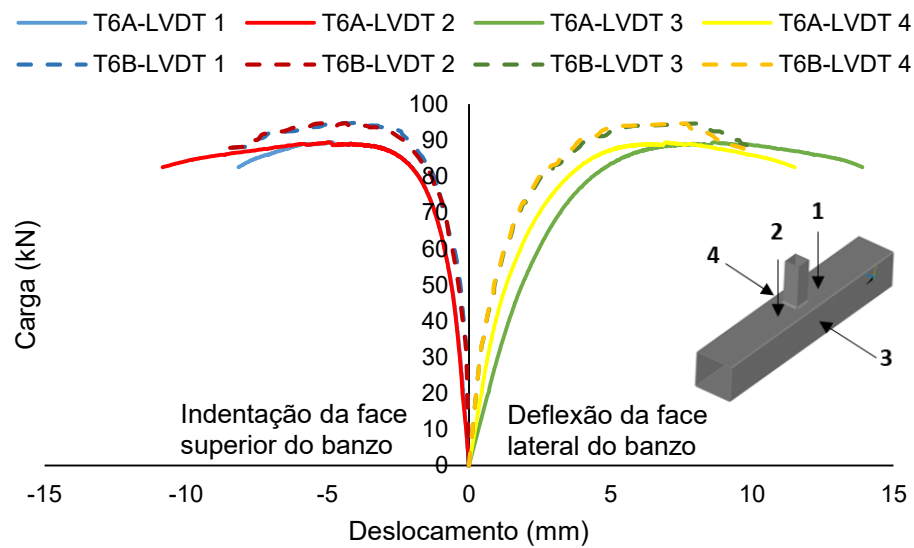


Figura 63 – LVDTs dos ensaios experimentais com $\beta = 0,8$

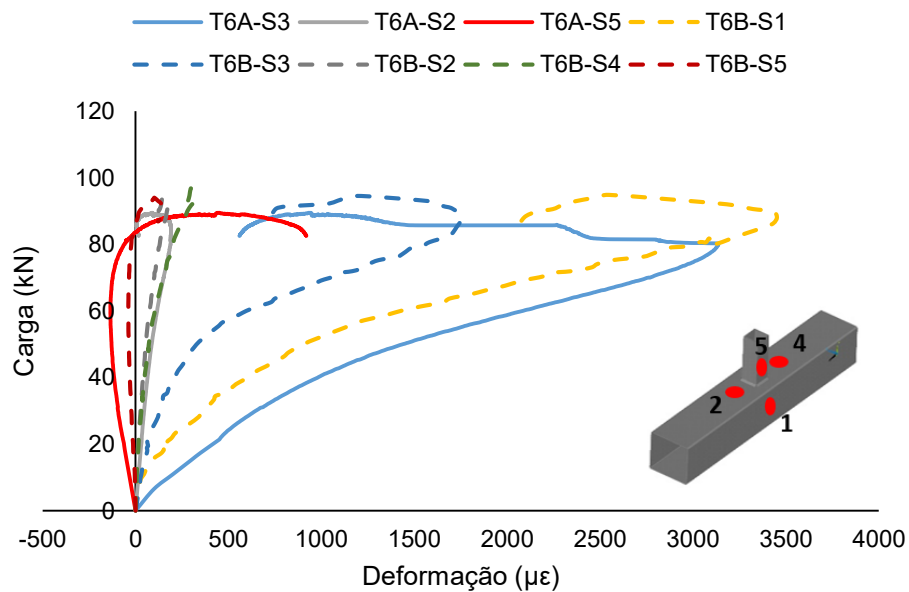


Figura 64 – Deformações dos ensaios com $\beta = 0,8$

Observa-se na Figura 63 que existe uma coerência entre as medições realizadas pelos LVDTs dos mesmos ensaios, indicando precisão nas leituras. Contudo, percebe-se uma diferença em relação as curvas obtidas nos dois ensaios, onde o corpo de prova da série B obteve menores cargas máximas, o que pode ter sido ocasionado por pequenas excentricidades na hora da aplicação da carga, sendo observado diferentes valores de deformação entre os extensômetros do mesmo corpo de prova, além de claras diferenças nas deformações ocorridas no extensômetro

relacionado ao montante e banzo das ligações, conforme apresentado na Figura 64. É importante frisar que as medições referentes a S1 e S4 do protótipo da série A não apresentaram resultados satisfatórios e foram desconsideradas na análise.

Outro ponto de importante destaque refere-se ao formato das curvas carga-deslocamento dos corpos de prova com parâmetro $\beta = 0,8$, apresentadas na Figura 63, em que é possível notar uma carga de pico, diferentemente do que aconteceu nos protótipos com valores menores de β em função do efeito de membrana e do encruamento do material. Nota-se também que os valores de deflexão da face lateral do banzo foram maiores do que os de indentação da face superior do mesmo elemento. Além disso, percebe-se que quanto maior o valor de β , maior a rigidez inicial da curva, conforme já citado por Feng *et al.* [72] em função do aumento da rigidez do montante, que passa a transmitir as cargas cada vez mais para a face lateral do banzo. Juntamente a isso, observa-se na Figura 64 que as maiores deformações ocorreram justamente na face lateral do banzo, sendo mais sobressalentes do que as medições ocorridas na face superior do banzo.

Com todas essas considerações sendo ponderadas, aliadas ao aspecto visual dos corpos de prova após o ensaio, pode-se concluir que o modo de falha preponderante (já que a interação entre modos ainda é presente) observado para as ligações com valores de $\beta = 0,8$ foi a falha na face lateral do banzo, sendo contrário ao Eurocode 3, parte 1-8 [10], e de acordo com o que foi observado por Feng e Young [70] em alguns dos seus corpos de prova com configurações geométricas similares. A Figura 65 e a Figura 66 apresentam as ligações após a realização dos ensaios.



Figura 65 – T6A-C100x3-B80x3 após ensaio



Figura 66 – T6B-C100x3-B80x3 após ensaio

A Figura 67 e a Figura 68 apresentam o conjunto de ligações ensaiadas das séries A e B de ensaios, respectivamente. Percebe-se que com o aumento dos valores de β , ocorre cada vez mais a transferência de aplicação da carga (e consequentemente, as deformações) da face superior para a face lateral do banzo, o que proporciona a combinação entre os modos de falha A e B, até que em um certo ponto, a falha na face lateral passa a ser mais predominante. Isso está apresentado de maneira mais clara na Figura 69.



Figura 67 – Série A de ensaios



Figura 68 – Série B de ensaios

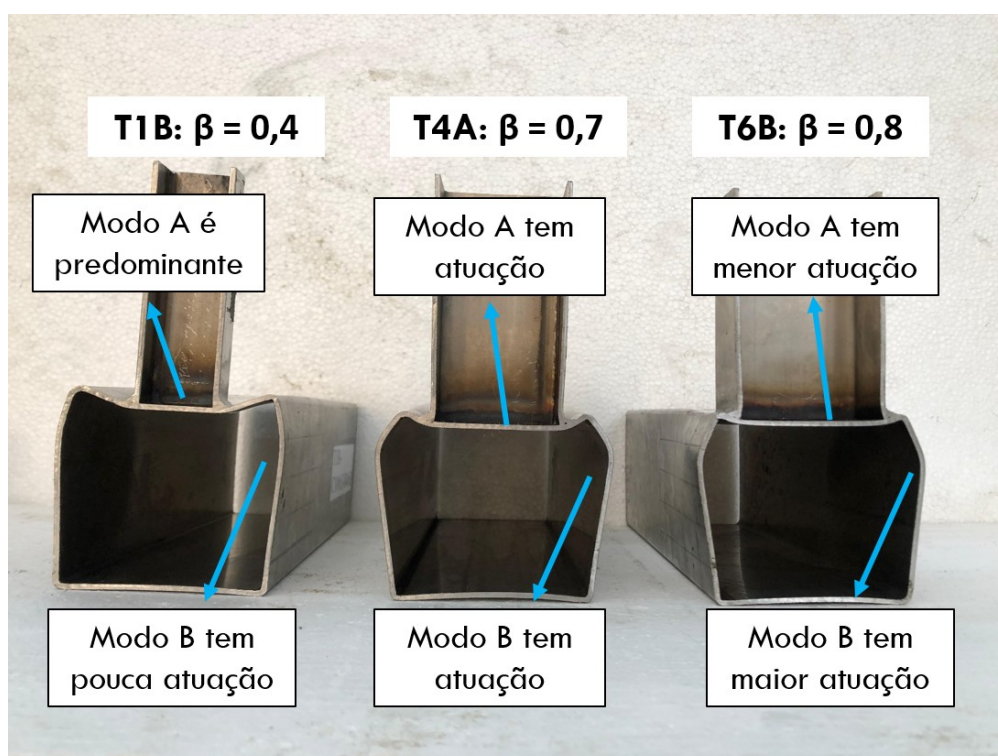


Figura 69 – Comparativo entre modos de falha dos ensaios

4.8 Resistências obtidas e comparação com normas

Para a determinação das resistências das ligações ensaiadas, dois critérios de deformação limite foram adotados, em que o primeiro refere-se as premissas determinadas por Zhao [41] relacionando a razão entre a carga última e carga de serviço, e o segundo tem como base as premissas adotadas atualmente [44], que se baseiam na carga relacionada a deformação de 3% da largura do banzo ou a carga de pico, o que ocorrer primeiro. A Figura 70 apresenta as curvas utilizadas, sendo sempre referentes ao deslocamento na face superior do banzo (LVDT 1 e 2).

Após isso, realizaram-se comparações entre os resultados experimentais e as resistências propostas utilizando tanto a equação referente a falha na face superior do banzo preconizada no Eurocode 3, parte 1-8 [10], conforme apresentado na Equação (4), quanto os fatores de correção propostos por Feng e Young [71], conforme indicado na Equação (15) e na Equação (18), onde a Tabela 7 e a Tabela 8, juntamente com as considerações indicadas entre a Figura 71 e a Figura 74, apresentam os resultados obtidos. Os valores considerados para as propriedades mecânicas das ligações com banzo de dimensões 100x3 mm foram extraídos a partir do ensaio de tração no corpo de prova CP8, enquanto as propriedades para as ligações com banzo 80x3 mm foram obtidas por meio da média dos resultados dos corpos de prova CP1 e CP2, cujos valores estão apresentados na Tabela 5.

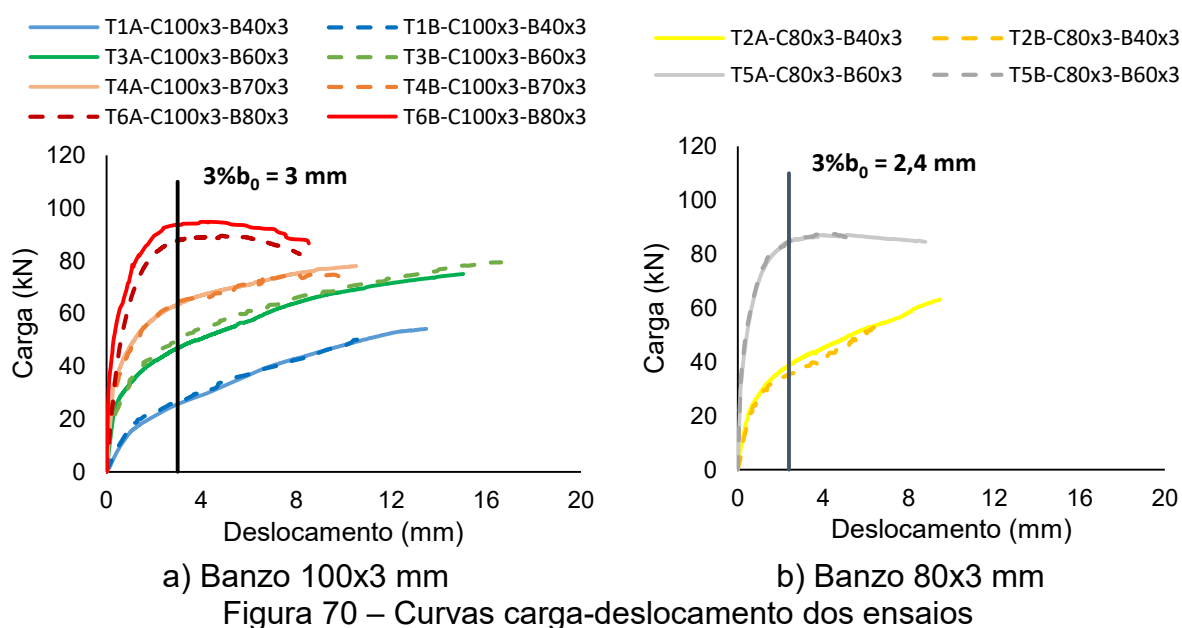


Tabela 7 – Resistências das ligações ensaiadas (em kN)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%b0}$	$N_{3\%b0}$	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao}	NEC3	NFY
T1A-C100x3-B40x3	0,40	36,49	15,09	26,00	1,72	22,64	18,67	13,04
T1B-C100x3-B40x3	0,40	36,28	16,83	26,79	1,59	25,25	18,14	12,71
T2A-C80x3-B40x3	0,50	28,62	25,55	38,71	1,52	38,32	24,11	18,93
T2B-C80x3-B40x3	0,50	28,75	24,00	35,69	1,49	35,69	24,28	19,03
T3A-C100x3-B60x3	0,60	36,13	33,50	46,78	1,40	46,78	26,41	18,55
T3B-C100x3-B60x3	0,60	34,90	34,77	49,98	1,44	49,98	28,73	20,58
T4A-C100x3-B70x3	0,70	36,23	47,56	63,34	1,33	63,34	34,39	41,94
T4B-C100x3-B70x3	0,70	34,63	46,86	64,44	1,38	64,44	36,89	44,79
T5A-C80x3-B60x3	0,75	28,39	65,03	84,68	1,30	84,68	45,02	53,74
T5B-C80x3-B60x3	0,75	29,15	66,27	84,50	1,28	84,50	43,14	51,60
T6A-C100x3-B80x3	0,80	36,29	64,77	87,89	1,36	87,89	47,30	57,69
T6B-C100x3-B80x3	0,80	35,27	73,18	93,60	1,28	93,60	50,08	60,91

Tabela 8 – Comparação entre resistências experimentais e de projeto

Nomenclatura	β	Modo	$N_{3\%b0}/NEC3$	$N_{Zhao}/NEC3$	$N_{3\%b0}/NFY (A)$	$N_{Zhao}/NFY (A)$	$N_{3\%b0}/NFY (A+B)$	$N_{Zhao}/NFY (A+B)$
T1A-C100x3-B40x3	0,40	A	1,39	1,21	1,99	1,74		
T1B-C100x3-B40x3	0,40	A	1,48	1,39	2,11	1,99		
T2A-C80x3-B40x3	0,50	A	1,61	1,59	2,05	2,02		
T2B-C80x3-B40x3	0,50	A	1,47	1,47	1,88	1,88		
T3A-C100x3-B60x3	0,60	A	1,77	1,77	2,52	2,52		
T3B-C100x3-B60x3	0,60	A	1,74	1,74	2,43	2,43		
T4A-C100x3-B70x3	0,70	A+B ^a	1,84	1,84			1,51	1,51
T4B-C100x3-B70x3	0,70	A+B ^a	1,75	1,75			1,44	1,44
T5A-C80x3-B60x3	0,75	A+B	1,88	1,88			1,58	1,58
T5B-C80x3-B60x3	0,75	A+B	1,96	1,96			1,64	1,64
T6A-C100x3-B80x3	0,80	A+B ^b	1,86	1,86			1,52	1,52
T6B-C100x3-B80x3	0,80	A+B ^b	1,87	1,87			1,54	1,54
Média			1,72	1,69	2,16	2,10	1,54	1,54
CoV			0,11	0,14	0,12	0,15	0,04	0,04

A+B^a: Modo A tem maior influênciaA+B^b: Modo B tem maior influência

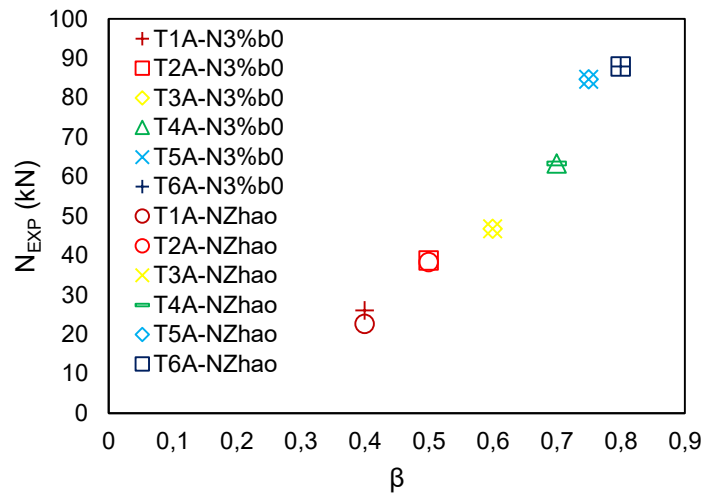


Figura 71 – Resistências da série A de ligações em termos de β

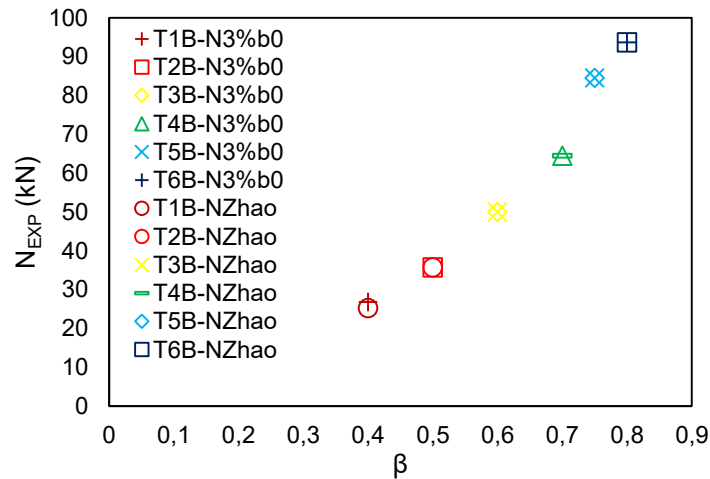


Figura 72 – Resistências da série B de ligações em termos de β

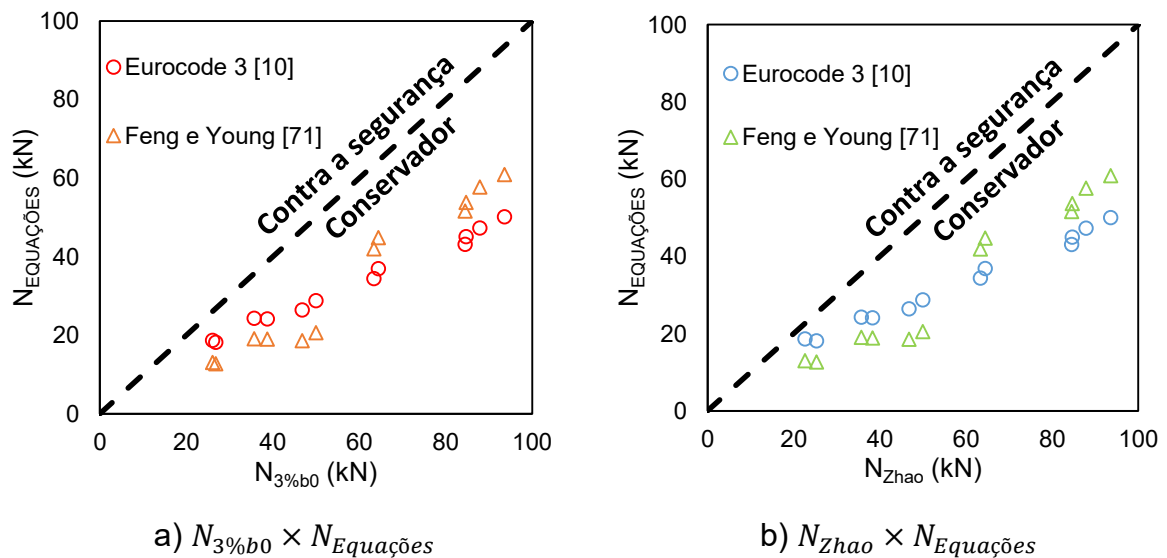


Figura 73 – Resistências experimentais e analíticas

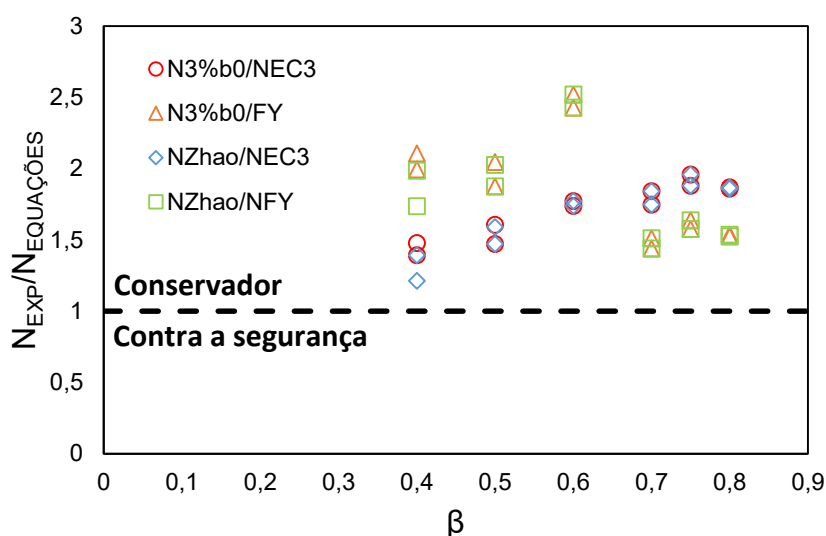


Figura 74 – Razão entre cargas experimentais e numéricas em termos de β

Observando-se inicialmente a Figura 71 e a Figura 72, percebe-se que os maiores valores de resistência obtidos nos ensaios ocorreram nas ligações com o parâmetro $\beta = 0,8$, sendo esse o maior valor das ligações que foram investigadas. A partir disso, pode-se concluir que a resistência está relacionada diretamente ao valor de β , ou seja, quanto maior o valor desse parâmetro, mais resistente a ligação é, sendo essa uma premissa já observada em ligações de aço carbono.

Aliado a isso, analisando os resultados presentes na Figura 73 e na Figura 74, de maneira preliminar, nota-se que a utilização das equações de projeto indicadas pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10], pela NBR 16239 [12], e por Feng e Young [71] geram resultados que estão a favor da segurança de forma demasiada. Isso é causado, para o caso da norma europeia [10] e da norma brasileira [12], por suas formulações serem criadas com base em um material elasto-plástico perfeito, não considerando as propriedades mecânicas específicas do aço inoxidável, enquanto que para o caso da formulação de Feng e Young [71] ocorre pela adoção de um fator redutor de resistência para valores de $\beta \leq 0,7$. Por fim, comparando a utilização do critério de deformação limite proposto por Zhao [41] com o utilizado atualmente [44], percebe-se pequenas diferenças nos resultados de razão entre as cargas experimentais e analíticas para valores pequenos de β , que passam a ser comandados pela carga de serviço, enquanto os demais utilizam a carga última como parâmetro indicador de resistência.

5 MODELOS NUMÉRICOS

5.1 Considerações iniciais

A partir do progresso da tecnologia e avanço na capacidade de processamento de dados em computadores ao longo dos anos, diversos cálculos e análises voltados a engenharia, que anteriormente só poderiam ser feitos de maneira manual, passaram a ser realizados de maneira automatizada, o que acelerou o desenvolvimento de projetos e pesquisas, principalmente no ramo estrutural, possibilitando avaliar de maneira ágil, as formulações prescritas em normas, indicando possíveis alterações.

O presente capítulo descreve a modelagem numérica realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* ANSYS V.16.2 [83] com o auxílio da linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Os resultados experimentais apresentados no capítulo seis foram utilizados como base para a calibração do modelo desenvolvido e, conseqüentemente, de seus resultados. Os principais pontos abordados são: tipo de elemento e análise não linear utilizada; tamanho de malha; condições de contorno e carregamento; propriedades dos materiais dos perfis e da solda; calibração e comparativo entre as curvas carga-deslocamento obtidas numericamente e experimentalmente.

5.2 Malha de elementos finitos e análise não linear utilizada

Para o modelo implementado na análise numérica, optou-se por utilizar o elemento finito sólido SOLID185, que tem como principal característica, a presença de oito nós com três graus de liberdade por nó (translações nas direções x, y e z), além da consideração de integração reduzida [83].

Entre algumas outras particularidades proporcionadas por esse tipo de elemento, pode-se citar a consideração de plasticidade, hiperelasticidade, enrijecimento em função do estado de tensões, além da consideração de grandes deformações [83], que é uma característica marcante em aços inoxidáveis. A opção

de geometria do elemento SOLID185 adotada em grande parte do modelo foi a prismática, em função de sua melhor indicação para esse tipo de estrutura, o que garantiu uma maior convergência entre nós. Existem diversos trabalhos que optam por utilizar elementos tetraédricos na região da solda por ser um ponto de geometria complexa, contudo, realizou-se um estudo e se observou uma diferença mínima de resultados, além de um progresso bem mais contínuo do *software* quando se adotou a geometria prismática na região, também não havendo diferenciação do comportamento da estrutura. A Figura 75 apresenta a geometria desse elemento.

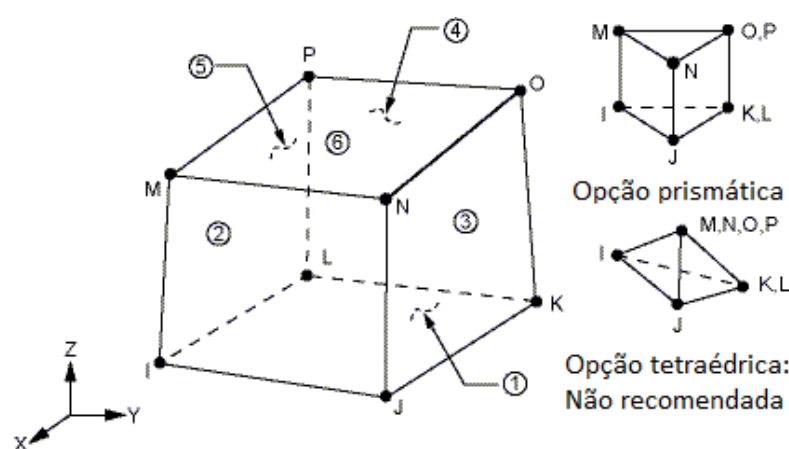


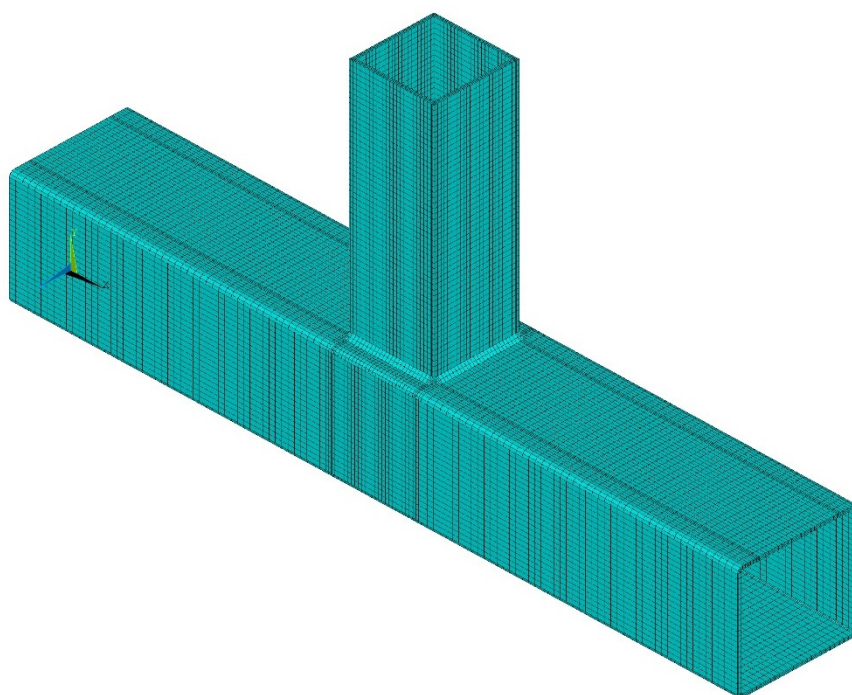
Figura 75 – Geometrias do elemento SOLID185 (adaptado) [83]

Durante a criação do modelo, optou-se por refinar a malha em regiões que o modo de falha da ligação pudesse ser mais atuante, ou seja, as regiões de face superior e lateral do banzo tiveram maior número de elementos. Aliado a isso, e utilizando como referência diversos trabalhos na área, dividiu-se a espessura da parede do banzo e do montante das ligações em três elementos. As larguras de banzos e montantes foram divididas em 24 elementos, enquanto suas alturas foram divididas em 23 elementos. A Figura 76 apresenta todos esses detalhes citados.

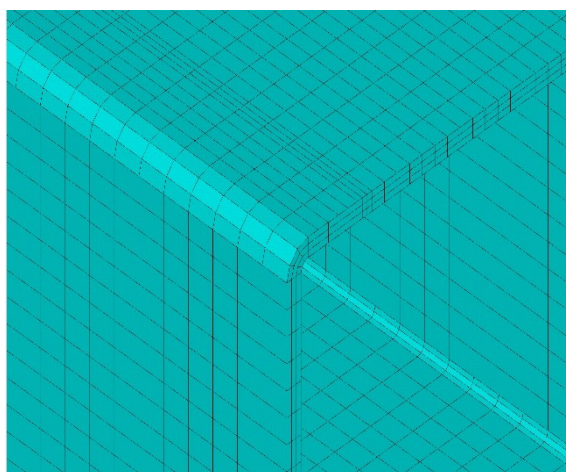
Em todas as análises numéricas desenvolvidas, percebe-se uma relação não linear entre esforços aplicados e deslocamentos, o que indica a possibilidade de se aplicar uma estratégia iterativa para a convergência. Adotou-se o método de Newton-Rapshon no *software* ANSYS [83] como meio de resolução, sendo este um dos mais utilizados em programas que utilizam o MEF, obtendo assim, as soluções de sistemas de equações não lineares a partir da aplicação de critérios de convergência.

O método de Newton-Rapshon é baseado na criação de incrementos de cargas (*substeps*) a partir de uma carga total a ser aplicada, onde cada vez que a estrutura

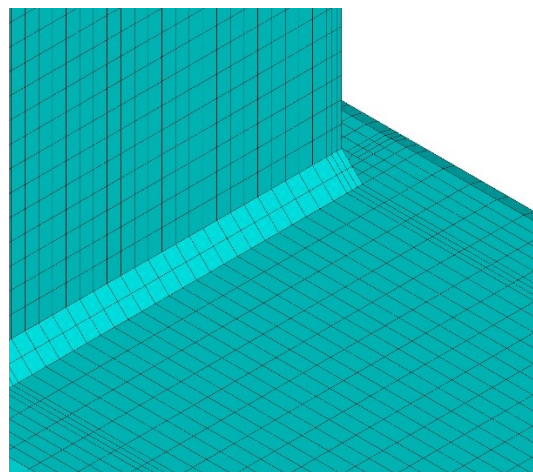
atinge o equilíbrio, um novo incremento é adicionado, ou seja, um novo passo de carga (*step*) é aplicado a estrutura. A ação de iteração é levada adiante até que se atinja o critério de convergência adotado pelo usuário. É importante frisar que grande parte dos trabalhos da área não aplicam a carga por meio de incrementos de maneira direta, mas sim utilizam-se do artifício de se incrementar deslocamentos, uma vez que o controle de carga possui restrições para se traçar o caminho de equilíbrio após a tangente alcançar valores nulos, além da possibilidade de instabilidade *Snap-Through* [25], problemas esses que o controle de deslocamento contorna de maneira eficaz.



a) Malha utilizada



b) Detalhe da malha na espessura



c) Detalhe da malha na solda

Figura 76 – Malha utilizada nos modelos e seus detalhes

A não linearidade geométrica foi adotada no modelo, utilizando-se a formulação de Lagrange Atualizado, que considera a possibilidade de grandes deformações de maneira a permitir a redistribuição da carga aplicada na ligação após o início do escoamento. Isso é traduzido com a atualização da matriz de rigidez da estrutura após cada incremento no valor de carga aplicada na forma de deslocamentos prescritos [3], ou seja, a estrutura inicia indeformada, e após o primeiro incremento de carga, a configuração da estrutura é modificada para a condição deformada gerada por esse acréscimo (em função da atualização da matriz de rigidez), e assim sucessivamente, até o critério de convergência ser alcançado.

Destaca-se que tanto imperfeições iniciais quanto tensões residuais não foram fatores considerados nos modelos, pois segundo Segura *et al.* [84] e Lesani *et al.* [85], ambos têm efeitos que podem ser desconsiderados em análises para verificação de resistência de ligações tubulares. Os modelos desenvolvidos para as análises possuíam, em média, aproximadamente, 61000 nós e 45650 elementos, e seu tempo de processamento variava entre 25 e 35 minutos, gerando arquivos de resultados com tamanhos médios de 32,5 GB.

5.3 Modelagem do material e não linearidade física

Conforme já dito, o aço inoxidável apresenta uma curva tensão-deformação que é não linear em quase toda sua composição, sendo esse um ponto importante para ser considerado nas análises numéricas que utilizam esse material para indicar o real comportamento da estrutura.

Dito isso, a não linearidade física do material dos banzos e montantes foi considerada usando o modelo multilinear isotrópico (MISO) presente na biblioteca do ANSYS [83], em que pares de valores para tensões e deformações extraídos da curva do material do corpo de prova CP8 apresentados na Figura 32 foram considerados, uma vez que essa amostra representa uma curva intermediária entre todas que foram ensaiadas. Os valores adotados para as propriedades mecânicas, conforme apresentado na Tabela 5, foram: módulo de elasticidade ($E = 203 \text{ GPa}$), tensão em 0,2% de deformação ($\sigma_{0,2\%} = 366,42 \text{ MPa}$, sendo admitida como tensão de escoamento), tensão última ($f_u = 800 \text{ MPa}$) e Coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). É

importante salientar que diversos trabalhos utilizam a curva tensão-deformação verdadeira em vez da curva tensão-deformação de engenharia nas análises, contudo, após um estudo com o foco na calibração dos resultados experimentais e numéricos, observou-se valores praticamente iguais de resistência usando ambas as curvas, e aliado a isso, para o trecho da curva carga-deslocamento com maiores deformações das ligações, observou-se que a relação entre refinamento da malha, tempo de processamento e calibração dos resultados utilizando a curva de engenharia apresentou-se mais adequada, sendo esse panorama decisivo para a escolha dessa curva nos modelos. A Figura 77 apresenta a curva tensão-deformação utilizada.

A modelagem da solda é um caso particular quando se refere ao tipo de material utilizado. Tendo como referência as especificações da AWS A5.4/A5.4M [86] e de Feng e Young [70], adotou-se as propriedades do eletrodo E308L-17 nos modelos analisados, sendo similar ao que foi utilizado como metal de adição nos corpos de prova ensaiados. Definiu-se um modelo bilinear isotrópico (BISO) presente na biblioteca do ANSYS [83] para esse elemento da ligação, utilizando como valores para as propriedades mecânicas: módulo de elasticidade (E) igual 210 GPa, tensão de escoamento (f_y) igual a 440 MPa e tensão última (f_u) igual a 570 MPa. O valor de espessura de perna da solda foi correspondente a $1,35t_0$, sendo t_0 o valor de espessura da parede do banzo, utilizando-se de um valor médio relacionando as espessuras de perna de solda (a_x) e as espessuras do banzo usadas nos ensaios experimentais, que estão apresentadas na Tabela 6.

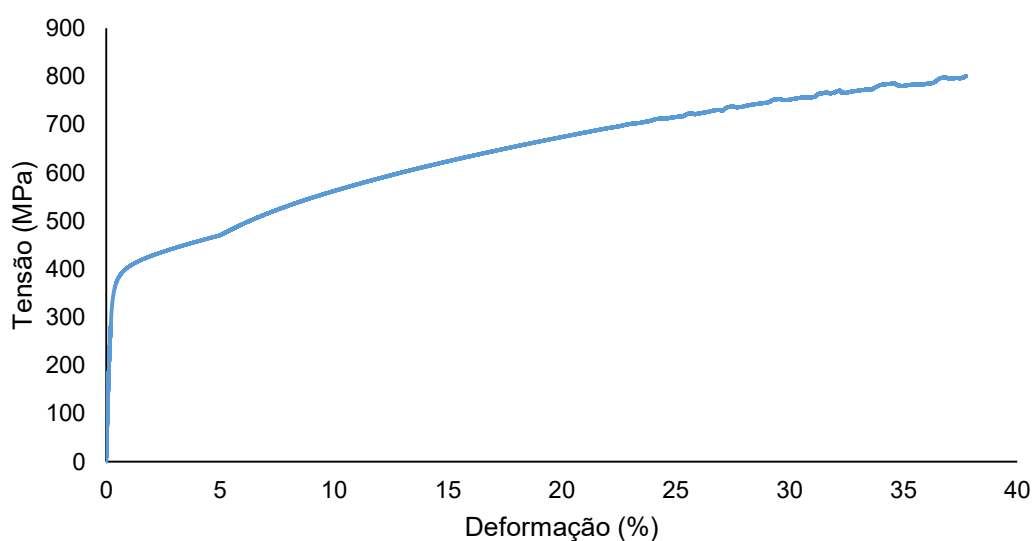


Figura 77 – Curva tensão-deformação utilizada nos modelos

5.4 Condições de contorno e de carregamento

Com o intuito de reproduzir a carga aplicada e o tipo de apoio adotado nas ligações tubulares ensaiadas, utilizou-se nos modelos numéricos desenvolvidos, condições de contorno semelhantes, garantindo assim que o comportamento da estrutura ocorresse de maneira coerente com a etapa experimental.

Primeiramente, criou-se um elemento de massa unitário no topo do montante (em seu centroide), conectando-o a todos os nós adjacentes ao local e restringindo deslocamentos apenas em x e z, uma vez que o deslocamento a ser aplicado na direção y é o que representaria a carga de compressão da prensa hidráulica do ensaio. Com essa configuração, evitou-se o surgimento de excentricidades que gerariam esforços adicionais na ligação.

Em relação aos apoios, como os banzos das ligações estavam totalmente apoiados na etapa experimental, criou-se nos modelos numéricos, um outro elemento de massa unitário, agora no centro da face interior do banzo, conectando-o aos nós das duas linhas longitudinais (AB e CD) das extremidades do banzo e restringindo os deslocamentos nas direções x, y e z (em função do grampo fixador). A Figura 78 apresenta as condições de contorno utilizadas nos modelos numéricos.

É importante salientar que, conforme já citado, as medidas do banzo e montante obedeceram ao que foi utilizado experimentalmente ($L_0 = 6b_0$ e $L_1 = 3b_0$), ou seja, as indicações de Feng *et al.* [72]. O contato entre os elementos da ligação foi considerado com base na coincidência dos nós [9].

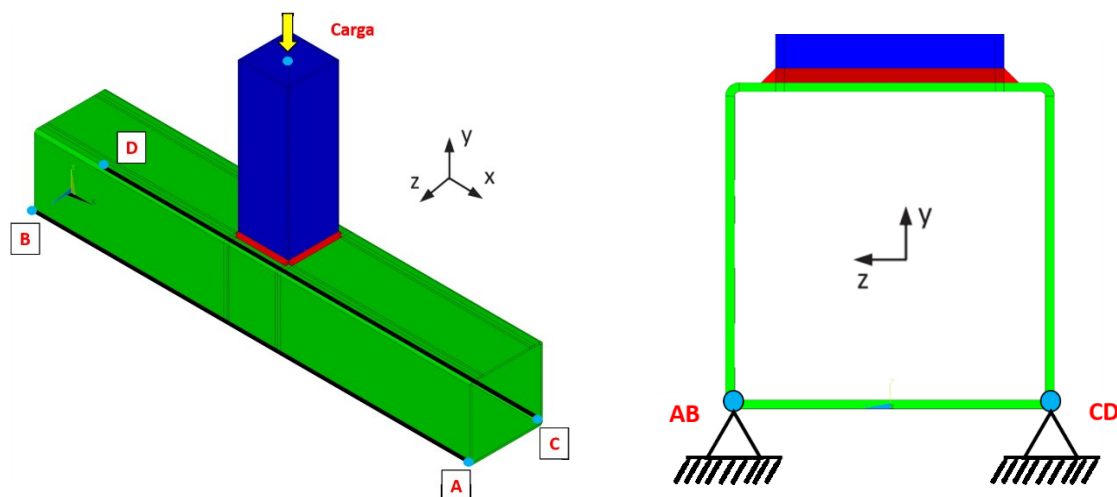


Figura 78 – Condições de contorno utilizadas nos modelos

5.5 Validação do modelo numérico

Conforme já dito, é necessário que o comportamento que ocorre nos modelos numéricos seja semelhante e gere resultados próximos ao que são observados nos ensaios experimentais. A partir disso, adotou-se duas formas de validação das análises desenvolvidas numericamente, para que se comprovasse sua eficácia.

Primeiramente, realizou-se um estudo de sensibilidade de malha, onde se buscou encontrar as divisões de elementos mais otimizadas, ou seja, que convergissem para valores próximos de resistência da ligação, o que geraria como consequência, um refinamento adequado, que não comprometeria a análise com gastos computacionais excessivos. A partir desse ponto, conforme já citado, observou-se que três divisões ao longo da espessura das paredes dos elementos, além de 24 elementos dividindo as larguras de banzos e montantes, juntamente com suas alturas divididas em 23 elementos, indicaram resultados adequados.

A segunda etapa é relacionada a calibração em função dos resultados experimentais obtidos após os ensaios realizados no LEC. O foco dessa fase de validação foi obter a convergência entre as curvas carga-deslocamento extraídas numericamente e experimentalmente, além de se verificar a ocorrência do mesmo modo de falha e deformadas nos corpos de prova para ambas as análises. Após diversos testes realizados, conseguiu-se obter um modelo que fornecia respostas adequadas, garantindo assim, a convergência requerida, cuja validação por meio da comparação de curvas está apresentada entre a Figura 79 e a Figura 84. Algumas comparações entre as deformadas experimentais e numéricas estão exemplificadas entre a Figura 85 e a Figura 87. Destaca-se que, apesar de terem dimensões semelhantes, cada par de configuração geométrica foi calibrado com base nos dois modelos experimentais, uma vez que se observou diferenças nas medições entre os protótipos ensaiados em variáveis que tem grande influência na resistência da ligação, como a espessura do banzo e a espessura da perna de solda, por exemplo.

Pode-se observar que grandes partes dos trechos das curvas sobrepõem-se, indicando que os resultados numéricos e experimentais convergiram de maneira adequada, excetuando-se a ligação T6A-C100x3-B80x3, uma vez que conforme já dito, possíveis excentricidades ocorreram nos ensaios, o que levou a uma diminuição de sua carga resistente, tanto que o outro ensaio com a mesma configuração

geométrica (T6B-C100x3-B80) teve uma boa convergência com o modelo numérico. Conforme já citado anteriormente, um dos critérios de deformação limite adotados na análise é o usado atualmente [44], sendo ele utilizado no comparativo das resistências numéricas e experimentais, como mais uma fonte de confirmação da calibração dos modelos. A Tabela 9 apresenta esses resultados, em que se nota uma convergência satisfatória no que se refere a capacidade resistente dos modelos em questão, quando comparados aos corpos de prova ensaiados.

