

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO, SOB TRAÇÃO E CONECTADOS POR
PARAFUSOS**

RONIVON SOARES PEREIRA

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE
AÇO FORMADOS A FRIO, SOB TRAÇÃO E CONECTADOS
POR PARAFUSOS**

RONIVON SOARES PEREIRA

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**TESE DE PUBLICAÇÃO: E.TD-004A/20
BRASÍLIA/DF: 07 DE OUTUBRO DE 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO, SOB TRAÇÃO E CONECTADOS POR
PARAFUSOS**

RONIVON SOARES PEREIRA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

APROVADA POR:

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Valdeir Francisco de Paula, DSc (IFG-GO)
(Coorientador)**

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr.Ing. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Gustavo de Souza Veríssimo, DSc (UFV)
(Examinador Externo)**

**Prof. Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, DSc (VALEC)
(Examinador Externo)**

**Prof. Cleirton André Silva de Freitas, DSc (UFCA)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF: 07 DE OUTUBRO DE 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

pp436a	Pereira, Ronivon Soares Análise Numérica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio, Sob Tração e Conectados por Parafusos / Ronivon Soares Pereira; orientador Luciano Mendes Bezerra; coorientador Valdeir Francisco de Paula. -- Brasília, 2020. 273 p. Tese (Doutorado – Doutorado em Estruturas e Construção Civil) -- Universidade de Brasília, 2020.
	1. Análise Numérica e Experimental. 2. Cantoneiras e Perfis U de Aço Formados a Frio. 3. Ruptura da Seção Líquida.
	I. Bezerra, Luciano Mendes , orient. (ENC/FT/UnB) II. De Paula, Valdeir Francisco , co-orient. III. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, R. S (2020). Análise Numérica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio, Sob Tração e Conectados por Parafusos. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-004A/20, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 273p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ronivon Soares Pereira

TÍTULO: Análise Numérica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio, Sob Tração e Conectados por Parafusos.

GRAU: Doutor ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ronivon Soares Pereira
Rua PB 16 quadra 42 lote 25 Parque Brasília
75093795 Anápolis -GO - Brasil.
e-mail: ronivon.sp@gmail.com

Dedicatória

*A minha amada esposa Lidiane de Lemos Soares Pereira
e aos meus filhos Miguel, Israel e Gabriel,
que sempre estiveram presente comigo,
aos meus tão amados e maravilhosos pais,
Vera Lucia e José Pereira
que não só batalharam para eu
chegar até aqui como também me
ensinaram e instigaram a batalhar,
as minhas irmãs Viviane Soares e
Gleiciane Soares, que na simplicidade
de suas vidas sempre me incentivaram,
e a minha sogra e meu sogro,
Eliana Lemos e Joaquim José Neto
que sempre me estimularam
a seguir este caminho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu vida, saúde e estrutura para que eu chegasse até aqui. Obrigado por estar sempre ao meu lado, meu Pai, e por estar presente em todos os momentos. Ao Senhor meu Deus eu te adoro e te dou graças!

A minha amada esposa Lidianne de Lemos Soares Pereira e filhos Miguel de Lemos Soares, Israel de Lemos Soares e Gabriel de Lemos Soares, pela compreensão nos momentos de ausência e apoio nas dificuldades. Obrigado minha família, pelo estímulo!

Aos meus pais, Vera Lúcia Soares de Jesus Pereira e José Pereira Sobrinho pelo imenso amor, carinho, compreensão e por me ensinarem, através de sua retidão, que é o trabalho que torna o homem digno, e, às minhas irmãs Viviane Soares e Gleiciane Soares pelo companheirismo, amor e constante disponibilidade em ajudar, obrigado minhas irmãs!

Em especial, ao Professor Luciano Mendes Bezerra, meu Orientador, e o professor Valdeir Francisco de Paula, meu Coorientador, pela confiança, disponibilidade em ajudar, apoio e motivação ao longo deste trabalho. Muito Obrigado Professores, por todo o conhecimento compartilhado e, sobretudo, pelo tratamento humano, e pela experiência de vida compartilhada desde o início da Pós-Graduação.

Ao Professor Jorge Douglas Bonilla Rocha pela disponibilidade e pelas contribuições para o aprimoramento desta tese. Professor, obrigado pelo convívio agradável no Programa de Pós-graduação e pela serenidade e disponibilidade em ajudar sempre que eu o procurei para conversar.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC-UnB), por compartilharem seus conhecimentos.

Aos alunos do PECC que se tornaram meus amigos e fizeram parte dessa caminhada, e em particular ao Jerfson, Welington, Élidea e Robson pelos momentos de companheirismo, humor, tensão que passamos nesse tempo, sem a colaboração de vocês não seria possível concluir este estudo.

Um agradecimento especial, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica de Goiás - IFG Campus Goiânia, por disponibilizar os equipamentos necessários para realização dos ensaios.

Gostaria de agradecer ao Sérgio, técnico do Laboratório de Engenharia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica de Goiás - IFG Campus Goiânia, ao meu afilhado André Luiz e ao meu amigo Diego Borja pelo apoio durante a realização dos ensaios.

A Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC-UnB).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo auxílio financeiro.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO, SOB TRAÇÃO E CONECTADOS POR PARAFUSOS

Autor: Ronivon Soares Pereira

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, outubro de 2020

Em diversos países, as estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio vêm ganhando cada vez mais espaço na indústria da construção civil. Apesar da difusão do seu uso e da grande quantidade de trabalhos de pesquisa sobre perfis de aço formados a frio, alguns fenômenos ainda não estão satisfatoriamente compreendidos. O objetivo deste trabalho consiste em realizar um estudo numérico-experimental de perfis de aço formados a frio, submetidos à tração e conectados por parafusos, para se analisar o fenômeno conhecido como *shear lag*. Neste estudo, as análises experimentais envolveram testes em 96 cantoneiras e 100 perfis tipo U. Os resultados dos ensaios foram utilizados para aprofundar o entendimento do efeito de algumas variáveis que influenciam na resistência da ligação e no fenômeno *shear lag*. Modelos numéricos foram também idealizados com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando-se o software ABAQUS. Esses modelos mostram a viabilidade da simulação numérica dos experimentos. Por meio da modelagem estatística foram obtidos os parâmetros que influenciam a resistência ao colapso das ligações dos perfis. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais, oferecendo um modelo capaz de simular adequadamente os ensaios experimentais. Com os resultados experimentais foram realizados tratamentos estatísticos e proposta equações que quantificam a redução da eficiência da seção transversal de cantoneiras e de perfis U. As equações propostas são avaliadas utilizando os resultados experimentais desenvolvidos nesta pesquisa e também de outras referências envolvendo perfis de aço formados a frio. Comparam-se também as equações propostas com as equações prescritas pelas normas, americana, AISI S100, e a norma brasileira, NBR 14.762. As equações propostas obtiveram desempenhos superiores quando comparada com as equações propostas em pesquisas anteriores e às normas acima mencionadas.

Palavras-chave: análise numérica, análise experimental, cantoneiras e perfis U de aço formados a frio, *shear lag*, ruptura da seção líquida, ABAQUS.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL MEMBERS UNDER TENSION AND CONNECTED WITH BOLTS

Author: Ronivon Soares Pereira

Supervisor: Luciano Mendes Bezerra

Post-graduation Program in Structures and Civil Construction

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, october of 2020

In several countries, steel structures made of cold-formed profiles are gaining more and more space in the civil construction industry. Despite the widespread use and the large amount of research work on cold formed steel profiles, some phenomena are not yet satisfactorily understood. The objective of this work is to carry out a numerical-experimental study of cold-formed steel profiles, subjected to traction and connected by bolts, and, therefore, analyzes the phenomenon known as shear lag. In this study, the experimental analyzes involved the test of 96 angles and 100 U-profiles. The test results were used to the understanding of the effect of some variables that influence the connection strength and the shear lag phenomenon. Numerical models were also idealized using the Finite Element Method (FEM), using the ABAQUS software. These models show the feasibility of the numerical simulation of the experiments. Through statistical modeling, the parameters that influence the resistance to the collapse of the profile connections were obtained. The numerical results were compared with the experimental results, offering a model capable of adequately simulating the experimental tests. With the experimental results, statistical treatments were carried out and equations proposed to quantify the reduction of the efficiency coefficient of the net section of angles and U profiles. The proposed equations are evaluated using the experimental results developed in this research and also from other references involving cold-formed steel profiles. The proposed equations are also compared with the equations prescribed by the American, AISI S100, and the Brazilian, NBR 14.762, Standards. The proposed equations obtained superior performances when compared to the equations proposed in previous research and to the Standards mentioned above.

Keiywords: numerical analysis, experimental analysis, cold-formed steel angles and channels, shear lag, net-section failure, ABAQUS.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	27
1.2 OBJETIVOS	29
1.2.1 Objetivo geral	29
1.2.1 Objetivos específicos	29
1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	30
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 REVISÃO TEÓRICA	33
2.1.1 A norma brasileira ABNT NBR 14762:2010	34
2.1.2 A norma norte americana de perfis formados a frio AISI S100 (2016)	37
2.1.3 A norma europeia.....	39
2.1.4 Verificação do desempenho do coeficiente Ct	40
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
2.2.1 Pesquisas experimentais em cantoneiras	48
2.2.2 Pesquisas experimentais em perfis U.....	59
2.2.3 Pesquisas numéricas	65
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	76
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	79
3.1 INTRODUÇÃO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	79
3.2 APARATO EXPERIMENTAL.....	79
3.2.1 Caracterização dos materiais	80
3.2.2 Identificação dos perfis	82
3.2.3 Caracterização dos parafusos e das chapas de fixação	85
3.2.4 Caracterização dos perfis	90
3.2.5 Equipamento de ensaio	96
3.2.6 Propriedades geométricas das cantoneiras.....	101
3.2.7 Propriedades geométricas dos perfis U.....	105
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
4.1 INTRODUÇÃO DA APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
4.2 MODOS DE FALHA E DEFORMAÇÃO DOS PERFIS	111
4.2.1 Falha por ruptura da seção líquida	113
4.2.2 Falha por esmagamento	117

4.2.3 Falha por esmagamento combinado com rasgamento e ruptura da seção líquida	119
4.2.4 Modos de deformação.....	121
4.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	126
4.3.1 Sistematização dos resultados.....	126
4.3.2 Avaliação de desempenho do coeficiente (Ct, exp) em cantoneiras.....	137
4.3.3 Verificação em cantoneiras com chapas de fixação de diferentes espessuras	140
4.3.4 Verificação em perfis U com chapas de fixação de diferentes espessuras	144
5. MODELAGEM ESTATÍSTICA.....	148
5.1 INTRODUÇÃO DA MODELAGEM ESTATÍSTICA.....	148
5.2 ANÁLISE DE FUNÇÃO DISCRIMINANTE.....	148
5.2.1 Análise de função discriminante em cantoneiras.....	149
5.2.2 Análise de função discriminante em perfis U	158
5.3 REGRESSÃO ESTATÍSTICA	165
5.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA DE RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA	167
5.4.1 Seleção das amostras de cantoneiras formadas a frio para regressão múltipla linear	167
5.4.2 Obtenção do modelo de regressão múltipla linear em cantoneiras.....	168
5.4.3 Avaliação do modelo de regressão em cantoneiras	171
5.4.3.1 Avaliação comparativa da equação proposta nos ensaios de cantoneiras (casos UnB).....	172
5.4.3.2 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995).....	174
5.4.3.3 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Maiola (2004).....	176
5.4.3.4 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Teh e Gilbert (2013a)	178
5.4.4 Seleção das amostras de perfis U formados a frio para regressão múltipla linear	180
5.4.5 Obtenção do modelo de regressão múltipla linear em perfis U	180
5.4.6 Avaliação do modelo de regressão em perfis U	184
5.4.6.1 Avaliação comparativa da equação proposta nos ensaios de perfis U (casos UnB).....	184
5.4.6.2 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995).....	187
5.4.6.3 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Maiola (2004).....	189
5.4.6.4 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Teh e Gilbert (2013b).....	191

5.5 COEFICIENTES PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO À RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA	193
5.5.1 Coeficientes de redução da área líquida (Ct) para pré-dimensionamento de ligações parafusadas em cantoneiras e perfis U formados a frio	193
6. MODELAGEM NUMÉRICA	197
6.1 INTRODUÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA.....	197
6.1.1 Geometria do modelo.....	197
6.1.2 Modelo constitutivo para aço.....	198
6.1.3 Tipos e malha de elementos finitos.....	199
6.1.4 Carregamento e condições de contorno	200
6.1.5 Superfícies de contato	202
6.1.6 Validação dos modelos de elementos finitos	202
6.1.7 Cantoneiras de abas iguais conectadas em uma aba com uma linha de parafusos	202
6.1.7.1 Cantoneira A2-B211	203
6.1.7.2 Cantoneira A2-B221	204
6.1.7.3 Cantoneira A2-B231	207
6.1.7.4 Cantoneira A2-B241	208
6.1.8 Cantoneiras de abas iguais conectadas em uma aba com duas linhas de parafusos	211
6.1.8.1 Cantoneira A2-C212	211
6.1.8.2 Cantoneira A2-C222	213
6.1.8.3 Cantoneira A2-C232	215
6.1.8.4 Cantoneira A2-C242	217
6.1.9 Avaliação da modelagem numérica das cantoneiras	219
6.1.10 Perfis U conectados na alma com uma linha de parafusos	221
6.1.10.1 Perfil U C2-G211W	221
6.1.10.2 Perfil U C2-G221W	224
6.1.10.3 Perfil U C2-G231W	226
6.1.10.4 Perfil U C2-G241W	228
6.1.11 Perfis U conectados na alma com duas linhas de parafusos	230
6.1.11.1 Perfil U C2-G212W	230
6.1.11.2 Perfil U C2-G222W	232
6.1.11.3 Perfil U C2-G232W	234
6.1.11.4 Perfil U C2-G242W	236
6.1.12 Avaliação da modelagem numérica dos perfis U	238

6.1.13 Considerações sobre a modelagem numérica	240
7. CONCLUSÕES	243
7.1 CONCLUSÕES DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	243
7.2 CONCLUSÕES DAS MODELAGENS ESTÁTISTICAS	244
7.3 CONCLUSÕES DA MODELAGEM NUMÉRICA.....	246
7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	247
REFERÊNCIAS	249
APÊNDICE A - GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO DOS PERFIS ENSAIADOS	254
APÊNDICE B - DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA DOS PERFIS ENSAIADOS COM CHAPAS DE FIXAÇÃO COMPOSTAS DE DIFERENTES ESPESSURAS	271

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estados limites últimos em chapas com ligações parafusadas (CARRIL, LABOUBE e YU, 1994)	33
Figura 2.2 – Ruptura por cisalhamento de bloco em cantoneira e em perfil U (YU, 2000)	34
Figura 2.3 – Perfis tratados como chapa (todos os parafusos contidos em uma única seção) NBR 14762 (ABNT, 2010)	36
Figura 2.4 – Ligação parafusada em perfis NBR 14762 (ABNT, 2010)	36
Figura 2.5 – Parâmetros para ligações parafusadas em cantoneiras com 1, 2 e 3 parafusos segundo a norma europeia (EUROCODE1-8, 2010).	40
Figura 2.6 – Cantoneira de aço formada a frio com esquema de furos para executar conexão de parafusos (DE PAULA, BEZERRA e MATIAS, 2008)	42
Figura 2.7 – Desempenho do coeficiente de redução da área líquida comparando-se a equação da NBR 14762 com resultados experimentais.	47
Figura 2.8 – Expressão gráfica da equação do coeficientes C_t em comparação com valores obtidos de resultados experimentais.....	48
Figura 2.9 – Valores absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14762 (ABNT, 2001) e a equação proposta por De Paula (2006)	51
Figura 2.10 – Comportamento estrutural típico com esmagamento nos perfis com apenas um parafuso por linha, e ruptura da seção líquida nos demais, acompanhado do aumento das deformações na aba não conectada (DE PAULA, 2006)	52
Figura 2.11 – Esquema da arquitetura da rede neural utilizada por Pan (2006).	53
Figura 2.12 – Fotografia da configuração do modelo experimental com cantoneiras simples e cantoneiras duplas (PADMAPRIYA e KANDASAMY, 2010)	54
Figura 2.13 – Fenômeno <i>shear lag</i> em cantoneiras submetidas à tração (PRABHA et al., 2011).	56
Figura 2.14 – Disposição dos furos nos modelos de Prabha et al. (2011).	56
Figura 2.15 – Relação T_{exp}/T_{norma} para os diversos casos analisados por Prabha et al. (2011). ..	57
Figura 2.16 – Modo de ruptura típico do modelo (PAN e CHIANG, 2002).	60
Figura 2.17 – Modo de ruptura obtido pelo modelo (PAN, 2004).....	61
Figura 2.18 – Resultados de ensaios de perfis U comparados com valores de resistência dados pela norma AISI (2001) (PAN, 2004)	61
Figura 2.19 – Definição dos valores de W_c e W_u (PAN, 2004).	62
Figura 2.20 – Modos de ruptura (a) Ruptura da seção líquida (b) Esmagamento.....	64
Figura 2.21 – Elemento de ligação flexível (TEH e GILBERT, 2013b)	64
Figura 2.22 – Modelo de elementos finitos da conexão parafusada (CHUNG e IP, 2001)	66
Figura 2.23 – Diagramas força-deslocamento numérico e experimental para modelo de cantoneira (MAIOLA, 2004).....	67
Figura 2.24 – Curvas de isotensões e deformada para modelo de cantoneira (MAIOLA, 2004).	67

Figura 2.25 – Detalhe do acoplamento de nós na região de contato com os parafusos (DE PAULA, 2006).	68
Figura 2.26 – Deformada da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)	69
Figura 2.27 – Deformada da cantoneira C141 ensaiada (DE PAULA, 2006)	69
Figura 2.28 – Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)	69
Figura 2.29 – Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)	70
Figura 2.30 – Distribuição das tensões (PADMAPRIYA e KANDASAMY, 2010).....	71
Figura 2.31 – Modelo de ensaio realizado em perfis U laminados a frio	72
Figura 2.32 – Modelo de casca em perfil U formado a frio e parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)	72
Figura 2.33 – Tensão de <i>von Mises</i> no perfil U 100x45x500 mm, formado a frio e parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)	73
Figura 2.34 – Distribuição de deslocamento ao longo do perfil U 100x45x500 mm, formado a frio parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016).....	73
Figura 2.35 – Comparação da deformada experimental e numérica (BARAN et al. 2016). ...	74
Figura 2.36 – Comparação do modelo experimental e o modelo numérico FE mostrando a ruptura (KE et al. 2018).....	75
Figura 2.37 – Tensão de <i>von Mises</i> e deformada do modelo numérico (MAI et al. 2018).....	76
Figura 3.1 – Posição das amostras extraídas dos perfis para os ensaios de caracterização dos materiais.	80
Figura 3.2 – Dimensões em milímetros (mm), das amostras para caracterização dos materiais dos perfis.	81
Figura 3.3 – Detalhe da instalação do extensômetro na amostra para a caracterização das propriedades mecânicas do aço.	81
Figura 3.4 – Nomenclatura utilizada na representação para cada modelo	82
Figura 3.5 – Configuração geral do parafuso e da porca com medidas em milímetros (mm). 85	
Figura 3.6 – Torno de comando numérico computadorizado (CNC)	86
Figura 3.7 – Execução das chapas de fixação no torno de comando numérico computadorizado (CNC)	86
Figura 3.8 – Chapa de fixação para a instalação de perfis com 1 furo por seção, dimensões em (mm)	87
Figura 3.9 – Chapa de fixação para a instalação de perfis com 2 furos por seção, dimensões em (mm)	87
Figura 3.10 – Dispositivo com 12,7 mm de espessura para fixação de cantoneiras 50x50 mm em todas as abas conectadas, dimensões em (mm)	88
Figura 3.11 – Dispositivo com 12,7 mm de espessura para fixação de cantoneiras 75x75 mm em todas as abas conectadas, dimensões em (mm)	88

Figura 3.12 – Dispositivo para fixação de perfis U com flanges de 45 mm de altura, dimensões em (mm)	89
Figura 3.13 – Dispositivo para fixação de perfis U com flanges de 50 mm de altura, dimensões em (mm)	89
Figura 3.14 – Corte das barras de aço para confecção dos modelos a serem ensaiados	91
Figura 3.15 – Dimensões em (mm) das seções transversais das cantoneiras de abas iguais ...	91
Figura 3.16 – Dimensões em (mm) das seções transversais das cantoneiras de abas desiguais	91
Figura 3.17 – Dimensões em (mm) das seções transversais dos perfis U.....	92
Figura 3.18 – Dimensões em (mm) das seções transversais dos perfis U.....	92
Figura 3.19 – Execução dos furos nos modelos.	93
Figura 3.20 – Configuração das cantoneiras com uma linha de furos por seção, dimensões em (mm).....	93
Figura 3.21 – Configuração das cantoneiras com duas linhas de furos por seção, dimensões em (mm).	94
Figura 3.22 – Configuração das cantoneiras conectadas com uma linha de furos por seção, conectadas pelas duas abas, dimensões em (mm).	94
Figura 3.23 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pela alma, dimensões em (mm).	95
Figura 3.24 – Configuração dos perfis U com duas linhas de furos por seção, conectados pela alma, dimensões em (mm).	95
Figura 3.25 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pelos flanges, dimensões em (mm).....	96
Figura 3.26 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pela alma e pelos flanges, dimensões em (mm).....	96
Figura 3.27 – Ilustração do esquema montado para o ensaio experimental.....	97
Figura 3.28 – Montagem do modelo na máquina universal de ensaios.	98
Figura 3.29 – Instalação típica dos perfis com uma e duas linhas de parafusos na máquina universal de ensaios.....	98
Figura 3.30 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com uma linha de parafusos.	99
Figura 3.31 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com duas linhas de parafusos.	99
Figura 3.32 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com uma linha de parafusos na alma e nos flanges.....	100
Figura 3.33 – Detalhes do transdutor de deslocamento instalado nos parafusos das conexões.	100
Figura 4.1 – Curvas força x deslocamento para as ligações com cantoneiras.	110
Figura 4.2 – Curvas força x deslocamento para as ligações com perfis U.....	111

Figura 4.3 – Aspecto da deformada dos modelos com cantoneiras parafusadas com uma linha de furos, após os ensaios.	112
Figura 4.4 – Aspecto da deformada dos modelos com perfis U parafusados com duas linha de furos, após os ensaios.	113
Figura 4.5 – Ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneira com uma aba conectada.....	114
Figura 4.6 – Ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneira com ambas as abas conectadas.	114
Figura 4.7 – Ruptura da seção líquida ocorrida numa cantoneira com uma aba conectada e duas linhas de parafusos.....	115
Figura 4.8 – Ruptura da seção líquida num perfil U conectado pela alma com apenas uma linha de parafusos.....	115
Figura 4.9 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados somente pela alma, com duas linhas de parafusos.	116
Figura 4.10 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados somente nos flanges.....	116
Figura 4.11 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados pela alma e pelos flanges..	117
Figura 4.12 – Esmagamento ocorrido em cantoneiras com uma aba conectada com uma linha de parafusos.....	117
Figura 4.13 – Esmagamento na borda dos furos em uma cantoneira com todas as abas conectadas.	118
Figura 4.14 – Esmagamento na borda dos furos em perfis U com ligação pela alma com uma linha de parafusos.....	118
Figura 4.15 – Falha por esmagamento combinado com início de rasgamento em cantoneiras com uma linha de parafusos.	119
Figura 4.16 – Falha por esmagamento combinado com início de ruptura da seção líquida em cantoneiras com uma linha de parafusos.....	119
Figura 4.17 – Falha por esmagamento combinado com início de rasgamento em perfis U com uma linha de parafusos.	120
Figura 4.18 – Aspecto da deformação sofrida por uma cantoneira tracionada ligada por apenas uma das abas com uma seção de parafusos.....	121
Figura 4.19 – Deformações em cantoneiras de abas desiguais, conectadas nas abas maiores	122
Figura 4.20 – Deformações em cantoneiras de abas desiguais, conectadas nas abas menores	122
Figura 4.21 – Deformações em cantoneiras de abas iguais, conectadas por todas as abas....	123
Figura 4.22 – Excessiva deformação nos flanges do perfil U conectado com uma seção de parafusos.....	123
Figura 4.23 – Deformações em perfis U conectados pela alma com uma linha de parafusos	124
Figura 4.24 – Deformações em perfis U conectados pela alma com duas linha de parafusos	124
Figura 4.25 – Deformações em perfis U conectados pelos flanges com uma linha de parafusos em cada flange.....	125

Figura 4.26 – Deformações em perfis U conectados pela alma e pelos flanges	125
Figura 4.27 – Avaliação das forças de ruptura dos ensaios em cantoneiras com uma linha de furos e duas linhas de furos, em relação ao carregamento das normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005).....	131
Figura 4.28 – Avaliação das forças de ruptura dos ensaios em perfis U com uma linha de furos e duas linhas de furos, em relação ao carregamento das normas NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005)	135
Figura 4.29 – Avaliação de correlação entre o coeficiente Ct, exp e a distância x	137
Figura 4.30 – Avaliação de correlação entre o coeficiente Ct, exp e a razão entre a largura da aba conectada e a largura da aba desconectada de uma cantoneira	138
Figura 4.31 – Avaliação de correlação entre o coeficiente Ct, exp e a espessura da aba	139
Figura 4.32 – Avaliação de correlação entre o coeficiente Ct, exp e a relação entre a largura da	139
Figura 4.33 – Cantoneiras 75x75#1,55 mm, (A2-B131) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos.....	141
Figura 4.34 – Cantoneiras 75x75#1,95 mm, (A2-B231) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos.....	142
Figura 4.35 – Cantoneiras 100x100#1,55 mm, (A2-C132) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos	143
Figura 4.36 – Cantoneiras 100x100#1,95 mm, (A2-C232) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos	144
Figura 4.37 – Perfil U COR 420 #2,65 mm (C1-I331W) conectados na alma, com uma linha de parafusos.....	145
Figura 4.38 – Perfil U ZAR 345 #1,95 mm, C2-I231W conectadas pela alma, com uma linha de parafusos.....	146
Figura 5.1 – Distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com elipses em relação aos modos de ruptura.....	156
Figura 5.2 – Distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com autovalores em relação aos modos de ruptura.....	156
Figura 5.3 – Disposição das variáveis respostas de cantoneiras em relação aos modos de ruptura	157
Figura 5.4 – Distribuição das variáveis respostas de perfis U com elipses em relação aos modos de ruptura.....	163
Figura 5.5 – Distribuição das variáveis respostas de perfis U com autovalores em relação aos modos de ruptura.....	163
Figura 5.6 – Disposição das variáveis respostas de perfis U em relação aos modos de ruptura	164
Figura 5.7 – Distribuição dos resíduos e distribuição normal esperada em Cantoneiras.....	169
Figura 5.8 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos em Cantoneiras	170

Figura 5.9 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho.....	173
Figura 5.10 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho	174
Figura 5.11 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995).....	175
Figura 5.12 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995).....	176
Figura 5.13 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004).....	177
Figura 5.14 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004).....	177
Figura 5.15 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Teh e Gilbert (2013a)	179
Figura 5.16 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Teh e Gilbert (2013a)	179
Figura 5.17 – Distribuição dos resíduos e distribuição normal esperada em perfis U	182
Figura 5.18 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos em perfis U	182
Figura 5.19– Valores de ensaios de perfis U absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho.....	186
Figura 5.20 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho.....	186
Figura 5.21 – Valores de ensaios de perfis U absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)	188
Figura 5.22 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995).....	188
Figura 5.23 – Valores de ensaios de perfis U ordenados absolutos das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004)	190
Figura 5.24 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004).....	190

Figura 5.25 – Valores de ensaios de perfis U ordenados absolutos das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho aos casos de Teh e Gilbert (2013b)	192
Figura 5.26 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho aos casos de Teh e Gilbert (2013b).....	192
Figura 6.1 – Dimensões (mm) da ligação na cantoneira A2-B-221	197
Figura 6.2 – Chapas de fixação com uma linha de furos e com duas linhas de furos e dimensões em milímetros (mm).....	198
Figura 6.3 – Comportamento Uniaxial do aço (Modificado de NGUYEN e KIM, 2009).....	199
Figura 6.4 – Aspecto da malha adotada.	200
Figura 6.5 – Representação de aplicação do carregamento.	201
Figura 6.6 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B211).....	203
Figura 6.7 – Região dos furos da cantoneira A2-B211 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	203
Figura 6.8 – Deformada global de toda cantoneira A2-B211 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	204
Figura 6.9 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B221).....	205
Figura 6.10 – Região dos furos da cantoneira A2-B221 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	205
Figura 6.11– Deformada global de toda cantoneira A2-B221 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	206
Figura 6.12 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B231).....	207
Figura 6.13 – Região dos furos da cantoneira A2-B231 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	207
Figura 6.14 – Deformada global de toda cantoneira A2-B231 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	208
Figura 6.15 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B241).....	209
Figura 6.16 – Região dos furos da cantoneira A2-B241 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	209
Figura 6.17 – Deformada global de toda cantoneira A2-B241 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	210
Figura 6.18 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C212).....	211
Figura 6.19 – Região dos furos da cantoneira A2-C212 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	212
Figura 6.20 – Deformada global de toda cantoneira A2-C212 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	212
Figura 6.21 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C222).....	213

Figura 6.22 – Região dos furos da cantoneira A2-C222 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	214
Figura 6.23 – Deformada global de toda cantoneira A2-C222 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	214
Figura 6.24 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C232).....	215
Figura 6.25 – Região dos furos da cantoneira A2-C232 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	216
Figura 6.26 – Deformada global de toda cantoneira A2-C232 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	216
Figura 6.27 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C242).....	217
Figura 6.28 – Região dos furos da cantoneira A2-C232 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	218
Figura 6.29 – Deformada global de toda cantoneira A2-C232 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	218
Figura 6.30 – Distribuição dos valores de força máxima atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais em cantoneiras formadas a frio	220
Figura 6.31 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G211W)	222
Figura 6.32 – Região dos furos do perfil U C2-G211W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	222
Figura 6.33 – Deformada global de todo perfil U C2-G211W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	223
Figura 6.34 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G221W)	224
Figura 6.35 – Região dos furos do perfil U C2-G221W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	224
Figura 6.36 – Deformada global de toda cantoneira C2-G221W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	225
Figura 6.37 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G231W)	226
Figura 6.38 – Região dos furos do perfil U C2-G231W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	226
Figura 6.39 – Deformada global de toda cantoneira C2-G231W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	227
Figura 6.40 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G241W)	228
Figura 6.41 – Região dos furos do perfil U C2-G241W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	228
Figura 6.42 – Deformada global de toda cantoneira C2-G241W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	229
Figura 6.43 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G212W)	230
Figura 6.44 – Região dos furos do perfil U C2-G212W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).....	231

Figura 6.45 – Deformada global de toda cantoneira C2-G212W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	231
Figura 6.46 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G222W)	232
Figura 6.47 – Região dos furos do perfil U C2-G222W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	233
Figura 6.48 – Deformada global de toda cantoneira C2-G222W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	233
Figura 6.49 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G232W)	234
Figura 6.50 – Região dos furos do perfil U C2-G232W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	235
Figura 6.51 – Deformada global de toda cantoneira C2-G232W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	235
Figura 6.52 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G242W)	236
Figura 6.53 – Região dos furos do perfil U C2-G242W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	237
Figura 6.54 – Deformada global de toda cantoneira C2-G242W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)	237
Figura 6.55 – Distribuição dos valores de força máxima atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais em perfis U	239

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensão máxima de furos (mm)	37
Tabela 2.2 – Características das cantoneiras de aço formadas a frio apresentadas por Holcomb et al. (1995); Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013a e 2014a).	42
Tabela 2.3 – Desempenho do coeficiente C_t dado pela NBR 14762 para cantoneiras apresentadas por Holcomb et al. (1995), Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013a e 2014a).	45
Tabela 2.4 – Modos de ruptura, forças experimental e do ANSYS e deslocamentos experimentais e do ANSYS.....	74
Tabela 3.1 – Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do aço.	82
Tabela 3.2 – Sequência da nomenclatura dos perfis metálicos	82
Tabela 3.3 – Seção transversal e material dos modelos.....	83
Tabela 3.4 – Identificação das séries das cantoneiras e respectivas dimensões.....	83
Tabela 3.5 – Identificação das séries dos perfis U e respectivas dimensões.	83
Tabela 3.6 – Identificação das séries dos perfis	83
Tabela 3.7 – Identificação e descrição das características especiais das cantoneiras ensaiadas.	84
Tabela 3.8 – Identificação e descrição das características especiais dos perfis U ensaiados. .	84
Tabela 3.9 – Tipos de aço, espessura nominal e raio de concordância das dobras dos perfis..	90
Tabela 3.11 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectados por uma aba, com duas linhas de parafusos.....	103
Tabela 3.12 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas desiguais, conectadas pela menor aba, com uma linha de parafusos.....	103
Tabela 3.13 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas desiguais, conectadas pela maior aba, com uma linha de parafusos.....	104
Tabela 3.14 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectadas por todas as abas.	104
Tabela 3.15 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com uma linha de parafusos.	105
Tabela 3.16 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com duas linha de parafusos.....	106
Tabela 3.17 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas no flange do perfil, com uma linha de parafusos	107
Tabela 3.18 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados na alma e no flange do perfil, com uma linha de parafusos	108

Tabela 4.1 – Valores das forças de ruptura e modos de falha em cantoneiras, calculados segundo a norma NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios.....	127
Tabela 4.2 – Valores das forças de ruptura e modos de falha em perfis U, calculados segundo a norma NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios	128
Tabela 4.3 – Valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios em cantoneiras, calculados segundo as normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005).....	129
Tabela 4.4 – Dados estatísticos dos resultados gerados na análise de carregamentos das cantoneiras utilizando as normas.....	132
Tabela 4.5 – Valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios em perfis U, calculados segundo as normas NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005).....	133
Tabela 4.6 –Dados estatísticos dos resultados gerados na análise de carregamentos dos perfis U utilizando as normas.....	136
Tabela 4.7 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nas cantoneiras A2-B131	140
Tabela 4.8– Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nas cantoneiras A2-B231	141
Tabela 4.9 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nas cantoneiras A2-C132	142
Tabela 4.10 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nas cantoneiras A2-C232	143
Tabela 4.11 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nos perfis U (C1-I331W).....	145
Tabela 4.12 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o <i>C t exp.</i> e o <i>C t NBR 14762</i> nos perfis U (C2-I231W).....	146
Tabela 5.1 – Análise de função discriminante dos modos de ruptura em cantoneiras.....	150
Tabela 5.2 – Análise de função classificação dos modos de ruptura em cantoneiras	152
Tabela 5.3 – Matriz de classificação dos modos de ruptura em cantoneiras	153
Tabela 5.4 – Classificação de casos dos modos de ruptura em cantoneiras.....	153
Tabela 5.5 – Análise de função discriminante dos modos de ruptura em perfis U	158
Tabela 5.6 – Análise de função classificação dos modos de ruptura em perfis U	159
Tabela 5.7 – Matriz de classificação dos modos de ruptura em perfis U.....	160
Tabela 5.8 – Classificação de casos dos modos de ruptura em perfis U	160
Tabela 5.9 – Estatísticas da regressão linear múltipla em cantoneiras.....	170
Tabela 5.10 – Coeficientes de regressão para o modelo de cantoneira obtido.....	171
Tabela 5.11 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada aos próprios perfis ensaiados	172
Tabela 5.12 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. Al. (1995)	174

Tabela 5.13 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada nos casos Maiola (2004)	176
Tabela 5.14 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada aos casos Teh e Gilbert (2013a)	178
Tabela 5.15 – Estatísticas da regressão linear múltipla em perfis U	183
Tabela 5.16 – Coeficientes de regressão para o modelo de perfis U obtido	183
Tabela 5.17 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos próprios perfis U ensaiados	185
Tabela 5.18 – Avaliação da equação proposta em perfis U neste trabalho aplicada aos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)	187
Tabela 5.19 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Maiola (2004)	189
Tabela 5.20 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Teh e Gilbert (2013b)	191
Tabela 5.21 – Valores de coeficientes de redução da área líquida para pré-dimensionamento	194
Tabela 5.22 – Valores de coeficientes de redução da área líquida para pré-dimensionamento de ligações parafusadas em perfis U formados a frio	194
Tabela 6. 1 – Propriedades mecânicas do aço	199
Tabela 6. 2 – Diferenças entre as força de ruptura dos ensaios e dos modelos em cantoneiras	220
Tabela 6. 3 – Diferenças entre as forças de ruptura dos ensaios e dos modelos em perfis U	239

LISTA DE ABREVIÇÕES, SÍMBOLOS E NOMECLATURAS

1. Escalares

A	área bruta da seção transversal do perfil
A_{cn}	área da aba conectada
A_o	área da aba desconectada
A_e	área efetiva da seção transversal do perfil
A_n	área líquida da seção transversal do perfil
A'_{ne}	área líquida efetiva da seção transversal considerando o efeito <i>shear lag</i>
A_{nv}	área líquida submetida ao cisalhamento
β	coeficiente de ponderação da resistência última da seção líquida
b_1	aba da cantoneira desconectada
b_2	aba da cantoneira conectada
bf	flange do perfil U desconectado
bw	alma do perfil U conectada
C_t	Coeficiente de redução da seção líquida;
d	diâmetro nominal do parafuso
d_f	diâmetro do furo
f_u	resistência à ruptura do aço na tração
f_y	resistência ao escoamento do aço
g	espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação
L	comprimento da ligação parafusada
$N_{t,Rd}$	força normal de tração resistente de cálculo
n_f	quantidade de furos na linha de ruptura da seção transversal
t	espessura da chapa
U	coeficiente de redução da área líquida, de acordo com a norma norte americana
\bar{x}	distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil
W_u	comprimento dos elementos desconectados
W_c	comprimento dos elementos conectados,
γ	coeficiente de ponderação das resistências
α_e	coeficiente da força resistente ao esmagamento em ligações parafusadas

2. Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society For Testing and Materials</i>
AS/NZS	Standards Australia
BSI	<i>British Standard Institute</i>
CAN/CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
COR	Aço anticorrosivo ou aço patinável
Eurocode	European Committee for Standardization
IAB	Instituto Aço Brasil
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
NBR	Norma Brasileira
MEF	Método dos Elementos Finitos
PPF	Perfis de aço formados a frio
ZAR	Aço galvanizado por imersão a quente

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O minério de ferro é a matéria prima mais importante na indústria do aço, e o Brasil é um dos principais produtores de minério de ferro com reservas de alta qualidade e capazes de abastecer a produção do aço em todo país e também poder exportar esta matéria prima. Segundo o Instituto Aço Brasil (IAB), o Brasil ocupa a nona posição no ranking mundial de aço com 34,530 milhões de toneladas de aço produzidos em 2019 (POSO, 2015).

Dentre os principais setores consumidores de produtos siderúrgicos, a construção civil foi um setor que apresentou aumento na participação do consumo, aumentou o consumo em 11,6% em 2019, para 7,9 milhões de toneladas. A participação da construção civil no total do consumo aparente aumentou de 33,4% em 2018 para 37,6% em 2019. Esse setor continua sendo o maior consumidor de produtos siderúrgicos do país.

O uso do aço na construção civil brasileira tem sido muito importante devido aos inúmeros benefícios que as estruturas de aço oferecem em condições adversas. Neste contexto, quando se depara com estruturas de aço com projetos arquitetônicos arrojados, com a existência de grandes vãos, e para estas estruturas terem bom desempenho é essencial a qualidade, dos materiais, dos processos de fabricação e montagem, além de constante inspeção e manutenção. Para prevenir acidentes e mau desempenho estrutural.

O bom funcionamento das estruturas, dado o elevado grau de tecnologia, garante um desenvolvimento e aplicação para um fim comum, levando em consideração os estados limites normativos, que é assegurar e proteger a vida daqueles que dependem de alguma forma do bom desempenho e funcionamento das estruturas.

A construção de estrutura de aço tem como característica importante a possibilidade de oferecer variedades de dimensões de perfis, formas e aplicações. Esses perfis podem ser do tipo: a) perfis soldados; b) perfis laminados e; c) perfis formados a frio – também chamados de perfis de chapa dobrada.

Os perfis formados a frio podem ser fabricados por máquinas perfiladeiras ou dobradeiras, a partir da dobra de chapas planas de diversas espessuras – frequentemente com valores máximos de 6,35 mm de espessura (YU, 2000), também têm uma extensa gama de aplicações, tendo grande versatilidade e, normalmente, são destinados a obras cujas magnitudes dos carregamentos estejam entre baixas e médias (LEE et al., 2014). Além disso,

esses perfis têm a vantagem de oferecer baixo peso próprio e a facilidade de serem produzidos, economicamente, com seções transversais pouco usuais.

Perfis de aço formados a frio com conexões nas extremidades podem ser comumente utilizados em diversas estruturas, como torres de transmissão, passarelas, coberturas e obras de pequeno e médio porte. No Brasil e em outros países, tem sido crescente a opção pelo sistema construtivo dos chamados *light steel frames* (ou pórticos leves de aço) nos quais se utilizam o aço galvanizado de chapas finas de alta resistência. Neste caso, os elementos estruturais são basicamente constituídos de perfis formados a frio manufaturados em aço galvanizado. Essa é, uma das tantas áreas de aplicação dos perfis de aço formados a frio que deve receber grande atenção, pois, disponibiliza um dos benefícios do aço para atender a grande demanda nacional com velocidade de construção, advindo do alto grau de industrialização do sistema de produção.

A montagem das estruturas de aço se torna possível devido ao fato das peças estruturais serem pré-fabricadas e conectadas entre si, no local da obra, através de parafusos e soldas, garantindo a estabilidade do conjunto. Embora as estruturas de aço possam ser montadas tanto com parafusos como com soldas, a preferência por ligações parafusadas é crescente, pela rapidez que proporciona no canteiro de obras. As conexões parafusadas são práticas, pois permitem uma eventual desmontagem das estruturas de forma mais fácil, se comparadas com as conexões por solda, além de poder ser utilizadas em qualquer local de construção, já que não precisam de fonte de energia (como os equipamentos de solda) para serem executadas e se comportam de forma mais resistente quando submetidas a carregamentos alternados (LEE et al., 2014). Desta forma, ressalta-se a grande importância que as conexões parafusadas têm para o sucesso do empreendimento de maneira geral e segurança da estrutura de maneira particular (ANANTHI, ROY e LIM 2019).

A tecnologia das estruturas de aço cresce cada vez mais no mercado da construção civil e as ligações parafusadas, a partir da facilidade de execução durante a montagem nas estruturas de aço, não poderiam ficar fora deste processo tecnológico. Uma abordagem do comportamento das conexões parafusadas em perfis formados a frio foi realizada por Taylor (2000) que relatou não estarem completamente conhecidos e equacionados alguns fenômenos que influenciam os resultados das resistências dessas conexões. Dentre esses fenômenos tem-se o efeito *shear lag*, que ocorre quando o perfil é conectado apenas por parte da sua seção transversal. Nesses casos, ocorre uma redução na resistência à tração da peça quando ela é determinada pela ruptura da seção líquida.

As pesquisas sobre o efeito *shear lag* em perfis L (comumente denominados no Brasil de “cantoneiras”) e em perfis U formados a frio, que deram origem às equações descritas em uma das mais utilizadas normas técnicas – a norma americana para perfis formados a frio (AISI, 1999) - foram realizadas na década de 1990 por LaBoube e Yu (1995), abrangendo a ruptura de 27 cantoneiras e 8 rupturas de perfis U. De Paula (2006) contribuiu nesta linha realizando na Universidade de Brasília (UnB) 158 ensaios em perfis L com conexões parafusadas sob tração analisando o efeito *shear lag*. A partir de 2006, poucos trabalhos foram desenvolvidos visando ampliar a abrangência das equações, levando em consideração diversos parâmetros envolvidos, cabendo mencionar os recentes trabalhos de Teh e Gilbert (2013a), (2013b), (2014a) e (2014b). Esses autores realizaram ensaios em cantoneiras e em perfis U destinados ao entendimento do efeito *shear lag* em conexões parafusadas em perfis formados a frio. Tais trabalhos nortearam a definição das equações utilizadas na norma americana para perfis formados a frio (AISI, 2016). Mesmo assim, as formulações propostas e as características dos resultados e conclusões apresentadas sugerem que novas pesquisas e outras considerações devam ser avaliadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal desse trabalho consiste em analisar o comportamento estrutural de ligações parafusadas em cantoneiras e perfis U, formados a frio, por meio de análise de vários resultados experimentais. Para atingir tal objetivo, estes resultados são usados para a prescrição de relações matemáticas que melhor quantifiquem a resistência à ruptura da seção líquida de conexões típicas quando sujeitas ao efeito *shear lag*.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Desenvolver uma análise discriminante por meio dos ensaios experimentais de cantoneiras e perfis U, no sentido de discriminar as variáveis mais importantes dentre os grupos dos modos de ruptura;

- Propor uma equação para o cálculo de coeficientes de redução da seção líquida de cantoneiras e de perfis U. Será feita uma modelagem estatística, de modo que tais equações possam ser utilizadas por projetistas de estruturas de aço formado a frio;
- Obter resultados experimentais para validação de um modelo numérico;
- Simular modelos numéricos baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), empregando um programa específico (ABAQUS) e desta forma obter resultados numéricos que possam ser úteis como modelo de cálculo

Sendo assim, por meio dos resultados experimentais dos ensaios realizados com materiais de aço galvanizados (ZAR 345), (ZAR 400) e aço carbono (COR 420) utilizados no país, será possível simular modelos numéricos baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), empregando um programa específico (ABAQUS). Com isso será possível avaliar a possibilidade de uso desta simulação numérica para a obtenção de uma descrição qualitativa e quantitativa da resistência de cantoneiras e perfis U formados a frio e sob tração. Pretende-se também com os modelos numéricos demonstrar uma alternativa econômica e rápida quando comparada com a metodologia de ensaios experimentais que demandam tempo e altos custos.

1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Entre as motivações dessa pesquisa, podemos destacar a busca de equações que ainda são motivos de pesquisa da comunidade acadêmica, equações estas capazes de produzir valores mais seguros e realistas da resistência à ruptura da seção líquida. Este trabalho, dentro da linha de pesquisa de perfis formados a frio, tem também a intenção de motivar um maior uso de perfis de aço formados a frio na construção civil. É importante relatar que os perfis aqui utilizados são de fabricação nacional. Nesta pesquisa, o leitor também encontrará uma grande variabilidade de configurações de ligações parafusadas e perfis com diferentes tipos de aço, (ZAR 345), (ZAR 400) e (COR 420). Entre as principais contribuições dessa pesquisa destacam-se: (a) proposição de uma equação para o cálculo mais preciso da ruptura da seção líquida (C_t) em cantoneiras e perfis U formados a frio, sob tração e conectados por parafusos. (b) um considerável banco de dados experimental que pode servir como valores de referência para outras pesquisas e para projetistas de aço; (c) Modelo numérico não linear em Elementos Finitos para avaliar o comportamento estrutural de perfis de aço formados a frio, sob tração e conectados por parafusos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Apresenta-se a seguir uma descrição da estrutura dos capítulos deste trabalho de pesquisa.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema do trabalho, incluindo a descrição do problema em causa, os objetivos e as motivações e organização da tese.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica sobre o dimensionamento de conexões parafusadas de elementos estruturais de aço, com ênfase em perfis formados a frio, abordando aspectos de análise experimental e numérica e proposições de outros autores dentro do tema analisado nesta tese.

No capítulo 3, apresentam-se os materiais e métodos empregados na análise experimental, com a descrição detalhada dos equipamentos, instrumentos, peças e esquemas de montagem utilizados. São apresentados também os detalhes de fabricação dos perfis, suas dimensões, a metodologia de caracterização do aço empregado, e, o padrão de identificação dos diversos perfis a serem ensaiados.

No capítulo 4 é apresentada a análise dos resultados de 96 ensaios de cantoneiras e 100 ensaios de perfis U, formados a frio, descrevendo-se detalhadamente cada conjunto de ensaios e avaliando-se diversos aspectos qualitativos e quantitativos destes ensaios.

No capítulo 5 é apresentada a modelagem estatística dos resultados dos ensaios, por meio de uma análise que discrimina os modos de ruptura obtidos em ensaios de cantoneiras e de perfis U, formados a frio. Este capítulo também apresenta uma regressão estatística para o coeficiente de redução da seção líquida (C_t), a partir da qual foram obtidos os parâmetros para uma nova equação de dimensionamento de cantoneiras e perfis U, formados a frio, com ligações parafusadas submetidas à tração.

No capítulo 6 é apresentada a modelagem numérica realizada para cantoneiras e perfis U formados a frio, ensaiados com 1 linha e 2 linhas de furos, por meio do Método dos Elementos Finitos, empregando-se o programa comercial ABAQUS. Neste capítulo também são descritas as estratégias adotadas na modelagem do material, nas condições de contorno, nas hipóteses de cálculo e na representação dos perfis. Além disso, neste capítulo apresenta-se uma análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre este trabalho de pesquisa são também apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

2.1 REVISÃO TEÓRICA

Desde a década de 1950, experimentos têm sido realizados em algumas instituições de pesquisa, de modo a estudar o desempenho estrutural de conexões parafusadas quando os elementos estruturais são submetidos a esforços de tração. Os resultados desses testes indicam que os quatro tipos principais de estados limites últimos que podem ocorrer nesse tipo de ligação, em chapas e perfis, são os seguintes (CARRIL, LABOUBE e YU, 1994):

- rasgamento entre furos e entre furo e borda (Figura 2.1a);
- esmagamento da chapa junto ao parafuso (Figura 2.1b);
- ruptura da seção líquida (Figura 2.1c);
- cisalhamento do parafuso (Figura 2.1d);
- rasgamento da chapa causado devido à rotação excessiva do parafuso (Figura 2.1e).

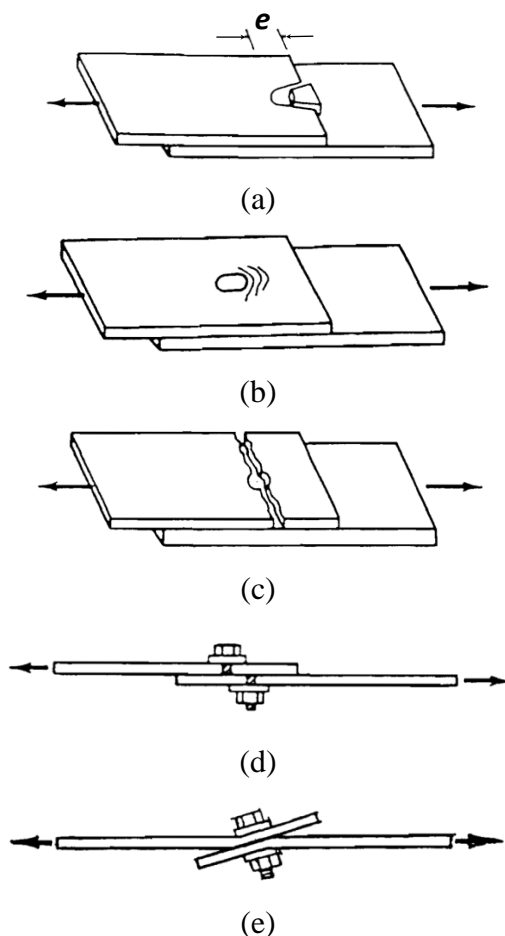


Figura 2.1 – Estados limites últimos em chapas com ligações parafusadas (CARRIL, LABOUBE e YU, 1994)

Além desses cinco tipos básicos de falha, pode também ocorrer em perfis de chapas finas, a ruptura por rasgamento da parte conectada (YU, 2000), também chamada de cisalhamento de bloco (*block shear*), como apresentado na Figura 2.2.

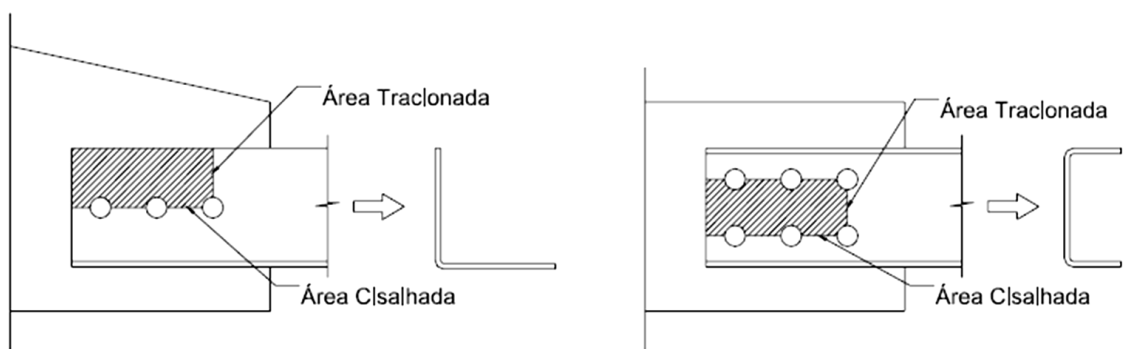


Figura 2.2 – Ruptura por cisalhamento de bloco em cantoneira e em perfil U (YU, 2000)

Esse estudo aborda especificamente os modos de falha onde ocorre a ruptura da seção líquida (Figura 2.1c) em ligações parafusadas de perfis formados a frio, com ensaios executados em cantoneiras e perfis U. A seguir são apresentadas as prescrições para o dimensionamento desses tipos de perfis presentes nas principais normas técnicas de estruturas de aço vigentes.

2.1.1 A norma brasileira ABNT NBR 14762:2010

A norma brasileira para dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, NBR 14762 (ABNT, 2010), estabelece em seu item 9.6 os critérios a serem observados no cálculo de barras submetidas à tração. Esses critérios abrangem o escoamento da seção bruta (equação. 2.1) e a ruptura da seção líquida do perfil na região da ligação (equação. 2.2), dados respectivamente, pelas seguintes relações:

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,10) \quad (2.1)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t A_n f_u}{\gamma} \quad (\gamma = 1,65) \quad (2.2)$$

onde:

$N_{t,Rd}$ é a força normal de tração resistente de cálculo;

A é a área bruta da seção transversal do perfil;

A_n é a área líquida da seção transversal do perfil;

C_t é o coeficiente de redução da área líquida;
 γ é o coeficiente de ponderação das resistências;
 f_y é a tensão de escoamento;
 f_u é a tensão de ruptura da chapa do perfil.

Apesar de não haver uma definição formal na NBR 14762 (ABNT, 2010), a área líquida da seção transversal do perfil é usualmente obtida da seguinte forma, por observação da relação correspondente na norma norte americana (AISI, 2001):

$$A_n = A - n_f d_f t \quad (2.3)$$

onde:

n_f é quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;
 d_f é a dimensão do furo na direção perpendicular à sollicitação de acordo com a Tabela 2.1;
 t é a espessura da parte conectada analisada.

O coeficiente C_t da equação 2.2 é obtido em função do tipo de barra (chapa ou perfil) e do tipo de ligação (soldada ou parafusada). Para perfis com ligações parafusadas, objeto deste trabalho, este coeficiente será calculado com as seguintes relações, dependendo do critério em que se enquadra a ligação:

— todos os elementos conectados, com dois ou mais parafusos na direção da sollicitação:

$$C_t = 1,0 \quad (2.4)$$

— todos os parafusos contidos em uma única seção transversal (incluindo o caso particular de um único parafuso na ligação), o perfil deve ser tratado como chapa equivalente, com C_t dado por:

$$C_t = 2,5 \left(\frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad (2.5)$$

onde:

d é o diâmetro nominal do parafuso;

g é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação.

— cantoneiras e perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação, sendo que nem todos elementos estão conectados:

$$C_t = 1,0 - 1,2 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) \leq 0,9 \quad (2.6)$$

(porém não inferior a 0,4)

onde:

L é o comprimento da ligação parafusada, medida entre o centro do primeiro furo e o centro do último furo, na direção da solicitação;

\bar{x} é a excentricidade da ligação, tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil;

d é o diâmetro nominal do parafuso;

g é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação.

As grandezas para cálculo do coeficiente C_t se apresentam nas Figuras 2.3 e 2.4.

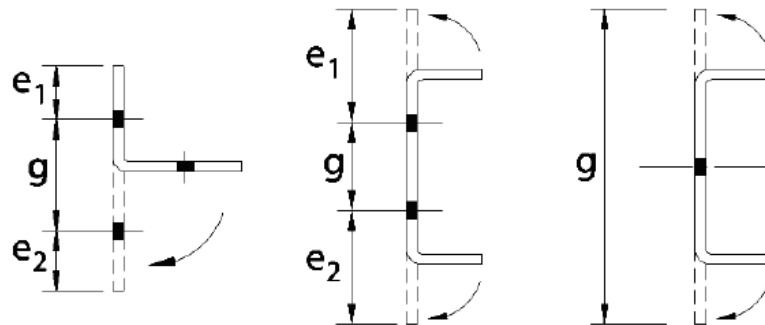


Figura 2.3 – Perfis tratados como chapa (todos os parafusos contidos em uma única seção)
NBR 14762 (ABNT, 2010)

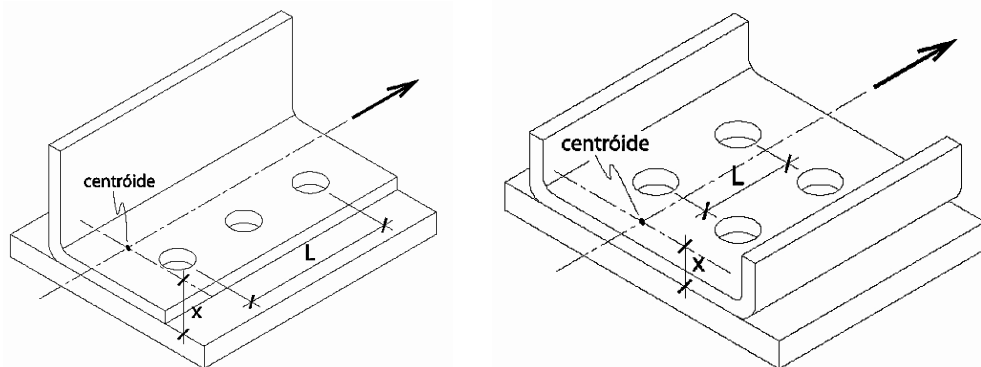


Figura 2.4 – Ligação parafusada em perfis NBR 14762 (ABNT, 2010)

É importante observar que a equação 2.6 foi obtida através da realização de apenas 27 ensaios de cantoneiras e 8 perfis U, ambos formados a frio (LABOUBE e YU, 1995).

A NBR 14762 (ABNT, 2010) também expõe em seu item 10.3 - ligações parafusadas, que os parafusos não devem exceder às especificações relacionadas às dimensões dos furos. Nas estruturas em geral, devem ser especificados furos-padrão. Nas ligações cuja solicitação seja normal ao eixo dos parafusos (força cortante), caso sejam especificados furos alongados ou muito alongados, a dimensão alongada do furo deve ser normal à solicitação. A Tabela 2.1 apresenta a dimensão máxima dos furos em milímetros.

Tabela 2.1 – Dimensão máxima de furos (mm)

Diâmetro nominal do parafuso (d)	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
< 12,5	d+0,8	d+1,5	(d+0,8)x(d+6)	(d+0,8)x(2,5d)
≥ 12,5	d+1,5	d+5	(d+1,5)x(d+6)	(d+1,5)x(2,5d)

Para a verificação da ligação parafusada, no que diz respeito ao esmagamento (pressão de contato), a norma NBR 14.762 (ABNT, 2010) estabelece a seguinte relação:

$$F_{Rd} = \alpha_e dt f_u / \gamma \quad (\gamma = 1,55) \quad (2.7)$$

onde f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base); d é o diâmetro nominal do parafuso; t é a espessura do elemento conectado analisado; α_e é um fator igual a $(1,83t + 1,53)$, com t em milímetros ($t \leq 4,75$ mm) e γ é o coeficiente de ponderação das resistências.

2.1.2 A norma norte americana de perfis formados a frio AISI S100 (2016)

As especificações da norma norte americana de perfis formados a frio AISI S100 (2016) são destinadas para Canadá, México e Estados Unidos e esta edição substituiu a edição da AISI S100 (2012) e as edições anteriores.

Outras normas, como a norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010), têm como referência os parâmetros da norma norte americana de perfis formados a frio AISI S100 (2016), exceto pelo fato da norma brasileira considerar, também, a possibilidade de ligações com parafusos em uma única seção transversal do perfil. Esta relação é prescrita no item 3 da

seção 9.6.2 da NBR 14762 (ABNT, 2010), e representada anteriormente na equação 2.5, na qual é adotado o conceito de chapa equivalente para os perfis.

Por meio das pesquisas de Teh e Gilbert (2013b) e (2014a), as especificações da norma americana de perfis formados a frio AISI S100 (2012) foram renovadas na edição da norma AISI S100 (2016). As equações referentes à ruptura da seção líquida em cantoneiras e perfis U conectados por parafusos são apresentadas a seguir.

Para cantoneiras conectadas por parafusos:

$$U = \frac{1}{1,1 + \frac{0,5b_1}{b_2 + b_1} + \frac{2\bar{x}}{L}} \quad (2.8)$$

Para perfis U conectados por parafusos:

$$U = \frac{1}{1,1 + \frac{bf}{bw + 2bf} + \frac{\bar{x}}{L}} \quad (2.9)$$

onde:

\bar{x} é a excentricidade da ligação, tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil;

L é o comprimento da ligação parafusada, medida entre o centro do primeiro furo e o centro do último furo, na direção da solicitação;

b_1 é a largura da aba da cantoneira desconectada;

b_2 é a largura da aba da cantoneira conectada;

bf é a largura do flange do perfil U desconectado;

bw é a largura da alma do perfil U conectada.

Além disso, a norma AISI S100 (2016) apresenta a seguinte relação para o dimensionamento ao esmagamento, quando a deformação do furo não é uma consideração de projeto:

$$P_N = \alpha C d t f_u \quad (2.10)$$

onde:

α é um fator que depende do tipo de conexão, igual a 0,75 para ligação com cisalhamento simples sem uso de arruelas ou com apenas uma arruela;

C é um fator que depende da relação d/t , igual a 3,0 para valores de $d/t < 10$;

d é o diâmetro nominal do parafuso;

t é a espessura do elemento conectado analisado;

f_u é a resistência à ruptura do aço (metal-base).

Para os casos tratados neste trabalho ($\alpha = 0,75$ e $C = 3,0$), a equação. 2.11 assume a seguinte forma:

$$P_N = 2,25dtf_u \quad (2.11)$$

Ressalta-se que esta norma unificou, a partir do ano de 2001, a normatização referente ao assunto para Estados Unidos, Canadá e México.

2.1.3 A norma europeia

A norma adotada pelos países europeus para o projeto de estruturas de aço especifica no item 3.10.3, de seu suplemento destinado a chapas e perfis finos (EUROCODE1-8, 2010), que o dimensionamento de cantoneiras de chapas finas conectadas por apenas uma aba deverá obedecer ao estabelecido na norma de perfis laminados e soldados (EUROCODE 1-8, 1993). Em seu item 5.2, essa norma apresenta as seguintes equações para a determinação da resistência última na seção líquida de ligações com uma linha de parafusos em apenas uma aba da cantoneira:

$$\text{com 1 parafuso: } N_{Rd} = 2,0(e_2 - 0,5d_0)tf_u/\gamma \quad (2.12)$$

$$\text{com 2 parafusos: } N_{Rd} = \beta_2 A_{net} f_u / \gamma \quad (2.13)$$

$$\text{com 3 ou mais parafusos : } N_{Rd} = \beta_3 A_{net} f_u / \gamma \quad (2.14)$$

onde:

$$\beta_2 = 0,4 \text{ e } \beta_3 = 0,5 \text{ quando } p_1 \leq 2,5d_0 \text{ e,}$$

$$\beta_2 = \beta_3 = 0,7 \text{ quando } p_1 \geq 5,0d_0$$

Para valores intermediários de p_1 , os valores de β serão interpolados linearmente.

β_2 e β_3 são fatores de redução dependentes de p_1 ;

A_{net} é a área líquida do perfil;

f_u é a tensão de ruptura da chapa do perfil;

γ é o coeficiente de ponderação das resistências.

Para cantoneiras de abas desiguais conectadas pela menor aba, a área líquida é tomada como sendo a área líquida de uma cantoneira de abas iguais, cuja dimensão da aba é a mesma da menor aba conectada. Os parâmetros a serem adotados nas equações são apresentados na Figura 2.5.

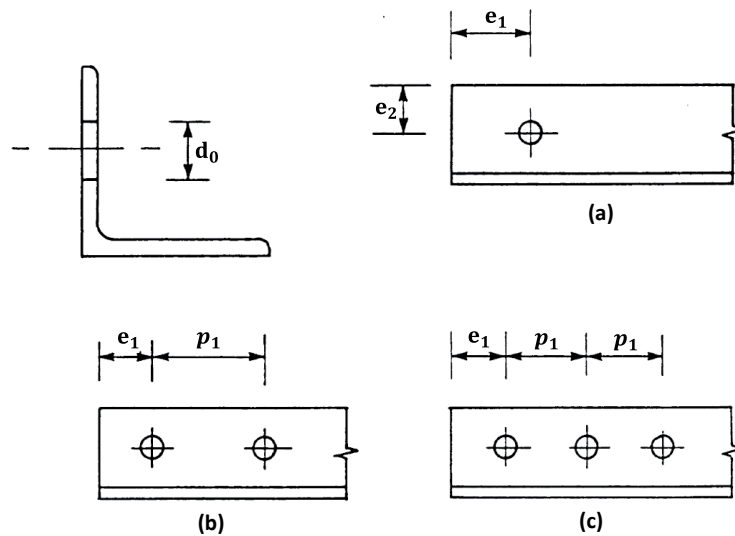


Figura 2.5 – Parâmetros para ligações parafusadas em cantoneiras com 1, 2 e 3 parafusos segundo a norma europeia (EUROCODE1-8, 2010).

Segundo a norma europeia no item 3.13.2 de perfis finos, para um grupo de parafusos simétricos sujeito ao carregamento concêntrico, a resistência ao esmagamento deverá atender a seguinte equação:

$$F_{Rd} = (0,5A_{nt}f_u/\gamma) + ((1/\sqrt{3})A_{nv}f_y/\gamma) \quad (2.15)$$

onde A_{nt} área líquida submetida à tração, A_{nv} é a área líquida submetida ao cisalhamento, f_y é a tensão de escoamento da chapa do perfil, f_u é a tensão de ruptura da chapa do perfil e γ é o coeficiente de ponderação das resistências.

2.1.4 Verificação do desempenho do coeficiente C_t

Nesta seção são apresentados os valores do coeficiente de redução C_t para cantoneiras formadas a frio conectadas por parafusos, conforme a equação adotada pela AISI S100

(2016). A relação entre a capacidade final e a capacidade final de norma para a resistência nominal da seção líquida é utilizada para avaliar o coeficiente C_t .

A capacidade final experimental é chamada de " P_{ULT} ". A resistência da seção líquida " $N_{t,Rd}$ " é obtida usando medidas das propriedades geométricas do material. Os dados experimentais disponíveis na literatura são utilizados para uma avaliação preliminar do coeficiente de redução " C_t " expressa na equação (2.6) referente aos dados experimentais de Holcomb et al. (1995) e Yip e Cheng (2000). A norma atual AISI S100 (2016) compõe-se das equações (2.8) e (2.9) para ensaios de cantoneiras e perfis U de aço formados a frio, submetidos à tração, que foram desenvolvidas pelos autores Teh e Gilbert, (2013a) e (2014a). Holcomb et al. (1995) realizaram ensaios na Universidade de Missouri-Rolla, Yip e Cheng (2000) realizaram ensaios na Universidade de Alberta e Teh e Gilbert (2013a), (2013b) e (2014a) e (2014b) realizaram ensaios na Universidade de Wollongong.

Apresenta-se a seguir uma avaliação do desempenho do coeficiente C_t especificado pela norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010). Para esta comparação será utilizada a equação (2.2) com a aplicação do coeficiente de ponderação da resistência (γ) igual a 1,0, definindo-se então a força normal resistente ($N_{t,Rd}$) da seguinte maneira:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u \quad (2.16)$$

onde o valor de C_t é dado pela equação (2.6)

Dividindo-se a força de ruptura experimental obtida nos ensaios (P_{ULT}) pela força da norma $N_{t,Rd}$, obtém-se um índice de avaliação do desempenho da equação (2.2), o qual levará a resultados insatisfatórios quando seu valor for inferior a 1, ou seja:

$$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}} < 1,0 \quad (2.17)$$

A Tabela 2.2, que está de acordo com os autores Holcomb et al. (1995); Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013a) e (2014a), indica os parâmetros geométricos das cantoneiras e também apresenta o desempenho do coeficiente C_t dado pela norma americana AISI S100 (2001) e pela NBR 14762 (ABNT, 2010) das cantoneiras de aço formadas a frio, e todas apresentam um parafuso por seção transversal.

A identificação de cada cantoneira está na terceira coluna, sendo assim " b_c " é a largura da aba conectada da cantoneira; " b_d " é a largura da aba não conectada da cantoneira; " t " é a espessura uniforme; " d " é o diâmetro nominal do parafuso; " \bar{x} " é a distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade; e " L " é a distância do comprimento total da ligação dos

parafusada ao longo da direção da força aplicada. A Figura 2.6 ilustra uma cantoneira de aço formado a frio.

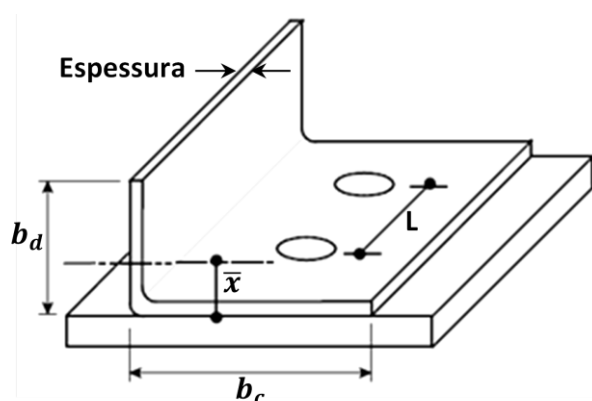


Figura 2.6 – Cantoneira de aço formada a frio com esquema de furos para executar conexão de parafusos (DE PAULA, BEZERRA e MATIAS, 2008)

Tabela 2.2 – Características das cantoneiras de aço formadas a frio apresentadas por Holcomb et al. (1995); Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013a e 2014a).

Num. Ensaio	Fonte	Config. do modelo	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	Num. Paraf.	d (mm)	\bar{x} (mm)	L (mm)
1		LBN11-1	41,30	41,30	1,067	2	12,70	10,81	38,1
2		LBN11-2	41,30	41,30	1,067	2	12,70	10,81	38,1
3		LBN11-3	41,30	41,30	1,067	2	12,70	10,81	38,1
4		LCN11-1	41,30	41,30	1,067	3	12,70	10,81	76,2
5		LCN11-2	41,30	41,30	1,067	3	12,70	10,81	76,2
6		LCN11-3	41,30	41,30	1,067	3	12,70	10,81	76,2
7		LBN12-1	41,30	82,50	1,067	2	12,70	28,06	38,1
8		LBN12-2	41,30	82,50	1,067	2	12,70	28,06	38,1
9		LBN12-3	41,30	82,50	1,067	2	12,70	28,06	38,1
10		LCN12-1	41,30	82,50	1,067	3	12,70	28,06	76,2
11		LCN12-2	41,30	82,50	1,067	3	12,70	28,06	76,2
12		LBN13-1	82,50	41,30	1,067	2	12,70	7,34	38,1
13	Holcomb et al. (1995)	LBN13-2	82,50	41,30	1,067	2	12,70	7,34	38,1
14		LCN13-1	82,50	41,30	1,067	3	12,70	7,34	76,2
15		LCN13-2	82,50	41,30	1,067	3	12,70	7,34	76,2
16		LBN31-1	41,30	41,30	3,048	2	12,70	11,74	38,1
17		LBN31-2	41,30	41,30	3,048	2	12,70	11,74	38,1
18		LCN31-1	41,30	41,30	3,048	3	12,70	11,74	76,2
19		LCN31-2	41,30	41,30	3,048	3	12,70	11,74	76,2
20		LBN32-1	41,30	82,50	3,048	2	12,70	29,14	38,1
21		LBN32-2	41,30	82,50	3,048	2	12,70	29,14	38,1
22		LCN32-1	41,30	82,50	3,048	3	12,70	29,14	76,2
23		LCN32-2	41,30	82,50	3,048	3	12,70	29,14	76,2
24		LBN33-1	82,50	41,30	3,048	2	12,70	8,20	38,1
25		LBN33-2	82,50	41,30	3,048	2	12,70	8,20	38,1
26		LCN33-1	82,50	41,30	3,048	3	12,70	8,20	76,2
27		LCN33-2	82,50	41,30	3,048	3	12,70	8,20	76,2

Continua...

Num. Ensaio	Fonte	Config. do modelo	<i>bc</i> (mm)	<i>bd</i> (mm)	<i>t</i> (mm)	Num. Paraf.	<i>d</i> (mm)	\bar{x} (mm)	<i>L</i> (mm)
28	Yip e Cheng (1997)	12,2	102,00	102,00	2,657	2	19,10	26,72	95,5
29		12,3	102,00	102,00	2,657	3	19,10	26,72	191,0
30		12,4	102,00	102,00	2,657	3	19,10	26,72	191,0
31		14,2	50,80	50,80	1,897	2	15,90	13,57	63,3
32		14,3	50,80	50,80	1,897	3	15,90	13,57	126,6
33		16,2	38,10	38,10	1,519	2	12,70	10,22	38,1
34		16,3	38,10	38,10	1,519	3	12,70	10,22	76,2
35		Yip e Cheng (1999)	A2-2	51,00	51,00	1,214	2	19,10	13,31
36	A2-2N		51,00	51,00	1,214	2	19,05	13,31	63,5
37	A2-3		51,00	51,00	1,214	3	19,05	13,31	127,0
38	A3-2		76,00	76,00	1,214	2	19,05	19,55	63,5
39	A3-3		76,00	76,00	1,214	3	19,10	19,55	127,0
40	A4-2		102,00	102,00	1,214	2	19,05	26,05	63,5
41	A4-3		102,00	102,00	1,214	3	19,05	26,05	127,0
42	A4-4		102,00	102,00	1,214	4	19,05	26,05	190,5
43	Teh e Gilbert (2013a)	EA2	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	40,0
44		EA4	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	60,0
45		EA6	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	80,0
46		EA8	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	40,0
47		EA10	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	60,0
48		EA12	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	80,0
49		EA14	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
50		EA16	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	75,0
51		EA18	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	100,0
52		EA20	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	50,0
53		EA22	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	75,0
54		EA24	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	100,0
55		EA1	40,00	40,00	1,500	1	13,00	10,70	40,0
56		EA3	40,00	40,00	1,500	1	13,00	10,70	60,0
57		EA5	40,00	40,00	1,500	1	13,00	10,70	80,0
58		EA7	50,00	50,00	1,500	1	13,00	13,20	40,0
59		EA9	50,00	50,00	1,500	1	13,00	13,20	60,0
60		EA11	50,00	50,00	1,500	1	13,00	13,20	80,0
61		EA13	60,00	60,00	1,500	1	17,00	15,70	50,0
62		EA15	60,00	60,00	1,500	1	17,00	15,70	75,0
63		EA17	60,00	60,00	1,500	1	17,00	15,70	100,0
64		DEA1	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	40,0
65		DEA2	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	60,0
66		DEA3	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	80,0
67		DEA4	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	40,0
68		DEA5	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	60,0
69		DEA6	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	80,0
70		DEA7	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
71		DEA8	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	75,0
72		DEA9	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	100,0
73		AEA1	40,00	40,00	3,000	1	13,00	10,60	40,0
74		AEA2 ^a	50,00	50,00	3,000	1	13,00	13,10	80,0
75		AEA3	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
76		AEA4	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	75,0
77		AEA5	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	100,0
78		UAW1	60,00	40,00	3,000	1	17,00	7,80	50,0
79	UAW2	60,00	40,00	3,000	1	17,00	7,80	75,0	
80	UAW3	60,00	40,00	3,000	1	17,00	7,80	100,0	

Continua...

Num. Ensaios	Fonte	Config. do modelo	bc (mm)	bd (mm)	t (mm)	Num. Paraf.	d (mm)	\bar{x} (mm)	L (mm)
81		UAW4	80,00	40,00	3,000	1	17,00	6,45	50,0
82		UAW5	80,00	40,00	3,000	1	17,00	6,45	75,0
83		UAW6	80,00	40,00	3,000	1	17,00	6,45	100,0
84		UAW7	75,00	50,00	3,000	1	17,00	9,80	50,0
85		UAW8	75,00	50,00	3,000	1	17,00	9,80	75,0
86		UAW9	75,00	50,00	3,000	1	17,00	9,80	100,0
87	Teh	UAW11	100,00	50,00	3,000	1	17,00	8,11	75,0
88	e	UAW13	60,00	40,00	1,500	1	17,00	7,92	50,0
89	Gilbert	UAW16	80,00	40,00	1,500	1	17,00	6,57	50,0
90	(2013a)	UAW17	80,00	40,00	1,500	1	17,00	6,57	75,0
91		UAW19	75,00	50,00	1,500	1	17,00	9,92	50,0
92		UAN1	40,00	60,00	3,000	1	13,00	19,50	40,0
93		UAN2	40,00	60,00	3,000	1	13,00	19,50	60,0
94		UAN3	40,00	60,00	3,000	1	13,00	19,50	80,0
95		UAN4	40,00	80,00	3,000	1	13,00	28,30	40,0
96		UAN5	40,00	80,00	3,000	1	13,00	28,30	60,0
97		UAN6	40,00	80,00	3,000	1	13,00	28,30	80,0
98		UAN7	50,00	75,00	3,000	1	13,00	24,00	40,0
99		UAN8	50,00	75,00	3,000	1	13,00	24,00	60,0
100		UAN9	50,00	75,00	3,000	1	13,00	24,00	80,0
101		UAN10	50,00	100,00	3,000	1	13,00	34,90	40,0
102		UAN11	50,00	100,00	3,000	1	13,00	34,90	60,0
103		UAN12	50,00	100,00	3,000	1	13,00	34,90	80,0
104		OL1	50,00	50,00	3,000	1	17,00	13,10	50,0
105		OL2	50,00	50,00	3,000	1	17,00	13,10	100,0
106	Teh	OL3a	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
107	e	OL3b	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
108	Gilbert	OL3c	60,00	60,00	3,000	1	17,00	15,60	50,0
109	(2014a)	OL5a	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	50,0
110		OL5b	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	50,0
111		OL6	75,00	75,00	3,000	1	17,00	19,30	100,0

A cantoneira está ligada a uma placa de reforço por parafusos como é apresentado na Figura 2.6. A partir da divisão da força ($N_{t,Rd}$) pela força de ruptura experimental (P_{ULT}), obtém-se um índice de avaliação do desempenho da equação. (2.17), o qual levará a resultados insatisfatórios e contra a segurança, quando seu valor estiver inferior a (1,0), ou seja, ($P_{ULT}/N_{t,Rd} < 1,0$).

Utilizando-se os valores das forças últimas obtidas nos ensaios em laboratório, pode-se obter os coeficientes experimentais de redução da seção líquida ($C_{t,exp}$), através da seguinte relação na equação (2.18):

$$C_{t,exp} = \frac{P_{ULT}}{A_n f_u} \quad (2.18)$$

A Tabela 2.3 apresenta os valores para P_{ULT} , f_u , A (área bruta das cantoneiras), A_n , $N_{t,Rd}$, $(P_{ULT} - N_{t,Rd})$ que é a diferença em resistência e também expressa essa diferença em porcentagem com referência ao P_{ULT} , a razão do $(P_{ULT}/N_{t,Rd})$ e a equação (2.6) da NBR 14.762 (ABNT, 2010) e ainda relata o valor ideal do coeficiente de redução C_t obtido a partir do valor da força final P_{ULT} dividido por $A_n f_u$.

Tabela 2.3 – Desempenho do coeficiente C_t dado pela NBR 14762 para cantoneiras apresentadas por Holcomb et al. (1995), Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013a e 2014a).

Num. Ensaio	Perfil	P_{ULT} (kN)	f_u (MPa)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$\frac{P_{ULT} - N_{t,Rd}}{N_{t,Rd}}$ (kN)	$\frac{P_{ULT} - N_{t,Rd}}{N_{t,Rd}}$ (%)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (%)	C_t NBR 14762 (2010)	C_t AISI (2016)	$C_{t,exp}$
1	LBN11-1	15,80	385	86,3	71,11	18,1	-2,3	-14,3	0,875	0,659	0,522	0,577
2	LBN11-2	16,20	385	86,3	71,11	18,1	-1,9	-11,4	0,897	0,659	0,522	0,592
3	LBN11-3	15,90	385	86,3	71,11	18,1	-2,2	-13,5	0,881	0,659	0,522	0,581
4	LCN11-1	19,60	385	86,3	71,11	22,7	-3,1	-15,9	0,863	0,830	0,612	0,716
5	LCN11-2	20,00	385	86,3	71,11	22,7	-2,7	-13,6	0,880	0,830	0,612	0,731
6	LCN11-3	20,90	385	86,3	71,11	22,7	-1,8	-8,7	0,920	0,830	0,612	0,763
7	LBN12-1	17,90	385	130,2	115,07	17,7	0,2	1,0	1,010	0,400	0,344	0,404
8	LBN12-2	19,30	385	130,2	115,07	17,7	1,6	8,2	1,089	0,400	0,344	0,436
9	LBN12-3	18,20	385	130,2	115,07	17,7	0,5	2,6	1,027	0,400	0,344	0,411
10	LCN12-1	21,90	385	130,2	115,07	24,7	-2,8	-12,9	0,886	0,558	0,461	0,494
11	LCN12-2	22,80	385	130,2	115,07	24,7	-1,9	-8,4	0,922	0,558	0,461	0,515
12	LBN13-1	25,30	385	130,2	115,07	34,1	-8,8	-34,6	0,743	0,769	0,605	0,571
13	LBN13-2	24,40	385	130,2	115,07	34,1	-9,7	-39,6	0,716	0,769	0,605	0,551
14	LCN13-1	29,80	385	130,2	115,07	39,2	-9,4	-31,5	0,761	0,884	0,685	0,673
15	LCN13-2	31,70	385	130,2	115,07	39,2	-7,5	-23,6	0,809	0,884	0,685	0,716
16	LBN31-1	49,00	366	236,5	193,21	44,6	4,4	9,0	1,099	0,630	0,509	0,693
17	LBN31-2	48,30	366	236,5	193,21	44,6	3,7	7,7	1,084	0,630	0,509	0,683
18	LCN31-1	58,50	366	236,5	193,21	57,6	0,9	1,5	1,015	0,815	0,603	0,827
19	LCN31-2	56,70	366	236,5	193,21	57,6	-0,9	-1,7	0,984	0,815	0,603	0,802
20	LBN32-1	52,00	366	362,1	318,79	46,7	5,3	10,2	1,114	0,400	0,338	0,446
21	LBN32-2	56,00	366	362,1	318,79	46,7	9,3	16,7	1,200	0,400	0,338	0,480
22	LCN32-1	62,90	366	362,1	318,79	63,1	-0,2	-0,4	0,996	0,541	0,455	0,539
23	LCN32-2	60,20	366	362,1	318,79	63,1	-2,9	-4,9	0,953	0,541	0,455	0,516
24	LBN33-1	80,90	366	362,1	318,79	86,6	-5,7	-7,0	0,935	0,742	0,589	0,693
25	LBN33-2	79,60	366	362,1	318,79	86,6	-7,0	-8,7	0,920	0,742	0,589	0,682
26	LCN33-1	88,30	366	362,1	318,79	101,6	-13,3	-15,7	0,869	0,871	0,675	0,757
27	LCN33-2	90,90	366	362,1	318,79	101,6	-10,7	-11,8	0,895	0,871	0,675	0,779
28	12,2	135,80	516	530,4	475,69	163,1	-27,3	-20,1	0,833	0,664	0,524	0,553
29	12,3	154,70	516	530,4	475,69	204,3	-49,6	-32,0	0,757	0,832	0,614	0,630
30	12,4	158,30	516	530,4	475,69	204,3	-46,0	-29,0	0,775	0,832	0,614	0,645
31	14,2	35,70	327	186,8	153,81	37,4	-1,7	-4,6	0,956	0,743	0,562	0,710
32	14,3	43,00	327	186,8	153,81	43,8	-0,8	-1,9	0,981	0,871	0,639	0,855
33	16,2	20,30	317	112,0	90,39	19,4	0,9	4,3	1,045	0,678	0,530	0,708
34	16,3	24,40	317	112,0	90,39	24,0	0,4	1,5	1,015	0,839	0,618	0,852
35	A2-2	27,90	316	121,4	96,40	22,8	5,1	18,3	1,224	0,749	0,565	0,916
36	A2-2N	24,00	316	121,4	96,46	22,8	1,2	4,9	1,052	0,749	0,565	0,787
37	A2-3	31,10	316	121,4	96,46	26,6	4,5	14,3	1,167	0,874	0,641	1,020
38	A3-2	32,80	316	182,1	157,16	31,3	1,5	4,5	1,048	0,630	0,509	0,660
39	A3-3	37,70	316	182,1	157,10	40,5	-2,8	-7,3	0,932	0,815	0,603	0,759

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	P_{ULT} (kN)	f_u (MPa)	A (mm ²)	A_{n^2} (mm ²)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (kN)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (%)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (%)	C_t NBR 14762 (2010)	C_t AISI (2016)	$C_{t,exp}$
40	A4-2	34,00	316	245,2	220,29	35,3	-1,3	-3,9	0,962	0,508	0,461	0,488
41	A4-3	45,10	316	245,2	220,29	52,5	-7,4	-16,3	0,859	0,754	0,568	0,648
42	A4-4	49,40	316	245,2	220,29	58,2	-8,8	-17,8	0,849	0,836	0,616	0,710
43	EA2	60,92	580	226,6	187,56	74,2	-13,3	-21,8	0,821	0,682	0,532	0,560
44	EA4	66,36	580	226,6	187,56	85,7	-19,4	-29,2	0,774	0,788	0,587	0,610
45	EA6	67,45	580	226,6	187,56	91,5	-24,0	-35,6	0,737	0,841	0,619	0,620
46	EA8	73,23	580	286,6	247,56	87,2	-13,9	-19,0	0,840	0,607	0,499	0,510
47	EA10	76,10	580	286,6	247,56	106,0	-29,9	-39,2	0,718	0,738	0,560	0,530
48	EA12	86,15	580	286,6	247,56	115,4	-29,2	-33,9	0,747	0,804	0,596	0,600
49	EA14	89,14	580	346,6	295,56	107,2	-18,1	-20,3	0,831	0,626	0,507	0,520
50	EA16	102,85	580	346,6	295,56	128,6	-25,8	-25,1	0,800	0,750	0,566	0,600
51	EA18	106,28	580	346,6	295,56	139,3	-33,1	-31,1	0,763	0,813	0,602	0,620
52	EA20	107,34	580	436,6	385,56	120,0	-12,7	-11,8	0,894	0,537	0,471	0,480
53	EA22	118,52	580	436,6	385,56	154,6	-36,1	-30,4	0,767	0,691	0,536	0,530
54	EA24	122,99	580	436,6	385,56	171,8	-48,8	-39,7	0,716	0,768	0,576	0,550
55	EA1	30,95	605	116,0	96,51	39,7	-8,7	-28,1	0,781	0,679	0,531	0,530
56	EA3	34,45	605	116,0	96,51	45,9	-11,4	-33,2	0,751	0,786	0,586	0,590
57	EA5	34,45	605	116,0	96,51	49,0	-14,6	-42,3	0,703	0,840	0,618	0,590
58	EA7	35,97	605	146,0	126,51	46,2	-10,3	-28,5	0,778	0,604	0,498	0,470
59	EA9	39,04	605	146,0	126,51	56,3	-17,3	-44,3	0,693	0,736	0,559	0,510
60	EA11	40,57	605	146,0	126,51	61,4	-20,8	-51,3	0,661	0,802	0,595	0,530
61	EA13	47,35	605	176,0	150,51	56,8	-9,4	-19,9	0,834	0,623	0,506	0,520
62	EA15	49,17	605	176,0	150,51	68,2	-19,0	-38,7	0,721	0,749	0,565	0,540
63	EA17	50,99	605	176,0	150,51	73,9	-22,9	-44,9	0,690	0,812	0,601	0,560
64	DEA1	55,48	580	226,6	187,56	74,2	-18,7	-33,7	0,748	0,682	0,532	0,510
65	DEA2	63,09	580	226,6	187,56	85,7	-22,6	-35,9	0,736	0,788	0,587	0,580
66	DEA3	68,53	580	226,6	187,56	91,5	-23,0	-33,5	0,749	0,841	0,619	0,630
67	DEA4	71,79	580	286,6	247,56	87,2	-15,4	-21,4	0,824	0,607	0,499	0,500
68	DEA5	73,23	580	286,6	247,56	106,0	-32,7	-44,7	0,691	0,738	0,560	0,510
69	DEA6	74,66	580	286,6	247,56	115,4	-40,7	-54,5	0,647	0,804	0,596	0,520
70	DEA7	87,43	580	346,6	295,56	107,2	-19,8	-22,7	0,815	0,626	0,507	0,510
71	DEA8	89,14	580	346,6	295,56	128,6	-39,5	-44,3	0,693	0,750	0,566	0,520
72	DEA9	101,14	580	346,6	295,56	139,3	-38,2	-37,8	0,726	0,813	0,602	0,590
73	AEA1	63,09	580	226,6	187,56	74,2	-11,1	-17,6	0,850	0,682	0,532	0,580
74	AEA2 ^a	80,41	580	286,6	247,56	115,4	-35,0	-43,5	0,697	0,804	0,596	0,560
75	AEA3	89,14	580	346,6	295,56	107,2	-18,1	-20,3	0,831	0,626	0,507	0,520
76	AEA4	99,43	580	346,6	295,56	128,6	-29,2	-29,4	0,773	0,750	0,566	0,580
77	AEA5	106,28	580	346,6	295,56	139,3	-33,1	-31,1	0,763	0,813	0,602	0,620
78	UAW1	84,71	580	286,6	235,56	111,1	-26,3	-31,1	0,763	0,813	0,620	0,620
79	UAW2	91,54	580	286,6	235,56	119,6	-28,0	-30,6	0,766	0,875	0,663	0,670
80	UAW3	94,27	580	286,6	235,56	123,8	-29,6	-31,4	0,761	0,906	0,687	0,690
81	UAW4	113,14	580	346,6	295,56	144,9	-31,8	-28,1	0,781	0,845	0,656	0,660
82	UAW5	120,00	580	346,6	295,56	153,7	-33,7	-28,1	0,781	0,897	0,695	0,700
83	UAW6	123,42	580	346,6	295,56	158,2	-34,7	-28,1	0,780	0,923	0,717	0,720
84	UAW7	97,27	580	361,6	310,56	137,8	-40,5	-41,6	0,706	0,765	0,591	0,540
85	UAW8	111,68	580	361,6	310,56	151,9	-40,2	-36,0	0,735	0,843	0,640	0,620
86	UAW9	113,48	580	361,6	310,56	158,9	-45,5	-40,1	0,714	0,882	0,668	0,630
87	UAW11	138,65	580	436,6	385,56	194,6	-56,0	-40,4	0,712	0,870	0,674	0,620
88	UAW13	41,56	605	146,0	120,51	59,1	-17,5	-42,1	0,704	0,810	0,619	0,570
89	UAW16	58,28	605	176,0	150,51	76,7	-18,4	-31,6	0,760	0,842	0,654	0,640
90	UAW17	58,28	605	176,0	150,51	81,5	-23,2	-39,8	0,715	0,895	0,694	0,640
91	UAW19	52,58	605	183,5	158,01	72,8	-20,3	-38,5	0,722	0,762	0,589	0,550
92	UAN1	60,30	580	286,6	247,56	59,6	0,7	1,2	1,012	0,415	0,421	0,420

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	P_{ULT} (kN)	f_u (MPa)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (kN/kN)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (%)	$\frac{P_{ULT}}{N_{t,Rd}}$ (%)	C_t NBR 14762 (2010)	C_t AISI (2016)	$C_{t,exp}$
93	UAN2	74,66	580	286,6	247,56	87,6	-12,9	-17,3	0,852	0,610	0,488	0,520
94	UAN3	78,97	580	286,6	247,56	101,6	-22,6	-28,6	0,777	0,708	0,530	0,550
95	UAN4	66,00	580	346,6	307,56	26,9	39,1	59,2	2,450	0,151	0,351	0,370
96	UAN5	76,70	580	346,6	307,56	77,4	-0,7	-0,9	0,991	0,434	0,421	0,430
97	UAN6	76,70	580	346,6	307,56	102,7	-26,0	-33,8	0,747	0,576	0,467	0,430
98	UAN7	76,70	580	361,6	322,56	52,4	24,3	31,7	1,464	0,280	0,385	0,410
99	UAN8	86,06	580	361,6	322,56	97,3	-11,2	-13,0	0,885	0,520	0,455	0,460
100	UAN9	86,06	580	361,6	322,56	119,7	-33,7	-39,1	0,719	0,640	0,500	0,460
101	UAN10	76,09	580	436,6	397,56	-10,8	86,9	114,2	-7,019	-0,047	0,315	0,330
102	UAN11	85,32	580	436,6	397,56	69,6	15,7	18,4	1,225	0,302	0,385	0,370
103	UAN12	89,93	580	436,6	397,56	109,9	-19,9	-22,2	0,819	0,477	0,434	0,390
104	OL1	79,24	580	286,6	235,56	93,7	-14,4	-18,2	0,846	0,686	0,534	0,580
105	OL2	91,54	580	286,6	235,56	115,2	-23,6	-25,8	0,795	0,843	0,620	0,670
106	OL3a	89,14	580	346,6	295,56	107,2	-18,1	-20,3	0,831	0,626	0,507	0,520
107	OL3b	94,28	580	346,6	295,56	107,2	-13,0	-13,7	0,879	0,626	0,507	0,550
108	OL3c	90,85	580	346,6	295,56	107,2	-16,4	-18,0	0,847	0,626	0,507	0,530
109	OL5a	105,10	580	436,6	385,56	120,0	-14,9	-14,2	0,876	0,537	0,471	0,470
110	OL5b	105,10	580	436,6	385,56	120,0	-14,9	-14,2	0,876	0,537	0,471	0,470
111	OL6	127,47	580	436,6	385,56	171,8	-44,4	-34,8	0,742	0,768	0,576	0,570

Na Figura 2.7 são apresentados graficamente os resultados para $P_{ULT}/N_{t,Rd}$, podendo-se observar que para a maioria dos modelos testados a capacidade resistente estimada, $N_{t,Rd}$, é contra a segurança.

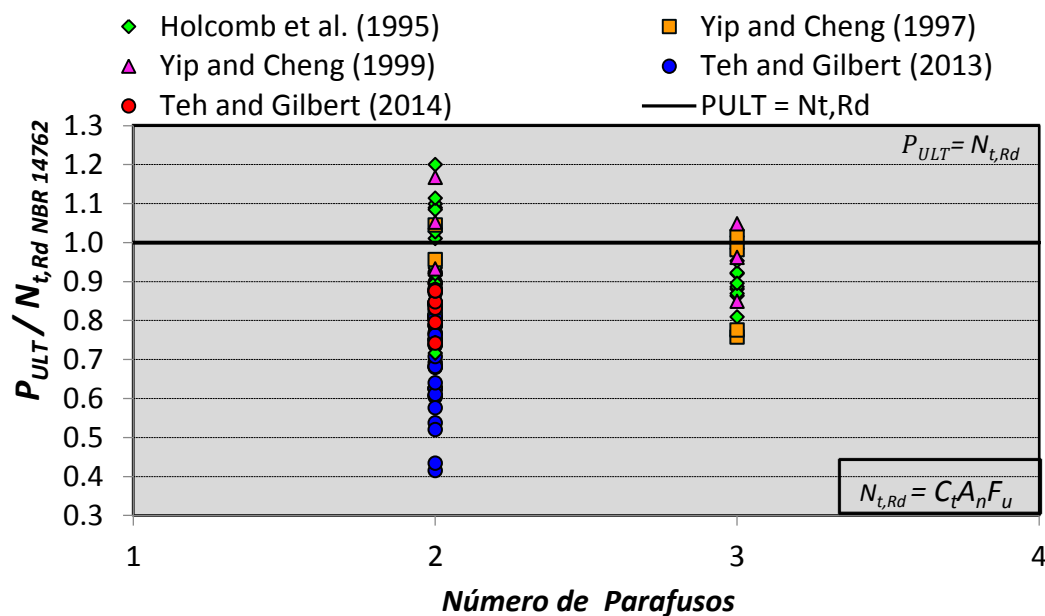


Figura 2.7 – Desempenho do coeficiente de redução da área líquida comparando-se a equação da NBR 14762 com resultados experimentais.

Na Figura 2.8, apresenta-se um gráfico no qual os valores do coeficiente $C_{t,exp}$, calculados a partir dos dados da Tabela 2.3, são comparados com a equação (2.6) da norma NBR 14762 (ABNT, 2010). O desempenho do coeficiente de redução varia de acordo com o

número de parafusos e o parâmetro (\bar{x} / L). Observando-se a Figura 2.8, nota-se que os valores do coeficiente C_t obtidos com a equação da NBR 14762 ficam contra a segurança para a maioria dos casos, demonstrando que é necessária uma reavaliação da equação do C_t para assegurar um dimensionamento seguro.

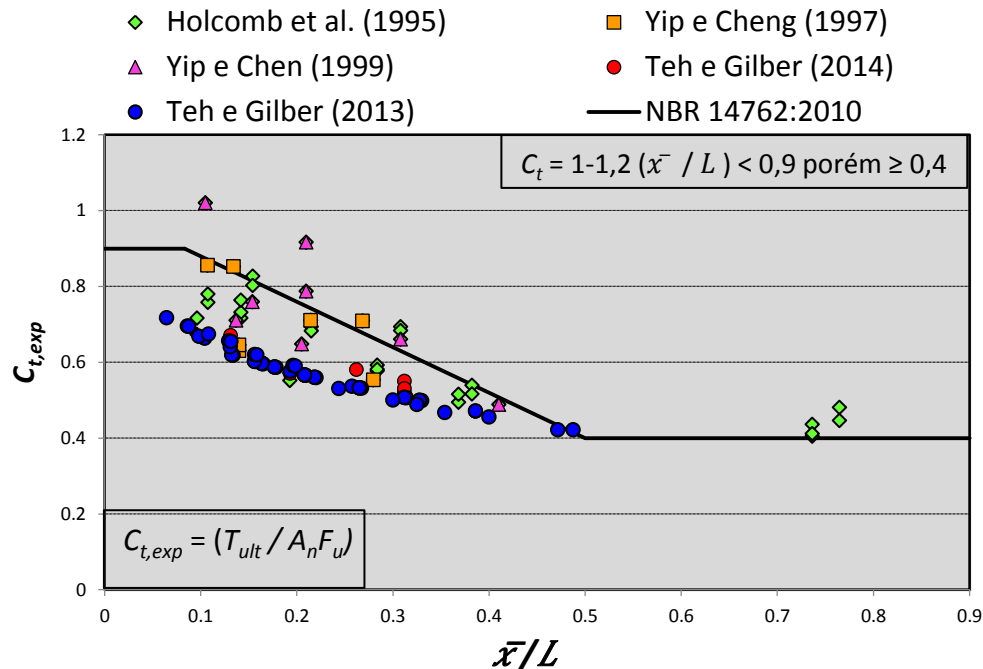


Figura 2.8 – Expressão gráfica da equação do coeficientes C_t em comparação com valores obtidos de resultados experimentais.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos pesquisadores, citados a seguir, têm-se mostrado interessados em entender melhor o fenômeno associado ao coeficiente de redução da área líquida, por meio de trabalhos experimentais e numéricos, bem como com modelos analíticos, buscando uma melhor estimativa da perda de eficiência da seção de perfis com conexões parafusadas em razão do efeito do *shear lag*.

2.2.1 Pesquisas experimentais em cantoneiras

Segundo Kulak e Wu (1997), as cantoneiras de aço formadas a frio podem ser usadas com grande frequência nas estruturas de engenharia civil, como, por exemplo, no reforço de treliças em torres de transmissão e em telhados de galpões. Quando estas são usadas como elementos tracionados, o arranjo mais utilizado é o par de cantoneiras de abas iguais dispostos simetricamente em relação às chapas de fixação, conectadas por parafusos.

Por razão prática, seria incomum conectar ambas as abas das cantoneiras devido à influência da conexão em apenas uma das abas conectadas, pois acarretaria o fenômeno *shear lag* quando submetidas à tração. Tal fato pode ser explicado devido à força axial no elemento principal e em relação às extremidades conectadas ser excêntrica. Também pode estar presente a flexão em elementos tracionados que estão simétricos na seção transversal, como por exemplo, uma forma de I, não terá flexão presente, embora os efeitos do fenômeno *shear lag* existam apenas nos casos em que as conexões são executadas nas extremidades.

Kulak e Wu (1997) desenvolveram um trabalho experimental e uma investigação analítica verificando vários parâmetros relacionados à redução da eficiência da ligação em cantoneiras laminadas de aço. Os autores e as respectivas normas americana e canadense, fizeram comparações do desempenho de algumas relações sugeridas, em especial a relação sugerida por Munse e Chesson (1963), representada pela equação 2.19.

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} \leq 0,9 \quad (2.19)$$

Foram analisados resultados de 72 ensaios de diversas fontes juntamente com 24 ensaios realizados pelos autores (Munse e Chesson, 1963), de cantoneiras simples e duplas constituídas de aço *CAN/CSA-M300W* com $f_y = 300$ MPa e $f_u = 450$ MPa, furos com diâmetro de 24 mm e parafusos *ASTM A490* com 22 mm de diâmetro. Nos ensaios com apenas uma cantoneira os autores utilizaram chapa de ligação com 16 mm de espessura e nos ensaios com cantoneira dupla foram utilizadas chapas de ligação com 19 mm de espessura .

Kulak e Wu (1997) utilizaram o programa ANSYS para obter uma estimativa avaliação da força última, efetuando uma análise não linear incluindo os efeitos da plasticidade e da não linearidade geométrica. Os autores elaboraram uma especificação para o cálculo da capacidade de força das cantoneiras submetidas à tração, na qual é avaliada a distribuição de tensão na seção crítica dos perfis. Eles verificaram que os modelos de projetos de elementos finitos, em que cantoneiras conectadas através da aba maior aproximam-se à força final do material, mostram uma resistência superior na ligação quando comparadas com cantoneiras conectadas através da menor aba.

Observou-se que a eficiência da seção líquida é afetada pelo comprimento da conexão parafusada em determinadas faixas: uma amostra de ligação com uma conexão de até 4 parafusos tem uma eficiência de teste que é considerável (até 25%); comparando ligações de 4 parafusos a outras de 6 parafusos, são maiores do que o mesmo par de cantoneiras com uma conexão de 2 parafusos, chegando a uma pequena diferença de eficiência entre os espécimes

(cerca de 3%). Kulak e Wu (1997), ao final, propõem para o cálculo da eficiência da seção líquida (fator U) a seguinte relação:

$$U = \frac{A_{cn} + \beta \frac{F_y}{F_u} A_o}{A_n} \quad (2.20)$$

onde A_{cn} é a área da aba conectada, A_o é a área da aba desconectada, A_n é a área líquida da seção do perfil, β é igual a 1,0 para perfis com 4 ou mais parafusos por linha ou igual a 0,5 para perfis com 2 ou 3 parafusos por linha, F_y é a tensão de escoamento, F_u é a tensão de ruptura.

Os estudos de Kulak e Wu (1997) são avaliados através da equação proposta (2.20), mostrando que o desempenho está a favor da segurança, levando a valores preditos iguais a 96% dos valores obtidos nos ensaios, com desvio padrão de 8%. Foram sugeridos também que os seguintes valores para a eficiência da seção líquida utilizando um diâmetro de 2 mm de furo maior do que o diâmetro nominal do parafuso, sejam utilizados pelos projetistas, de modo a facilitar a obtenção direta sem nenhuma iteração do projeto de conexões parafusadas de cantoneiras:

$$U = 0,80 \quad \text{para cantoneiras com 4 ou mais parafusos por linha e;}$$

$$U = 0,60 \quad \text{para cantoneiras com 2 ou 3 parafusos por linha.}$$

De Paula (2006) desenvolveu um estudo experimental e numérico de cantoneiras de aço formadas a frio, conectadas por parafusos e sob força de tração. O referido autor comenta que, devido à conexão parafusada, a cantoneira não se deforma uniformemente, devido ao efeito *shear lag*, que reduz a capacidade resistente da cantoneira. Para o cálculo da capacidade última da peça tracionada, a hipótese de ruptura da seção líquida foi examinada e o fenômeno de *shear lag* levado em conta através do fator C_t .

De Paula (2006) realizou uma análise experimental envolvendo a ruptura de 158 cantoneiras com diversas configurações, incluindo a presença de arruelas na ligação, furos executados com puncionamento, aplicação do torque mínimo nos parafusos e ligações com excentricidade em relação ao eixo da aba conectada. Os resultados dos ensaios foram usados para analisar as diversas variáveis que afetam a resistência da ligação. A partir de análise estatística sobre os dados experimentais, o autor propôs nova equação que estima a redução da eficiência da seção transversal de cantoneiras (equação 2.21).

$$C_t = 1,12 - 0,29 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) - \left(\frac{0,55b_{cn} + 0,13b_d - 2,51t}{b_c} \right) \quad (2.21)$$

onde:

\bar{x} é a distancia do plano da aba conectada até o centro de gravidade da cantoneira;

L é o comprimento total da ligação;

b_{cn} é a largura líquida da aba conectada da cantoneira;

b_c é a largura da aba conectada da cantoneira;

b_d é a largura total da aba desconectada;

t é a espessura da cantoneira.

A validade da equação (2.21) foi também avaliada com resultados de outras pesquisas envolvendo perfis formados a frio. A performance da equação prescrita pela norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2001) também foi verificada e comparada com os resultados obtidos neste estudo. De Paula (2006) analisou que os valores percentuais ao lado dos valores médios das diferenças indicando a média das diferenças percentuais absolutas, ou seja, no caso da aplicação da equação proposta, a diferença média entre o valor obtido pela equação e o valor experimental foi de 4,8%, com desvio padrão de 3,8%. Utilizando a equação da NBR 14762, essas diferenças chegaram a 17,9% em relação aos valores experimentais, valor este que apresentou um desvio padrão de 11,8%. A Figura 2.9 apresenta os valores absolutos das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14762 (ABNT, 2001) e a que o autor propôs.