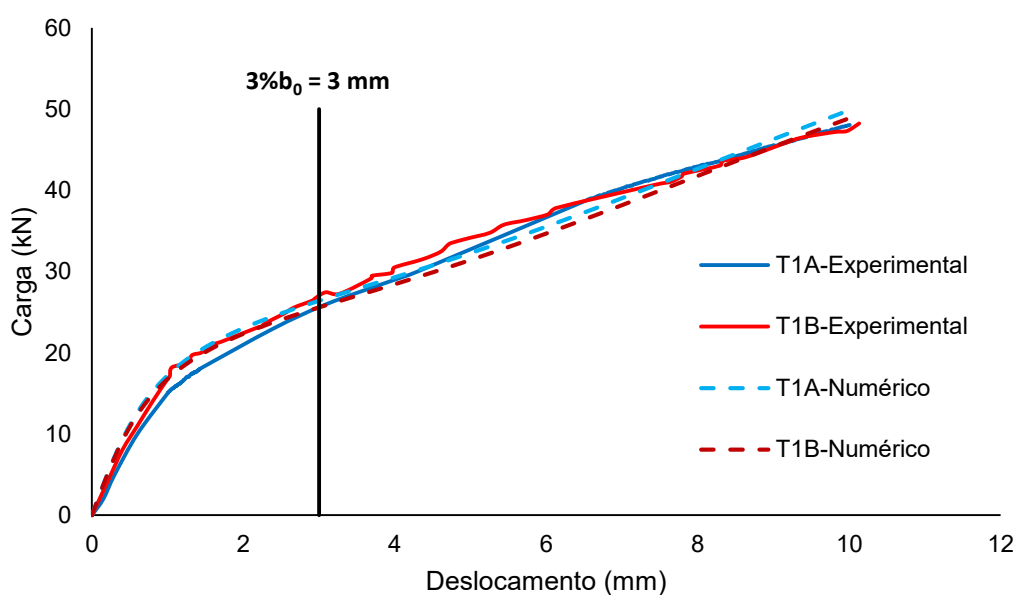


Figura 79 – Calibração para os ensaios T1-C100x3-B40x3

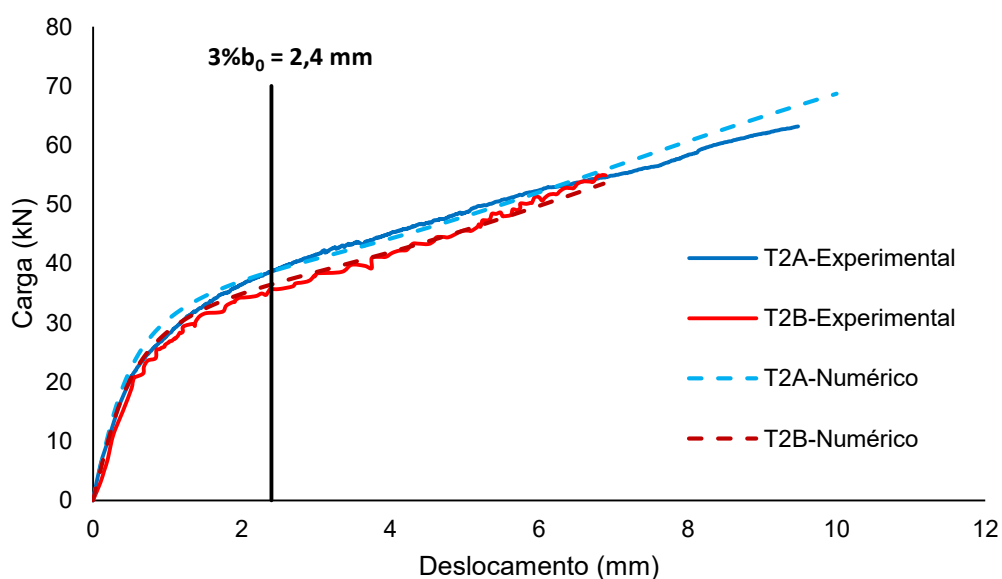


Figura 80 – Calibração para os ensaios T2-C80x3-B40x3

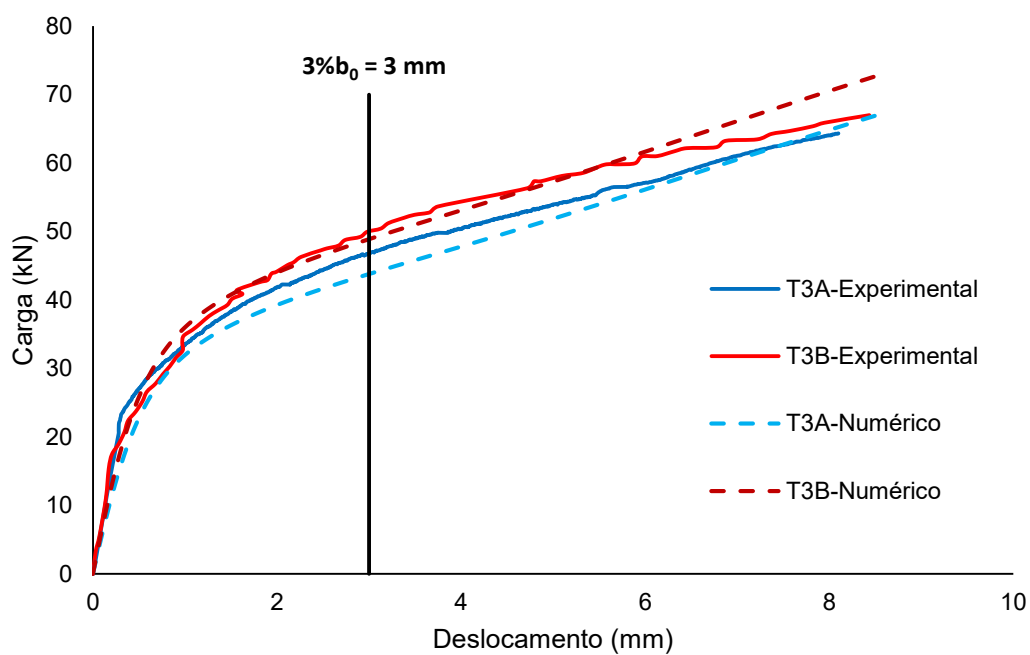


Figura 81 – Calibração para os ensaios T3-C100x3-B60x3

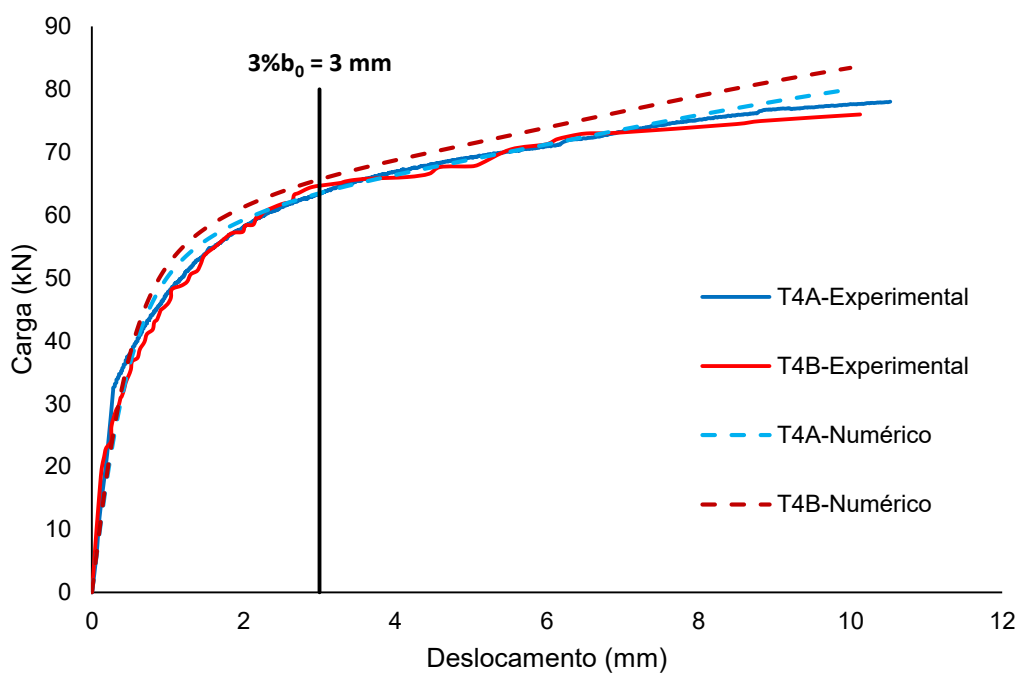


Figura 82 – Calibração para os ensaios T4-C100x3-B70x3

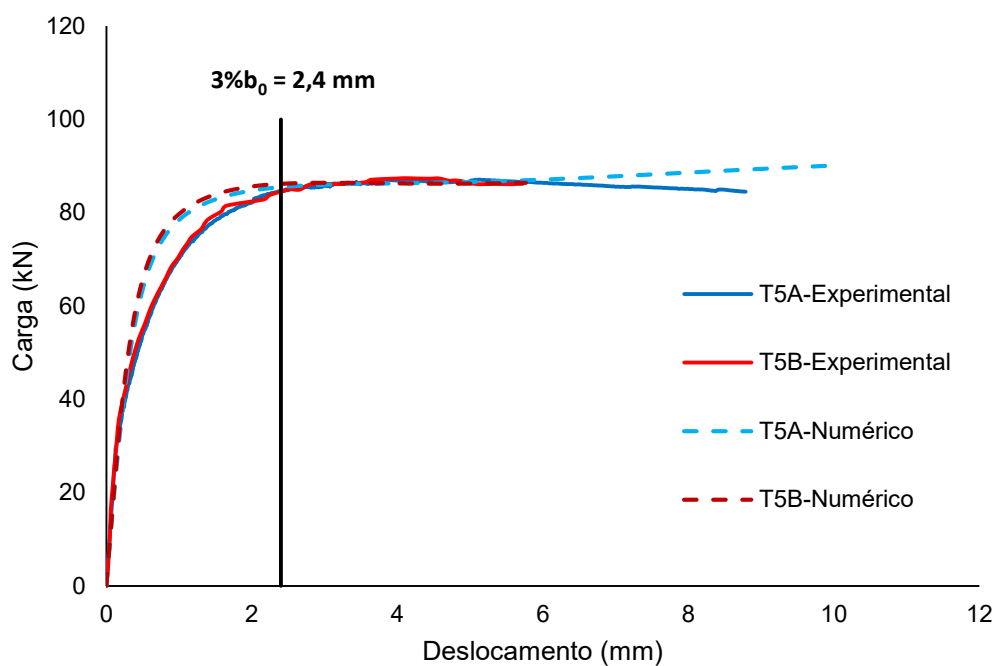


Figura 83 – Calibração para os ensaios T5-C80x3-B60x3

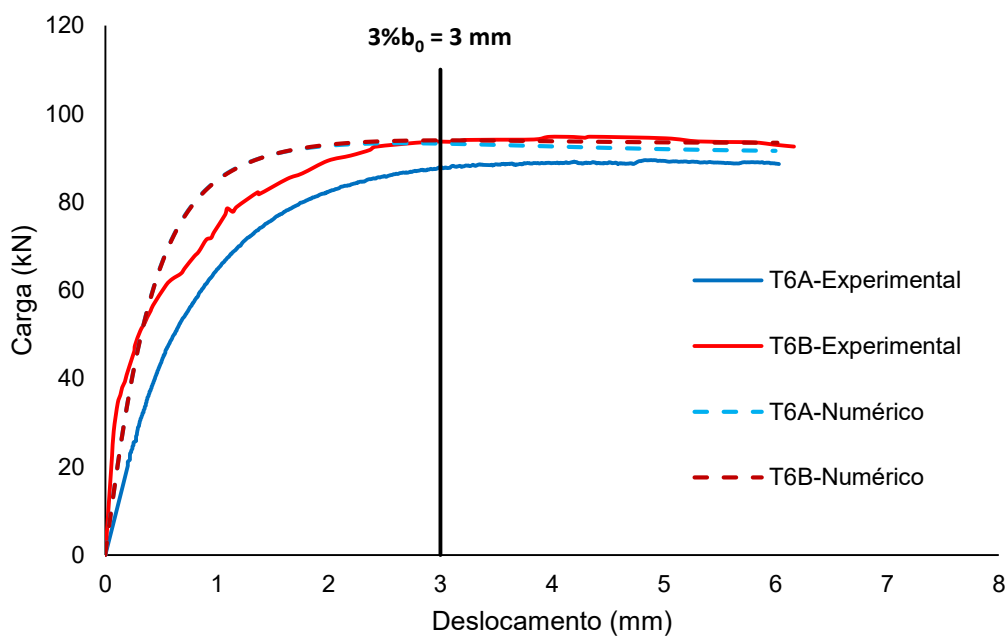
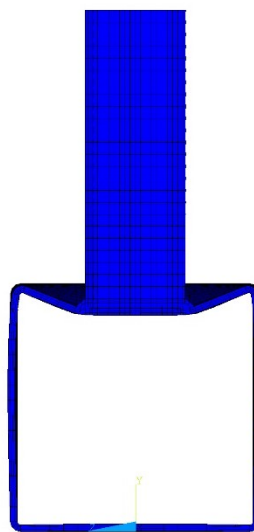


Figura 84 – Calibração para os ensaios T6-C100x3-B80x3



a) T1B-Experimental

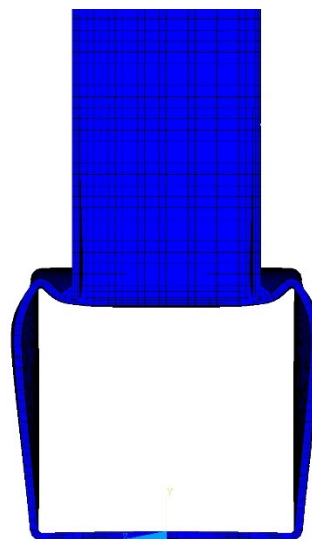


b) T1B-Numérico

Figura 85 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T1B



a) T4A-Experimental

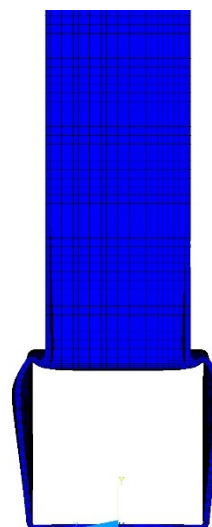


b) T4A-Numérico

Figura 86 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T4A



a) T6B-Experimental



b) T6B-Numérico

Figura 87 – Deformadas experimentais e numéricas para ligação T6B

Tabela 9 – Comparativo entre resistências numéricas e experimentais

Nomenclatura	β	N _{NUM} (kN)	N _{EXP} (kN)	N _{EXP} /N _{NUM}
T1A-C100x3-B40x3	0,40	26,46	26,00	1,02
T1B-C100x3-B40x3	0,40	25,66	26,79	0,96
T2A-C80x3-B40x3	0,50	38,93	38,71	1,01
T2B-C80x3-B40x3	0,50	36,72	35,69	1,03
T3A-C100x3-B60x3	0,60	43,89	46,78	0,94
T3B-C100x3-B60x3	0,60	48,96	49,98	0,98
T4A-C100x3-B70x3	0,70	63,55	63,34	1,00
T4B-C100x3-B70x3	0,70	65,70	64,44	1,02
T5A-C80x3-B60x3	0,75	85,50	84,68	1,01
T5B-C80x3-B60x3	0,75	86,25	84,50	1,02
T6A-C100x3-B80x3	0,80	93,18	87,89	1,06
T6B-C100x3-B80x3	0,80	93,94	93,60	1,00
Média				1,00
CoV				0,03

6 ANÁLISE PARAMÉTRICA

6.1 Considerações iniciais

A etapa de análise paramétrica consistiu em avaliar os resultados obtidos em 348 modelos numéricos, que foram calibrados em função dos ensaios experimentais, observando diversos fatores que influenciam na capacidade resistente de ligações tipo T em aço inoxidável com valores de $\beta \leq 0,85$, para que dessa maneira se pudesse propor hipóteses acerca do tema.

Dito isso, o estudo paramétrico do presente trabalho foi dividido em algumas etapas. Primeiramente, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros geométricos críticos β e 2γ na resistência das ligações. Aliado a isso, comparou-se os valores de resistência obtidos com as formulações presentes nas normas vigentes da área, como por exemplo, o Eurocode 3, parte 1-8 [10] e a NBR 16239 [12], além de equações propostas em pesquisas realizadas, tais como a de Feng e Young [71], juntamente com o comparativo entre modos de falha observados nos modelos com os previstos pelas instruções normativas atuais para diferentes critérios de deformação limite. Como consequência dos resultados observados, um fator de correção novo foi proposto para que se consiga dimensionar ligações tubulares tipo T entre perfis de aço inoxidável de maneira mais adequada, considerando as diversas vantagens que esse material proporciona. Por fim, todas essas comparações foram validadas por meio de uma análise de confiabilidade.

6.2 Nomenclatura dos modelos

Conforme já citado, 348 modelos foram desenvolvidos, que tinham como premissa básica, apresentar valores de parâmetro $\beta \leq 0,8$, com o intuito de se analisar o modo de falha da face conectada do banzo na ligação, aliado a influência dos parâmetros β e 2γ na resistência da ligação segundo o critério de deformação limite utilizado atualmente [44], além do critério proposto por Zhao [41].

A nomenclatura dos modelos foi proposta da seguinte maneira, por exemplo, para o modelo TN-C100x3-B50x3: as letras TN indicam que a classificação de configuração geométrica da ligação é o tipo T, e que o aço adotado é o austenítico grau 304 (não é de alta resistência); a letra C e os valores subsequentes representam a largura e a espessura do banzo, que para o caso explicitado, tem-se o valor de $b_0 = h_0 = 100$ mm, enquanto $t_0 = 3$ mm; a letra B e os valores seguintes representam a largura e a espessura do montante, que para o exemplo, tem-se o valor de $b_1 = h_1 = 50$ mm, enquanto $t_1 = 3$ mm. É importante frisar que as dimensões de seção transversal dos banzos considerados nas análises foram adotadas seguindo os padrões comerciais disponíveis no mercado [87], enquanto as dimensões dos montantes foram extrapoladas, para que se pudesse realizar as análises pretendidas. Os comprimentos do banzo (L_0) e do montante (L_1) seguiram as indicações de Feng *et al.* [72], ou seja, $6h_0$ para o banzo e $3h_1$ para o montante. Optou-se por extrapolar o limite preconizado pela ISO 14346 [11] para os valores de 2γ , que variaram entre 10 e 50 (seu limite máximo é 40), para que se pudesse ter uma maior gama de resultados, com um total de 26 diferentes valores de 2γ . Da mesma maneira, alguns perfis utilizados no banzo e no montante não se enquadraram na classe 1 ou classe 2 requerida pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10], mesmo utilizando as premissas especificadas pela norma de aço inoxidável atual [20] ou as instruções de sua proposta de revisão [88]. Enquanto isso, os valores de β foram os mesmos utilizados nos ensaios, ou seja, variaram entre 0,4 e 0,8 (totalizando 6 diferentes valores), dentro dos limites das normas. O Apêndice A apresenta a nomenclatura e dimensões de todos os modelos utilizados na análise. Entre a Figura 88 e a Figura 90 estão apresentadas algumas sínteses dos limites e dimensões adotados nos modelos.

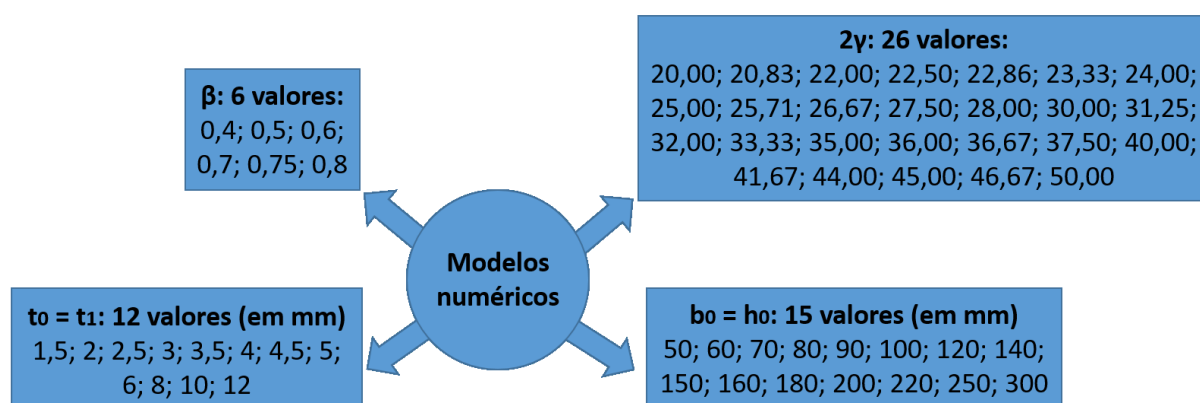


Figura 88 – Resumo de parâmetros e dimensões dos modelos

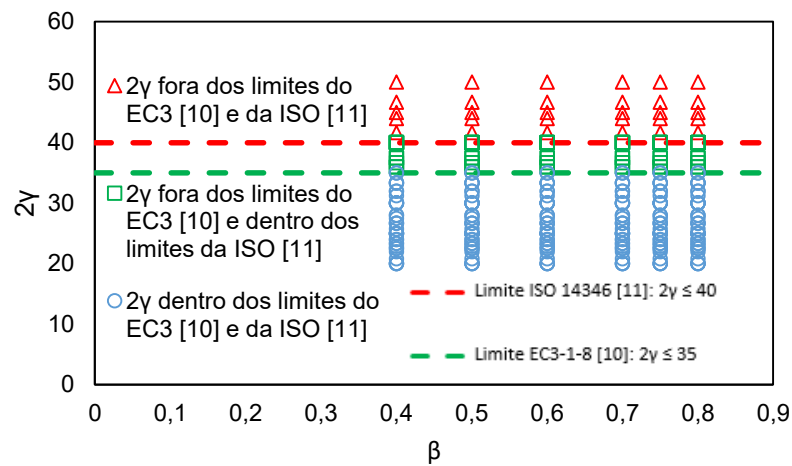
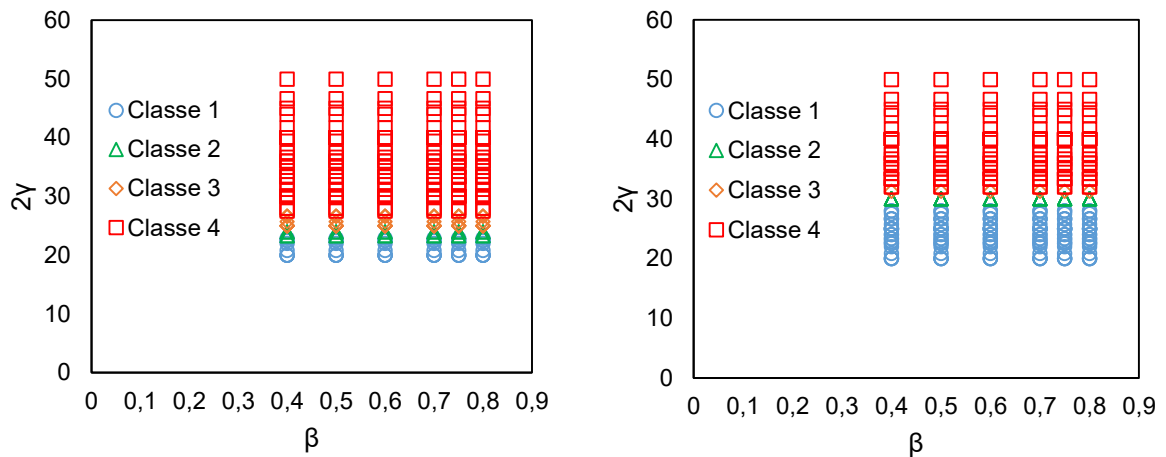


Figura 89 – Relação entre modelos analisados e limites para 2γ das normas



a) Eurocode 3, parte 1-4 [20]

b) Proposta de revisão do EC3-1-4 [88]

Figura 90 – Relação entre modelos analisados e classes dos banzos

6.3 Influência dos parâmetros β e 2γ

Conforme já citado, diversos estudos na área de ligações tubulares abordam os parâmetros β e 2γ como vitais no que se refere a resistência das mesmas. A partir dessa premissa, realizou-se uma série de análises, que tinham como objetivo avaliar e quantificar de maneira precisa essa influência para o caso de ligações tubulares tipo T com seções SHS constituídas de aço inoxidável austenítico.

Para determinar a resistência das ligações desenvolvidas numericamente, adotou-se tanto o critério de deformação limite atual [44] ($N_{3\%b0}$) quanto o critério proposto por Zhao [41] para perfis formados a frio (N_{Zhao}). O Apêndice B apresenta todas as curvas carga-deslocamento extraídas das análises numéricas, enquanto o Apêndice C indica os valores resistentes encontrados.

Nota-se que algumas curvas apresentadas no Apêndice B, mais especificamente curvas com diferentes valores de β e que, caso fossem colocadas em um mesmo gráfico, estariam próximas umas das outras em seu início (rigidez inicial similar), iriam se cruzar em níveis maiores de deslocamento aplicado, e por fim, uma delas atingiria maiores cargas. Essa mudança de comportamento ocorre, conforme observado por Kato e Nishiyama [26] e Zhao [42], em função da maior atuação do efeito de membrana em ligações tubulares entre perfis conformados a frio que possuem menores valores de β e maiores valores de 2γ , ocasionando essa acréscimo de rigidez que leva ao cruzamento de curvas em que, a princípio, existia uma tendência de seguirem caminhos similares.

A partir dos resultados obtidos, buscou-se propor inicialmente uma relação entre a carga resistente obtida nos modelos e o parâmetro β , considerando grupos com o mesmo valor de 2γ , conforme apresentado na Figura 91, utilizando primeiramente, apenas o critério de deformação limite atual [44] na análise.

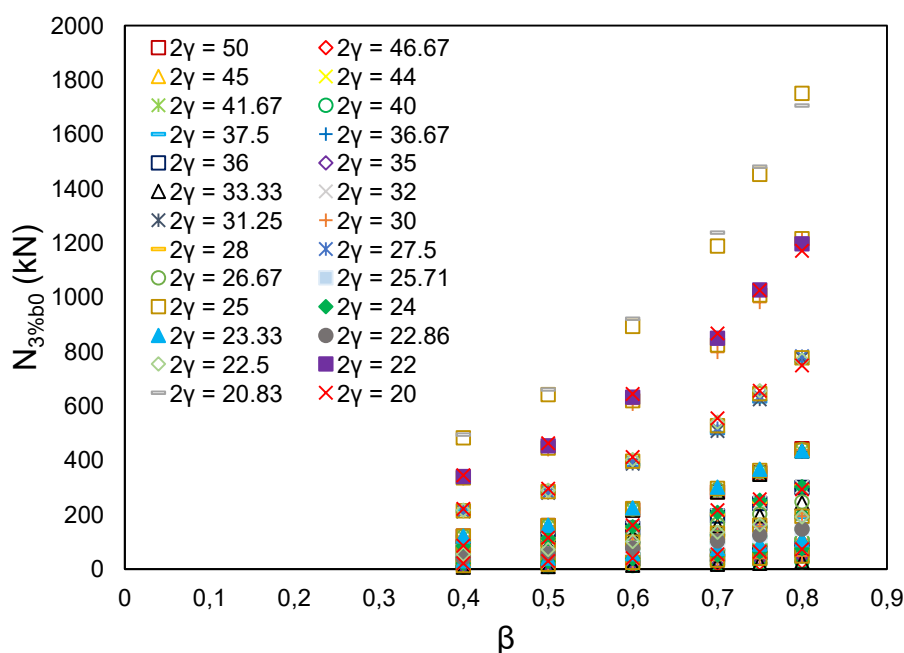


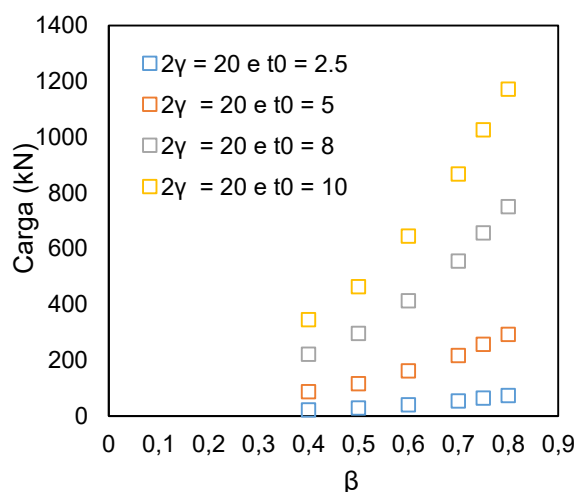
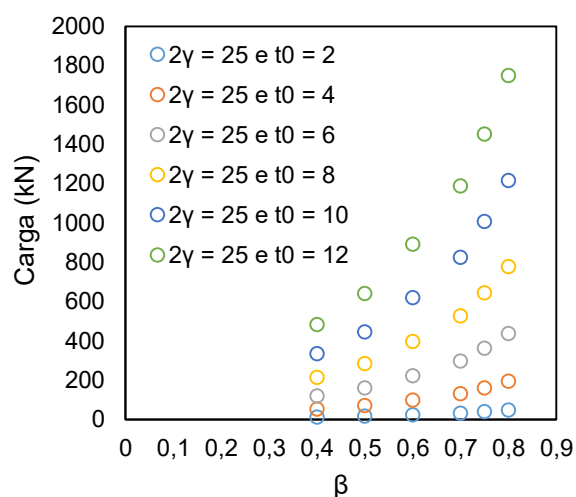
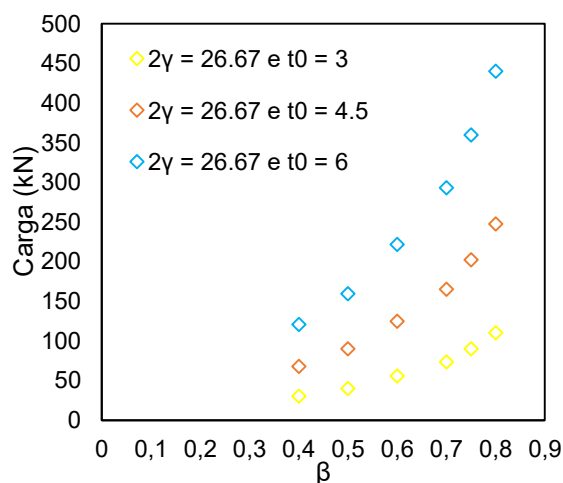
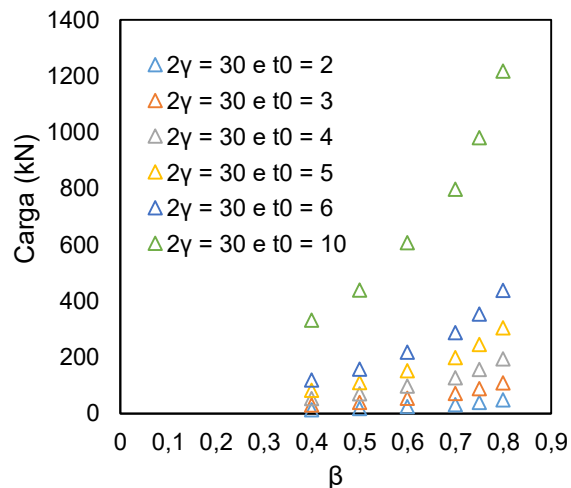
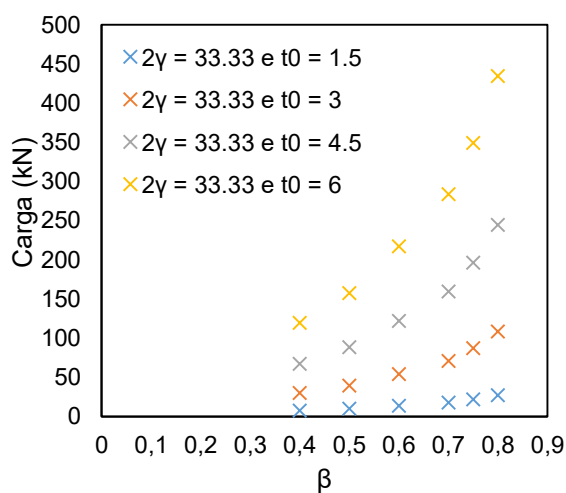
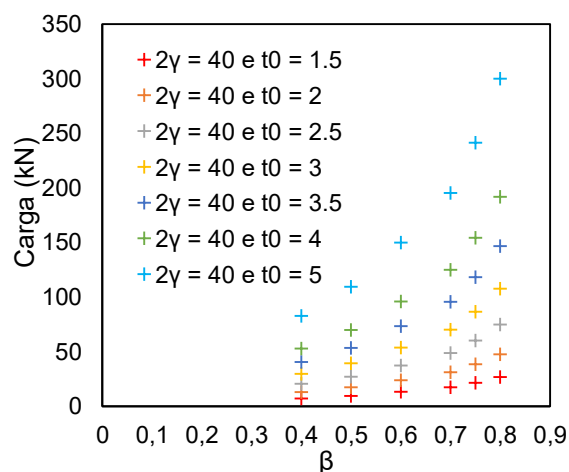
Figura 91 – Resistência numérica das ligações em termos de β e 2γ

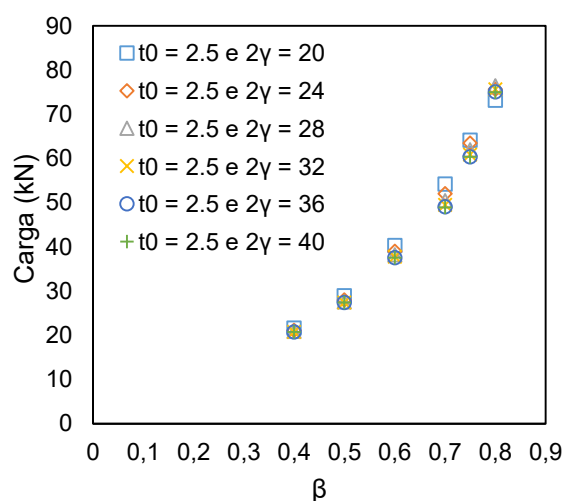
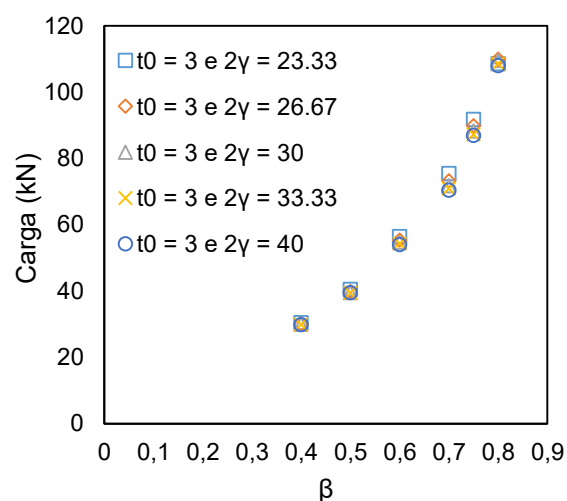
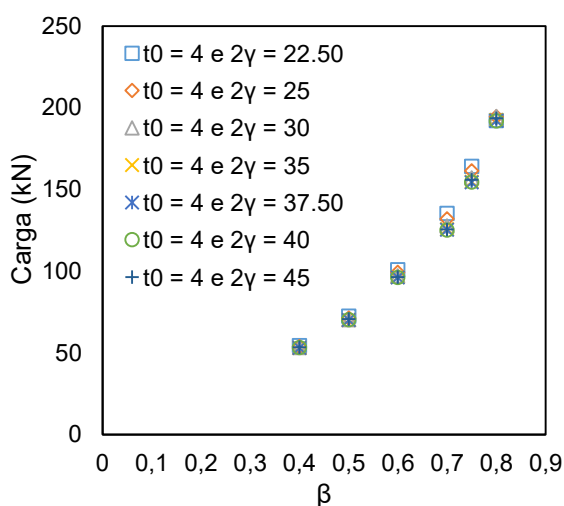
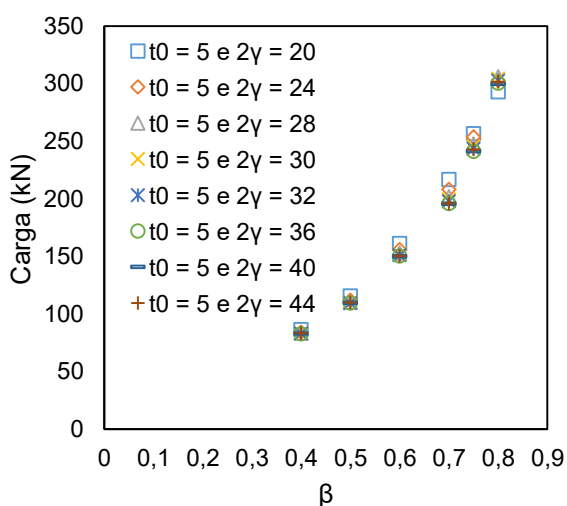
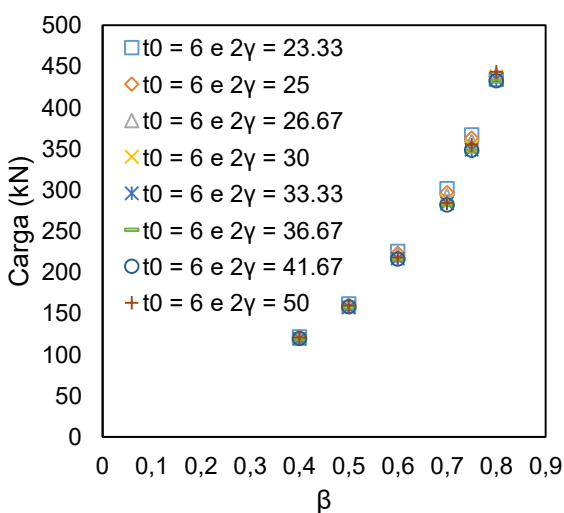
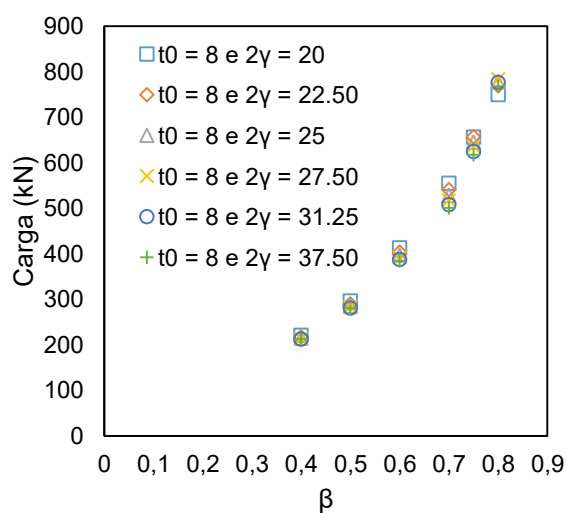
Focando inicialmente na relação entre a resistência e o parâmetro β , observa-se na Figura 91 que, para todas as séries de 2γ , os maiores valores de resistência foram atingidos quando $\beta = 0,8$, sendo esse o limite superior adotado dessa variável nas análises. Em função disso, conforme já havia sido observado nos ensaios experimentais, pode-se afirmar que a resistência de uma ligação tubular em aço inoxidável austenítico é incrementada conforme o valor do parâmetro β aumenta, sendo esse um comportamento similar ao observado nos estudos de ligações tubulares em aço carbono.

Quando o objetivo passa a ser a avaliação da influência do parâmetro 2γ na resistência da ligação, observa-se novamente na Figura 91 que os modelos com menores valores dessa variável ($20 \leq 2\gamma \leq 25$) foram os que atingiram as maiores resistências, ou seja, de uma maneira geral, pode-se concluir que o aumento de 2γ leva a diminuição nos valores resistentes das ligações. Contudo, apenas essa análise não se torna suficiente para afirmar que esse parâmetro tem uma influência significativa no comportamento de ligações com valores de $\beta \leq 0,85$. Por isso, outras duas análises foram feitas.

A primeira investigação teve como foco analisar as resistências de ligações com mesmo valor de 2γ , variando apenas as espessuras do banzo, estando apresentada na Figura 92. Analisando os resultados, pode-se perceber que, em cada grupo de 2γ , as ligações que atingiram as maiores resistências foram as com maiores valores de espessura do banzo (t_0). Essa consideração confirma o que já era preconizado no cálculo de resistência do Eurocode 3, parte 1-8 [10], em que na sua formulação, conforme indicado na Equação (4), apresenta a espessura do banzo disposta de maneira diretamente proporcional a resistência e também elevada ao quadrado.

A segunda análise fez o inverso, ou seja, fixou-se o valor de espessura do banzo e se variou o valor de 2γ , com alguns dos resultados obtidos apresentados na Figura 93. Observando os dados, é possível identificar que, independentemente do valor de espessura do banzo em questão, as mudanças nas resistências das ligações são mínimas, mesmo trabalhando com grandes diferenças de valores do parâmetro 2γ . Por exemplo, analisando a comparação para $t_0 = 4$ mm, nota-se que as ligações com parâmetros $2\gamma = 22,50$ e $2\gamma = 45$ tem praticamente a mesma resistência quando as espessuras de seus banzos tem esse valor.

a) Resistência em função de $2\gamma = 20$ b) Resistência em função de $2\gamma = 25$ c) Resistência em função de $2\gamma = 26,67$ d) Resistência em função de $2\gamma = 30$ e) Resistência em função de $2\gamma = 33,33$ f) Resistência em função de $2\gamma = 40$ Figura 92 – Análise de resistência das ligações em função de 2γ

a) Em função de $t_0 = 2,5$ mmb) Em função de $t_0 = 3$ mmc) Em função de $t_0 = 4$ mmd) Em função de $t_0 = 5$ mme) Em função de $t_0 = 6$ mmf) Em função de $t_0 = 8$ mmFigura 93 – Análise de resistência das ligações em função de t_0

A partir da avaliação desses aspectos, pode-se concluir que o parâmetro β tem grande influência na verificação da resistência das ligações tubulares, enquanto que com relação ao parâmetro 2γ , de maneira geral, pode-se assumir que ligações com menores valores dessa variável possuem maiores resistências, contudo, não se encontrou uma relação direta que pudesse garantir a real influência desse parâmetro, onde os valores de espessura do banzo (t_0) ainda tem predominância no que se refere ao dimensionamento de ligações tubulares em aço inoxidável.

6.4 Modos de falha

É notório que para os modelos utilizados na análise paramétrica do presente trabalho, baseando-se nos preceitos indicados pelas normas relativas às ligações tubulares em aço carbono, tal como o Eurocode 3, parte 1-8 [10] e NBR 16239 [12], espera-se que o modo de falha predominante nas ligações seja a plastificação na face superior do banzo, uma vez que a configuração de $\beta \leq 0,85$ categoriza esse ponto.

Contudo, ao analisar os estudos realizados por Feng e Young [70], [71], percebe-se que os modos de falha indicados nas normas vigentes de aço carbono nem sempre são aplicáveis para ligações em aço inoxidável, uma vez que em suas pesquisas, observou-se uma interação entre os modos de falha A e B para valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$. Dito isso, buscou-se realizar um estudo dos modos de falha ocorridos nas análises numéricas a partir da distribuição da tensão de von Mises no banzo dos modelos investigados através do *software* ANSYS [83], com o intuito de se comparar com o que foi observado nos ensaios experimentais realizados no LEC, além do que é descrito nas pesquisas e normas da área. Os modos de falha extraídos dos modelos numéricos estão apresentados no Apêndice D.

Primeiramente, pode-se observar que a maioria dos modelos tem a plastificação na face superior do banzo (modo A) como modo de falha predominante, confirmando assim as premissas presentes no Eurocode 3, parte 1-8 [10]. Entretanto, para as ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$, tem-se em grande parte dos modelos, a interação (modo A+B) entre os modos de plastificação da face superior e falha da face lateral do banzo, sendo esse segundo modo, característico de ligações com valores de $\beta = 1$. Cerca de 69% dos modelos desenvolvidos tiveram o modo de falha

A como principal, enquanto os 31% restantes estavam sob atuação do modo combinado. Desse modo, pode-se confirmar o que está presente na pesquisa de Feng e Young [71] sobre os modos de falha da ligação para essa faixa de valores.

É importante frisar que os modelos com valores de $\beta = 0,8$ foram propensos a serem influenciados de maneira significativa pela falha na face lateral do banzo, o que pode ser confirmado observando as suas respectivas curvas carga-deslocamento apresentadas no Apêndice B, uma vez que diversos modelos apresentaram carga de pico, de maneira similar ao que foi observado experimentalmente nos ensaios realizados no LEC. Alguns exemplos de curvas extraídas dos modelos numéricos e que indicam essa diferenciação estão apresentadas na Figura 94. A Figura 95 indica um comparativo entre alguns exemplos de distribuição da tensão de von Mises que foram observadas nos modelos analisados, em que para o modelo com $\beta = 0,7$, obteve-se a distribuição com deslocamento aplicado de 15 mm, e nas demais configurações de β , obteve-se a distribuição com deslocamento aplicado de 10 mm. Nota-se que nas ligações com menores valores de β , a plastificação fica praticamente restrita a face superior do banzo, e conforme o parâmetro β aumenta, as tensões passam a serem cada vez mais efetivas na face lateral do banzo, indicando a combinação entre os modos A e B na ligação.

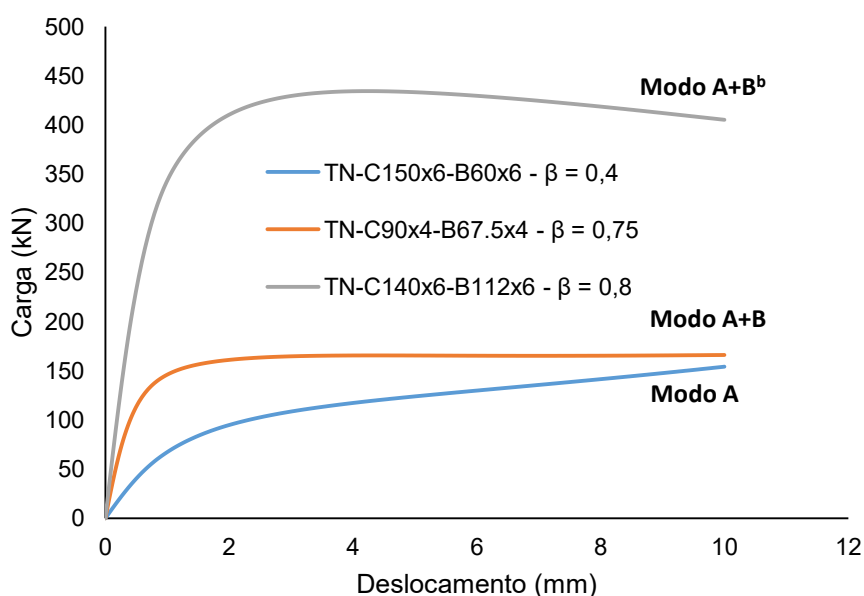


Figura 94 – Comparativo entre curvas dos modelos

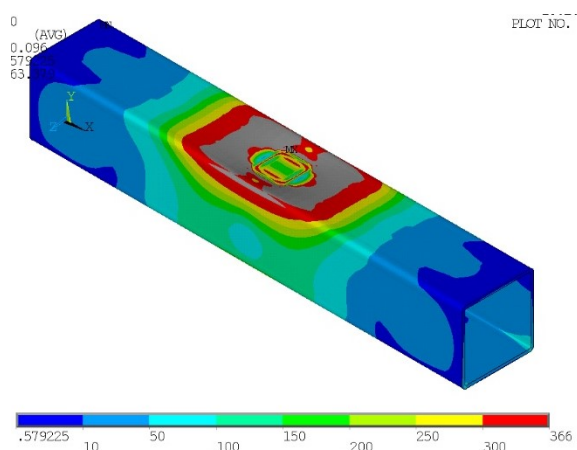
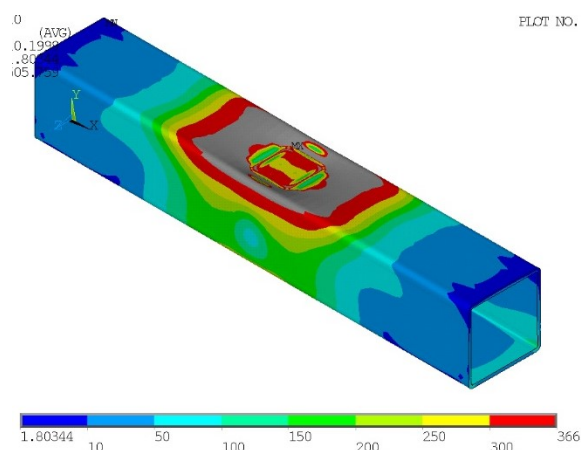
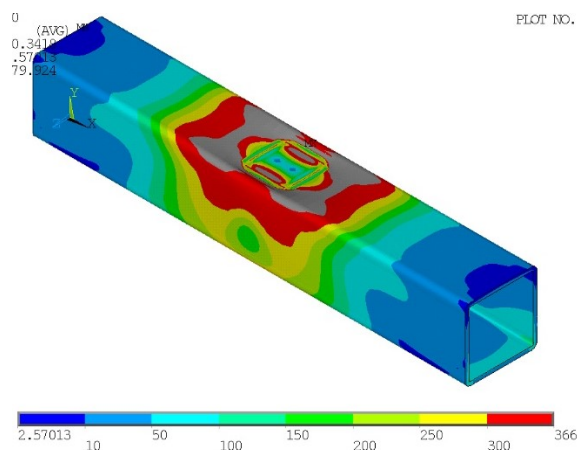
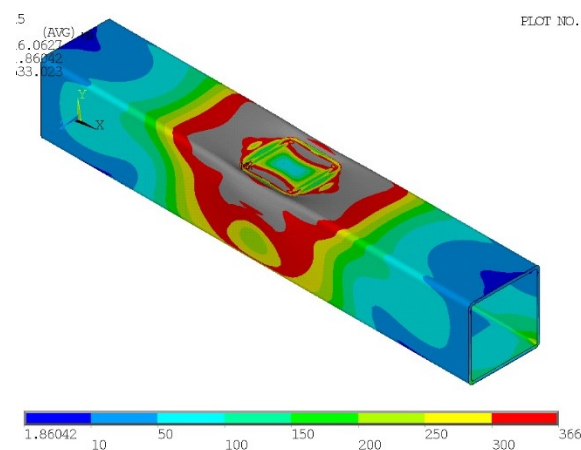
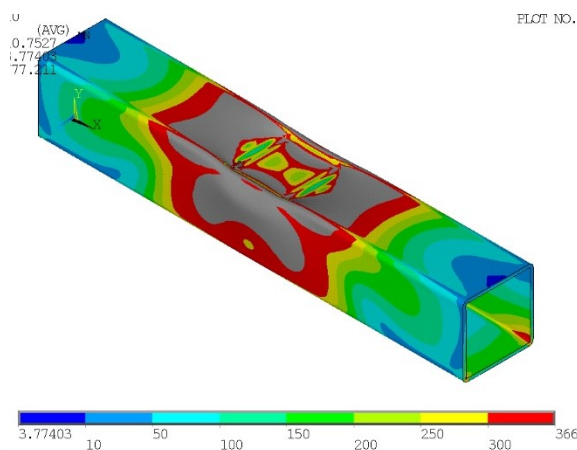
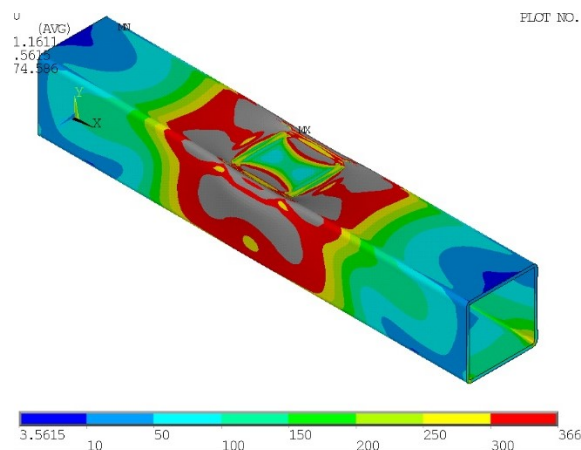
a) TN-C150x6-B60x6 ($\beta = 0,4$)b) TN-C120x5-B60x5 ($\beta = 0,5$)c) TN-C160x8-B96x8 ($\beta = 0,6$)d) TN-C200x8-B140x8 ($\beta = 0,7$)e) TN-C90x4-B67,5x4 ($\beta = 0,75$)f) TN-C140x6-B112x6 ($\beta = 0,8$)

Figura 95 – Distribuição da tensão de von Mises (em MPa) nos modelos

6.5 Comparação com as formulações atuais

A partir dos resultados de resistência das ligações obtidos nas análises numéricas, utilizando o critério de deformação limite atual ($N_{3\%B0}$) [44] e o critério proposto por Zhao (N_{Zhao}) [41], realizou-se um comparativo com o valor resistente obtido usando a equação para plastificação na face superior do banzo apresentada pelo Eurocode 3, parte 1-8 (N_{EC3}) [10] e pela NBR 16239 [12], avaliando a aplicabilidade da Equação (4), que é usada para ligações em aço carbono, na obtenção da resistência em ligações tubulares em aço inoxidável austenítico.

Aliado a isso, realizando um comparativo entre os resultados numéricos e as formulações propostas por Feng e Young (Equação (15) e Equação (18), adotadas como $N_{FY(A)}$ e $N_{FY(A+B)}$, respectivamente) [71], foi possível entender a viabilidade de aplicação, levando em consideração os diferentes critérios de deformação limite adotados. O Apêndice E e o Apêndice F apresentam os resultados das comparações realizadas, a Tabela 10 indica os valores obtidos para média, desvio padrão e coeficiente de variação em relação as razões realizadas no comparativo, e por fim, entre a Figura 96 e a Figura 99, resumiu-se as análises relativas as formulações atualmente preconizadas, diferenciando-se pelo critério de deformação limite ($N_{3\%b0}$ e N_{Zhao}) adotado em cada comparativo.

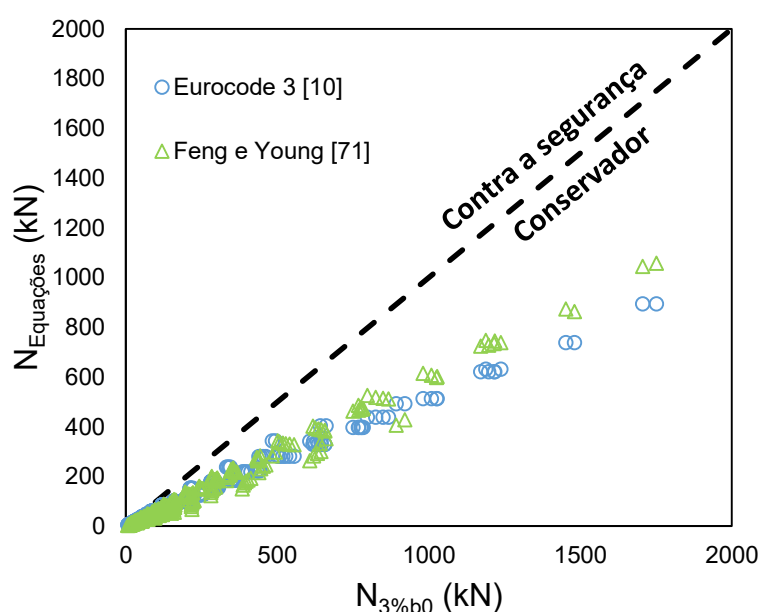


Figura 96 – Relação entre resistências numéricas ($N_{3\%b0}$) e analíticas

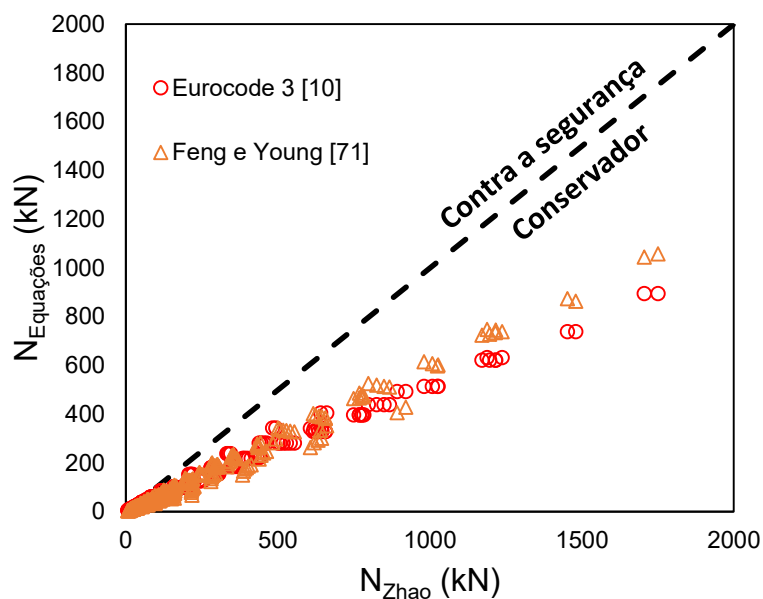


Figura 97 – Relação entre resistências numéricas (N_{Zhao}) e analíticas

Tabela 10 – Média e coeficiente de variação das análises

Valores	$N_{3\%b0}/$ NEC3	$N_{Zhao}/$ NEC3	$N_{3\%b0}/$ NFY(A)	$N_{Zhao}/$ NFY(A)	$N_{3\%b0}/$ NFY (A+B)	$N_{Zhao}/$ NFY (A+B)
Média	1,75	1,75	2,12	2,12	1,59	1,59
Desv Pad	0,20	0,20	0,31	0,31	0,07	0,07
CoV	0,11	0,12	0,15	0,15	0,05	0,05

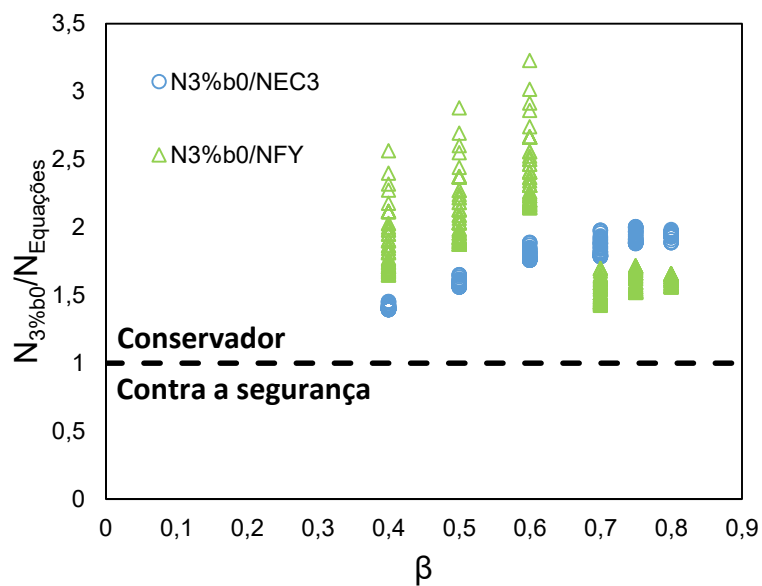


Figura 98 – Razão entre resistências (com $N_{3\%b0}$) em termos de β

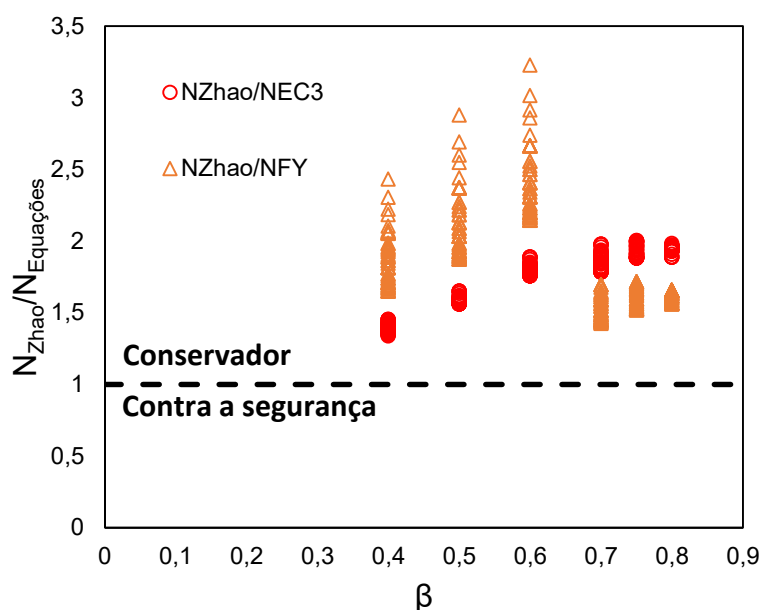


Figura 99 – Razão entre resistências (com N_{Zhao}) em termos de β

Analizando a Figura 96, a Figura 97 e os resultados da Tabela 10, percebe-se que, independente do critério de deformação limite adotado, tanto a formulação que determina a resistência de ligações tubulares tipo T presente no Eurocode 3, parte 1-8 [10] e a NBR 16239 [12] quanto as equações indicadas por Feng e Young [71] para resistência de ligações em aço inoxidável apresentam resultados a favor da segurança quando comparados com os valores resistentes obtidos de maneira numérica através dos modelos desenvolvidos, indicando um possível subdimensionamento das ligações. Para o caso do Eurocode 3, parte 1-8 [10] e para a NBR 16239 [12], essa consideração já era esperada, em função do regime elasto-plástico perfeito que é adotado para a elaboração das análises que geram as equações da norma, onde esse comportamento não ocorre em ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável, já que essas não possuem um patamar de escoamento bem definido (curva tensão-deformação não linear), assim, pode-se extrair e aproveitar ainda mais a capacidade resistente desse material.

Já para as equações previstas por Feng e Young [71], é necessário observar que suas análises foram desenvolvidas não apenas utilizando os resultados experimentais das ligações tubulares em aço inoxidável austenítico, mas também que seus modelos foram calibrados com base em ensaios que utilizaram aços inoxidáveis austeníticos de alta resistência (HSA) e duplex.

Em função dessas considerações, além da possibilidade de combinação dos modos de falha, Feng e Young [71] propuseram fatores de correção para a resistência das ligações tipo T, sendo um fator redutor de resistência para ligações tubulares com valores de $0,2 \leq \beta < 0,7$ e um fator incrementador de resistência para ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,85$, conforme apresentado na Equação (17) e Equação (19), respectivamente. Dito isso, observando a Figura 98 e a Figura 99, percebe-se que para valores de β até 0,6, as razões entre resistências numéricas e resistências propostas por Feng e Young [71] tornam-se extremamente conservadoras, ultrapassando até mesmo o Eurocode 3, parte 1-8 [10], já que o fator redutor está gerando uma diminuição da real resistência, sendo esse um problema onde não se aproveita o potencial das ligações em aço inoxidável, gerando custos mais elevados na hora dos orçamentos e planejamento de execução em campo da estrutura. Para os valores de $\beta \geq 0,7$, em função do fator incrementador da resistência, observa-se que as razões entre resistências numéricas e resistências propostas por Feng e Young [71] tornam-se um pouco mais compatíveis, mas ainda não se apresentam tão adequadas para a obtenção dos valores resistentes da ligação de maneira coerente.

Observando a diferença dos resultados quando se utilizou o critério de deformação limite atual [44] e o critério proposto por Zhao [41], confirmou-se que nas ligações com valores de $\beta = 0,4$ e $\beta = 0,5$, realmente existem ligações onde a carga de serviço passa a comandar o dimensionamento ($N_{1,Rd} = 1,5 \times N_{1\%b0}$), enquanto nas demais ligações, a carga última ($N_{1,Rd} = N_{3\%b0}$) passava a ser a indicada para a resistência da ligação. Contudo, observando principalmente a Tabela 10, nota-se que não houve diferenças significativas nos cálculos, tendo valores praticamente iguais tanto para a média quanto para o coeficiente de variação.

Conforme já dito, observou-se a interação entre os modos de falha A e B para as ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$. Em função disso, optou-se por realizar uma análise extra nessa faixa de modelos, considerando a aplicabilidade da equação proposta pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] para a falha na parede lateral do banzo, em que a Equação (20) apresenta a resistência segundo a norma.

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n \times f_b \times t_0}{\sin \theta_1} \times \left(\frac{2 \times h_1}{\sin \theta_1} + 10 \times t_0 \right) / \gamma_{M5} \quad (20)$$

$$\text{Para montantes comprimidos: } f_b = \chi \times f_{y0} \quad (21)$$

Onde:

k_n : Fator relacionado a tensões em banzos retangulares (igual a 1 para o presente caso);

f_b : Resistência à flambagem da parede lateral do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

h_1 : Altura da seção transversal do montante;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo.

Segundo o Eurocode 3, parte 1-8 [10], χ é o fator de redução para flambagem, sendo obtido por meio da Equação (22).

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1 \quad (22)$$

$$\phi = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{3,46 \times \left(\frac{h_0}{t_0} - 2\right) \times \sqrt{\frac{1}{\sin \theta_1}}}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}} \quad (24)$$

Onde:

λ : Índice de esbeltez normalizado;

α : Fator de imperfeição (para seção tubular conformada a frio, é igual a 0,49);

h_0 : Altura da seção transversal do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

θ_1 : Ângulo entre montante e banzo (para ligações T, equivale a 90°);

E : Módulo de elasticidade do material;

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo.

A Figura 100 e a Figura 101 apresentam os comparativos realizados para análises utilizando a equação referente a plastificação na face lateral do banzo, enquanto um resumo dos resultados está apresentado no Apêndice E e no Apêndice F. Os valores de média e coeficiente de variação obtidos relacionados a Figura 101 foram 1,34 e 0,20, respectivamente.

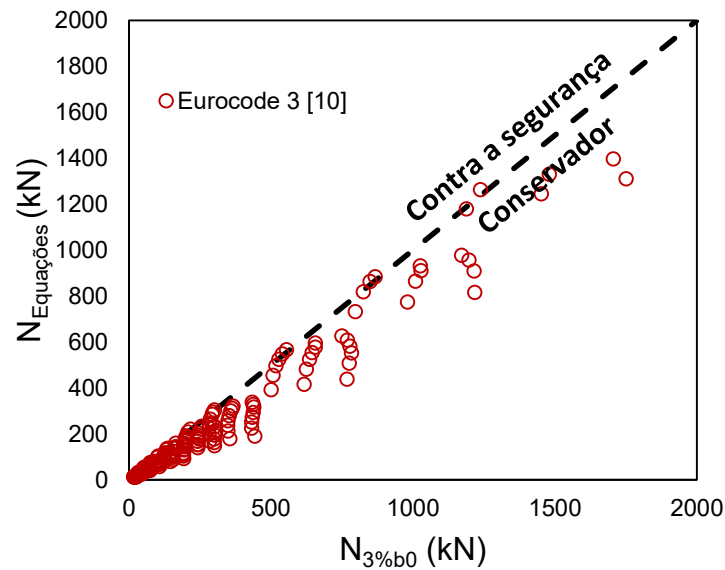


Figura 100 – Relação entre resistências numéricas ($N_{3\%b0}$) e analíticas (modo B)

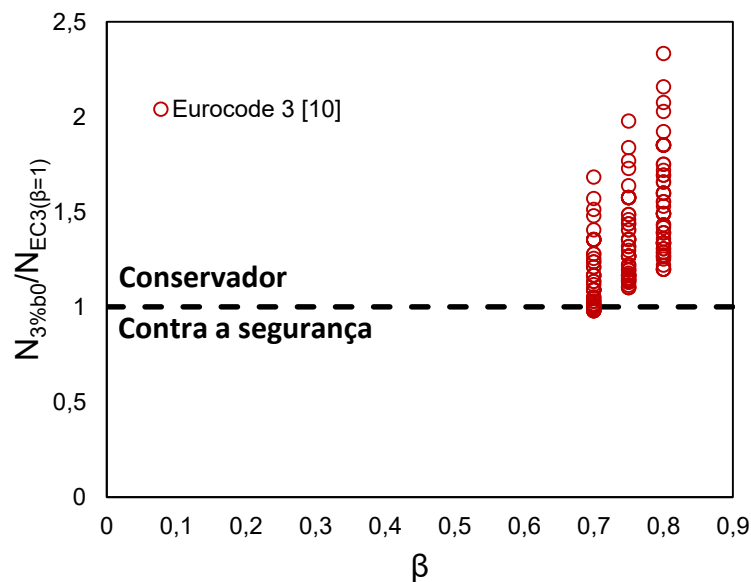


Figura 101 – Razão entre resistências em termos de β (modo B)

Pode-se observar que o dimensionamento de ligações tubulares em aço inoxidável utilizando a equação para a falha na face lateral do banzo apresenta resultados a favor da segurança, mas que geram um subdimensionamento da estrutura, de maneira similar com o que já havia sido concluído para as equações do modo A (mesmo observando que a utilização da equação do modo B gerou resultados um pouco mais propícios de serem adotados), onde ambas as formulações resultam em um não-aproveitamento do potencial que esse tipo de material proporciona.

6.6 Proposta de nova equação

Conforme apresentado até agora, tanto as equações propostas pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] e pela NBR 16239 [12], seja para plastificação na face superior ou lateral do banzo, quanto os fatores de correção indicados por Feng e Young [71] não indicaram resultados adequados para que se possa prever a resistência de ligações tubulares tipo T entre perfis quadrados de aço inoxidável austenítico.

Dito isso, a presente etapa da análise paramétrica teve o intuito de encontrar um fator de correção para a formulação do modo de falha A presente no Eurocode 3, parte 1-8 [10], conforme apresentado na Equação (4), para que os resultados aproximasse-se do que foi observado nos modelos numéricos. Utilizando a análise comparativa das razões entre cargas numéricas para o critério de deformação limite atual [44] ($N_{3\%b0}$) e as cargas previstas por essa norma (N_{EC3}), apresentada na Figura 98, conseguiu-se determinar uma linha de tendência, encontrando um fator de correção de aproximadamente $(1,35 \times \beta) + 0,91$, conforme indicado na Figura 102.

Com base nesses dados, diversos ajustes foram realizados em função da análise de confiabilidade, que será apresentada no item subsequente da presente dissertação, buscando-se um valor adequado aos limites propostos nessa etapa. Por fim, encontrou-se um fator otimizado, adotando sua nomenclatura como α_{PR} , em que a Equação (25) apresenta seu emprego (N_{PR}) na formulação do Eurocode 3, parte 1-8 [10] já simplificada para o caso de uma ligação tipo T com cargas de compressão apenas no montante, enquanto a Equação (26) apresenta sua descrição. A Figura 103, a Figura 104, o Apêndice E e o Apêndice F o indicam o resumo de análises e resultados referentes a aplicabilidade desse fator.

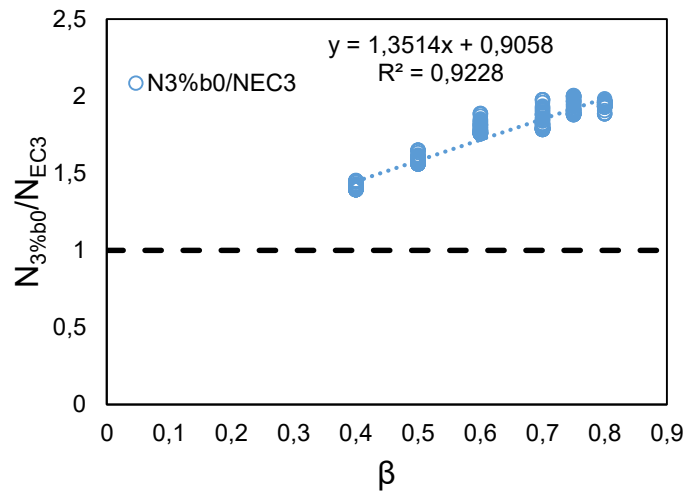


Figura 102 – Linha de tendência linear utilizada

$$N_{PR} = N_{1,Rd} \times \alpha_{PR} = \left[\frac{f_{y0} \times t_0^2}{(1 - \beta)} \times (2 \times \beta + 4 \times \sqrt{1 - \beta}) \right] \times \alpha_{PR} / \gamma_{M5} \quad (25)$$

$$\alpha_{PR} = (1,35 \times \beta) + 0,87 \quad (26)$$

Onde:

f_{y0} : Tensão de escoamento do aço no perfil do banzo;

t_0 : Espessura da parede do banzo;

γ_{M5} : Coeficiente de segurança.

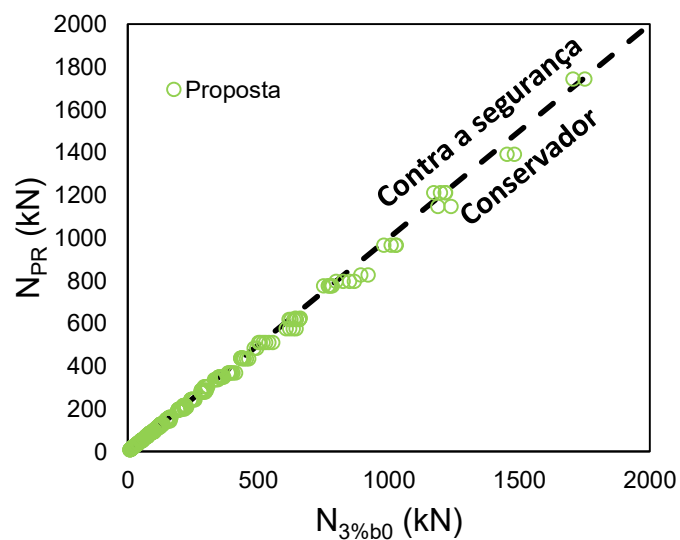


Figura 103 – Relação entre resistência numérica ($N_{3\%b0}$) e proposta

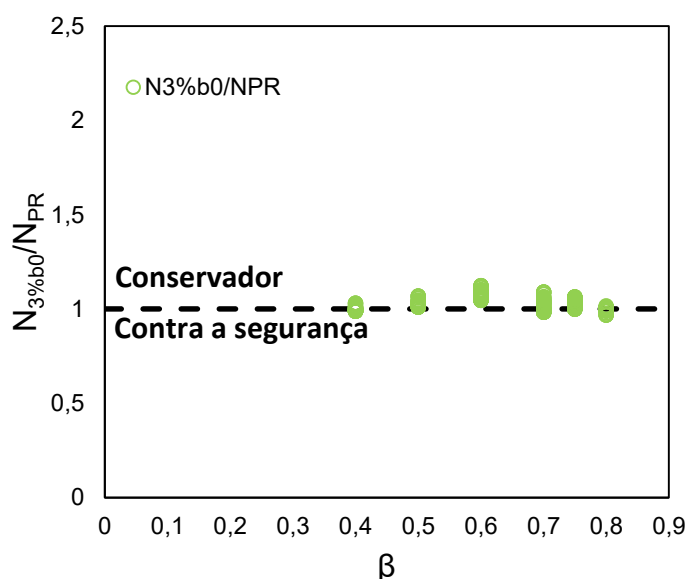


Figura 104 – Razão entre resistências em termos de β (proposta)

Observa-se que a utilização do fator de correção proposto na equação adotada pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] para indicar a resistência relacionada a plastificação da face superior do banzo resultou em resultados extremamente satisfatórios, apresentando valores muito próximos aos extraídos das análises numéricas, uma vez que os valores de média e coeficiente de variação da razão entre as cargas numéricas e as resistências propostas foram, respectivamente, 1,02 e 0,03.

É importante frisar que, diferentemente do que foi realizado por Feng e Young [71], conseguiu-se desenvolver um fator de correção único, que não dependesse da possibilidade de interação entre modos de falha, visto que alguns modelos da faixa entre $0,7 \leq \beta \leq 0,8$ tiveram apenas a falha na face superior do banzo como modo atuante, não podendo serem afetados por uma diferenciação direta no que se refere ao cálculo da resistência. Aliado a isso, percebe-se que o fator de correção gerou resultados precisos até mesmo para modelos que não estavam nos limites do parâmetro 2γ preconizados pelas normas de aço carbono, além de funcionar corretamente para as ligações com membros (banzos e montantes) indicados como classe 3 e classe 4 (todas as ligações estão classificadas no Apêndice D) utilizando os limites tanto do Eurocode 3, parte 1-4 atual [20] quanto os limites da sua proposta de revisão [88], uma vez que a formulação do Eurocode 3, parte 1-8 [10] prevê resoluções para resistência apenas em membros da ligação com seção classe 1 ou classe 2.

6.7 Análise de confiabilidade

A realização de uma análise de confiabilidade das equações indicadas pelas normas e pesquisas da área é de importância vital para que se possa mensurar o nível de precisão das respostas relacionadas as razões entre cargas resistentes numéricas e analíticas das estruturas estudadas, sendo usualmente utilizadas para definir os fatores de segurança prescritos normativamente.

Existem algumas maneiras de se realizar esse estudo. Contudo, em função de sua praticidade de aplicação, optou-se por utilizar o método prescrito pela AISC [77], sendo esse o mais adotado nas pesquisas da área de ligações tubulares. Nesse método, a confiabilidade das formulações propostas é mensurada por um índice de confiabilidade (β_0), em que as equações são consideradas confiáveis para uso caso esse índice seja igual ou maior que 2,6 para membros em aço inoxidável [77]. Nas situações que o índice estiver abaixo desse valor, considera-se que a formulação é contra a segurança, e caso o índice estiver muito acima desse valor, considera-se a formulação como conservadora. A Equação (27) apresenta o cálculo do índice de confiabilidade, adotando-se a formulação indicada por Pandey e Young [82].

$$\beta_0 = \frac{\ln(C_\phi M_m F_m P_m / \phi)}{\sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_P V_M^2 + V_Q^2}} \quad (27)$$

Onde:

C_ϕ : Coeficiente de calibração;

M_M : Média dos valores correspondentes aos fatores do material, refletindo as incertezas nas suas propriedades;

F_M : Média dos valores correspondentes aos fatores de fabricação, refletindo a geometria da seção transversal;

P_M : Média dos valores sob comparação (no caso, é a média da razão entre carga numérica e carga analítica);

Φ : Fator de resistência que considera as incertezas e variabilidades inerentes a resistência nominal;

V_M : Coeficiente de variação do fator relacionado ao material;

V_F : Coeficiente de variação do fator relacionado ao processo de fabricação;
 C_P : Fator de correção que considera a influência do tamanho da amostra;
 V_P : Coeficiente de variação dos valores sob comparação (no caso, CoV da razão entre carga numérica e carga analítica);
 V_Q : Coeficiente de variação do fator relacionado aos efeitos das cargas.

O cálculo do fator de correção que considera a influência do tamanho da amostra está apresentado na Equação (28), conforme indicado por Nogueira *et al.* [7].

$$C_P = \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right) \times m}{(m - 2)} \quad (28)$$

Onde:

n: Número de dados ou análises realizadas

m: Número de análises - 1

O cálculo do coeficiente de calibração C_ϕ é baseado principalmente na combinação de cargas adotadas, uma vez que o Eurocode [89] utiliza os valores de $1,35DL + 1,5LL$, ou seja, fator de majoração de 1,35 para cargas permanentes e de 1,5 para cargas variáveis, enquanto a ASCE [90] adota $1,2DL + 1,6LL$, ou seja, fatores de majoração para cargas permanentes e variáveis de 1,2 e 1,6, respectivamente. A formulação descrita para o cálculo do coeficiente de calibração está apresentada na Equação (29), conforme indicado por Meimand e Schafer [91].

$$C_\phi = \frac{(\sum \gamma_i Q_i)}{(\sum B_i Q_i)} = \frac{F_{DL}D + F_{LL}L}{B_D D + B_L L} \quad (29)$$

Onde:

F_{DL} : Fator de majoração para carga permanente;

F_{LL} : Fator de majoração para carga variável;

B_D : Fator estatístico relacionado a carga permanente;

B_L : Fator estatístico relacionado a carga variável (50 anos).

Adotou-se os valor de razão entre cargas variáveis e permanentes (L/D) preconizados inicialmente pela AISC [77], baseando-se no estudo desenvolvido por Bartlett *et al.* [92], que equivale a $L/D = 3$. Aliado a isso, utilizou-se os fatores estatísticos para carga variável e permanente preconizados por Ellingwood e Galambos [93], que foram 1,05 e 1, respectivamente. Com a utilização dessas premissas, obteve-se os valores de coeficiente de calibração (C_ϕ) para a combinação de cargas do Eurocode [89] e da ASCE [90] iguais a 1,44 e 1,48, respectivamente, em que o valor encontrado relativo a norma europeia foi utilizado para o cálculo de confiabilidade referente as formulações do Eurocode 3, parte 1-8 [10] e da equação proposta, enquanto o valor encontrado relativo a norma americana [90] foi utilizado para o cálculo de confiabilidade das equações propostas por Feng e Young [71], seguindo as premissas adotadas em seus estudos. A Tabela 11 apresenta um resumo da análise de confiabilidade realizada.

Tabela 11 – Análise de confiabilidade

Valores	NEC3 (3%b0)	NEC3 (Zhao)	N _{FY} (3%b0 e A)	N _{FY} (Zhao e A)	N _{FY} (3%b0 e A+B)	N _{FY} (Zhao e A+B)	NEC3 (3%b0 e $\beta = 1$)	N _{PR} (3%b0)
C_ϕ	1,44	1,44	1,48	1,48	1,48	1,48	1,44	1,44
M_M	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
F_M	1	1	1	1	1	1	1	1
P_M	1,75	1,75	2,12	2,12	1,59	1,59	1,34	1,02
ϕ	1	1	1	1	1	1	1	1
V_M	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
V_F	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
n	348	348	174	174	174	174	174	348
m	347	347	173	173	173	173	173	347
C_P	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
V_P	0,11	0,12	0,15	0,15	0,05	0,05	0,20	0,03
V_Q	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
β_0	4,78	4,75	5,30	5,28	4,96	4,96	3,00	2,85

Os valores relacionados a média e coeficiente de variação em função dos fatores do material (M_M e V_M), além do coeficiente de variação relacionado aos efeitos das cargas (V_Q) foram escolhidos com base na descrição apresentada pela AISC [77] para aços inoxidáveis austeníticos, adotando-se $M_M = 1,25$, $V_M = 0,08$ e $V_Q = 0,19$. Para as variáveis relacionadas aos fatores de fabricação (F_M e V_F), adotou-se os

valores indicados pela AISC [77] para tubos conformados a frio em aço inoxidável, sendo $F_M = 1$ e $V_F = 0,05$. Usando o que foi prescrito por Pandey e Young [82], definiu-se o valor do fator de resistência Φ como igual a 1. Por fim, para o cálculo do fator de correção C_P , que está relacionado ao tamanho da amostra, adotou-se como $n = 348$ dados para a comparação com a norma europeia para o modo A e a equação proposta, e $n = 174$ dados para as comparações utilizando os fatores incrementadores (A+B) e redutores (A) de resistência, além da equação da norma europeia para o modo B, uma vez que metade dos modelos analisados estava na faixa do modo de falha A, enquanto a outra metade estava na faixa do modo combinado.

Observando os resultados apresentados na Tabela 11, nota-se que tanto as equações do Eurocode 3, parte 1-8 [10] para o modo de falha de plastificação na face superior do banzo, quanto as formulações com os fatores de correção propostos por Feng e Young [71] apresentaram índices de confiabilidade muito acima da faixa esperada, que é 2,6. Com essa análise realizada, pode-se afirmar que as três equações, independente do critério de deformação limite adotado, apresentam resultados conservadores no que se refere ao dimensionamento de ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável. Aliado a isso, nota-se que para a faixa de modelos com valores de β entre 0,7 e 0,8, a utilização da equação do Eurocode 3, parte 1-8 [10] para o modo de falha de plastificação na face lateral do banzo apresenta resultados menos conservadores, contudo, ainda não é adequada para definir as resistências da ligações, também resultando em valores conservadores.

Por fim, a análise de confiabilidade relativa a equação proposta apresentou um índice de confiabilidade de 2,85, sendo o valor mais próximo do limite de 2,6 adotado nas pesquisas da área, comprovando sua eficácia e possibilitando seu emprego (independente da combinação de modos de falha, classes de perfil e critério de deformação limite adotado) para a determinação das resistências de ligações tubulares tipo T entre perfis SHS de aço inoxidável de maneira simplificada e objetiva.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tem como objetivo analisar de maneira experimental e numérica a resistência de ligações tubulares tipo T entre perfis SHS de aço inoxidável austenítico com valores de parâmetro $\beta \leq 0,8$. Buscou-se avaliar as cargas resistentes obtidas e os modos de falha resultantes, evidenciando a influência dos parâmetros geométricos críticos nesses pontos. Com base nos resultados obtidos, conseguiu-se realizar comparações com as formulações presentes nas normas vigentes e equações propostas por pesquisadores da área.

Pode-se dividir o trabalho em três etapas: a primeira, com o foco experimental, teve grande parte do seu desenvolvimento realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com a realização de doze ensaios de ligações tubulares com valores de β variando entre 0,4 e 0,8; a segunda etapa refere-se ao desenvolvimento de 348 modelos numéricos utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio do software ANSYS [83], calibrando as análises em função dos resultados experimentais; a terceira e última etapa apresentou a realização de uma análise paramétrica, avaliando a influência dos parâmetros β e 2γ na resistência da ligação, juntamente com a verificação de aplicabilidade do Eurocode 3, parte 1-8 [10] e da NBR 16239 [12], além dos fatores de correção propostos por Feng e Young [71] para o dimensionamento das ligações tubulares. Por fim, um novo fator de correção otimizado foi proposto.

A partir dos resultados experimentais, algumas premissas iniciais foram destacadas. Primeiramente, observou-se que os corpos de prova com valores do parâmetro $\beta = 0,8$ apresentaram as maiores resistências, concluindo-se que quanto maior o valor desse parâmetro, mais resistentes as ligações são, sendo um comportamento similar ao que acontecem em ligações tubulares entre perfis de aço carbono. Notou-se uma coerência em relação aos modos de falha indicados no Eurocode 3, parte 1-8 [10] e nos corpos de prova ensaiados na faixa de $0,4 \leq \beta \leq 0,6$, contudo, nas ligações com maiores valores de β , uma combinação entre os modos de falha de plastificação na face superior e plastificação na face lateral ocorreu, em que alguns corpos de prova ($\beta = 0,8$) chegaram a ter tendências maiores ao modo B.