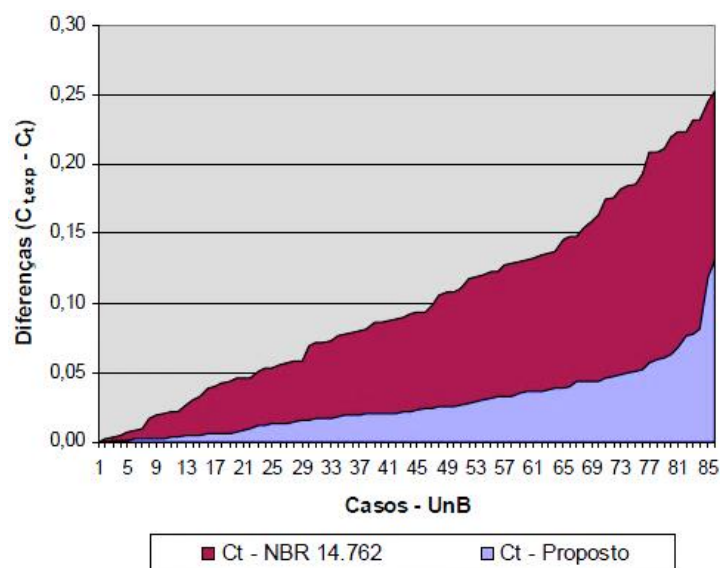


Figura 2.9 – Valores absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14762 (ABNT, 2001) e a equação proposta por De Paula (2006)

De Paula (2006) fez uma modelagem numérica utilizando o software ANSYS e concluiu que o desempenho da equação proposta é superior ao da equação da norma NBR 14762 (ABNT, 2001), tanto para seus próprios resultados dos ensaios quanto para os resultados de outros pesquisadores. A equação proposta por De Paula (2006) apresentou as menores diferenças (absolutas e percentuais) entre os valores calculados e os valores experimentais. O autor concluiu também que a presença de arruelas junto às porcas e às cabeças dos parafusos, assim como a execução dos furos dos perfis através do puncionamento não alterou de maneira significativa a força de ruptura da seção líquida. E para os níveis de força aplicados nos ensaios, a não aplicação de torque calibrado mínimo durante a instalação dos parafusos não provocou alteração importante nas forças de ruptura da seção líquida.

A Figura 2.10 mostra uma série de perfis com mesmas dimensões da seção transversal e os modos típicos de ruptura e deformação global. De maneira geral, a falha por esmagamento ocorreu naquelas cantoneiras com apenas uma seção de parafusos e a falha por ruptura da seção líquida ocorreu nos perfis com duas ou mais seções.

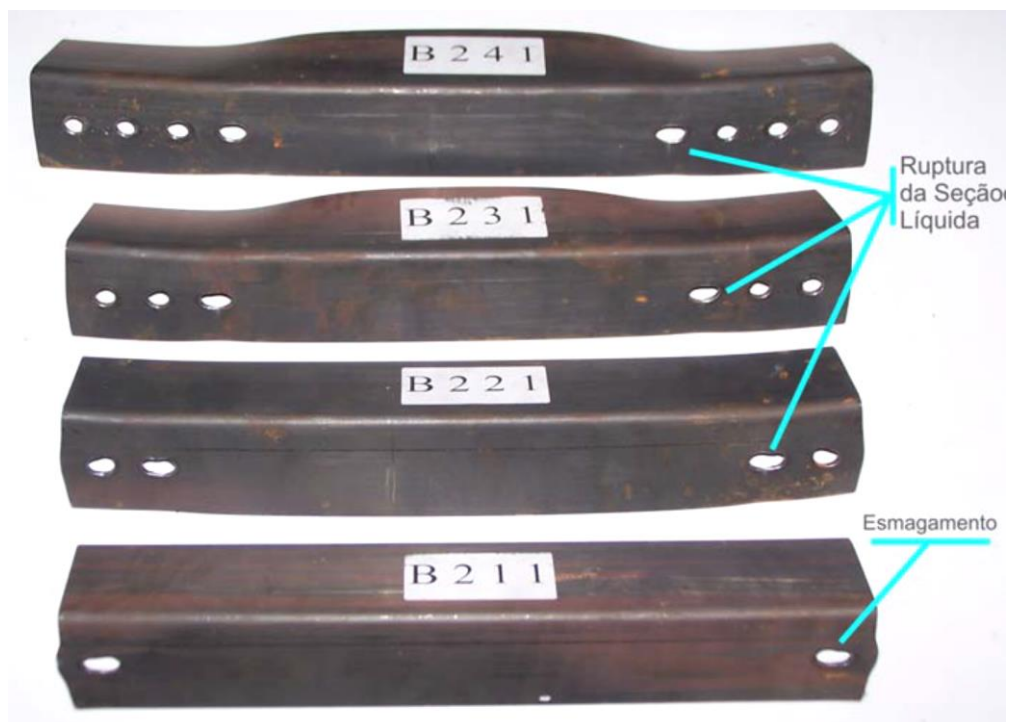


Figura 2.10 – Comportamento estrutural típico com esmagamento nos perfis com apenas um parafuso por linha, e ruptura da seção líquida nos demais, acompanhado do aumento das deformações na aba não conectada (DE PAULA, 2006)

Pan (2006) analisou o efeito *shear lag* em cantoneiras de abas iguais e de abas desiguais com espessuras de 2,3 mm e 3,2 mm conectados por parafusos ASTM A325 de 12,7

mm de diâmetro. O autor seguiu as prescrições da norma AISI (2001) padronizando os furos dos modelos em 14,3 mm de diâmetro para a ligação dos parafusos e o material utilizado foi o aço SSC400, de fabricação chinesa, com tensão nominal de ruptura de 400 MPa. Os modelos tiveram um total de 24 pares ligados um de costas para o outro, 12 pares com duas linhas de parafusos e 12 pares com quatro linhas de parafusos.

Pan (2006) utilizou uma ferramenta computacional de redes neurais artificiais (RNA) para ajudar a capturar a não linearidade dos dados dos ensaios. As experiências foram conduzidas utilizando a caixa de ferramentas (*Adaptive Neural Networks*) ANN do Matlab versão 6.1. A estrutura da rede neural é mostrada na Figura 2.11, caracterizada por uma camada de entrada, duas camadas ocultas e uma camada de saída. A função *TANSIG* foi utilizada como a função de transferência em duas camadas para conduzir a transformação não linear entre camadas. Para a saída, a função *PURELIN* (mapeamento linear entre camadas) foi adaptada. O algoritmo de treinamento utilizado foi o de *Levenberg-Marquardt*, com a técnica empregada por alguns algoritmos de aprendizado de *Backpropagation* (BP).

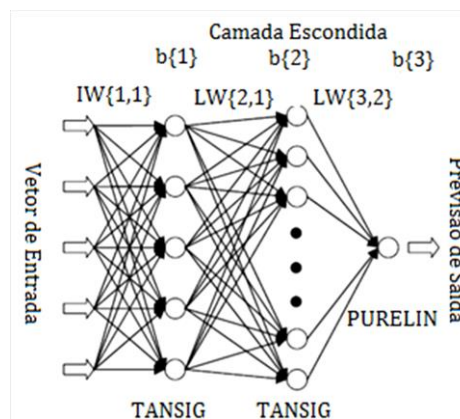


Figura 2.11 – Esquema da arquitetura da rede neural utilizada por Pan (2006).

Com o uso da ferramenta computacional de redes neurais artificiais mostrada na figura 2.11 possui arquitetura típica de uma rede do tipo (*Perceptron*) multicamada, o autor mostrou que ela pode ser utilizada para prever a força de tração no elemento de aço conectado formado a frio e que o resultado mostrado através da (*Bacppropagation*) BP construída, funcionou bem no mapeamento de dados.

O autor citado mostrou que uma RNA é capaz de mapear o fenômeno, a partir dos dados disponíveis, e pode ser utilizada para prever a força de tração num elemento de aço formado a frio conectado por parafusos.

Com base nos resultados experimentais, Pan (2006) concluiu que há uma discrepância bastante grande entre os resultados dos testes e os valores para os espécimes com maior

tamanho de elemento não conectado. O autor realizou uma comparação entre os resultados dos testes e as estimativas feitas com os modelos presentes nas normas AISI (1996) e AS/NZS 4600: (1996), mostrando que as resistências são superestimadas. Também existe uma discrepância entre os resultados experimentais e os valores previstos pela norma BSI (1998) e que os cálculos realizados através da AISI (2001) fornecem melhores resultados para cantoneiras de aço formadas a frio. Também foi apontado que a razão entre a excentricidade da conexão e o comprimento da conexão \bar{x}/L , e a relação entre os comprimentos de elementos não conectados e conectados W_u/W_c , são os principais fatores que podem influenciar a resistência à tração das cantoneiras de aço formadas a frio.

Padmapriya e Kandasamy (2010) realizaram 72 ensaios de cantoneiras de abas iguais e desiguais e 48 ensaios de cantoneiras duplas com diferentes espessuras, todas conectadas com parafusos pretos comuns. Os espécimes foram testados com duas configurações de seção diferentes, ou seja, cantoneiras simples e cantoneiras duplas. As cantoneiras simples foram conectadas na aba maior em chapas de ligação de aço maciço com 6 mm de espessura. Nos espécimes com chapas de 2 mm e 4 mm de espessura foram utilizados na conexão, parafusos pretos comuns de 12 mm de diâmetro. No caso dos espécimes com 3 mm de espessura foram utilizados parafusos pretos comuns de 10 mm de diâmetro. Já as duplas cantoneiras com espessuras de 3 mm e 4 mm conectadas pela aba maior, utilizaram chapas de ligações fabricadas com espessuras de 8 mm e 12 mm, e a conexão foi executada com parafusos pretos comuns de 10 mm e 12 mm de espessura. Todos os espécimes foram fabricados com comprimento de 500 mm de comprimento. A Figura 2.12 apresenta a configuração do modelo experimental das cantoneiras.

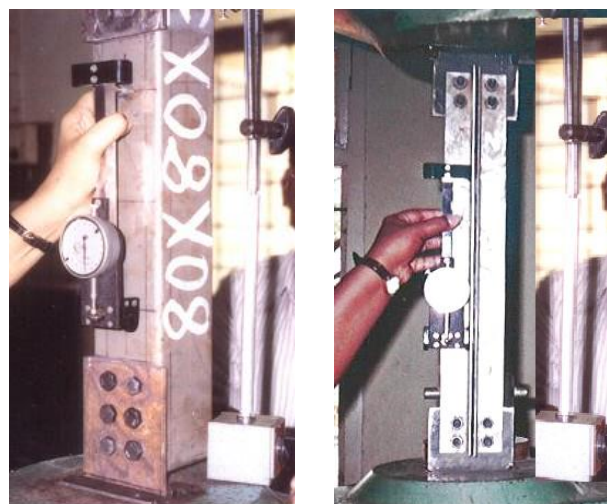


Figura 2.12 – Fotografia da configuração do modelo experimental com cantoneiras simples e cantoneiras duplas (PADMAPRIYA e KANDASAMY, 2010)

Padmapriya e Kandasamy (2010) também realizaram uma investigação numérica utilizando o software ANSYS versão 10, com o objetivo de desenvolver um modelo que pudesse estudar o comportamento da distribuição da tensão nas cantoneiras simples de abas iguais e cantoneiras duplas. Os autores desenvolveram a equação (2.21), levando em consideração outras variáveis, além daquelas previstas nas normas AISI (2007) e AS/NZS: 4600 (2005).

$$U = 1,024 - 0,301 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) - \frac{(0,12a_{cn} + 0,22a_d - 0,761d - 1,5t)}{a_c} \quad (2.21)$$

onde \bar{x} é a excentricidade da ligação, L é o comprimento de ligação, a_c é a largura da aba conectada da cantoneira, a_{cn} é a largura líquida da aba conectada da cantoneira, a_d é a largura da aba não conectada, d é o diâmetro nominal do parafuso e, t é a espessura da cantoneira.

Padmapriya e Kandasamy (2010) concluíram que a capacidade máxima de força aumenta à medida que a área da seção transversal aumenta, mostrando também que a previsão de um número maior de parafusos melhora a rigidez da ligação, o que também contribui para aumentar a capacidade de força. As cantoneiras de aço formadas a frio com abas mais largas submetidas à tração com menor excentricidade manifestaram flambagem local.

Padmapriya e Kandasamy (2010) também concluíram que os contornos de tensão obtidos na análise de elementos finitos indicam que as tensões máximas ocorrem nos orifícios internos dos parafusos a partir dos quais as falhas experimentais foram iniciadas. Com base nos experimentos, a equação proposta para a eficiência da seção líquida é aplicável somente quando a aba maior da cantoneira está conectada.

Prabha et al. (2011) realizaram estudos sobre o fenômeno do *shear lag* através de regressão linear com 108 resultados experimentais relatados na literatura cuja falha se deu por ruptura da seção líquida. Desses resultados relatados, 27 experimentos são da *University of Missouri Rolla* (Holcomb et al., 1995), 15 experimentos da *University of Alberta* (Yip e Cheng, 2000) e 66 experimentos da *Universidade de Brasília* (De Paula, Bezerra e Matias, 2008). Os autores realizaram experimentos com 18 cantoneiras de abas iguais de aço formado a frio com 900 mm de comprimento e tensão de ruptura do material da ordem de 424 MPa, com espessura de 1,5 mm ligadas por parafusos pretos com diâmetro de 12 mm. Na Figura 2.13 apresenta-se o fenômeno *shear lag* em cantoneiras submetidas à tração.

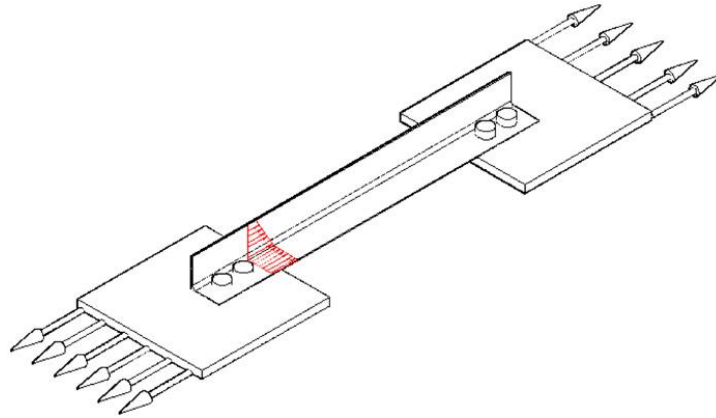


Figura 2.13 – Fenômeno *shear lag* em cantoneiras submetidas à tração (PRABHA et al., 2011).

As cantoneiras foram conectadas em uma chapa de ligação com furos executados de 13,5 mm, conectadas somente por uma das abas com 2 ou 3 parafusos em uma única linha. A distância entre os parafusos variou entre $2,5d_p$, $3,0d_p$ e $3,5d_p$, sendo d_p o diâmetro do parafuso. A Figura 2.14 apresenta a forma como ficaram dispostos os furos nos modelos.



Figura 2.14 – Disposição dos furos nos modelos de Prabha et al. (2011).

Os parâmetros considerados nos ensaios foram: o número de parafusos, a distância entre os furos e a relação entre o comprimento da aba conectada e o comprimento da aba não conectada. Para comparação, a capacidade resistente dos espécimes foi estimada de acordo com as normas AS/NZS 4600 (2005), AISI (2001), AISC (2005), BS: 5950-part 5 (1998), IS: 800 (2007). A equação proposta pelos autores é a equação 2.22:

$$P_u = f_u A_{cn} + \beta f_y A_{g0} \quad (2.22)$$

onde P_u é a capacidade de força última por tração, f_u é a tensão de ruptura do aço do perfil, f_y é a tensão de escoamento do aço do perfil, A_{cn} é a área líquida; A_{g0} é a área bruta da seção transversal e β é o coeficiente de redução da seção líquida.

Prabha et al. (2011) fizeram uma comparação com os dados ensaiados e os cálculos realizados através das normas, tomando como referência a relação $\frac{T_{exp}}{T_{norma}}$. O que está acima da linha correspondente a $T_{exp}/T_{norma} = 1,0$ é conservador e abaixo é não conservador. A Figura 2.15 mostra a relação T_{exp}/T_{norma} para os diversos casos analisados.

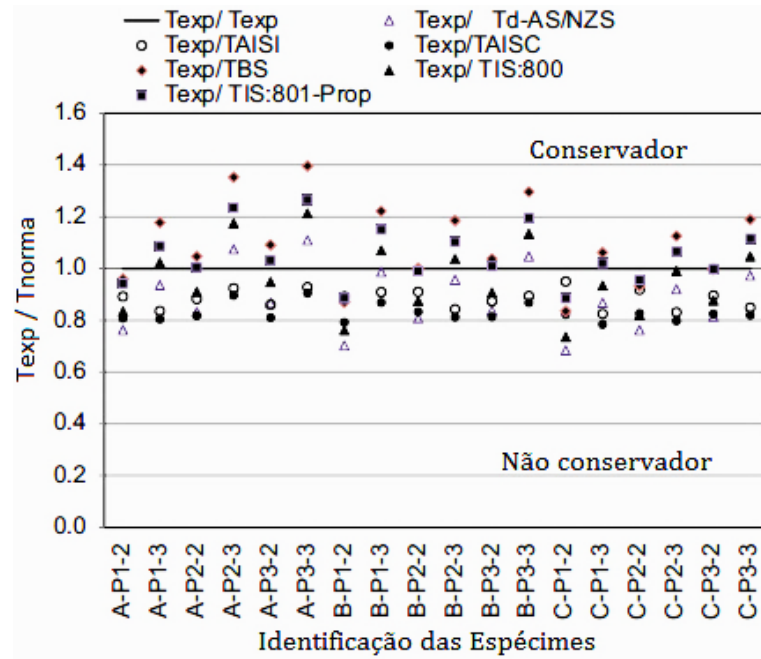


Figura 2.15 – Relação T_{exp}/T_{norma} para os diversos casos analisados por Prabha et al. (2011).

Prabha et al. (2011) concluíram que a equação proposta mostra claramente que o coeficiente de redução da seção líquida aumenta com o aumento do número de parafusos e as equações das normas IS: 800 (2007) e AS/NZS 4600 (2005) produziram boas estimativas para os espécimes com três conexões parafusadas e não conservadoras, ao passo que superestimaram a capacidade para os modelos com dois parafusos. As equações da BS: 5950 parte-5 (1998) e da IS:801 (1975) produzem uma boa estimativa da capacidade de tração de cantoneiras formadas a frio. A equação proposta para as cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à tração, que está no mesmo formato de IS: 800 (2007) (código indiano para o projeto de aço laminado a quente) apresentou uma boa estimativa da capacidade de tração, representando bem o fenômeno *shear lag*.

Teh e Gilbert (2013a) realizaram ensaios com cantoneiras de abas iguais, cantoneiras de abas desiguais conectadas pela maior aba, cantoneiras de abas desiguais conectadas pela menor aba e cantoneiras duplas com conexões alternadas nas abas. Os modelos utilizados eram constituídos de chapas de aço G450, que tem um nome comercial “GALVSPAN”, fornecido pela *Bluescope Steel Port Kembla Steelworks*, da Austrália. Foram utilizados perfis

com 1,5 mm e 3 mm de espessura e o aço utilizado está entre aqueles com a menor ductilidade. A tensão de ruptura do material com 1,5 mm de espessura foi $f_u = 630$ MPa e a tensão de ruptura do material com 3,0 mm de espessura foi $f_u = 580$ MPa. A ductilidade do material é o fator (f_u / f_y) e desta forma, a ductilidade do material com espessura de 1,5 mm foi $f_u/f_y = 1,04$ e com espessura de 3,0 mm foi $f_u/f_y = 1,09$.

Teh e Gilbert (2013a) examinaram as equações especificadas pelas normas de estruturas de aço da América do Norte e da Austrália para determinar a capacidade de tração de seção líquida de cantoneiras de aço formadas a frio parafusado em uma aba. Com base em uma modificação da equação usada em perfis U parafusado na alma, propuseram uma equação para determinar a capacidade de tração da seção líquida de uma cantoneira de aço formado a frio conectada em uma aba. A equação proposta (Eq. 2.23) foi aferida por meio de testes laboratoriais em 61 espécimes, apresentando melhor ajuste do que as equações das normas consideradas.

$$P_p = A_n F_u \left(\frac{1}{1,1 + \frac{W_u}{W_c + W_u} + \frac{\bar{x}}{L}} \right) \quad (2.23)$$

onde:

P_p é o coeficiente de redução da seção líquida;

A_n é a área líquida da cantoneira;

F_u é a tensão de ruptura do material;

W_u é a largura da aba da cantoneira desconectada;

W_c é a largura da aba da cantoneira conectada;

\bar{x} é a excentricidade da ligação;

L é o comprimento da ligação parafusada.

A equação (2.23) produz resultados razoavelmente precisos e consistentes em todas as configurações, exceto para espécimes de cantoneiras de abas desiguais parafusadas na menor aba, para os quais as capacidades são superestimadas. Teh e Gilbert (2013a) sugerem que, para todas as configurações que não sejam cantoneiras de abas desiguais únicas parafusadas na menor aba, um fator de resistência de 0,70 seja aplicado à nova equação para garantir um índice de confiabilidade não inferior a 3,5. Na especificação norte-americana para projetos de estruturas de aço formadas a frio, para cantoneiras de abas desiguais únicas parafusadas na menor aba, um fator de resistência de 0,65 é recomendado.

Padmapriya (2015) realizou 16 ensaios em cantoneiras de aço formadas a frio com 2 mm e 3 mm de espessura conectadas por apenas uma linha de parafusos pretos comuns de 10 mm de diâmetro. O autor estudou também vários tipos de falhas na conexão com comportamento de força verso deslocamento. As comparações são feitas entre os resultados dos testes e as previsões calculadas com base nas especificações utilizando a BS 5950- parte 5 (1998), AS/NZS 4600 (2005). Como base em ensaios experimentais o autor prescreve que o corte começou primeiro na seção crítica, em torno dos furos internos do parafuso, e que 14 espécimes se romperam por ruptura na seção líquida para o mesmo comprimento de conexão, onde a capacidade máxima de força aumenta à medida que a área da seção transversal aumenta. Padmapriya (2015) concluiu também que a capacidade da seção líquida do elemento submetida à tração é afetada pela excentricidade de ligação, pela área de seção transversal e pela espessura do elemento conectado. Além disso, quando as forças experimentais são comparadas com as forças finais previstas por várias normas, observa-se que os valores preditos por AS/NZS 4600 (2005) e BS 5950- parte 5 (1998) são mais próximos e maiores do que forças experimentais para cantoneiras de abas iguais. De forma semelhante, para as cantoneiras de abas desiguais, os valores experimentais são superiores às normas AS/NZS 4600 (2005) e BS 5950- parte 5 (1998).

2.2.2 Pesquisas experimentais em perfis U

Pan e Chiang (2002) realizaram um estudo do efeito de *shear lag* em perfis U com espessuras de 2,3 mm e 3,2 mm conectados por parafusos ASTM A325 de 12,7 mm de diâmetro. Eles seguiram as prescrições da norma AISI (1996), padronizando os furos dos modelos em 14,3 mm de diâmetro para a ligação dos parafusos. O material utilizado pelos autores foi o SSC400 (aço de fabricação chinesa), com tensão nominal de ruptura de 400 MPa. Os modelos foram ligados um de costa para o outro, formando um total de 24 pares, sendo que para uma metade os perfis foram ligados pela alma usando dois parafusos em duas linhas na direção da aplicação de força, e, para a outra, conectados com quatro parafusos em uma linha na direção da aplicação de força. O espaçamento adotado entre centros de furos foi de 3 vezes o diâmetro do parafuso.

O modo de falha por ruptura da seção líquida foi observado para os modelos conectados com dois parafusos por seção. Uma fotografia da falha típica é mostrada na Figura 2.16.



Figura 2.16 – Modo de ruptura típico do modelo (PAN e CHIANG, 2002).

Pan e Chiang (2002) compararam apenas os resultados de testes e os cálculos esperados em relação à ruptura da seção líquida, levando em consideração várias especificações normativas. Esses autores realizaram uma análise numérica não linear com o software ANSYS, com o objetivo de estudar a distribuição de tensões nas diversas localizações da seção transversal dos modelos, discretizando os modelos com um elemento isotrópico 3-D 10-Node *Isotropic Structural Solid*, (SOLID 45).

Os autores citados observaram que as leituras de deformações nos ensaios e nos modelos numéricos evidenciaram distribuição de tensão não uniforme em toda a seção dos espécimes. As tensões são maiores na alma conectada do perfil do que nas abas conectadas do perfil, assim, por meio do modo de ruptura, os autores ressaltaram o efeito da excentricidade e o fenômeno *shear lag*.

Através dos ensaios e da modelagem numérica os autores constataram que a AISC (1999) proporciona boa concordância com os resultados testados e a AISI (1996) e a AS/NZS-4600 (1996) parecem superestimar as resistências em comparação com os resultados dos testes. Advertiram também que há uma grande discrepância entre os resultados dos testes e os valores previstos pela British Standard (1998).

Pan e Chiang (2002) também ressaltam que quando se conectam os perfis em chapas com espessuras maiores, a rigidez fora do plano da chapa de reforço aumenta as restrições da conexão, no final da seção transversal em perfis U.

Pan (2004) fez ensaios realizando um estudo do efeito do *shear lag* em perfis U formados a frio com diferentes dimensões utilizando ligações parafusadas, considerando as prescrições das normas técnicas AISC (1999), AISI (2001), AS/NZS-4600 (1996) e BSI

(1998) e também de acordo com a recomendação de Holcomb, Yu e LaBoube (1995). O autor realizou uma modelagem numérica com o software ANSYS para estudar a distribuição de tensões na seção transversal do perfil tracionado. O material utilizado foi o SSC400, aço chinês com tensão nominal de ruptura de 400 MPa. Com base nos resultados experimentais de 54 modelos com diferentes configurações, utilizando chapa de 2,4 mm de espessura conectadas por parafusos ASTM A325 de 12,7 mm de diâmetro, o autor mostrou ainda que, a AISC (1999) evidencia uma boa correlação com os resultados do teste para a maioria dos espécimes e que a AISI (2001) parece superestimar os valores da resistência de perfis U com 2 ou 3 parafusos por linha. Uma fotografia de falha típica é mostrada na Figura 2.17 e os resultados de ensaios de perfis U comparados com valores de resistência dados pela norma AISI (2001) e (PAN, 2004) estão apresentados na Figura 2.18.



Figura 2.17 – Modo de ruptura obtido pelo modelo (PAN, 2004).

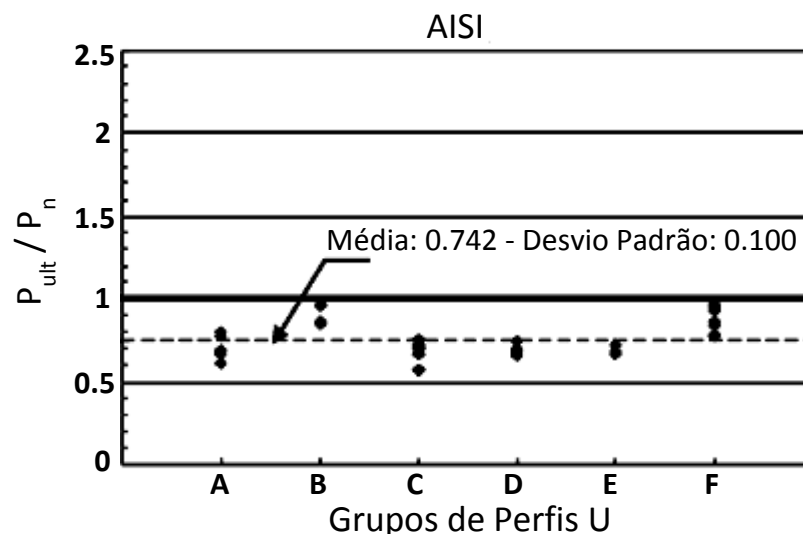
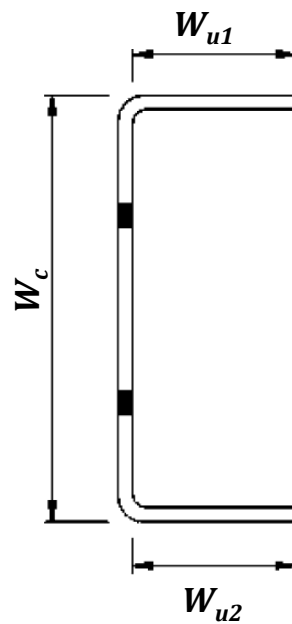


Figura 2.18 – Resultados de ensaios de perfis U comparados com valores de resistência dados pela norma AISI (2001) (PAN, 2004)

As normas BSI (1998) e AS/NZS:4600 (1996) e os resultados obtidos com a recomendação de Holcomb, Yu e LaBoube (1995), fornecem valores que, segundo o autor, apontam uma pequena discrepância, provavelmente pela não consideração do comprimento da ligação. Pan (2004) sugeriu também, que a consideração do efeito da largura da alma, não é adequada para a obtenção da resistência à tração, sugerindo que, ao invés desse parâmetro, a largura da aba (flange) seja considerada através da relação entre a largura dos elementos desconectados e conectados da seção do perfil. Através de seus ensaios e de outras pesquisas, o autor sugeriu a seguinte equação empírica para calcular a eficiência da seção:

$$U = 1,15 - 0,86 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) - 0,14 \left(\frac{W_u}{W_c} \right) \quad (2.24)$$

onde W_u é o comprimento dos elementos desconectados e W_c é o comprimento dos elementos conectados, conforme Figura 2.19.



$$W_u = W_{u1} + W_{u2}$$

Figura 2.19 – Definição dos valores de W_c e W_u (PAN, 2004).

De acordo com Pan (2004), os fatores representados na equação sugerida são os principais efeitos que definem a resistência à tração em perfis U. Ele advertiu que outros estudos em perfis U enrijecidos devem ser realizados para verificar os fatores influentes na eficiência do coeficiente da seção líquida.

Teh e Gilbert (2013b) realizaram ensaios em 55 perfis U duplos, de costas, com seções com alma de 80, 100 e 120 mm, com larguras de flange variando de 20 a 50 mm, com chapas de aço G450 com 1,5 mm e 3 mm de espessura. A tensão de ruptura do material com 1,5 mm de espessura foi $f_u = 630$ MPa e do material com 3,0 mm de espessura foi $f_u = 580$ MPa. A ductilidade do material com espessura de 1,5 mm foi $f_u/f_y = 1,04$ e do material com espessura de 3,0 mm foi $f_u/f_y = 1,09$.

Teh e Gilbert (2013b) examinaram a precisão das equações para determinar a resistência à tração da seção líquida de perfis U formados a frio, parafusados na alma, conforme as normas de estruturas de aço da América do Norte e da Austrália. Os autores comentaram que selecionaram um aço com menor ductilidade para garantir que a equação proposta e os correspondentes fatores de capacidade sejam conservadores para todas as classes de aço aceitas pelas especificações do projeto. Com base nos ensaios laboratoriais em perfis U formados a frio, parafusados na alma, uma equação de projeto foi proposta para determinar a capacidade de tração da seção líquida.

A equação proposta (Eq. 2.25) foi ajustada utilizando-se os resultados de 55 ensaios e fornece aproximações melhores do que as equações das normas e as existentes na literatura.

$$P_p = A_n F_u \left(\frac{1}{1,1 + \frac{W_f}{W_c + 2W_f} + \frac{\bar{x}}{L}} \right) \quad (2.25)$$

onde:

P_p é o coeficiente de redução da seção líquida;

A_n é a área líquida da cantoneira;

F_u é a tensão de ruptura do material;

W_f é a largura do flange do perfil;

W_c é largura da alma do perfil;

\bar{x} é a excentricidade da ligação;

L é o comprimento da ligação parafusada.

A equação proposta produziu resultados razoavelmente precisos e consistentes em todas as configurações adotadas nos ensaios experimentais. Os resultados dos autores descreveram três fatores distintos: o *shear lag* no plano da ligação associado com a concentração de tensão em torno de um furo passante também está presente em uma chapa

plana, o *shear lag* fora de plano da ligação que é presente numa seção I bissimétrica parafusada apenas aos flanges e o momento de flexão oriundos da conexão à excentricidade no eixo neutro.

Teh e Gilbert (2013b) ainda asseguraram que, mesmo que a excentricidade de conexão de perfil U duplo parafusado simetricamente de costas seja zero, a flexão local pode reduzir significativamente a eficiência da seção líquida. Com isso, eles sugeriram que a mesma equação de projeto seja aplicada a perfil U simples e duplo com ligações parafusadas na alma de forma que os três fatores sejam sempre levados em consideração. As Figuras 2.20 (a) e 2.20 (b) apresentam os modos de ruptura e a Figura 2.21 mostra o elemento de ligação flexível.



(a)



(b)

Figura 2.20 – Modos de ruptura (a) Ruptura da seção líquida (b) Esmagamento (TEH e GILBERT, 2013b)



Figura 2.21 – Elemento de ligação flexível (TEH e GILBERT, 2013b)

2.2.3 Pesquisas numéricas

Diversos pesquisadores têm buscado, através de trabalhos experimentais e/ou numéricos, uma relação matemática que quantifique a perda de eficiência da seção de um perfil com conexão parafusada em razão do efeito *shear lag*.

Yip e Cheng (2000) analisaram o efeito *shear lag* em perfis U e cantoneiras de abas iguais, formadas a frio, com conexões parafusadas. Um modelo de elementos finitos com a consideração das não-linearidades física e geométrica (grandes deformações) empregando o programa ABAQUS foi utilizado para modelar e analisar os ensaios, possibilitando também a investigação dos fatores que afetam a eficiência da seção líquida dos perfis ensaiados.

Chung e Ip (2001) apresentaram uma investigação do comportamento de conexões parafusadas em aços formados a frio, especialmente enfatizando a modelagem de três modos de falha: esmagamento da chapa, corte do parafuso e ruptura da seção líquida. Os autores realizaram um estudo paramétrico envolvendo diferentes configurações das ligações parafusadas de modo a fornecer valores de resistências ao amassamento para fins de projeto, comparando os resultados às prescrições de quatro normas técnicas, cujas equações, segundo os autores, não se aplicavam a aços de alta resistência, devido a sua reduzida ductilidade.

Os autores utilizaram, tal como no trabalho anterior de Chung e Ip (2000), o programa ANSYS e os mesmos tipos de elementos para modelar o problema, chegando à solução com o método de *Newton-Raphson* (full), pois o modelo empregado considerava também as não-linearidades material, geométrica e de contato. A Figura 2.22 mostra um modelo de elementos finitos típico, relativo à metade do espécime ensaiado (simétrico em relação ao seu eixo longitudinal), que possui cerca de 2000 nós, 1200 elementos sólidos (SOLID45) e 1000 elementos de contato (CONTAC49).

Após comparação com resultados numéricos de elementos finitos, os autores propuseram uma equação que relaciona a resistência ao esmagamento com as resistências de escoamento e ruptura do material, através de um coeficiente de resistência, permitindo sua aplicação a conexões parafusadas de aços com baixa ou com alta resistência e com diferentes valores de ductilidade. Ao final, Chung e Ip (2001) concluíram que o modelo de elementos finitos consegue representar corretamente os três modos de falhas típicos em conexões parafusadas de aços formados a frio: esmagamento, rasgamento e ruptura da seção líquida.

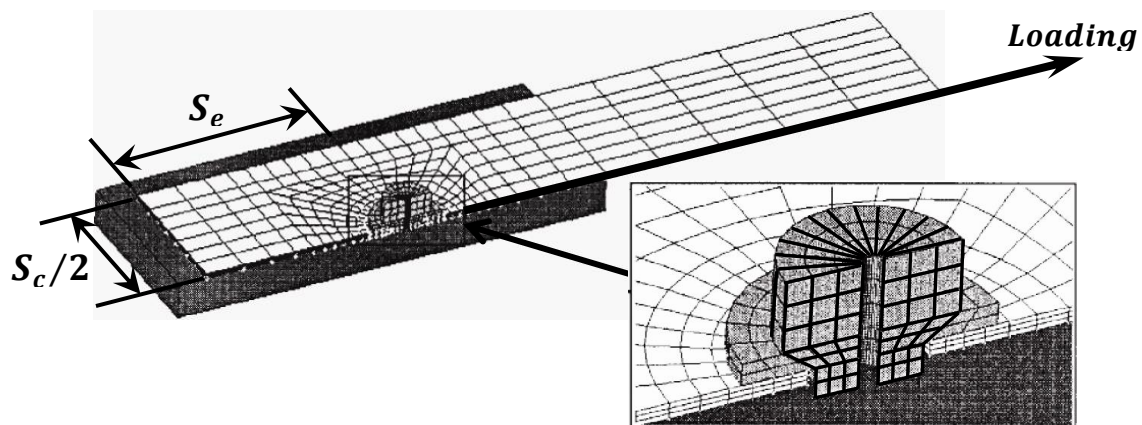


Figura 2.22 – Modelo de elementos finitos da conexão parafusada (CHUNG e IP, 2001)

Maiola (2004) realizou um programa experimental abrangendo ligações parafusadas em chapas finas, cantoneiras e perfis U, formados a frio, perfazendo um total 116 corpos de prova de chapas e 82 de perfis, de modo a estudar o fenômeno do *shear lag* e investigar as prescrições da NBR 14762 (ABNT, 2001) relativas a este tema.

Maiola (2004) também realizou uma modelagem numérica para comparação com os resultados experimentais obtidos através do programa ANSYS, considerando a não linearidade geométrica através de uma formulação lagrangeana até então atualizada e empregando o processo incremental-iterativo de *Newton-Raphson*. As malhas foram geradas automaticamente pelo programa e o elemento utilizado nas modelagens foi o de casca de 4 nós (SHELL43 – *Plastic Large Strain Shell*). Na Figura 2.23 apresenta-se uma comparação entre os diagramas força-deslocamento numérico e experimental, enquanto na Figura 2.24 são apresentadas as curvas de isotensões e a deformada relativa ao ensaio de ruptura da seção líquida de uma cantoneira.

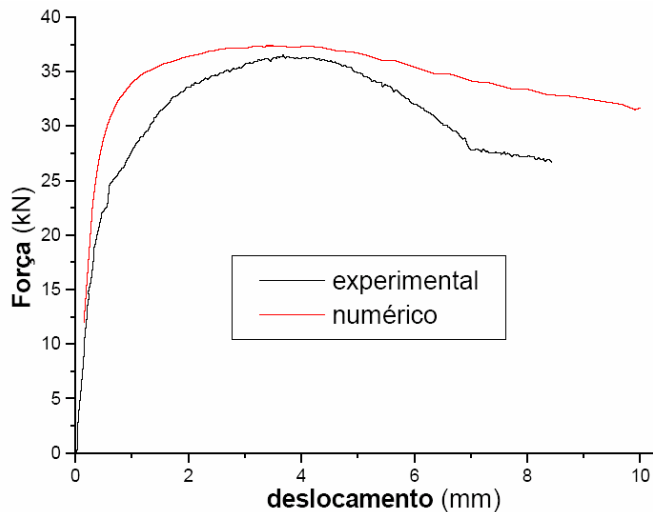


Figura 2.23 – Diagramas força-deslocamento numérico e experimental para modelo de cantoneira (MAIOLA, 2004)

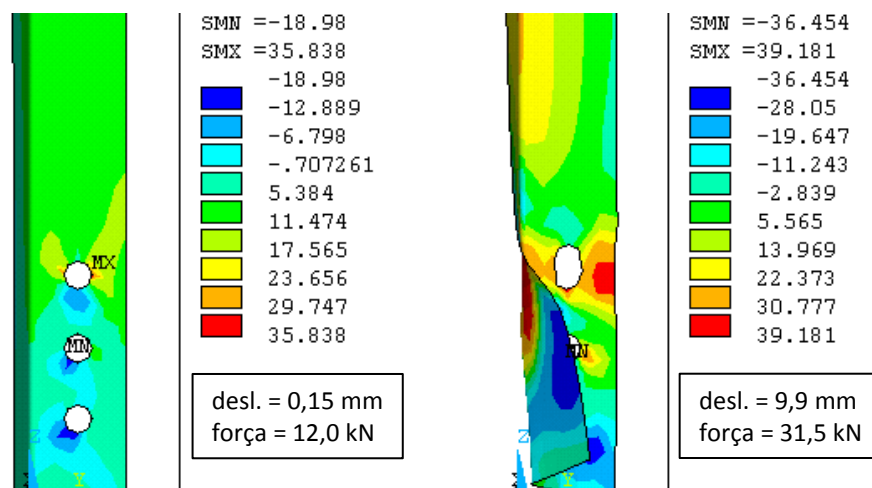


Figura 2.24 – Curvas de isotensões e deformada para modelo de cantoneira (MAIOLA, 2004).

De Paula (2006) realizou uma modelagem numérica utilizando o software ANSYS. O autor apresentou uma estratégia para a modelagem de cantoneiras, considerando a não-linearidade geométrica e de material, cujos resultados foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente, levando a uma boa concordância com os mesmos.

De Paula (2006) modelou 13 perfis integralmente, ou seja, em sua completa extensão (600 mm de comprimento). Em uma extremidade, foram restritos todos os graus de liberdade dos nós dos furos, e aqueles imediatamente próximos a eles. A restrição se deu nas rotações e no deslocamento perpendicular ao plano da aba da cantoneira.

Na outra extremidade, local de representação da parte móvel da máquina de ensaio, realizou-se as mesmas restrições nos nós dos furos e aqueles próximos a eles. No entanto, nos nós em contato direto com os parafusos, aplicou-se uma força, de modo a garantir a direção de aplicação da força como realizado no ensaio.

O acoplamento na direção longitudinal da cantoneira, dos nós em contato com os parafusos foi realizado. Esse processo foi necessário, visto que a chapa de fixação impedia os deslocamentos relativos entre os parafusos. A Figura 2.25 mostra um detalhe deste acoplamento em uma cantoneira com 3 furos em apenas uma linha de parafusos.

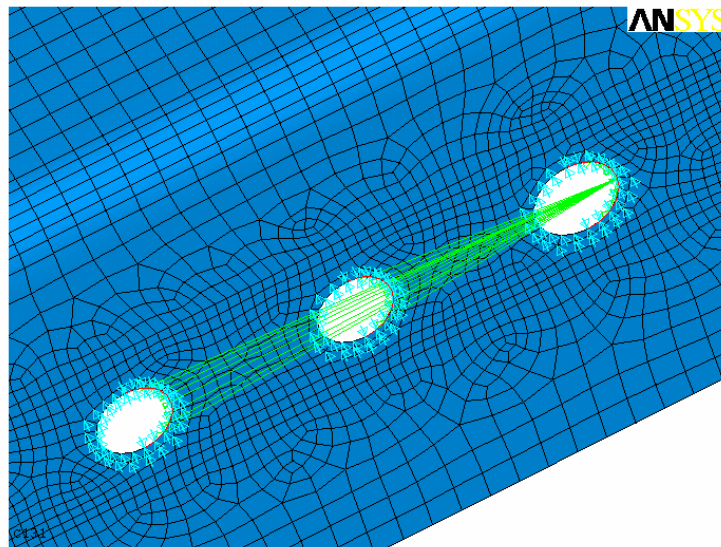


Figura 2.25 – Detalhe do acoplamento de nós na região de contato com os parafusos (DE PAULA, 2006).

A Figura 2.26 mostra a deformada da cantoneira C141, obtida na modelagem numérica, enquanto a Figura 2.27 apresenta a fotografia da deformada real do perfil, onde pode-se notar a compatibilidade das deformações obtidas no modelo e aquelas desenvolvidas no perfil ensaiado. Na Figura 2.28 são apresentados os deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira (eixo Y), cujo valor máximo foi 11,07 mm, enquanto no ensaio experimental a mesma cantoneira atingiu 26 mm na força máxima. As curvas força-deslocamento obtidas no ensaio e a partir do modelo são apresentadas na Figura 2.29.

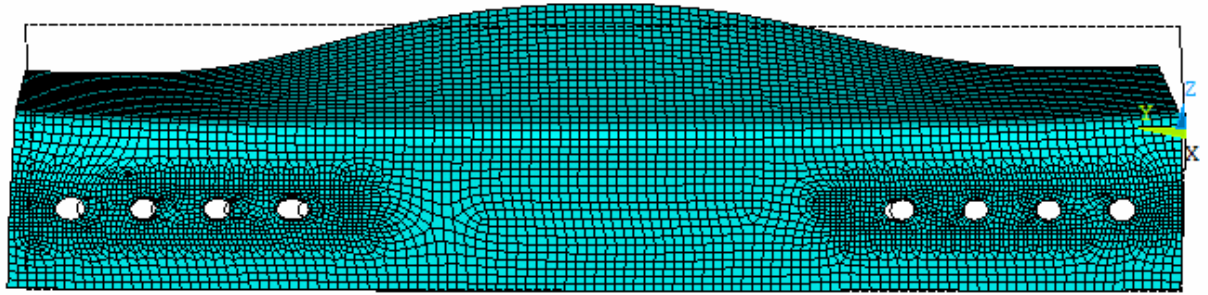


Figura 2.26 – Deformada da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)



Figura 2.27 – Deformada da cantoneira C141 ensaiada (DE PAULA, 2006)

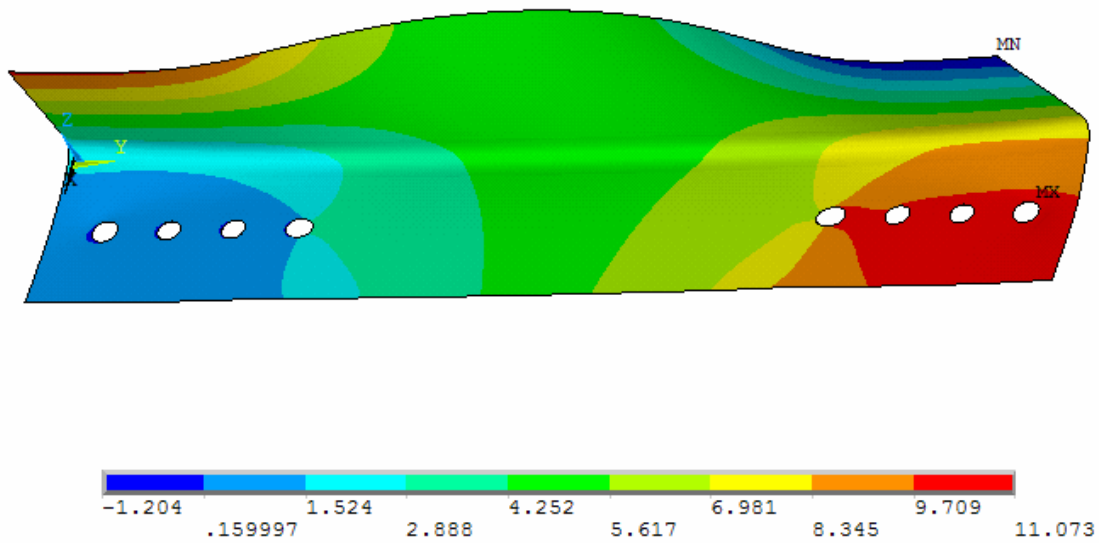


Figura 2.28 – Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)

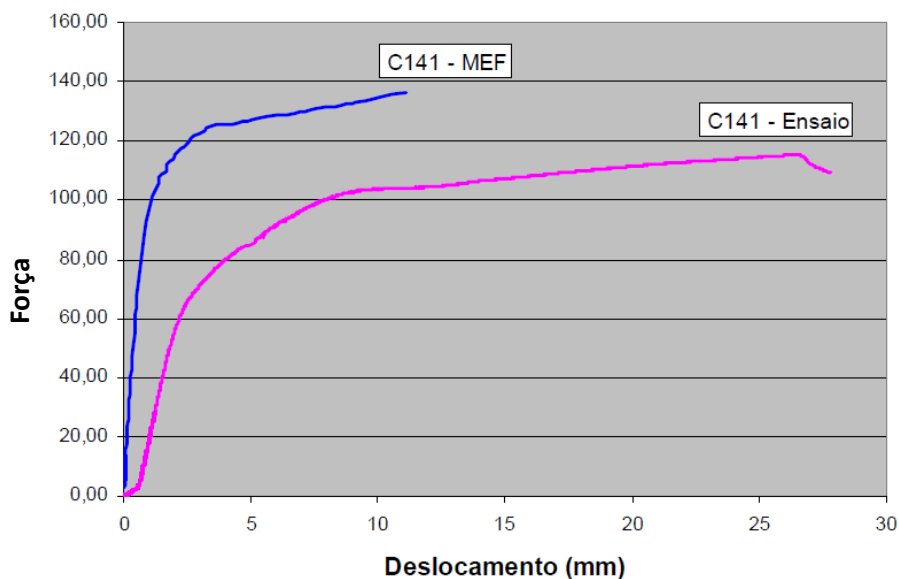


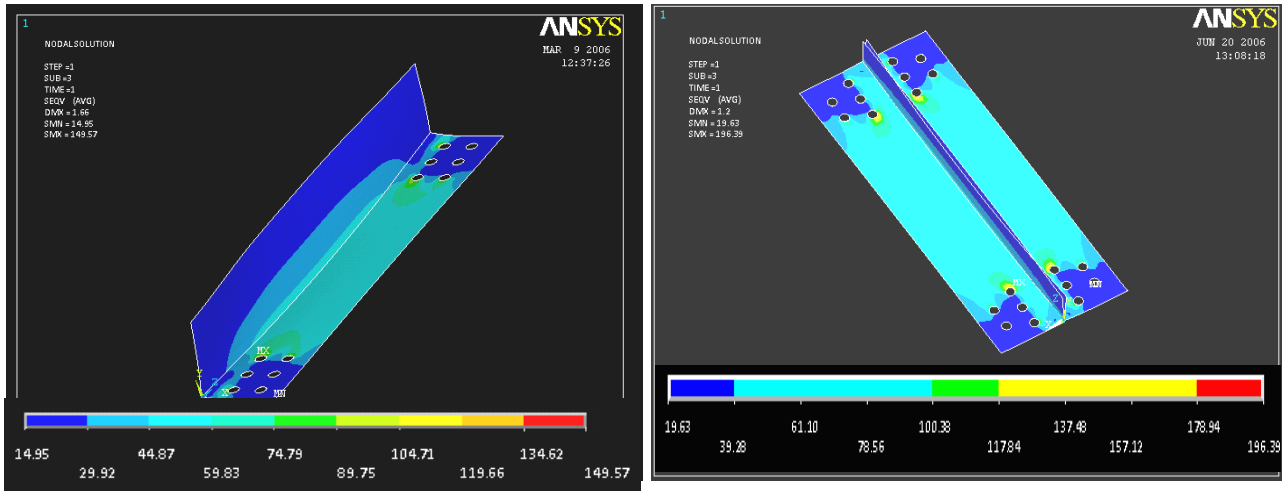
Figura 2.29 – Deslocamentos na direção longitudinal da cantoneira C141 (DE PAULA, 2006)

De Paula (2006) desenvolveu uma análise a partir da Figura 2.29 mostrando que o modelo numérico apresentou maior rigidez do que aquele obtido experimentalmente. O autor verificou que esse fato pode ser atribuído, principalmente, à acomodação inicial dos perfis aos parafusos durante os ensaios e à sensibilidade do transdutor de deslocamento a outras deformações, além da deformação estritamente longitudinal (ao longo do eixo Y). Outra causa dessa diferença pode ser a excentricidade das chapas de fixação em relação à aba conectada, pois elas transmitem uma força excêntrica aos furos, o que acaba gerando um momento nas abas da cantoneira.

Com isso, De Paula (2006) concluiu que as deformadas dos perfis ensaiados foram bem representadas pelos modelos numéricos de elementos finitos que incorporaram análises de grandes deformações e grandes deslocamentos, simulando adequadamente as deformações e tensões surgidas nas abas e nos furos das cantoneiras. A partir dos resultados encontrados, demonstrou a viabilidade do uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que indiquem a força de ruptura das ligações parafusadas em perfis formados a frio, permitindo assim o seu uso concomitante com ensaios experimentais, de maneira a reduzir custos e a duração destas atividades.

Padmapriya e Kandasamy (2010) realizaram ensaios com cantoneiras de abas iguais e cantoneiras duplas conectadas, obtendo resultados experimentais com os quais calibraram um modelo numérico capaz de representar o comportamento força/deslocamento e os modos de falhas. A força atingida pelos modelos ensaiados foi comparada com a capacidade de força teórica prevista pelas normas internacionais e com a capacidade de força prevista pela

investigação numérica. A Figura 2.30 apresenta resultados relatados pelo programa ANSYS em cantoneiras de abas iguais 80x80 com 3 mm de espessura e cantoneira dupla de 100x50 com 4 mm de espessura.



a) cantoneiras de abas iguais 80x80

b) duas cantoneiras 100x50 em T ligadas ao mesmo lado da placa de reforço

Figura 2.30 – Distribuição das tensões (PADMAPRIYA e KANDASAMY, 2010)

Padmapriya (2015) realizou uma pesquisa experimental e numérica em cantoneiras de abas iguais e cantoneiras duplas com espessuras de 2 e 3 mm. O autor desenvolveu a investigação numérica no programa ANSYS, discretizando os perfis com o elemento SHELL 63. Nos modelos de elementos finitos, a deformação de cisalhamento dos parafusos foi ignorada, já que o autor julgou que a força se transferia da placa de ligação através dos parafusos para as cantoneiras. Desta forma, Padmapriya (2015) concluiu que as tensões de contorno obtidas através da análise de elementos finitos indicam que ocorrem tensões máximas nos orifícios mais internos dos parafusos a partir dos quais as falhas experimentais foram iniciadas. A distribuição das tensões obtida na investigação numérica relata uma boa concordância com os resultados experimentais.

Jaghan e Padmapriya (2016) fizeram uma investigação experimental analisando o fenômeno *shear lag* em 12 perfis U de aço formado a frio, conectados na alma por parafusos, sendo estes perfis submetidos à tração. A tensão de escoamento nominal do material utilizado foi $f_y = 389$ MPa. O comprimento total de todos os modelos confeccionados foi de 500 mm, a espessura da chapa 2 mm, os parafusos de 10 mm de diâmetro e a chapa de ligação era de aço laminado a quente com 8 mm de espessura. A Figura 2.31 apresenta o modelo de ensaio realizado em perfis U laminados a frio segundo os autores.