Juntamente a esses pontos, observou-se que a utilização das equações propostas pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10], pela NBR 16239 [12], e por Feng e Young

[71] resultaram em dimensionamentos extremamente a favor da segurança nas ligações. Por fim, pequenas diferenças nos resultados de razão entre as cargas experimentais e analíticas foram observadas nos corpos de prova com valores de β iguais a 0,4 e 0,5, quando se compara a utilização do critério de deformação limite proposto por Zhao [41] e do critério adotado nos dias atuais [44].

Para se aprofundar mais nessas premissas, realizou-se uma extensa análise paramétrica em função dos modelos numéricos desenvolvidos, em que a partir dela, diversas premissas foram concluídas. Primeiramente, confirmou-se o que já havia sido apresentado em relação ao parâmetro β na análise experimental, ou seja, esse parâmetro geométrico é crítico e tem influência direta na determinação da resistência de ligações tubulares entre perfis de aço inoxidável.

Aliado a isso, buscou-se evidenciar uma possível influência do parâmetro 2γ nas ligações, onde se observou que os modelos com maiores resistências geralmente estavam entre os menores valores de 2γ , podendo assumir essa premissa de maneira preliminar. Contudo, notou-se que caso fixe um valor de espessura do banzo (t_0) na análise, percebe-se que até mesmo ligações com valores muito diferentes do parâmetro 2γ apresentam resistências praticamente iguais, enquanto que caso fixe um valor de 2γ na análise, observa-se que as ligações com maiores valores de t_0 apresentam as maiores resistências. Com isso, concluiu-se que a espessura do banzo tem maior influência (quando comparado com o parâmetro 2γ propriamente dito) na resistência de ligações tubulares em aço inoxidável, de maneira similar ao proposto nas formulações referentes ao aço carbono, uma vez que essa variável nessas equações está elevada ao quadrado.

Outro ponto importante analisado no estudo paramétrico foram os modos de falha ocorridos nas ligações, e de maneira similar ao que foi demonstrado nos ensaios experimentais, observou-se a predominância da plastificação na face superior do banzo (modo A) em grande parte dos modelos, principalmente na faixa de valores de $0,4 \leq \beta \leq 0,6$. Apesar disso, conforme apresentado por Feng e Young [71], nas ligações com valores de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$, concluiu-se que existe a possibilidade de interação do modo A com a falha na face lateral do banzo (modo B), gerando um modo de falha combinado (A+B), o que não está preconizado no Eurocode 3, parte 1-8 [10].

Juntamente a isso, realizou-se a comparação entre as resistências obtidas numericamente e pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10], além da formulação proposta por

Feng e Young [71]. Por meio de uma análise de confiabilidade utilizando as premissas da AISC [77], pode-se concluir que a tanto a equação para o modo de falha da face superior no banzo quanto para a falha na face lateral do banzo preconizadas pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] geram resultados conservadores para definir a resistência de ligações tubulares em aço inoxidável, sendo esse comportamento já esperado, em função da consideração elasto-plástica perfeita dessa norma, diferentemente do que ocorre nos aços austeníticos, que não tem um patamar de escoamento bem definido em função de seu comportamento não linear.

Observando a comparação entre as cargas numéricas e as resistências indicadas por Feng e Young [71], notou-se valores extremamente conservadores para a faixa de $0,4 \leq \beta \leq 0,6$ em função da utilização de um fator redutor de resistência, e conservadores para a faixa de $0,7 \leq \beta \leq 0,8$, mesmo com a adoção de um fator incrementador de resistência. De maneira aproximada ao que foi descrito experimentalmente, observou-se que a utilização do critério de deformação limite proposto por Zhao [41] gerou resultados próximos ao critério adotado atualmente [44], não acarretando em grandes mudanças na determinação das resistências.

Por fim, utilizando uma linha de tendência linear, conseguiu-se propor um fator incrementador de resistência para a equação proposta pelo Eurocode 3, parte 1-8 [10] para a plastificação na face superior do banzo, obtendo-se resultados extremamente otimizados, e que por meio da análise de confiabilidade, evidenciou-se que essa formulação pode ser utilizada para a determinação da resistência de ligações tubulares tipo T entre perfis SHS de aço inoxidável austenítico, garantindo um dimensionamento seguro e viável para a estrutura.

Como sugestões para os futuros trabalhos que seguem a mesma linha de pesquisa, apresenta-se: realizar ensaios em ligações tubulares de aço inoxidável com valores de $0,8 \leq \beta \leq 1$; utilizar diferentes classes de aços inoxidáveis (ferrítico, duplex) para compor os perfis da ligação; variar os tipos de seções (retangulares, circulares ou elípticas) e configurações geométricas (K, N, Y) das ligações estudadas; avaliar o impacto do parâmetro τ na resistência das ligações; realizar análises utilizando chapas de reforço na face superior do banzo; desenvolver estudos experimentais e numéricos aplicando esforços axiais (tração e compressão) nos banzos de ligações, usando a mesma configuração geométrica dos corpos de prova ensaiados no presente trabalho, para comparar e avaliar o comportamento da estrutura de maneira completa.

REFERÊNCIAS

- [1] WARDENIER, Jaap; PACKER, Jeffrey; ZHAO, Xiao-Ling; VAN DER VEGTE, Addie. **Hollow Sections in Structural Applications**. 2. ed. Geneva, Switzerland: CIDECT, 2010.
- [2] WARDENIER, Jaap. **Hollow Sections in Structural Applications**. 1 ed. Netherlands: CIDECT, 2001.
- [3] GUERRIEIRO, Lucas Castelo Branco. **Análise de ligações tubulares T com reforço de chapa**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [4] ARAÚJO, Afonso; SARMANHO, Arlene; BATISTA, Eduardo; REQUENA, João; FAKURY, Ricardo; PIMENTA, Roberval. **Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço**. 1 ed. Belo Horizonte: Editora do Autor, 2016.
- [5] NIZER, Adriano. **Avaliação da influência do esforço normal no banzo no comportamento de ligações tubulares em aço**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] HARRIS STEELS LTD. **Hollow Sections**. Disponível em: <<https://www.harrissteels.co.uk/>>. [S.d.]. Acesso em: 15 nov. 2023.
- [7] NOGUEIRA, Mateus Moreira. **Avaliação da resistência de ligações T entre perfis tubulares soldados em aço inoxidável com o banzo carregado axialmente**. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- [8] QUEIROZ, Gilson; VILELA, Paula Moura Leite. **Ligações, regiões nodais e fadiga de estruturas de aço**. 1 ed. Belo Horizonte: Código Editora, 2012.
- [9] GOMES, Nathann Vasconcelos. **Avaliação de ligações tubulares tipo T com reforço de chapa lateral**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [10] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints**. Brussels, 2010.
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14346: Static design procedure for welded hollow-section joints – Recommendations**. Switzerland, 2013.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16239**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.
- [13] BRASIL, Douglas; LIMA, Luciano; VELLASCO, Pedro; SILVA, André. Structural analyses of reinforced tubular T-joints. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 69, n. 1, p. 13-19, mar. 2016.
- [14] SARQUIS, Fernando Rocha. **Avaliação estrutural de cantoneiras em aço inoxidável austenítico submetidas à compressão**. 2019. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [15] CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. 1 ed. São Paulo: Arcelor Mittal, 2008.
- [16] TORRES, Flávio Lacerda. **Comportamento estrutural de cantoneiras de aço inoxidável interconectadas em configuração cruciforme sob compressão axial**. 2022. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- [17] DUARTE, Hugo Penalva Clare Silveira Goulart. **Avaliação de colunas tubulares quadradas em aço inoxidável**. 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [18] STRUCTURAE. **The Helix Bridge**. Disponível em: <<https://structurae.net/en/structures/the-helix-bridge>>. [S.d.]. Acesso em: 22 nov. 2023.
- [19] EUROINOX. **Erasmus Metro Station in Brussels**. Disponível em <https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/euroinox>. [S.d.]. Acesso em: 22 nov. 2023.
- [20] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3**: Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels. Brussels, 2006.
- [21] JOINTS STANDARDS AUSTRALIA/ STANDARDS NEW ZEALAND COMMITTEE. **AS/NZS 4673**: Cold-formed stainless steel structures. Sydney, 2001.
- [22] AFSHAN, Sheida; GARDNER, Leroy. The continuous strength method for structural stainless steel design. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 69, p. 42-49, abr. 2013.

- [23] PACKER, Jeffrey; WARDENIER, Jaap; ZHAO, Xiao-Ling; VAN DER VEGTE, Addie; KUROBANE, Yoshiaki. **Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading**. 2. ed. [S.l.]: CIDECT, 2009.
- [24] KOSTESKI, Nikola; PACKER, Jeffrey; PUTHLI, Ramgopal. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections. **Journal Constructional Steel Research**, v. 59, p. 427-559, 2003.
- [25] CORREIA, Tatiana Pereira. **Avaliação da influência de tensões normais no banzo para a resistência de ligações soldadas entre perfis RHS e SHS**. 2019. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [26] KATO, Ben; NISHIYAMA, Isao. T-joints made of rectangular tubes. In: International specialty conference on cold-formed steel structures, 5., 1980, Missouri, USA. **Proceedings...** Missouri, 1980, p. 663-679.
- [27] PACKER, Jeffrey. Moment Connections between Rectangular Hollow Sections. **Journal of Construction Steel Research**, [S.l.], v. 25, p. 63-81, jan. 1993.
- [28] CAO, Junjie; PACKER, Jeffrey; YANG, Guojing. Yield line analysis of RHS connections with axial loads. **Journal of Construction Steel Research**, [S.l.], v. 48, n. 1, p. 1-25, out. 1998.
- [29] CAO, Junjie; PACKER, Jeffrey; KOSTESKI, Nikola. Design guidelines for longitudinal plate to HSS connections. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v.124, n. 7, p. 784-791, jul. 1998.
- [30] DAVIES, Gwynne; PACKER, Jeffrey. Predicting the strength of branch plate – RHS connections for punching shear. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 458-467, set. 1982.
- [31] ZHAO, Xiao-Ling; HANCOCK, Gregory. Square and rectangular hollow sections under transverse end-bearing force. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 121, n. 9, p. 1323-1329, set. 1995.
- [32] ZHAO, Xiao-Ling; HANCOCK, Gregory. Plastic mechanism analysis of T-joints in RHS under concentrated force. **Steel Structures: Journal of Singapore Structural Steel Society**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 31-46, 1991.
- [33] ZHAO, Xiao-Ling; HANCOCK, Gregory. Plastic Mechanism analysis of T-joints in RHS subject to combined bending and concentrated force. In: International Symposium on Tubular Connections, 5., 1993, Nottingham, UK. **Proceedings...** Nottingham, 1993, p. 345-352.

- [34] LIU, Jianqiao; CHEN, C.; SHAO, Yongbo; YUAN, W. Determination of Yield Lines for Circular Tubular T-joints under Axial Compression. **Structural Longevity**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 129–137, 2009.
- [35] MOUTY, Jean. Calcul des charges ultime des assemblages soude's de profiles creux carre's et rectangulaires. **Construction Métallique**, Paris, France, v. 1, n. 2, p. 37–58, 1976.
- [36] MOUTY, Jean. Theoretical prediction of welded joint strength. In: International Symposium on Hollow Structural Sections, 1. **Proceedings...** Toronto, 1977.
- [37] YURA, Joseph; ZETTLEMOYER, Nicholas; EDWARDS, I.F. Ultimate capacity equations for tubular joints. In: Offshore Technology Conference, 1., 1980, Houston, Texas. **Proceedings...** Houston, 1980.
- [38] YURA, Joseph; ZETTLEMOYER, Nicholas; EDWARDS, I.F. Ultimate capacity of circular tubular joints. **Journal of the Structural Division**, [S.l.], v. 107, n. 10, p. 1965–1985, 1981.
- [39] KOROL, Robert; MIRZA, Farooque. A. Finite element analysis of RHS T-joints. **Journal of Structural Engineering**, v. 108, n. 9, p. 2081-2098, 1982.
- [40] LU, L. H; DE WINKEL, G.D., YU Y., WARDENIER, J. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints. In: International Symposium on Tubular Structures, 6., 1994, Melbourne, Australia. **Proceedings...** Melbourne, 1994
- [41] ZHAO, Xiao-Ling. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 53, p. 149–165, 2000.
- [42] ZHAO, Xiao-Ling. **The behaviour of cold-formed RHS beams under combined actions**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The University of Sydney, Sydney, 1992.
- [43] INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), 2., 1989, Helsinki. **Design recommendations for hollow section joints - predominantly statically loaded**. Helsinki: IIW Subcommission XV-E, 1989.
- [44] INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), 3., 2009, Singapore. **Static design procedure for welded hollow-section joints - Recommendations**. Singapore: IIW Subcommission VX-E, 2009.
- [45] ZHAO, Xiao-Ling; WARDENIER, Jaap; PACKER, Jeffrey; VAN DER VEGTE, Addie. Current static design guidance for hollow-section joints. **Structures and Buildings**, [S.l.], v. 163, n. 6, p. 361-373, dez. 2010.

- [46] WARDENIER, Jaap; VAN DER VEGTE, Addie; PACKER, Jeffrey; ZHAO, Xiao-Ling. Background of the new RHS joint strength equations in the IIW (2009) recommendations. In: International Symposium on Tubular Structures, 13., 2010, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong, 2010.
- [47] ZHAO, Xiao-Ling; HANCOCK, Gregory. T-joints in rectangular hollow sections subject to combined actions. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 117, n. 8, p. 2258-2277, 1991.
- [48] WARDENIER, Jaap; KUROBANE, Yoshiaki; PACKER, Jeffrey; VAN DER VEGTE, Addie; ZHAO, Xiao-Ling. **Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading**. 1. ed. [S.l.]: CIDECT, 1991.
- [49] PACKER, Jeffrey; WARDENIER, Jaap. Design rules for welds in RHS K, T, Y and X connections. **Welding in the World - Le Soudage Dans Le Monde**, [S.l.], v. 31, n. 4, p. 293-296, 1993.
- [50] KOSTESKI, Nikola; PACKER, Jeffrey; PUTHLI, Ramgopal. A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 59, 2003.
- [51] MASHIRI, Fidelis Rutendo; ZHAO, Xiao-Ling. Plastic Mechanism Analysis of Welded Thin-Walled T-Joint Made up of Circular Braces and Square Chords under In Plane Bending. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 42, p. 759-783, 2004.
- [52] LIU, D. K.; WARDENIER, Jaap; VAN DER VEGTE, Addie. New Chord Stress Functions for Rectangular Hollow Section Joints. In: International Offshore and Polar Engineering Conference, 14., 2004, Toulon. **Proceedings...** Toulon, 2004.
- [53] SHAO, Yong-Bo. Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular "T"- and K-joints under axial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 63, p. 1351-1360, 2006.
- [54] BU, Xiao-Ding; PACKER, Jeffrey. Chord end distance effect on RHS connections. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 168, 2020.
- [55] NUNES, Gabriel Vieira. **Análise numérica paramétrica de ligações tipo "T", "K" e "KT" compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- [56] NUNES, Gabriel Vieira. **Análise teórica-experimental de ligações com perfis metálicos tubulares (retangulares e circulares) considerando o efeito do carregamento do banzo**. 2017. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

- [57] PEREIRA, Daniel José Rocha. **Análise paramétrica de ligações tipo “T” compostas por perfis tubulares paredes esbeltas**. 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- [58] NETO, João Batista da Silva. **Análise numérica paramétrica de ligações do tipo “T” com carga no banzo**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- [59] GUERRA, Messias Junio Lopes. **Estudo de ligações T compostas de seções tubulares de paredes esbeltas**. 2020. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- [60] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 10088-1**: Stainless steels - Part 1: List of stainless steels. Brussels, 2005.
- [61] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 10027-2**: Designation systems for steels – Part 2: Steels numbers. Brussels, 1992.
- [62] INSTITUTE, The Steel Construction. **Design Manual for Structural Stainless Steel**, 4. ed., Ascot, UK: SCI, 2017.
- [63] AFSHAN, Sheida. **Structural Behaviour of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members**. 2013. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Imperial College London, Londres, 2013.
- [64] GARDNER, Leroy. The use of stainless steel in structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 45-55, 2005.
- [65] RASMUSSEN, Kim J. R. Recent research on stainless steel tubular structures. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 54, n. 1, p. 75-88, 2000.
- [66] RASMUSSEN, Kim J. R.; HASHAM, Anthony. S. Tests of X- and K-joints in CHS stainless steel tubes. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 127, n. 10, p. 1183-1189, 2001.
- [67] RASMUSSEN, Kim J. R.; YOUNG, Ben. Tests of X- and K-joints in SHS stainless steel tubes. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 127, n. 10, p. 1173-1182, 2001.
- [68] PACKER, Jeffrey; WARDENIER, Jaap; KUROBANE, Yoshiaki; DUTTA, D; YEOMANS, N. **Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading**. 1. ed. [S.l.]: CIDECT, 1992.

- [69] FENG, Ran. **Design of cold-formed stainless steel tubular joints**. 2008. 399 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The University of Hong Kong, Hong Kong, 2008.
- [70] FENG, Ran; YOUNG, Ben. Experimental investigation of cold-formed stainless steel tubular T-joints. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 46, n. 10, p. 1129-1142, 2008.
- [71] FENG, Ran; YOUNG, Ben. Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular T and X Joints. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 67, n. 3, p. 421-436, 2011.
- [72] FENG, Ran; LIU, Yuexin; ZHU, Jihua. Tests of CHS-to-SHS tubular connections in stainless steel. **Engineering Structures**, [S.l.] v. 199, n. 109590, 2019.
- [73] FENG, Ran; HUANG, Zhipeng; CHEN, Zhenming; ROY, Krishanu; CHEN, Boshan; LIM, James. Finite-element analysis and design of stainless-steel CHS-to-SHS hybrid tubular joints under axial compression. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 151, n. 106728, 2020.
- [74] FENG, Ran; WU, Chaoqun; CHEN, Zhenming; ROY, Krishanu; CHEN, Boshan; LIM, James. An experimental study on stainless steel hybrid tubular joints with square braces and circular chord. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 155, 2020.
- [75] FENG, Ran; WU, Chaoqun; CHEN, Zhenming; ROY, Krishanu; CHEN, Boshan; LIM, James. Finite element modelling and proposed design rules of stainless steel hybrid tubular joints with square braces and circular chord. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 179, 2021.
- [76] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [77] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 370-21**: Specification for Structural Stainless Steel Buildings. EUA, 2021.
- [78] TYLEK, Izabela; KUCHTA, Krzysztof. Mechanical properties of structural stainless steels. **Czasopismo Techniczne**, [S.l.], v. 4-B, n. 12, p. 59-80, 2014.
- [79] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892**: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.
- [80] HUANG, Yun'er; YOUNG, Ben. The art of coupon tests. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 96, p. 159-175, 2014.

- [81] FRONIUS. **Soldagem TIG**: cordões limpos, conexões estáveis. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/mundo-da-soldagem/soldagem-tig>>. [S.d.]. Acesso em: 14 dez. 2023.
- [82] PANDEY, Madhup; YOUNG, Ben. Tests of cold-formed high strength steel tubular T-joints. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 143, n. 106200, 2019.
- [83] ANSYS V.16.2. **ANSYS – Inc. Theory Reference**, 2015.
- [84] SEGURA, Guillermo; ARRAYAGO, Itsaso; MIRAMBELL, Enrique. New proposal for the bending moment capacity of tubular T-joints in carbon steel and stainless steel structures. **Thin-Walled Structures**, [S.l.], v. 187, n. 110667, 2023.
- [85] LESANI, Mohammad; BAHAAARI, Mohammad; SHOKRIED, Mahmood. Detail investigation on un-stiffened T/Y tubular joints behavior under axial compressive loads. **Journal of Constructional Steel Research**, [S.l.], v. 80, p. 91-99, 2013.
- [86] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding**. Miami, 2006.
- [87] MILLSTOCK STAINLESS. **Stainless steel sections**. Willenhall, 2024.
- [88] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3**: Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels. Brussels, 2023.
- [89] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode**: Basis of Structural Design. Brussels, 2002.
- [90] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE/SEI 7-10**: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. New York, 2016.
- [91] MEIMAND, Vahid; SCHAFER, Ben. Impact of load combinations on structural reliability determined from testing cold-formed steel components. **Structural Safety**, [S.l.], v. 48, p. 25-32, 2014.
- [92] BARTLETT, Michael; DEXTER, Robert; GRAESER, Mark; JELINEK, Jason; SCHIMIDT, Bradley; GALAMBOS, Theodore. Updating Standard Shape Material Properties Database for Design and Reliability. **Engineering Journal**, [S.l.], v. 40, p. 2-14, 2003.
- [93] ELLINGWOOD, Bruce; GALAMBOS, Theodore. Probability-based criteria for structural design. **Structural Safety**, Amsterdam, v. 1, p. 15-26, 1982.

APÊNDICE A

Tabela 12 – Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continua)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C50x1.5-B40x1.5	50	1.5	40	1.5	0.8	33.33
TN-C50x2-B40x2	50	2	40	2	0.8	25.00
TN-C50x2.5-B40x2.5	50	2.5	40	2.5	0.8	20.00
TN-C60x1.5-B48x1.5	60	1.5	48	1.5	0.8	40.00
TN-C60x2-B48x2	60	2	48	2	0.8	30.00
TN-C60x2.5-B48x2.5	60	2.5	48	2.5	0.8	24.00
TN-C70x1.5-B56x1.5	70	1.5	56	1.5	0.8	46.67
TN-C70x2-B56x2	70	2	56	2	0.8	35.00
TN-C70x2.5-B56x2.5	70	2.5	56	2.5	0.8	28.00
TN-C70x3-B56x3	70	3	56	3	0.8	23.33
TN-C80x2-B64x2	80	2	64	2	0.8	40.00
TN-C80x2.5-B64x2.5	80	2.5	64	2.5	0.8	32.00
TN-C80x3-B64x3	80	3	64	3	0.8	26.67
TN-C80x3.5-B64x3.5	80	3.5	64	3.5	0.8	22.86
TN-C90x2.5-B72x2.5	90	2.5	72	2.5	0.8	36.00
TN-C90x3-B72x3	90	3	72	3	0.8	30.00
TN-C90x3.5-B72x3.5	90	3.5	72	3.5	0.8	25.71
TN-C90x4-B72x4	90	4	72	4	0.8	22.50
TN-C100x2.5-B80x2.5	100	2.5	80	2.5	0.8	40.00
TN-C100x3-B80x3	100	3	80	3	0.8	33.33
TN-C100x4-B80x4	100	4	80	4	0.8	25.00
TN-C100x5-B80x5	100	5	80	5	0.8	20.00
TN-C120x3-B96x3	120	3	96	3	0.8	40.00
TN-C120x4-B96x4	120	4	96	4	0.8	30.00
TN-C120x4.5-B96x4.5	120	4.5	96	4.5	0.8	26.67
TN-C120x5-B96x5	120	5	96	5	0.8	24.00
TN-C140x3.5-B112x3.5	140	3.5	112	3.5	0.8	40.00
TN-C140x4-B112x4	140	4	112	4	0.8	35.00
TN-C140x5-B112x5	140	5	112	5	0.8	28.00
TN-C140x6-B112x6	140	6	112	6	0.8	23.33
TN-C150x4-B120x4	150	4	120	4	0.8	37.50
TN-C150x4.5-B120x4.5	150	4.5	120	4.5	0.8	33.33
TN-C150x5-B120x5	150	5	120	5	0.8	30.00
TN-C150x6-B120x6	150	6	120	6	0.8	25.00

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C160x4-B128x4	160	4	128	4	0.8	40.00
TN-C160x5-B128x5	160	5	128	5	0.8	32.00
TN-C160x6-B128x6	160	6	128	6	0.8	26.67
TN-C160x8-B128x8	160	8	128	8	0.8	20.00
TN-C180x4-B144x4	180	4	144	4	0.8	45.00
TN-C180x5-B144x5	180	5	144	5	0.8	36.00
TN-C180x6-B144x6	180	6	144	6	0.8	30.00
TN-C180x8-B144x8	180	8	144	8	0.8	22.50
TN-C200x5-B160x5	200	5	160	5	0.8	40.00
TN-C200x6-B160x6	200	6	160	6	0.8	33.33
TN-C200x8-B160x8	200	8	160	8	0.8	25.00
TN-C200x10-B160x10	200	10	160	10	0.8	20.00
TN-C220x5-B176x5	220	5	176	5	0.8	44.00
TN-C220x6-B176x6	220	6	176	6	0.8	36.67
TN-C220x8-B176x8	220	8	176	8	0.8	27.50
TN-C220x10-B176x10	220	10	176	10	0.8	22.00
TN-C250x6-B200x6	250	6	200	6	0.8	41.67
TN-C250x8-B200x8	250	8	200	8	0.8	31.25
TN-C250x10-B200x10	250	10	200	10	0.8	25.00
TN-C250x12-B200x12	250	12	200	12	0.8	20.83
TN-C300x6-B240x6	300	6	240	6	0.8	50.00
TN-C300x8-B240x8	300	8	240	8	0.8	37.50
TN-C300x10-B240x10	300	10	240	10	0.8	30.00
TN-C300x12-B240x12	300	12	240	12	0.8	25.00
TN-C50x1.5-B37.5x1.5	50	1.5	37.5	1.5	0.75	33.33
TN-C50x2-B37.5x2	50	2	37.5	2	0.75	25.00
TN-C50x2.5-B37.5x2.5	50	2.5	37.5	2.5	0.75	20.00
TN-C60x1.5-B45x1.5	60	1.5	45	1.5	0.75	40.00
TN-C60x2-B45x2	60	2	45	2	0.75	30.00
TN-C60x2.5-B45x2.5	60	2.5	45	2.5	0.75	24.00
TN-C70x1.5-B52.5x1.5	70	1.5	52.5	1.5	0.75	46.67
TN-C70x2-B52.5x2	70	2	52.5	2	0.75	35.00
TN-C70x2.5-B52.5x2.5	70	2.5	52.5	2.5	0.75	28.00
TN-C70x3-B52.5x3	70	3	52.5	3	0.75	23.33
TN-C80x2-B60x2	80	2	60	2	0.75	40.00
TN-C80x2.5-B60x2.5	80	2.5	60	2.5	0.75	32.00
TN-C80x3-B60x3	80	3	60	3	0.75	26.67
TN-C80x3.5-B60x3.5	80	3.5	60	3.5	0.75	22.86

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C90x2.5-B67.5x2.5	90	2.5	67.5	2.5	0.75	36.00
TN-C90x3-B67.5x3	90	3	67.5	3	0.75	30.00
TN-C90x3.5-B67.5x3.5	90	3.5	67.5	3.5	0.75	25.71
TN-C90x4-B67.5x4	90	4	67.5	4	0.75	22.50
TN-C100x2.5-B75x2.5	100	2.5	75	2.5	0.75	40.00
TN-C100x3-B75x3	100	3	75	3	0.75	33.33
TN-C100x4-B75x4	100	4	75	4	0.75	25.00
TN-C100x5-B75x5	100	5	75	5	0.75	20.00
TN-C120x3-B90x3	120	3	90	3	0.75	40.00
TN-C120x4-B90x4	120	4	90	4	0.75	30.00
TN-C120x4.5-B90x4.5	120	4.5	90	4.5	0.75	26.67
TN-C120x5-B90x5	120	5	90	5	0.75	24.00
TN-C140x3.5-B105x3.5	140	3.5	105	3.5	0.75	40.00
TN-C140x4-B105x4	140	4	105	4	0.75	35.00
TN-C140x5-B105x5	140	5	105	5	0.75	28.00
TN-C140x6-B105x6	140	6	105	6	0.75	23.33
TN-C150x4-B112.5x4	150	4	112.5	4	0.75	37.50
TN-C150x4.5-B112.5x4.5	150	4.5	112.5	4.5	0.75	33.33
TN-C150x5-B112.5x5	150	5	112.5	5	0.75	30.00
TN-C150x6-B112.5x6	150	6	112.5	6	0.75	25.00
TN-C160x4-B120x4	160	4	120	4	0.75	40.00
TN-C160x5-B120x5	160	5	120	5	0.75	32.00
TN-C160x6-B120x6	160	6	120	6	0.75	26.67
TN-C160x8-B120x8	160	8	120	8	0.75	20.00
TN-C180x4-B135x4	180	4	135	4	0.75	45.00
TN-C180x5-B135x5	180	5	135	5	0.75	36.00
TN-C180x6-B135x6	180	6	135	6	0.75	30.00
TN-C180x8-B135x8	180	8	135	8	0.75	22.50
TN-C200x5-B150x5	200	5	150	5	0.75	40.00
TN-C200x6-B150x6	200	6	150	6	0.75	33.33
TN-C200x8-B150x8	200	8	150	8	0.75	25.00
TN-C200x10-B150x10	200	10	150	10	0.75	20.00
TN-C220x5-B165x5	220	5	165	5	0.75	44.00
TN-C220x6-B165x6	220	6	165	6	0.75	36.67
TN-C220x8-B165x8	220	8	165	8	0.75	27.50
TN-C220x10-B165x10	220	10	165	10	0.75	22.00
TN-C250x6-B187.5x6	250	6	187.5	6	0.75	41.67
TN-C250x8-B187.5x8	250	8	187.5	8	0.75	31.25

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C250x10-B187.5x10	250	10	187.5	10	0.75	25.00
TN-C250x12-B187.5x12	250	12	187.5	12	0.75	20.83
TN-C300x6-B225x6	300	6	225	6	0.75	50.00
TN-C300x8-B225x8	300	8	225	8	0.75	37.50
TN-C300x10-B225x10	300	10	225	10	0.75	30.00
TN-C300x12-B225x12	300	12	225	12	0.75	25.00
TN-C50x1.5-B35x1.5	50	1.5	35	1.5	0.7	33.33
TN-C50x2-B35x2	50	2	35	2	0.7	25.00
TN-C50x2.5-B35x2.5	50	2.5	35	2.5	0.7	20.00
TN-C60x1.5-B42x1.5	60	1.5	42	1.5	0.7	40.00
TN-C60x2-B42x2	60	2	42	2	0.7	30.00
TN-C60x2.5-B42x2.5	60	2.5	42	2.5	0.7	24.00
TN-C70x1.5-B49x1.5	70	1.5	49	1.5	0.7	46.67
TN-C70x2-B49x2	70	2	49	2	0.7	35.00
TN-C70x2.5-B49x2.5	70	2.5	49	2.5	0.7	28.00
TN-C70x3-B49x3	70	3	49	3	0.7	23.33
TN-C80x2-B56x2	80	2	56	2	0.7	40.00
TN-C80x2.5-B56x2.5	80	2.5	56	2.5	0.7	32.00
TN-C80x3-B56x3	80	3	56	3	0.7	26.67
TN-C80x3.5-B56x3.5	80	3.5	56	3.5	0.7	22.86
TN-C90x2.5-B63x2.5	90	2.5	63	2.5	0.7	36.00
TN-C90x3-B63x3	90	3	63	3	0.7	30.00
TN-C90x3.5-B63x3.5	90	3.5	63	3.5	0.7	25.71
TN-C90x4-B63x4	90	4	63	4	0.7	22.50
TN-C100x2.5-B70x2.5	100	2.5	70	2.5	0.7	40.00
TN-C100x3-B70x3	100	3	70	3	0.7	33.33
TN-C100x4-B70x4	100	4	70	4	0.7	25.00
TN-C100x5-B70x5	100	5	70	5	0.7	20.00
TN-C120x3-B84x3	120	3	84	3	0.7	40.00
TN-C120x4-B84x4	120	4	84	4	0.7	30.00
TN-C120x4.5-B84x4.5	120	4.5	84	4.5	0.7	26.67
TN-C120x5-B84x5	120	5	84	5	0.7	24.00
TN-C140x3.5-B98x3.5	140	3.5	98	3.5	0.7	40.00
TN-C140x4-B98x4	140	4	98	4	0.7	35.00
TN-C140x5-B98x5	140	5	98	5	0.7	28.00
TN-C140x6-B98x6	140	6	98	6	0.7	23.33
TN-C150x4-B105x4	150	4	105	4	0.7	37.50
TN-C150x4.5-B105x4.5	150	4.5	105	4.5	0.7	33.33

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C150x5-B105x5	150	5	105	5	0.7	30.00
TN-C150x6-B105x6	150	6	105	6	0.7	25.00
TN-C160x4-B112x4	160	4	112	4	0.7	40.00
TN-C160x5-B112x5	160	5	112	5	0.7	32.00
TN-C160x6-B112x6	160	6	112	6	0.7	26.67
TN-C160x8-B112x8	160	8	112	8	0.7	20.00
TN-C180x4-B126x4	180	4	126	4	0.7	45.00
TN-C180x5-B126x5	180	5	126	5	0.7	36.00
TN-C180x6-B126x6	180	6	126	6	0.7	30.00
TN-C180x8-B126x8	180	8	126	8	0.7	22.50
TN-C200x5-B140x5	200	5	140	5	0.7	40.00
TN-C200x6-B140x6	200	6	140	6	0.7	33.33
TN-C200x8-B140x8	200	8	140	8	0.7	25.00
TN-C200x10-B140x10	200	10	140	10	0.7	20.00
TN-C220x5-B154x5	220	5	154	5	0.7	44.00
TN-C220x6-B154x6	220	6	154	6	0.7	36.67
TN-C220x8-B154x8	220	8	154	8	0.7	27.50
TN-C220x10-B154x10	220	10	154	10	0.7	22.00
TN-C250x6-B175x6	250	6	175	6	0.7	41.67
TN-C250x8-B175x8	250	8	175	8	0.7	31.25
TN-C250x10-B175x10	250	10	175	10	0.7	25.00
TN-C250x12-B175x12	250	12	175	12	0.7	20.83
TN-C300x6-B210x6	300	6	210	6	0.7	50.00
TN-C300x8-B210x8	300	8	210	8	0.7	37.50
TN-C300x10-B210x10	300	10	210	10	0.7	30.00
TN-C300x12-B210x12	300	12	210	12	0.7	25.00
TN-C50x1.5-B30x1.5	50	1.5	30	1.5	0.6	33.33
TN-C50x2-B30x2	50	2	30	2	0.6	25.00
TN-C50x2.5-B30x2.5	50	2.5	30	2.5	0.6	20.00
TN-C60x1.5-B36x1.5	60	1.5	36	1.5	0.6	40.00
TN-C60x2-B36x2	60	2	36	2	0.6	30.00
TN-C60x2.5-B36x2.5	60	2.5	36	2.5	0.6	24.00
TN-C70x1.5-B42x1.5	70	1.5	42	1.5	0.6	46.67
TN-C70x2-B42x2	70	2	42	2	0.6	35.00
TN-C70x2.5-B42x2.5	70	2.5	42	2.5	0.6	28.00
TN-C70x3-B42x3	70	3	42	3	0.6	23.33
TN-C80x2-B48x2	80	2	48	2	0.6	40.00
TN-C80x2.5-B48x2.5	80	2.5	48	2.5	0.6	32.00

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C80x3-B48x3	80	3	48	3	0.6	26.67
TN-C80x3.5-B48x3.5	80	3.5	48	3.5	0.6	22.86
TN-C90x2.5-B54x2.5	90	2.5	54	2.5	0.6	36.00
TN-C90x3-B54x3	90	3	54	3	0.6	30.00
TN-C90x3.5-B54x3.5	90	3.5	54	3.5	0.6	25.71
TN-C90x4-B54x4	90	4	54	4	0.6	22.50
TN-C100x2.5-B60x2.5	100	2.5	60	2.5	0.6	40.00
TN-C100x3-B60x3	100	3	60	3	0.6	33.33
TN-C100x4-B60x4	100	4	60	4	0.6	25.00
TN-C100x5-B60x5	100	5	60	5	0.6	20.00
TN-C120x3-B72x3	120	3	72	3	0.6	40.00
TN-C120x4-B72x4	120	4	72	4	0.6	30.00
TN-C120x4.5-B72x4.5	120	4.5	72	4.5	0.6	26.67
TN-C120x5-B72x5	120	5	72	5	0.6	24.00
TN-C140x3.5-B84x3.5	140	3.5	84	3.5	0.6	40.00
TN-C140x4-B84x4	140	4	84	4	0.6	35.00
TN-C140x5-B84x5	140	5	84	5	0.6	28.00
TN-C140x6-B84x6	140	6	84	6	0.6	23.33
TN-C150x4-B90x4	150	4	90	4	0.6	37.50
TN-C150x4.5-B90x4.5	150	4.5	90	4.5	0.6	33.33
TN-C150x5-B90x5	150	5	90	5	0.6	30.00
TN-C150x6-B90x6	150	6	90	6	0.6	25.00
TN-C160x4-B96x4	160	4	96	4	0.6	40.00
TN-C160x5-B96x5	160	5	96	5	0.6	32.00
TN-C160x6-B96x6	160	6	96	6	0.6	26.67
TN-C160x8-B96x8	160	8	96	8	0.6	20.00
TN-C180x4-B108x4	180	4	108	4	0.6	45.00
TN-C180x5-B108x5	180	5	108	5	0.6	36.00
TN-C180x6-B108x6	180	6	108	6	0.6	30.00
TN-C180x8-B108x8	180	8	108	8	0.6	22.50
TN-C200x5-B120x5	200	5	120	5	0.6	40.00
TN-C200x6-B120x6	200	6	120	6	0.6	33.33
TN-C200x8-B120x8	200	8	120	8	0.6	25.00
TN-C200x10-B120x10	200	10	120	10	0.6	20.00
TN-C220x5-B132x5	220	5	132	5	0.6	44.00
TN-C220x6-B132x6	220	6	132	6	0.6	36.67
TN-C220x8-B132x8	220	8	132	8	0.6	27.50
TN-C220x10-B132x10	220	10	132	10	0.6	22.00

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C250x6-B150x6	250	6	150	6	0.6	41.67
TN-C250x8-B150x8	250	8	150	8	0.6	31.25
TN-C250x10-B150x10	250	10	150	10	0.6	25.00
TN-C250x12-B150x12	250	12	150	12	0.6	20.83
TN-C300x6-B180x6	300	6	180	6	0.6	50.00
TN-C300x8-B180x8	300	8	180	8	0.6	37.50
TN-C300x10-B180x10	300	10	180	10	0.6	30.00
TN-C300x12-B180x12	300	12	180	12	0.6	25.00
TN-C50x1.5-B25x1.5	50	1.5	25	1.5	0.5	33.33
TN-C50x2-B25x2	50	2	25	2	0.5	25.00
TN-C50x2.5-B25x2.5	50	2.5	25	2.5	0.5	20.00
TN-C60x1.5-B30x1.5	60	1.5	30	1.5	0.5	40.00
TN-C60x2-B30x2	60	2	30	2	0.5	30.00
TN-C60x2.5-B30x2.5	60	2.5	30	2.5	0.5	24.00
TN-C70x1.5-B35x1.5	70	1.5	35	1.5	0.5	46.67
TN-C70x2-B35x2	70	2	35	2	0.5	35.00
TN-C70x2.5-B35x2.5	70	2.5	35	2.5	0.5	28.00
TN-C70x3-B35x3	70	3	35	3	0.5	23.33
TN-C80x2-B40x2	80	2	40	2	0.5	40.00
TN-C80x2.5-B40x2.5	80	2.5	40	2.5	0.5	32.00
TN-C80x3-B40x3	80	3	40	3	0.5	26.67
TN-C80x3.5-B40x3.5	80	3.5	40	3.5	0.5	22.86
TN-C90x2.5-B45x2.5	90	2.5	45	2.5	0.5	36.00
TN-C90x3-B45x3	90	3	45	3	0.5	30.00
TN-C90x3.5-B45x3.5	90	3.5	45	3.5	0.5	25.71
TN-C90x4-B45x4	90	4	45	4	0.5	22.50
TN-C100x2.5-B50x2.5	100	2.5	50	2.5	0.5	40.00
TN-C100x3-B50x3	100	3	50	3	0.5	33.33
TN-C100x4-B50x4	100	4	50	4	0.5	25.00
TN-C100x5-B50x5	100	5	50	5	0.5	20.00
TN-C120x3-B60x3	120	3	60	3	0.5	40.00
TN-C120x4-B60x4	120	4	60	4	0.5	30.00
TN-C120x4.5-B60x4.5	120	4.5	60	4.5	0.5	26.67
TN-C120x5-B60x5	120	5	60	5	0.5	24.00
TN-C140x3.5-B70x3.5	140	3.5	70	3.5	0.5	40.00
TN-C140x4-B70x4	140	4	70	4	0.5	35.00
TN-C140x5-B70x5	140	5	70	5	0.5	28.00
TN-C140x6-B70x6	140	6	70	6	0.5	23.33

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C150x4-B75x4	150	4	75	4	0.5	37.50
TN-C150x4.5-B75x4.5	150	4.5	75	4.5	0.5	33.33
TN-C150x5-B75x5	150	5	75	5	0.5	30.00
TN-C150x6-B75x6	150	6	75	6	0.5	25.00
TN-C160x4-B80x4	160	4	80	4	0.5	40.00
TN-C160x5-B80x5	160	5	80	5	0.5	32.00
TN-C160x6-B80x6	160	6	80	6	0.5	26.67
TN-C160x8-B80x8	160	8	80	8	0.5	20.00
TN-C180x4-B90x4	180	4	90	4	0.5	45.00
TN-C180x5-B90x5	180	5	90	5	0.5	36.00
TN-C180x6-B90x6	180	6	90	6	0.5	30.00
TN-C180x8-B90x8	180	8	90	8	0.5	22.50
TN-C200x5-B100x5	200	5	100	5	0.5	40.00
TN-C200x6-B100x6	200	6	100	6	0.5	33.33
TN-C200x8-B100x8	200	8	100	8	0.5	25.00
TN-C200x10-B100x10	200	10	100	10	0.5	20.00
TN-C220x5-B110x5	220	5	110	5	0.5	44.00
TN-C220x6-B110x6	220	6	110	6	0.5	36.67
TN-C220x8-B110x8	220	8	110	8	0.5	27.50
TN-C220x10-B110x10	220	10	110	10	0.5	22.00
TN-C250x6-B125x6	250	6	125	6	0.5	41.67
TN-C250x8-B125x8	250	8	125	8	0.5	31.25
TN-C250x10-B125x10	250	10	125	10	0.5	25.00
TN-C250x12-B125x12	250	12	125	12	0.5	20.83
TN-C300x6-B150x6	300	6	150	6	0.5	50.00
TN-C300x8-B150x8	300	8	150	8	0.5	37.50
TN-C300x10-B150x10	300	10	150	10	0.5	30.00
TN-C300x12-B150x12	300	12	150	12	0.5	25.00
TN-C50x1.5-B20x1.5	50	1.5	20	1.5	0.4	33.33
TN-C50x2-B20x2	50	2	20	2	0.4	25.00
TN-C50x2.5-B20x2.5	50	2.5	20	2.5	0.4	20.00
TN-C60x1.5-B24x1.5	60	1.5	24	1.5	0.4	40.00
TN-C60x2-B24x2	60	2	24	2	0.4	30.00
TN-C60x2.5-B24x2.5	60	2.5	24	2.5	0.4	24.00
TN-C70x1.5-B28x1.5	70	1.5	28	1.5	0.4	46.67
TN-C70x2-B28x2	70	2	28	2	0.4	35.00
TN-C70x2.5-B28x2.5	70	2.5	28	2.5	0.4	28.00
TN-C70x3-B28x3	70	3	28	3	0.4	23.33