Figura 2.31 – Modelo de ensaio realizado em perfis U laminados a frio (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)

Segundo Jaghan e Padmapriya (2016), foi utilizado resultados experimentais para testar e validar o modelo de análise de elementos finitos no *software* ANSYS (12.0). Eles realizaram uma análise não linear e observaram que materiais se comportam como um material isotrópico. O tipo de elemento utilizado para modelar os perfis U foi o SHELL 63. Ele é um elemento de casca com 4 nós e possuiu 6 graus de liberdade em cada nó. A malha de elementos finitos com tamanho de 2 mm por 2 mm foi implícita e usada em todas as simulações e foi ignorado o contato de fixação entre a chapa de ligação e o modelo do perfil U. A Figura 2.32 apresenta o modelo de casca em perfil U formado a frio e parafusado, a Figura 2.33 mostra a tensão de *von Mises* no perfil U 100x45x500 mm, formado a frio e parafusado e a Figura 2.34 apresenta a distribuição de deslocamento ao longo do perfil U 100x45x500 mm, formado a frio e parafusado.

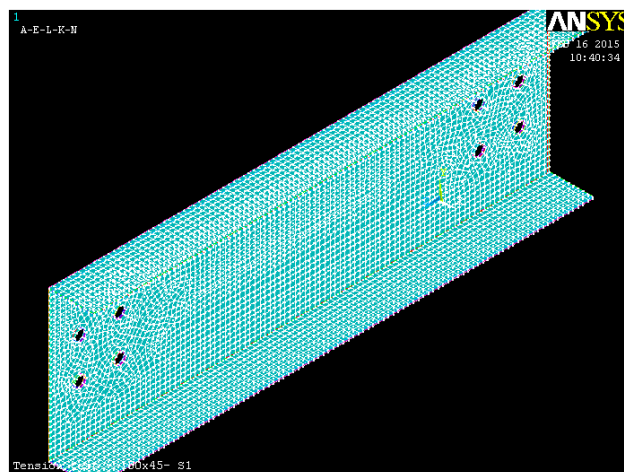


Figura 2.32 – Modelo de casca em perfil U formado a frio e parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)

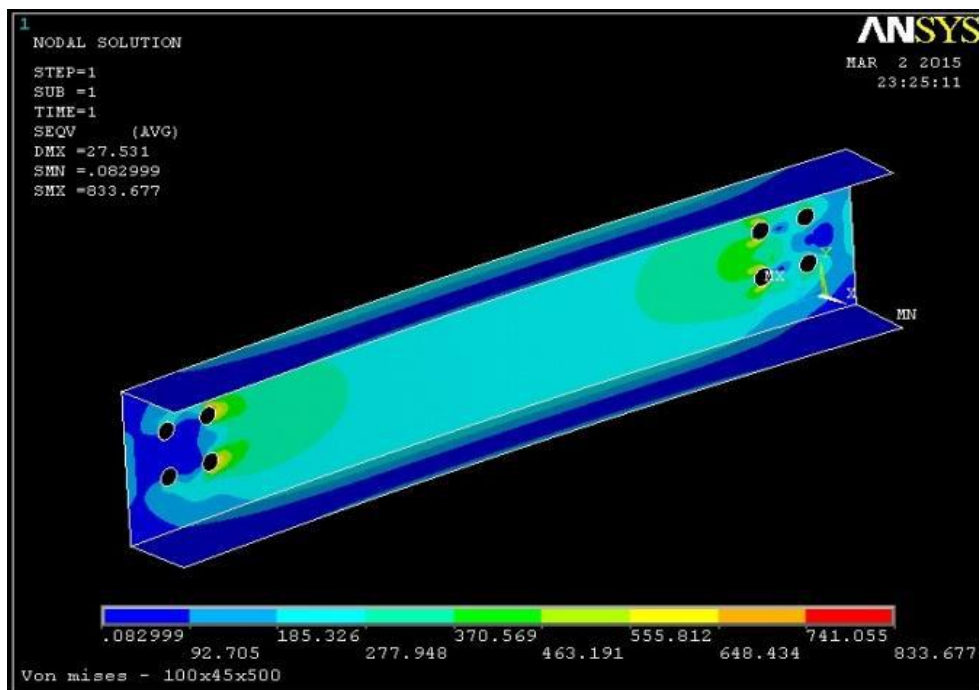


Figura 2.33 – Tensão de *von Mises* no perfil U 100x45x500 mm, formado a frio e parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)

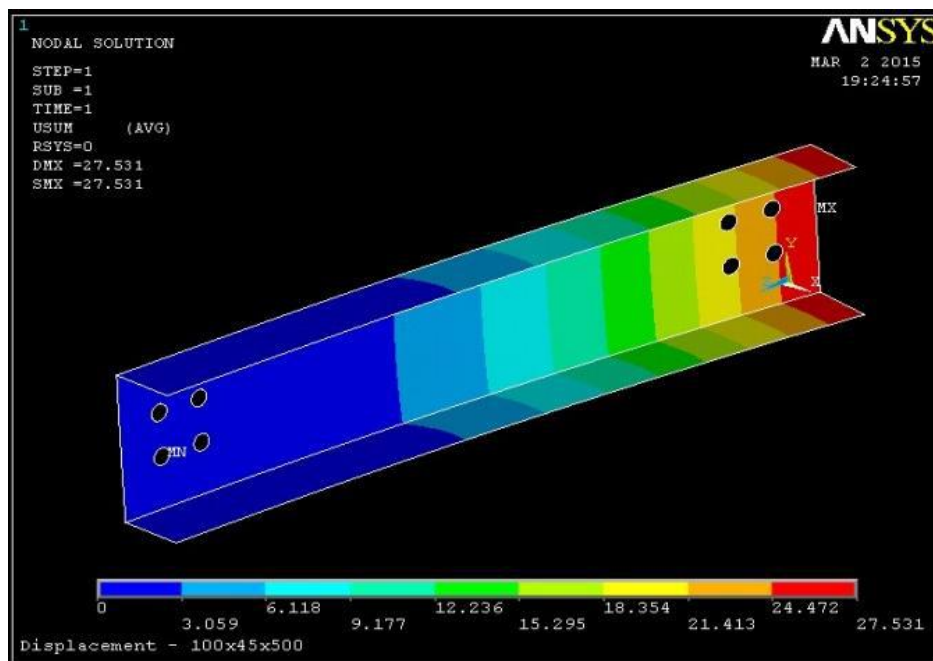


Figura 2.34 – Distribuição de deslocamento ao longo do perfil U 100x45x500 mm, formado a frio parafusado (JAGHAN e PADMAPRIYA, 2016)

Os autores fizeram uma comparação da capacidade de força teórica pelas normas AISI (2007), AS/NZS 4600 (2005), BS 5950-parte 5 (1998) e também com a capacidade de força prevista pelo *software* ANSYS (12.0). Os modos de ruptura, forças experimental e do ANSYS e deslocamentos experimentais e do ANSYS são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Modos de ruptura, forças experimental e do ANSYS e deslocamentos experimentais e do ANSYS.

Nº do Ens.	Caracter. do Perfil	Nº perf. por linha	Modo de Ruptura	Força aplicada			Deslocamento		
				EXP (kN)	ANSYS (kN)	Δ (%)	EXP (mm)	ANSYS (mm)	Δ (%)
1	100x45x2	2	Esmag.	67,50	75,05	10,59	22,35	27,53	20,77
2	100x60x2	2	R.S.L	69,83	77,81	10,83	22,70	27,25	18,22
3	125x45x2	2	Esmag.	77,68	85,69	9,81	25,70	29,35	13,26
4	125x60x2	2	R.S.L	75,45	83,91	10,62	24,65	27,41	10,60
5	150x45x2	2	R.S.L	80,70	92,55	13,67	23,00	23,77	3,29
6	150x60x2	2	R.S.L	82,60	85,61	3,58	24,70	25,29	2,36

Com base nos resultados dos experimentos, os autores concluíram que a minoria dos espécimes falhou por esmagamento, mas a maioria falhou por ruptura da seção líquida. As resistências estimadas com as normas AISI (2007), AS/NZS 4600 (2005) e BS 5950-parte 5 (1998) superaram as resistências experimentais em 14,5%, 31,2% e 26,2% respectivamente. Cabe ressaltar que as resistências obtidas numericamente superaram as experimentais em 10%.

Baran et al. (2016) fizeram um estudo numérico e experimental sobre uma ligação com cantoneiras parafusada pelas abas para torres de transmissão. Os autores analisaram 6 modelos utilizando o *software* ANSYS e concluíram que o modo de falha era a fratura na região dos furos internos obtendo boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais. A Figura 2.35 apresenta a comparação da deformada do modelo experimental com a do modelo numérico.

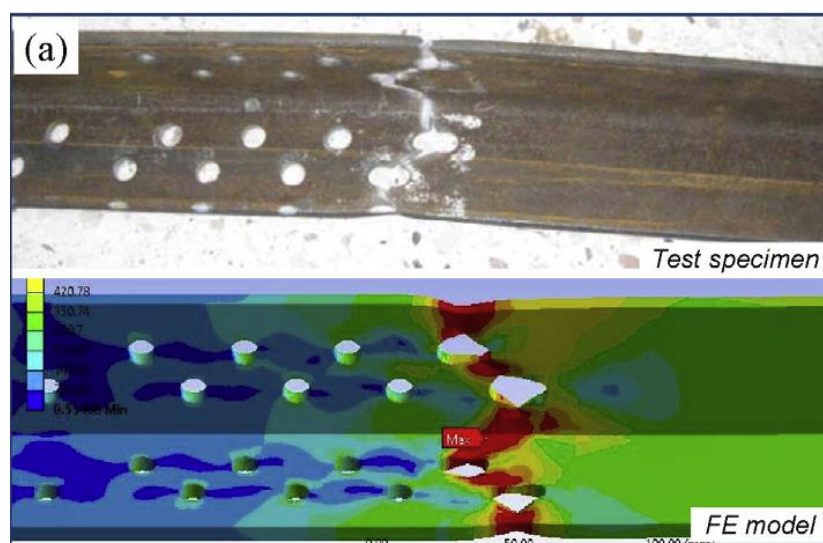


Figura 2.35 – Comparação da deformada experimental e numérica (BARAN et al. 2016).

Ke et al. (2018) realizaram uma investigação sobre o efeito do fenômeno *shear lag* em cantoneiras fabricadas em aço de alta resistência, com conexões soldadas e parafusadas, utilizando análise experimental e numérica. Foram realizados 18 testes experimentais e um estudo paramétrico utilizando o *software* ABAQUS. A modelagem numérica indicou falha por fratura da cantoneira na região dos furos. A relação de teste das análises em relação à capacidade última sob tração, variou de 0,93 a 1,10 para os espécimes com conexões parafusadas e 0,90 a 1,07 para os espécimes com conexões soldadas, respectivamente. A Figura 2.36 apresenta a comparação da deformada do modelo experimental e modelo numérico FE.

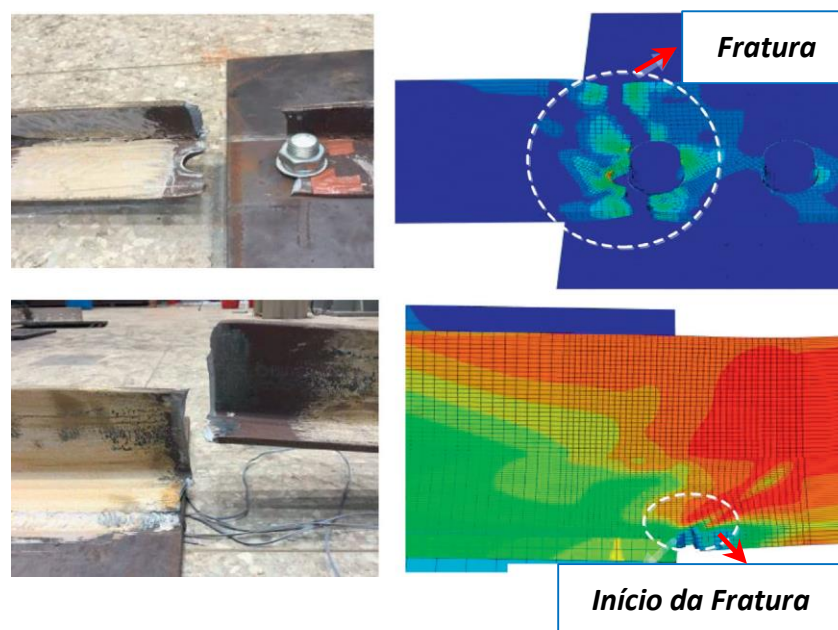


Figura 2.36 – Comparação do modelo experimental e o modelo numérico FE mostrando a ruptura (KE et al. 2018)

Mai et al. (2018) apresentaram uma aplicação da técnica de Correlação de Imagem Digital (DIC) para investigar o modo de falha referido como “cisalhamento de bloco” de ligações parafusadas de chapa de aço G450 de alta resistência. Em conjunto com a análise experimental convencional, a DIC pode fornecer informações detalhadas sobre o modo de falha da conexão. Os autores realizaram testes em 12 amostras de 3 mm de espessura, na Universidade de Sydney. Segundo os autores as características das novas equações para cisalhamento de bloco recentemente adotadas nas normas AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2018) de estruturas de aço formadas a frio foram esclarecidas. Na Figura 2.37 são apresentadas imagens tomadas em intervalos de 10 segundos e cortadas usando o *software* MATLAB para reduzir seu tamanho.

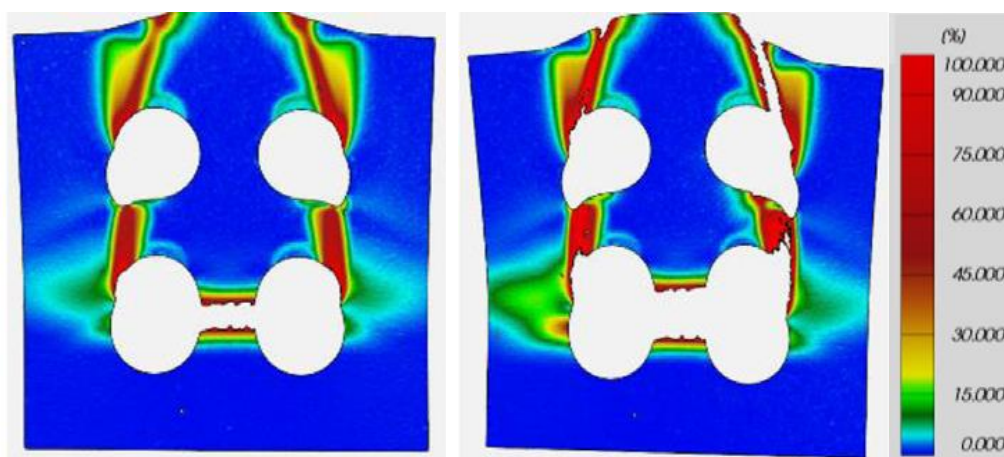


Figura 2.37 – Tensão de *von Mises* e deformada do modelo numérico (MAI et al. 2018)

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pode-se observar que a maioria dos trabalhos analisados é recente, se comparadas com as pesquisas experimentais abordando chapas grossas e perfis laminados e soldados, tendo sido realizadas principalmente a partir do final da década de 1990 para ligações parafusadas em perfis U e cantoneiras. No entanto, percebe-se que vários aspectos do comportamento dessas ligações ainda não são adequadamente representados em diversas normas técnicas, inclusive a norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010), não sendo contemplados nas relações que definem o dimensionamento estrutural das ligações parafusadas em peças de aço formadas a frio. Podem-se citar: a presença ou não de arruelas, o efeito da força de aperto do parafuso, o uso de aços carbono e aços galvanizados de alta resistência e baixa ductilidade, o efeito da excentricidade no plano do elemento conectado, a presença de uma única seção de parafusos perpendicular à direção da solicitação, a conexão de cantoneiras de abas desiguais através da menor aba e, mesmo, a eficiência de perfis com todos os elementos da seção transversal conectados.

Cabe ressaltar que os avanços recentes na área de modelagem numérica por elementos finitos tem permitido representar de forma muito realista o comportamento de ligações parafusadas, especialmente quanto ao valor da força de ruptura e quanto às regiões de concentração de tensões.

A partir da revisão teórica realizada, identificam-se oportunidades de desenvolvimento de pesquisas na área de ligações parafusadas em perfis formados a frio, que integre os

resultados de um número adequado de experimentos em escala real com a modelagem numérica consistente, visando à obtenção de relações matemáticas capazes de estimar a capacidade resistente dos elementos estruturais com melhor aproximação.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo descrevem-se os ensaios de laboratório realizados com modelos de ligações parafusadas submetidas à tração com perfis U e cantoneiras de aço formados a frio, visando à obtenção de parâmetros para qualificar e quantificar o fenômeno de ruptura da seção líquida. Este modo de falha é afetado, principalmente, pela conexão parcial dos elementos que compõe a seção do perfil, responsável pelo efeito *shear lag*.

Os perfis utilizados nos ensaios foram preparados com dimensões e configurações reais e submetidos à tração em prensa eletromecânica.

Apresenta-se a seguir a metodologia empregada, destacando-se o aparato experimental utilizado, a metodologia de caracterização dos materiais, os parâmetros investigados e a descrição dos padrões de perfis empregados.

Todos os ensaios contidos nesse trabalho foram realizados no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, Campus Goiânia – Departamento de áreas acadêmicas 3, Goiânia, Goiás.

3.2 APARATO EXPERIMENTAL

O programa experimental se constituiu de maneira a realizar ensaios de perfis parafusados submetidos à tração de modo a investigar os diversos parâmetros que afetam o desempenho da seção parafusada dos perfis formados a frio. Foram confeccionados e ensaiados 96 cantoneiras e 100 perfis U, variando-se a configuração geométrica de suas seções, as distribuições dos parafusos e das espessuras e as metodologias de execução da ligação.

3.2.1 Caracterização dos materiais

Os aços empregados na fabricação dos perfis estudados nesse trabalho são: COR 420 (f_y nominal de 300 MPa e f_u nominal de 420 MPa), ZAR 345 (f_y nominal de 345 MPa e f_u nominal de 430 MPa) e ZAR 400 (f_y nominal de 400 MPa e f_u nominal de 450 MPa), produzidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e comercializados pela empresa Isoeste Metálicas Indústria e Comércio, da cidade de Anápolis-GO.

Para determinação das propriedades mecânicas dos materiais utilizados na confecção dos perfis ensaiados, seguiram-se as recomendações da norma ASTM A370 (ASTM, 2014) que trata de materiais submetidos a teste de tração. Nesses ensaios foram obtidos os valores da resistência ao escoamento do aço (f_y), da resistência à ruptura do aço à tração (f_u) e o alongamento dos corpos de prova após os ensaios (Δ_l) para cada uma das espessuras utilizadas.

Utilizando o mesmo lote de material, nos aços COR 420, ZAR 345 e ZAR 400 foram retirados 3 (três) corpos de prova para cada espessura disponível dos materiais. As amostras que foram retiradas dos perfis dobrados estão indicados na Figura 3.1. Estas amostras foram retiradas através de uma máquina que executa o corte com jato de água, que não afeta termicamente a estrutura da liga metálica, como ocorre com os cortes a chama e a laser, e também não ocasiona o surgimento de tensões residuais. Na Figura 3.2 é apresentada uma imagem do corpo de prova típico utilizado, com suas dimensões em milímetros.

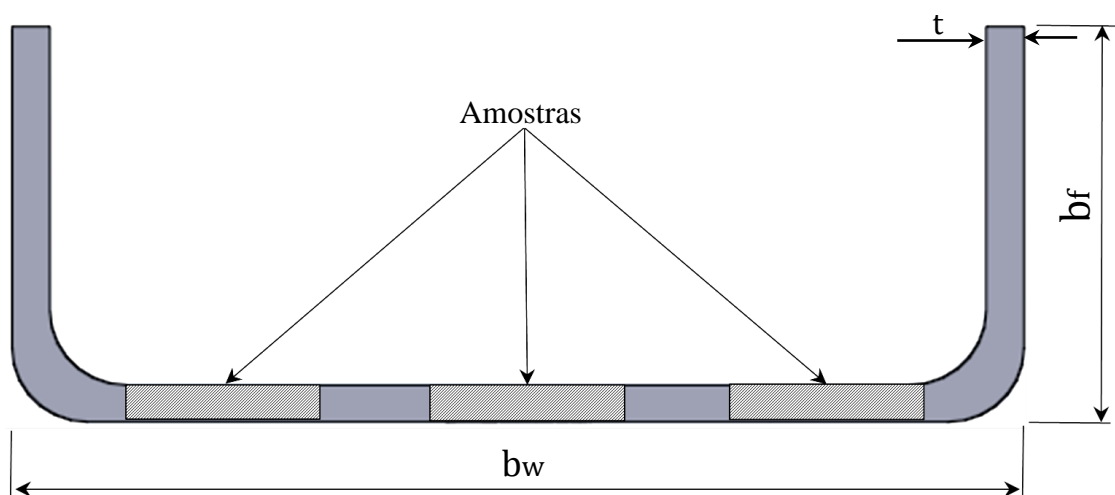


Figura 3.1 – Posição das amostras extraídas dos perfis para os ensaios de caracterização dos materiais.

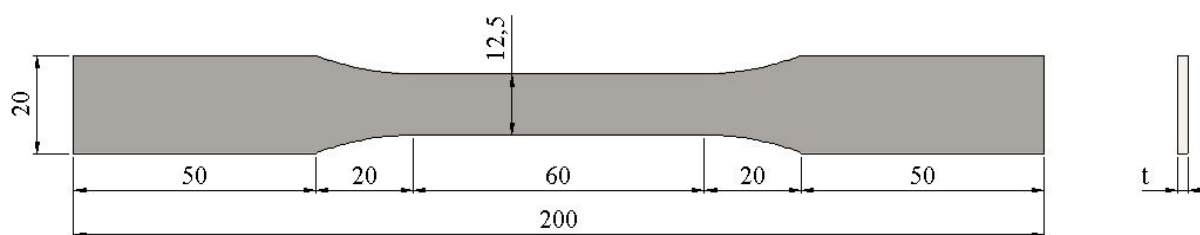


Figura 3.2 – Dimensões em milímetros (mm), das amostras para caracterização dos materiais dos perfis.

Para os ensaios de 3 (três) amostras com diferentes espessuras e diferentes tipos de materiais, foi instalado na máquina de ensaio eletromecânica, um extensômetro eletrônico com base de medida de 50 mm adaptado para obtenção automática de deformação relativa. A Figura 3.3 representa o detalhe da instalação do extensômetro na amostra para a caracterização das propriedades mecânicas do aço.

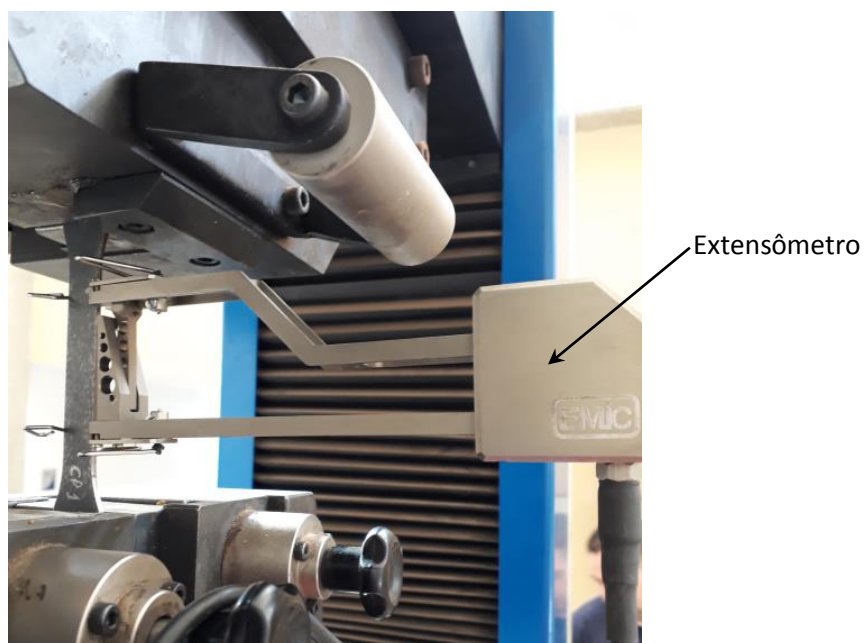


Figura 3.3 – Detalhe da instalação do extensômetro na amostra para a caracterização das propriedades mecânicas do aço.

Os resultados médios da caracterização dos diferentes tipos de aços e com espessuras diferentes estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do aço.

Espessura Nominal	Tipo de aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_u/f_y	Alongamento (%)
# 2,65 mm	COR 420	376,14	519,54	1,38	17,71
# 3,70 mm	COR 420	379,40	506,04	1,33	19,90
# 1,55 mm	ZAR 345	345,32	458,84	1,33	23,29
# 1,95 mm	ZAR 345	396,80	500,43	1,26	17,07
# 2,30 mm	ZAR 400	595,40	643,71	1,08	19,91

3.2.2 Identificação dos perfis

Para permitir a identificação única dos modelos ensaiados, foi estabelecida uma nomenclatura que contemplou as seguintes informações, na ordem apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Sequência da nomenclatura dos perfis metálicos

Tipo de perfil	Tipo de material	Série	Espessura da chapa do perfil	Quantidade de seções de parafusos	Quantidade de parafusos por seção	Característica especial (quando existente)
----------------	------------------	-------	------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--

Para cada perfil, foram atribuídas informações que corresponderam a uma posição, de modo a compor a identificação única do modelo. A nomenclatura utilizada na representação de cada modelo está apresentada na Figura 3.4, e, na sequência, as especificações do significado de cada símbolo.

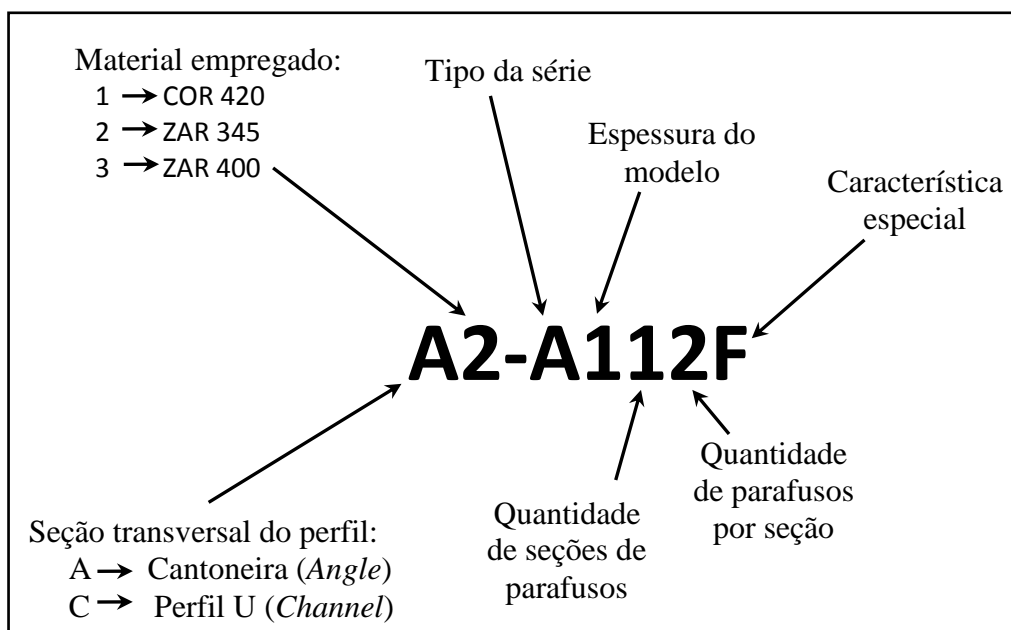


Figura 3.4 – Nomenclatura utilizada na representação para cada modelo

- a) Seção transversal dos perfis e material empregado, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Seção transversal e material dos modelos

Tipo do perfil	Tipo de material
A = Cantoneira (<i>Angle</i>)	ZAR 345 e ZAR 400
C = Perfil U (<i>Channel</i>)	COR 420, ZAR 345 e ZAR 400

- b) As dimensões das abas das cantoneiras para cada uma das 6 séries definidas estão relacionadas na Tabela 3.4. As dimensões dos perfis U, para cada uma das 4 séries definidas estão relacionadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Identificação das séries das cantoneiras e respectivas dimensões.

Série	Dimensões das abas (mm)
A	50x50
B	75x75
C	100x100
D	50x75
E	50x100
F	75x100

Tabela 3.5 – Identificação das séries dos perfis U e respectivas dimensões.

Série	Dimensões da alma e do flange (mm)
G	100x40
H	100x50
I	120x45
J	150x50

- c) Espessura da chapa do perfil: foram empregadas 5 diferentes espessuras de chapas identificadas de acordo com a Tabela 3.6

Tabela 3.6 – Identificação das séries dos perfis

Número da espessura	Espessura nominal (mm)
1	1,55
2	1,95
3	2,65
4	3,70
5	2,30

- d) A quantidade de seções transversais com parafusos variou de 1 a 4 em cada extremidade do perfil.
- e) Quantidade de parafusos por seção: foram ensaiados perfis com 1 e 2 furos por seção transversal
- f) Características especiais para cantoneiras: os modelos destinados a avaliar parâmetros específicos foram identificados conforme a Tabela 3.7

Tabela 3.7 – Identificação e descrição das características especiais das cantoneiras ensaiadas.

Identificação	Descrição
F	Cantoneira conectada nas 2 abas.
L	Cantoneira de abas desiguais conectadas na maior aba.

- g) Características especiais para perfis U: os modelos destinados a avaliar parâmetros específicos foram identificados conforme a Tabela 3.8

Tabela 3.8 – Identificação e descrição das características especiais dos perfis U ensaiados.

Identificação	Descrição
W	Perfil U conectado na alma.
F	Perfil U conectado somente nos flanges.
WF	Perfil U conectado na alma e nos flanges.

Desta forma, como exemplo, são apresentados os seguintes perfis:

- a) Perfil A2-C232: Cantoneira com aço ZAR 345, cantoneira de 100x100 mm, com espessura de 1,95 mm, com 3 seções de parafusos, contendo 2 parafusos por seção.
- b) Perfil A2-D141L: Cantoneira com aço ZAR 345, cantoneira de 50x75 mm, com espessura de 1,55 mm, com 4 seções de parafusos, contendo 1 parafuso por seção, conectada na aba maior.
- c) Perfil C1-G311W: Perfil U com aço COR 420, perfil U de 100x40 mm, com espessura de 2,65 mm, com 1 seções de parafusos, contendo 1 parafuso por seção, conectado na alma.
- d) Perfil C2-I243WF: Perfil U com aço ZAR 345, perfil U de 120x45 mm, com espessura de 1,95 mm, com 4 seções de parafusos, contendo 3 parafuso por seção, conectado na alma e nos flanges.
- e) Perfil C2-J222F: Perfil U com aço ZAR 345, perfil U de 150x50 mm, com espessura de 1,95 mm, com 2 seções de parafusos, contendo 2 parafuso por seção, conectado nos flanges.

3.2.3 Caracterização dos parafusos e das chapas de fixação

Para a fixação dos perfis foram utilizados parafusos galvanizados de alta resistência, do tipo ASTM A325, com 12,7 mm de diâmetro, com rosca parcial e uma porca galvanizada. Durante a montagem dos modelos foi aplicado um torque de 100 Nm nos parafusos, controlado com um torquímetro. A Figura 3.5 mostra as medidas em milímetros do parafuso e da porca.

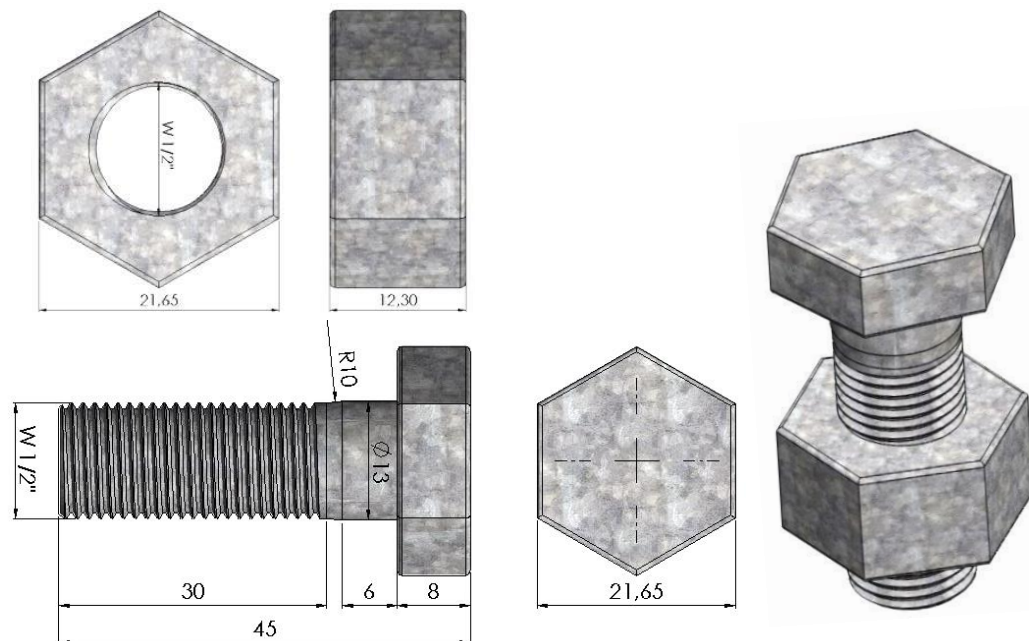


Figura 3.5 – Configuração geral do parafuso e da porca com medidas em milímetros (mm).

Por meio de uma máquina de usinagem em um torno de comando numérico computadorizado (CNC) foram confeccionadas chapas de fixação, nas quais os perfis foram parafusados de modo a possibilitar a instalação dos perfis na máquina de ensaios. Essas chapas foram fabricadas em aço SAE-1040, com espessura de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a usinagem das chapas de fixação em um torno (CNC).



Figura 3.6 – Torno de comando numérico computadorizado (CNC)

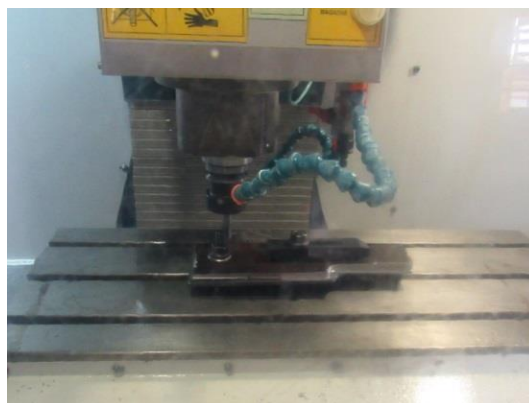


Figura 3.7 – Execução das chapas de fixação no torno de comando numérico computadorizado (CNC)

As dimensões em milímetros e o arranjo dos furos executados para a instalação dos perfis com 1 e com 2 furos por seção transversal são apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9. O arranjo dos furos com as dimensões em milímetros dos perfis U para instalação com 1 linha de furos na alma do perfil, com 2 linhas de furos na alma do perfil, com 1 linha de furos nos flanges e com furos executados na alma e nos flanges são apresentados nas Figuras 3.8, 3.9, 3.12 e 3.13.

Foram utilizadas três espessuras diferentes das chapas de fixação (6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm) para comparar e verificar diferentes resultados de força e deslocamento. As chapas de 6,35 mm e 10,0 mm foram dimensionadas de maneira a realizar testes e sofrerem pequenas deformações garantindo que a ruptura da seção líquida ocorresse nos perfis, já as chapas de 12,7 mm foram dimensionadas para sofrerem pequenas deformações quando comparadas com as sofridas pelos perfis e de modo a garantir que a ruptura da seção líquida ocorresse nos perfis e não nas chapas de fixação.

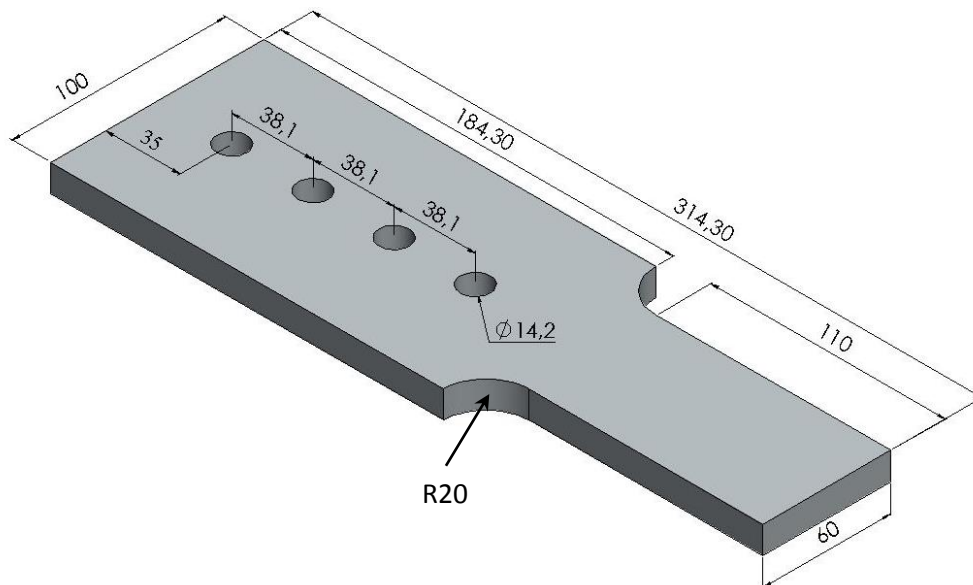


Figura 3.8 – Chapa de fixação para a instalação de perfis com 1 furo por seção, dimensões em (mm)

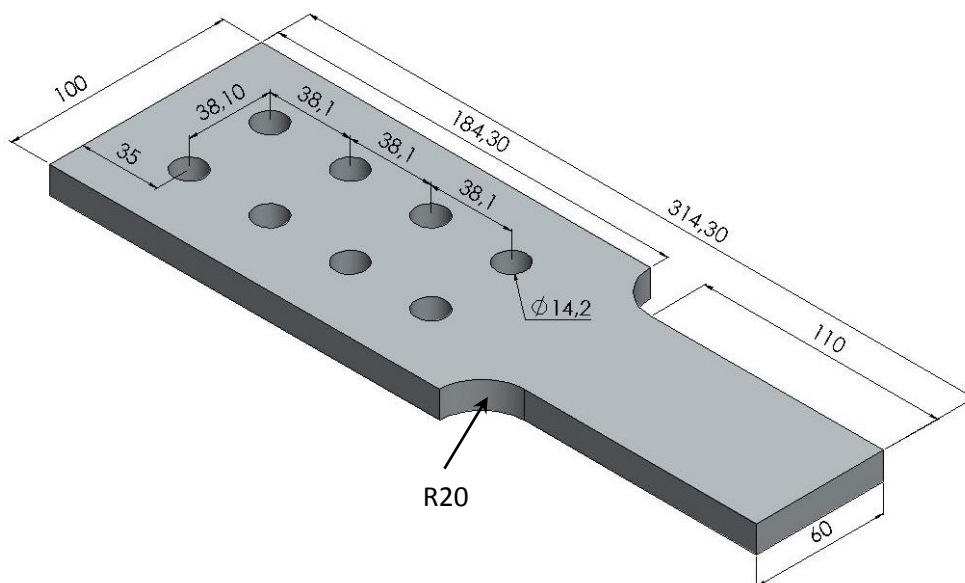


Figura 3.9 – Chapa de fixação para a instalação de perfis com 2 furos por seção, dimensões em (mm)

Para a fixação das cantoneiras conectadas pelas duas abas, foram desenvolvidos dispositivos específicos para perfis com abas iguais de 50 mm e 75 mm, de mesmo material e espessuras utilizadas nas chapas de fixação. O esquema geral desses dispositivos com as dimensões em milímetros está apresentado nas Figuras 3.10 e 3.11.

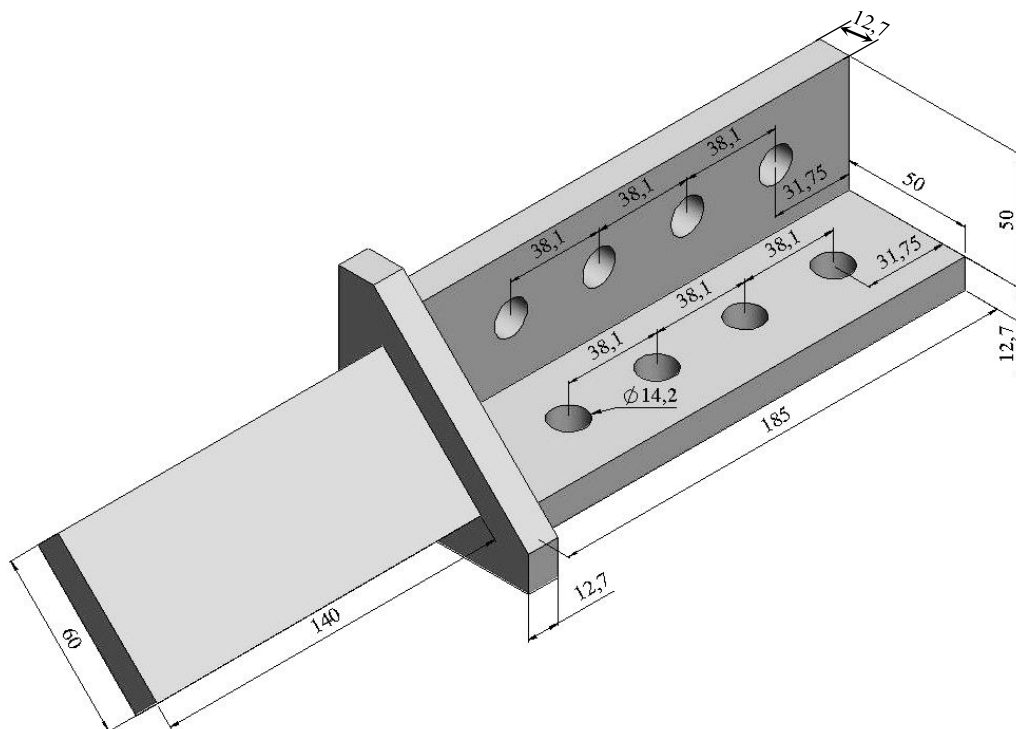


Figura 3.10 – Dispositivo com 12,7 mm de espessura para fixação de cantoneiras 50x50 mm em todas as abas conectadas, dimensões em (mm)

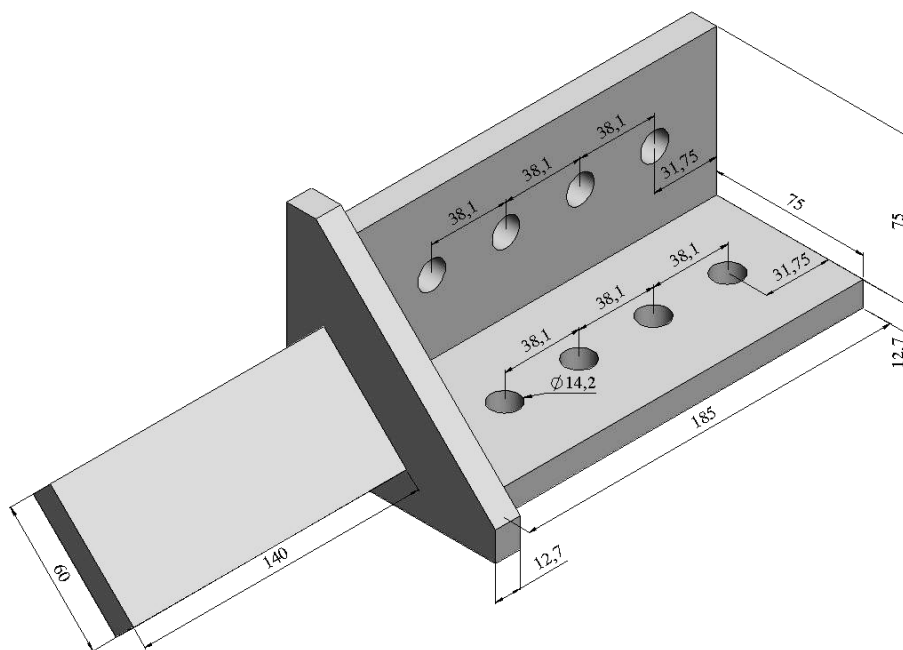


Figura 3.11 – Dispositivo com 12,7 mm de espessura para fixação de cantoneiras 75x75 mm em todas as abas conectadas, dimensões em (mm)

Foram desenvolvidos dispositivos específicos para perfis U com: (a) conexões executadas somente na alma do perfil com uma linha de furos; (b) conexões executados nos

flanges do perfil com uma linha de furos; e (c) conexões executas na alma e nos flanges do perfil. Estes dispositivos foram usinados com 3 tipos de espessura diferentes, sendo 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm. O esquema geral desses dispositivos com as dimensões em milímetros está apresentado nas Figuras 3.12 e 3.13.

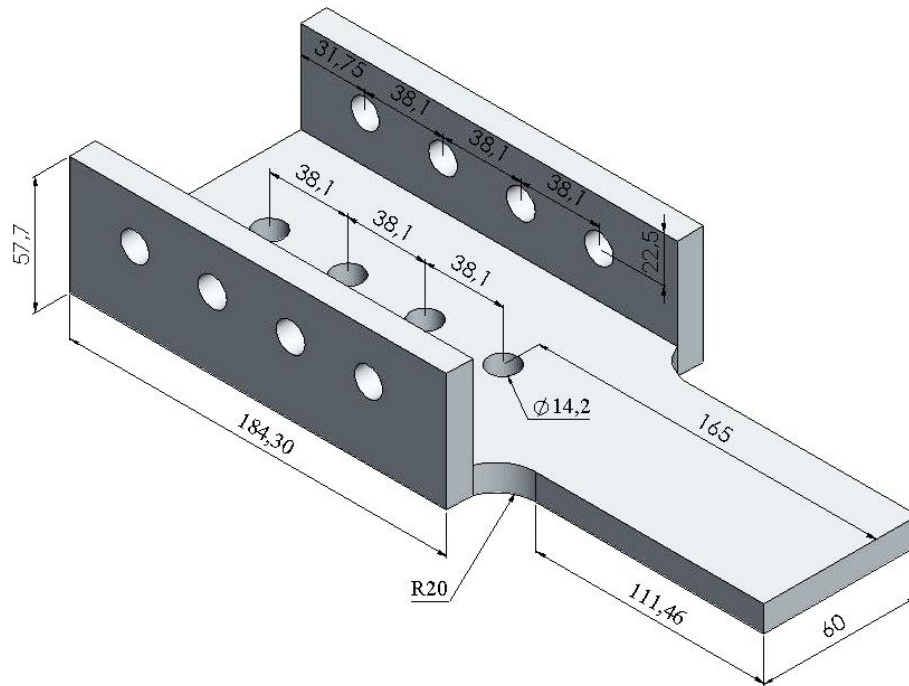


Figura 3.12 – Dispositivo para fixação de perfis U com flanges de 45 mm de altura, dimensões em (mm)

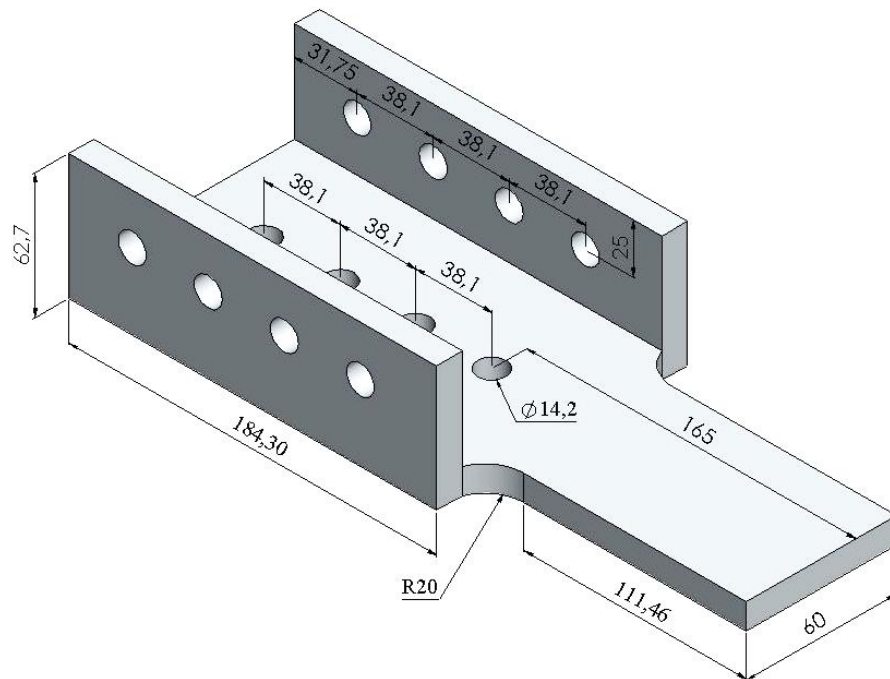


Figura 3.13 – Dispositivo para fixação de perfis U com flanges de 50 mm de altura, dimensões em (mm)

3.2.4 Caracterização dos perfis

Os modelos ensaiados foram confeccionados em uma indústria que fabrica perfis de aço formado a frio, com chapas de 6000 mm de comprimento. O dobramento foi realizado através de perfiladeiras de alto desempenho, que garantem um melhor acabamento em suas dimensões na largura total da seção transversal especificada. as chapas foram cortadas por meio de guilhotina, de bobinas do aço estrutural patinável de alta resistência, conhecido comercialmente por COR 420, e de bobinas do aço estrutural galvanizado de alta resistência conhecido comercialmente por ZAR 345 e ZAR 400.

O valor do raio de concordância da dobra de cada perfil depende da espessura. Os modelos para ensaio foram confeccionados com perfis com seções usuais padronizadas pela norma brasileira de perfis estruturais de aço formados a frio NBR 6355 (ABNT, 2012). Na Tabela 3.9, mostra-se o tipo do aço utilizado em cada perfil, bem como os valores nominais das espessuras e o raio de concordância da dobra de cada perfil. As dimensões em milímetros das seções das cantoneiras e dos perfis U, ensaiados, são apresentadas nas Figuras 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18.

Tabela 3.9 – Tipos de aço, espessura nominal e raio de concordância das dobras dos perfis

Tipo de aço	Espessura Nominal	Raio de Concordância
COR 420	2,65 mm	5,30 mm
COR 420	3,70 mm	7,40 mm
ZAR 345	1,55 mm	3,10 mm
ZAR 345	1,95 mm	3,90 mm
ZAR 400	2,30 mm	4,60 mm

As barras de 6000 mm foram cortadas com uma serra policorte, em partes com cerca de 600 mm de comprimento total, de modo a permitir sua adequada instalação nas chapas de fixação e, posteriormente, na máquina de ensaios. Cada perfil foi etiquetado e, com um paquímetro digital, foi obtida a sua espessura média. As imagens da Figura 3.14 mostram a execução do corte das barras de 6000 mm para produzir os modelos a serem ensaiados.