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (continuação)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C80x2-B32x2	80	2	32	2	0.4	40.00
TN-C80x2.5-B32x2.5	80	2.5	32	2.5	0.4	32.00
TN-C80x3-B32x3	80	3	32	3	0.4	26.67
TN-C80x3.5-B32x3.5	80	3.5	32	3.5	0.4	22.86
TN-C90x2.5-B36x2.5	90	2.5	36	2.5	0.4	36.00
TN-C90x3-B36x3	90	3	36	3	0.4	30.00
TN-C90x3.5-B36x3.5	90	3.5	36	3.5	0.4	25.71
TN-C90x4-B36x4	90	4	36	4	0.4	22.50
TN-C100x2.5-B40x2.5	100	2.5	40	2.5	0.4	40.00
TN-C100x3-B40x3	100	3	40	3	0.4	33.33
TN-C100x4-B40x4	100	4	40	4	0.4	25.00
TN-C100x5-B40x5	100	5	40	5	0.4	20.00
TN-C120x3-B48x3	120	3	48	3	0.4	40.00
TN-C120x4-B48x4	120	4	48	4	0.4	30.00
TN-C120x4.5-B48x4.5	120	4.5	48	4.5	0.4	26.67
TN-C120x5-B48x5	120	5	48	5	0.4	24.00
TN-C140x3.5-B56x3.5	140	3.5	56	3.5	0.4	40.00
TN-C140x4-B56x4	140	4	56	4	0.4	35.00
TN-C140x5-B56x5	140	5	56	5	0.4	28.00
TN-C140x6-B56x6	140	6	56	6	0.4	23.33
TN-C150x4-B60x4	150	4	60	4	0.4	37.50
TN-C150x4.5-B60x4.5	150	4.5	60	4.5	0.4	33.33
TN-C150x5-B60x5	150	5	60	5	0.4	30.00
TN-C150x6-B60x6	150	6	60	6	0.4	25.00
TN-C160x4-B64x4	160	4	64	4	0.4	40.00
TN-C160x5-B64x5	160	5	64	5	0.4	32.00
TN-C160x6-B64x6	160	6	64	6	0.4	26.67
TN-C160x8-B64x8	160	8	64	8	0.4	20.00
TN-C180x4-B72x4	180	4	72	4	0.4	45.00
TN-C180x5-B72x5	180	5	72	5	0.4	36.00
TN-C180x6-B72x6	180	6	72	6	0.4	30.00
TN-C180x8-B72x8	180	8	72	8	0.4	22.50
TN-C200x5-B80x5	200	5	80	5	0.4	40.00
TN-C200x6-B80x6	200	6	80	6	0.4	33.33
TN-C200x8-B80x8	200	8	80	8	0.4	25.00
TN-C200x10-B80x10	200	10	80	10	0.4	20.00
TN-C220x5-B88x5	220	5	88	5	0.4	44.00
TN-C220x6-B88x6	220	6	88	6	0.4	36.67

Tabela 12 - Dimensões das ligações nos modelos numéricos (conclusão)

Nomenclatura	$b_0=h_0$ (mm)	t_0 (mm)	$b_1=h_1$ (mm)	t_1 (mm)	β	2γ
TN-C220x8-B88x8	220	8	88	8	0.4	27.50
TN-C220x10-B88x10	220	10	88	10	0.4	22.00
TN-C250x6-B100x6	250	6	100	6	0.4	41.67
TN-C250x8-B100x8	250	8	100	8	0.4	31.25
TN-C250x10-B100x10	250	10	100	10	0.4	25.00
TN-C250x12-B100x12	250	12	100	12	0.4	20.83
TN-C300x6-B120x6	300	6	120	6	0.4	50.00
TN-C300x8-B120x8	300	8	120	8	0.4	37.50
TN-C300x10-B120x10	300	10	120	10	0.4	30.00
TN-C300x12-B120x12	300	12	120	12	0.4	25.00

APÊNDICE B

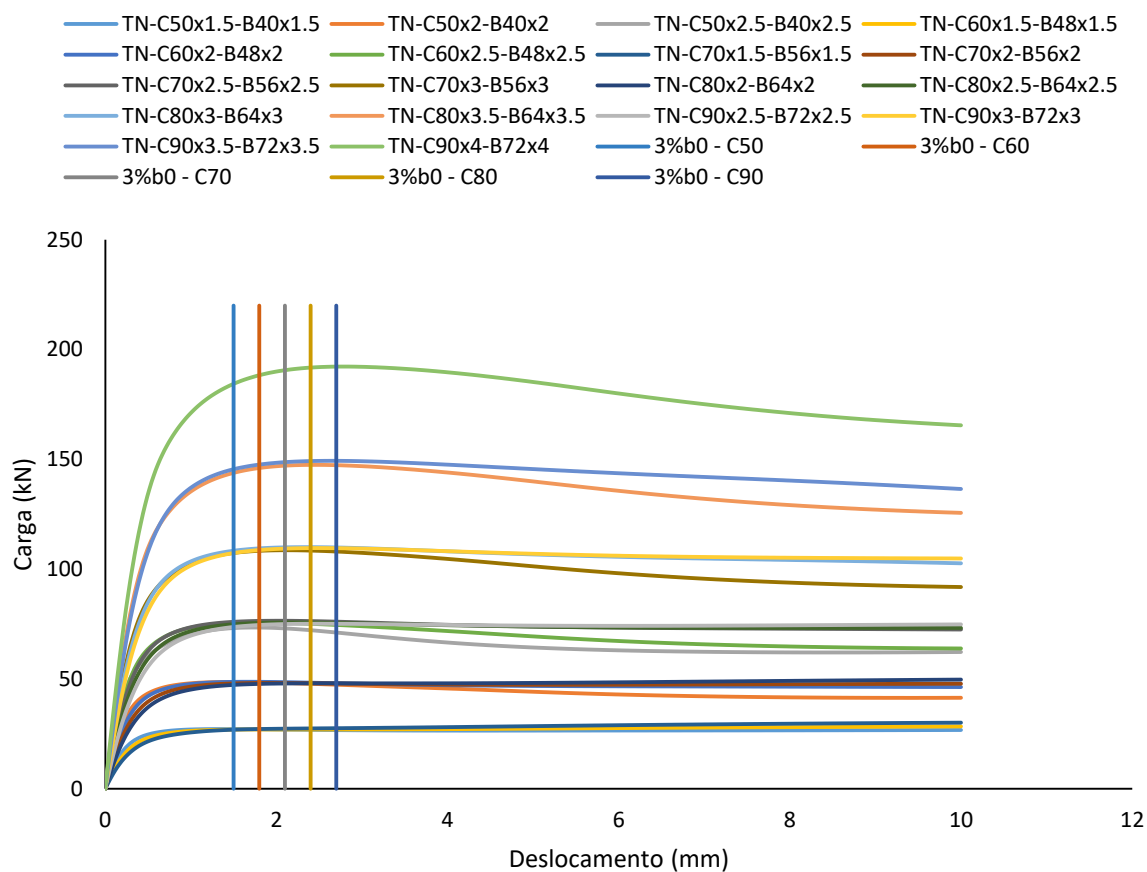


Figura 105 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 50 e 90 mm

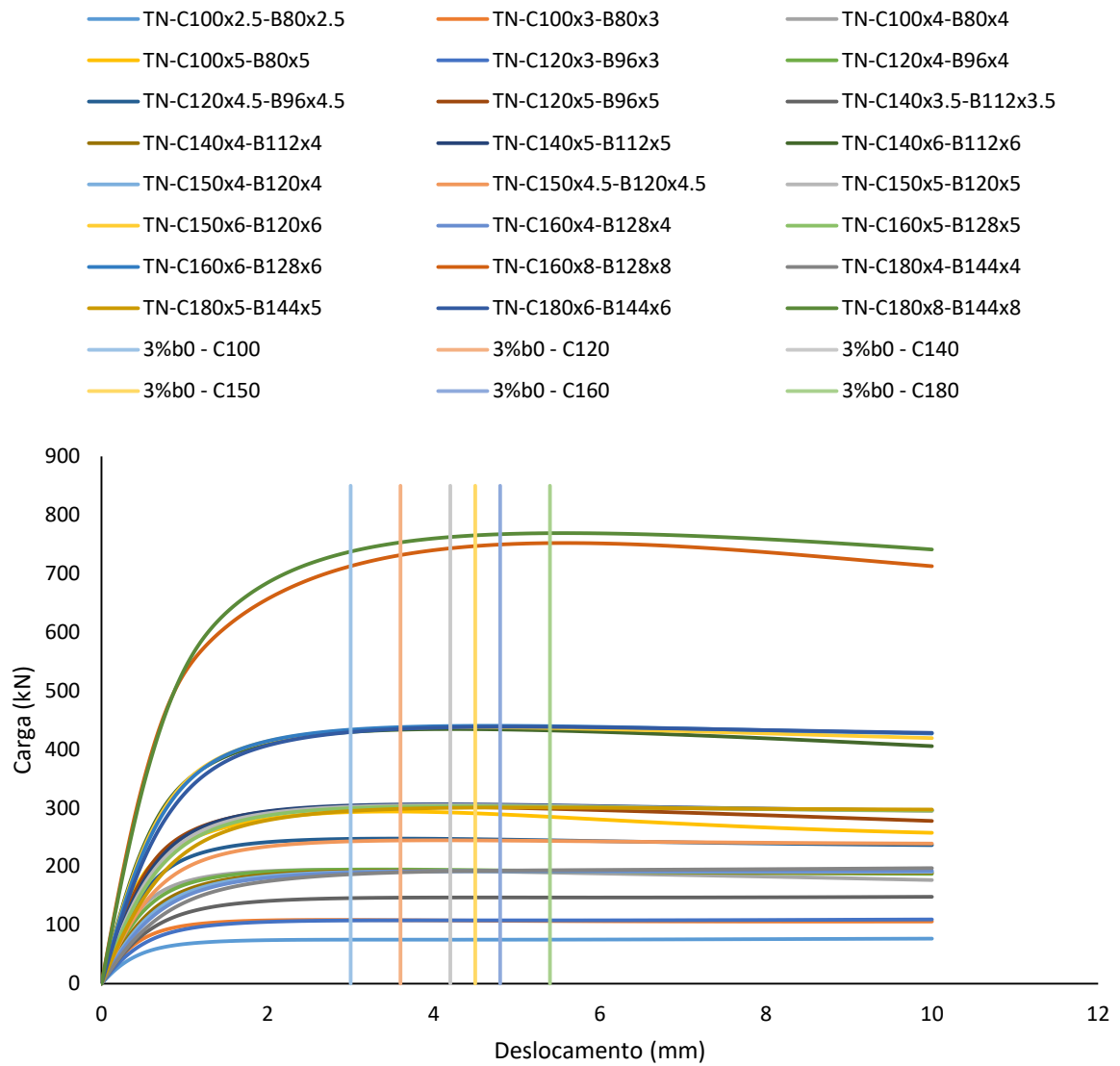


Figura 106 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 100 e 180 mm

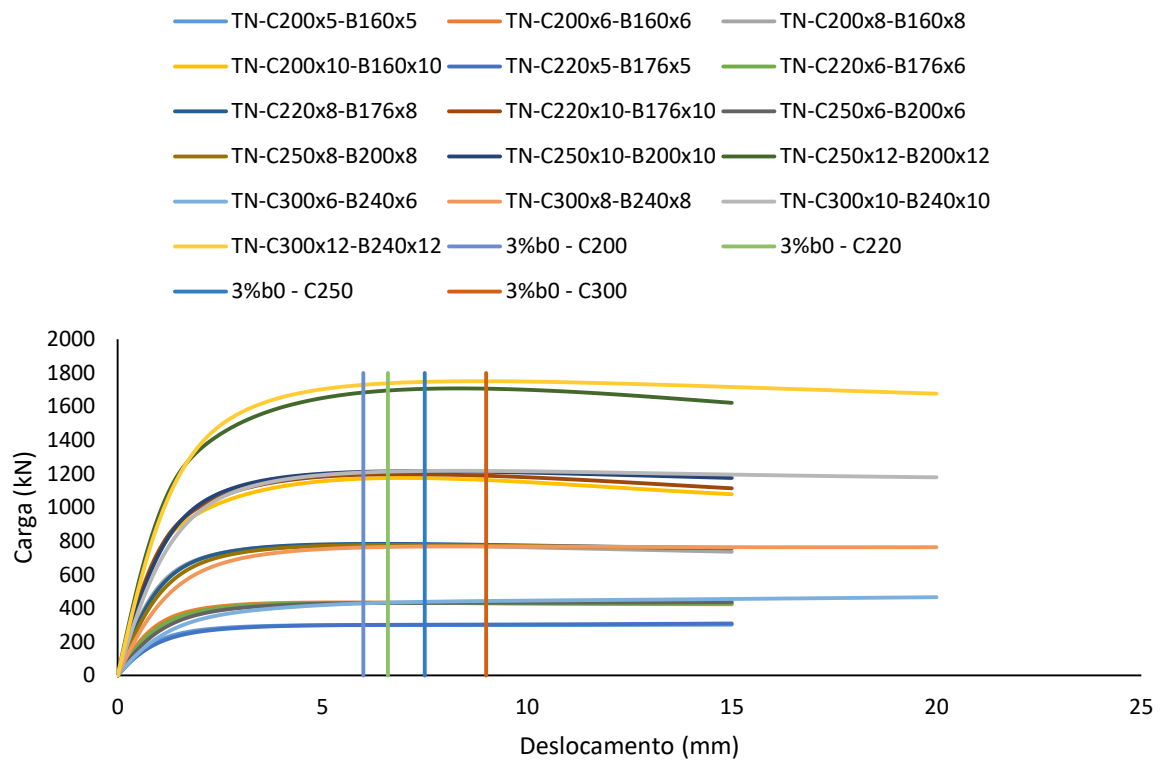


Figura 107 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,8$ e b_0 entre 200 e 300 mm

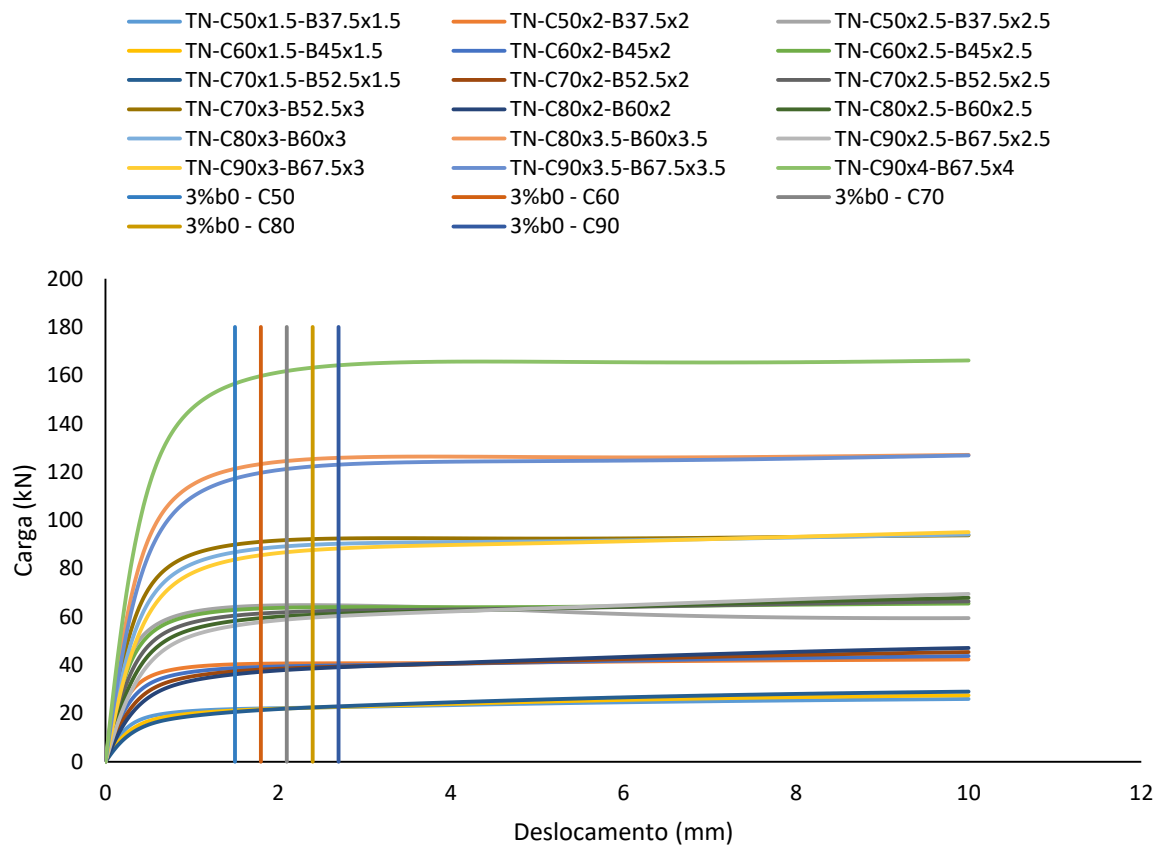


Figura 108 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 50 e 90 mm

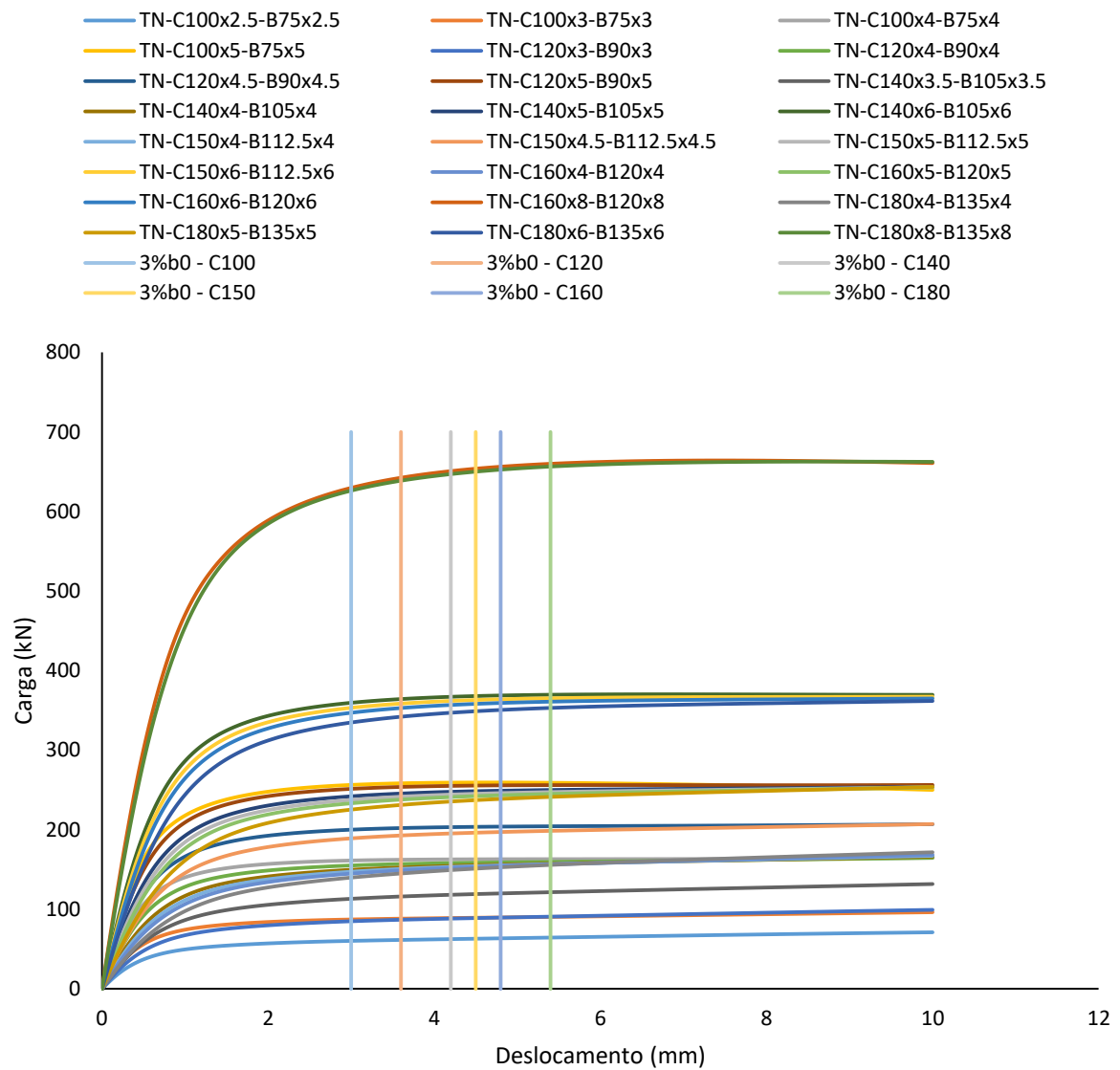


Figura 109 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 100 e 180 mm

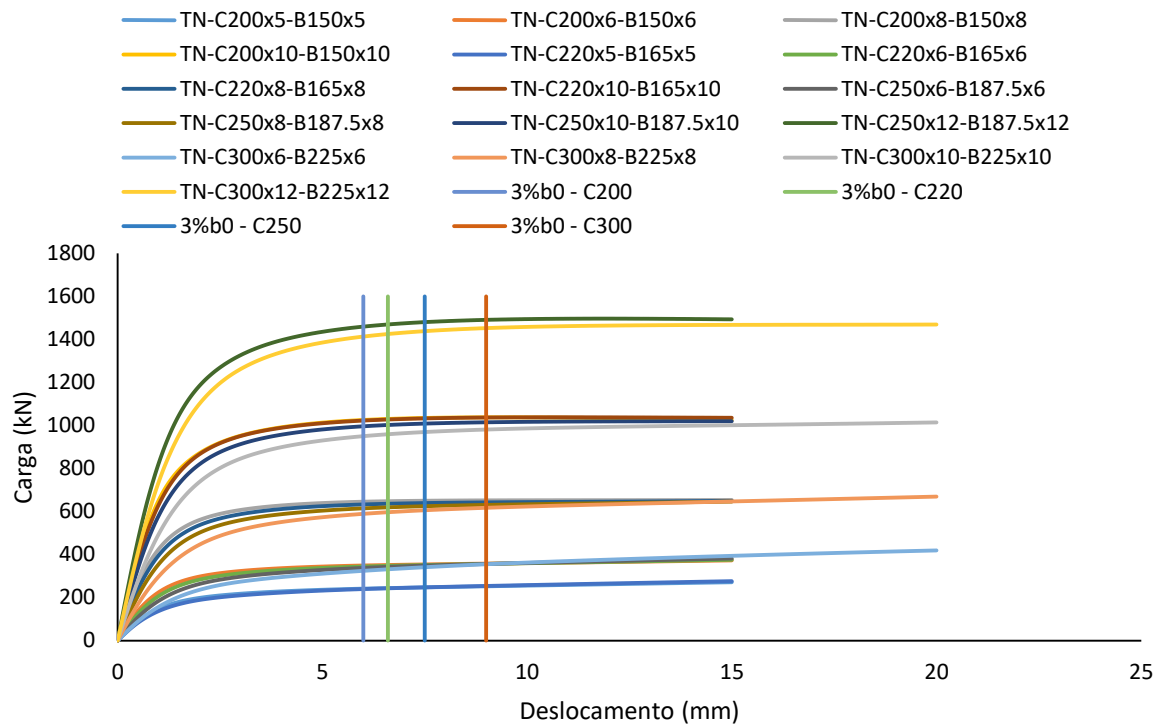


Figura 110 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,75$ e b_0 entre 200 e 300 mm

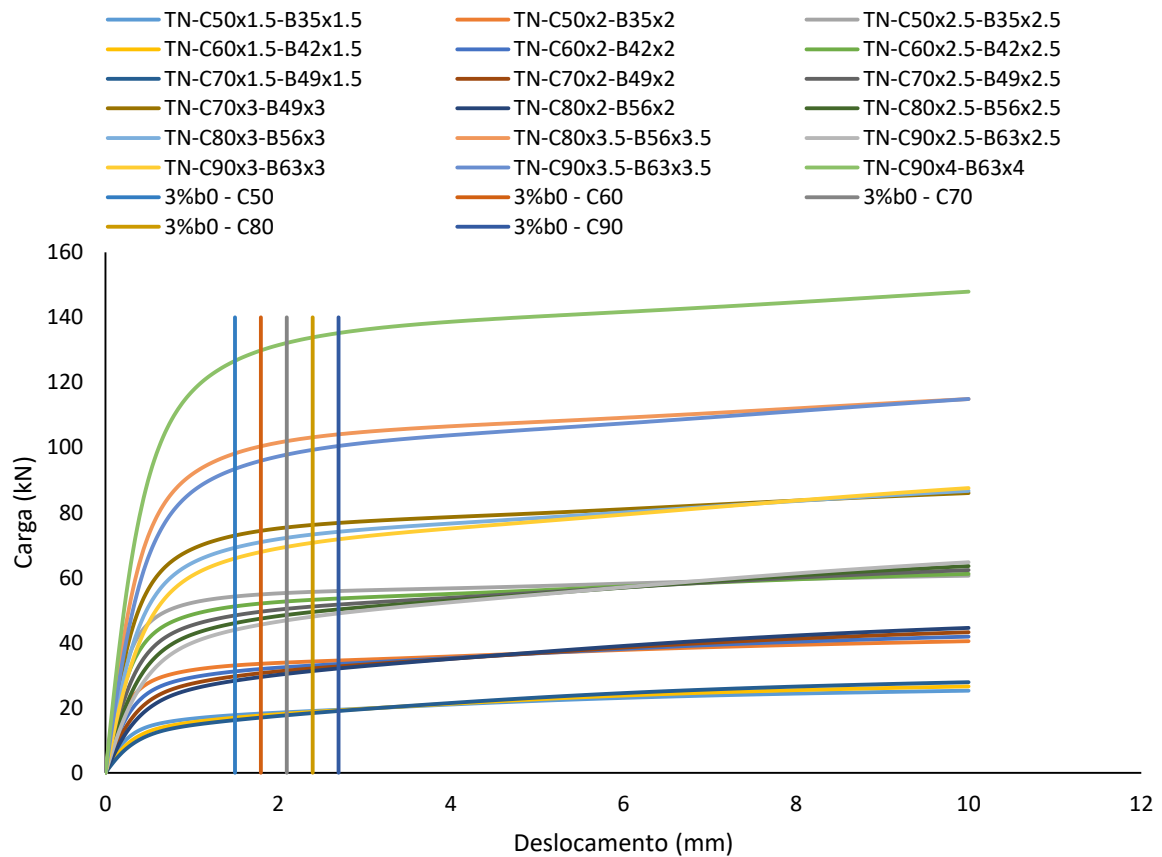


Figura 111 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 50 e 90 mm

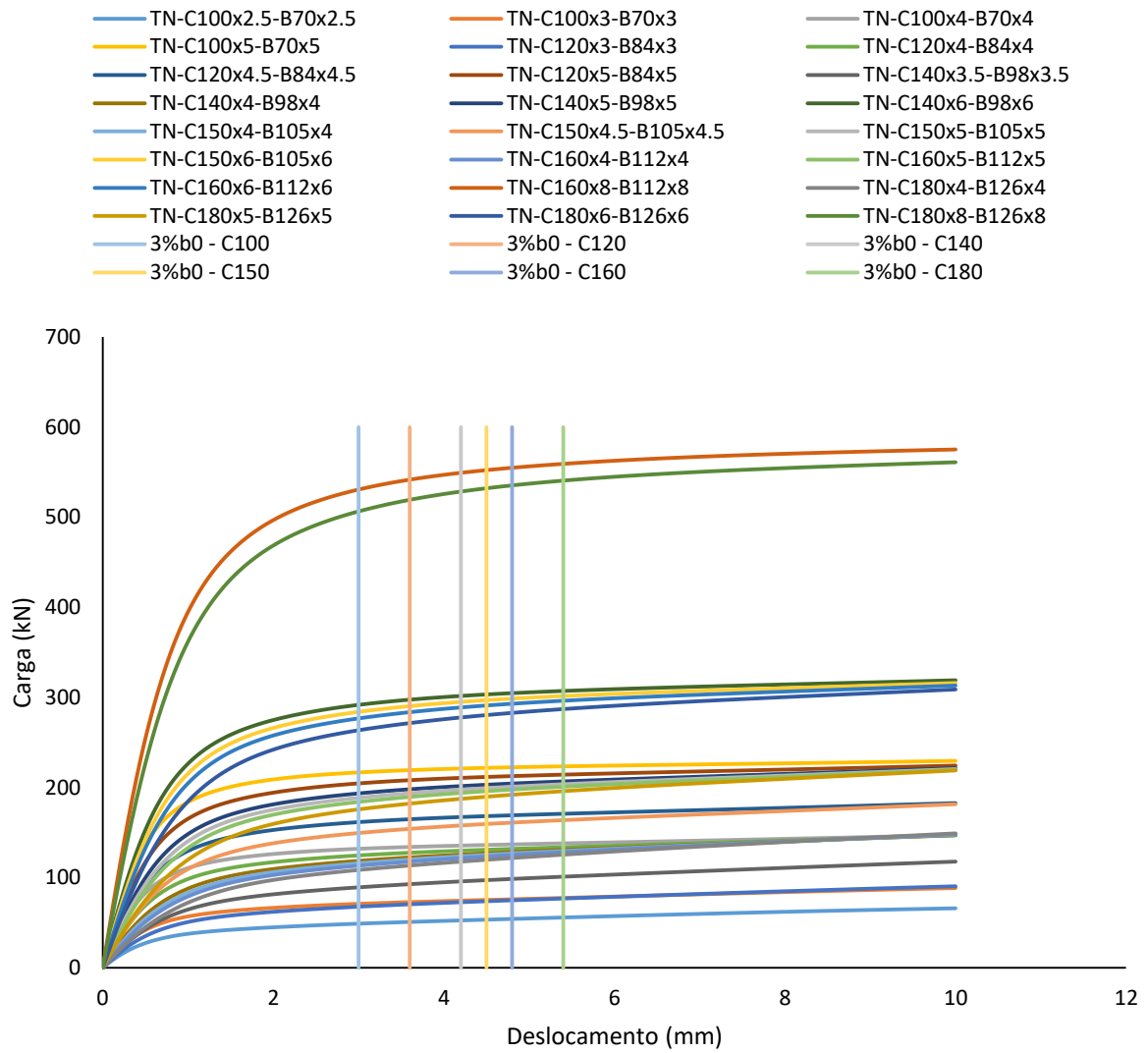


Figura 112 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 100 e 180 mm

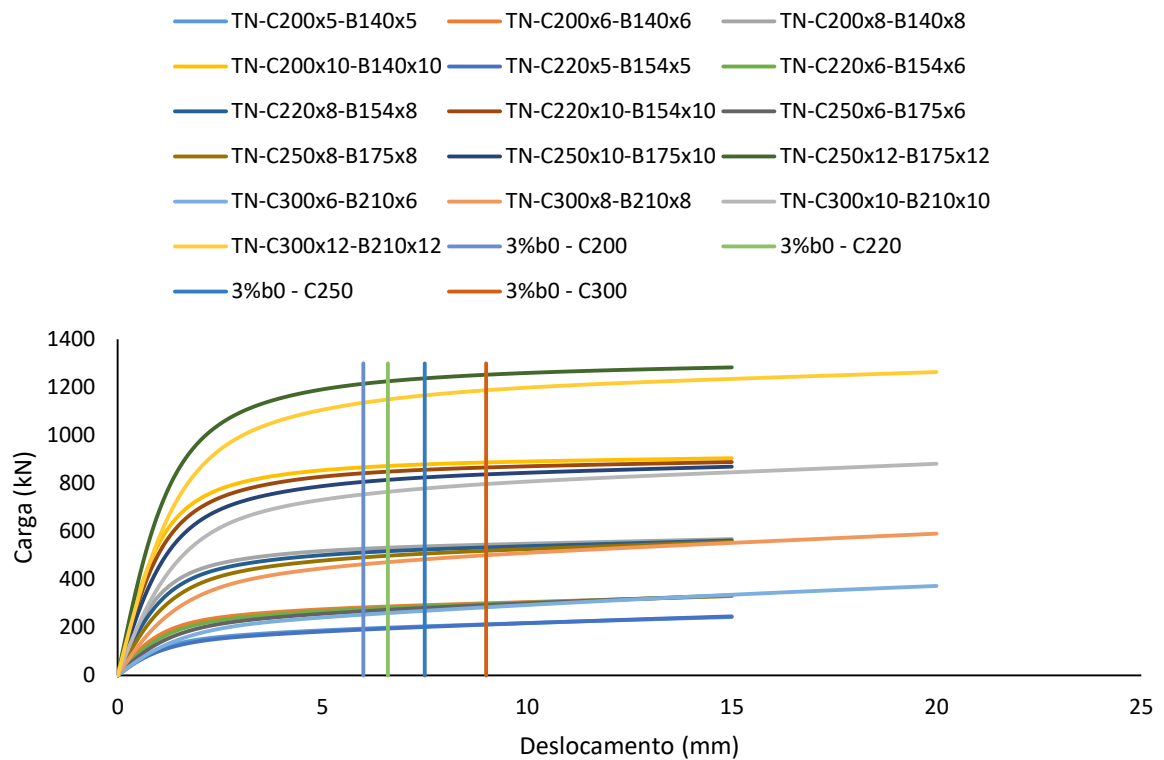


Figura 113 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,7$ e b_0 entre 200 e 300 mm

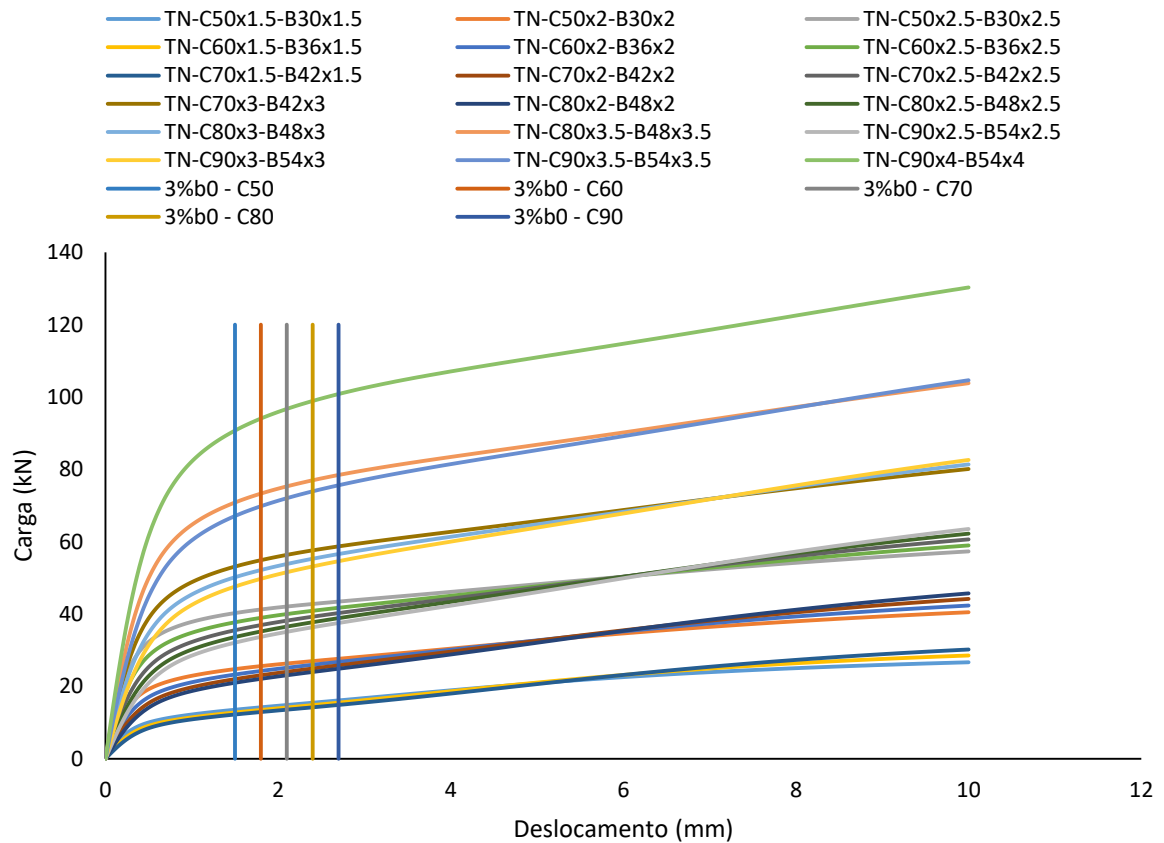


Figura 114 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 50 e 90 mm

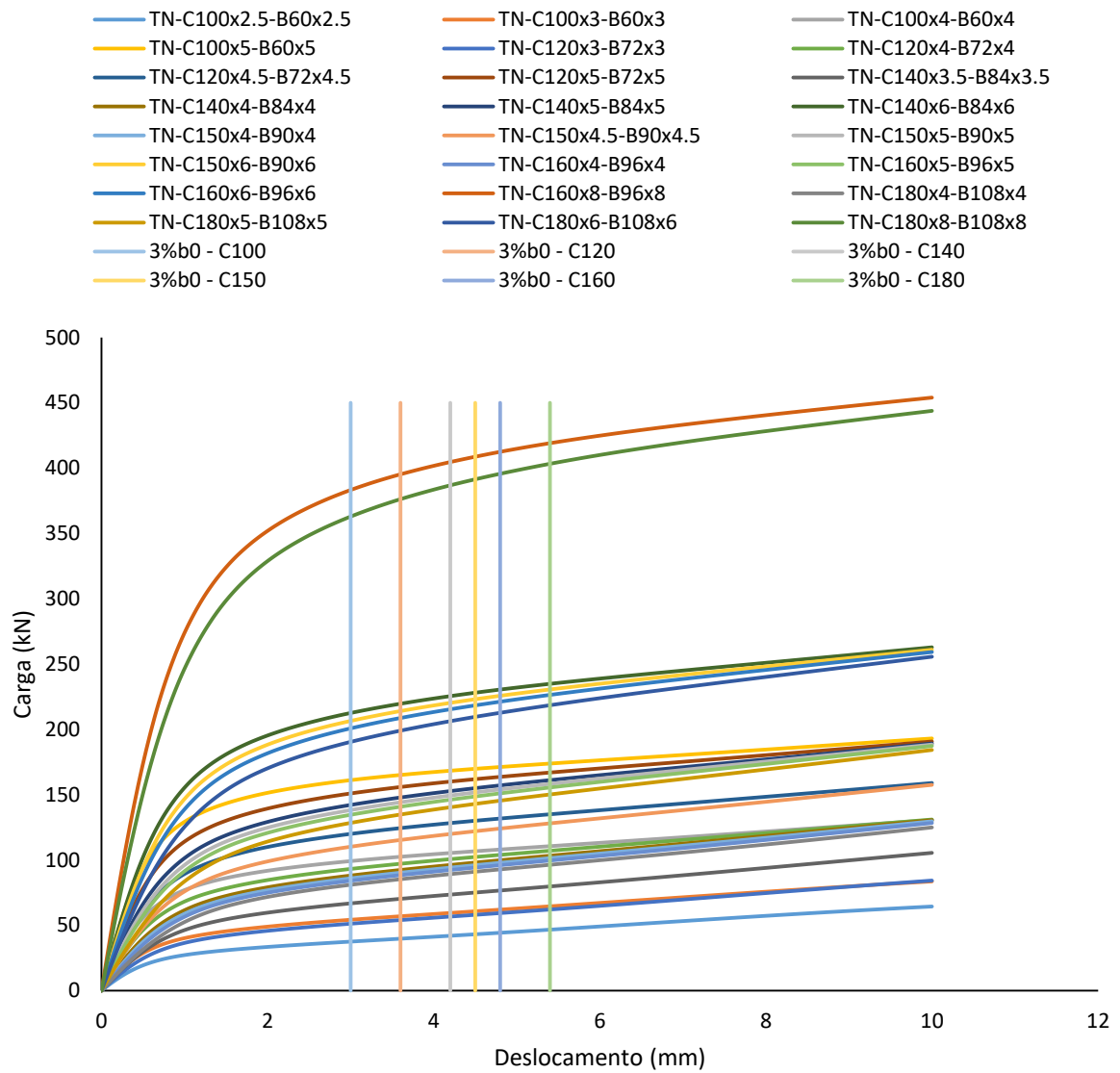


Figura 115 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 100 e 180 mm

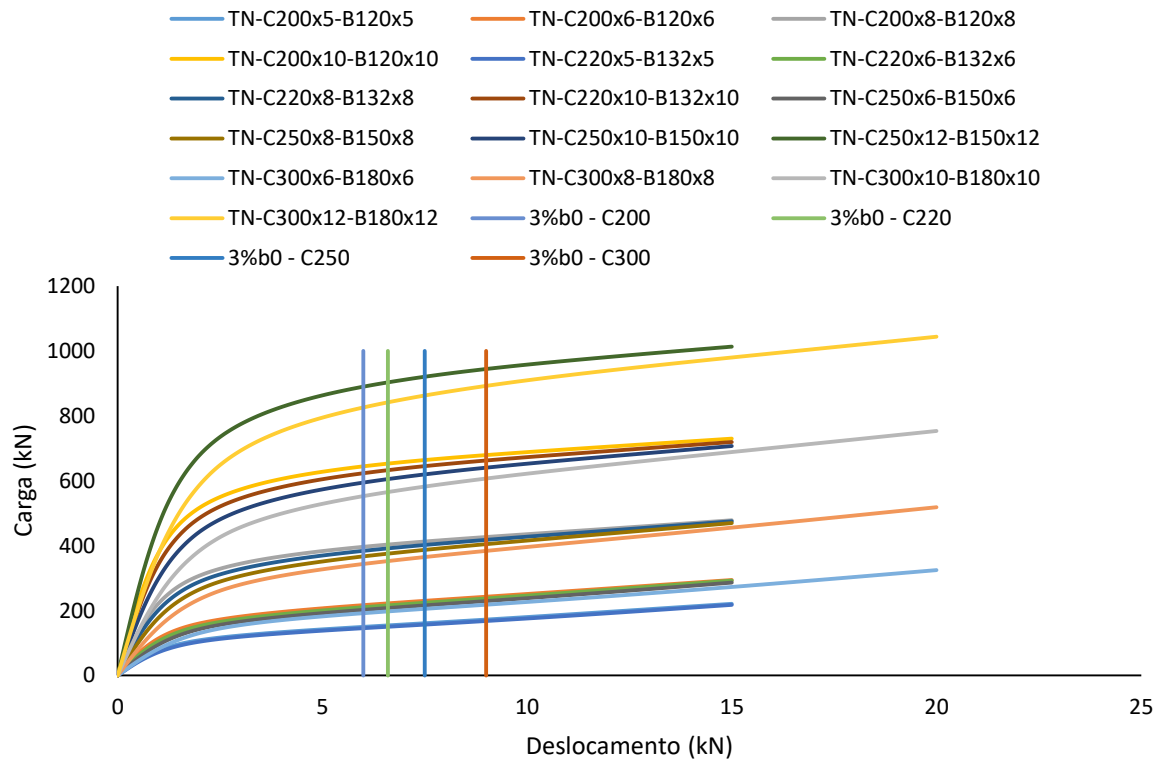


Figura 116 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,6$ e b_0 entre 200 e 300 mm

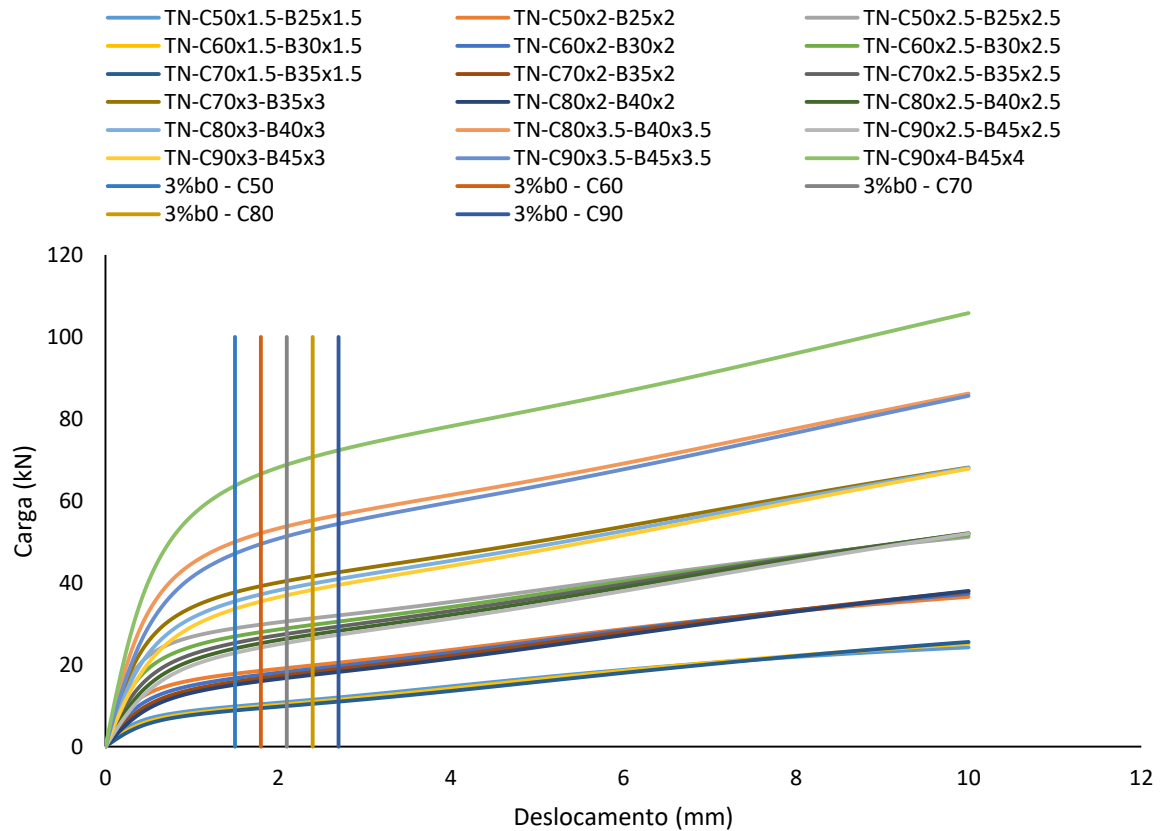


Figura 117 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 50 e 90 mm

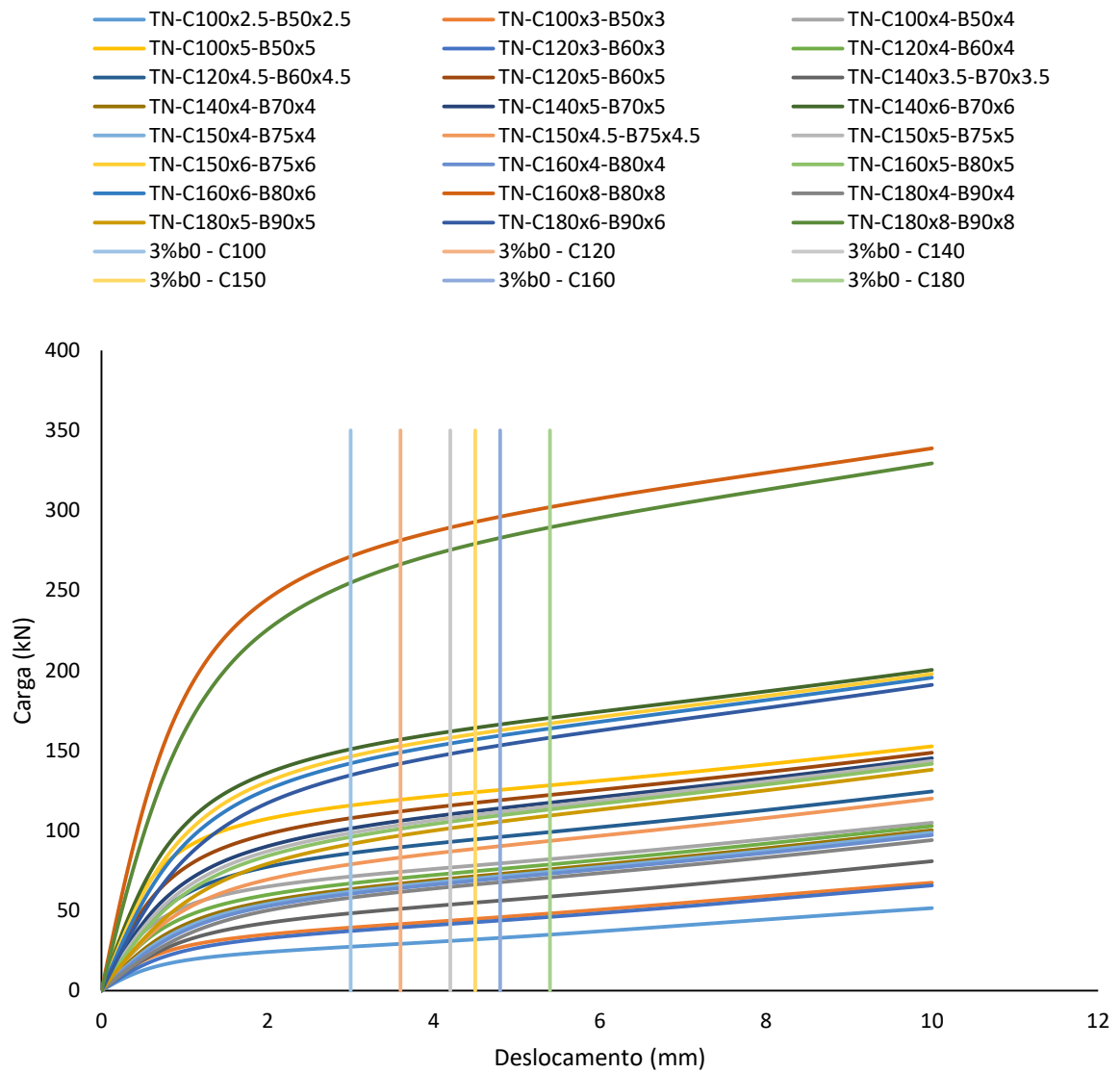


Figura 118 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 100 e 180 mm

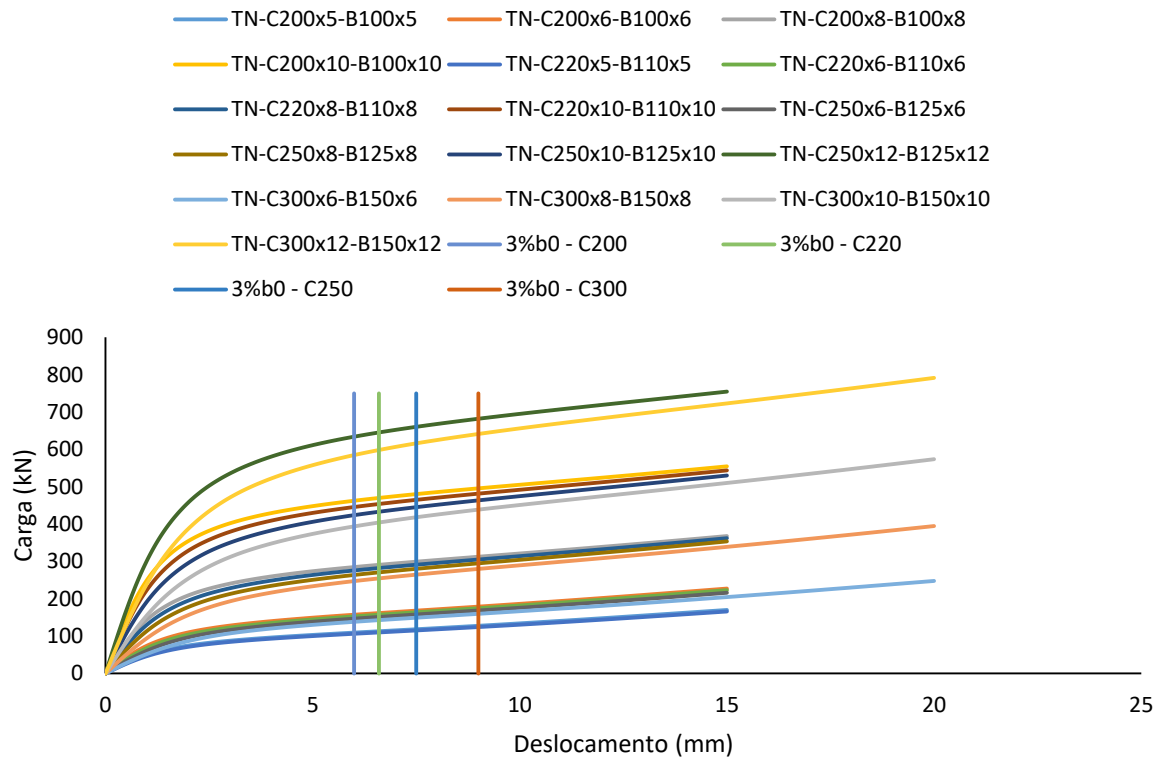


Figura 119 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,5$ e b_0 entre 200 e 300 mm

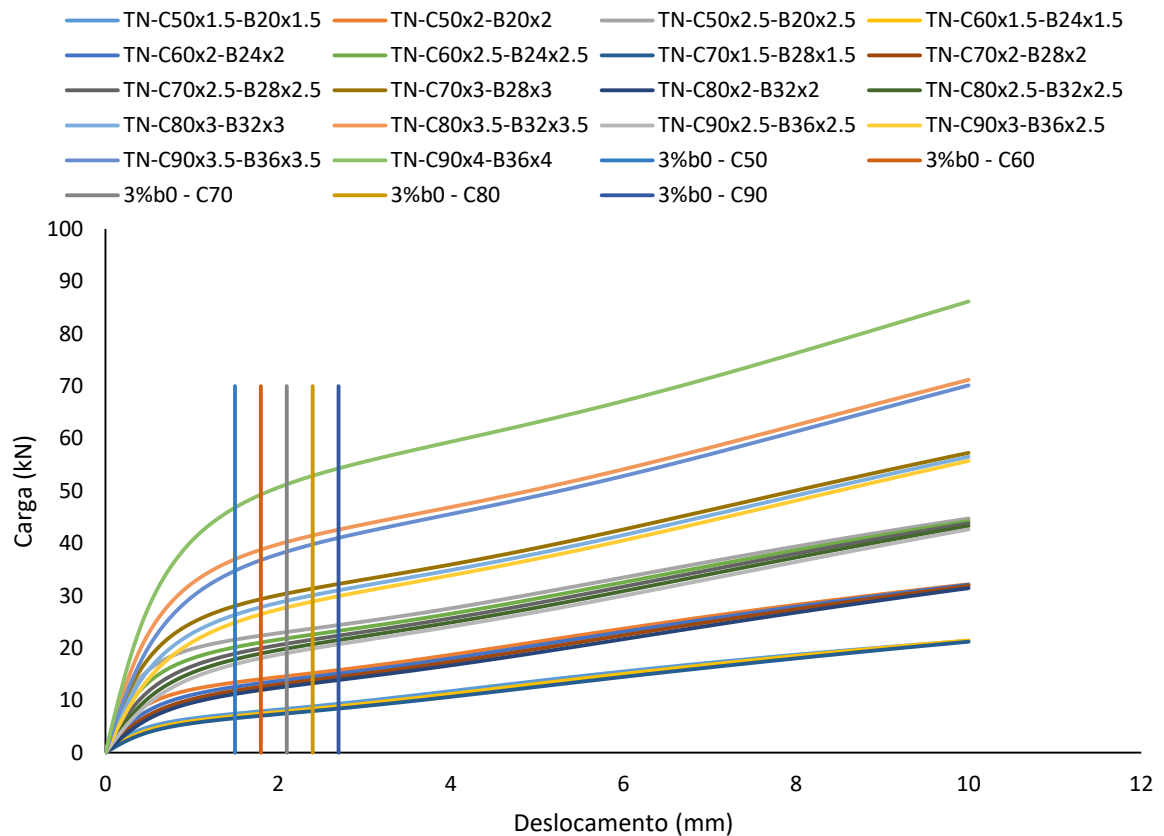


Figura 120 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 50 e 90 mm

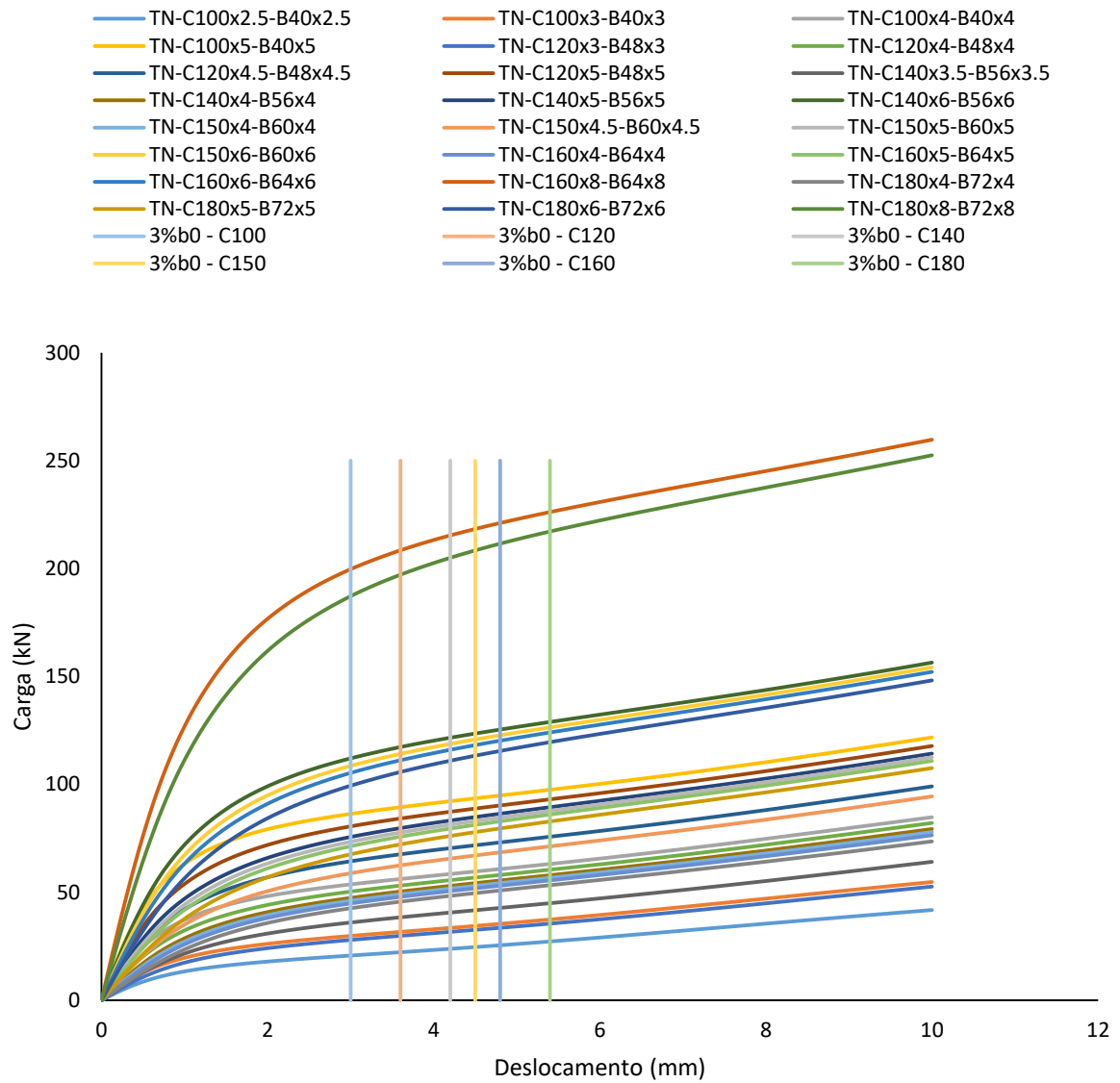


Figura 121 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 100 e 180 mm

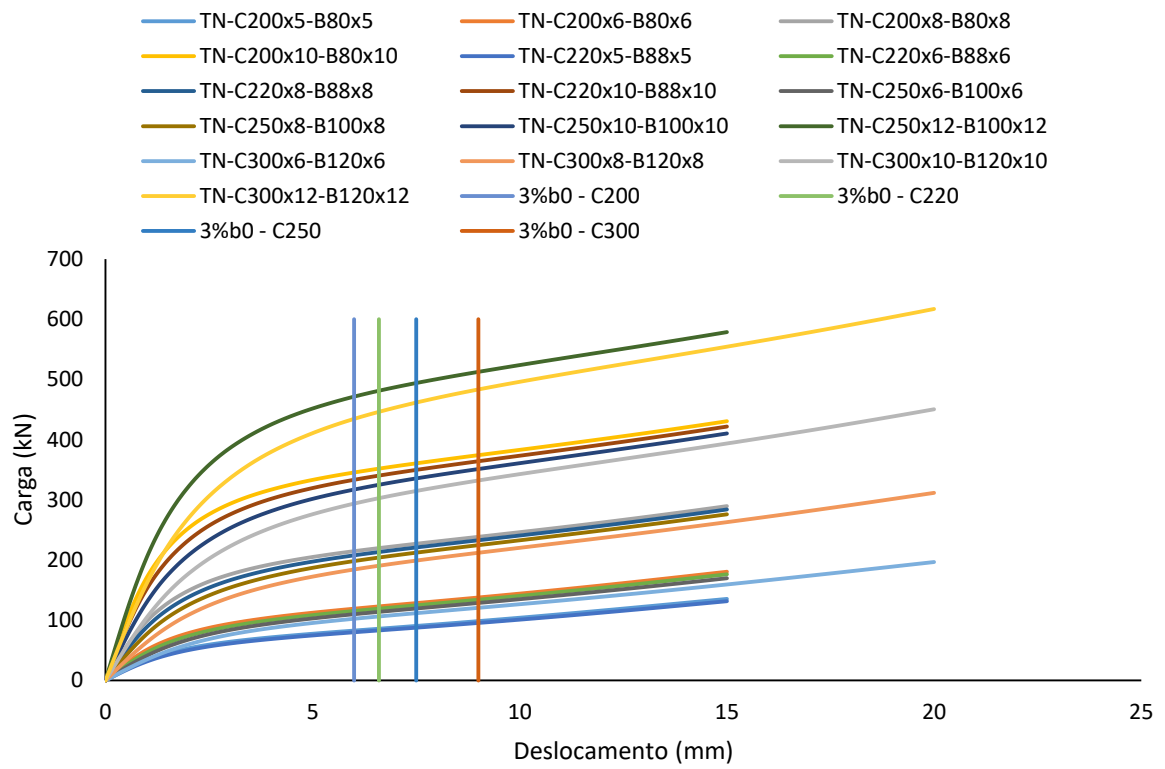


Figura 122 – Carga-deslocamento para $\beta = 0,4$ e b_0 entre 200 e 300 mm

APÊNDICE C

Tabela 13 – Resistências numéricas obtidas nas ligações (continua)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C50x1.5-B40x1.5	0.8	33.33	24.87	27.15	1.09	27.15
TN-C50x2-B40x2	0.8	25.00	43.74	48.61	1.11	48.61
TN-C50x2.5-B40x2.5	0.8	20.00	61.07	73.21	1.20	73.21
TN-C60x1.5-B48x1.5	0.8	40.00	24.47	26.99	1.10	26.99
TN-C60x2-B48x2	0.8	30.00	44.46	48.68	1.09	48.68
TN-C60x2.5-B48x2.5	0.8	24.00	67.41	75.65	1.12	75.65
TN-C70x1.5-B56x1.5	0.8	46.67	24.03	27.35	1.14	27.35
TN-C70x2-B56x2	0.8	35.00	43.98	48.13	1.09	48.13
TN-C70x2.5-B56x2.5	0.8	28.00	69.57	76.48	1.10	76.48
TN-C70x3-B56x3	0.8	23.33	95.92	108.61	1.13	108.61
TN-C80x2-B64x2	0.8	40.00	43.45	47.99	1.10	47.99
TN-C80x2.5-B64x2.5	0.8	32.00	69.11	75.65	1.09	75.65
TN-C80x3-B64x3	0.8	26.67	99.54	110.00	1.11	110.00
TN-C80x3.5-B64x3.5	0.8	22.86	129.28	147.47	1.14	147.47
TN-C90x2.5-B72x2.5	0.8	36.00	68.49	75.12	1.10	75.12
TN-C90x3-B72x3	0.8	30.00	99.85	109.54	1.10	109.54
TN-C90x3.5-B72x3.5	0.8	25.71	134.49	149.31	1.11	149.31
TN-C90x4-B72x4	0.8	22.50	167.48	192.22	1.15	192.22
TN-C100x2.5-B80x2.5	0.8	40.00	67.82	75.00	1.11	75.00
TN-C100x3-B80x3	0.8	33.33	99.16	108.63	1.10	108.63
TN-C100x4-B80x4	0.8	25.00	174.36	194.50	1.12	194.50
TN-C100x5-B80x5	0.8	20.00	243.28	292.85	1.20	292.85
TN-C120x3-B96x3	0.8	40.00	97.61	108.00	1.11	108.00
TN-C120x4-B96x4	0.8	30.00	177.36	194.75	1.10	194.75
TN-C120x4.5-B96x4.5	0.8	26.67	223.66	247.53	1.11	247.53
TN-C120x5-B96x5	0.8	24.00	268.80	302.68	1.13	302.68
TN-C140x3.5-B112x3.5	0.8	40.00	132.80	147.00	1.11	147.00
TN-C140x4-B112x4	0.8	35.00	175.48	192.58	1.10	192.58
TN-C140x5-B112x5	0.8	28.00	277.63	305.98	1.10	305.98
TN-C140x6-B112x6	0.8	23.33	382.64	434.53	1.14	434.53
TN-C150x4-B120x4	0.8	37.50	174.47	192.06	1.10	192.06
TN-C150x4.5-B120x4.5	0.8	33.33	222.86	244.44	1.10	244.44

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C150x5-B120x5	0.8	30.00	276.97	304.31	1.10	304.31
TN-C150x6-B120x6	0.8	25.00	391.86	437.67	1.12	437.67
TN-C160x4-B128x4	0.8	40.00	173.40	192.01	1.11	192.01
TN-C160x5-B128x5	0.8	32.00	275.86	302.67	1.10	302.67
TN-C160x6-B128x6	0.8	26.67	397.34	440.08	1.11	440.08
TN-C160x8-B128x8	0.8	20.00	621.81	749.71	1.21	749.71
TN-C180x4-B144x4	0.8	45.00	171.11	193.54	1.13	193.54
TN-C180x5-B144x5	0.8	36.00	273.43	300.52	1.10	300.52
TN-C180x6-B144x6	0.8	30.00	398.70	438.23	1.10	438.23
TN-C180x8-B144x8	0.8	22.50	668.46	769.00	1.15	769.00
TN-C200x5-B160x5	0.8	40.00	270.83	300.02	1.11	300.02
TN-C200x6-B160x6	0.8	33.33	395.98	434.59	1.10	434.59
TN-C200x8-B160x8	0.8	25.00	696.22	778.12	1.12	778.12
TN-C200x10-B160x10	0.8	20.00	971.06	1171.40	1.21	1171.40
TN-C220x5-B176x5	0.8	44.00	267.98	301.67	1.13	301.67
TN-C220x6-B176x6	0.8	36.67	393.02	432.45	1.10	432.45
TN-C220x8-B176x8	0.8	27.50	708.91	783.37	1.11	783.37
TN-C220x10-B176x10	0.8	22.00	1031.80	1197.50	1.16	1197.50
TN-C250x6-B200x6	0.8	41.67	388.20	432.65	1.11	432.65
TN-C250x8-B200x8	0.8	31.25	706.72	776.38	1.10	776.38
TN-C250x10-B200x10	0.8	25.00	1087.50	1215.90	1.12	1215.90
TN-C250x12-B200x12	0.8	20.83	1437.50	1705.70	1.19	1705.70
TN-C300x6-B240x6	0.8	50.00	379.34	443.51	1.17	443.51
TN-C300x8-B240x8	0.8	37.50	697.09	768.31	1.10	768.31
TN-C300x10-B240x10	0.8	30.00	1106.70	1217.40	1.10	1217.40
TN-C300x12-B240x12	0.8	25.00	1565.60	1750.90	1.12	1750.90
TN-C50x1.5-B37.5x1.5	0.75	33.33	18.75	21.83	1.16	21.83
TN-C50x2-B37.5x2	0.75	25.00	35.33	40.36	1.14	40.36
TN-C50x2.5-B37.5x2.5	0.75	20.00	54.93	64.12	1.17	64.12
TN-C60x1.5-B45x1.5	0.75	40.00	17.98	21.74	1.21	21.74
TN-C60x2-B45x2	0.75	30.00	34.05	39.25	1.15	39.25
TN-C60x2.5-B45x2.5	0.75	24.00	55.53	63.48	1.14	63.48
TN-C70x1.5-B52.5x1.5	0.75	46.67	17.42	22.02	1.26	22.02
TN-C70x2-B52.5x2	0.75	35.00	32.90	38.68	1.18	38.68
TN-C70x2.5-B52.5x2.5	0.75	28.00	53.91	61.95	1.15	61.95
TN-C70x3-B52.5x3	0.75	23.33	80.29	91.81	1.14	91.81

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C80x2-B60x2	0.75	40.00	31.92	38.65	1.21	38.65
TN-C80x2.5-B60x2.5	0.75	32.00	52.40	60.86	1.16	60.86
TN-C80x3-B60x3	0.75	26.67	78.33	89.87	1.15	89.87
TN-C80x3.5-B60x3.5	0.75	22.86	109.61	125.35	1.14	125.35
TN-C90x2.5-B67.5x2.5	0.75	36.00	51.02	60.35	1.18	60.35
TN-C90x3-B67.5x3	0.75	30.00	76.46	88.31	1.16	88.31
TN-C90x3.5-B67.5x3.5	0.75	25.71	107.28	123.02	1.15	123.02
TN-C90x4-B67.5x4	0.75	22.50	143.16	164.17	1.15	164.17
TN-C100x2.5-B75x2.5	0.75	40.00	49.82	60.38	1.21	60.38
TN-C100x3-B75x3	0.75	33.33	74.70	87.30	1.17	87.30
TN-C100x4-B75x4	0.75	25.00	140.78	161.42	1.15	161.42
TN-C100x5-B75x5	0.75	20.00	218.84	256.46	1.17	256.46
TN-C120x3-B90x3	0.75	40.00	71.69	86.94	1.21	86.94
TN-C120x4-B90x4	0.75	30.00	135.78	157.00	1.16	157.00
TN-C120x4.5-B90x4.5	0.75	26.67	175.96	202.20	1.15	202.20
TN-C120x5-B90x5	0.75	24.00	221.42	253.90	1.15	253.90
TN-C140x3.5-B105x3.5	0.75	40.00	97.52	118.33	1.21	118.33
TN-C140x4-B105x4	0.75	35.00	131.22	154.67	1.18	154.67
TN-C140x5-B105x5	0.75	28.00	215.08	247.78	1.15	247.78
TN-C140x6-B105x6	0.75	23.33	320.31	367.21	1.15	367.21
TN-C150x4-B112.5x4	0.75	37.50	129.20	154.37	1.19	154.37
TN-C150x4.5-B112.5x4.5	0.75	33.33	167.86	196.40	1.17	196.40
TN-C150x5-B112.5x5	0.75	30.00	212.02	245.30	1.16	245.30
TN-C150x6-B112.5x6	0.75	25.00	316.35	363.19	1.15	363.19
TN-C160x4-B120x4	0.75	40.00	127.33	154.55	1.21	154.55
TN-C160x5-B120x5	0.75	32.00	209.08	243.40	1.16	243.40
TN-C160x6-B120x6	0.75	26.67	312.58	359.46	1.15	359.46
TN-C160x8-B120x8	0.75	20.00	559.38	656.51	1.17	656.51
TN-C180x4-B135x4	0.75	45.00	124.24	155.90	1.25	155.90
TN-C180x5-B135x5	0.75	36.00	203.63	241.38	1.19	241.38
TN-C180x6-B135x6	0.75	30.00	305.18	353.23	1.16	353.23
TN-C180x8-B135x8	0.75	22.50	571.43	656.66	1.15	656.66
TN-C200x5-B150x5	0.75	40.00	198.84	241.47	1.21	241.47
TN-C200x6-B150x6	0.75	33.33	298.22	349.15	1.17	349.15
TN-C200x8-B150x8	0.75	25.00	562.04	645.67	1.15	645.67
TN-C200x10-B150x10	0.75	20.00	873.58	1025.80	1.17	1025.80

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C220x5-B165x5	0.75	44.00	194.88	243.05	1.25	243.05
TN-C220x6-B165x6	0.75	36.67	291.91	347.40	1.19	347.40
TN-C220x8-B165x8	0.75	27.50	552.02	636.04	1.15	636.04
TN-C220x10-B165x10	0.75	22.00	891.55	1027.90	1.15	1027.90
TN-C250x6-B187.5x6	0.75	41.67	283.71	348.47	1.23	348.47
TN-C250x8-B187.5x8	0.75	31.25	537.53	624.72	1.16	624.72
TN-C250x10-B187.5x10	0.75	25.00	877.86	1008.80	1.15	1008.80
TN-C250x12-B187.5x12	0.75	20.83	1271.90	1480.70	1.16	1480.70
TN-C300x6-B225x6	0.75	50.00	274.30	354.98	1.29	354.98
TN-C300x8-B225x8	0.75	37.50	516.08	617.40	1.20	617.40
TN-C300x10-B225x10	0.75	30.00	847.01	981.18	1.16	981.18
TN-C300x12-B225x12	0.75	25.00	1263.80	1452.70	1.15	1452.70
TN-C50x1.5-B35x1.5	0.7	33.33	14.36	17.75	1.24	17.75
TN-C50x2-B35x2	0.7	25.00	27.89	33.03	1.18	33.03
TN-C50x2.5-B35x2.5	0.7	20.00	46.35	54.23	1.17	54.23
TN-C60x1.5-B42x1.5	0.7	40.00	13.66	17.63	1.29	17.63
TN-C60x2-B42x2	0.7	30.00	26.33	31.93	1.21	31.93
TN-C60x2.5-B42x2.5	0.7	24.00	44.04	52.07	1.18	52.07
TN-C70x1.5-B49x1.5	0.7	46.67	13.27	17.72	1.33	17.72
TN-C70x2-B49x2	0.7	35.00	25.11	31.44	1.25	31.44
TN-C70x2.5-B49x2.5	0.7	28.00	41.99	50.44	1.20	50.44
TN-C70x3-B49x3	0.7	23.33	63.88	75.46	1.18	75.46
TN-C80x2-B56x2	0.7	40.00	24.24	31.33	1.29	31.33
TN-C80x2.5-B56x2.5	0.7	32.00	40.26	49.48	1.23	49.48
TN-C80x3-B56x3	0.7	26.67	61.34	73.30	1.19	73.30
TN-C80x3.5-B56x3.5	0.7	22.86	87.38	103.18	1.18	103.18
TN-C90x2.5-B63x2.5	0.7	36.00	38.87	49.04	1.26	49.04
TN-C90x3-B63x3	0.7	30.00	59.10	71.82	1.22	71.82
TN-C90x3.5-B63x3.5	0.7	25.71	84.38	100.51	1.19	100.51
TN-C90x4-B63x4	0.7	22.50	114.57	135.23	1.18	135.23
TN-C100x2.5-B70x2.5	0.7	40.00	37.83	48.93	1.29	48.93
TN-C100x3-B70x3	0.7	33.33	57.20	70.96	1.24	70.96
TN-C100x4-B70x4	0.7	25.00	111.10	132.06	1.19	132.06
TN-C100x5-B70x5	0.7	20.00	184.64	216.85	1.17	216.85
TN-C120x3-B84x3	0.7	40.00	54.43	70.45	1.29	70.45
TN-C120x4-B84x4	0.7	30.00	104.94	127.67	1.22	127.67

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C120x4.5-B84x4.5	0.7	26.67	137.78	164.89	1.20	164.89
TN-C120x5-B84x5	0.7	24.00	175.57	208.23	1.19	208.23
TN-C140x3.5-B98x3.5	0.7	40.00	74.04	95.88	1.29	95.88
TN-C140x4-B98x4	0.7	35.00	100.10	125.69	1.26	125.69
TN-C140x5-B98x5	0.7	28.00	167.45	201.71	1.20	201.71
TN-C140x6-B98x6	0.7	23.33	254.75	301.77	1.18	301.77
TN-C150x4-B105x4	0.7	37.50	98.21	125.32	1.28	125.32
TN-C150x4.5-B105x4.5	0.7	33.33	128.49	159.62	1.24	159.62
TN-C150x5-B105x5	0.7	30.00	163.85	199.46	1.22	199.46
TN-C150x6-B105x6	0.7	25.00	249.63	297.11	1.19	297.11
TN-C160x4-B112x4	0.7	40.00	96.67	125.22	1.30	125.22
TN-C160x5-B112x5	0.7	32.00	160.59	197.84	1.23	197.84
TN-C160x6-B112x6	0.7	26.67	244.73	293.12	1.20	293.12
TN-C160x8-B112x8	0.7	20.00	471.95	555.10	1.18	555.10
TN-C180x4-B126x4	0.7	45.00	94.46	125.58	1.33	125.58
TN-C180x5-B126x5	0.7	36.00	155.06	196.08	1.26	196.08
TN-C180x6-B126x6	0.7	30.00	235.83	287.21	1.22	287.21
TN-C180x8-B126x8	0.7	22.50	457.23	540.84	1.18	540.84
TN-C200x5-B140x5	0.7	40.00	150.95	195.63	1.30	195.63
TN-C200x6-B140x6	0.7	33.33	228.25	283.74	1.24	283.74
TN-C200x8-B140x8	0.7	25.00	443.49	528.17	1.19	528.17
TN-C200x10-B140x10	0.7	20.00	737.04	867.31	1.18	867.31
TN-C220x5-B154x5	0.7	44.00	148.07	196.01	1.32	196.01
TN-C220x6-B154x6	0.7	36.67	222.06	282.12	1.27	282.12
TN-C220x8-B154x8	0.7	27.50	430.61	518.00	1.20	518.00
TN-C220x10-B154x10	0.7	22.00	718.52	849.28	1.18	849.28
TN-C250x6-B175x6	0.7	41.67	215.36	281.79	1.31	281.79
TN-C250x8-B175x8	0.7	31.25	413.69	507.77	1.23	507.77
TN-C250x10-B175x10	0.7	25.00	692.66	825.24	1.19	825.24
TN-C250x12-B175x12	0.7	20.83	1049.50	1237.90	1.18	1237.90
TN-C300x6-B210x6	0.7	50.00	209.45	284.46	1.36	284.46
TN-C300x8-B210x8	0.7	37.50	392.20	501.15	1.28	501.15
TN-C300x10-B210x10	0.7	30.00	654.44	797.72	1.22	797.72
TN-C300x12-B210x12	0.7	25.00	997.14	1188.30	1.19	1188.30
TN-C50x1.5-B30x1.5	0.6	33.33	10.15	13.59	1.34	13.59
TN-C50x2-B30x2	0.6	25.00	19.44	24.83	1.28	24.83

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C50x2.5-B30x2.5	0.6	20.00	32.63	40.33	1.24	40.33
TN-C60x1.5-B36x1.5	0.6	40.00	9.88	13.53	1.37	13.53
TN-C60x2-B36x2	0.6	30.00	18.43	24.32	1.32	24.32
TN-C60x2.5-B36x2.5	0.6	24.00	30.71	39.02	1.27	39.02
TN-C70x1.5-B42x1.5	0.6	46.67	9.79	13.60	1.39	13.60
TN-C70x2-B42x2	0.6	35.00	17.83	24.09	1.35	24.09
TN-C70x2.5-B42x2.5	0.6	28.00	29.29	38.24	1.31	38.24
TN-C70x3-B42x3	0.6	23.33	44.58	56.43	1.27	56.43
TN-C80x2-B48x2	0.6	40.00	17.53	24.04	1.37	24.04
TN-C80x2.5-B48x2.5	0.6	32.00	28.31	37.80	1.34	37.80
TN-C80x3-B48x3	0.6	26.67	42.73	55.36	1.30	55.36
TN-C80x3.5-B48x3.5	0.6	22.86	61.03	77.06	1.26	77.06
TN-C90x2.5-B54x2.5	0.6	36.00	27.70	37.60	1.36	37.60
TN-C90x3-B54x3	0.6	30.00	41.35	54.69	1.32	54.69
TN-C90x3.5-B54x3.5	0.6	25.71	58.75	75.69	1.29	75.69
TN-C90x4-B54x4	0.6	22.50	80.07	100.92	1.26	100.92
TN-C100x2.5-B60x2.5	0.6	40.00	27.35	37.55	1.37	37.55
TN-C100x3-B60x3	0.6	33.33	40.38	54.29	1.34	54.29
TN-C100x4-B60x4	0.6	25.00	77.36	99.23	1.28	99.23
TN-C100x5-B60x5	0.6	20.00	129.91	161.24	1.24	161.24
TN-C120x3-B72x3	0.6	40.00	39.34	54.06	1.37	54.06
TN-C120x4-B72x4	0.6	30.00	73.40	97.20	1.32	97.20
TN-C120x4.5-B72x4.5	0.6	26.67	95.94	124.52	1.30	124.52
TN-C120x5-B72x5	0.6	24.00	122.35	155.97	1.27	155.97
TN-C140x3.5-B84x3.5	0.6	40.00	53.52	73.57	1.37	73.57
TN-C140x4-B84x4	0.6	35.00	71.06	96.28	1.35	96.28
TN-C140x5-B84x5	0.6	28.00	116.72	152.85	1.31	152.85
TN-C140x6-B84x6	0.6	23.33	177.68	225.60	1.27	225.60
TN-C150x4-B90x4	0.6	37.50	70.35	96.10	1.37	96.10
TN-C150x4.5-B90x4.5	0.6	33.33	90.70	122.11	1.35	122.11
TN-C150x5-B90x5	0.6	30.00	114.58	151.84	1.33	151.84
TN-C150x6-B90x6	0.6	25.00	173.77	223.21	1.28	223.21
TN-C160x4-B96x4	0.6	40.00	69.86	96.08	1.38	96.08
TN-C160x5-B96x5	0.6	32.00	112.88	151.10	1.34	151.10
TN-C160x6-B96x6	0.6	26.67	170.37	221.32	1.30	221.32
TN-C160x8-B96x8	0.6	20.00	331.99	412.66	1.24	412.66

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C180x4-B108x4	0.6	45.00	69.36	96.40	1.39	96.40
TN-C180x5-B108x5	0.6	36.00	110.46	150.27	1.36	150.27
TN-C180x6-B108x6	0.6	30.00	164.91	218.62	1.33	218.62
TN-C180x8-B108x8	0.6	22.50	319.41	403.50	1.26	403.50
TN-C200x5-B120x5	0.6	40.00	109.08	150.09	1.38	150.09
TN-C200x6-B120x6	0.6	33.33	161.09	217.04	1.35	217.04
TN-C200x8-B120x8	0.6	25.00	308.66	396.76	1.29	396.76
TN-C200x10-B120x10	0.6	20.00	518.43	644.74	1.24	644.74
TN-C220x5-B132x5	0.6	44.00	108.40	150.44	1.39	150.44
TN-C220x6-B132x6	0.6	36.67	158.56	216.25	1.36	216.25
TN-C220x8-B132x8	0.6	27.50	299.92	391.98	1.31	391.98
TN-C220x10-B132x10	0.6	22.00	502.52	632.96	1.26	632.96
TN-C250x6-B150x6	0.6	41.67	156.50	216.25	1.38	216.25
TN-C250x8-B150x8	0.6	31.25	290.11	387.35	1.34	387.35
TN-C250x10-B150x10	0.6	25.00	482.04	619.88	1.29	619.88
TN-C250x12-B150x12	0.6	20.83	736.44	920.82	1.25	920.82
TN-C300x6-B180x6	0.6	50.00	155.69	218.35	1.40	218.35
TN-C300x8-B180x8	0.6	37.50	280.89	384.23	1.37	384.23
TN-C300x10-B180x10	0.6	30.00	457.53	607.14	1.33	607.14
TN-C300x12-B180x12	0.6	25.00	693.90	892.58	1.29	892.58
TN-C50x1.5-B25x1.5	0.5	33.33	6.98	9.87	1.41	9.87
TN-C50x2-B25x2	0.5	25.00	13.25	17.85	1.35	17.85
TN-C50x2.5-B25x2.5	0.5	20.00	22.43	28.96	1.29	28.96
TN-C60x1.5-B30x1.5	0.5	40.00	6.84	9.89	1.45	9.89
TN-C60x2-B30x2	0.5	30.00	12.61	17.59	1.40	17.59
TN-C60x2.5-B30x2.5	0.5	24.00	20.93	28.03	1.34	28.03
TN-C70x1.5-B35x1.5	0.5	46.67	6.79	9.97	1.47	9.97
TN-C70x2-B35x2	0.5	35.00	12.29	17.53	1.43	17.53
TN-C70x2.5-B35x2.5	0.5	28.00	19.98	27.59	1.38	27.59
TN-C70x3-B35x3	0.5	23.33	30.39	40.52	1.33	40.52
TN-C80x2-B40x2	0.5	40.00	12.13	17.58	1.45	17.58
TN-C80x2.5-B40x2.5	0.5	32.00	19.42	27.41	1.41	27.41
TN-C80x3-B40x3	0.5	26.67	29.12	39.87	1.37	39.87
TN-C80x3.5-B40x3.5	0.5	22.86	41.62	55.32	1.33	55.32
TN-C90x2.5-B45x2.5	0.5	36.00	19.10	27.38	1.43	27.38
TN-C90x3-B45x3	0.5	30.00	28.27	39.55	1.40	39.55