Figura 3.14 – Corte das barras de aço para confecção dos modelos a serem ensaiados

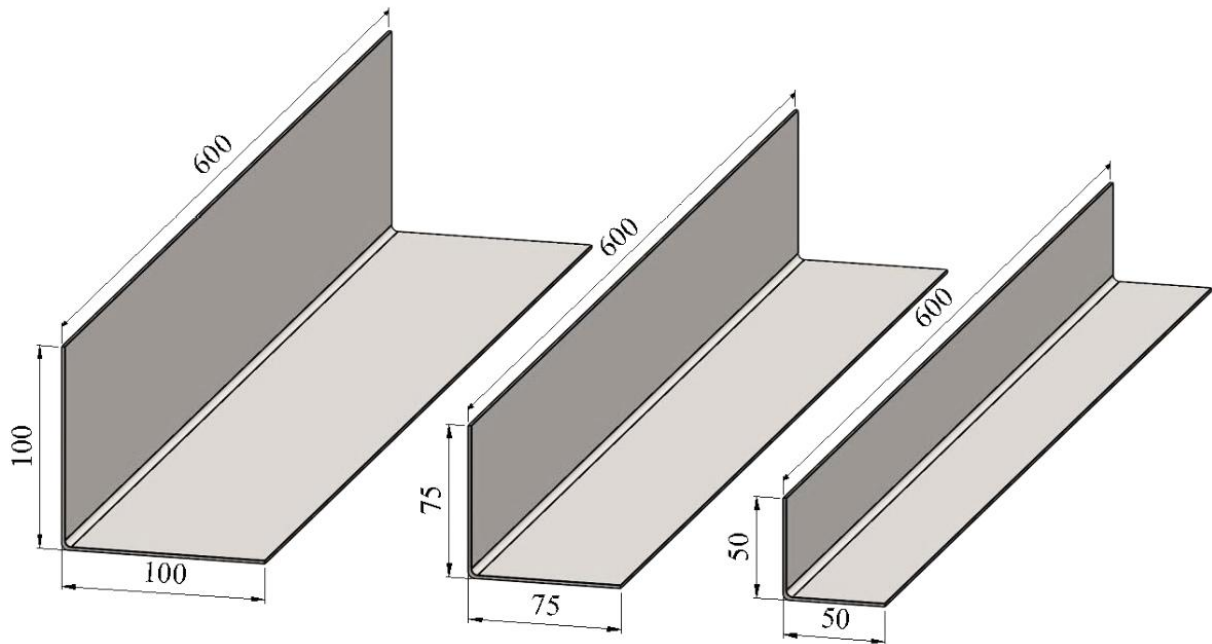


Figura 3.15 – Dimensões em (mm) das seções transversais das cantoneiras de abas iguais

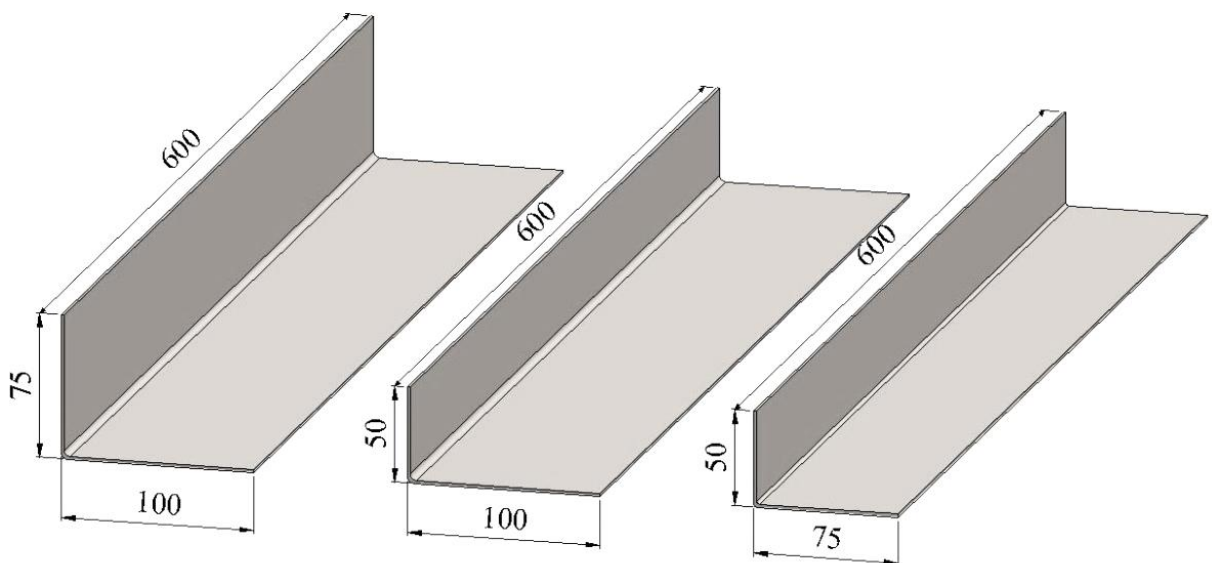


Figura 3.16 – Dimensões em (mm) das seções transversais das cantoneiras de abas desiguais

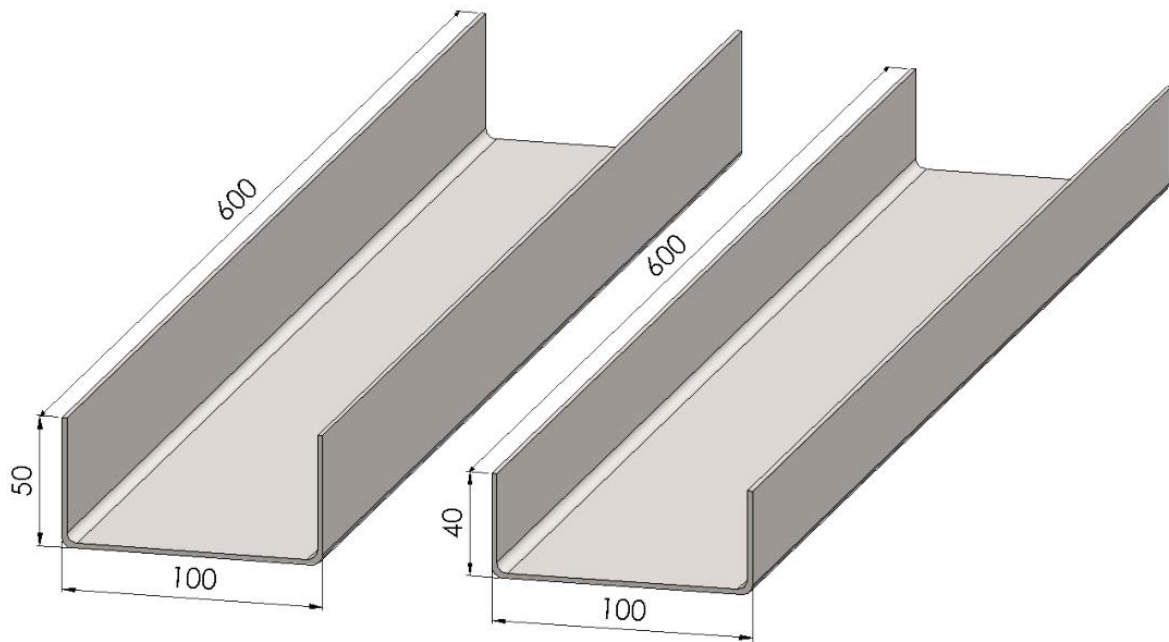


Figura 3.17 – Dimensões em (mm) das seções transversais dos perfis U

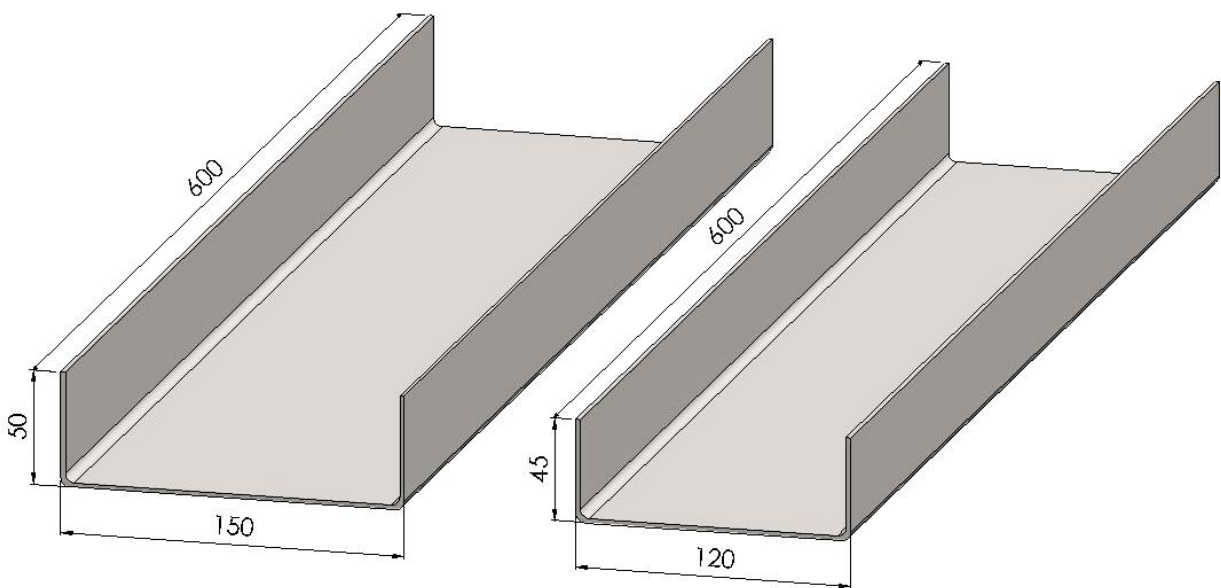


Figura 3.18 – Dimensões em (mm) das seções transversais dos perfis U

Todos os perfis ensaiados tiveram os furos para a instalação dos parafusos executados manualmente, com uso de brocas. Em todos os casos, os furos foram realizados com diâmetro 14,2 mm, de modo a permitir uma folga de 1,5 mm para o uso de parafusos de 12,7 mm de diâmetro. A Figura 3.19 apresenta o modo como foram executados os furos nos modelos.



Figura 3.19 – Execução dos furos nos modelos.

Nos perfis típicos de uma linha de parafusos, os furos foram executados no eixo da aba para as cantoneiras e no eixo da alma para os perfis U, afastados entre si de 38,1 mm, correspondente a 3 vezes o diâmetro do parafuso, ficando o primeiro furo distante 31,75 mm da borda do perfil na direção da solicitação (2,5 vezes o diâmetro). Essas medidas correspondem à distância entre centros de furos adjacentes. As configurações típicas dos perfis com uma e com duas linhas de parafusos são apresentadas na Figura 3.20 a Figura 3.24.

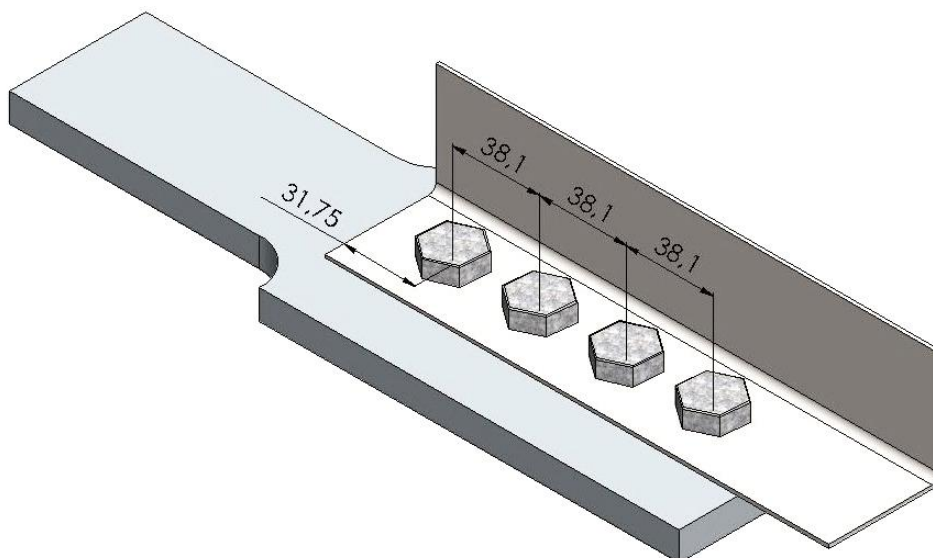


Figura 3.20 – Configuração das cantoneiras com uma linha de furos por seção, dimensões em (mm).

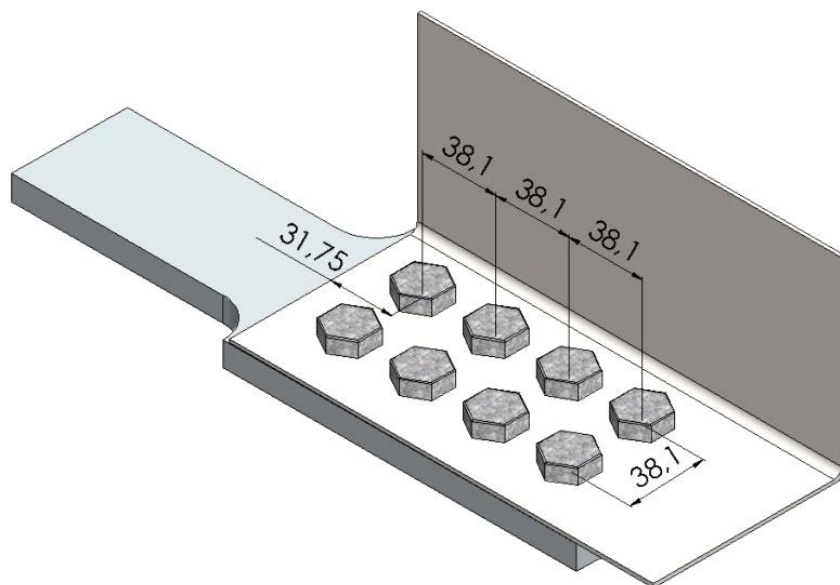


Figura 3.21 – Configuração das cantoneiras com duas linhas de furos por seção, dimensões em (mm).

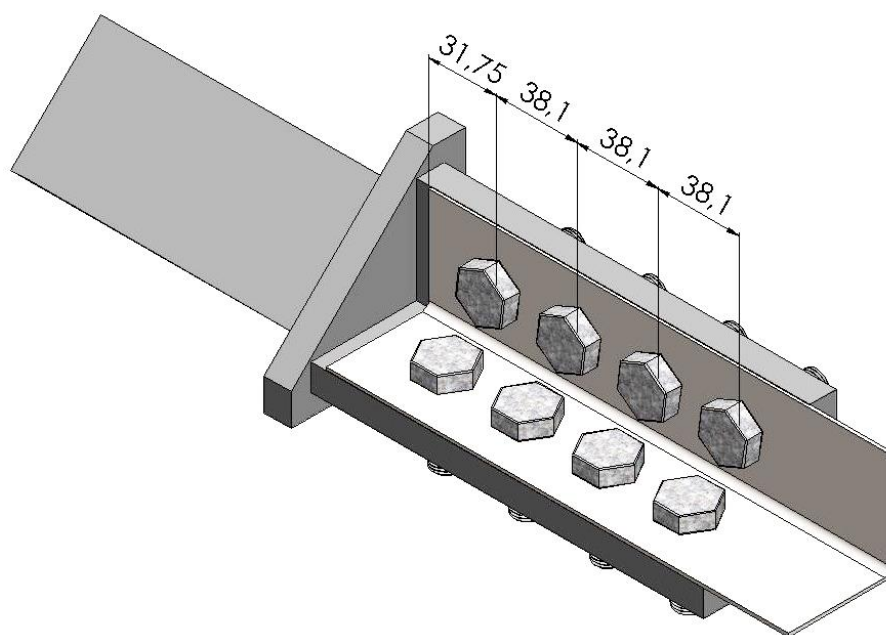


Figura 3.22 – Configuração das cantoneiras conectadas com uma linha de furos por seção, conectadas pelas duas abas, dimensões em (mm).

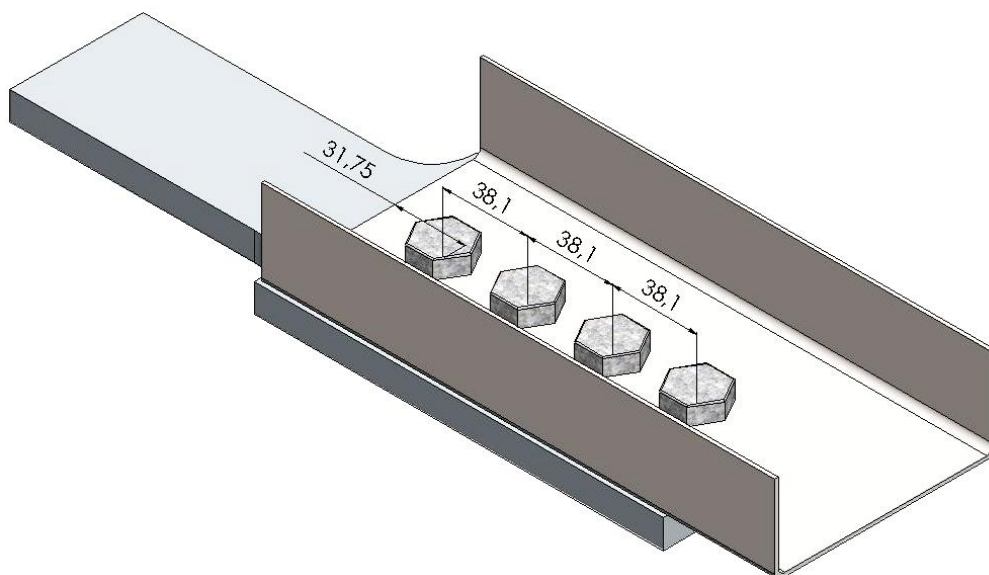


Figura 3.23 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pela alma, dimensões em (mm).

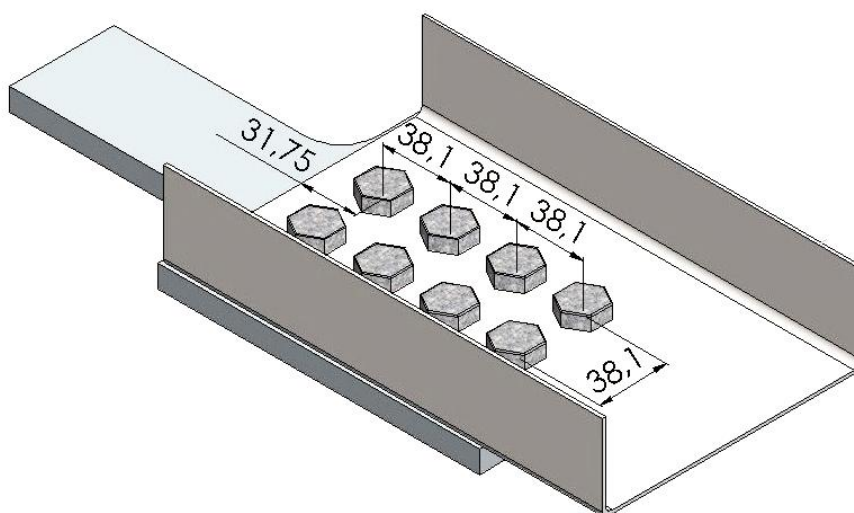


Figura 3.24 – Configuração dos perfis U com duas linhas de furos por seção, conectados pela alma, dimensões em (mm).

Também nos perfis típicos de uma linha de parafusos, os furos foram executados no eixo do flange para os perfis U, como apresentado na Figura 3.25, e ainda os furos foram executados no eixo do flange e no eixo da alma para os perfis U, como mostrado na Figura 3.26, afastados entre si de 38,1 mm (3 vezes o diâmetro do parafuso), ficando o primeiro furo distante 31,75 mm da borda do perfil na direção da solicitação (2,5 vezes do diâmetro). Essas medidas correspondem à distância entre centros de furos adjacentes.

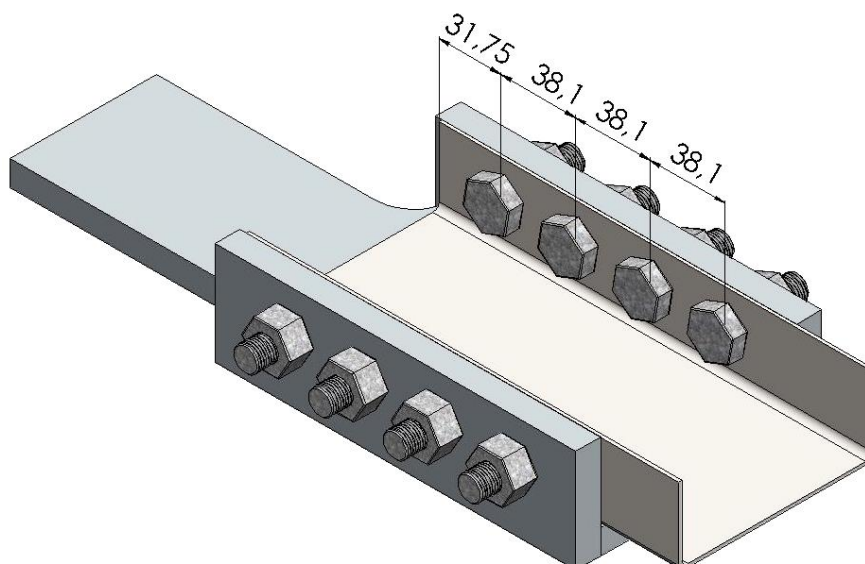


Figura 3.25 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pelos flanges, dimensões em (mm).

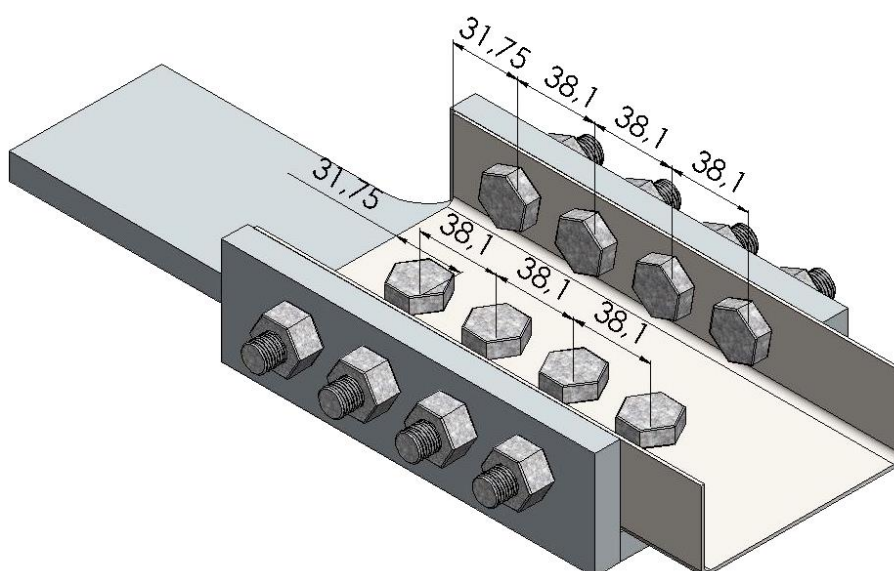


Figura 3.26 – Configuração dos perfis U com uma linha de furos por seção, conectados pela alma e pelos flanges, dimensões em (mm).

3.2.5 Equipamento de ensaio

O conjunto formado pelos perfis parafusados nas chapas de fixação era instalado nas garras da máquina universal de ensaios EMIC-DL-60000, cuja capacidade máxima é de 600 kN. As Figuras 3.27 e 3.28 mostram uma vista geral do equipamento que é acionado e controlado por computador e a Figura 3.29 mostra uma instalação típica dos perfis na máquina de ensaios.

O software da máquina permitiu a aquisição automática dos dados referentes à força aplicada, ao deslocamento das garras da prensa e ao deslocamento relativo de extensômetros externos instalados nos perfis. A frequência de amostragem foi de 2Hz e a força foi aplicada com controle de deslocamento de 2 mm/min.

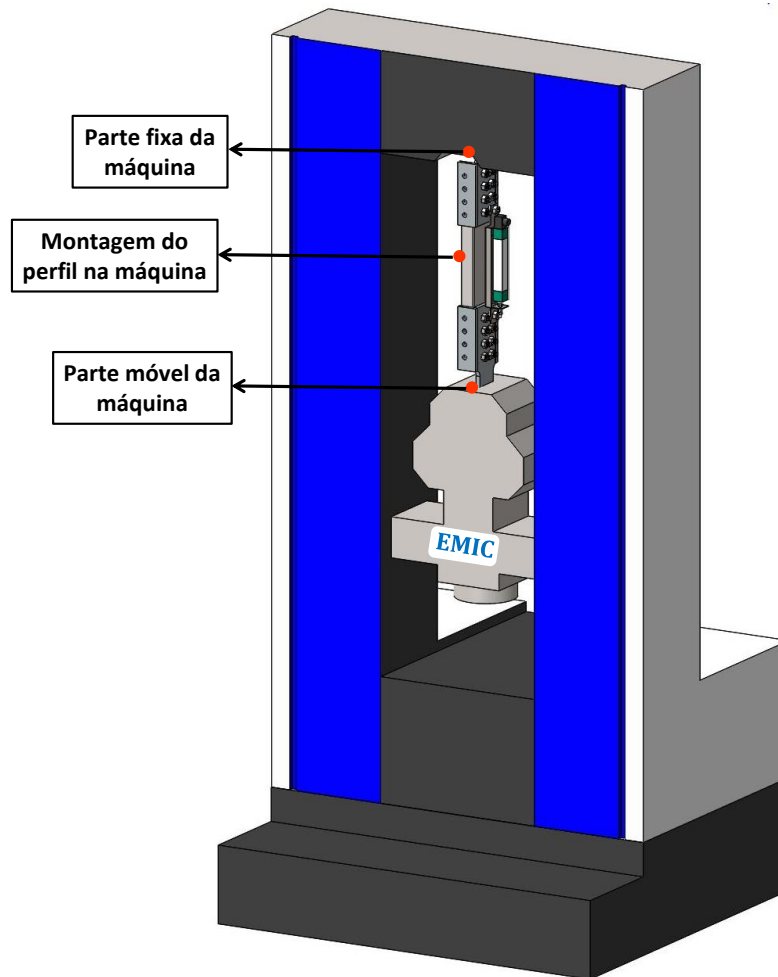


Figura 3.27 – Ilustração do esquema montado para o ensaio experimental.



Figura 3.28 – Montagem do modelo na máquina universal de ensaios.

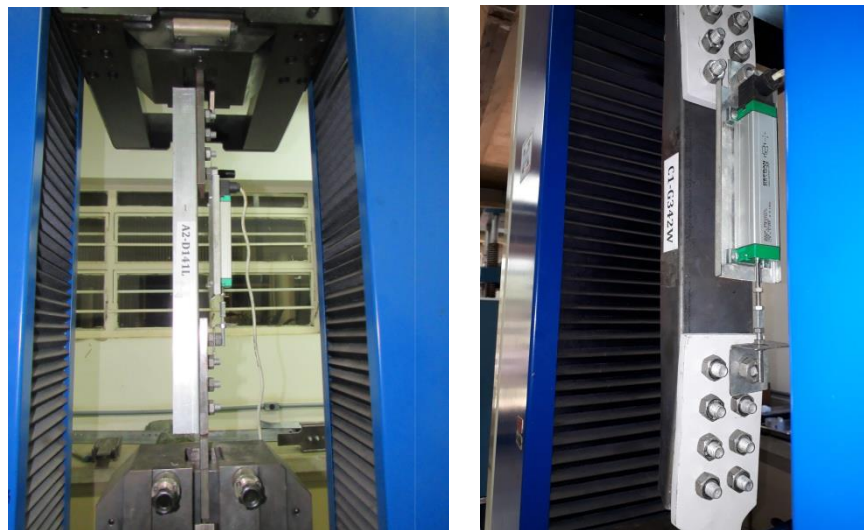


Figura 3.29 – Instalação típica dos perfis com uma e duas linhas de parafusos na máquina universal de ensaios.

As forças aplicadas foram obtidas diretamente da célula de força da máquina de ensaios. Além disso, a deformação axial relativa do perfil foi obtida de um transdutor de deslocamento (LVDT) instalado em parafusos de extremidades opostas dos perfis. As Figuras 3.30, 3.31 e 3.32 mostram o esquema geral de instalação do transdutor e a Figura 3.33 apresenta o processo de fixação do mesmo nos parafusos dos perfis em uma instalação típica na máquina de ensaios.

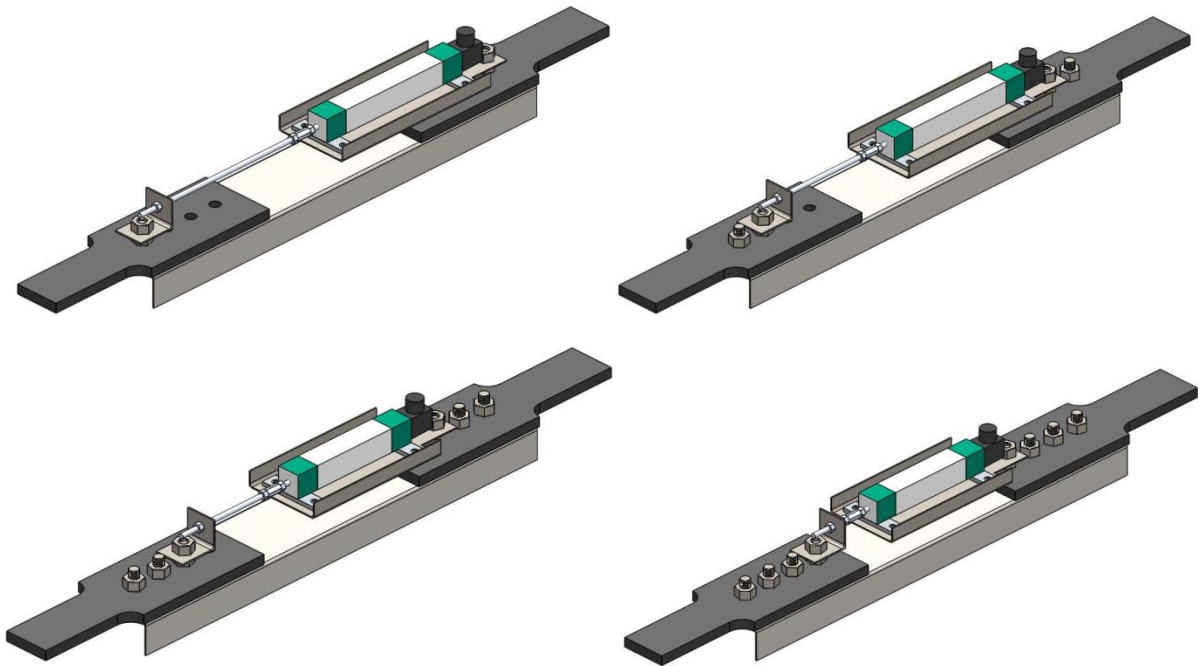


Figura 3.30 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com uma linha de parafusos.

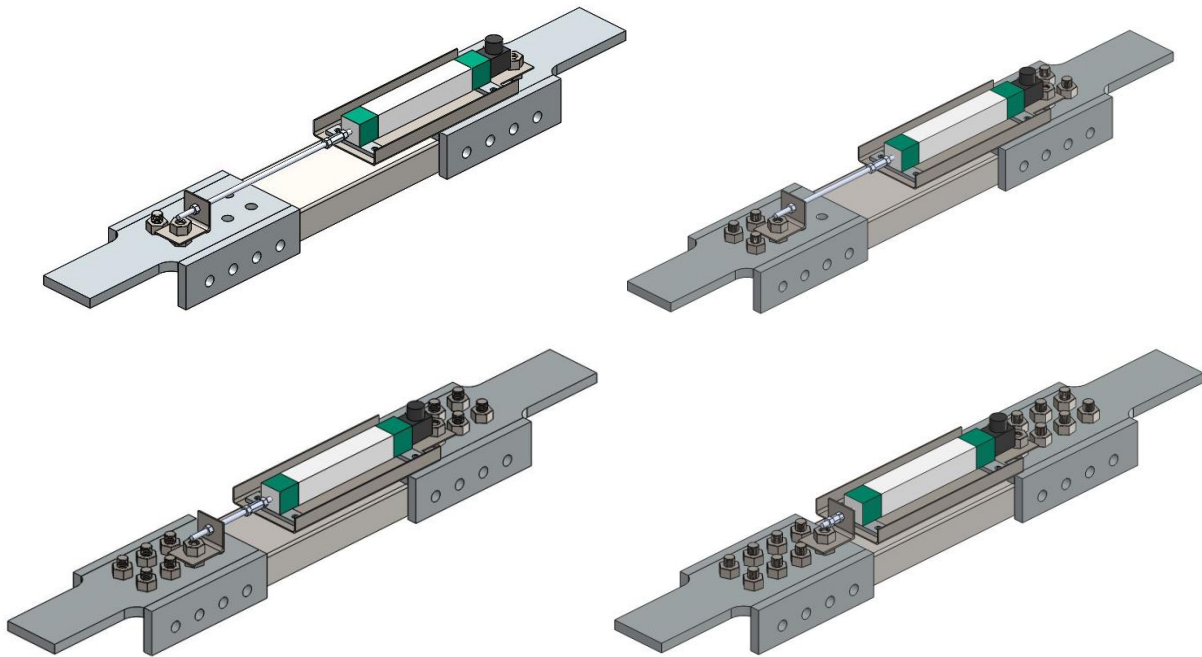


Figura 3.31 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com duas linhas de parafusos.

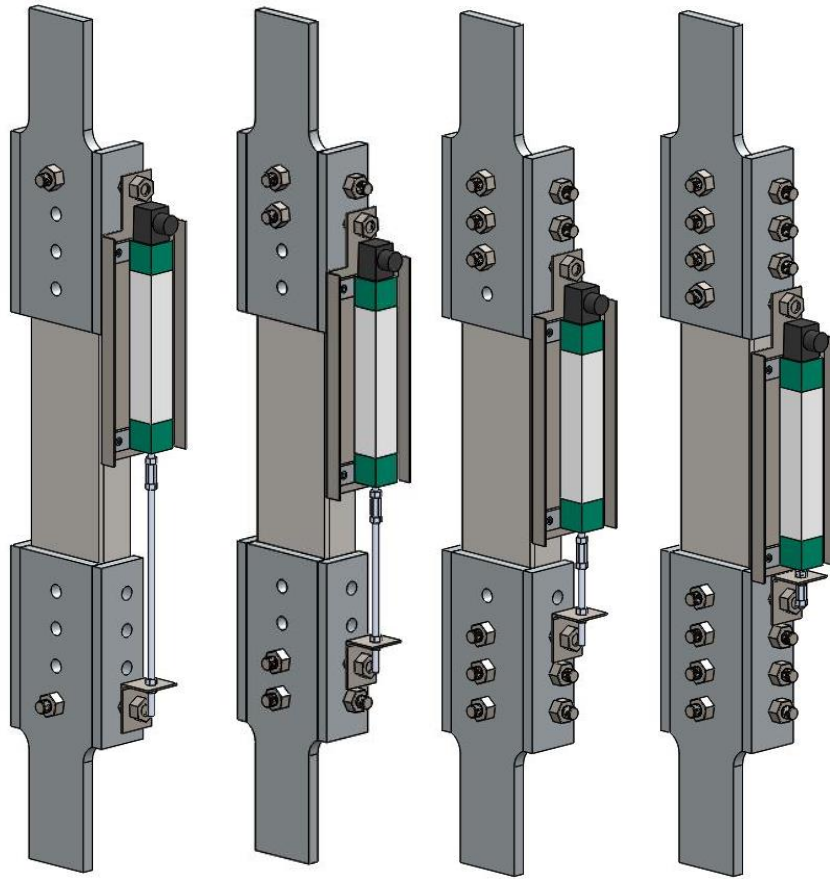


Figura 3.32 – Esquema geral de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos dos perfis com uma linha de parafusos na alma e nos flanges.

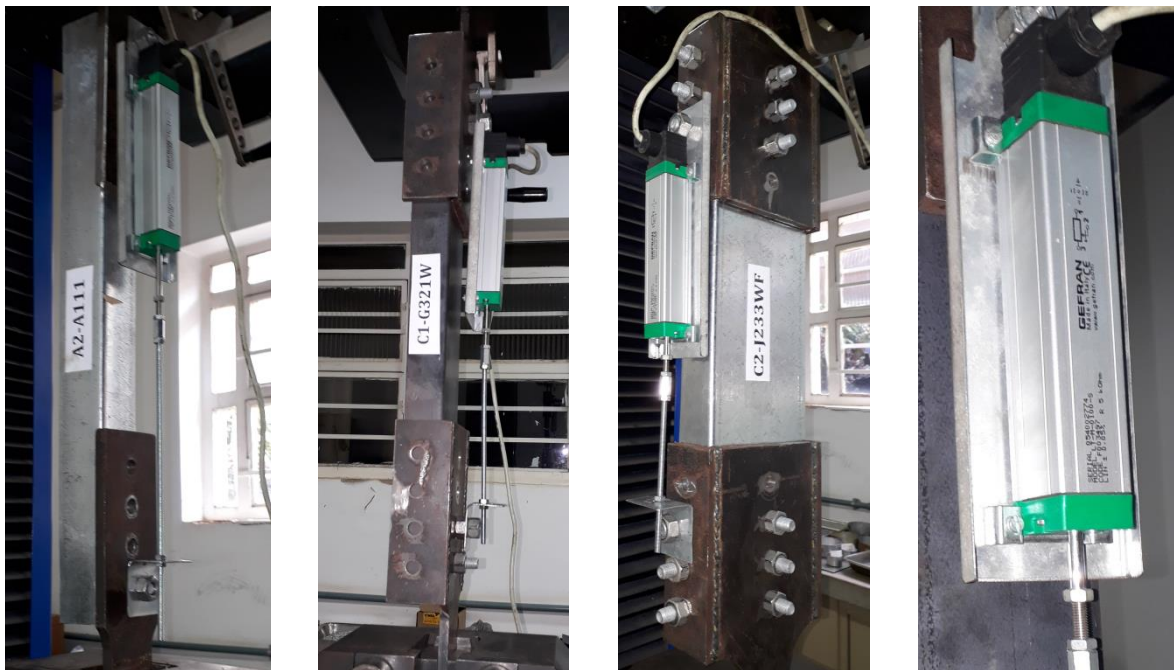


Figura 3.33 – Detalhes do transdutor de deslocamento instalado nos parafusos das conexões.

3.2.6 Propriedades geométricas das cantoneiras

Na Tabela 3.10 são apresentadas as propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectadas por apenas uma aba, com uma linha de parafusos e sem excentricidade da conexão em relação ao eixo da aba do perfil. Essas cantoneiras foram ensaiadas de forma a se obterem parâmetros de variação da espessura do perfil, variação das abas e variação do arranjo dos parafusos na conexão, além de servirem de referência para os demais ensaios com características de alguma forma modificadas.

As tabelas apresentadas nesta sequência mostram a nomenclatura das cantoneiras, os valores da largura da aba conectada (b_c), da largura da aba desconectada (b_d), a espessura média do perfil (t), o comprimento total do perfil (L_{perfil}), o diâmetro do parafuso (d), a área bruta da seção do perfil (A), a área líquida (A_n), a excentricidade da ligação (\bar{x}), tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil e o comprimento da ligação (L).

Tabela 3.10 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos.

Num. Ensaio	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
1	A2-A111	50	50	1,59	597	12,7	154,85	132,27	13,23	0,00
2	A2-A121	50	50	1,58	599	12,7	153,90	131,46	13,22	38,10
3	A2-A131	50	50	1,57	596	12,7	152,95	130,65	13,22	76,20
4	A2-A141	50	50	1,57	595	12,7	152,95	130,65	13,22	114,30
5	A2-A211	50	50	1,96	598	12,7	189,69	161,85	13,40	0,00
6	A2-A221	50	50	1,96	598	12,7	189,69	161,85	13,40	38,10
7	A2-A231	50	50	1,97	599	12,7	190,62	162,65	13,41	76,20
8	A2-A241	50	50	1,97	598	12,7	190,62	162,65	13,41	114,30
9	A2-B111	75	75	1,61	599	12,7	237,24	214,38	19,49	0,00
10	A2-B121	75	75	1,60	597	12,7	235,79	213,07	19,48	38,10
11	A2-B131	75	75	1,58	598	12,7	232,90	210,46	19,47	76,20
12	A2-B141	75	75	1,59	598	12,7	234,35	211,77	19,48	114,30
13	A2-B211	75	75	1,95	599	12,7	286,25	258,56	19,64	0,00
14	A2-B221	75	75	1,90	596	12,7	279,07	252,09	19,62	38,10
15	A2-B231	75	75	1,97	597	12,7	289,12	261,15	19,65	76,20
16	A2-B241	75	75	1,96	599	12,7	287,69	259,85	19,65	114,30
17	A2-C111	100	100	1,60	598	12,7	315,79	293,07	25,73	0,00
18	A2-C121	100	100	1,60	597	12,7	315,79	293,07	25,73	38,10
19	A2-C131	100	100	1,59	597	12,7	313,85	291,27	25,73	76,20
20	A2-C141	100	100	1,58	597	12,7	311,90	289,46	25,72	114,30
21	A2-C211	100	100	1,95	596	12,7	383,75	356,06	25,89	0,00
22	A2-C221	100	100	1,96	98	12,7	385,69	357,85	25,90	38,10
23	A2-C231	100	100	1,95	598	12,7	383,75	356,06	25,89	76,20
24	A2-C241	100	100	1,97	597	12,7	387,62	359,65	25,90	114,30
25	A3-A511	50	50	2,09	600	12,7	201,82	172,14	13,46	0,00
26	A3-A521	50	50	2,09	600	12,7	201,82	172,14	13,46	38,10
27	A3-A531	50	50	2,09	600	12,7	201,82	172,14	13,46	76,20
28	A3-A541	50	50	2,10	600	12,7	202,75	172,93	13,47	114,30
29	A3-B511	75	75	2,09	600	12,7	306,32	276,64	19,71	0,00
30	A3-B521	75	75	2,10	600	12,7	307,75	277,93	19,71	38,10
31	A3-B531	75	75	2,10	600	12,7	307,75	277,93	19,71	76,20
32	A3-B541	75	75	2,09	600	12,7	306,32	276,64	19,71	114,30
33	A3-C511	100	100	2,10	600	12,7	412,75	382,93	25,96	0,00
34	A3-C521	100	100	2,09	599	12,7	410,82	381,14	25,96	38,10
35	A3-C531	100	100	2,10	600	12,7	412,75	382,93	25,96	76,20
36	A3-C541	100	100	2,11	599	12,7	414,68	384,72	25,97	114,30

As tabelas seguintes apresentam as propriedades geométricas das demais cantoneiras, cujos ensaios visaram a avaliação da variação de determinados parâmetros, que são os seguintes: número de linhas de parafusos (Tabela 3.11), abas desiguais conectadas pela aba menor (Tabela 3.12), abas desiguais conectados pela aba maior (Tabelas 3.13) e todas as abas conectadas (Tabela 3.14).

Tabela 3.10 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectados por uma aba, com duas linhas de parafusos.

Num. Ensaio	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
37	A2-C112	100	100	1,61	597	12,7	317,74	272,02	25,74	0,00
38	A2-C122	100	100	1,62	597	12,7	319,69	273,68	25,74	38,10
39	A2-C132	100	100	1,59	596	12,7	313,85	268,69	25,73	76,20
40	A2-C142	100	100	1,64	598	12,7	323,58	277,00	25,75	114,30
41	A2-C212	100	100	1,96	597	12,7	385,69	330,02	25,90	0,00
42	A2-C222	100	100	1,98	598	12,7	389,56	333,32	25,91	38,10
43	A2-C232	100	100	1,97	600	12,7	387,62	331,67	25,90	76,20
44	A2-C242	100	100	1,97	598	12,7	385,69	330,02	25,90	114,30
45	A3-C512	100	100	2,11	599	12,7	414,68	354,76	25,97	0,00
46	A3-C522	100	100	2,09	599	12,7	410,82	351,47	25,96	38,10
47	A3-C532	100	100	2,10	598	12,7	412,75	353,11	25,96	76,20
48	A3-C542	100	100	2,11	600	12,7	414,68	354,76	25,97	114,30

Tabela 3.11 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas desiguais, conectadas pela menor aba, com uma linha de parafusos.

Num. Ensaio	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
49	A2-D111	50	75	1,60	598	12,7	195,79	173,07	23,30	0,00
50	A2-D121	50	75	1,61	596	12,7	196,99	174,13	23,30	38,10
51	A2-D131	50	75	1,61	596	12,7	196,99	174,13	23,30	76,20
52	A2-D141	50	75	1,60	598	12,7	195,79	173,07	23,30	114,30
53	A2-E111	50	100	1,62	600	12,7	238,69	215,68	34,20	0,00
54	A2-E121	50	100	1,61	599	12,7	237,24	214,38	34,20	38,10
55	A2-E131	50	100	1,62	598	12,7	238,69	215,68	34,20	76,20
56	A2-E141	50	100	1,61	599	12,7	237,24	214,38	34,20	114,30
57	A2-F111	75	100	1,55	598	12,7	267,30	245,29	29,32	0,00
58	A2-F121	75	100	1,57	599	12,7	270,70	248,40	29,33	38,10
59	A2-F131	75	100	1,56	599	12,7	269,00	246,85	29,33	76,20
60	A2-F141	75	100	1,56	599	12,7	269,00	246,85	29,33	114,30

Tabela 3.12 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas desiguais, conectadas pela maior aba, com uma linha de parafusos.

Num. Ensaio	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
61	A2-D111L	75	50	1,62	597	12,7	198,19	175,18	10,70	0,00
62	A2-D121L	75	50	1,60	595	12,7	195,79	173,07	10,69	38,10
63	A2-D131L	75	50	1,61	598	12,7	196,99	174,13	10,70	76,20
64	A2-D141L	75	50	1,60	598	12,7	195,79	173,07	10,69	114,30
65	A2-E111L	100	50	1,59	600	12,7	234,35	211,77	9,01	0,00
66	A2-E121L	100	50	1,61	599	12,7	237,24	214,38	9,02	38,10
67	A2-E131L	100	50	1,60	598	12,7	235,79	213,07	9,02	76,20
68	A2-E141L	100	50	1,59	598	12,7	234,35	211,77	9,01	114,30
69	A2-F111L	100	75	1,56	600	12,7	269,00	246,85	16,76	0,00
70	A2-F121L	100	75	1,55	598	12,7	267,30	245,29	16,75	38,10
71	A2-F131L	100	75	1,55	598	12,7	267,30	245,29	16,75	76,20
72	A2-F141L	100	75	1,56	599	12,7	269,00	246,85	16,76	114,30
73	A3-E511L	100	50	2,09	600	12,7	306,32	276,64	9,23	0,00
74	A3-E521L	100	50	2,11	600	12,7	309,18	279,22	9,23	38,10
75	A3-E531L	100	50	2,10	600	12,7	307,75	277,93	9,23	76,20
76	A3-E541L	100	50	2,10	600	12,7	307,75	277,93	9,23	114,30
77	A3-F511L	100	75	2,10	600	12,7	360,25	330,43	16,99	0,00
78	A3-F521L	100	75	2,09	600	12,7	358,57	328,89	16,99	38,10
79	A3-F531L	100	75	2,11	600	12,7	361,93	331,97	17,00	76,20
80	A3-F541L	100	75	2,11	600	12,7	361,93	331,97	17,00	114,30

Tabela 3.13 – Propriedades geométricas das cantoneiras de abas iguais, conectadas por todas as abas.

Num. Ensaio	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
81	A2-A112F	50	50	1,56	598	12,7	152,00	107,70	13,22	0,00
82	A2-A122F	50	50	1,55	598	12,7	151,05	107,03	13,21	38,10
83	A2-A132F	50	50	1,58	598	12,7	153,90	109,03	13,22	76,20
84	A2-A142F	50	50	1,56	599	12,7	152,00	107,70	13,22	114,30
85	A2-A212F	50	50	1,97	598	12,7	190,62	134,67	13,41	0,00
86	A2-A222F	50	50	1,98	596	12,7	191,56	135,32	13,41	38,10
87	A2-A232F	50	50	1,99	597	12,7	192,49	135,98	13,41	76,20
88	A2-A242F	50	50	1,96	596	12,7	189,69	134,02	13,40	114,30
89	A2-B112F	75	75	1,59	599	12,7	234,35	189,19	19,48	0,00
90	A2-B122F	75	75	1,63	600	12,7	240,13	193,84	19,50	38,10
91	A2-B132F	75	75	1,63	597	12,7	240,13	193,84	19,50	76,20
92	A2-B142F	75	75	1,64	596	12,7	241,58	195,00	19,50	114,30
93	A2-B212F	75	75	1,96	596	12,7	287,69	232,02	19,65	0,00
94	A2-B222F	75	75	1,97	599	12,7	289,12	233,17	19,65	38,10
95	A2-B232F	75	75	1,98	597	12,7	290,56	234,32	19,66	76,20
96	A2-B242F	75	75	1,95	596	12,7	286,25	230,87	19,64	114,30

3.2.7 Propriedades geométricas dos perfis U

Na Tabela 3.15 são apresentadas as propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com uma linha de parafusos e sem excentricidade da conexão em relação ao eixo da alma do perfil. Estes perfis foram ensaiados de forma a se obterem parâmetros de variação da espessura do perfil, variação da largura da alma do perfil, variação dos flanges e variação do arranjo dos parafusos na conexão, além de servirem de referência para os demais ensaios com características de alguma forma modificadas.

As tabelas apresentadas nesta sequência mostram a nomenclatura dos perfis U, os valores da largura do flange (b_f), da largura da alma (b_w), a espessura média do perfil (t), o comprimento total do perfil (L_{perfil}), o diâmetro do parafuso (d), a área bruta da seção do perfil (A), a área líquida (A_n), a excentricidade da ligação (\bar{x}), tomada como a distância entre o plano da ligação e o centróide da seção transversal do perfil e o comprimento da ligação (L).

Tabela 3.14 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com uma linha de parafusos.

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
1	C1-G311W	100	40	2,67	598	12,7	457,17	419,25	10,08	0,00
2	C1-G321W	100	40	2,68	598	12,7	458,79	420,74	10,08	38,10
3	C1-G331W	100	40	2,67	598	12,7	457,17	419,25	10,08	76,20
4	C1-G341W	100	40	2,69	596	12,7	460,41	422,22	10,09	114,30
5	C1-I311W	120	45	2,73	599	12,7	548,80	510,04	10,85	0,00
6	C1-I321W	120	45	2,68	598	12,7	539,19	501,14	10,83	38,10
7	C1-I331W	120	45	2,75	600	12,7	552,64	513,59	10,86	76,20
8	C1-I341W	120	45	2,67	600	12,7	537,27	499,35	10,82	114,30
9	C1-G411W	100	40	3,70	600	12,7	621,00	568,46	10,55	0,00
10	C1-G421W	100	40	3,70	597	12,7	621,00	568,46	10,55	38,10
11	C1-G431W	100	40	3,71	599	12,7	622,56	569,88	10,55	76,20
12	C1-G441W	100	40	3,71	600	12,7	622,56	569,88	10,55	114,30
13	C2-G111W	100	40	1,57	599	12,7	274,50	252,20	9,59	0,00
14	C2-G121W	100	40	1,55	594	12,7	271,10	249,09	9,58	38,10
15	C2-G131W	100	40	1,56	597	12,7	272,80	250,65	9,58	76,20
16	C2-G141W	100	40	1,55	595	12,7	271,10	249,09	9,58	114,30
17	C2-G211W	100	40	1,95	600	12,7	338,50	310,81	9,76	0,00
18	C2-G221W	100	40	1,96	598	12,7	340,17	312,34	9,76	38,10
19	C2-G231W	100	40	1,96	599	12,7	340,17	312,34	9,76	76,20
20	C2-G241W	100	40	1,95	599	12,7	338,50	310,81	9,76	114,30
21	C2-I111W	120	45	1,55	600	12,7	317,60	295,59	10,32	0,00
22	C2-I121W	120	45	1,56	599	12,7	319,60	297,45	10,33	38,10

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
23	C2-I131W	120	45	1,56	598	12,7	319,60	297,45	10,33	76,20
24	C2-I141W	120	45	1,57	597	12,7	321,60	299,30	10,33	114,30
25	C2-I211W	120	45	1,95	599	12,7	397,00	369,31	10,50	0,00
26	C2-I221W	120	45	1,96	598	12,7	398,97	371,14	10,51	38,10
27	C2-I231W	120	45	1,95	597	12,7	397,00	369,31	10,50	76,20
28	C2-I241W	120	45	1,95	597	12,7	397,00	369,31	10,50	114,30
29	C2-J211W	150	50	1,95	599	12,7	475,00	447,31	10,85	0,00
30	C2-J221W	150	50	1,96	598	12,7	477,37	449,54	10,85	38,10
31	C2-J231W	150	50	1,95	596	12,7	475,00	447,31	10,85	76,20
32	C2-J241W	150	50	1,95	597	12,7	475,00	447,31	10,85	114,30
33	C3-G511W	100	40	2,12	600	12,7	366,83	336,72	9,83	0,00
34	C3-G521W	100	40	2,10	600	12,7	363,50	333,68	9,82	38,10
35	C3-G531W	100	40	2,11	600	12,7	365,17	335,20	9,83	76,20
36	C3-G541W	100	40	2,11	600	12,7	365,17	335,20	9,83	114,30

A Tabela 3.16 apresenta as propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com duas linhas de parafusos e sem excentricidade da conexão em relação ao eixo da alma do perfil.

Tabela 3.15 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas na alma do perfil, com duas linha de parafusos

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
37	C1-G312W	100	40	2,65	597	12,7	453,92	378,66	10,07	0,00
38	C1-G322W	100	40	2,67	598	12,7	457,17	381,34	10,08	38,10
39	C1-G332W	100	40	2,68	597	12,7	458,79	382,68	10,08	76,20
40	C1-G342W	100	40	2,66	599	12,7	455,54	380,00	10,07	114,30
41	C1-G412W	100	40	3,72	596	12,7	624,11	518,47	10,56	0,00
42	C1-G422W	100	40	3,71	600	12,7	622,56	517,19	10,55	38,10
43	C1-G432W	100	40	3,70	599	12,7	621,00	515,92	10,55	76,20
44	C1-G442W	100	40	3,71	600	12,7	622,56	517,19	10,55	114,30
45	C2-G112W	100	40	1,53	597	12,7	267,71	224,25	9,57	0,00
46	C2-G122W	100	40	1,56	598	12,7	272,80	228,50	9,58	38,10
47	C2-G132W	100	40	1,56	599	12,7	272,80	228,50	9,58	76,20
48	C2-G142W	100	40	1,54	599	12,7	269,40	225,67	9,57	114,30
49	C2-G212W	100	40	1,94	599	12,7	336,83	281,73	9,75	0,00
50	C2-G222W	100	40	1,93	599	12,7	335,16	280,34	9,75	38,10
51	C2-G232W	100	40	1,93	598	12,7	335,16	280,34	9,75	76,20
52	C2-G242W	100	40	1,94	599	12,7	336,83	281,73	9,75	114,30
53	C2-I112W	120	45	1,56	595	12,7	319,60	275,30	10,33	0,00

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
54	C2-I122W	120	45	1,57	599	12,7	321,60	277,01	10,33	38,10
55	C2-I132W	120	45	1,58	600	12,7	323,59	278,72	10,34	76,20
56	C2-I142W	120	45	1,57	600	12,7	321,60	277,01	10,33	114,30
57	C2-I212W	120	45	1,94	600	12,7	395,03	339,93	10,50	0,00
58	C2-I222W	120	45	1,93	598	12,7	393,06	338,24	10,49	38,10
59	C2-I232W	120	45	1,94	599	12,7	395,03	339,93	10,50	76,20
60	C2-I242W	120	45	1,96	597	12,7	398,97	343,31	10,51	114,30
61	C3-I512W	120	45	2,09	600	12,7	424,54	365,19	10,56	0,00
62	C3-I522W	120	45	2,10	600	12,7	426,50	366,86	10,57	38,10
63	C3-I532W	120	45	2,10	600	12,7	426,50	366,86	10,57	76,20
64	C3-I542W	120	45	2,11	600	12,7	428,47	368,54	10,57	114,30
65	C3-J512W	150	50	2,12	600	12,7	515,23	455,02	10,92	0,00
66	C3-J522W	150	50	2,11	600	12,7	512,87	452,94	10,92	38,10
67	C3-J532W	150	50	2,10	600	12,7	510,50	450,86	10,91	76,20
68	C3-J542W	150	50	2,10	600	12,7	510,50	450,86	10,91	114,30

A Tabela 3.17 apresenta as propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas nos flanges do perfil, com uma linha de parafusos.

Tabela 3.16 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados apenas no flange do perfil, com uma linha de parafusos

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
69	C2-H212F	100	50	1,96	598	12,7	379,37	323,71	13,40	0,00
70	C2-H222F	100	50	1,99	597	12,7	384,98	328,47	13,41	38,10
71	C2-H232F	100	50	1,94	598	12,7	375,63	320,53	13,39	76,20
72	C2-H242F	100	50	1,99	600	12,7	384,98	328,47	13,41	114,30
73	C2-J212F	150	50	1,96	599	12,7	477,37	421,71	10,85	0,00
74	C2-J222F	150	50	1,95	598	12,7	475,00	419,62	10,85	38,10
75	C2-J232F	150	50	1,97	597	12,7	479,74	423,80	10,86	76,20
76	C2-J242F	150	50	1,96	596	12,7	477,37	421,71	10,85	114,30

A Tabela 3.18 apresenta as propriedades geométricas dos perfis U, conectados na alma e nos flanges do perfil, com uma linha de parafusos.

Tabela 3.17 – Propriedades geométricas dos perfis U, conectados na alma e no flange do perfil, com uma linha de parafusos

Num. Ensaio	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{x} (mm)	L (mm)
77	C1-H313WF	100	50	2,66	598	12,7	508,74	395,43	13,73	0,00
78	C1-H323WF	100	50	2,67	598	12,7	510,57	396,83	13,73	38,10
79	C1-H333WF	100	50	2,69	598	12,7	514,21	399,62	13,74	76,20
80	C1-H343WF	100	50	2,68	598	12,7	512,39	398,22	13,74	114,30
81	C1-I313WF	120	45	2,66	600	12,7	535,34	422,03	10,82	0,00
82	C1-I323WF	120	45	2,65	598	12,7	533,42	420,53	10,81	38,10
83	C1-I333WF	120	45	2,67	599	12,7	537,27	423,53	10,82	76,20
84	C1-I343WF	120	45	2,65	596	12,7	533,42	420,53	10,81	114,30
85	C1-J313WF	150	50	2,68	599	12,7	646,39	532,22	11,17	0,00
86	C1-J323WF	150	50	2,66	596	12,7	641,74	528,43	11,16	38,10
87	C1-J333WF	150	50	2,65	597	12,7	639,42	526,53	11,15	76,20
88	C1-J343WF	150	50	2,68	599	12,7	646,39	532,22	11,17	114,30
89	C2-H213WF	100	50	1,98	598	12,7	383,11	298,77	13,41	0,00
90	C2-H223WF	100	50	1,96	595	12,7	379,37	295,88	13,40	38,10
91	C2-H233WF	100	50	1,98	597	12,7	383,11	298,77	13,41	76,20
92	C2-H243WF	100	50	1,97	595	12,7	381,24	297,32	13,41	114,30
93	C2-I213WF	120	45	1,99	598	12,7	404,88	320,11	10,52	0,00
94	C2-I223WF	120	45	1,98	600	12,7	402,91	318,57	10,51	38,10
95	C2-I233WF	120	45	1,97	599	12,7	400,94	317,02	10,51	76,20
96	C2-I243WF	120	45	1,98	600	12,7	402,91	318,57	10,51	114,30
97	C2-J213WF	150	50	1,95	599	12,7	475,00	391,93	10,85	0,00
98	C2-J223WF	150	50	1,96	597	12,7	477,37	393,88	10,85	38,10
99	C2-J233WF	150	50	1,95	598	12,7	475,00	391,93	10,85	76,20
100	C2-J243WF	150	50	1,97	596	12,7	479,74	395,82	10,86	114,30

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO DA APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foram construídos modelos de ligações parafusadas com cantoneiras e perfis U para a avaliação de sua resposta estrutural quando submetidos a força de tração axial, com diversas configurações de ligações. Esses modelos foram ensaiados e os resultados numéricos registrados e analisados. Neste capítulo são apresentados os resultados e análises.

Uma vez que não é possível identificar visualmente a falha da ligação no ensaio de tração, pois os parafusos encobrem a área afetada, adotou-se como critério para a interrupção dos ensaios a perda da capacidade da ligação de resistir esforços adicionais, através do monitoramento da curva força-deslocamento mostrada pelo software de aquisição de dados.

Na Figura 4.1 apresentam-se as curvas força-deslocamento para as cantoneiras e na Figura 4.2 as curvas para os perfis U, obtidos durante a realização dos ensaios. A força aplicada foi lida pela célula de força da máquina universal e o deslocamento foi lido pelo transdutor de deslocamento (LVDT) instalado nos modelos.

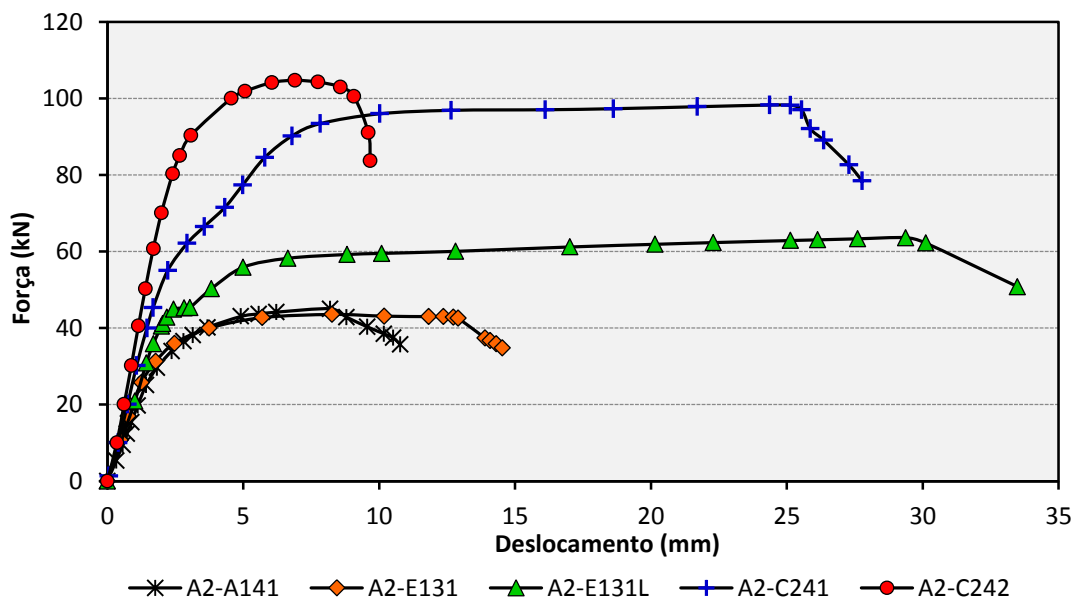


Figura 4.1 – Curvas força x deslocamento para as ligações com cantoneiras.

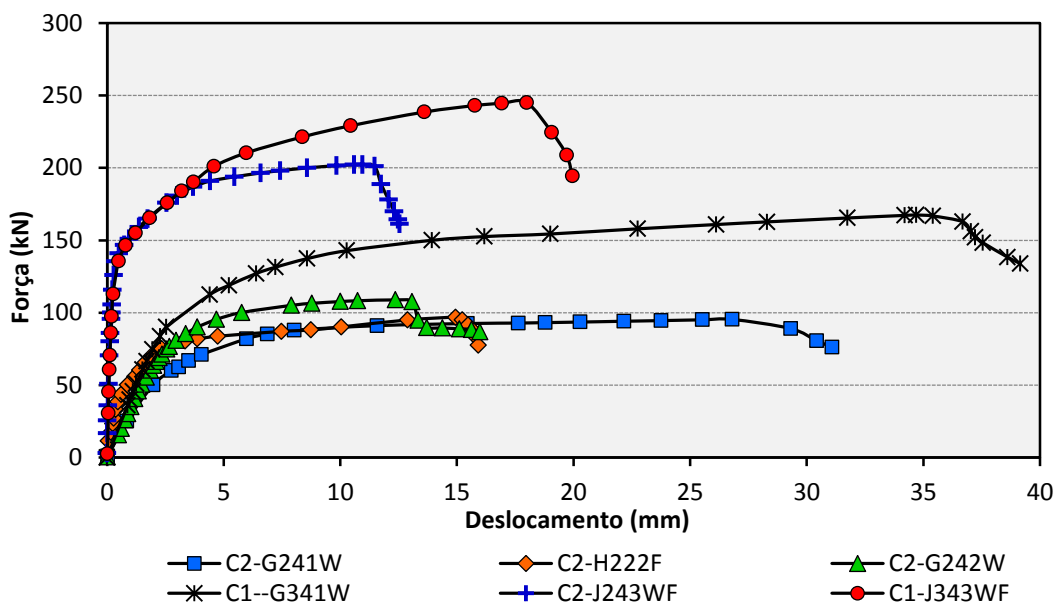


Figura 4.2 – Curvas força x deslocamento para as ligações com perfis U.

No Apêndice A encontram-se as curvas força x deslocamento das séries ensaiadas e no Apêndice B apresenta-se a documentação fotográfica dos perfis ensaiados com chapas de fixação compostas de diferentes espessuras.

4.2 MODOS DE FALHA E DEFORMAÇÃO DOS PERFIS

De acordo com as prescrições da NBR 14762 (ABNT, 2010) todos os perfis ensaiados foram pré-dimensionados, de modo que a maioria deles apresentasse, no colapso, o fenômeno da ruptura da seção líquida. Diversas cantoneiras e perfis U apresentaram o modo de falha por esmagamento do aço na região de contato com o parafuso, enquanto outros modelos, por sua vez, apresentaram uma combinação entre os modos de falha.

As configurações estabelecidas pelos modos de falhas identificados foram as seguintes:

- a) modo de falha I: ruptura da seção líquida;
- b) modo de falha II: esmagamento com início de ruptura da seção líquida;
- c) modo de falha III: esmagamento;
- d) modo de falha IV: esmagamento com início de rasgamento.

Como os parafusos utilizados eram de alta resistência, não ocorreu ruptura por cisalhamento dos parafusos, e nenhum modelo apresentou ruptura exclusivamente por rasgamento.

Nas cantoneiras, com abas de 75 mm e 100 mm de largura, especificamente naquelas com as abas desconectadas de maior dimensão, foram observadas excessivas deformações nos modelos. Já nos perfis U, essas deformações excessivas aconteceram nos flanges com apenas uma linha de furos e também quando a conexão era executada somente nos flanges.

Na Figura 4.3 é mostrada uma série de cantoneiras com as mesmas dimensões da seção transversal e os modos típicos de falha e deformação global. De maneira geral, a falha por esmagamento ocorreu naquelas cantoneiras com apenas uma seção de parafusos e a falha por ruptura da seção líquida ocorreu nos modelos com duas ou mais seções.



Figura 4.3 – Aspecto da deformada dos modelos com cantoneiras parafusadas com uma linha de furos, após os ensaios.

Na Figura 4.4 são mostrados diversos perfis U após os ensaios, com esmagamento nos perfis com dois parafusos por linha e ruptura da seção líquida nos demais, acompanhado do aumento das deformações nos flanges, próximo à conexão.



Figura 4.4 – Aspecto da deformada dos modelos com perfis U parafusados com duas linha de furos, após os ensaios.

Os exemplos dos principais modos de falha e deformação identificados nas cantoneiras são apresentados a seguir.

4.2.1 Falha por ruptura da seção líquida

Nos modelos ensaiados que apresentaram como modo de falha a ruptura da seção líquida, esse fenômeno caracteriza-se pela estricção da borda do furo, quando a peça está submetida a esforços de tração que ultrapassam a resistência elástica da chapa na região do furo. O material, então, deforma-se plasticamente e, ao atingir a tensão limite, inicia-se uma redução pronunciada na espessura do mesmo, levando à falha da ligação.

Das 96 cantoneiras ensaiadas, 69 delas (cerca de 72% do total), e dos 100 perfis U ensaiados, 74 deles (cerca de 74% do total), apresentaram como modo de falha a ruptura da seção líquida. Uma típica ruptura da seção líquida de uma cantoneira conectada por apenas uma aba está apresentada na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneira com uma aba conectada.

Foi observado que nos furos mais próximos do centro do perfil (no sentido longitudinal) é onde ocorre a ruptura da seção líquida, tendo, em alguns casos, ocorrido simultaneamente em furos das duas extremidades da cantoneira. O mesmo modo de ruptura em uma cantoneira conectada pelas duas abas é mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneira com ambas as abas conectadas.

Nos casos de cantoneiras com apenas uma seção de parafusos, conectadas somente por uma aba ou por ambas as abas, eventualmente ocorre este modo de falha. Entretanto, na maioria das vezes, ocorreu o esmagamento da chapa do perfil no contato com o parafuso.

Na Figura 4.7 é mostrada a imagem da ruptura da seção líquida ocorrida numa cantoneira com duas linhas de parafusos.



Figura 4.7 – Ruptura da seção líquida ocorrida numa cantoneira com uma aba conectada e duas linhas de parafusos

Nos perfis U também observou-se a ruptura da seção líquida em alguns casos. Entretanto, nos perfis U com apenas uma seção de parafusos, para a maioria dos modelos ensaiados observou-se o esmagamento da chapa no contato com o parafuso. Na Figura 4.8 é mostrada uma imagem da ruptura da seção líquida ocorrida num perfil U conectado somente na alma com uma linha de parafusos.



Figura 4.8 – Ruptura da seção líquida num perfil U conectado pela alma com apenas uma linha de parafusos.

Na Figura 4.9 são mostradas imagens da ruptura da seção líquida em perfis U com ligações somente pela alma, com duas linhas de parafusos.



Figura 4.9 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados somente pela alma, com duas linhas de parafusos.

No caso dos modelos com perfil U conectados pelos flanges, observou-se a ruptura da seção líquida nos dois flanges do perfil, como mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados somente nos flanges.

Nos casos dos perfis U com conexões executadas na alma e nos flanges do perfil, observou-se que a ruptura da seção líquida tem início nos furos da alma e se propaga até encontrar os furos nos flanges. Na Figura 4.11 são apresentados dois exemplos de ruptura da seção líquida ocorrido em perfis U com ligação pela alma e pelos flanges.



Figura 4.11 – Ruptura da seção líquida em perfis U conectados pela alma e pelos flanges.

4.2.2 Falha por esmagamento

Em um ensaio de tração com perfis conectados por parafusos, os parafusos exercem uma compressão na região de contato com as paredes dos furos, de modo que, dependendo da magnitude do esforço, os perfis sofrem deformações que levam a um “enrugamento” do material adjacente à borda do furo, no sentido de aplicação da força. Se o aço atinge o escoamento nessa região, ocorre a falha por esmagamento do material por compressão e a ligação perde a capacidade de resistir a esforços adicionais.

Das 96 cantoneiras ensaiadas, 27 delas (cerca de 28% do total) apresentaram como modo de falha o esmagamento do material na região de contato dos parafusos. Na Figura 4.12 são mostrados exemplos de esmagamento em cantoneiras com uma e duas seções de parafusos, onde a falha ocorre na direção da borda do perfil devido à perda de resistência do material comprimido.



Figura 4.12 – Esmagamento ocorrido em cantoneiras com uma aba conectada com uma linha de parafusos

Na Figura 4.13 pode-se observar a deformação excessiva na região da ligação de uma cantoneira ligada por ambas as abas, caracterizando o modo de falha por esmagamento do aço da chapa na borda do furo.

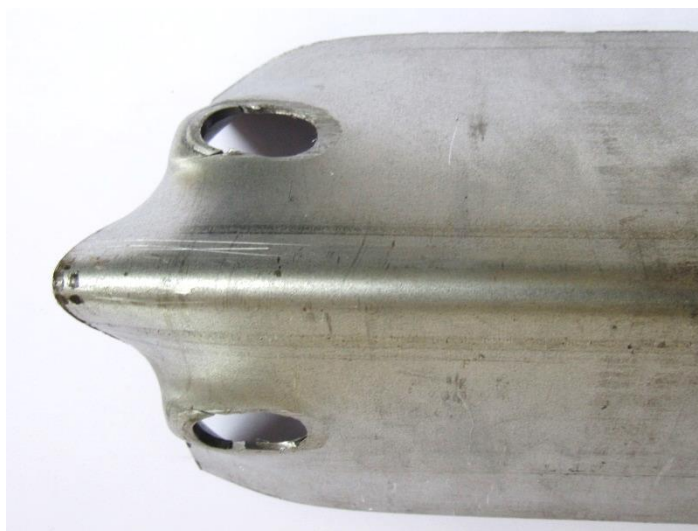


Figura 4.13 – Esmagamento na borda dos furos em uma cantoneira com todas as abas conectadas.

Dos 100 perfis U ensaiados, 26 deles (cerca de 26% do total) apresentaram como modo de falha o esmagamento do material na região de contato dos parafusos. A Figura 4.14 apresenta exemplos de esmagamento em perfis U com uma e duas seções de parafusos, onde a falha ocorre na direção da borda do perfil devido à perda de resistência do material comprimido.



Figura 4.14 – Esmagamento na borda dos furos em perfis U com ligação pela alma com uma linha de parafusos.

4.2.3 Falha por esmagamento combinado com rasgamento e ruptura da seção líquida

Em alguns dos ensaios realizados foram identificadas também combinações de modos de falha, como esmagamento combinado com início de rasgamento, como mostrado na Figura 4.15, e raramente a falha por esmagamento combinada com início de ruptura da seção líquida, como mostrado na Figura 4.16.

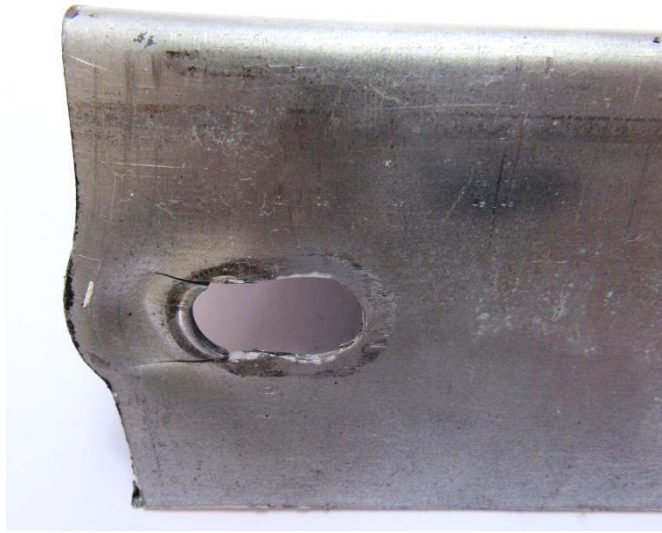


Figura 4.15 – Falha por esmagamento combinado com início de rasgamento em cantoneiras com uma linha de parafusos.



Figura 4.16 – Falha por esmagamento combinado com início de ruptura da seção líquida em cantoneiras com uma linha de parafusos.

A Figura 4.17 mostra o exemplo da combinação de esmagamento com rasgamento em perfis U conectados pela alma, com uma e duas seções de parafusos.



Figura 4.17 – Falha por esmagamento combinado com início de rasgamento em perfis U com uma linha de parafusos.

4.2.4 Modos de deformação

Quando ensaios são executados com perfis de aço formados a frio e com conexões parafusadas, sendo estes modelos, cantoneiras conectadas apenas por uma das abas e com uma linha de parafusos, existe o surgimento de tensões de compressão nas abas desconectadas durante o processo de tração das ligações. Os perfis com maiores seções transversais e menor espessura apresentaram maiores deformações ou flambagem local da aba. Este fato pode ser observado no perfil da Figura 4.18, com abas de 100 mm de largura, chapa de 1,95 mm de espessura e 4 seções de parafusos.



Figura 4.18 – Aspecto da deformação sofrida por uma cantoneira tracionada ligada por apenas uma das abas com uma seção de parafusos.

No caso dos modelos com cantoneiras de abas desiguais, observou-se que quanto maior a largura da aba desconectada, maiores as deformações ocorreram nas abas de maior largura, conforme pode ser visto tanto na Figura 4.19, cujas cantoneiras foram conectadas pela maior aba, quanto na Figura 4.20, cujas cantoneiras foram ligadas pela menor aba.



Figura 4.19 – Deformações em cantoneiras de abas desiguais, conectadas nas abas maiores



Figura 4.20 – Deformações em cantoneiras de abas desiguais, conectadas nas abas menores

Os ensaios realizados com cantoneiras de abas iguais e conexões executadas em todas as abas mostraram pequenas deformações que são apresentadas geralmente próximas à ligação parafusada. A Figura 4.21 mostra essas deformações.



Figura 4.21 – Deformações em cantoneiras de abas iguais, conectadas por todas as abas

Por meio de ensaios realizados com perfis U conectados apenas pela alma do perfil e com uma linha de parafusos, foi possível observar o surgimento de tensões de compressão nos flanges desconectados durante o processo de tração das ligações. Os perfis com menor espessura apresentaram maiores deformações, ou flambagem local. Como exemplo, a Figura 4.22 apresenta o perfil U com a alma de 120 mm de largura, chapa de 1,55 mm de espessura e 4 seções de parafusos e a Figura 4.23 apresenta as deformações referentes aos perfis U conectados somente pela alma do perfil.



Figura 4.22 – Excessiva deformação nos flanges do perfil U conectado com uma seção de parafusos



Figura 4.23 – Deformações em perfis U conectados pela alma com uma linha de parafusos

Os modelos que foram conectados com duas linhas de parafusos apresentaram maiores deformações geralmente próximo à ligação parafusada do perfil (Figura 4.24). As Figuras 4.25 e 4.26 também apresentam esses tipos de deformações.



Figura 4.24 – Deformações em perfis U conectados pela alma com duas linha de parafusos



Figura 4.25 – Deformações em perfis U conectados pelos flanges com uma linha de parafusos em cada flange



Figura 4.26 – Deformações em perfis U conectados pela alma e pelos flanges

4.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.3.1 Sistematização dos resultados

Após a obtenção dos resultados experimentais e dos resultados calculados pôde-se avaliar a eficiência do coeficiente de redução da área líquida (C_t) prescrito pela NBR 14762 (ABNT, 2010) para cantoneiras formadas a frio [Tal fato deve ser considerado na verificação da hipótese de ruptura da seção líquida (R.S.L.)] e a força da norma NBR 14762 $N_{t,Rd}$, que consiste na força axial de tração resistente de cálculo normal e sem a aplicação do coeficiente de ponderação de resistência (γ), cujo valor especificado pela NBR 14762 (ABNT, 2010) é de 1,65.

A equação para o cálculo de $N_{t,Rd}$ é a reapresentada a seguir:

$$N_{t,Rd} = C_t A_n f_u \quad (4.1)$$

Para obter os resultados de força última da NBR 14.762 (ABNT, 2010) são necessários os valores da resistência última dos aços (f_u) que se encontram na Tabela 3.1 e os valores das áreas líquidas das seções dos perfis que se encontram nas Tabelas 3.9 até 3.18.

Por intermédio dos parâmetros da equação e dos dados experimentais, pôde-se, então, construir a Tabela 4.1, na qual são apresentados, para cada cantoneira, os valores da força de ruptura calculados segundo a NBR 14.762 (ABNT, 2010) ($N_{t,Rd}$) e da força de ruptura dos perfis obtida nos ensaios deste trabalho (P_{ULT}), acompanhados dos respectivos modos de falha.

Destacam-se nas Tabelas 4.1 e 4.2 as forças de ruptura obtidas nos ensaios cujos valores são inferiores àqueles obtidos com as prescrições na NBR 14.762 (ABNT, 2010), nos quais foram verificados, além da ruptura da seção líquida (R.S.L.), os estados limites últimos do esmagamento, do rasgamento e do cisalhamento dos parafusos. Também, estão avultados, os modos de falha, obtidos nos ensaios, cuja indicação foi sugerida na NBR 14.762 (ABNT, 2010). A Tabela 4.1 apresenta os valores das forças de ruptura e modos de falha em cantoneiras, calculados segundo a NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios.

A Tabela 4.2 apresenta os valores das forças de ruptura e modos de falha em perfis U, calculados segundo a NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios.

Tabela 4.1 – Valores das forças de ruptura e modos de falha em cantoneiras, calculados segundo a norma NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios

Num. Ensaio	Perfil	NBR 14.762		Ensaio		Num. Ensaio	Perfil	NBR 14.762		Ensaio	
		$N_{t,Rd}$ (kN)	Falha	P_{ult} (kN)	Falha			$N_{t,Rd}$ (kN)	Falha	P_{ult} (kN)	Falha
1	A2-A111	19,54	R.S.L.	24,99	Esmag.	49	A2-D111	20,39	R.S.L.	21,33	R.S.L.
2	A2-A121	35,19	R.S.L.	34,42	R.S.L.	50	A2-D121	31,96	R.S.L.	34,51	R.S.L.
3	A2-A131	47,47	R.S.L.	41,73	R.S.L.	51	A2-D131	50,58	R.S.L.	37,49	R.S.L.
4	A2-A141	51,63	R.S.L.	45,04	R.S.L.	52	A2-D141	59,99	R.S.L.	43,56	R.S.L.
5	A2-A211	26,16	R.S.L.	30,10	Esmag - R.S.L.	53	A2-E111	21,14	R.S.L.	22,45	Esmag - Rasg.
6	A2-A221	46,81	R.S.L.	45,51	R.S.L.	54	A2-E121	39,35	R.S.L.	33,21	R.S.L.
7	A2-A231	64,21	R.S.L.	59,41	R.S.L.	55	A2-E131	45,66	R.S.L.	43,56	R.S.L.
8	A2-A241	69,94	R.S.L.	64,02	R.S.L.	56	A2-E141	63,05	R.S.L.	48,52	R.S.L.
9	A2-B111	21,01	R.S.L.	20,46	Esmag - Rasg.	57	A2-F111	20,58	R.S.L.	23,75	Esmag - Rasg.
10	A2-B121	39,11	R.S.L.	46,14	R.S.L.	58	A2-F121	43,91	Esmag.	43,61	R.S.L.
11	A2-B131	66,29	Esmag.	55,40	R.S.L.	59	A2-F131	60,95	R.S.L.	56,38	R.S.L.
12	A2-B141	77,30	R.S.L.	47,13	R.S.L.	60	A2-F141	78,39	R.S.L.	62,88	R.S.L.
13	A2-B211	27,70	R.S.L.	35,86	Esmag - Rasg.	61	A2-D111L	20,65	R.S.L.	23,66	Esmag.
14	A2-B221	50,46	R.S.L.	57,30	R.S.L.	62	A2-D121L	44,75	Esmag.	41,59	R.S.L.
15	A2-B231	90,15	Esmag.	74,15	R.S.L.	63	A2-D131L	66,44	R.S.L.	50,49	R.S.L.
16	A2-B241	103,21	R.S.L.	84,01	R.S.L.	64	A2-D141L	70,50	R.S.L.	55,71	R.S.L.
17	A2-C111	21,50	R.S.L.	26,53	Esmag.	65	A2-E111L	20,76	R.S.L.	23,35	Esmag.
18	A2-C121	44,75	Esmag.	46,57	Esmag - Rasg.	66	A2-E121L	45,03	Esmag.	43,54	Esmag - Rasg.
19	A2-C131	66,71	Esmag.	67,56	R.S.L.	67	A2-E131L	67,13	Esmag.	63,62	R.S.L.
20	A2-C141	88,39	Esmag.	74,94	R.S.L.	68	A2-E141L	87,97	R.S.L.	69,47	R.S.L.
21	A2-C211	28,53	R.S.L.	33,46	Esmag.	69	A2-F111L	20,71	R.S.L.	24,29	Esmag.
22	A2-C221	59,79	Esmag.	64,81	Esmag - Rasg.	70	A2-F121L	43,35	Esmag.	44,73	Esmag - Rasg.
23	A2-C231	89,23	Esmag.	90,31	R.S.L.	71	A2-F131L	65,03	Esmag.	66,60	R.S.L.
24	A2-C241	120,19	Esmag.	98,29	R.S.L.	72	A2-F141L	87,27	Esmag.	72,92	R.S.L.
25	A3-A511	35,82	R.S.L.	42,87	Esmag - R.S.L.	73	A3-E511L	38,15	R.S.L.	48,90	Esmag - Rasg.
26	A3-A521	63,83	R.S.L.	62,46	R.S.L.	74	A3-E521L	82,80	Esmag.	94,99	Esmag - Rasg.
27	A3-A531	87,32	R.S.L.	78,77	R.S.L.	75	A3-E531L	123,61	Esmag.	122,42	R.S.L.
28	A3-A541	95,58	R.S.L.	77,00	R.S.L.	76	A3-E541L	161,57	R.S.L.	145,82	R.S.L.
29	A3-B511	38,15	R.S.L.	46,79	Esmag - Rasg.	77	A3-F511L	38,99	R.S.L.	51,21	R.S.L.
30	A3-B521	71,56	R.S.L.	86,01	R.S.L.	78	A3-F521L	82,01	Esmag.	97,62	R.S.L.
31	A3-B531	123,37	R.S.L.	106,49	R.S.L.	79	A3-F531L	124,20	Esmag.	128,65	R.S.L.
32	A3-B541	141,23	R.S.L.	117,90	R.S.L.	80	A3-F541L	165,60	Esmag.	142,93	R.S.L.
33	A3-C511	39,49	R.S.L.	44,95	Esmag - Rasg.	81	A2-A112F	25,91	R.S.L.	45,85	Esmag - Rasg.
34	A3-C521	82,01	Esmag.	124,62	Esmag - Rasg.	82	A2-A122F	49,11	R.S.L.	62,61	R.S.L.
35	A3-C531	123,61	Esmag.	129,03	R.S.L.	83	A2-A132F	50,03	R.S.L.	62,70	R.S.L.
36	A3-C541	165,60	Esmag.	148,59	R.S.L.	84	A2-A142F	49,42	R.S.L.	58,76	R.S.L.
37	A2-C112	24,69	R.S.L.	48,31	Esmag.	85	A2-A212F	35,54	R.S.L.	64,32	Esmag - Rasg.
38	A2-C122	50,23	R.S.L.	68,39	R.S.L.	86	A2-A222F	67,72	R.S.L.	83,68	R.S.L.
39	A2-C132	73,34	R.S.L.	75,61	R.S.L.	87	A2-A232F	68,05	R.S.L.	86,52	R.S.L.
40	A2-C142	92,74	R.S.L.	81,37	R.S.L.	88	A2-A242F	67,07	R.S.L.	83,05	R.S.L.
41	A2-C212	32,73	R.S.L.	58,51	Esmag - Rasg.	89	A2-B112F	24,93	R.S.L.	43,61	Esmag - Rasg.
42	A2-C222	66,72	R.S.L.	84,30	R.S.L.	90	A2-B122F	88,94	R.S.L.	82,89	R.S.L.
43	A2-C232	98,28	R.S.L.	97,30	R.S.L.	91	A2-B132F	88,94	R.S.L.	87,96	R.S.L.
44	A2-C242	120,25	R.S.L.	104,74	R.S.L.	92	A2-B142F	89,48	R.S.L.	89,06	R.S.L.
45	A3-C512	45,29	R.S.L.	89,84	Esmag - Rasg.	93	A2-B212F	33,45	R.S.L.	54,48	Esmag - Rasg.
46	A3-C522	164,03	Esmag.	124,62	Esmag - Rasg.	94	A2-B222F	116,69	R.S.L.	113,50	R.S.L.
47	A3-C532	227,30	R.S.L.	121,03	R.S.L.	95	A2-B232F	117,26	R.S.L.	122,76	R.S.L.
48	A3-C542	228,36	R.S.L.	130,92	R.S.L.	96	A2-B242F	115,53	R.S.L.	121,32	R.S.L.

Tabela 4.2 – Valores das forças de ruptura e modos de falha em perfis U, calculados segundo a norma NBR 14.762 (ABNT, 2010) e obtidos nos ensaios

Num. Ensaio	Perfil	NBR 14.762		Ensaio		Num. Ensaio	Perfil	NBR 14.762		Ensaio	
		$N_{t,Rd}$ (kN)	Falha	P_{ult} (kN)	Falha			$N_{t,Rd}$ (kN)	Falha	P_{ult} (kN)	Falha
1	C1-G311W	42,28	Esmag.	55,46	Esmag - Rasg.	51	C2-G232W	118,76	R.S.L	99,72	R.S.L.
2	C1-G321W	84,88	Esmag.	104,38	Esmag - Rasg.	52	C2-G242W	126,55	R.S.L	108,84	R.S.L.
3	C1-G331W	126,84	Esmag.	138,06	R.S.L.	53	C2-I112W	43,63	Esmag.	54,25	Esmag.
4	C1-G341W	170,39	Esmag.	167,44	R.S.L.	54	C2-I122W	85,74	R.S.L	75,14	R.S.L.
5	C1-I311W	43,18	Esmag.	46,66	Esmag - Rasg.	55	C2-I132W	107,07	R.S.L	87,64	R.S.L.
6	C1-I321W	84,88	Esmag.	86,34	Esmag - Rasg.	56	C2-I142W	113,32	R.S.L	97,35	R.S.L.
7	C1-I331W	130,64	Esmag.	116,69	R.S.L.	57	C2-I212W	59,18	Esmag.	68,89	Esmag.
8	C1-I341W	169,12	Esmag.	139,99	R.S.L.	58	C2-I222W	113,33	R.S.L	95,42	R.S.L.
9	C1-G411W	58,53	Esmag.	81,91	Esmag - Rasg.	59	C2-I232W	141,99	R.S.L	116,64	R.S.L.
10	C1-G421W	117,06	Esmag.	145,64	Esmag - Rasg.	60	C2-I242W	152,85	R.S.L	128,20	R.S.L.
11	C1-G431W	176,07	Esmag.	186,58	R.S.L.	61	C3-I512W	70,46	R.S.L.	92,73	Esmag - R.S.L.
12	C1-G441W	234,76	Esmag.	231,33	R.S.L.	62	C3-I522W	164,81	Esmag.	147,48	R.S.L.
13	C2-G111W	20,56	R.S.L	25,37	Esmag - Rasg.	63	C3-I532W	236,15	R.S.L.	179,34	R.S.L.
14	C2-G121W	43,35	Esmag.	45,38	Esmag - Rasg.	64	C3-I542W	237,23	R.S.L.	195,83	R.S.L.
15	C2-G131W	65,45	Esmag.	68,35	R.S.L.	65	C3-J512W	71,08	R.S.L.	90,20	Esmag - R.S.L.
16	C2-G141W	86,71	Esmag.	88,56	R.S.L.	66	C3-J522W	165,60	Esmag.	147,92	R.S.L.
17	C2-G211W	27,69	R.S.L	32,07	Esmag - Rasg.	67	C3-J532W	247,22	Esmag.	188,57	R.S.L.
18	C2-G221W	59,79	Esmag.	59,32	Esmag - Rasg.	68	C3-J542W	290,23	R.S.L.	215,60	R.S.L.
19	C2-G231W	89,69	Esmag.	82,33	R.S.L.	69	C2-H212F	37,21	R.S.L	59,54	Esmag.
20	C2-G241W	118,97	Esmag.	95,35	R.S.L.	70	C2-H222F	94,92	R.S.L	93,83	R.S.L.
21	C2-I111W	20,63	R.S.L	27,74	Esmag - Rasg.	71	C2-H232F	126,58	R.S.L	131,97	R.S.L.
22	C2-I121W	43,63	Esmag.	49,73	Esmag - Rasg.	72	C2-H242F	141,22	R.S.L	141,60	R.S.L.
23	C2-I131W	65,45	Esmag.	69,60	R.S.L.	73	C2-J212F	43,72	R.S.L	63,17	Esmag - R.S.L.
24	C2-I141W	87,83	Esmag.	82,96	R.S.L.	74	C2-J222F	118,97	Esmag.	90,75	R.S.L.
25	C2-I211W	28,17	R.S.L	38,01	Esmag - Rasg.	75	C2-J232F	175,82	R.S.L	121,37	R.S.L.
26	C2-I221W	59,79	Esmag.	67,21	Esmag - Rasg.	76	C2-J242F	186,99	R.S.L	155,88	R.S.L.
27	C2-I231W	89,23	Esmag.	96,76	R.S.L.	77	C1-H313WF	93,61	R.S.L	115,70	Esmag - R.S.L.
28	C2-I241W	118,97	Esmag.	109,85	R.S.L.	78	C1-H323WF	117,00	R.S.L	173,07	R.S.L.
29	C2-J211W	28,61	R.S.L	39,08	Esmag - Rasg.	79	C1-H333WF	162,69	R.S.L	190,90	R.S.L.
30	C2-J221W	59,79	Esmag.	66,02	Esmag - Rasg.	80	C1-H343WF	177,06	R.S.L	199,22	R.S.L.
31	C2-J231W	89,23	Esmag.	96,16	Esmag - Rasg.	81	C1-I313WF	90,20	R.S.L	100,77	Esmag - Rasg.
32	C2-J241W	118,97	Esmag.	109,22	R.S.L.	82	C1-I323WF	144,08	R.S.L	185,39	R.S.L.
33	C3-G511W	41,59	Esmag.	59,74	Esmag.	83	C1-I333WF	182,54	R.S.L	198,52	R.S.L.
34	C3-G521W	82,41	Esmag.	102,54	Esmag - Rasg.	84	C1-I343WF	193,68	R.S.L	203,39	R.S.L.
35	C3-G531W	124,20	Esmag.	135,96	R.S.L.	85	C1-J313WF	92,76	R.S.L	102,86	Esmag - Rasg.
36	C3-G541W	165,60	Esmag.	173,40	R.S.L.	86	C1-J323WF	178,06	R.S.L	198,82	R.S.L.
37	C1-G312W	83,93	Esmag.	91,77	Esmag - R.S.L.	87	C1-J333WF	225,50	R.S.L	241,82	R.S.L.
38	C1-G322W	135,23	R.S.L	132,08	R.S.L.	88	C1-J343WF	244,09	R.S.L	245,18	R.S.L.
39	C1-G332W	167,24	R.S.L	152,41	R.S.L.	89	C2-H213WF	66,82	R.S.L	80,38	Esmag - R.S.L.
40	C1-G342W	176,54	R.S.L	172,06	R.S.L.	90	C2-H223WF	85,57	R.S.L	130,98	R.S.L.
41	C1-G412W	105,13	R.S.L.	119,98	Esmag - R.S.L.	91	C2-H233WF	117,94	R.S.L	141,99	R.S.L.
42	C1-G422W	234,76	Esmag.	174,95	R.S.L.	92	C2-H243WF	127,85	R.S.L	156,10	R.S.L.
43	C1-G432W	267,76	R.S.L.	210,02	R.S.L.	93	C2-I213WF	64,77	R.S.L	84,64	Esmag - Rasg.
44	C1-G442W	268,42	R.S.L.	234,49	R.S.L.	94	C2-I223WF	106,63	R.S.L	153,55	R.S.L.
45	C2-G112W	42,80	Esmag.	50,40	Esmag - Rasg.	95	C2-I233WF	132,39	R.S.L	168,29	R.S.L.
46	C2-G122W	73,21	R.S.L	70,52	R.S.L.	96	C2-I243WF	141,82	R.S.L	169,28	R.S.L.
47	C2-G132W	89,03	R.S.L	82,51	R.S.L.	97	C2-J213WF	64,80	R.S.L	81,46	Esmag - R.S.L.
48	C2-G142W	93,14	R.S.L	92,08	R.S.L.	98	C2-J223WF	129,74	R.S.L	155,61	R.S.L.
49	C2-G212W	59,18	Esmag.	60,10	Esmag - R.S.L.	99	C2-J233WF	162,63	R.S.L	196,31	R.S.L.
50	C2-G222W	97,23	R.S.L	84,71	R.S.L.	100	C2-J243WF	175,51	R.S.L	202,22	R.S.L.

Dos 96 ensaios realizados, 44 deles (ou seja, 45,83% do total) apresentaram força de ruptura (P_{ULT}) inferior à especificada na NBR 14.762 (ABNT, 2010) ($N_{t,Rd}$) e em 52 casos (ou 54,17% das vezes) o modo de falha foi distinto do prescrito pela mesma norma.

Já os 100 ensaios realizados em perfis U, 38 deles (ou seja, 38,00% do total) apresentaram força de ruptura (P_{ULT}) inferior à especificada na NBR 14.762 (ABNT, 2010) ($N_{t,Rd}$) e em 62 casos (ou 62,00% das vezes) o modo de falha foi distinto do prescrito pela mesma norma.

É importante observar também que, para praticamente todos os ensaios nos quais o modo de falha encontrado foi o esmagamento e nos quais a NBR 14.762 (ABNT, 2010) prescreveu que o modo de falha a ser encontrado seria a ruptura da seção líquida ou o rasgamento, a força dada pela norma para o esmagamento é a que mais se aproxima do resultado do ensaio.

A Tabela 4.3 apresenta os valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios de cantoneiras (P_{exp}), calculados segundo as normas EUROCODE 1-8 (2010) (P_{EC-3}), NBR 14.762 (ABNT, 2010) ($N_{t,Rd}$), AISI S100 (2016) (P_{AISI}), e AS/NZS 4600 (2005) ($P_{AS/NZS}$). Por meio dos dados utilizados na Tabela 4.3 foi realizada uma avaliação de resistência com a proporção das forças últimas experimentais e das normas avaliadas em relação ao número de casos. Os gráficos das Figuras 4.27 apresentam a distribuição dos resultados da proporção das forças últimas experimentais e das normas avaliadas em relação ao número de casos, de acordo o número de seções de parafusos, para os casos nos quais ocorreram rupturas da seção líquida com duas ou mais seções de parafusos.

Tabela 4.3 – Valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios em cantoneiras, calculados segundo as normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005)

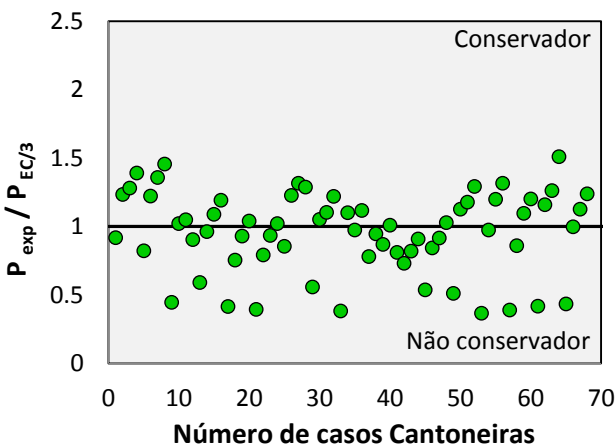
Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	P_{EC-3} (2010) (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{EC-3}}$	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
1	A2-A111	24,99	27,21	19,54		43,85	0,918	1,279		0,570
2	A2-A121	34,42	27,92	35,19	29,51	43,58	1,233	0,978	1,166	0,790
3	A2-A131	41,73	32,57	47,47	35,33	43,31	1,281	0,879	1,181	0,963
4	A2-A141	45,04	32,37	51,63	37,91	43,31	1,391	0,872	1,188	1,040
5	A2-A211	30,10	36,59	26,16		58,52	0,823	1,151		0,514
6	A2-A221	45,51	37,26	46,81	39,44	58,52	1,221	0,972	1,154	0,778
7	A2-A231	59,41	43,74	64,21	47,82	58,81	1,358	0,925	1,242	1,010
8	A2-A241	64,02	43,95	69,94	51,36	58,81	1,457	0,915	1,246	1,089
9	A2-B111	20,46	46,02	21,01		71,07	0,445	0,974		0,288
10	A2-B121	46,14	45,25	39,11	41,21	70,64	1,020	1,180	1,120	0,653
11	A2-B131	55,40	52,79	66,29	51,89	69,77	1,049	0,836	1,068	0,794
12	A2-B141	47,13	52,15	77,30	57,47	70,20	0,904	0,610	0,820	0,671
13	A2-B211	35,86	60,79	27,70		93,49	0,590	1,295		0,384
14	A2-B221	57,30	59,52	50,46	53,01	91,15	0,963	1,136	1,081	0,629
15	A2-B231	74,15	68,12	90,15	70,05	94,42	1,088	0,823	1,059	0,785
16	A2-B241	84,01	70,57	103,21	76,77	93,95	1,190	0,814	1,094	0,894

Continua...

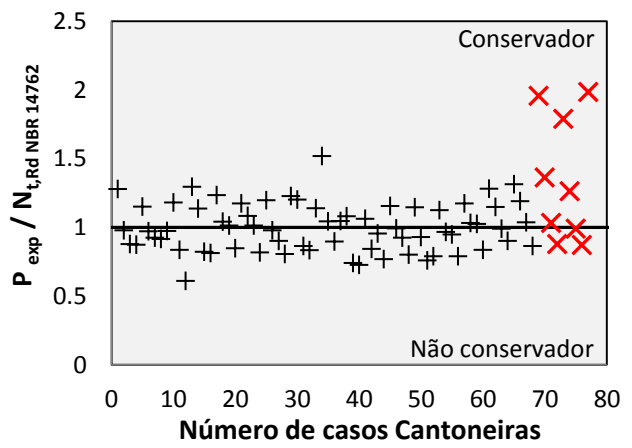
Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	P_{EC-3} (2010) (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{EC-3}}$	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
17	A2-C111	26,53	64,09	21,50		97,16	0,414	1,234		0,273
18	A2-C121	46,57	61,86	44,75	49,79	97,16	0,753	1,041	0,935	0,479
19	A2-C131	67,56	72,62	66,71	65,99	96,56	0,930	1,013	1,024	0,700
20	A2-C141	74,94	72,17	88,39	73,78	95,96	1,038	0,848	1,016	0,781
21	A2-C211	33,46	85,19	28,53		128,74	0,393	1,173		0,260
22	A2-C221	64,81	81,96	59,79	66,09	129,38	0,791	1,084	0,981	0,501
23	A2-C231	90,31	96,70	89,23	87,80	128,74	0,934	1,012	1,029	0,702
24	A2-C241	98,29	96,22	120,19	99,81	130,04	1,022	0,818	0,985	0,756
25	A3-A511	42,87	50,18	35,82		80,06	0,854	1,197		0,535
26	A3-A521	62,46	50,97	63,83	53,88	80,06	1,225	0,979	1,159	0,780
27	A3-A531	78,77	59,84	87,32	65,06	80,06	1,316	0,902	1,211	0,984
28	A3-A541	77,00	59,84	95,58	70,20	80,43	1,287	0,806	1,097	0,957
29	A3-B511	46,79	83,82	38,15		128,66	0,558	1,226		0,364
30	A3-B521	86,01	81,91	71,56	75,02	129,26	1,050	1,202	1,146	0,665
31	A3-B531	106,49	96,61	123,37	95,81	129,26	1,102	0,863	1,111	0,824
32	A3-B541	117,90	96,61	141,23	105,07	128,66	1,220	0,835	1,122	0,916
33	A3-C511	44,95	118,01	39,49		178,09	0,381	1,138		0,252
34	A3-C521	124,62	113,39	82,01	90,44	177,26	1,099	1,520	1,378	0,703
35	A3-C531	129,03	132,49	123,61	121,34	178,09	0,974	1,044	1,063	0,725
36	A3-C541	148,59	133,11	165,60	137,25	178,93	1,116	0,897	1,083	0,830
37	A2-D111	21,33	27,38	20,39		50,62	0,779	1,046		0,421
38	A2-D121	34,51	36,53	31,96	30,46	50,93	0,945	1,080	1,133	0,678
39	A2-D131	37,49	43,14	50,58	39,72	50,93	0,869	0,741	0,944	0,736
40	A2-D141	43,56	43,14	59,99	43,93	50,62	1,010	0,726	0,992	0,860
41	A2-E111	22,45	27,73	21,14		63,09	0,810	1,062		0,356
42	A2-E121	33,21	45,52	39,35	30,47	62,71	0,730	0,844	1,090	0,530
43	A2-E131	43,56	53,12	45,66	42,46	63,09	0,820	0,954	1,026	0,690
44	A2-E141	48,52	53,44	63,05	48,41	62,71	0,908	0,770	1,002	0,774
45	A2-F111	23,75	44,31	20,58		71,75	0,536	1,154		0,331
46	A2-F121	43,61	51,77	43,91	38,96	72,66	0,842	0,993	1,119	0,600
47	A2-F131	56,38	61,55	60,95	52,55	72,21	0,916	0,925	1,073	0,781
48	A2-F141	62,88	61,16	78,39	59,65	72,21	1,028	0,802	1,054	0,871
49	A2-D111L	23,66	46,31	20,65		58,07	0,511	1,146		0,407
50	A2-D121L	41,59	36,97	44,75	42,67	57,37	1,125	0,929	0,975	0,725
51	A2-D131L	50,49	42,88	66,44	50,54	57,73	1,177	0,760	0,999	0,875
52	A2-D141L	55,71	43,14	70,50	53,40	57,37	1,291	0,790	1,043	0,971
53	A2-E111L	23,35	63,69	20,76		70,20	0,367	1,125		0,333
54	A2-E121L	43,54	44,70	45,03	56,53	71,07	0,974	0,967	0,770	0,613
55	A2-E131L	63,62	53,12	67,13	65,03	70,64	1,198	0,948	0,978	0,901
56	A2-E141L	69,47	52,79	87,97	68,22	70,20	1,316	0,790	1,018	0,990
57	A2-F111L	24,29	62,49	20,71		81,83	0,389	1,173		0,297
58	A2-F121L	44,73	52,10	43,35	51,31	81,32	0,859	1,032	0,872	0,550
59	A2-F131L	66,60	60,78	65,03	64,17	81,32	1,096	1,024	1,038	0,819
60	A2-F141L	72,92	60,78	87,27	70,46	81,83	1,200	0,836	1,035	0,891
61	A3-E511L	48,90	117,45	38,15		128,66	0,416	1,282		0,380
62	A3-E521L	94,99	81,91	82,80	102,64	129,86	1,160	1,147	0,925	0,731
63	A3-E531L	122,42	97,06	123,61	118,57	129,26	1,261	0,990	1,033	0,947
64	A3-E541L	145,82	96,61	161,57	125,27	129,26	1,509	0,903	1,164	1,128
65	A3-F511L	51,21	118,01	38,99		153,68	0,434	1,313		0,333
66	A3-F521L	97,62	97,84	82,01	95,96	152,96	0,998	1,190	1,017	0,638
67	A3-F531L	128,65	114,32	124,20	121,38	154,39	1,125	1,036	1,060	0,833
68	A3-F541L	142,93	115,39	165,60	132,58	154,39	1,239	0,863	1,078	0,926

Continua...

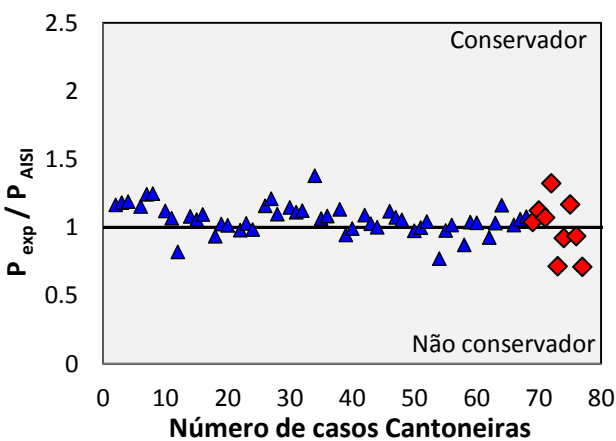
Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	P_{EC-3} (2010) (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{EC-3}}$	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
69	A2-C112	48,31		24,69		90,18		1,957		0,536
70	A2-C122	68,39		50,23	46,49	90,73		1,362	1,471	0,754
71	A2-C132	75,61		73,34	60,87	89,07		1,031	1,242	0,849
72	A2-C142	81,37		92,74	70,59	91,83		0,877	1,153	0,886
73	A2-C212	58,51		32,73		119,32		1,788		0,490
74	A2-C222	84,30		66,72	61,55	120,52		1,263	1,370	0,699
75	A2-C232	97,30		98,28	81,77	119,92		0,990	1,190	0,811
76	A2-C242	104,74		120,25	91,59	119,32		0,871	1,144	0,878
77	A3-C512	89,84		45,29		164,99		1,984		0,545
78	A3-C522	124,62		164,03	83,40	163,46		0,760	1,494	0,762
79	A3-C532	121,03		227,30	111,90	164,22		0,532	1,082	0,737
80	A3-C542	130,92		228,36	126,56	164,99		0,573	1,034	0,793



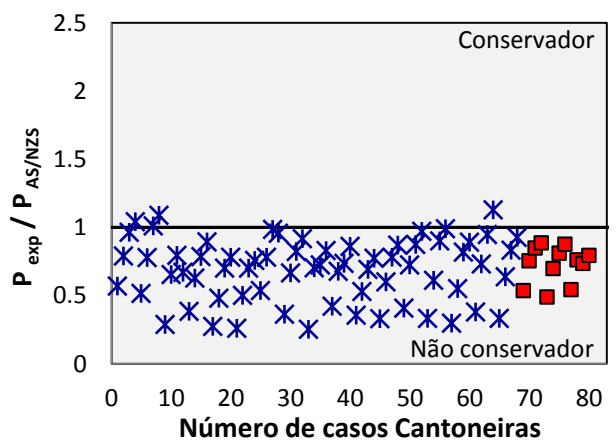
● P Eurocode 1-8 (2010) uma linha de furos



+ Nt,Rd NBR 14762 (2010) uma linha de furos
 x Nt,Rd NBR 14762 (2010) duas linhas de furos



▲ P AISI (2016) uma linha de furos
 ◆ P AISI (2016) duas linhas de furos



* P AS/NZS (2005) uma linha de furos
 ■ P AS/NZS (2005) duas linhas de furos

Figura 4.27 – Avaliação das forças de ruptura dos ensaios em cantoneiras com uma linha de furos e duas linhas de furos, em relação ao carregamento das normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005)

A Tabela 4.4 resume os dados estatísticos da proporção das resistências experimentais e calculadas pelas normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14762 (2010), AISI (2016) e AS/NZS 4600 (2005) utilizando os dados experimentais das cantoneiras com uma linha de furos e duas linhas de furos conectadas em apenas uma das abas.