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C90x3.5-B45x3.5	0.5	25.71	40.01	54.46	1.36	54.46
TN-C90x4-B45x4	0.5	22.50	54.62	72.43	1.33	72.43
TN-C100x2.5-B50x2.5	0.5	40.00	18.92	27.45	1.45	27.45
TN-C100x3-B50x3	0.5	33.33	27.74	39.43	1.42	39.43
TN-C100x4-B50x4	0.5	25.00	52.67	71.34	1.35	71.34
TN-C100x5-B50x5	0.5	20.00	89.23	115.75	1.30	115.75
TN-C120x3-B60x3	0.5	40.00	27.21	39.52	1.45	39.52
TN-C120x4-B60x4	0.5	30.00	50.16	70.29	1.40	70.29
TN-C120x4.5-B60x4.5	0.5	26.67	65.33	89.67	1.37	89.67
TN-C120x5-B60x5	0.5	24.00	83.31	112.04	1.34	112.04
TN-C140x3.5-B70x3.5	0.5	40.00	37.01	53.78	1.45	53.78
TN-C140x4-B70x4	0.5	35.00	48.90	70.05	1.43	70.05
TN-C140x5-B70x5	0.5	28.00	79.56	110.26	1.39	110.26
TN-C140x6-B70x6	0.5	23.33	121.03	161.97	1.34	161.97
TN-C150x4-B75x4	0.5	37.50	48.55	70.10	1.44	70.10
TN-C150x4.5-B75x4.5	0.5	33.33	62.27	88.67	1.42	88.67
TN-C150x5-B75x5	0.5	30.00	78.29	109.81	1.40	109.81
TN-C150x6-B75x6	0.5	25.00	118.27	160.46	1.36	160.46
TN-C160x4-B80x4	0.5	40.00	48.30	70.23	1.45	70.23
TN-C160x5-B80x5	0.5	32.00	77.34	109.55	1.42	109.55
TN-C160x6-B80x6	0.5	26.67	115.99	159.38	1.37	159.38
TN-C160x8-B80x8	0.5	20.00	227.94	296.23	1.30	296.23
TN-C180x4-B90x4	0.5	45.00	48.04	70.62	1.47	70.62
TN-C180x5-B90x5	0.5	36.00	76.09	109.45	1.44	109.45
TN-C180x6-B90x6	0.5	30.00	112.66	158.10	1.40	158.10
TN-C180x8-B90x8	0.5	22.50	217.76	289.56	1.33	289.56
TN-C200x5-B100x5	0.5	40.00	75.41	109.71	1.45	109.71
TN-C200x6-B100x6	0.5	33.33	110.57	157.60	1.43	157.60
TN-C200x8-B100x8	0.5	25.00	210.04	285.22	1.36	285.22
TN-C200x10-B100x10	0.5	20.00	355.90	462.81	1.30	462.81
TN-C220x5-B110x5	0.5	44.00	75.06	110.18	1.47	110.18
TN-C220x6-B110x6	0.5	36.67	109.30	157.62	1.44	157.62
TN-C220x8-B110x8	0.5	27.50	204.26	282.56	1.38	282.56
TN-C220x10-B110x10	0.5	22.00	342.86	454.15	1.32	454.15
TN-C250x6-B125x6	0.5	41.67	108.28	158.22	1.46	158.22
TN-C250x8-B125x8	0.5	31.25	198.50	280.55	1.41	280.55

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (continuação)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C250x10-B125x10	0.5	25.00	327.98	445.61	1.36	445.61
TN-C250x12-B125x12	0.5	20.83	503.94	660.71	1.31	660.71
TN-C300x6-B150x6	0.5	50.00	107.74	160.00	1.49	160.00
TN-C300x8-B150x8	0.5	37.50	193.73	280.27	1.45	280.27
TN-C300x10-B150x10	0.5	30.00	312.47	439.05	1.41	439.05
TN-C300x12-B150x12	0.5	25.00	472.09	641.63	1.36	641.63
TN-C50x1.5-B20x1.5	0.4	33.33	5.00	7.48	1.50	7.48
TN-C50x2-B20x2	0.4	25.00	9.46	13.46	1.42	13.46
TN-C50x2.5-B20x2.5	0.4	20.00	16.03	21.63	1.35	21.63
TN-C60x1.5-B24x1.5	0.4	40.00	4.89	7.49	1.53	7.33
TN-C60x2-B24x2	0.4	30.00	9.03	13.32	1.48	13.32
TN-C60x2.5-B24x2.5	0.4	24.00	14.94	21.10	1.41	21.10
TN-C70x1.5-B28x1.5	0.4	46.67	4.83	7.54	1.56	7.25
TN-C70x2-B28x2	0.4	35.00	8.79	13.29	1.51	13.18
TN-C70x2.5-B28x2.5	0.4	28.00	14.29	20.86	1.46	20.86
TN-C70x3-B28x3	0.4	23.33	21.68	30.46	1.41	30.46
TN-C80x2-B32x2	0.4	40.00	8.66	13.31	1.54	12.99
TN-C80x2.5-B32x2.5	0.4	32.00	13.90	20.77	1.49	20.77
TN-C80x3-B32x3	0.4	26.67	20.80	30.12	1.45	30.12
TN-C80x3.5-B32x3.5	0.4	22.86	29.69	41.55	1.40	41.55
TN-C90x2.5-B36x2.5	0.4	36.00	13.65	20.75	1.52	20.48
TN-C90x3-B36x3	0.4	30.00	20.22	29.95	1.48	29.95
TN-C90x3.5-B36x3.5	0.4	25.71	28.56	41.09	1.44	41.09
TN-C90x4-B36x4	0.4	22.50	38.95	54.36	1.40	54.36
TN-C100x2.5-B40x2.5	0.4	40.00	13.50	20.78	1.54	20.25
TN-C100x3-B40x3	0.4	33.33	19.84	29.88	1.51	29.76
TN-C100x4-B40x4	0.4	25.00	37.58	53.77	1.43	53.77
TN-C100x5-B40x5	0.4	20.00	63.68	86.46	1.36	86.46
TN-C120x3-B48x3	0.4	40.00	19.41	29.92	1.54	29.12
TN-C120x4-B48x4	0.4	30.00	35.87	53.22	1.48	53.22
TN-C120x4.5-B48x4.5	0.4	26.67	46.65	67.73	1.45	67.73
TN-C120x5-B48x5	0.4	24.00	59.41	84.32	1.42	84.32
TN-C140x3.5-B56x3.5	0.4	40.00	26.40	40.72	1.54	39.60
TN-C140x4-B56x4	0.4	35.00	34.96	53.09	1.52	52.44
TN-C140x5-B56x5	0.4	28.00	56.85	83.38	1.47	83.38
TN-C140x6-B56x6	0.4	23.33	86.28	121.75	1.41	121.75

Tabela 13 - Resistências numéricas obtidas nas ligações (conclusão)

Nomenclatura	β	2γ	$N_{1\%B0}$ (kN)	$N_{3\%B0}$ (kN)	$N_{3\%b0}/N_{1\%b0}$	N_{Zhao} (kN)
TN-C150x4-B60x4	0.4	37.50	34.67	53.11	1.53	52.01
TN-C150x4.5-B60x4.5	0.4	33.33	44.52	67.20	1.51	66.79
TN-C150x5-B60x5	0.4	30.00	55.98	83.14	1.49	83.14
TN-C150x6-B60x6	0.4	25.00	84.35	120.94	1.43	120.94
TN-C160x4-B64x4	0.4	40.00	34.45	53.17	1.54	51.68
TN-C160x5-B64x5	0.4	32.00	55.30	83.00	1.50	82.96
TN-C160x6-B64x6	0.4	26.67	82.80	120.37	1.45	120.37
TN-C160x8-B64x8	0.4	20.00	162.60	221.25	1.36	221.25
TN-C180x4-B72x4	0.4	45.00	34.16	53.40	1.56	51.24
TN-C180x5-B72x5	0.4	36.00	54.37	82.93	1.53	81.56
TN-C180x6-B72x6	0.4	30.00	80.54	119.70	1.49	119.70
TN-C180x8-B72x8	0.4	22.50	155.20	217.33	1.40	217.33
TN-C200x5-B80x5	0.4	40.00	53.78	83.06	1.54	80.67
TN-C200x6-B80x6	0.4	33.33	79.05	119.43	1.51	118.57
TN-C200x8-B80x8	0.4	25.00	149.77	214.97	1.44	214.97
TN-C200x10-B80x10	0.4	20.00	253.85	345.67	1.36	345.67
TN-C220x5-B88x5	0.4	44.00	53.39	83.33	1.56	80.09
TN-C220x6-B88x6	0.4	36.67	78.07	119.42	1.53	117.10
TN-C220x8-B88x8	0.4	27.50	145.87	213.56	1.46	213.56
TN-C220x10-B88x10	0.4	22.00	244.34	340.52	1.39	340.52
TN-C250x6-B100x6	0.4	41.67	77.13	119.73	1.55	115.69
TN-C250x8-B100x8	0.4	31.25	141.90	212.52	1.50	212.52
TN-C250x10-B100x10	0.4	25.00	233.83	335.85	1.44	335.85
TN-C250x12-B100x12	0.4	20.83	359.22	494.27	1.38	494.27
TN-C300x6-B120x6	0.4	50.00	76.44	120.86	1.58	114.66
TN-C300x8-B120x8	0.4	37.50	138.31	212.31	1.54	207.47
TN-C300x10-B120x10	0.4	30.00	223.33	332.40	1.49	332.40
TN-C300x12-B120x12	0.4	25.00	336.55	483.58	1.44	483.58

APÊNDICE D

Tabela 14 – Modos de falha e classes dos membros das ligações (continua)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C50x1.5-B40x1.5	0.8	A+B	4	1	4	3
TN-C50x2-B40x2	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C50x2.5-B40x2.5	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B48x1.5	0.8	A+B	4	4	4	4
TN-C60x2-B48x2	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C60x2.5-B48x2.5	0.8	A+B	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B56x1.5	0.8	A	4	4	4	4
TN-C70x2-B56x2	0.8	A+B	4	1	4	4
TN-C70x2.5-B56x2.5	0.8	A+B	1	1	4	1
TN-C70x3-B56x3	0.8	A+B	1	1	2	1
TN-C80x2-B64x2	0.8	A	4	4	4	4
TN-C80x2.5-B64x2.5	0.8	A+B	4	1	4	3
TN-C80x3-B64x3	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B64x3.5	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B72x2.5	0.8	A+B	4	1	4	4
TN-C90x3-B72x3	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C90x3.5-B72x3.5	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C90x4-B72x4	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B80x2.5	0.8	A	4	4	4	4
TN-C100x3-B80x3	0.8	A+B	4	1	4	3
TN-C100x4-B80x4	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C100x5-B80x5	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C120x3-B96x3	0.8	A	4	4	4	4
TN-C120x4-B96x4	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C120x4.5-B96x4.5	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C120x5-B96x5	0.8	A+B	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B112x3.5	0.8	A	4	4	4	4
TN-C140x4-B112x4	0.8	A+B	4	1	4	4
TN-C140x5-B112x5	0.8	A+B	1	1	4	1
TN-C140x6-B112x6	0.8	A+B	1	1	2	1
TN-C150x4-B120x4	0.8	A	4	2	4	4
TN-C150x4.5-B120x4.5	0.8	A+B	4	1	4	3

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C150x5-B120x5	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C150x6-B120x6	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C160x4-B128x4	0.8	A	4	4	4	4
TN-C160x5-B128x5	0.8	A+B	4	1	4	3
TN-C160x6-B128x6	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C160x8-B128x8	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C180x4-B144x4	0.8	A	4	4	4	4
TN-C180x5-B144x5	0.8	A	4	1	4	4
TN-C180x6-B144x6	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C180x8-B144x8	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C200x5-B160x5	0.8	A	4	4	4	4
TN-C200x6-B160x6	0.8	A+B	4	1	4	3
TN-C200x8-B160x8	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C200x10-B160x10	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C220x5-B176x5	0.8	A	4	4	4	4
TN-C220x6-B176x6	0.8	A	4	1	4	4
TN-C220x8-B176x8	0.8	A+B	1	1	4	1
TN-C220x10-B176x10	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C250x6-B200x6	0.8	A	4	4	4	4
TN-C250x8-B200x8	0.8	A+B	3	1	4	3
TN-C250x10-B200x10	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C250x12-B200x12	0.8	A+B	1	1	1	1
TN-C300x6-B240x6	0.8	A	4	4	4	4
TN-C300x8-B240x8	0.8	A	4	2	4	4
TN-C300x10-B240x10	0.8	A+B	2	1	4	2
TN-C300x12-B240x12	0.8	A+B	1	1	3	1
TN-C50x1.5-B37.5x1.5	0.75	A+B	4	1	4	3
TN-C50x2-B37.5x2	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C50x2.5-B37.5x2.5	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B45x1.5	0.75	A	4	2	4	4
TN-C60x2-B45x2	0.75	A+B	2	1	4	1
TN-C60x2.5-B45x2.5	0.75	A+B	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B52.5x1.5	0.75	A	4	4	4	4
TN-C70x2-B52.5x2	0.75	A+B	4	1	4	3
TN-C70x2.5-B52.5x2.5	0.75	A+B	1	1	4	1
TN-C70x3-B52.5x3	0.75	A+B	1	1	2	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C80x2-B60x2	0.75	A	4	2	4	4
TN-C80x2.5-B60x2.5	0.75	A+B	4	1	4	2
TN-C80x3-B60x3	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B60x3.5	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B67.5x2.5	0.75	A	4	1	4	3
TN-C90x3-B67.5x3	0.75	A+B	2	1	4	1
TN-C90x3.5-B67.5x3.5	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C90x4-B67.5x4	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B75x2.5	0.75	A	4	2	4	4
TN-C100x3-B75x3	0.75	A+B	4	1	4	3
TN-C100x4-B75x4	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C100x5-B75x5	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C120x3-B90x3	0.75	A	4	2	4	4
TN-C120x4-B90x4	0.75	A+B	2	1	4	1
TN-C120x4.5-B90x4.5	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C120x5-B90x5	0.75	A+B	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B105x3.5	0.75	A	4	2	4	4
TN-C140x4-B105x4	0.75	A	4	1	4	3
TN-C140x5-B105x5	0.75	A+B	1	1	4	1
TN-C140x6-B105x6	0.75	A+B	1	1	2	1
TN-C150x4-B112.5x4	0.75	A	4	1	4	4
TN-C150x4.5-B112.5x4.5	0.75	A	4	1	4	3
TN-C150x5-B112.5x5	0.75	A+B	2	1	4	1
TN-C150x6-B112.5x6	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C160x4-B120x4	0.75	A	4	2	4	4
TN-C160x5-B120x5	0.75	A	4	1	4	2
TN-C160x6-B120x6	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C160x8-B120x8	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C180x4-B135x4	0.75	A	4	4	4	4
TN-C180x5-B135x5	0.75	A	4	1	4	3
TN-C180x6-B135x6	0.75	A	2	1	4	1
TN-C180x8-B135x8	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C200x5-B150x5	0.75	A	4	2	4	4
TN-C200x6-B150x6	0.75	A	4	1	4	3
TN-C200x8-B150x8	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C200x10-B150x10	0.75	A+B	1	1	1	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C220x5-B165x5	0.75	A	4	4	4	4
TN-C220x6-B165x6	0.75	A	4	1	4	4
TN-C220x8-B165x8	0.75	A+B	1	1	4	1
TN-C220x10-B165x10	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C250x6-B187.5x6	0.75	A	4	3	4	4
TN-C250x8-B187.5x8	0.75	A	3	1	4	2
TN-C250x10-B187.5x10	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C250x12-B187.5x12	0.75	A+B	1	1	1	1
TN-C300x6-B225x6	0.75	A	4	4	4	4
TN-C300x8-B225x8	0.75	A	4	1	4	4
TN-C300x10-B225x10	0.75	A+B	2	1	4	1
TN-C300x12-B225x12	0.75	A+B	1	1	3	1
TN-C50x1.5-B35x1.5	0.7	A	4	1	4	2
TN-C50x2-B35x2	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C50x2.5-B35x2.5	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B42x1.5	0.7	A	4	1	4	4
TN-C60x2-B42x2	0.7	A+B	2	1	4	1
TN-C60x2.5-B42x2.5	0.7	A+B	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B49x1.5	0.7	A	4	4	4	4
TN-C70x2-B49x2	0.7	A	4	1	4	3
TN-C70x2.5-B49x2.5	0.7	A+B	1	1	4	1
TN-C70x3-B49x3	0.7	A+B	1	1	2	1
TN-C80x2-B56x2	0.7	A	4	1	4	4
TN-C80x2.5-B56x2.5	0.7	A	4	1	4	1
TN-C80x3-B56x3	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B56x3.5	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B63x2.5	0.7	A	4	1	4	3
TN-C90x3-B63x3	0.7	A+B	2	1	4	1
TN-C90x3.5-B63x3.5	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C90x4-B63x4	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B70x2.5	0.7	A	4	1	4	4
TN-C100x3-B70x3	0.7	A+B	4	1	4	2
TN-C100x4-B70x4	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C100x5-B70x5	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C120x3-B84x3	0.7	A	4	1	4	4
TN-C120x4-B84x4	0.7	A	2	1	4	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C120x4.5-B84x4.5	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C120x5-B84x5	0.7	A+B	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B98x3.5	0.7	A	4	1	4	4
TN-C140x4-B98x4	0.7	A	4	1	4	3
TN-C140x5-B98x5	0.7	A+B	1	1	4	1
TN-C140x6-B98x6	0.7	A+B	1	1	2	1
TN-C150x4-B105x4	0.7	A	4	1	4	3
TN-C150x4.5-B105x4.5	0.7	A	4	1	4	2
TN-C150x5-B105x5	0.7	A	2	1	4	1
TN-C150x6-B105x6	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C160x4-B112x4	0.7	A	4	1	4	4
TN-C160x5-B112x5	0.7	A	4	1	4	1
TN-C160x6-B112x6	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C160x8-B112x8	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C180x4-B126x4	0.7	A	4	4	4	4
TN-C180x5-B126x5	0.7	A	4	1	4	3
TN-C180x6-B126x6	0.7	A	2	1	4	1
TN-C180x8-B126x8	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C200x5-B140x5	0.7	A	4	1	4	4
TN-C200x6-B140x6	0.7	A	4	1	4	2
TN-C200x8-B140x8	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C200x10-B140x10	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C220x5-B154x5	0.7	A	4	2	4	4
TN-C220x6-B154x6	0.7	A	4	1	4	3
TN-C220x8-B154x8	0.7	A+B	1	1	4	1
TN-C220x10-B154x10	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C250x6-B175x6	0.7	A	4	1	4	4
TN-C250x8-B175x8	0.7	A	3	1	4	1
TN-C250x10-B175x10	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C250x12-B175x12	0.7	A+B	1	1	1	1
TN-C300x6-B210x6	0.7	A	4	4	4	4
TN-C300x8-B210x8	0.7	A	4	1	4	3
TN-C300x10-B210x10	0.7	A+B	2	1	4	1
TN-C300x12-B210x12	0.7	A+B	1	1	3	1
TN-C50x1.5-B30x1.5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C50x2-B30x2	0.6	A	1	1	3	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C50x2.5-B30x2.5	0.6	A+B	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B36x1.5	0.6	A	4	1	4	2
TN-C60x2-B36x2	0.6	A	2	1	4	1
TN-C60x2.5-B36x2.5	0.6	A	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B42x1.5	0.6	A	4	1	4	4
TN-C70x2-B42x2	0.6	A	4	1	4	1
TN-C70x2.5-B42x2.5	0.6	A	1	1	4	1
TN-C70x3-B42x3	0.6	A	1	1	2	1
TN-C80x2-B48x2	0.6	A	4	1	4	2
TN-C80x2.5-B48x2.5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C80x3-B48x3	0.6	A	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B48x3.5	0.6	A	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B54x2.5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C90x3-B54x3	0.6	A	2	1	4	1
TN-C90x3.5-B54x3.5	0.6	A	1	1	3	1
TN-C90x4-B54x4	0.6	A	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B60x2.5	0.6	A	4	1	4	2
TN-C100x3-B60x3	0.6	A	4	1	4	1
TN-C100x4-B60x4	0.6	A	1	1	3	1
TN-C100x5-B60x5	0.6	A	1	1	1	1
TN-C120x3-B72x3	0.6	A	4	1	4	2
TN-C120x4-B72x4	0.6	A	2	1	4	1
TN-C120x4.5-B72x4.5	0.6	A	1	1	3	1
TN-C120x5-B72x5	0.6	A	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B84x3.5	0.6	A	4	1	4	2
TN-C140x4-B84x4	0.6	A	4	1	4	1
TN-C140x5-B84x5	0.6	A	1	1	4	1
TN-C140x6-B84x6	0.6	A	1	1	2	1
TN-C150x4-B90x4	0.6	A	4	1	4	1
TN-C150x4.5-B90x4.5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C150x5-B90x5	0.6	A	2	1	4	1
TN-C150x6-B90x6	0.6	A	1	1	3	1
TN-C160x4-B96x4	0.6	A	4	1	4	2
TN-C160x5-B96x5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C160x6-B96x6	0.6	A	1	1	3	1
TN-C160x8-B96x8	0.6	A	1	1	1	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C180x4-B108x4	0.6	A	4	1	4	3
TN-C180x5-B108x5	0.6	A	4	1	4	1
TN-C180x6-B108x6	0.6	A	2	1	4	1
TN-C180x8-B108x8	0.6	A	1	1	1	1
TN-C200x5-B120x5	0.6	A	4	1	4	2
TN-C200x6-B120x6	0.6	A	4	1	4	1
TN-C200x8-B120x8	0.6	A	1	1	3	1
TN-C200x10-B120x10	0.6	A	1	1	1	1
TN-C220x5-B132x5	0.6	A	4	1	4	3
TN-C220x6-B132x6	0.6	A	4	1	4	1
TN-C220x8-B132x8	0.6	A	1	1	4	1
TN-C220x10-B132x10	0.6	A	1	1	1	1
TN-C250x6-B150x6	0.6	A	4	1	4	3
TN-C250x8-B150x8	0.6	A	3	1	4	1
TN-C250x10-B150x10	0.6	A	1	1	3	1
TN-C250x12-B150x12	0.6	A	1	1	1	1
TN-C300x6-B180x6	0.6	A	4	2	4	4
TN-C300x8-B180x8	0.6	A	4	1	4	1
TN-C300x10-B180x10	0.6	A	2	1	4	1
TN-C300x12-B180x12	0.6	A	1	1	3	1
TN-C50x1.5-B25x1.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C50x2-B25x2	0.5	A	1	1	3	1
TN-C50x2.5-B25x2.5	0.5	A	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B30x1.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C60x2-B30x2	0.5	A	2	1	4	1
TN-C60x2.5-B30x2.5	0.5	A	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B35x1.5	0.5	A	4	1	4	2
TN-C70x2-B35x2	0.5	A	4	1	4	1
TN-C70x2.5-B35x2.5	0.5	A	1	1	4	1
TN-C70x3-B35x3	0.5	A	1	1	2	1
TN-C80x2-B40x2	0.5	A	4	1	4	1
TN-C80x2.5-B40x2.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C80x3-B40x3	0.5	A	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B40x3.5	0.5	A	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B45x2.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C90x3-B45x3	0.5	A	2	1	4	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C90x3.5-B45x3.5	0.5	A	1	1	3	1
TN-C90x4-B45x4	0.5	A	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B50x2.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C100x3-B50x3	0.5	A	4	1	4	1
TN-C100x4-B50x4	0.5	A	1	1	3	1
TN-C100x5-B50x5	0.5	A	1	1	1	1
TN-C120x3-B60x3	0.5	A	4	1	4	1
TN-C120x4-B60x4	0.5	A	2	1	4	1
TN-C120x4.5-B60x4.5	0.5	A	1	1	3	1
TN-C120x5-B60x5	0.5	A	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B70x3.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C140x4-B70x4	0.5	A	4	1	4	1
TN-C140x5-B70x5	0.5	A	1	1	4	1
TN-C140x6-B70x6	0.5	A	1	1	2	1
TN-C150x4-B75x4	0.5	A	4	1	4	1
TN-C150x4.5-B75x4.5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C150x5-B75x5	0.5	A	2	1	4	1
TN-C150x6-B75x6	0.5	A	1	1	3	1
TN-C160x4-B80x4	0.5	A	4	1	4	1
TN-C160x5-B80x5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C160x6-B80x6	0.5	A	1	1	3	1
TN-C160x8-B80x8	0.5	A	1	1	1	1
TN-C180x4-B90x4	0.5	A	4	1	4	1
TN-C180x5-B90x5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C180x6-B90x6	0.5	A	2	1	4	1
TN-C180x8-B90x8	0.5	A	1	1	1	1
TN-C200x5-B100x5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C200x6-B100x6	0.5	A	4	1	4	1
TN-C200x8-B100x8	0.5	A	1	1	3	1
TN-C200x10-B100x10	0.5	A	1	1	1	1
TN-C220x5-B110x5	0.5	A	4	1	4	1
TN-C220x6-B110x6	0.5	A	4	1	4	1
TN-C220x8-B110x8	0.5	A	1	1	4	1
TN-C220x10-B110x10	0.5	A	1	1	1	1
TN-C250x6-B125x6	0.5	A	4	1	4	1
TN-C250x8-B125x8	0.5	A	3	1	4	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (continuação)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C250x10-B125x10	0.5	A	1	1	3	1
TN-C250x12-B125x12	0.5	A	1	1	1	1
TN-C300x6-B150x6	0.5	A	4	1	4	3
TN-C300x8-B150x8	0.5	A	4	1	4	1
TN-C300x10-B150x10	0.5	A	2	1	4	1
TN-C300x12-B150x12	0.5	A	1	1	3	1
TN-C50x1.5-B20x1.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C50x2-B20x2	0.4	A	1	1	3	1
TN-C50x2.5-B20x2.5	0.4	A	1	1	1	1
TN-C60x1.5-B24x1.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C60x2-B24x2	0.4	A	2	1	4	1
TN-C60x2.5-B24x2.5	0.4	A	1	1	2	1
TN-C70x1.5-B28x1.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C70x2-B28x2	0.4	A	4	1	4	1
TN-C70x2.5-B28x2.5	0.4	A	1	1	4	1
TN-C70x3-B28x3	0.4	A	1	1	2	1
TN-C80x2-B32x2	0.4	A	4	1	4	1
TN-C80x2.5-B32x2.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C80x3-B32x3	0.4	A	1	1	3	1
TN-C80x3.5-B32x3.5	0.4	A	1	1	1	1
TN-C90x2.5-B36x2.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C90x3-B36x3	0.4	A	2	1	4	1
TN-C90x3.5-B36x3.5	0.4	A	1	1	3	1
TN-C90x4-B36x4	0.4	A	1	1	1	1
TN-C100x2.5-B40x2.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C100x3-B40x3	0.4	A	4	1	4	1
TN-C100x4-B40x4	0.4	A	1	1	3	1
TN-C100x5-B40x5	0.4	A	1	1	1	1
TN-C120x3-B48x3	0.4	A	4	1	4	1
TN-C120x4-B48x4	0.4	A	2	1	4	1
TN-C120x4.5-B48x4.5	0.4	A	1	1	3	1
TN-C120x5-B48x5	0.4	A	1	1	2	1
TN-C140x3.5-B56x3.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C140x4-B56x4	0.4	A	4	1	4	1
TN-C140x5-B56x5	0.4	A	1	1	4	1
TN-C140x6-B56x6	0.4	A	1	1	2	1

Tabela 14 - Modos de falha e classes dos membros das ligações (conclusão)

Nomenclatura	β	Modo de falha	Classe Banzo (2023)	Classe Montante (2023)	Classe Banzo (2006)	Classe Montante (2006)
TN-C150x4-B60x4	0.4	A	4	1	4	1
TN-C150x4.5-B60x4.5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C150x5-B60x5	0.4	A	2	1	4	1
TN-C150x6-B60x6	0.4	A	1	1	3	1
TN-C160x4-B64x4	0.4	A	4	1	4	1
TN-C160x5-B64x5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C160x6-B64x6	0.4	A	1	1	3	1
TN-C160x8-B64x8	0.4	A	1	1	1	1
TN-C180x4-B72x4	0.4	A	4	1	4	1
TN-C180x5-B72x5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C180x6-B72x6	0.4	A	2	1	4	1
TN-C180x8-B72x8	0.4	A	1	1	1	1
TN-C200x5-B80x5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C200x6-B80x6	0.4	A	4	1	4	1
TN-C200x8-B80x8	0.4	A	1	1	3	1
TN-C200x10-B80x10	0.4	A	1	1	1	1
TN-C220x5-B88x5	0.4	A	4	1	4	1
TN-C220x6-B88x6	0.4	A	4	1	4	1
TN-C220x8-B88x8	0.4	A	1	1	4	1
TN-C220x10-B88x10	0.4	A	1	1	1	1
TN-C250x6-B100x6	0.4	A	4	1	4	1
TN-C250x8-B100x8	0.4	A	3	1	4	1
TN-C250x10-B100x10	0.4	A	1	1	3	1
TN-C250x12-B100x12	0.4	A	1	1	1	1
TN-C300x6-B120x6	0.4	A	4	1	4	1
TN-C300x8-B120x8	0.4	A	4	1	4	1
TN-C300x10-B120x10	0.4	A	2	1	4	1
TN-C300x12-B120x12	0.4	A	1	1	3	1

APÊNDICE E

Tabela 15 – Resistências analíticas dos modelos (continua)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C50x1.5-B40x1.5	0.8	13.97	16.90	16.99	27.24
TN-C50x2-B40x2	0.8	24.83	29.37	36.40	48.43
TN-C50x2.5-B40x2.5	0.8	38.80	45.25	61.11	75.67
TN-C60x1.5-B48x1.5	0.8	13.97	17.21	14.59	27.24
TN-C60x2-B48x2	0.8	24.83	29.78	32.66	48.43
TN-C60x2.5-B48x2.5	0.8	38.80	45.76	57.93	75.67
TN-C70x1.5-B56x1.5	0.8	13.97	17.52	12.68	27.24
TN-C70x2-B56x2	0.8	24.83	30.19	29.05	48.43
TN-C70x2.5-B56x2.5	0.8	38.80	46.27	53.41	75.67
TN-C70x3-B56x3	0.8	55.88	65.77	84.38	108.96
TN-C80x2-B64x2	0.8	24.83	30.60	25.93	48.43
TN-C80x2.5-B64x2.5	0.8	38.80	46.78	48.70	75.67
TN-C80x3-B64x3	0.8	55.88	66.38	79.17	108.96
TN-C80x3.5-B64x3.5	0.8	76.06	89.40	115.73	148.31
TN-C90x2.5-B72x2.5	0.8	38.80	47.29	44.36	75.67
TN-C90x3-B72x3	0.8	55.88	67.00	73.49	108.96
TN-C90x3.5-B72x3.5	0.8	76.06	90.12	109.91	148.31
TN-C90x4-B72x4	0.8	99.34	116.65	151.98	193.71
TN-C100x2.5-B80x2.5	0.8	38.80	47.81	40.52	75.67
TN-C100x3-B80x3	0.8	55.88	67.61	67.97	108.96
TN-C100x4-B80x4	0.8	99.34	117.47	145.59	193.71
TN-C100x5-B80x5	0.8	155.22	180.98	244.43	302.68
TN-C120x3-B96x3	0.8	55.88	68.84	58.34	108.96
TN-C120x4-B96x4	0.8	99.34	119.11	130.64	193.71
TN-C120x4.5-B96x4.5	0.8	125.73	149.36	178.13	245.17
TN-C120x5-B96x5	0.8	155.22	183.03	231.74	302.68
TN-C140x3.5-B112x3.5	0.8	76.06	93.70	79.41	148.31
TN-C140x4-B112x4	0.8	99.34	120.75	116.21	193.71
TN-C140x5-B112x5	0.8	155.22	185.08	213.63	302.68
TN-C140x6-B112x6	0.8	223.51	263.08	337.53	435.85
TN-C150x4-B120x4	0.8	99.34	121.57	109.71	193.71
TN-C150x4.5-B120x4.5	0.8	125.73	152.13	152.93	245.17
TN-C150x5-B120x5	0.8	155.22	186.11	204.13	302.68
TN-C150x6-B120x6	0.8	223.51	264.31	327.58	435.85
TN-C160x4-B128x4	0.8	99.34	122.39	103.72	193.71
TN-C160x5-B128x5	0.8	155.22	187.13	194.81	302.68
TN-C160x6-B128x6	0.8	223.51	265.53	316.68	435.85
TN-C160x8-B128x8	0.8	397.36	463.32	625.75	774.85

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	NEC3 (kN)	N _{FY} (kN)	NEC3 ($\beta = 1$) (kN)	N _{PR} (kN)
TN-C180x4-B144x4	0.8	99.34	124.03	93.24	193.71
TN-C180x5-B144x5	0.8	155.22	189.18	177.42	302.68
TN-C180x6-B144x6	0.8	223.51	267.99	293.94	435.85
TN-C180x8-B144x8	0.8	397.36	466.60	607.93	774.85
TN-C200x5-B160x5	0.8	155.22	191.23	162.07	302.68
TN-C200x6-B160x6	0.8	223.51	270.45	271.88	435.85
TN-C200x8-B160x8	0.8	397.36	469.88	582.36	774.85
TN-C200x10-B160x10	0.8	620.87	723.94	977.73	1210.70
TN-C220x5-B176x5	0.8	155.22	193.28	148.73	302.68
TN-C220x6-B176x6	0.8	223.51	272.91	251.59	435.85
TN-C220x8-B176x8	0.8	397.36	473.15	552.96	774.85
TN-C220x10-B176x10	0.8	620.87	728.03	956.65	1210.70
TN-C250x6-B200x6	0.8	223.51	276.60	225.04	435.85
TN-C250x8-B200x8	0.8	397.36	478.07	507.57	774.85
TN-C250x10-B200x10	0.8	620.87	734.18	909.94	1210.70
TN-C250x12-B200x12	0.8	894.06	1044.93	1397.12	1743.41
TN-C300x6-B240x6	0.8	223.51	282.75	190.08	435.85
TN-C300x8-B240x8	0.8	397.36	486.27	438.83	774.85
TN-C300x10-B240x10	0.8	620.87	744.43	816.50	1210.70
TN-C300x12-B240x12	0.8	894.06	1057.22	1310.31	1743.41
TN-C50x1.5-B37.5x1.5	0.75	11.54	13.97	16.10	21.73
TN-C50x2-B37.5x2	0.75	20.52	24.26	34.58	38.63
TN-C50x2.5-B37.5x2.5	0.75	32.06	37.38	58.20	60.36
TN-C60x1.5-B45x1.5	0.75	11.54	14.22	13.80	21.73
TN-C60x2-B45x2	0.75	20.52	24.60	30.97	38.63
TN-C60x2.5-B45x2.5	0.75	32.06	37.81	55.06	60.36
TN-C70x1.5-B52.5x1.5	0.75	11.54	14.47	11.98	21.73
TN-C70x2-B52.5x2	0.75	20.52	24.94	27.51	38.63
TN-C70x2.5-B52.5x2.5	0.75	32.06	38.23	50.68	60.36
TN-C70x3-B52.5x3	0.75	46.17	54.34	80.22	86.91
TN-C80x2-B60x2	0.75	20.52	25.28	24.53	38.63
TN-C80x2.5-B60x2.5	0.75	32.06	38.65	46.16	60.36
TN-C80x3-B60x3	0.75	46.17	54.85	75.16	86.91
TN-C80x3.5-B60x3.5	0.75	62.84	73.87	110.05	118.30
TN-C90x2.5-B67.5x2.5	0.75	32.06	39.08	41.99	60.36
TN-C90x3-B67.5x3	0.75	46.17	55.36	69.68	86.91
TN-C90x3.5-B67.5x3.5	0.75	62.84	74.46	104.38	118.30
TN-C90x4-B67.5x4	0.75	82.08	96.38	144.55	154.51
TN-C100x2.5-B75x2.5	0.75	32.06	39.50	38.33	60.36
TN-C100x3-B75x3	0.75	46.17	55.86	64.39	86.91
TN-C100x4-B75x4	0.75	82.08	97.06	138.31	154.51
TN-C100x5-B75x5	0.75	128.25	149.54	232.79	241.42
TN-C120x3-B90x3	0.75	46.17	56.88	55.19	86.91

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C120x4-B90x4	0.75	82.08	98.41	123.88	154.51
TN-C120x4.5-B90x4.5	0.75	103.88	123.41	169.11	195.55
TN-C120x5-B90x5	0.75	128.25	151.23	220.25	241.42
TN-C140x3.5-B105x3.5	0.75	62.84	77.42	75.12	118.30
TN-C140x4-B105x4	0.75	82.08	99.77	110.05	154.51
TN-C140x5-B105x5	0.75	128.25	152.92	202.71	241.42
TN-C140x6-B105x6	0.75	184.68	217.36	320.89	347.65
TN-C150x4-B112.5x4	0.75	82.08	100.44	103.83	154.51
TN-C150x4.5-B112.5x4.5	0.75	103.88	125.69	144.88	195.55
TN-C150x5-B112.5x5	0.75	128.25	153.77	193.57	241.42
TN-C150x6-B112.5x6	0.75	184.68	218.38	311.20	347.65
TN-C160x4-B120x4	0.75	82.08	101.12	98.12	154.51
TN-C160x5-B120x5	0.75	128.25	154.61	184.63	241.42
TN-C160x6-B120x6	0.75	184.68	219.39	300.64	347.65
TN-C160x8-B120x8	0.75	328.31	382.81	595.95	618.05
TN-C180x4-B135x4	0.75	82.08	102.47	88.12	154.51
TN-C180x5-B135x5	0.75	128.25	156.31	167.97	241.42
TN-C180x6-B135x6	0.75	184.68	221.43	278.74	347.65
TN-C180x8-B135x8	0.75	328.31	385.52	578.20	618.05
TN-C200x5-B150x5	0.75	128.25	158.00	153.31	241.42
TN-C200x6-B150x6	0.75	184.68	223.46	257.57	347.65
TN-C200x8-B150x8	0.75	328.31	388.23	553.24	618.05
TN-C200x10-B150x10	0.75	512.99	598.14	931.17	965.70
TN-C220x5-B165x5	0.75	128.25	159.69	140.59	241.42
TN-C220x6-B165x6	0.75	184.68	225.49	238.16	347.65
TN-C220x8-B165x8	0.75	328.31	390.94	524.80	618.05
TN-C220x10-B165x10	0.75	512.99	601.53	910.09	965.70
TN-C250x6-B187.5x6	0.75	184.68	228.54	212.81	347.65
TN-C250x8-B187.5x8	0.75	328.31	395.00	481.13	618.05
TN-C250x10-B187.5x10	0.75	512.99	606.61	864.44	965.70
TN-C250x12-B187.5x12	0.75	738.70	863.36	1329.95	1390.61
TN-C300x6-B225x6	0.75	184.68	233.61	179.52	347.65
TN-C300x8-B225x8	0.75	328.31	401.77	415.32	618.05
TN-C300x10-B225x10	0.75	512.99	615.07	774.27	965.70
TN-C300x12-B225x12	0.75	738.70	873.52	1244.79	1390.61
TN-C50x1.5-B35x1.5	0.7	9.87	11.94	15.20	17.91
TN-C50x2-B35x2	0.7	17.54	20.75	32.76	31.84
TN-C50x2.5-B35x2.5	0.7	27.41	31.96	55.29	49.75
TN-C60x1.5-B42x1.5	0.7	9.87	12.16	13.01	17.91
TN-C60x2-B42x2	0.7	17.54	21.03	29.28	31.84
TN-C60x2.5-B42x2.5	0.7	27.41	32.32	52.19	49.75
TN-C70x1.5-B49x1.5	0.7	9.87	12.37	11.28	17.91
TN-C70x2-B49x2	0.7	17.54	21.32	25.97	31.84

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C70x2.5-B49x2.5	0.7	27.41	32.69	47.95	49.75
TN-C70x3-B49x3	0.7	39.47	46.46	76.06	71.64
TN-C80x2-B56x2	0.7	17.54	21.61	23.13	31.84
TN-C80x2.5-B56x2.5	0.7	27.41	33.05	43.61	49.75
TN-C80x3-B56x3	0.7	39.47	46.89	71.15	71.64
TN-C80x3.5-B56x3.5	0.7	53.73	63.15	104.37	97.52
TN-C90x2.5-B63x2.5	0.7	27.41	33.41	39.63	49.75
TN-C90x3-B63x3	0.7	39.47	47.33	65.88	71.64
TN-C90x3.5-B63x3.5	0.7	53.73	63.66	98.85	97.52
TN-C90x4-B63x4	0.7	70.17	82.40	137.12	127.37
TN-C100x2.5-B70x2.5	0.7	27.41	33.77	36.14	49.75
TN-C100x3-B70x3	0.7	39.47	47.76	60.82	71.64
TN-C100x4-B70x4	0.7	70.17	82.98	131.03	127.37
TN-C100x5-B70x5	0.7	109.65	127.85	221.15	199.01
TN-C120x3-B84x3	0.7	39.47	48.63	52.04	71.64
TN-C120x4-B84x4	0.7	70.17	84.14	117.13	127.37
TN-C120x4.5-B84x4.5	0.7	88.81	105.51	160.09	161.20
TN-C120x5-B84x5	0.7	109.65	129.30	208.76	199.01
TN-C140x3.5-B98x3.5	0.7	53.73	66.19	70.83	97.52
TN-C140x4-B98x4	0.7	70.17	85.30	103.89	127.37
TN-C140x5-B98x5	0.7	109.65	130.74	191.80	199.01
TN-C140x6-B98x6	0.7	157.89	185.84	304.25	286.58
TN-C150x4-B105x4	0.7	70.17	85.88	97.95	127.37
TN-C150x4.5-B105x4.5	0.7	88.81	107.47	136.83	161.20
TN-C150x5-B105x5	0.7	109.65	131.47	183.01	199.01
TN-C150x6-B105x6	0.7	157.89	186.71	294.82	286.58
TN-C160x4-B112x4	0.7	70.17	86.46	92.51	127.37
TN-C160x5-B112x5	0.7	109.65	132.19	174.44	199.01
TN-C160x6-B112x6	0.7	157.89	187.58	284.61	286.58
TN-C160x8-B112x8	0.7	280.70	327.29	566.15	509.47
TN-C180x4-B126x4	0.7	70.17	87.61	83.01	127.37
TN-C180x5-B126x5	0.7	109.65	133.64	158.52	199.01
TN-C180x6-B126x6	0.7	157.89	189.31	263.53	286.58
TN-C180x8-B126x8	0.7	280.70	329.61	548.46	509.47
TN-C200x5-B140x5	0.7	109.65	135.09	144.55	199.01
TN-C200x6-B140x6	0.7	157.89	191.05	243.26	286.58
TN-C200x8-B140x8	0.7	280.70	331.93	524.12	509.47
TN-C200x10-B140x10	0.7	438.59	511.40	884.61	796.04
TN-C220x5-B154x5	0.7	109.65	136.53	132.45	199.01
TN-C220x6-B154x6	0.7	157.89	192.79	224.72	286.58
TN-C220x8-B154x8	0.7	280.70	334.24	496.64	509.47
TN-C220x10-B154x10	0.7	438.59	514.29	863.52	796.04
TN-C250x6-B175x6	0.7	157.89	195.39	200.58	286.58