Tabela 4.4 – Dados estatísticos dos resultados gerados na análise de carregamentos das cantoneiras utilizando as normas

Parâmetros Estatísticos	Uma linha de furos				Duas linhas de furos		
	P_{exp} / P_{EC-3}	$P_{exp} / N_{t,Rd}$	P_{exp} / P_{AISI}	$P_{exp} / P_{AS/NZS}$	$P_{exp} / N_{t,Rd}$	P_{exp} / P_{AISI}	$P_{exp} / P_{AS/NZS}$
Diferença Máxima	1,509	1,520	1,378	1,128	1,984	1,494	0,886
Diferença Mínima	0,367	0,610	0,770	0,252	0,532	1,034	0,490
Média das diferenças	0,959	0,997	1,063	0,688	1,166	1,242	0,728
Desvio Padrão das diferenças	0,294	0,174	0,107	0,230	0,510	0,166	0,136
Coefficiente de Variação das diferenças	0,306	0,174	0,100	0,335	0,438	0,134	0,187
$P_{exp} / P_{EUROCODE / NBR / AISI} < 1$ (%)	50,0	54,4	23,5	94,1	50,0	44,4	100,0
$P_{exp} / P_{EUROCODE / NBR / AISI} \geq 1$ (%)	50,0	45,6	76,5	5,9	50,0	55,6	0,0

Nota: Verificação das normas EUROCODE 1-8 (2010), NBR 14762 (2010), AISI (2016) e AS/NZS 4600 (2005) utilizando os dados experimentais das cantoneiras com uma linha de furos e duas linhas de furos conectadas em apenas uma das abas

Para conexão com uma linha de parafuso, as relações de valores médios de P_{exp} / P_{EC-3} , $P_{exp} / N_{t,Rd}$, P_{exp} / P_{AISI} e $P_{exp} / P_{AS/NZS}$ são, respectivamente, 0,959; 0,997; 1,063 e 0,688; com seus correspondentes coeficientes de variação (COV) de 0,306; 0,174; 0,100 e 0,335; respectivamente. Deve-se salientar que a norma americana AISI S100 (2016) é que tem os melhores valores estatísticos nesta análise com um valor médio de 1,063 e um menor valor de 0,10 para o coeficiente de variação, não deixando de expor que a AISI S100 (2016) ≥ 1 (%) indicam que a norma americana é a mais conservadora com 76,5% e obtém a equação mais complexa para a execução dos cálculos. Já a norma AS/NZS 4600 (2005) tem um valor médio de 0,688 e um maior valor de 0,335 para o coeficiente de variação, e o valor para a AS/NZS 4600 (2005) < 1 (%) é de 94,1%, mostrando que esta norma não é conservadora.

De acordo com está análise e apesar de ter uma equação do coeficiente de ruptura da seção líquida (C_t) mais simplificada, a norma NBR 14762 (2010) se apresentam com um valor médio de 0,997 e o coeficiente de variação 0,174 e valores não conservadores de 45,6% e valores de 54,4% quando são conservadores. Como pode ser visualizado na Tabela 4.4 a norma europeia

EUROCODE 1-8 (2010) não tão satisfatória uma vez que os cálculos são só para uma linha de parafusos.

Para conexão com duas linha de parafusos, as relações de valores médios de $P_{exp} / N_{t,Rd}$, P_{exp} / P_{AISI} e $P_{exp} / P_{AS/NZS}$ são, respectivamente, 1,166; 1,242 e 0,728; com seus correspondentes coeficientes de variação (COV) de 0,438; 0,134 e 0,187; respectivamente. Destaca-se a norma americana AISI S100 (2016) que tem os melhores valores estatísticos nesta análise com um valor médio de 1,242 e um menor valor de 0,134 para o coeficiente de variação, a AISI S100 (2016) ≥ 1 (%) indicam que a norma americana é pouco mais conservadora com 55,6%. Não deixando de expor que a norma AS/NZS 4600 (2005) tem um valor médio de 0,728 e um menor valor de 0,187 para o coeficiente de variação, mas não é conservadora com 100% dos valores abaixo de 1, mostrando que a AS/NZS 4600 (2005) está contra a segurança para os casos de cantoneira conectadas com duas linha de parafusos.

A Tabela 4.5 apresenta os valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios de perfis U (P_{exp}), calculados segundo as normas NBR 14.762 (ABNT, 2010) ($N_{t,Rd}$), AISI S100 (2016) (P_{AISI}), e AS/NZS 4600 (2005) ($P_{AS/NZS}$). Por meio dos dados utilizados na Tabela 4.5 foi realizada uma avaliação de resistência com a proporção das forças ultimas experimentais e das normas avaliadas em relação ao número de casos. Os gráficos das Figuras 4.28 apresentam a distribuição dos resultados da proporção das forças ultimas experimentais e das normas avaliadas em relação ao número de casos, de acordo o número de seções de parafusos, para os casos nos quais ocorreram rupturas da seção líquida com duas ou mais seções de parafusos. A Tabela 4.6 resume os dados estatísticos da proporção das resistências experimentais e calculadas pelas normas citadas.

Tabela 4.5 – Valores das forças de ruptura obtidas nos ensaios em perfis U, calculados segundo as normas NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005)

Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
1	C1-G311W	55,46	42,28		157,37	1,312		0,352
2	C1-G321W	104,38	84,88	137,76	157,93	1,230	0,758	0,661
3	C1-G331W	138,06	126,84	149,75	157,37	1,088	0,922	0,877
4	C1-G341W	167,44	170,39	155,52	158,49	0,983	1,077	1,056
5	C1-I311W	46,66	43,18		191,45	1,081		0,244
6	C1-I321W	86,34	84,88	162,88	188,11	1,017	0,530	0,459
7	C1-I331W	116,69	130,64	183,16	192,79	0,893	0,637	0,605
8	C1-I341W	139,99	169,12	184,13	187,44	0,828	0,760	0,747
9	C1-G411W	81,91	58,53		207,84	1,399		0,394
10	C1-G421W	145,64	117,06	179,89	207,84	1,244	0,810	0,701
11	C1-G431W	186,58	176,07	197,43	208,36	1,060	0,945	0,895

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
12	C1-G441W	231,33	234,76	203,87	208,36	0,985	1,135	1,110
13	C2-G111W	25,37	20,56		83,61	1,234		0,303
14	C2-G121W	45,38	43,35	72,63	82,58	1,047	0,625	0,550
15	C2-G131W	68,35	65,45	79,43	83,09	1,044	0,861	0,823
16	C2-G141W	88,56	86,71	81,29	82,58	1,021	1,089	1,072
17	C2-G211W	32,07	27,69		112,38	1,158		0,285
18	C2-G221W	59,32	59,79	99,03	112,93	0,992	0,599	0,525
19	C2-G231W	82,33	89,69	107,77	112,93	0,918	0,764	0,729
20	C2-G241W	95,35	118,97	110,50	112,38	0,801	0,863	0,848
21	C2-I111W	27,74	20,63		97,99	1,345		0,283
22	C2-I121W	49,73	43,63	86,09	98,61	1,140	0,578	0,504
23	C2-I131W	69,60	65,45	94,14	98,61	1,063	0,739	0,706
24	C2-I141W	82,96	87,83	97,77	99,22	0,945	0,849	0,836
25	C2-I211W	38,01	28,17		133,53	1,349		0,285
26	C2-I221W	67,21	59,79	116,80	134,19	1,124	0,575	0,501
27	C2-I231W	96,76	89,23	127,28	133,53	1,084	0,760	0,725
28	C2-I241W	109,85	118,97	131,43	133,53	0,923	0,836	0,823
29	C2-J211W	39,08	28,61		161,73	1,366		0,242
30	C2-J221W	66,02	59,79	141,95	162,54	1,104	0,465	0,406
31	C2-J231W	96,16	89,23	155,19	161,73	1,078	0,620	0,595
32	C2-J241W	109,22	118,97	160,47	161,73	0,918	0,681	0,675
33	C3-G511W	59,74	41,59		156,60	1,436		0,381
34	C3-G521W	102,54	82,41	135,95	155,19	1,244	0,754	0,661
35	C3-G531W	135,96	124,20	148,68	155,89	1,095	0,914	0,872
36	C3-G541W	173,40	165,60	153,22	155,89	1,047	1,132	1,112
37	C1-G312W	91,77	83,93		142,14	1,093		0,646
38	C1-G322W	132,08	135,23	124,86	143,14	0,977	1,058	0,923
39	C1-G332W	152,41	167,24	136,69	143,65	0,911	1,115	1,061
40	C1-G342W	172,06	176,54	139,99	142,64	0,975	1,229	1,206
41	C1-G412W	119,98	105,13		189,56	1,141		0,633
42	C1-G422W	174,95	234,76	163,66	189,09	0,745	1,069	0,925
43	C1-G432W	210,02	267,76	178,74	188,63	0,784	1,175	1,113
44	C1-G442W	234,49	268,42	185,02	189,09	0,874	1,267	1,240
45	C2-G112W	50,40	42,80		74,34	1,178		0,678
46	C2-G122W	70,52	73,21	66,62	75,75	0,963	1,058	0,931
47	C2-G132W	82,51	89,03	72,41	75,75	0,927	1,139	1,089
48	C2-G142W	92,08	93,14	73,65	74,81	0,989	1,250	1,231
49	C2-G212W	60,10	59,18		101,86	1,016		0,590
50	C2-G222W	84,71	97,23	88,90	101,36	0,871	0,953	0,836
51	C2-G232W	99,72	118,76	96,74	101,36	0,840	1,031	0,984
52	C2-G242W	108,84	126,55	100,17	101,86	0,860	1,087	1,068
53	C2-I112W	54,25	43,63		91,27	1,243		0,594
54	C2-I122W	75,14	85,74	80,17	91,83	0,876	0,937	0,818
55	C2-I132W	87,64	107,07	88,20	92,40	0,819	0,994	0,948

Continua...

Num. Ensaio	Perfil	P_{exp} (kN)	$N_{t,Rd}$ (2010) (kN)	P_{AISI} (2016) (kN)	$P_{AS/NZS}$ (2005) (kN)	$\frac{P_{exp}}{N_{t,Rd}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AISI}}$	$\frac{P_{exp}}{P_{AS/NZS}}$
56	C2-I142W	97,35	113,32	90,49	91,83	0,859	1,076	1,060
57	C2-I212W	68,89	59,18		122,91	1,164		0,561
58	C2-I222W	95,42	113,33	106,48	122,29	0,842	0,896	0,780
59	C2-I232W	116,64	141,99	117,15	122,91	0,821	0,996	0,949
60	C2-I242W	128,20	152,85	122,17	124,13	0,839	1,049	1,033
61	C3-I512W	92,73	70,46		169,84	1,316		0,546
62	C3-I522W	147,48	164,81	148,36	170,62	0,895	0,994	0,864
63	C3-I532W	179,34	236,15	162,53	170,62	0,759	1,103	1,051
64	C3-I542W	195,83	237,23	168,64	171,40	0,825	1,161	1,143
65	C3-J512W	90,20	71,08		211,62	1,269		0,426
66	C3-J522W	147,92	165,60	183,76	210,65	0,893	0,805	0,702
67	C3-J532W	188,57	247,22	201,10	209,69	0,763	0,938	0,899
68	C3-J542W	215,60	290,23	207,98	209,69	0,743	1,037	1,028

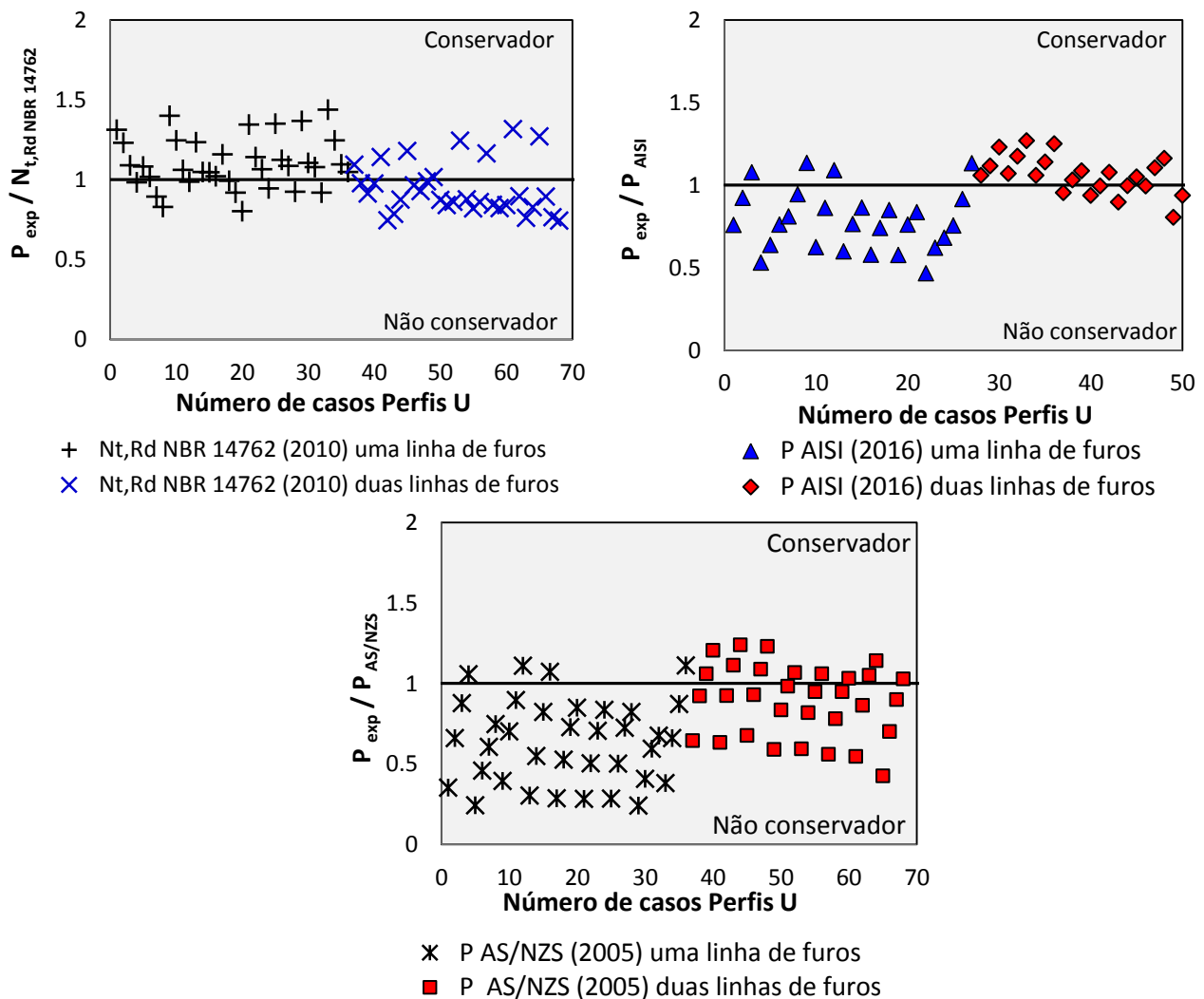


Figura 4.28 – Avaliação das forças de ruptura dos ensaios em perfis U com uma linha de furos e duas linhas de furos, em relação ao carregamento das normas NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005)

Tabela 4.6 –Dados estatísticos dos resultados gerados na análise de carregamentos dos perfis U utilizando as normas

Parâmetros Estatísticos	Uma linha de furos			Duas linhas de furos		
	$P_{exp} / N_{t,Rd}$	P_{exp} / P_{AISI}	$P_{exp} / P_{AS/NZS}$	$P_{exp} / N_{t,Rd}$	P_{exp} / P_{AISI}	$P_{exp} / P_{AS/NZS}$
Diferença Máxima	1,436	1,135	1,112	1,316	1,267	1,240
Diferença Mínima	0,801	0,465	0,242	0,743	0,896	0,426
Média das diferenças	1,100	0,788	0,635	0,940	1,059	0,892
Desvio Padrão das diferenças	0,162	0,184	0,258	0,160	0,113	0,221
Coefficiente de Variação das diferenças	0,147	0,233	0,407	0,170	0,106	0,248
$P_{exp} / P_{NBR / AISI / AS/NZS} < 1$ (%)	27,8	85,2	88,9	75,0	33,3	62,5
$P_{exp} / P_{NBR / AISI / AS/NZS} \geq 1$ (%)	72,2	14,8	11,1	25,0	66,7	37,5

Nota: Verificação das normas NBR 14762 (2010), AISI (2016) e AS/NZS (2005) utilizando os dados experimentais dos perfis U com uma linha de furos e duas linhas de furos conectados somente na alma do perfil

A Tabela 4.6 resume os dados estatísticos da proporção das resistências experimentais e calculadas pelas normas NBR 14.762 (ABNT, 2010), AISI S100 (2016) e AS/NZS 4600 (2005) utilizando os dados experimentais dos perfis U com uma linha de furos e duas linhas de furos conectados apenas na alma do perfil.

Para conexão com uma linha de parafuso, as relações de valores médios de $P_{exp} / N_{t,Rd}$, P_{exp} / P_{AISI} e $P_{exp} / P_{AS/NZS}$ são, respectivamente, 1,100; 0,788 e 0,635 com seus correspondentes coeficientes de variação (COV) de 0,147; 0,233 e 0,407; respectivamente. Deve-se salientar que a norma brasileira NBR 14.762 (ABNT, 2010) é que tem os melhores valores estatísticos nesta análise com um valor médio de 1,100 e um menor valor de 0,147 para o coeficiente de variação, não deixando de expor que a NBR 14.762 (ABNT, 2010) ≥ 1 (%) indicam que a norma brasileira é a que está apresentando resultados mais conservadores para 72,2% dos casos avaliados. Já a norma AS/NZS 4600 (2005) tem um valor médio de 0,635 e um maior valor de 0,407 para o coeficiente de variação, e o valor para a AS/NZS 4600 (2005) < 1 (%) é de 88,9%, mostrando que esta norma não é conservadora.

De acordo com esta análise e apesar de ter uma equação do coeficiente de ruptura da seção líquida (C_t) mais simplificada, a norma NBR 14762 (2010) se apresentam com os melhores valores estatísticos para os casos de perfis U conectados com uma linha de parafusos na alma do perfil.

Para conexão com duas linha de parafusos, as relações de valores médios de $P_{exp} / N_{t,Rd}$, P_{exp} / P_{AISI} e $P_{exp} / P_{AS/NZS}$ são, respectivamente, 0,940; 1,059 e 0,892; com seus correspondentes coeficientes de variação (COV) de 0,170; 0,106 e 0,248; respectivamente. Destaca-se a norma americana AISI S100 (2016) que tem os melhores valores estatísticos nesta análise com um valor

médio de 1,059 e um menor valor de 0,106 para o coeficiente de variação, a AISI S100 (2016) ≥ 1 (%) indicam que a norma americana é pouco mais conservadora com 66,7%. Não deixando de expor que a norma brasileira NBR 14.762 (ABNT, 2010) tem um valor médio de 0,940 e um menor valor de 0,170 para o coeficiente de variação, mas não é conservadora com 75,0% dos valores abaixo de 1, mostrando que a NBR 14.762 (ABNT, 2010) está contra a segurança para os casos de perfis U conectadas com duas linha de parafusos na alma do perfil.

Como pode ser visualizado na Tabela 4.5 e Tabela 4.6 a norma europeia EUROCODE 1-8 (2010) não apresenta cálculos de ruptura da seção líquida em Perfis U com conexões executadas na alma do perfil.

4.3.2 Avaliação de desempenho do coeficiente ($C_{t,exp}$) em cantoneiras

De modo a avaliar o desempenho do coeficiente ($C_{t,exp}$) em relação as variáveis reais, identificadas nos perfis, surge-se a necessidade de identificar a correlação entre essas variáveis. A seguir, apresenta-se a avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a distância \bar{x} , avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a razão entre a largura da aba conectada e a largura da aba desconectada, avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a espessura da aba conectada e a avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a relação entre a largura da aba conectada de uma cantoneira e o diâmetro do parafuso.

Na Figura 4.29 está correlacionado o valor da distância \bar{x} , medida do plano conectado ao centro de gravidade, com o coeficiente $C_{t,exp}$.

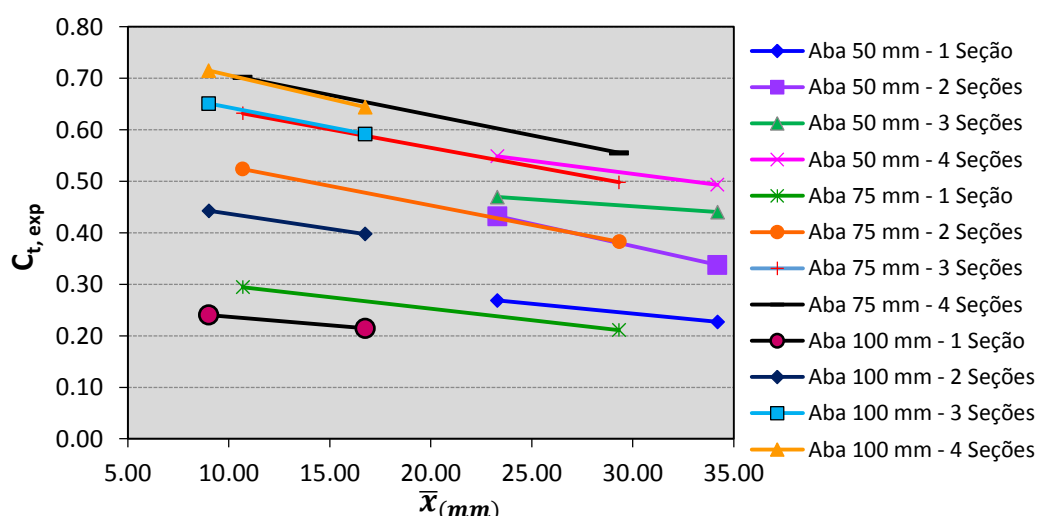


Figura 4.29 – Avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a distância \bar{x}

Observa-se a partir da Figura 4.29, que realmente existe uma forte correlação entre o valor de \bar{x} e o valor do coeficiente $C_{t,exp}$, o qual diminui à medida que \bar{x} aumenta. Nota-se, também, que a eficiência da seção aumenta à medida que aumenta o número de seções de parafusos (e consequentemente, o comprimento total da ligação).

A Figura 4.30 avalia a existência de correlação direta entre o valor do coeficiente $C_{t,exp}$ e a razão entre as larguras das abas conectadas (b_c) e desconectadas (b_d).

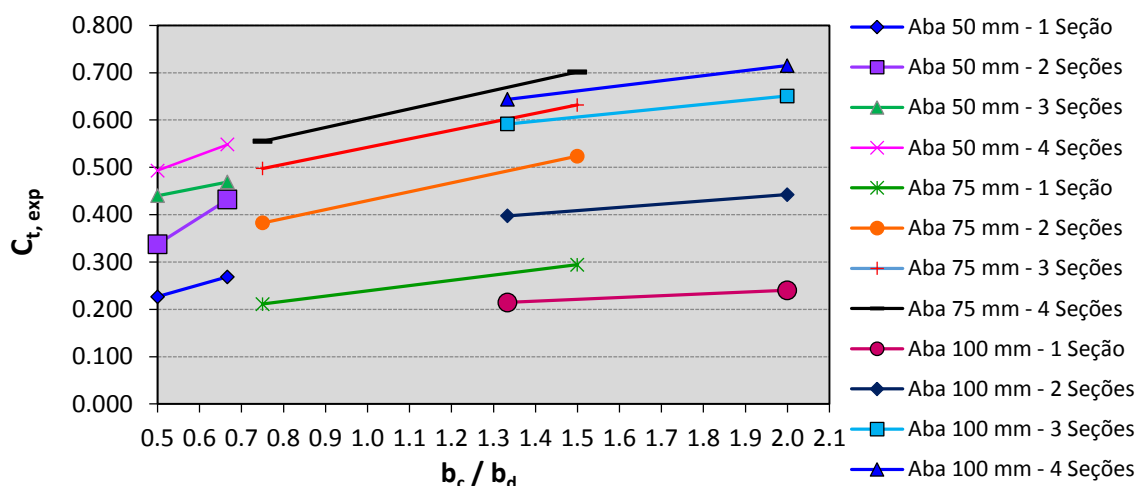


Figura 4.30 – Avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a razão entre a largura da aba conectada e a largura da aba desconectada de uma cantoneira

A Figura 4.30 mostra que existe uma tendência de aumento do coeficiente $C_{t,exp}$ à medida que a razão entre a aba conectada (b_c) e a aba desconectada (b_d) aumenta. Ou seja, mantendo-se constante a largura b_c , o valor de $C_{t,exp}$ diminui à medida que a largura b_d aumenta.

A Figura 4.31 apresenta a distribuição dos valores do coeficiente $C_{t,exp}$ em função da relação entre largura (b_c) e a espessura (t) da aba conectada para cantoneiras de abas iguais, cujo modo de falha foi a ruptura da seção líquida.

Os resultados dos demais tipos de cantoneiras, como as de abas desiguais e com excentricidade da ligação, não foram inseridos na Figura 4.29, pois os coeficientes $C_{t,exp}$ dessas, fatalmente introduzem novas correlações e, dessa maneira, podem mascarar a possível correlação existente entre $C_{t,exp}$ e b_c/t .

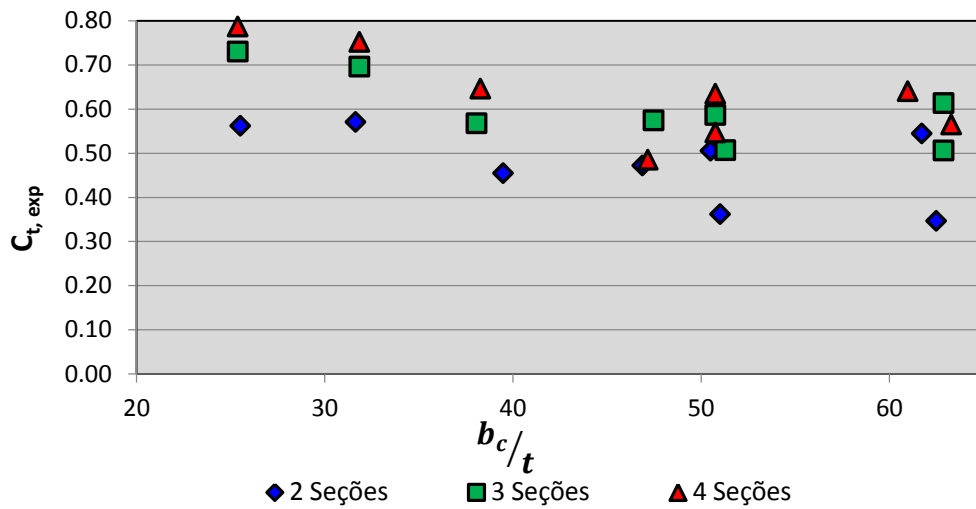


Figura 4.31 – Avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a espessura da aba conectada de uma cantoneira

A Figura 4.31 apresenta uma leve correlação entre os valores pesquisados, indicando que o coeficiente $C_{t,exp}$ diminui à medida que o valor de b_c/t aumenta. Este aumento da relação b_c/t é produzido tanto pelo aumento da largura da aba conectada quanto pela redução da espessura. Como o aumento da largura da aba conectada contribui pouco para a alteração do valor da distância \bar{x} , supõe-se que seja significativa a correlação existente entre b_c/t e $C_{t,exp}$.

Buscando avaliar a relação entre a largura da aba conectada e o diâmetro do parafuso (d) que possa ajudar na quantificação da eficiência da ligação parafusada submetida à tração, apresenta-se a Figura 4.32, na qual estão distribuídos os resultados das cantoneiras de abas iguais ensaiadas neste trabalho.

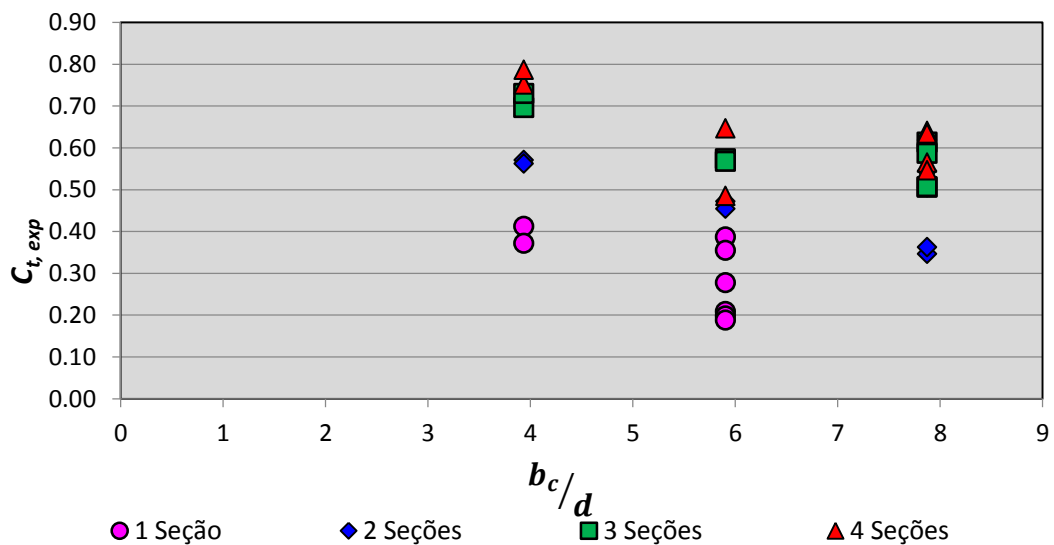


Figura 4.32 – Avaliação de correlação entre o coeficiente $C_{t,exp}$ e a relação entre a largura da aba conectada de uma cantoneira e o diâmetro do parafuso

Nesse caso, foi observada uma tendência mais direta entre o aumento da relação b_c/d e uma redução do coeficiente de redução da área líquida ($C_{t,exp}$). Como existem outros fatores que afetam o valor do coeficiente $C_{t,exp}$, esta correlação deverá ser comprovada na análise do conjunto das possíveis influências.

Após a apresentação e análise dos resultados parciais dos ensaios, é possível identificar as diversas tendências da eficiência da ligação parafusada em cantoneiras e perfis U, quando determinados parâmetros são alterados, tais como largura da aba desconectada para cantoneiras, largura dos flanges desconectados para perfis U, número de parafusos por seção, além de confirmação daquelas correlações tradicionais, como o comprimento da ligação e a excentricidade do plano da ligação até o centro de gravidade.

Também, foi observado, que apenas esses parâmetros tradicionalmente utilizados parecem não representar adequadamente diversos casos de ligações em perfis U e cantoneiras, mesmo naquelas cantoneiras com abas iguais e uma única linha de parafusos.

De maneira a obter uma relação que considere as diversas variáveis reais presentes em uma ligação bastante assimétrica, como as que ocorrem em cantoneiras e em perfis U, e especialmente, naqueles perfis formados a frio (cuja pequena espessura das chapas tende a provocar grandes não linearidades), propõe-se uma regressão estatística buscando modelar o comportamento do coeficiente de redução da área líquida (C_t) através das diversas variáveis reais identificadas e dos resultados obtidos.

4.3.3 Verificação em cantoneiras com chapas de fixação de diferentes espessuras

A Tabela 4.7 apresenta as cantoneiras A2-B131 que foram ensaiadas com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t,exp}$ e o $C_{t,NBR 14762}$.

Tabela 4.7 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t,exp}$ e o $C_{t,NBR 14762}$ nas cantoneiras A2-B131

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	X (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. Pu (kN)	$C_{t,exp}$	$C_{t,NBR 14762}$
6,35	A2-B131	75	75	1,60	597	12,7	235,79	213,07	19,48	76,20	16,18	50,22	0,514	0,693
10	A2-B131	75	75	1,59	597	12,7	234,35	211,77	19,48	76,20	12,66	51,50	0,530	0,693
12,7	A2-B131	75	75	1,58	598	12,7	232,90	210,46	19,47	76,20	18,92	55,40	0,574	0,693

A Figura 4.33 mostra as curvas de força-deslocamento das cantoneiras com as mesmas dimensões (A2-B131), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes.

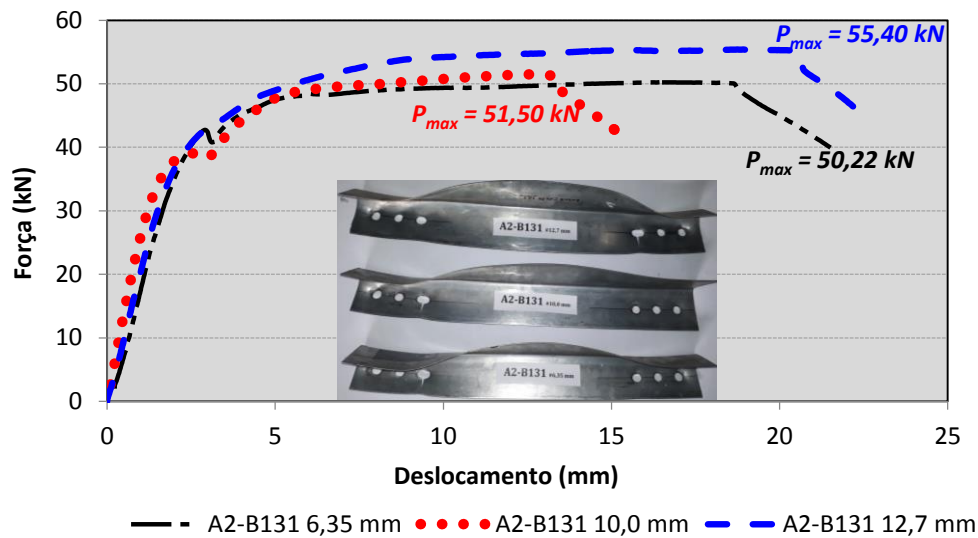


Figura 4.33 – Cantoneiras 75x75#1,55 mm, (A2-B131) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos

Na análise das curvas na Figura 4.33, pôde-se verificar que não existem grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. As cantoneiras, A2-B131 conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, A2-B131 conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e A2-B131 conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 3,14 em relação ao deslocamento e 2,70 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

A Tabela 4.8 apresenta as cantoneiras A2-B231 que foram ensaiadas com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp.}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$.

Tabela 4.8– Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp.}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$ nas cantoneiras A2-B231

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{X} (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. Pu (kN)	$C_{t\ exp.}$	$C_{t\ NBR\ 14762}$
6,35	A2-B231	75	75	1,98	598	12,7	290,56	262,44	19,66	76,20	21,94	72,61	0,553	0,690
10	A2-B231	75	75	1,96	598	12,7	287,69	259,85	19,65	76,20	20,14	72,47	0,557	0,691
12,7	A2-B231	75	75	1,97	597	12,7	289,12	261,15	19,65	76,20	19,11	74,15	0,567	0,691

A Figura 4.34 apresenta as curvas de força-deslocamento das cantoneiras com as mesmas dimensões (A2-B231), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes.

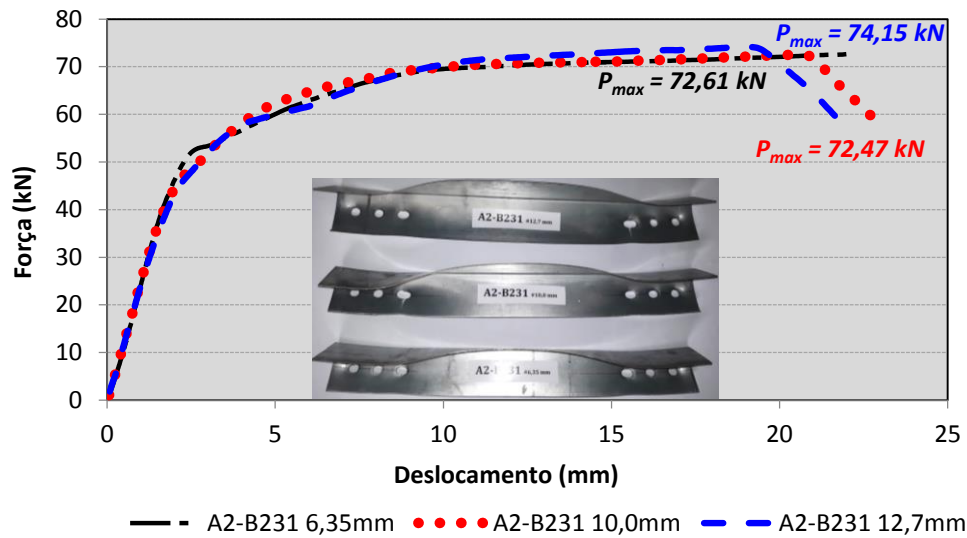


Figura 4.34 – Cantoneiras 75x75#1,95 mm, (A2-B231) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos

Por meio da análise das curvas na Figura 4.34, pôde-se verificar que não existem grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. As cantoneiras, A2-B231 conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, A2-B231 conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e A2-B231 conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 1,43 em relação ao deslocamento e 0,93 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

São apresentados na Tabela 4.9, as cantoneiras A2-C132 que foram ensaiadas com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp}$, e o $C_{t\ NBR\ 14762}$.

Tabela 4.9 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp}$, e o $C_{t\ NBR\ 14762}$ nas cantoneiras A2-C132

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{X} (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. Pu (kN)	$C_{t\ exp}$	$C_{t\ NBR\ 14762}$
6,35	A2-C132	100	100	1,61	598	12,7	317,74	272,02	25,74	76,20	6,53	77,65	0,622	0,595
10	A2-C132	100	100	1,60	600	12,7	315,79	270,35	25,73	76,20	5,57	74,89	0,604	0,595
12,7	A2-C132	100	100	1,59	596	12,7	313,85	268,69	25,73	76,20	5,89	75,61	0,613	0,595

A Figura 4.35 apresenta as curvas de força-deslocamento das cantoneiras com as mesmas dimensões (A2-C132), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes.

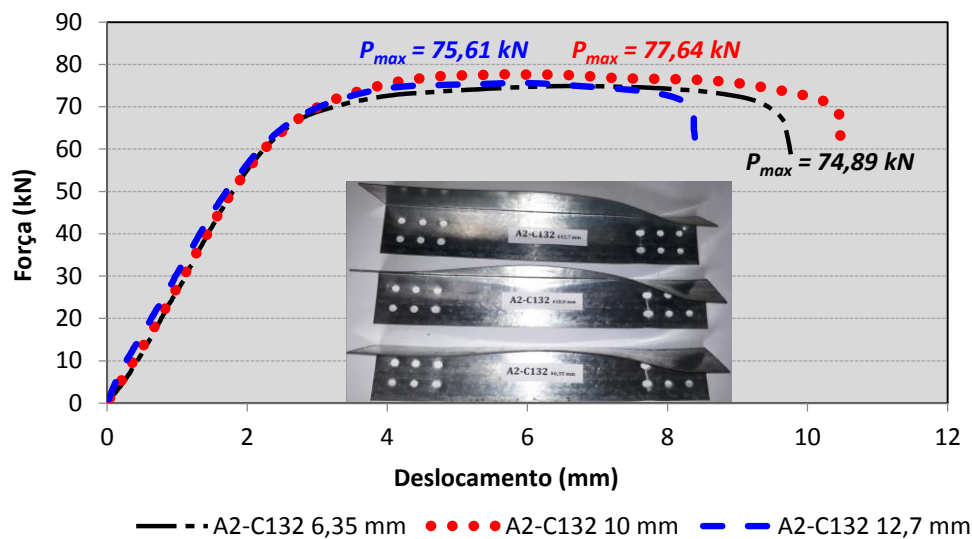


Figura 4.35 – Cantoneiras 100x100#1,55 mm, (A2-C132) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos

Pôde-se verificar que as curvas da Figura 4.35 não apresentam grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. As cantoneiras, A2-C132 conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, A2-C132 conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e A2-C132 conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 0,49 em relação ao deslocamento e 1,43 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

São apresentados na Tabela 4.10, as cantoneiras A2-C232 que foram ensaiadas com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp}$, e o $C_{t\ NBR\ 14762}$.

Tabela 4.10 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp}$, e o $C_{t\ NBR\ 14762}$ nas cantoneiras A2-C232

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_c (mm)	b_d (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{X} (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. P_u (kN)	$C_{t\ exp}$	$C_{t\ NBR\ 14762}$
6,35	A2-C232	100	100	1,97	599	12,7	387,62	331,67	25,90	76,20	8,42	86,12	0,519	0,592
10	A2-C232	100	100	1,96	599	12,7	385,69	330,02	25,90	76,20	7,87	95,91	0,581	0,592
12,7	A2-C232	100	100	1,97	600	12,7	387,62	331,67	25,90	76,20	7,47	97,30	0,586	0,592

As curvas de força-deslocamento das cantoneiras com as mesmas dimensões (A2-C132), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes são apresentadas na Figura 4.36.

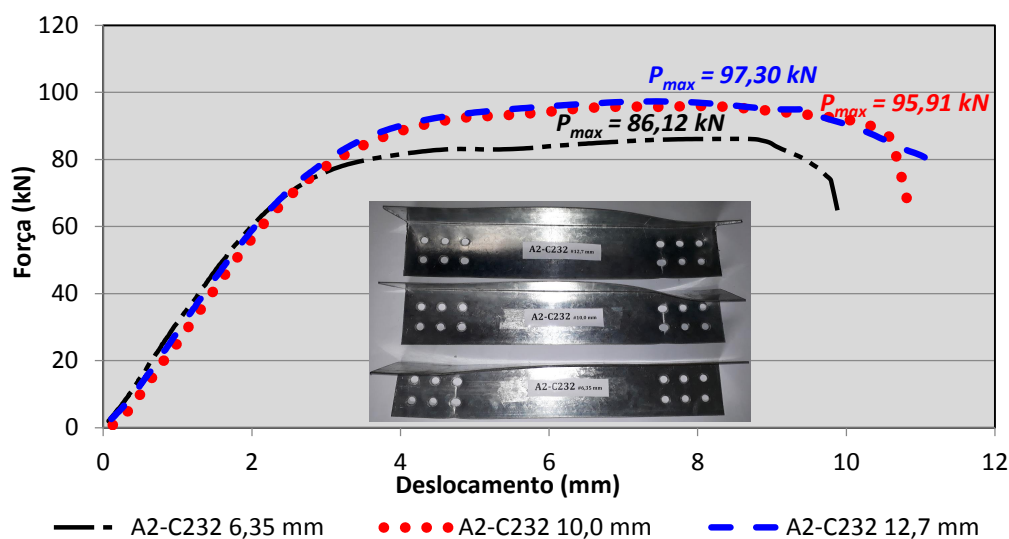


Figura 4.36 – Cantoneiras 100x100#1,95 mm, (A2-C232) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos

As curvas da Figura 4.36 mostram que não existem grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. As cantoneiras, A2-C232 conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, A2-C232 conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e A2-C232 conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 0,48 em relação ao deslocamento e 6,09 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

4.3.4 Verificação em perfis U com chapas de fixação de diferentes espessuras

A verificação em perfis U C1-I331W, ensaiados com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$, estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp.}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$ nos perfis U (C1-I331W)

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	X (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. P_u (kN)	$C_{t\ exp.}$	$C_{t\ NBR\ 14762}$
6,35	C1-I331W	120	45	2,71	595	12,7	544,96	506,48	10,84	76,20	35,51	120,72	0,459	0,829
10	C1-I331W	120	45	2,76	594	12,7	554,56	515,37	10,86	76,20	40,09	117,27	0,438	0,829
12,7	C1-I331W	120	45	2,75	600	12,7	552,64	513,59	10,86	76,20	44,09	116,69	0,437	0,829

A Figura 4.37 apresenta as curvas de força-deslocamento dos perfis U com as mesmas dimensões (C1-I331W), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes.

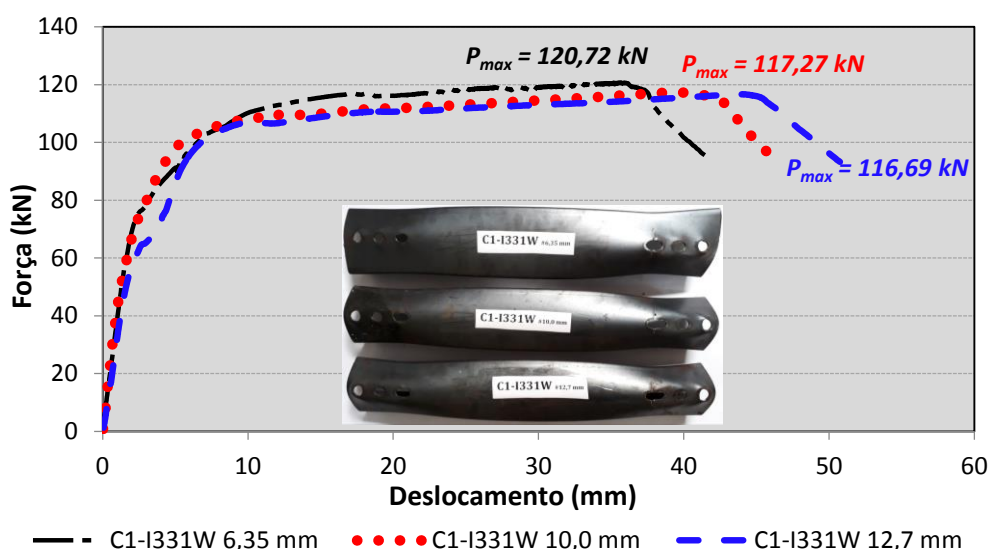


Figura 4.37 – Perfil U COR 420 #2,65 mm (C1-I331W) conectados na alma, com uma linha de parafusos

As curvas da Figura 4.37 mostram que não existem grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. Os perfis U, C1-I331W conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, C1-I331W conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e C1-I331W conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 4,29 em relação ao deslocamento e 2,18 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

A Tabela 4.12 apresenta as cantoneiras C2-I231W que foram ensaiadas com chapas de fixação de diferentes espessuras, com suas propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp.}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$.

Tabela 4.12 – Propriedades geométricas, deslocamento na força máxima de ruptura, a força última de ensaio, o $C_{t\ exp.}$ e o $C_{t\ NBR\ 14762}$ nos perfis U (C2-I231W)

Chapa de Fixação (mm)	Perfil	b_w (mm)	b_f (mm)	t (mm)	L_{perfil} (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_n (mm ²)	\bar{X} (mm)	L (mm)	Deslocamento (mm)	Força Última Exp. P_u (kN)	$C_{t\ exp.}$	$C_{t\ NBR\ 14762}$
6,35	C2-I231W	120	45	1,96	599	12,7	398,97	371,14	10,51	76,20	27,37	95,33	0,513	0,835
10	C2-I231W	120	45	1,97	598	12,7	400,94	372,97	10,51	76,20	27,71	91,59	0,491	0,834
12,7	C2-I231W	120	45	1,95	597	12,7	397,00	369,31	10,50	76,20	27,52	96,76	0,524	0,835

A Figura 4.38 apresenta as curvas de força-deslocamento dos perfis U com as mesmas dimensões (C2-I231W), conectadas por chapas de fixação com espessuras diferentes.

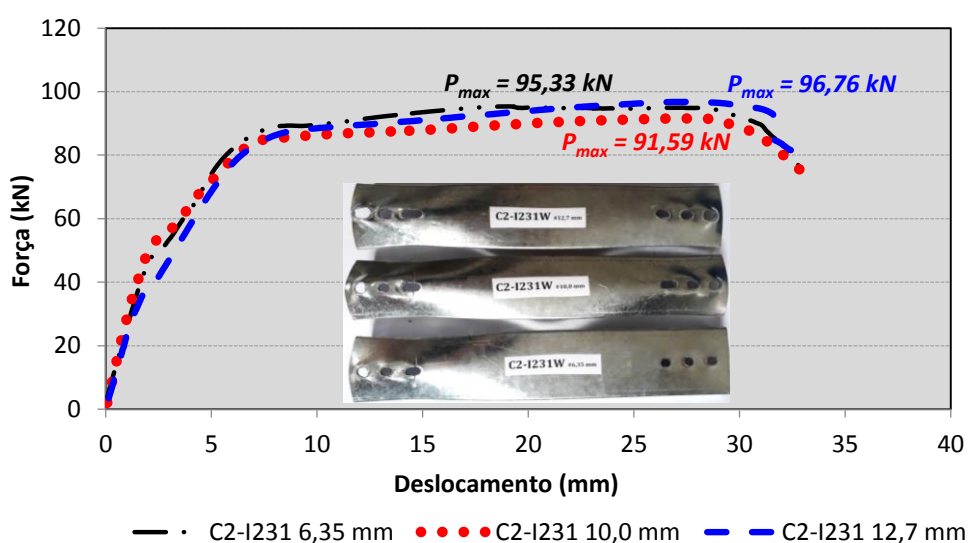


Figura 4.38 – Perfil U ZAR 345 #1,95 mm, C2-I231W conectadas pela alma, com uma linha de parafusos

Por meio da análise das curvas na Figura 4.38 pôde-se verificar que não existem grandes diferenças nos resultados, quando se realiza ensaios com chapas de fixação de diferentes espessuras. As cantoneiras, C2-I231W conectada na chapa de fixação com 6,35 mm de espessura, C2-I231W conectada na chapa de fixação com 10 mm de espessura e C2-I231W conectada na chapa de fixação com 12,7 mm de espessura tiveram um desvio padrão de 0,17 em relação ao deslocamento e 2,67 em relação à força aplicada nos ensaios. Subsequente os modos de ruptura após os ensaios foram os mesmos, com ruptura da seção líquida (R.S.L).

No Apêndice B se encontra a documentação fotográfica dos perfis ensaiados com chapas de fixação compostas de diferentes espessuras, nos quais pode ser visualizado que os modos de ruptura foram os mesmos para todos os perfis testados, e também, as deformadas experimentais ficaram bem próximas para ensaios realizados com chapas de fixação compostas de diferentes espessuras.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM ESTATÍSTICA

5. MODELAGEM ESTATÍSTICA

5.1 INTRODUÇÃO DA MODELAGEM ESTATÍSTICA

Após a apresentação e análise dos resultados dos ensaios no capítulo anterior, é possível identificar as diversas tendências da eficiência da ligação parafusada em cantoneiras e perfis U, formados a frio, além de confirmação daquelas correlações tradicionais, como o comprimento da ligação e a excentricidade do plano da ligação até o centro de gravidade.

Foi observado, também, que apenas estes parâmetros tradicionalmente utilizados parecem não representar adequadamente diversos casos de ligações em cantoneiras e perfis U.

De maneira a obter uma relação que considere as diversas variáveis presentes em uma ligação bastante assimétrica como as que ocorrem em cantoneiras e perfis U, especialmente, naqueles formadas a frio (cuja pequena espessura das chapas tende a provocar grandes não-linearidades), foi realizada uma análise de função discriminante estatística buscando maximizar a discriminação entre os grupos, e também foi realizada uma regressão estatística buscando modelar o comportamento do coeficiente de redução da área líquida (C_t), por meio das diversas variáveis identificadas e dos resultados obtidos.

Apresentam-se, a seguir, alguns conceitos importantes para a compreensão e avaliação dos resultados de uma análise de função discriminante e de uma regressão estatística.

5.2 ANÁLISE DE FUNÇÃO DISCRIMINANTE

Os autores AAKER et al. (2004, p. 552) afirmam que: “A análise discriminante envolve a derivação da combinação linear de duas (ou mais) variáveis independentes que vão melhor discriminar entre dois grupos predefinidos. Isso é obtido por meio do critério estatístico de maximização da variância entre grupos, em relação à variância dentro do grupo. A combinação linear (conhecida como função discriminante ou eixo) para uma análise discriminante é derivada de uma equação”.

Segundo a STATSOFT(2011) a análise de função discriminante é usada para determinar quais variáveis discriminam entre dois ou mais grupos, que ocorrem naturalmente. É uma técnica de redução de dimensionalidade que visa maximizar a discriminação entre os grupos. Computacionalmente, a análise da função discriminante é muito semelhante à análise de variância (ANOVA). Neste contexto, a ideia básica subjacente à análise da função

discriminante é determinar se os grupos diferem em relação à média de uma variável e, em seguida, usar essa variável para prever a associação ao grupo (por exemplo, de novos casos).

Por exemplo, um pesquisador engenheiro de estruturas metálicas, pode querer investigar quais variáveis discriminam os modos de ruptura, realizados em ensaios experimentais com vigas metálicas tipo I biapoiadas, com conexões parafusadas, a saber: (1) flambagem local da alma (FLA), (2) flambagem local da mesa comprimida (FLM), ou (3) flambagem lateral com torção (FLT) (PEREIRA e GOMES, 2014) (NBR 8800 ABNT, 2008). Para isso, o pesquisador poderia coletar dados sobre diversas variáveis em relação a esses modos de ruptura. Após os ensaios, as variáveis se encaixariam naturalmente em um dos três modos de ruptura. A Análise discriminante poderia então ser usada para determinar quais variáveis podem ser os melhores preditores dos ensaios experimentais realizados em vigas tipo I biapoiadas com conexões parafusadas.

No caso de uma única variável, o teste final de significância, se uma variável discrimina ou não entre os grupos é o teste F. Conforme descrito em conceitos elementares da ANOVA / MANOVA, F (de Fisher) é essencialmente calculado como a razão entre a variação entre grupos nos dados sobre a variação média agrupada dentro do grupo. Os F (de Fisher) que forem significativos vão indicar as variáveis que tem alto poder discriminante.

A significância dos modelos é estabelecida com base nos valores da *Wilks`Lambda*, que é comumente usado em análise discriminante (RENCHE, 2002; JOHNSON e WICHERN, 2007; POLIT, 2009). O seu valor indica a existência de diferenças entre os grupos (modos de ruptura), ou seja, o fato de que dois ou mais grupos têm diferenças entre si.