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	N _{EC3} (kN)	N _{FY} (kN)	N _{EC3} ($\beta = 1$) (kN)	N _{PR} (kN)
TN-C250x8-B175x8	0.7	280.70	337.72	454.69	509.47
TN-C250x10-B175x10	0.7	438.59	518.63	818.94	796.04
TN-C250x12-B175x12	0.7	631.57	738.15	1262.78	1146.30
TN-C300x6-B210x6	0.7	157.89	199.73	168.96	286.58
TN-C300x8-B210x8	0.7	280.70	343.50	391.81	509.47
TN-C300x10-B210x10	0.7	438.59	525.87	732.04	796.04
TN-C300x12-B210x12	0.7	631.57	746.83	1179.28	1146.30
TN-C50x1.5-B30x1.5	0.6	7.69	5.64		12.92
TN-C50x2-B30x2	0.6	13.67	11.28		22.96
TN-C50x2.5-B30x2.5	0.6	21.35	18.79		35.88
TN-C60x1.5-B36x1.5	0.6	7.69	5.07		12.92
TN-C60x2-B36x2	0.6	13.67	10.52		22.96
TN-C60x2.5-B36x2.5	0.6	21.35	17.85		35.88
TN-C70x1.5-B42x1.5	0.6	7.69	4.51		12.92
TN-C70x2-B42x2	0.6	13.67	9.77		22.96
TN-C70x2.5-B42x2.5	0.6	21.35	16.91		35.88
TN-C70x3-B42x3	0.6	30.75	25.93		51.66
TN-C80x2-B48x2	0.6	13.67	9.02		22.96
TN-C80x2.5-B48x2.5	0.6	21.35	15.97		35.88
TN-C80x3-B48x3	0.6	30.75	24.81		51.66
TN-C80x3.5-B48x3.5	0.6	41.85	35.52		70.32
TN-C90x2.5-B54x2.5	0.6	21.35	15.03		35.88
TN-C90x3-B54x3	0.6	30.75	23.68		51.66
TN-C90x3.5-B54x3.5	0.6	41.85	34.20		70.32
TN-C90x4-B54x4	0.6	54.67	46.60		91.84
TN-C100x2.5-B60x2.5	0.6	21.35	14.09		35.88
TN-C100x3-B60x3	0.6	30.75	22.55		51.66
TN-C100x4-B60x4	0.6	54.67	45.10		91.84
TN-C100x5-B60x5	0.6	85.42	75.17		143.50
TN-C120x3-B72x3	0.6	30.75	20.30		51.66
TN-C120x4-B72x4	0.6	54.67	42.09		91.84
TN-C120x4.5-B72x4.5	0.6	69.19	55.81		116.24
TN-C120x5-B72x5	0.6	85.42	71.41		143.50
TN-C140x3.5-B84x3.5	0.6	41.85	27.62		70.32
TN-C140x4-B84x4	0.6	54.67	39.09		91.84
TN-C140x5-B84x5	0.6	85.42	67.65		143.50
TN-C140x6-B84x6	0.6	123.00	103.73		206.64
TN-C150x4-B90x4	0.6	54.67	37.58		91.84
TN-C150x4.5-B90x4.5	0.6	69.19	50.74		116.24
TN-C150x5-B90x5	0.6	85.42	65.77		143.50
TN-C150x6-B90x6	0.6	123.00	101.48		206.64
TN-C160x4-B96x4	0.6	54.67	36.08		91.84
TN-C160x5-B96x5	0.6	85.42	63.89		143.50

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	NEC3 (kN)	N _{FY} (kN)	NEC3 ($\beta = 1$) (kN)	N _{PR} (kN)
TN-C160x6-B96x6	0.6	123.00	99.22		206.64
TN-C160x8-B96x8	0.6	218.67	192.43		367.36
TN-C180x4-B108x4	0.6	54.67	33.07		91.84
TN-C180x5-B108x5	0.6	85.42	60.13		143.50
TN-C180x6-B108x6	0.6	123.00	94.71		206.64
TN-C180x8-B108x8	0.6	218.67	186.42		367.36
TN-C200x5-B120x5	0.6	85.42	56.38		143.50
TN-C200x6-B120x6	0.6	123.00	90.20		206.64
TN-C200x8-B120x8	0.6	218.67	180.40		367.36
TN-C200x10-B120x10	0.6	341.67	300.67		574.01
TN-C220x5-B132x5	0.6	85.42	52.62		143.50
TN-C220x6-B132x6	0.6	123.00	85.69		206.64
TN-C220x8-B132x8	0.6	218.67	174.39		367.36
TN-C220x10-B132x10	0.6	341.67	293.15		574.01
TN-C250x6-B150x6	0.6	123.00	78.93		206.64
TN-C250x8-B150x8	0.6	218.67	165.37		367.36
TN-C250x10-B150x10	0.6	341.67	281.88		574.01
TN-C250x12-B150x12	0.6	492.01	428.45		826.57
TN-C300x6-B180x6	0.6	123.00	67.65		206.64
TN-C300x8-B180x8	0.6	218.67	150.33		367.36
TN-C300x10-B180x10	0.6	341.67	263.09		574.01
TN-C300x12-B180x12	0.6	492.01	405.90		826.57
TN-C50x1.5-B25x1.5	0.5	6.31	4.63		9.75
TN-C50x2-B25x2	0.5	11.22	9.26		17.34
TN-C50x2.5-B25x2.5	0.5	17.54	15.43		27.09
TN-C60x1.5-B30x1.5	0.5	6.31	4.17		9.75
TN-C60x2-B30x2	0.5	11.22	8.64		17.34
TN-C60x2.5-B30x2.5	0.5	17.54	14.66		27.09
TN-C70x1.5-B35x1.5	0.5	6.31	3.70		9.75
TN-C70x2-B35x2	0.5	11.22	8.02		17.34
TN-C70x2.5-B35x2.5	0.5	17.54	13.89		27.09
TN-C70x3-B35x3	0.5	25.25	21.29		39.01
TN-C80x2-B40x2	0.5	11.22	7.41		17.34
TN-C80x2.5-B40x2.5	0.5	17.54	13.12		27.09
TN-C80x3-B40x3	0.5	25.25	20.37		39.01
TN-C80x3.5-B40x3.5	0.5	34.37	29.16		53.10
TN-C90x2.5-B45x2.5	0.5	17.54	12.34		27.09
TN-C90x3-B45x3	0.5	25.25	19.44		39.01
TN-C90x3.5-B45x3.5	0.5	34.37	28.08		53.10
TN-C90x4-B45x4	0.5	44.89	38.27		69.36
TN-C100x2.5-B50x2.5	0.5	17.54	11.57		27.09
TN-C100x3-B50x3	0.5	25.25	18.52		39.01
TN-C100x4-B50x4	0.5	44.89	37.03		69.36

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C100x5-B50x5	0.5	70.14	61.72		108.37
TN-C120x3-B60x3	0.5	25.25	16.67		39.01
TN-C120x4-B60x4	0.5	44.89	34.57		69.36
TN-C120x4.5-B60x4.5	0.5	56.81	45.83		87.78
TN-C120x5-B60x5	0.5	70.14	58.64		108.37
TN-C140x3.5-B70x3.5	0.5	34.37	22.68		53.10
TN-C140x4-B70x4	0.5	44.89	32.10		69.36
TN-C140x5-B70x5	0.5	70.14	55.55		108.37
TN-C140x6-B70x6	0.5	101.00	85.18		156.05
TN-C150x4-B75x4	0.5	44.89	30.86		69.36
TN-C150x4.5-B75x4.5	0.5	56.81	41.66		87.78
TN-C150x5-B75x5	0.5	70.14	54.01		108.37
TN-C150x6-B75x6	0.5	101.00	83.33		156.05
TN-C160x4-B80x4	0.5	44.89	29.63		69.36
TN-C160x5-B80x5	0.5	70.14	52.47		108.37
TN-C160x6-B80x6	0.5	101.00	81.48		156.05
TN-C160x8-B80x8	0.5	179.56	158.01		277.42
TN-C180x4-B90x4	0.5	44.89	27.16		69.36
TN-C180x5-B90x5	0.5	70.14	49.38		108.37
TN-C180x6-B90x6	0.5	101.00	77.77		156.05
TN-C180x8-B90x8	0.5	179.56	153.07		277.42
TN-C200x5-B100x5	0.5	70.14	46.29		108.37
TN-C200x6-B100x6	0.5	101.00	74.07		156.05
TN-C200x8-B100x8	0.5	179.56	148.14		277.42
TN-C200x10-B100x10	0.5	280.56	246.89		433.47
TN-C220x5-B110x5	0.5	70.14	43.21		108.37
TN-C220x6-B110x6	0.5	101.00	70.37		156.05
TN-C220x8-B110x8	0.5	179.56	143.20		277.42
TN-C220x10-B110x10	0.5	280.56	240.72		433.47
TN-C250x6-B125x6	0.5	101.00	64.81		156.05
TN-C250x8-B125x8	0.5	179.56	135.79		277.42
TN-C250x10-B125x10	0.5	280.56	231.46		433.47
TN-C250x12-B125x12	0.5	404.01	351.83		624.20
TN-C300x6-B150x6	0.5	101.00	55.55		156.05
TN-C300x8-B150x8	0.5	179.56	123.45		277.42
TN-C300x10-B150x10	0.5	280.56	216.03		433.47
TN-C300x12-B150x12	0.5	404.01	333.31		624.20
TN-C50x1.5-B20x1.5	0.4	5.36	3.93		7.55
TN-C50x2-B20x2	0.4	9.52	7.86		13.43
TN-C50x2.5-B20x2.5	0.4	14.88	13.09		20.98
TN-C60x1.5-B24x1.5	0.4	5.36	3.54		7.55
TN-C60x2-B24x2	0.4	9.52	7.33		13.43
TN-C60x2.5-B24x2.5	0.4	14.88	12.44		20.98

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (continuação)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C70x1.5-B28x1.5	0.4	5.36	3.14		7.55
TN-C70x2-B28x2	0.4	9.52	6.81		13.43
TN-C70x2.5-B28x2.5	0.4	14.88	11.78		20.98
TN-C70x3-B28x3	0.4	21.43	18.07		30.21
TN-C80x2-B32x2	0.4	9.52	6.29		13.43
TN-C80x2.5-B32x2.5	0.4	14.88	11.13		20.98
TN-C80x3-B32x3	0.4	21.43	17.28		30.21
TN-C80x3.5-B32x3.5	0.4	29.16	24.75		41.12
TN-C90x2.5-B36x2.5	0.4	14.88	10.48		20.98
TN-C90x3-B36x3	0.4	21.43	16.50		30.21
TN-C90x3.5-B36x3.5	0.4	29.16	23.83		41.12
TN-C90x4-B36x4	0.4	38.09	32.47		53.71
TN-C100x2.5-B40x2.5	0.4	14.88	9.82		20.98
TN-C100x3-B40x3	0.4	21.43	15.71		30.21
TN-C100x4-B40x4	0.4	38.09	31.43		53.71
TN-C100x5-B40x5	0.4	59.52	52.38		83.92
TN-C120x3-B48x3	0.4	21.43	14.14		30.21
TN-C120x4-B48x4	0.4	38.09	29.33		53.71
TN-C120x4.5-B48x4.5	0.4	48.21	38.89		67.98
TN-C120x5-B48x5	0.4	59.52	49.76		83.92
TN-C140x3.5-B56x3.5	0.4	29.16	19.25		41.12
TN-C140x4-B56x4	0.4	38.09	27.24		53.71
TN-C140x5-B56x5	0.4	59.52	47.14		83.92
TN-C140x6-B56x6	0.4	85.71	72.28		120.85
TN-C150x4-B60x4	0.4	38.09	26.19		53.71
TN-C150x4.5-B60x4.5	0.4	48.21	35.35		67.98
TN-C150x5-B60x5	0.4	59.52	45.83		83.92
TN-C150x6-B60x6	0.4	85.71	70.71		120.85
TN-C160x4-B64x4	0.4	38.09	25.14		53.71
TN-C160x5-B64x5	0.4	59.52	44.52		83.92
TN-C160x6-B64x6	0.4	85.71	69.14		120.85
TN-C160x8-B64x8	0.4	152.37	134.08		214.84
TN-C180x4-B72x4	0.4	38.09	23.05		53.71
TN-C180x5-B72x5	0.4	59.52	41.90		83.92
TN-C180x6-B72x6	0.4	85.71	65.99		120.85
TN-C180x8-B72x8	0.4	152.37	129.89		214.84
TN-C200x5-B80x5	0.4	59.52	39.28		83.92
TN-C200x6-B80x6	0.4	85.71	62.85		120.85
TN-C200x8-B80x8	0.4	152.37	125.70		214.84
TN-C200x10-B80x10	0.4	238.07	209.51		335.69
TN-C220x5-B88x5	0.4	59.52	36.66		83.92
TN-C220x6-B88x6	0.4	85.71	59.71		120.85
TN-C220x8-B88x8	0.4	152.37	121.51		214.84

Tabela 15 - Resistências analíticas dos modelos (conclusão)

Nomenclatura	β	N_{EC3} (kN)	N_{FY} (kN)	$N_{EC3} (\beta = 1)$ (kN)	N_{PR} (kN)
TN-C220x10-B88x10	0.4	238.07	204.27		335.69
TN-C250x6-B100x6	0.4	85.71	55.00		120.85
TN-C250x8-B100x8	0.4	152.37	115.23		214.84
TN-C250x10-B100x10	0.4	238.07	196.41		335.69
TN-C250x12-B100x12	0.4	342.83	298.55		483.39
TN-C300x6-B120x6	0.4	85.71	47.14		120.85
TN-C300x8-B120x8	0.4	152.37	104.75		214.84
TN-C300x10-B120x10	0.4	238.07	183.32		335.69
TN-C300x12-B120x12	0.4	342.83	282.83		483.39

APÊNDICE F

Tabela 16 – Razões entre resistências numéricas e analíticas (continua)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C50x1.5-B40x1.5	0.8	1.94	1.94	1.61	1.61	1.60	1.00
TN-C50x2-B40x2	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C50x2.5-B40x2.5	0.8	1.89	1.89	1.62	1.62	1.20	0.97
TN-C60x1.5-B48x1.5	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C60x2-B48x2	0.8	1.96	1.96	1.63	1.63	1.49	1.01
TN-C60x2.5-B48x2.5	0.8	1.95	1.95	1.65	1.65	1.31	1.00
TN-C70x1.5-B56x1.5	0.8	1.96	1.96	1.56	1.56	2.16	1.00
TN-C70x2-B56x2	0.8	1.94	1.94	1.59	1.59	1.66	0.99
TN-C70x2.5-B56x2.5	0.8	1.97	1.97	1.65	1.65	1.43	1.01
TN-C70x3-B56x3	0.8	1.94	1.94	1.65	1.65	1.29	1.00
TN-C80x2-B64x2	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C80x2.5-B64x2.5	0.8	1.95	1.95	1.62	1.62	1.55	1.00
TN-C80x3-B64x3	0.8	1.97	1.97	1.66	1.66	1.39	1.01
TN-C80x3.5-B64x3.5	0.8	1.94	1.94	1.65	1.65	1.27	0.99
TN-C90x2.5-B72x2.5	0.8	1.94	1.94	1.59	1.59	1.69	0.99
TN-C90x3-B72x3	0.8	1.96	1.96	1.63	1.63	1.49	1.01
TN-C90x3.5-B72x3.5	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.36	1.01
TN-C90x4-B72x4	0.8	1.93	1.93	1.65	1.65	1.26	0.99
TN-C100x2.5-B80x2.5	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C100x3-B80x3	0.8	1.94	1.94	1.61	1.61	1.60	1.00
TN-C100x4-B80x4	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C100x5-B80x5	0.8	1.89	1.89	1.62	1.62	1.20	0.97
TN-C120x3-B96x3	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C120x4-B96x4	0.8	1.96	1.96	1.64	1.64	1.49	1.01
TN-C120x4.5-B96x4.5	0.8	1.97	1.97	1.66	1.66	1.39	1.01
TN-C120x5-B96x5	0.8	1.95	1.95	1.65	1.65	1.31	1.00
TN-C140x3.5-B112x3.5	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C140x4-B112x4	0.8	1.94	1.94	1.59	1.59	1.66	0.99
TN-C140x5-B112x5	0.8	1.97	1.97	1.65	1.65	1.43	1.01
TN-C140x6-B112x6	0.8	1.94	1.94	1.65	1.65	1.29	1.00
TN-C150x4-B120x4	0.8	1.93	1.93	1.58	1.58	1.75	0.99
TN-C150x4.5-B120x4.5	0.8	1.94	1.94	1.61	1.61	1.60	1.00
TN-C150x5-B120x5	0.8	1.96	1.96	1.64	1.64	1.49	1.01

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C150x6-B120x6	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C160x4-B128x4	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C160x5-B128x5	0.8	1.95	1.95	1.62	1.62	1.55	1.00
TN-C160x6-B128x6	0.8	1.97	1.97	1.66	1.66	1.39	1.01
TN-C160x8-B128x8	0.8	1.89	1.89	1.62	1.62	1.20	0.97
TN-C180x4-B144x4	0.8	1.95	1.95	1.56	1.56	2.08	1.00
TN-C180x5-B144x5	0.8	1.94	1.94	1.59	1.59	1.69	0.99
TN-C180x6-B144x6	0.8	1.96	1.96	1.64	1.64	1.49	1.01
TN-C180x8-B144x8	0.8	1.94	1.94	1.65	1.65	1.26	0.99
TN-C200x5-B160x5	0.8	1.93	1.93	1.57	1.57	1.85	0.99
TN-C200x6-B160x6	0.8	1.94	1.94	1.61	1.61	1.60	1.00
TN-C200x8-B160x8	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C200x10-B160x10	0.8	1.89	1.89	1.62	1.62	1.20	0.97
TN-C220x5-B176x5	0.8	1.94	1.94	1.56	1.56	2.03	1.00
TN-C220x6-B176x6	0.8	1.93	1.93	1.58	1.58	1.72	0.99
TN-C220x8-B176x8	0.8	1.97	1.97	1.66	1.66	1.42	1.01
TN-C220x10-B176x10	0.8	1.93	1.93	1.64	1.64	1.25	0.99
TN-C250x6-B200x6	0.8	1.94	1.94	1.56	1.56	1.92	0.99
TN-C250x8-B200x8	0.8	1.95	1.95	1.62	1.62	1.53	1.00
TN-C250x10-B200x10	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C250x12-B200x12	0.8	1.91	1.91	1.63	1.63	1.22	0.98
TN-C300x6-B240x6	0.8	1.98	1.98	1.57	1.57	2.33	1.02
TN-C300x8-B240x8	0.8	1.93	1.93	1.58	1.58	1.75	0.99
TN-C300x10-B240x10	0.8	1.96	1.96	1.64	1.64	1.49	1.01
TN-C300x12-B240x12	0.8	1.96	1.96	1.66	1.66	1.34	1.00
TN-C50x1.5-B37.5x1.5	0.75	1.89	1.89	1.56	1.56	1.36	1.00
TN-C50x2-B37.5x2	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C50x2.5-B37.5x2.5	0.75	2.00	2.00	1.72	1.72	1.10	1.06
TN-C60x1.5-B45x1.5	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C60x2-B45x2	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C60x2.5-B45x2.5	0.75	1.98	1.98	1.68	1.68	1.15	1.05
TN-C70x1.5-B52.5x1.5	0.75	1.91	1.91	1.52	1.52	1.84	1.01
TN-C70x2-B52.5x2	0.75	1.88	1.88	1.55	1.55	1.41	1.00
TN-C70x2.5-B52.5x2.5	0.75	1.93	1.93	1.62	1.62	1.22	1.03
TN-C70x3-B52.5x3	0.75	1.99	1.99	1.69	1.69	1.14	1.06
TN-C80x2-B60x2	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C80x2.5-B60x2.5	0.75	1.90	1.90	1.57	1.57	1.32	1.01

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C80x3-B60x3	0.75	1.95	1.95	1.64	1.64	1.20	1.03
TN-C80x3.5-B60x3.5	0.75	1.99	1.99	1.70	1.70	1.14	1.06
TN-C90x2.5-B67.5x2.5	0.75	1.88	1.88	1.54	1.54	1.44	1.00
TN-C90x3-B67.5x3	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C90x3.5-B67.5x3.5	0.75	1.96	1.96	1.65	1.65	1.18	1.04
TN-C90x4-B67.5x4	0.75	2.00	2.00	1.70	1.70	1.14	1.06
TN-C100x2.5-B75x2.5	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C100x3-B75x3	0.75	1.89	1.89	1.56	1.56	1.36	1.00
TN-C100x4-B75x4	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C100x5-B75x5	0.75	2.00	2.00	1.72	1.72	1.10	1.06
TN-C120x3-B90x3	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C120x4-B90x4	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C120x4.5-B90x4.5	0.75	1.95	1.95	1.64	1.64	1.20	1.03
TN-C120x5-B90x5	0.75	1.98	1.98	1.68	1.68	1.15	1.05
TN-C140x3.5-B105x3.5	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C140x4-B105x4	0.75	1.88	1.88	1.55	1.55	1.41	1.00
TN-C140x5-B105x5	0.75	1.93	1.93	1.62	1.62	1.22	1.03
TN-C140x6-B105x6	0.75	1.99	1.99	1.69	1.69	1.14	1.06
TN-C150x4-B112.5x4	0.75	1.88	1.88	1.54	1.54	1.49	1.00
TN-C150x4.5-B112.5x4.5	0.75	1.89	1.89	1.56	1.56	1.36	1.00
TN-C150x5-B112.5x5	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C150x6-B112.5x6	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C160x4-B120x4	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C160x5-B120x5	0.75	1.90	1.90	1.57	1.57	1.32	1.01
TN-C160x6-B120x6	0.75	1.95	1.95	1.64	1.64	1.20	1.03
TN-C160x8-B120x8	0.75	2.00	2.00	1.71	1.71	1.10	1.06
TN-C180x4-B135x4	0.75	1.90	1.90	1.52	1.52	1.77	1.01
TN-C180x5-B135x5	0.75	1.88	1.88	1.54	1.54	1.44	1.00
TN-C180x6-B135x6	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C180x8-B135x8	0.75	2.00	2.00	1.70	1.70	1.14	1.06
TN-C200x5-B150x5	0.75	1.88	1.88	1.53	1.53	1.58	1.00
TN-C200x6-B150x6	0.75	1.89	1.89	1.56	1.56	1.36	1.00
TN-C200x8-B150x8	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C200x10-B150x10	0.75	2.00	2.00	1.71	1.71	1.10	1.06
TN-C220x5-B165x5	0.75	1.90	1.90	1.52	1.52	1.73	1.01
TN-C220x6-B165x6	0.75	1.88	1.88	1.54	1.54	1.46	1.00

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C220x8-B165x8	0.75	1.94	1.94	1.63	1.63	1.21	1.03
TN-C220x10-B165x10	0.75	2.00	2.00	1.71	1.71	1.13	1.06
TN-C250x6-B187.5x6	0.75	1.89	1.89	1.52	1.52	1.64	1.00
TN-C250x8-B187.5x8	0.75	1.90	1.90	1.58	1.58	1.30	1.01
TN-C250x10-B187.5x10	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C250x12-B187.5x12	0.75	2.00	2.00	1.72	1.72	1.11	1.06
TN-C300x6-B225x6	0.75	1.92	1.92	1.52	1.52	1.98	1.02
TN-C300x8-B225x8	0.75	1.88	1.88	1.54	1.54	1.49	1.00
TN-C300x10-B225x10	0.75	1.91	1.91	1.60	1.60	1.27	1.02
TN-C300x12-B225x12	0.75	1.97	1.97	1.66	1.66	1.17	1.04
TN-C50x1.5-B35x1.5	0.7	1.80	1.80	1.49	1.49	1.17	0.99
TN-C50x2-B35x2	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C50x2.5-B35x2.5	0.7	1.98	1.98	1.70	1.70	0.98	1.09
TN-C60x1.5-B42x1.5	0.7	1.79	1.79	1.45	1.45	1.36	0.98
TN-C60x2-B42x2	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C60x2.5-B42x2.5	0.7	1.90	1.90	1.61	1.61	1.00	1.05
TN-C70x1.5-B49x1.5	0.7	1.80	1.80	1.43	1.43	1.57	0.99
TN-C70x2-B49x2	0.7	1.79	1.79	1.47	1.47	1.21	0.99
TN-C70x2.5-B49x2.5	0.7	1.84	1.84	1.54	1.54	1.05	1.01
TN-C70x3-B49x3	0.7	1.91	1.91	1.62	1.62	0.99	1.05
TN-C80x2-B56x2	0.7	1.79	1.79	1.45	1.45	1.35	0.98
TN-C80x2.5-B56x2.5	0.7	1.80	1.80	1.50	1.50	1.13	0.99
TN-C80x3-B56x3	0.7	1.86	1.86	1.56	1.56	1.03	1.02
TN-C80x3.5-B56x3.5	0.7	1.92	1.92	1.63	1.63	0.99	1.06
TN-C90x2.5-B63x2.5	0.7	1.79	1.79	1.47	1.47	1.24	0.99
TN-C90x3-B63x3	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C90x3.5-B63x3.5	0.7	1.87	1.87	1.58	1.58	1.02	1.03
TN-C90x4-B63x4	0.7	1.93	1.93	1.64	1.64	0.99	1.06
TN-C100x2.5-B70x2.5	0.7	1.79	1.79	1.45	1.45	1.35	0.98
TN-C100x3-B70x3	0.7	1.80	1.80	1.49	1.49	1.17	0.99
TN-C100x4-B70x4	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C100x5-B70x5	0.7	1.98	1.98	1.70	1.70	0.98	1.09
TN-C120x3-B84x3	0.7	1.78	1.78	1.45	1.45	1.35	0.98
TN-C120x4-B84x4	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C120x4.5-B84x4.5	0.7	1.86	1.86	1.56	1.56	1.03	1.02
TN-C120x5-B84x5	0.7	1.90	1.90	1.61	1.61	1.00	1.05
TN-C140x3.5-B98x3.5	0.7	1.78	1.78	1.45	1.45	1.35	0.98

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C140x4-B98x4	0.7	1.79	1.79	1.47	1.47	1.21	0.99
TN-C140x5-B98x5	0.7	1.84	1.84	1.54	1.54	1.05	1.01
TN-C140x6-B98x6	0.7	1.91	1.91	1.62	1.62	0.99	1.05
TN-C150x4-B105x4	0.7	1.79	1.79	1.46	1.46	1.28	0.98
TN-C150x4.5-B105x4.5	0.7	1.80	1.80	1.49	1.49	1.17	0.99
TN-C150x5-B105x5	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C150x6-B105x6	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C160x4-B112x4	0.7	1.78	1.78	1.45	1.45	1.35	0.98
TN-C160x5-B112x5	0.7	1.80	1.80	1.50	1.50	1.13	0.99
TN-C160x6-B112x6	0.7	1.86	1.86	1.56	1.56	1.03	1.02
TN-C160x8-B112x8	0.7	1.98	1.98	1.70	1.70	0.98	1.09
TN-C180x4-B126x4	0.7	1.79	1.79	1.43	1.43	1.51	0.99
TN-C180x5-B126x5	0.7	1.79	1.79	1.47	1.47	1.24	0.99
TN-C180x6-B126x6	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C180x8-B126x8	0.7	1.93	1.93	1.64	1.64	0.99	1.06
TN-C200x5-B140x5	0.7	1.78	1.78	1.45	1.45	1.35	0.98
TN-C200x6-B140x6	0.7	1.80	1.80	1.49	1.49	1.17	0.99
TN-C200x8-B140x8	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C200x10-B140x10	0.7	1.98	1.98	1.70	1.70	0.98	1.09
TN-C220x5-B154x5	0.7	1.79	1.79	1.44	1.44	1.48	0.98
TN-C220x6-B154x6	0.7	1.79	1.79	1.46	1.46	1.26	0.98
TN-C220x8-B154x8	0.7	1.85	1.85	1.55	1.55	1.04	1.02
TN-C220x10-B154x10	0.7	1.94	1.94	1.65	1.65	0.98	1.07
TN-C250x6-B175x6	0.7	1.78	1.78	1.44	1.44	1.40	0.98
TN-C250x8-B175x8	0.7	1.81	1.81	1.50	1.50	1.12	1.00
TN-C250x10-B175x10	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C250x12-B175x12	0.7	1.96	1.96	1.68	1.68	0.98	1.08
TN-C300x6-B210x6	0.7	1.80	1.80	1.42	1.42	1.68	0.99
TN-C300x8-B210x8	0.7	1.79	1.79	1.46	1.46	1.28	0.98
TN-C300x10-B210x10	0.7	1.82	1.82	1.52	1.52	1.09	1.00
TN-C300x12-B210x12	0.7	1.88	1.88	1.59	1.59	1.01	1.04
TN-C50x1.5-B30x1.5	0.6	1.77	1.77	2.41	2.41		1.05
TN-C50x2-B30x2	0.6	1.82	1.82	2.20	2.20		1.08
TN-C50x2.5-B30x2.5	0.6	1.89	1.89	2.15	2.15		1.12
TN-C60x1.5-B36x1.5	0.6	1.76	1.76	2.67	2.67		1.05
TN-C60x2-B36x2	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C60x2.5-B36x2.5	0.6	1.83	1.83	2.19	2.19		1.09

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C70x1.5-B42x1.5	0.6	1.77	1.77	3.02	3.02		1.05
TN-C70x2-B42x2	0.6	1.76	1.76	2.47	2.47		1.05
TN-C70x2.5-B42x2.5	0.6	1.79	1.79	2.26	2.26		1.07
TN-C70x3-B42x3	0.6	1.84	1.84	2.18	2.18		1.09
TN-C80x2-B48x2	0.6	1.76	1.76	2.67	2.67		1.05
TN-C80x2.5-B48x2.5	0.6	1.77	1.77	2.37	2.37		1.05
TN-C80x3-B48x3	0.6	1.80	1.80	2.23	2.23		1.07
TN-C80x3.5-B48x3.5	0.6	1.84	1.84	2.17	2.17		1.10
TN-C90x2.5-B54x2.5	0.6	1.76	1.76	2.50	2.50		1.05
TN-C90x3-B54x3	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C90x3.5-B54x3.5	0.6	1.81	1.81	2.21	2.21		1.08
TN-C90x4-B54x4	0.6	1.85	1.85	2.17	2.17		1.10
TN-C100x2.5-B60x2.5	0.6	1.76	1.76	2.66	2.66		1.05
TN-C100x3-B60x3	0.6	1.77	1.77	2.41	2.41		1.05
TN-C100x4-B60x4	0.6	1.82	1.82	2.20	2.20		1.08
TN-C100x5-B60x5	0.6	1.89	1.89	2.15	2.15		1.12
TN-C120x3-B72x3	0.6	1.76	1.76	2.66	2.66		1.05
TN-C120x4-B72x4	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C120x4.5-B72x4.5	0.6	1.80	1.80	2.23	2.23		1.07
TN-C120x5-B72x5	0.6	1.83	1.83	2.18	2.18		1.09
TN-C140x3.5-B84x3.5	0.6	1.76	1.76	2.66	2.66		1.05
TN-C140x4-B84x4	0.6	1.76	1.76	2.46	2.46		1.05
TN-C140x5-B84x5	0.6	1.79	1.79	2.26	2.26		1.07
TN-C140x6-B84x6	0.6	1.83	1.83	2.17	2.17		1.09
TN-C150x4-B90x4	0.6	1.76	1.76	2.56	2.56		1.05
TN-C150x4.5-B90x4.5	0.6	1.76	1.76	2.41	2.41		1.05
TN-C150x5-B90x5	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C150x6-B90x6	0.6	1.81	1.81	2.20	2.20		1.08
TN-C160x4-B96x4	0.6	1.76	1.76	2.66	2.66		1.05
TN-C160x5-B96x5	0.6	1.77	1.77	2.36	2.36		1.05
TN-C160x6-B96x6	0.6	1.80	1.80	2.23	2.23		1.07
TN-C160x8-B96x8	0.6	1.89	1.89	2.14	2.14		1.12
TN-C180x4-B108x4	0.6	1.76	1.76	2.91	2.91		1.05
TN-C180x5-B108x5	0.6	1.76	1.76	2.50	2.50		1.05
TN-C180x6-B108x6	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C180x8-B108x8	0.6	1.85	1.85	2.16	2.16		1.10
TN-C200x5-B120x5	0.6	1.76	1.76	2.66	2.66		1.05

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C200x6-B120x6	0.6	1.76	1.76	2.41	2.41		1.05
TN-C200x8-B120x8	0.6	1.81	1.81	2.20	2.20		1.08
TN-C200x10-B120x10	0.6	1.89	1.89	2.14	2.14		1.12
TN-C220x5-B132x5	0.6	1.76	1.76	2.86	2.86		1.05
TN-C220x6-B132x6	0.6	1.76	1.76	2.52	2.52		1.05
TN-C220x8-B132x8	0.6	1.79	1.79	2.25	2.25		1.07
TN-C220x10-B132x10	0.6	1.85	1.85	2.16	2.16		1.10
TN-C250x6-B150x6	0.6	1.76	1.76	2.74	2.74		1.05
TN-C250x8-B150x8	0.6	1.77	1.77	2.34	2.34		1.05
TN-C250x10-B150x10	0.6	1.81	1.81	2.20	2.20		1.08
TN-C250x12-B150x12	0.6	1.87	1.87	2.15	2.15		1.11
TN-C300x6-B180x6	0.6	1.78	1.78	3.23	3.23		1.06
TN-C300x8-B180x8	0.6	1.76	1.76	2.56	2.56		1.05
TN-C300x10-B180x10	0.6	1.78	1.78	2.31	2.31		1.06
TN-C300x12-B180x12	0.6	1.81	1.81	2.20	2.20		1.08
TN-C50x1.5-B25x1.5	0.5	1.56	1.56	2.13	2.13		1.01
TN-C50x2-B25x2	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C50x2.5-B25x2.5	0.5	1.65	1.65	1.88	1.88		1.07
TN-C60x1.5-B30x1.5	0.5	1.57	1.57	2.37	2.37		1.01
TN-C60x2-B30x2	0.5	1.57	1.57	2.04	2.04		1.01
TN-C60x2.5-B30x2.5	0.5	1.60	1.60	1.91	1.91		1.03
TN-C70x1.5-B35x1.5	0.5	1.58	1.58	2.69	2.69		1.02
TN-C70x2-B35x2	0.5	1.56	1.56	2.18	2.18		1.01
TN-C70x2.5-B35x2.5	0.5	1.57	1.57	1.99	1.99		1.02
TN-C70x3-B35x3	0.5	1.60	1.60	1.90	1.90		1.04
TN-C80x2-B40x2	0.5	1.57	1.57	2.37	2.37		1.01
TN-C80x2.5-B40x2.5	0.5	1.56	1.56	2.09	2.09		1.01
TN-C80x3-B40x3	0.5	1.58	1.58	1.96	1.96		1.02
TN-C80x3.5-B40x3.5	0.5	1.61	1.61	1.90	1.90		1.04
TN-C90x2.5-B45x2.5	0.5	1.56	1.56	2.22	2.22		1.01
TN-C90x3-B45x3	0.5	1.57	1.57	2.03	2.03		1.01
TN-C90x3.5-B45x3.5	0.5	1.58	1.58	1.94	1.94		1.03
TN-C90x4-B45x4	0.5	1.61	1.61	1.89	1.89		1.04
TN-C100x2.5-B50x2.5	0.5	1.57	1.57	2.37	2.37		1.01
TN-C100x3-B50x3	0.5	1.56	1.56	2.13	2.13		1.01
TN-C100x4-B50x4	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C100x5-B50x5	0.5	1.65	1.65	1.88	1.88		1.07

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C120x3-B60x3	0.5	1.56	1.56	2.37	2.37		1.01
TN-C120x4-B60x4	0.5	1.57	1.57	2.03	2.03		1.01
TN-C120x4.5-B60x4.5	0.5	1.58	1.58	1.96	1.96		1.02
TN-C120x5-B60x5	0.5	1.60	1.60	1.91	1.91		1.03
TN-C140x3.5-B70x3.5	0.5	1.56	1.56	2.37	2.37		1.01
TN-C140x4-B70x4	0.5	1.56	1.56	2.18	2.18		1.01
TN-C140x5-B70x5	0.5	1.57	1.57	1.98	1.98		1.02
TN-C140x6-B70x6	0.5	1.60	1.60	1.90	1.90		1.04
TN-C150x4-B75x4	0.5	1.56	1.56	2.27	2.27		1.01
TN-C150x4.5-B75x4.5	0.5	1.56	1.56	2.13	2.13		1.01
TN-C150x5-B75x5	0.5	1.57	1.57	2.03	2.03		1.01
TN-C150x6-B75x6	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C160x4-B80x4	0.5	1.56	1.56	2.37	2.37		1.01
TN-C160x5-B80x5	0.5	1.56	1.56	2.09	2.09		1.01
TN-C160x6-B80x6	0.5	1.58	1.58	1.96	1.96		1.02
TN-C160x8-B80x8	0.5	1.65	1.65	1.87	1.87		1.07
TN-C180x4-B90x4	0.5	1.57	1.57	2.60	2.60		1.02
TN-C180x5-B90x5	0.5	1.56	1.56	2.22	2.22		1.01
TN-C180x6-B90x6	0.5	1.57	1.57	2.03	2.03		1.01
TN-C180x8-B90x8	0.5	1.61	1.61	1.89	1.89		1.04
TN-C200x5-B100x5	0.5	1.56	1.56	2.37	2.37		1.01
TN-C200x6-B100x6	0.5	1.56	1.56	2.13	2.13		1.01
TN-C200x8-B100x8	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C200x10-B100x10	0.5	1.65	1.65	1.87	1.87		1.07
TN-C220x5-B110x5	0.5	1.57	1.57	2.55	2.55		1.02
TN-C220x6-B110x6	0.5	1.56	1.56	2.24	2.24		1.01
TN-C220x8-B110x8	0.5	1.57	1.57	1.97	1.97		1.02
TN-C220x10-B110x10	0.5	1.62	1.62	1.89	1.89		1.05
TN-C250x6-B125x6	0.5	1.57	1.57	2.44	2.44		1.01
TN-C250x8-B125x8	0.5	1.56	1.56	2.07	2.07		1.01
TN-C250x10-B125x10	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C250x12-B125x12	0.5	1.64	1.64	1.88	1.88		1.06
TN-C300x6-B150x6	0.5	1.58	1.58	2.88	2.88		1.03
TN-C300x8-B150x8	0.5	1.56	1.56	2.27	2.27		1.01
TN-C300x10-B150x10	0.5	1.56	1.56	2.03	2.03		1.01
TN-C300x12-B150x12	0.5	1.59	1.59	1.93	1.93		1.03
TN-C50x1.5-B20x1.5	0.4	1.40	1.40	1.90	1.90		0.99

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (continuação)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C50x2-B20x2	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00
TN-C50x2.5-B20x2.5	0.4	1.45	1.45	1.65	1.65		1.03
TN-C60x1.5-B24x1.5	0.4	1.40	1.37	2.12	2.07		0.99
TN-C60x2-B24x2	0.4	1.40	1.40	1.82	1.82		0.99
TN-C60x2.5-B24x2.5	0.4	1.42	1.42	1.70	1.70		1.01
TN-C70x1.5-B28x1.5	0.4	1.41	1.35	2.40	2.31		1.00
TN-C70x2-B28x2	0.4	1.40	1.38	1.95	1.94		0.99
TN-C70x2.5-B28x2.5	0.4	1.40	1.40	1.77	1.77		0.99
TN-C70x3-B28x3	0.4	1.42	1.42	1.69	1.69		1.01
TN-C80x2-B32x2	0.4	1.40	1.36	2.12	2.07		0.99
TN-C80x2.5-B32x2.5	0.4	1.40	1.40	1.87	1.87		0.99
TN-C80x3-B32x3	0.4	1.41	1.41	1.74	1.74		1.00
TN-C80x3.5-B32x3.5	0.4	1.42	1.42	1.68	1.68		1.01
TN-C90x2.5-B36x2.5	0.4	1.39	1.38	1.98	1.96		0.99
TN-C90x3-B36x3	0.4	1.40	1.40	1.82	1.82		0.99
TN-C90x3.5-B36x3.5	0.4	1.41	1.41	1.72	1.72		1.00
TN-C90x4-B36x4	0.4	1.43	1.43	1.67	1.67		1.01
TN-C100x2.5-B40x2.5	0.4	1.40	1.36	2.12	2.06		0.99
TN-C100x3-B40x3	0.4	1.39	1.39	1.90	1.89		0.99
TN-C100x4-B40x4	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00
TN-C100x5-B40x5	0.4	1.45	1.45	1.65	1.65		1.03
TN-C120x3-B48x3	0.4	1.40	1.36	2.12	2.06		0.99
TN-C120x4-B48x4	0.4	1.40	1.40	1.81	1.81		0.99
TN-C120x4.5-B48x4.5	0.4	1.40	1.40	1.74	1.74		1.00
TN-C120x5-B48x5	0.4	1.42	1.42	1.69	1.69		1.00
TN-C140x3.5-B56x3.5	0.4	1.40	1.36	2.12	2.06		0.99
TN-C140x4-B56x4	0.4	1.39	1.38	1.95	1.93		0.99
TN-C140x5-B56x5	0.4	1.40	1.40	1.77	1.77		0.99
TN-C140x6-B56x6	0.4	1.42	1.42	1.68	1.68		1.01
TN-C150x4-B60x4	0.4	1.39	1.37	2.03	1.99		0.99
TN-C150x4.5-B60x4.5	0.4	1.39	1.39	1.90	1.89		0.99
TN-C150x5-B60x5	0.4	1.40	1.40	1.81	1.81		0.99
TN-C150x6-B60x6	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00
TN-C160x4-B64x4	0.4	1.40	1.36	2.11	2.06		0.99
TN-C160x5-B64x5	0.4	1.39	1.39	1.86	1.86		0.99
TN-C160x6-B64x6	0.4	1.40	1.40	1.74	1.74		1.00
TN-C160x8-B64x8	0.4	1.45	1.45	1.65	1.65		1.03

Tabela 16 - Razões entre resistências numéricas e analíticas (conclusão)

Nomenclatura	β	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$	N_{Zhao}/N_{EC3}	$N_{3\%b0}/N_{FY}$	N_{Zhao}/N_{FY}	$N_{3\%b0}/N_{EC3}$ ($\beta=1$)	$N_{3\%b0}/N_{PR}$
TN-C180x4-B72x4	0.4	1.40	1.35	2.32	2.22		0.99
TN-C180x5-B72x5	0.4	1.39	1.37	1.98	1.95		0.99
TN-C180x6-B72x6	0.4	1.40	1.40	1.81	1.81		0.99
TN-C180x8-B72x8	0.4	1.43	1.43	1.67	1.67		1.01
TN-C200x5-B80x5	0.4	1.40	1.36	2.11	2.05		0.99
TN-C200x6-B80x6	0.4	1.39	1.38	1.90	1.89		0.99
TN-C200x8-B80x8	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00
TN-C200x10-B80x10	0.4	1.45	1.45	1.65	1.65		1.03
TN-C220x5-B88x5	0.4	1.40	1.35	2.27	2.18		0.99
TN-C220x6-B88x6	0.4	1.39	1.37	2.00	1.96		0.99
TN-C220x8-B88x8	0.4	1.40	1.40	1.76	1.76		0.99
TN-C220x10-B88x10	0.4	1.43	1.43	1.67	1.67		1.01
TN-C250x6-B100x6	0.4	1.40	1.35	2.18	2.10		0.99
TN-C250x8-B100x8	0.4	1.39	1.39	1.84	1.84		0.99
TN-C250x10-B100x10	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00
TN-C250x12-B100x12	0.4	1.44	1.44	1.66	1.66		1.02
TN-C300x6-B120x6	0.4	1.41	1.34	2.56	2.43		1.00
TN-C300x8-B120x8	0.4	1.39	1.36	2.03	1.98		0.99
TN-C300x10-B120x10	0.4	1.40	1.40	1.81	1.81		0.99
TN-C300x12-B120x12	0.4	1.41	1.41	1.71	1.71		1.00