De acordo com Kachigan (1991), a análise discriminante foi conceitualmente descrita como uma fusão das três funções essenciais da análise estatística (redução de dimensionalidade, inferência e identificação de associação entre variáveis). Através dela, podemos classificar os indivíduos em grupos, baseando-se em uma ou mais variáveis preditoras, ou para distinguir grupos com base em combinações de variáveis.

5.2.1 Análise de função discriminante em cantoneiras

Para a realização das análises de função discriminante, foi utilizado o programa STATISTICA, versão 10 (STATSOFT, 2011). Os gráficos (*scatterplots*) foram confeccionados utilizando o programa (PAST 3.20, 2018).

Apenas aquelas variáveis que se mostraram estatisticamente significativas foram incorporadas ao modelo. Assim, foram selecionadas as seguintes características geométricas das cantoneiras que pudessem expressar as condições especificadas:

- a. distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade (\bar{x});
- b. comprimento total da ligação (L);
- c. largura total da aba desconectada (b_d);
- d. largura líquida da aba conectada (b_{cn});
- e. espessura da chapa do perfil (t);
- f. largura total da aba conectada (b_c);
- g. diâmetro do parafuso (d);
- h. resistência última do aço (f_u);
- i. resistência ao escoamento do aço (f_y).

Por intermédio dos resultados experimentais de ensaios com 96 cantoneiras, executados neste trabalho, buscou-se determinar o conjunto de características que permitisse a melhor discriminação entre os modos de ruptura, ou seja, a fim de apresentar quais variáveis melhor prediziam estes modos de ruptura que foram determinados nos ensaios. A Tabela 5.1 apresenta o resumo de análise de função discriminante com modelo de 6 variáveis e 3 grupos de modos de ruptura (Esmag., Esmag-Rasg. e R.S.L)

Tabela 5.1 – Análise de função discriminante dos modos de ruptura em cantoneiras

Wilks' Lambda: 0,598992 aprox. F (12,176) = 4,2850 p <, 0000				
Variável	Wilks' Lambda	F (Fisher)	p-level	1-Toler. (R-Sqr)
\bar{x}/L	0,599321	0,029352	0,971084	0,131154
b_{cn}/b_c	0,634416	2,607624	0,079398	0,971137
b_d/b_c	0,631916	2,423932	0,094466	0,953721
$t/(b_c+b_d)$	0,640082	3,023900	0,053691	0,940296
d/b_d	*0,654109	*4,054368	*0,020686	*0,916904
f_u/f_y	*0,678798	*5,868166	*0,004052	*0,760919

Segundo Johnson e Wichern (2007) e Ponte (2005) o *Wilks' Lambda* (Λ) é um dos testes mais amplamente utilizados da Estatística, no sentido de discriminar os grupos. Ele é baseado em três matrizes, dentre as quais, W é a matriz de dispersão dos erros (ou seja, a matriz de somas “dentro” de quadrados e produtos cruzados para as variáveis dependentes que

não são contabilizados pelos preditores no projeto), B é a matriz de dispersão das hipóteses (ou seja, a matriz de somas “entre” quadrados e produtos cruzados para as variáveis dependentes que são contabilizadas por todos os preditores no projeto) e $W+B$ é a matriz de dispersão total (ou seja, as somas de quadrados e produtos cruzados para as variáveis dependentes que são contabilizadas por um efeito particular). A equação 5.1 mostra a *Wilks` Lambda*.

$$\Lambda = \frac{|W|}{|W+B|} \quad (5.1)$$

O *Wilks` Lambda*, que varia de 0 a 1, propicia a avaliação da existência de diferenças de médias entre os grupos para cada variável, e quanto menor o *Wilks` Lambda*, maior o grupo entre dispersão. Um pequeno valor (próximo de 0) de *Wilks` Lambda* significa que os grupos estão bem separados, um grande valor (próximo de 1) de *Wilks` Lambda* significa que os grupos são mal separados. (POLIT, 2009; ONWUKWE, OGBONNA e AYENI, 2014).

A função discriminante foi significativa, com *Wilks` Lambda* de 0,598992 (p-valor < 0,0000). Isto indica a existência de diferenças entre modos de ruptura, ou dito de modo mais preciso, indica que dois ou mais grupos têm diferenças maiores que as esperadas por simples acaso entre si. O modelo foi constituído por cinco variáveis que têm um efeito significativo sobre a discriminação entre grupos (GARSON, 2008). Com base nos valores de *Wilks` lambda* para determinadas variáveis, o grau em que cada variável individual contribui para a discriminação entre grupos foi determinado. Duas variáveis são mais importantes que as demais no sentido de discriminar os grupos e estão marcados com asterisco, (f_u/f_y) e (d/b_a) que contém o F (Fisher) significativo com os maiores valores da Tabela 5.1. A variável (f_u/f_y) é a ductilidade do aço, referente aos aços galvanizados ZAR 345 e ZAR 400 materiais utilizado neste trabalho.

A análise discriminante calcula automaticamente as funções de classificação. Estas não devem ser confundidas com as funções discriminantes. As funções de classificação são um subproduto da análise discriminante, podem ser usadas para determinar a qual grupo cada caso provavelmente pertence. Portanto, a probabilidade *a priori* em funções de classificação é proporcional ao tamanho dos grupos, de modo que cada função nos permite calcular os escores de classificação para cada caso, para cada grupo. A função de classificação mostra o coeficiente de cada variável para fazer o cálculo em cada um dos modos de ruptura. Existe

uma chance muito maior de um novo perfil se romper por R.S.L. do que os outros grupos, pois o valor de p indica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura na análise de função de classificação apresentada na Tabela 5.2.

De acordo com Johnson e Wichern (2007), a função geral de classificação pode ser representada pela seguinte equação linear, em que Z_n é a variável dependente, α é o intercepto, X_1, X_2 e X_n são as variáveis explicativas e β_1, β_2 e β_n são os coeficientes discriminantes para cada variável explicativa.

$$Z_n = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (5.2)$$

Os resultados da função de classificação em relação aos modos de ruptura são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análise de função classificação dos modos de ruptura em cantoneiras

Variável	Esmag. $p = 0,07292$	Esmag-Rasg. p $= 0,16667$	R.S.L. $p = 0,76042$
\bar{x}/L	-12,1	-12,6	-12,7
b_{cn}/b_c	18069,5	18212,6	18185,8
bd/b_c	2078,1	2090,3	2093,3
$t/(bc+bd)$	154804,7	155934,5	155022,1
d/bd	6066,5	6063,5	6117,2
f_u/f_y	2001,2	2017,5	1998,1
Constante	-11211,2	-11372,9	-11325,7

$$\mathbf{Esmag.} = -11211,2 + 2001,2 \frac{f_u}{f_y} + 6066,5 \frac{d}{bd} + 154804,7 \frac{t}{(bc+bd)} + 2078,1 \frac{bd}{b_c} + 18069,5 \frac{b_{cn}}{b_c} - 12,1 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{Esmag.- Rasg.} = -11372,9 + 2017,5 \frac{f_u}{f_y} + 6063,5 \frac{d}{bd} + 155934,5 \frac{t}{(bc+bd)} + 2090,3 \frac{bd}{b_c} + 18212,6 \frac{b_{cn}}{b_c} - 12,6 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{R.S.L.} = -11325,7 + 1998,1 \frac{f_u}{f_y} + 6117,2 \frac{d}{bd} + 155022,1 \frac{t}{(bc+bd)} + 2093,3 \frac{bd}{b_c} + 18185,8 \frac{b_{cn}}{b_c} - 12,7 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.5)$$

Na matriz de classificação estão apresentados os valores do modelo em relação aos modos de ruptura dos ensaios de cantoneiras, de modo que as linhas da Tabela 5.3 explicam a classificação observada e as colunas o que foram preditos com o modelo. O valor de p na tabela indica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura. Nesta matriz de classificação é mostrado um total com 75% de acerto no modelo como um todo.

Tabela 5.3 – Matriz de classificação dos modos de ruptura em cantoneiras

Modos de Ruptura	Porcentagem	Esmag.	Esmag-Rasg.	R.S.L.
		$p = 0,07292$	$p = 0,16667$	$p = 0,76042$
Esmag.	57,14286	4	0	3
Esmag-Rasg.	0,00000	0	0	16
R.S.L.	93,15069	4	1	68
Total	75,00000	8	1	87

Na Tabela 5.4 está apresentada a classificação de casos. Uma vez que calculamos os escores de classificação para um caso, é fácil decidir como classificar o caso: em geral, classificamos o caso como pertencendo ao grupo para o qual ele possui o maior escore de classificação. O valor de p explica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura.

Tabela 5.4 – Classificação de casos dos modos de ruptura em cantoneiras

Casos	Predito no Ensaio	$p = 0,07292$	$p = 0,16667$	$p = 0,76042$
		1	Esmag.	Esmag.
2	Esmag.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
3	Esmag.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
4	Esmag.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
* 5	Esmag.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
* 6	Esmag.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
* 7	Esmag.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
* 8	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
* 9	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 10	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 11	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 12	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 13	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 14	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 15	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 16	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 17	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 18	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 19	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 20	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.

Continua...

Casos	Predito no Ensaio	p = 0,07292	p = 0,16667	p = 0,76042
* 21	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 22	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 23	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
24	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
25	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
26	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
27	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
28	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
29	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
30	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
31	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
32	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
33	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
34	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
35	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
36	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
37	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
38	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
39	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 40	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag.
41	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
42	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
43	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
44	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
45	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
46	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
47	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
48	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
49	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
50	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
51	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
52	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
53	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
54	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
55	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
56	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
57	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
58	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
59	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
60	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
61	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
62	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
63	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
64	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.

Continua...

Casos	Predito no Ensaio	p = 0,07292	p = 0,16667	p = 0,76042
65	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
66	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
67	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
68	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
69	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
70	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
71	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
72	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
73	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
74	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
75	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
76	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
77	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
78	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
79	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
80	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 81	R.S.L.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
* 82	R.S.L.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
* 83	R.S.L.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
* 84	R.S.L.	Esmag.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.
85	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
86	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
87	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
88	R.S.L.	R.S.L.	Esmag.	Esmag. - Rasg.
89	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
90	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
91	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
92	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
93	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
94	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
95	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
96	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.

Por meio dos dados realizados nos ensaios de cantoneiras, referentes aos modos de ruptura, foram construídos gráficos com eixos abstratos a partir de combinações lineares das variáveis, visando maximizar a diferença entre os modos de ruptura. Os gráficos foram confeccionados utilizando o programa (PAST 3.20, 2018).

A seguir é apresentado o padrão obtido na discriminação dos grupos em uma análise multidimensional reduzida em duas dimensões. A legenda que está representada de vermelho mostra o grupo de perfis que se romperam por R.S.L., a legenda de verde mostra os grupos de perfis que se romperam por Esmag.-Rasg. e a legenda de roxo mostra os grupos de perfis que se romperam por Esmag.

A Figura 5.1 mostra a distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com elipses em relação aos modos de ruptura.

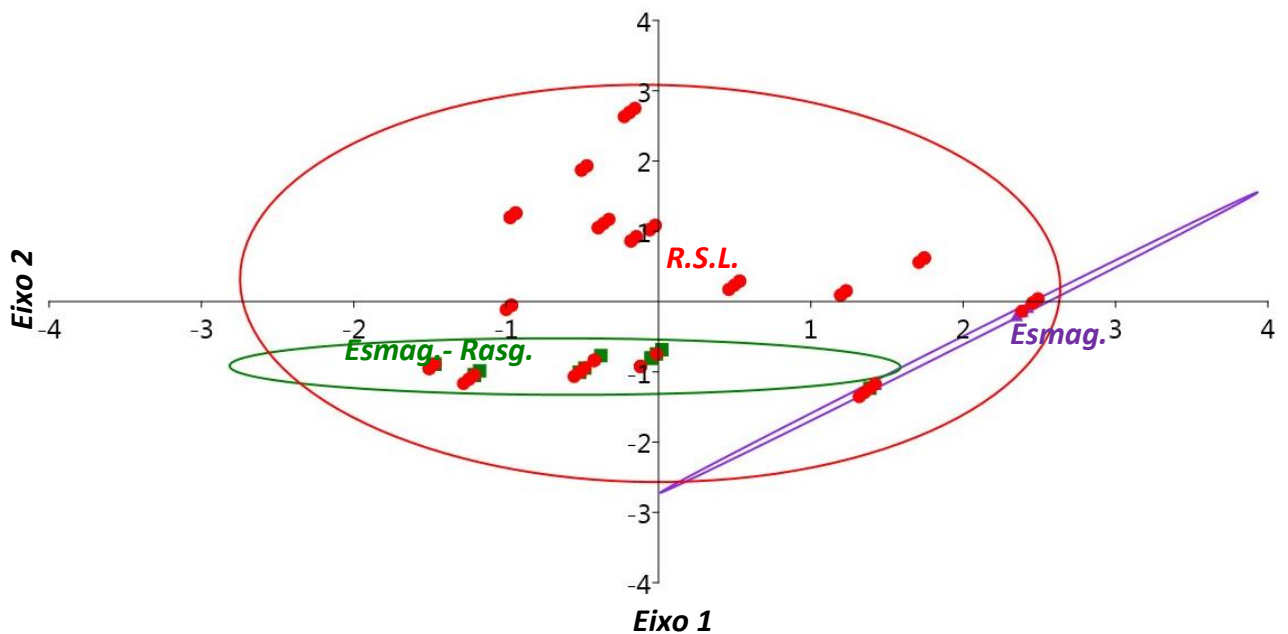


Figura 5.1 – Distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com elipses em relação aos modos de ruptura

A distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com autovalores e a distribuição das variáveis respostas de cantoneiras em relação aos modos de ruptura estão apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3.

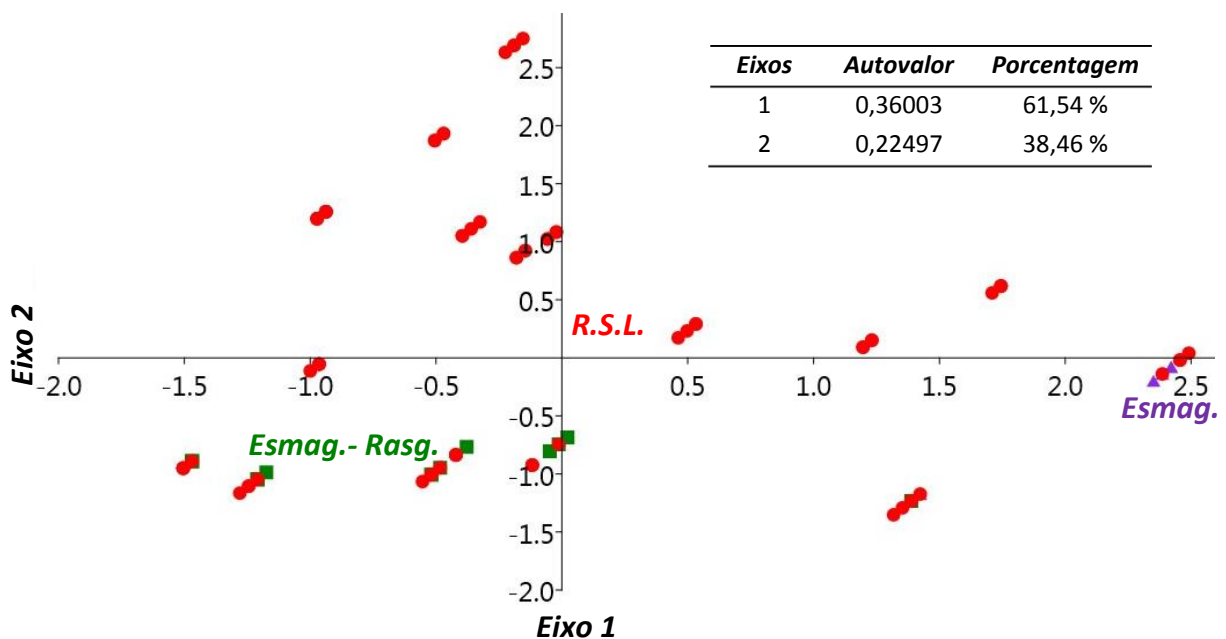


Figura 5.2 – Distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com autovalores em relação aos modos de ruptura

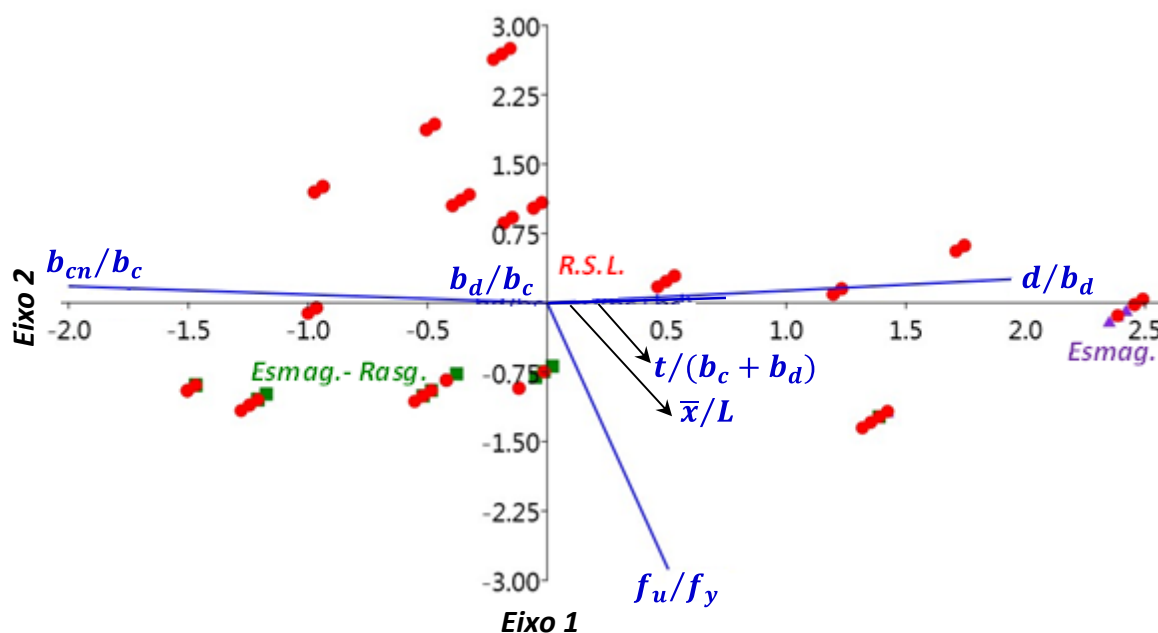


Figura 5.3 – Disposição das variáveis respostas de cantoneiras em relação aos modos de ruptura

Autovalor da função discriminante é uma maneira de retratar quanto de variação será explicado nos dados, mostra a significância de dimensões na classificação de variáveis independentes, que é igual a 0,36003 para o eixo 1 e 0,22497 para o eixo 2, já a porcentagem mostra que considerando 100% da variação de todo conjunto de dados o eixo 1 se apresenta com 61,54% e o eixo 2 com 38,46%, então estes dois eixos representam 100% da variação dos dados, ou seja o padrão que está no sistema multidimensional pode ser considerado como bem representado no gráfico.

As linhas azuis são representadas por combinações lineares das variáveis, onde a variável mais importante para discriminar os modos de ruptura é f_u/f_y e a segunda variável mais importante para discriminar os modos de ruptura é d/b_d .

Quando as variáveis representadas pela linha azul formam um ângulo agudo menor que 90° , existe uma correlação positiva forte entre as duas variáveis, como, por exemplo, a variável $(d/b_d$ e $t/(b_c + b_d)$. Quando tais variáveis formam um ângulo de quase 90° , são eixos quase ortogonais entre si, são as variáveis que não tem uma correlação positiva forte entre si, como, por exemplo, $(f_u/f_y$ e $d/b_d)$ e quando existem variáveis que ficam do lado oposto do gráfico elas tem uma correlação negativa entre si, como, por exemplo, $(b_{cn}/b_c$ e $d/b_d)$.

5.2.2 Análise de função discriminante em perfis U

Apenas aquelas variáveis que se mostraram estatisticamente significativas foram incorporadas ao modelo. Assim, foram selecionadas as seguintes características geométricas dos perfis U que pudessem expressar as condições especificadas:

- a. Distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade (\bar{x});
- b. Comprimento total da ligação (L);
- c. Largura total do flange (b_f);
- d. Largura total da alma (b_w).
- e. Largura líquida da alma (b_{wn});
- f. Espessura da chapa do perfil (t);
- g. Diâmetro do parafuso; (d)
- h. Resistência última do aço; (f_u)
- i. Resistência ao escoamento do aço; (f_y)

Por intermédio dos dados experimentais de 100 perfis U executados nesse trabalho, buscou-se determinar o conjunto de características que permitisse a melhor discriminação entre os modos de ruptura, ou seja, a fim de apresentar quais variáveis melhor prediziam estes modos de ruptura que foram determinados nos ensaios. A Tabela 5.5 apresenta o resumo de análise de função discriminante com modelo de 6 variáveis e 3 grupos de modos de ruptura (Esmag. Esmag-Rasg., R.S.L).

Tabela 5.5 – Análise de função discriminante dos modos de ruptura em perfis U

Wilks' Lambda: 0,40153 aprox. F (12,184) = 8,8645 p <, 0000				
Variável	Wilks' Lambda	F (Fisher)	p-level	1-Toler. (R-Sqr)
\bar{x}/L	0,403476	0,22260	0,800867	0,013706
b_{wn}/b_w	0,407437	0,67632	0,510996	0,971173
b_f/b_w	0,419010	2,00209	0,140894	0,985437
$t/(b_w+2b_f)$	*0,540249	*15,89140	*0,000001	*0,140490
d/b_f	*0,451212	*5,69121	*0,004674	*0,913666
f_u/f_y	*0,470422	*7,89196	*0,000687	*0,029285

A função discriminante foi significativa, com Wilks' Lambda de 0,40153 (p-valor < 0,0001). Isso indica a existência de diferenças entre modos de ruptura, ou dito de modo mais

preciso, indica que dois ou mais grupos têm diferenças maiores que as esperadas por simples acaso entre si (JOHNSON e WICHERN, 2007; POLIT, 2009). O modelo foi constituído por seis variáveis que têm um efeito significativo sobre a discriminação entre grupos (GARSON, 2008). Com base nos valores de *Wilks` lambda* para determinadas variáveis, o grau em que cada variável individual contribui para a discriminação entre grupos foi determinado. Três variáveis são mais importantes que as demais no sentido de discriminar os grupos e estão marcadas com asterisco ($t/(bw+2bf)$), (f_u / f_y) e (d / b_f) que contém o F (de Fisher) significativo com os maiores valores da Tabela 5.5. A variável (f_u / f_y) é a ductilidade do aço, referente aos diferentes tipos de materiais utilizados neste trabalho o aço COR 420 e os aços galvanizados ZAR 345 e ZAR 400.

Como citado na função de classificação das cantoneiras, a função de classificação para os perfis U mostra o coeficiente de cada variável para fazer o cálculo em cada um dos modos de ruptura. Existe uma chance muito maior de um novo perfil se romper por R.S.L. do que os outros grupos, pois o valor de p indica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura na análise de função de classificação. A Tabela 5.6 apresenta os resultados da função de classificação em relação aos modos de ruptura.

Tabela 5.6 – Análise de função classificação dos modos de ruptura em perfis U

Variável	Esmag. $p = 0,05000$	Esmag- Rasg. $p = 0,20000$	R.S.L. $p = 0,75000$
\bar{x}/L	97,02	99,42	100,64
b_{wn}/b_w	17703,40	17719,70	17662,97
b_f/b_w	2105,04	2105,39	2094,15
$t/(bw+2bf)$	13524,76	13614,26	12883,73
d/b_f	7815,90	7803,05	7723,85
f_u/f_y	413,02	408,30	392,58
Constante	-9782,64	-9786,78	-9678,08

$$\text{Esmag.} = -9782,64 + 413,02 \frac{f_u}{f_y} + 7815,90 \frac{d}{b_f} + 13524,76 \frac{t}{(bw+2bf)} + 2105,04 \frac{b_f}{b_w} + 17703,40 \frac{b_{wn}}{b_w} + 97,02 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.6)$$

$$\text{Esmag.- Rasg.} = -9786,78 + 408,30 \frac{f_u}{f_y} + 7803,05 \frac{d}{b_f} + 13614,26 \frac{t}{(bw+2bf)} + 2105,39 \frac{b_f}{b_w} + 17719,70 \frac{b_{wn}}{b_w} + 97,02 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.7)$$

$$\text{R.S.L.} = -9678,08 + 392,58 \frac{f_u}{f_y} + 7723,85 \frac{d}{b_f} + 12883,73 \frac{t}{(bw+2bf)} + 2094,15 \frac{b_f}{b_w} + 17662,97 \frac{b_{wn}}{b_w} + 100,64 \frac{\bar{x}}{L} \quad (5.8)$$

Na matriz de classificação estão apresentados os valores do modelo em relação aos modos de ruptura dos ensaios de perfis U, de modo que as linhas da Tabela 5.7 explicam a classificação observada e as colunas o que foram preditos com o modelo. O valor de p na Tabela 5.7 indica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura. Nesta matriz de classificação é mostrado um total com 86,00 % de acerto no modelo como um todo.

Tabela 5.7 – Matriz de classificação dos modos de ruptura em perfis U

Modos de Ruptura	Porcentagem	Esmag. $p = 0,05000$	Esmag-Rasg. $p = 0,20000$	R.S.L. $p = 0,75000$
Esmag.	0,00	0	5	0
Esmag-Rasg.	55,00	0	11	9
R.S.L.	100,00	0	0	75
Total	86,00	0	16	84

Na Tabela 5.8 estão apresentados a classificação de casos. Uma vez que calculamos os escores de classificação para um caso, é fácil decidir como classificar o caso: em geral, classificamos o caso como pertencendo ao grupo para o qual ele possui o maior escore de classificação. O valor de p explica a probabilidade de classificação em cada modo de ruptura.

Tabela 5.8 – Classificação de casos dos modos de ruptura em perfis U

Casos	Predito no Ensaio	$p = 0,05000$	$p = 0,22500$	$p = 0,72500$
* 1	Esmag.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
* 2	Esmag.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
* 3	Esmag.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
* 4	Esmag.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
* 5	Esmag.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
6	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
7	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
8	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
9	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
10	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
11	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
12	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
* 13	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 14	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 15	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 16	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
17	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
18	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
19	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.
20	Esmag. - Rasg.	Esmag. - Rasg.	Esmag.	R.S.L.

Continua...

Casos	Predito no Ensaio	$p = 0,05000$	$p = 0,22500$	$p = 0,72500$
* 21	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 22	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 23	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 24	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
* 25	Esmag. - Rasg.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
26	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
27	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
28	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
29	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
30	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
31	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
32	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
33	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
34	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
35	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
36	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
37	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
38	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
39	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
40	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
41	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
42	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
43	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
44	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
45	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
46	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
47	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
48	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
49	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
50	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
51	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
52	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
53	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
54	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
55	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
56	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
57	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
58	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
59	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
60	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
61	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
62	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
63	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
64	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
65	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.

Continua...

Casos	Predito no Ensaio	$p = 0,05000$	$p = 0,22500$	$p = 0,72500$
66	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
67	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
68	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
69	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
70	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
71	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
72	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
73	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
74	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
75	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
76	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
77	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
78	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
79	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
80	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
81	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
82	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
83	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
84	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
85	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
86	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
87	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
88	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
89	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
90	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
91	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
92	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
93	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
94	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
95	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
96	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
97	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
98	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
99	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.
100	R.S.L.	R.S.L.	Esmag. - Rasg.	Esmag.

Por meio dos dados realizados nos ensaios de perfis U, referentes aos modos de ruptura, foram construídos gráficos com eixos abstratos a partir de combinações lineares das variáveis, visando maximizar a diferença entre os modos de ruptura. Os gráficos foram confeccionados utilizando o programa (PAST 3.20, 2018).

A seguir é apresentado o padrão obtido na discriminação dos grupos em uma análise multidimensional reduzida em duas dimensões. A legenda que está representada de vermelho mostra o grupo de perfis que se romperam por R.S.L., a legenda de verde mostra os grupos de

perfis que se romperam por Esmag.-Rasg. e a legenda de roxo mostra os grupos de perfis que se romperam por Esmag. A Figura 5.1 mostra a distribuição das variáveis respostas de cantoneiras com elipses em relação aos modos de ruptura.

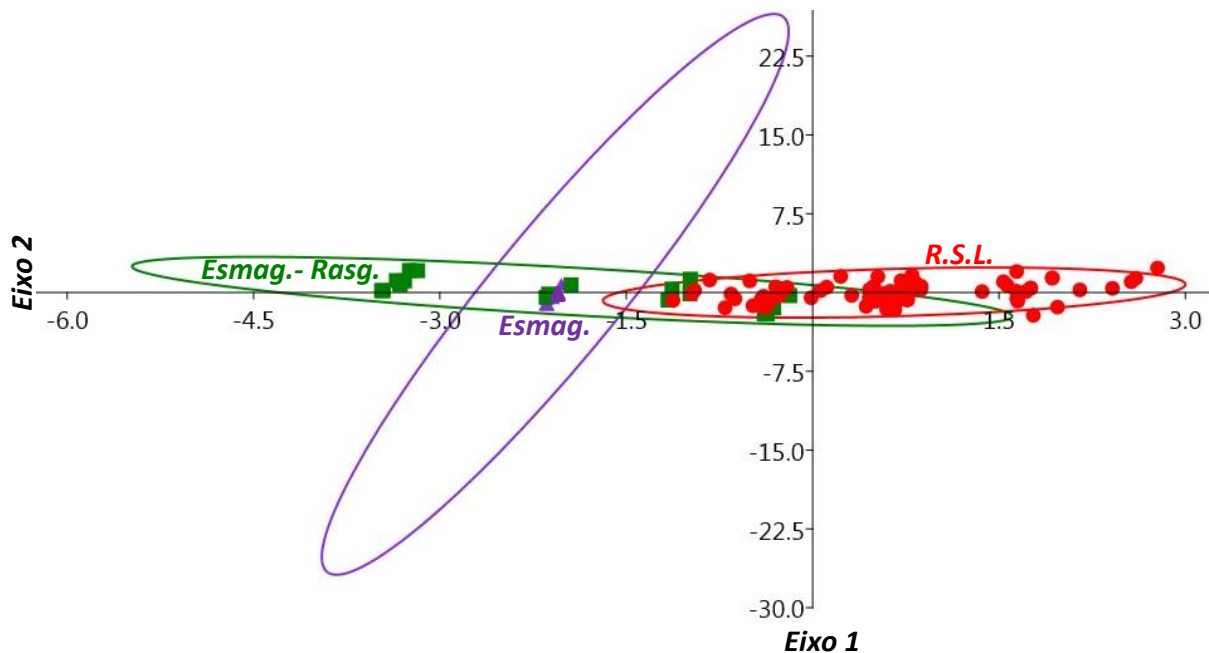


Figura 5.4 – Distribuição das variáveis respostas de perfis U com elipses em relação aos modos de ruptura

A Figura 5.5 mostra a disposição das variáveis respostas de perfis U com autovalores em relação aos modos de ruptura. A Figura 5.6 apresenta a disposição das variáveis respostas de perfis U em relação aos modos de ruptura.

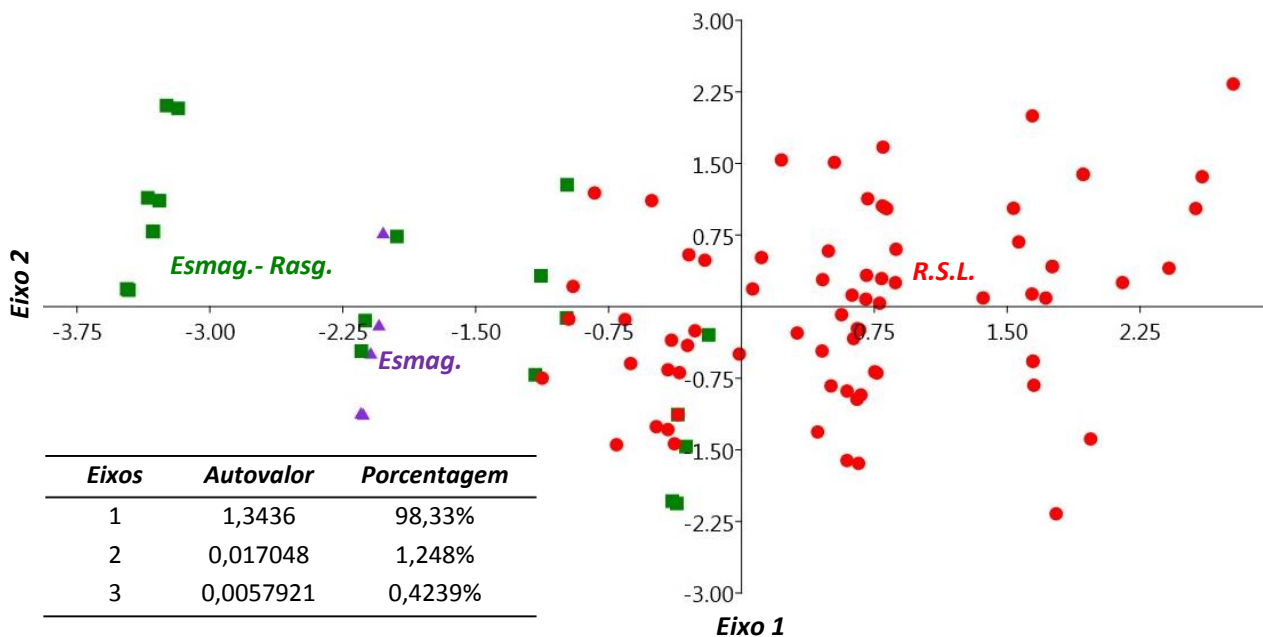


Figura 5.5 – Distribuição das variáveis respostas de perfis U com autovalores em relação aos modos de ruptura

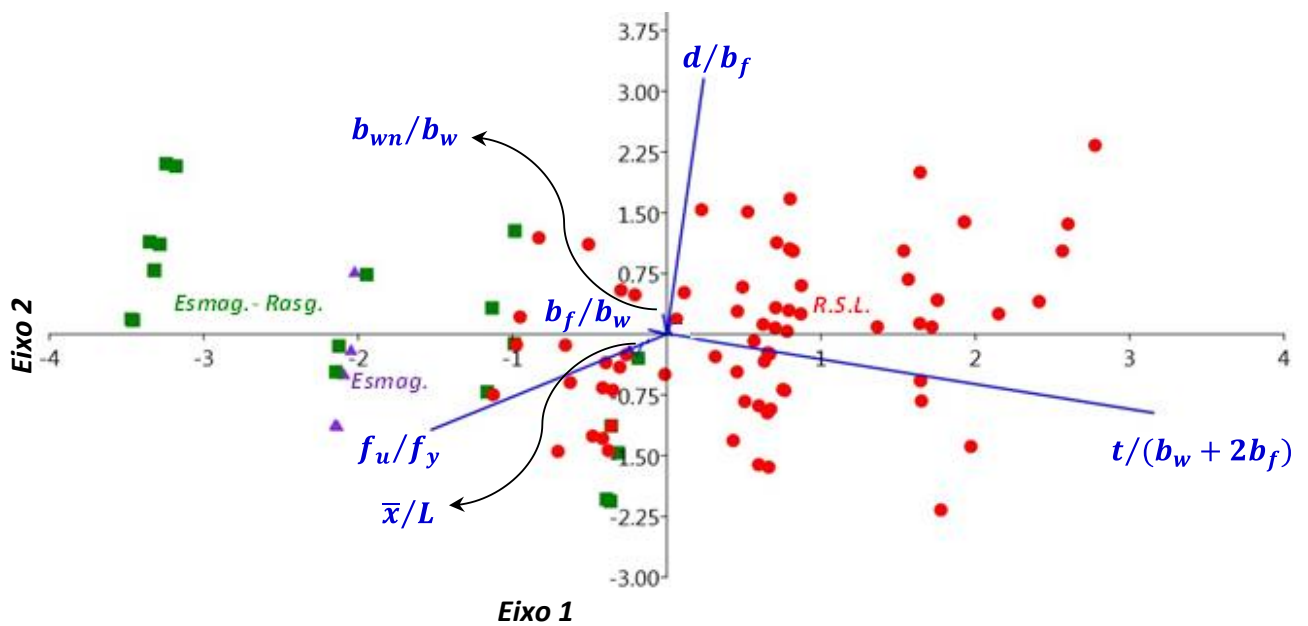


Figura 5.6 – Disposição das variáveis respostas de perfis U em relação aos modos de ruptura

A porcentagem mostra que considerando 100% da variação de todo conjunto de dados o eixo 1 se apresenta com 98,33%, o eixo 2 com 1,248% e o eixo 3 com 0,4239, então o eixo 1 e o eixo 2 juntos, representam 99,58% da variação dos dados, ou seja o padrão que está no sistema multidimensional pode ser considerado como bem representado no gráfico. Autovalor da função discriminante mostra a significância de dimensões na classificação de variáveis independentes, que é igual a 1,3436 para o eixo 1, para o eixo 2 igual a 0,017048 e para o eixo 3 igual a 0,0057921.

As linhas azuis são representadas por combinações lineares das variáveis, onde a variável mais importante para discriminar os modos de ruptura é a variável $t/(b_w + 2b_f)$, a segunda variável mais importante para discriminar os modos de ruptura é a variável f_u/f_y e a terceira variável mais importante para discriminar os modos de ruptura é a variável d/b_f .

Quando as variáveis representadas pela linha azul formam um ângulo agudo menor que 90° , existe uma correlação positiva forte entre as duas variáveis como, por exemplo, a variável $(f_u/f_y$ e $b_f/b_w)$. Quando as variáveis formam um ângulo de quase 90° , ou seja, são eixos quase ortogonais entre si, são as variáveis que não tem uma correlação positiva forte entre si, como, por exemplo, $(t/(b_w + 2b_f)$ e $d/b_f)$ e quando existem variáveis que ficam do lado oposto do gráfico, elas tem uma correlação negativa entre si, como, por exemplo, $(t/(b_w + 2b_f)$ e $b_f/b_w)$.

5.3 REGRESSÃO ESTATÍSTICA

De acordo com Spiegel e Stephens (2009) a finalidade geral da regressão estatística é conhecer mais sobre o relacionamento existente entre uma ou mais variáveis independentes (ou preditoras) e uma variável dependente (variável resposta). A regressão múltipla é utilizada quando o número de variáveis independentes é maior do que duas, desta forma, pode ser modelada por uma equação linear ou não-linear, as quais representam uma superfície de regressão. Havendo mais de 3 variáveis, o problema torna-se n-dimensional e, então, perde-se a intuição geométrica do modelo (STATSOFT, 2011).

Por meio dos dados experimentais realizados em cantoneiras e perfis U, busca-se determinar uma equação que explique o coeficiente de redução da área líquida (denominado na norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) como coeficiente C_t) a partir de variáveis referentes à geometria e configuração da ligação parafusada. De modo a simplificar o seu uso, o modelo procurado deverá, preferencialmente, ser dado por uma equação linear. Trata-se, portanto, de um problema de regressão múltipla linear, cuja equação geral é dada da seguinte forma (SPIEGEL e STEPHENS, 2009; SAMOHYL, 2009; ZAMAN e ALAKUS, 2019):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad (5.9)$$

onde:

Y_i é o valor, no i-ésimo ensaio, da variável dependente (resposta);

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$, são constantes, coeficientes angulares do modelo a serem determinados pela regressão;

$X_{i1}, \dots, X_{i,p-1}$ são os valores das variáveis preditoras (conhecidas) no i-ésimo ensaio;

ε_i são os erros (resíduos) independentes com distribuição $N(0, \sigma^2)$

$i=1,2,\dots,n$.

Pode-se perceber a importância em todas as variáveis preditoras apresentando efeito aditivo, ou seja, não apresentam um efeito de interação entre elas (o efeito de uma variável preditora não depende dos níveis da outra variável preditora). Os coeficientes angulares de

regressão (ou coeficientes β) na equação 5.9 representam a contribuição independente de cada variável preditora para a explicação da variável resposta e são escolhidos de maneira a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos.

A direção do relacionamento entre a variável Y e as variáveis X é dada pelo sinal dos coeficientes β , ou seja, caso β seja positivo, o aumento da variável X correspondente levará a um aumento da variável Y . Caso β seja negativo, um aumento de X corresponderá a uma redução de Y . Evidentemente, caso β seja nulo, não haverá relacionamento entre Y e a variável X correspondente.

Em uma análise de regressão múltipla a linha de regressão expressa a melhor previsão para a variável dependente (Y), dadas as variáveis independentes (X). O desvio de um determinado ponto a partir dessa linha é chamado de resíduo (que é a diferença entre o valor real e o valor predito pela linha de regressão), e quanto menor a sua taxa de variabilidade (a soma do quadrado dos resíduos seja menor possível), melhor será a estimativa do valor de Y .

Portanto, caso não haja nenhum relacionamento entre as variáveis X e a variável Y , a variabilidade residual será igual a 1,0. Desta forma, caso as variáveis X e a variável Y estejam perfeitamente relacionadas, a variabilidade residual será igual a 0,0. Em um modelo real, esta taxa de variabilidade fica, geralmente, entre 0,0 e 1,0.

Então se define como coeficiente de determinação R^2 ao valor da variabilidade residual subtraído de 1,0. O R^2 informa que percentual é eliminado do erro de previsão na variável Y quando usamos a análise de regressão de mínimos quadrados sobre a variável X . Assim, o coeficiente R^2 representa qual o percentual da variabilidade residual foi explicada pelo modelo e torna-se um indicador da qualidade do ajustamento do modelo aos dados. Portanto, um valor de R^2 próximo de 1,0 indica que a maioria das variabilidades foi explicada pelas variáveis especificadas no modelo (DE PAULA, 2006).

O grau de relação entre as variáveis predictoras X e a variável independente Y é dado pelo coeficiente de correlação R , que é a raiz quadrada de R^2 . Na correlação múltipla ele é chamado de coeficiente de correlação múltipla (R múltiplo), assumindo valores de 0,0 a 1,0.

Em uma análise de regressão múltipla, são adotadas as hipóteses de distribuição normal dos resíduos e média zero, as quais devem ser verificadas após a determinação dos coeficientes de regressão.

Deve ser verificada, também, a significância estatística (estatística p) do resultado, que é uma medida do grau de representatividade da população daquele resultado, ou seja, a estatística p representa um índice de diminuição da confiabilidade de um resultado. Quanto

maior o valor de p , menos confiável é que a relação obtida entre as variáveis da amostra seja representativa da realidade da população. Dessa forma, uma estatística p com valor de 0,05 indica que existem 5% de probabilidade que a relação encontrada entre as variáveis não seja real.

Afinal, uma regra comumente sugerida pela maioria dos pesquisadores é que, na regressão múltipla, haja uma quantidade de observações de, pelo menos, 10 a 20 vezes o número de variáveis independentes do modelo (STATSOFT, 2011).

5.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA DE RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA

Por meio dos resultados experimentais obtidos nas cantoneiras e nos perfis U que apresentaram ruptura da seção líquida, será apresentada a seguir uma modelagem estatística, empregando uma análise de regressão linear múltipla, através da qual se pretende identificar um modelo matemático que melhor quantifique a força de ocorrência daquele tipo de fenômeno em cantoneiras e em perfis U formados a frio, parafusados e submetidos à tração.

5.4.1 Seleção das amostras de cantoneiras formadas a frio para regressão múltipla linear

Em um total de 96 ensaios em cantoneiras formadas a frio no aço galvanizado ZAR 345 e ZAR 400, 73 apresentaram como modo de falha a ruptura da seção líquida. Contudo, conforme análise realizada no capítulo anterior, para algumas dessas conexões a força de ruptura para este tipo de falha está adequadamente quantificada pelas equações da norma (NBR 14.762 ABNT, 2010), como no caso das cantoneiras conectadas pelas duas abas.

Do total de cantoneiras ensaiadas, 4 com apenas 1 parafuso por seção e apenas 1 com 2 parafusos por seção apresentaram como falha, a ruptura da seção líquida e, portanto, não são representativos deste tipo de configuração. Sendo assim, os resultados destes perfis não serão utilizados na modelagem estatística, por representar condições de projeto onde recomendações específicas podem ser feitas de modo a abranger estes casos.

Então, serão analisados estatisticamente, os resultados de 60 cantoneiras, com duas ou mais seções de parafusos, que apresentaram ruptura da seção líquida como modo de falha.

5.4.2 Obtenção do modelo de regressão múltipla linear em cantoneiras

Atendendo as seguintes situações, estabeleceu-se que o modelo obtido por regressão dos dados dos ensaios deveria descrever as ligações parafusadas em cantoneiras formadas a frio:

- a. Cantoneiras de abas iguais conectadas por apenas uma aba
- b. Cantoneiras de abas desiguais conectadas pela maior aba
- c. Cantoneiras de aba desiguais conectadas pela menor aba
- d. Cantoneiras com uma ou mais linhas de parafusos
- e. Cantoneiras com duas ou mais parafusos por linha

Fundamentado na análise dos resultados realizada no capítulo anterior, que mostrou as diversas tendências acréscimo e redução do coeficiente C_t em função das propriedades das ligações ensaiadas, diversas grandezas relacionadas com as características das ligações foram escolhidas e avaliadas estatisticamente de maneira a obter-se um modelo que explicasse matematicamente os resultados obtidos.

Para a realização regressão estatística, foi utilizado o programa STATISTICA, versão 10 (STATSOFT, 2011).

- a. Distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade (\bar{x});
- b. Comprimento total da ligação (L);
- c. Largura total da aba desconectada (b_d);
- d. Largura total da aba conectada (b_c);
- e. Espessura da chapa do perfil (t).

A variável \bar{x} quantifica a redução da eficiência da ligação à medida que a linha de força afasta-se do centro de gravidade da seção transversal e o comprimento L expressa o fato de ocorrer um aumento naquela eficiência à medida que se aumenta o número de seções com parafusos.

Pretende-se modelar de maneira explícita os casos de abas desiguais conectadas tanto pela aba maior como pela aba menor, utilizando a largura da aba desconectada (b_d) que se expressa diretamente na equação, as alterações sofridas pela eficiência da ligação quando a sua dimensão for diferente da largura da aba conectada (b_c).

A espessura da chapa das cantoneiras (t) busca incorporar ao modo uma medida da esbeltez da aba conectada, a qual é intensamente solicitada por tensões de tração e

compressão devido as não-linearidades introduzidas pelos furos e tensões de contato dos parafusos.

Apesar da relação b_c/d ter apresentado correlação individual com o coeficiente C_t , conforme apresentado no capítulo anterior, deve-se observar que, esta correlação não se confirmou quando foi analisado o conjunto de variáveis selecionadas, qual mostrou que esta relação (b_c/d) não é estatisticamente significativa.

Todas estas variáveis mostraram alta correlação com o coeficiente C_t e, de modo a permitir sua aplicação adimensional, elas foram empregadas através da relação tradicional \bar{x}/L e através da seguinte relação, espessura, a soma da largura total da aba conectada e a largura total da aba desconectada $t/(b_c + b_d)$.

Uma vez determinadas as variáveis estatisticamente significativa para o modelo, foram excluídos os valores extremos (*outliers*) cujos resíduos apresentaram valores superiores a 2 desvios-padrões ($\pm 2\sigma$) e, então, verificada a hipótese de distribuição normal dos resíduos, a qual mostrou que não foi violado. A Figura 5.7 apresenta a distribuição dos resíduos e a distribuição normal esperada e a Figura 5.8 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

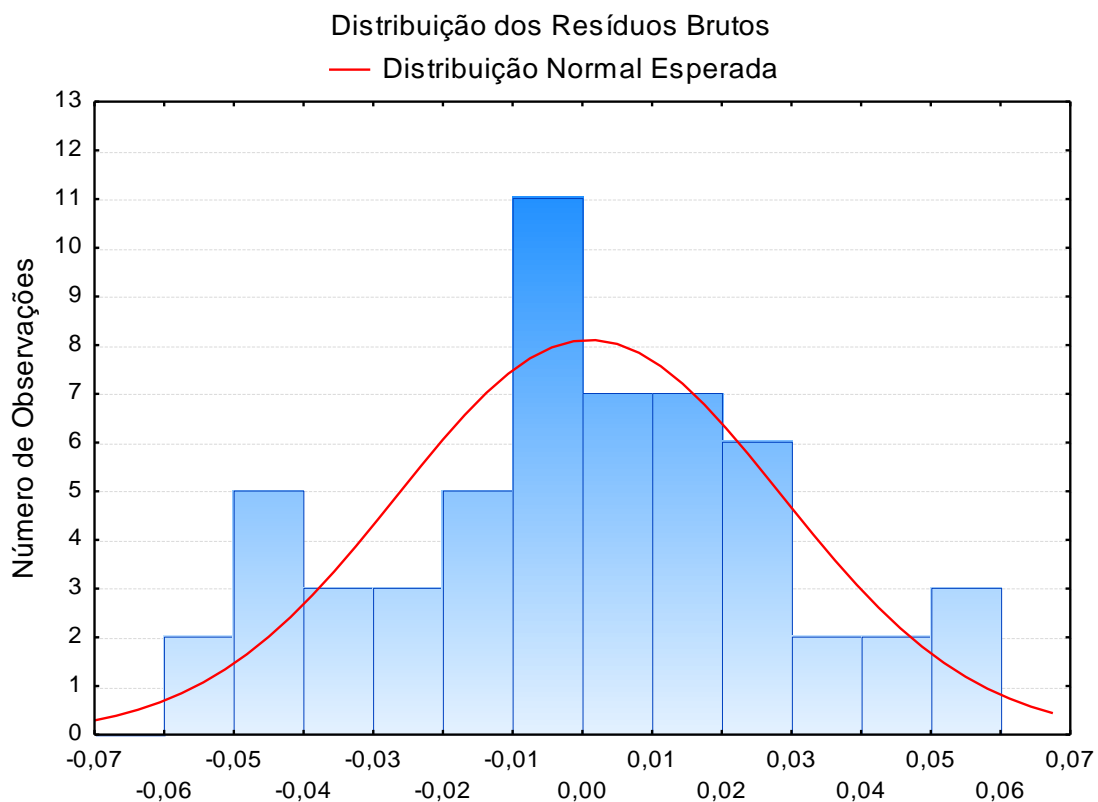


Figura 5.7 – Distribuição dos resíduos e distribuição normal esperada em Cantoneiras

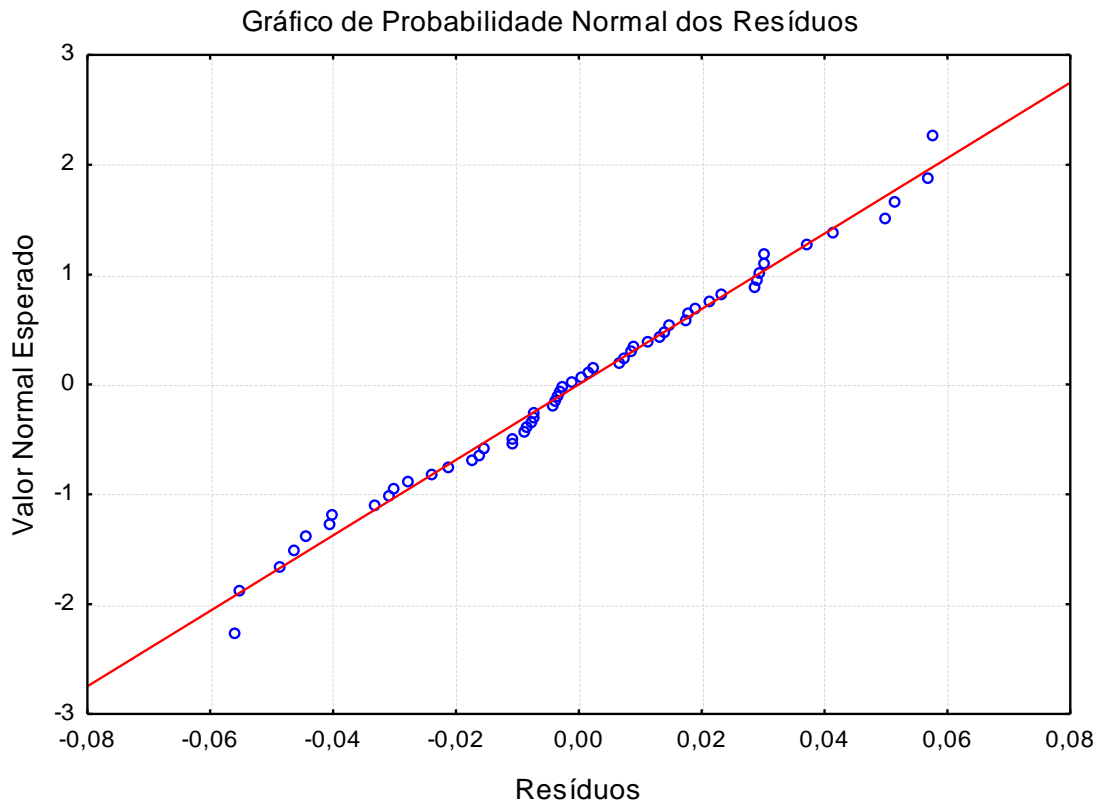


Figura 5.8 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos em Cantoneiras

Ao final das etapas de remoção dos extremos e de avaliação dos resíduos, permaneceram 56 casos que produziram um modelo altamente significativo ($p < 0.001$), com coeficiente de determinação (R^2) de 90,4%, coeficiente de correlação múltiplo (R) igual a 95,1%, erro padrão da estimativa de C_t igual a 0,0280 e alta significância estatística para os parâmetros obtidos (estatística p). Estas estatísticas são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Estatísticas da regressão linear múltipla em cantoneiras

Estatística	Valor
R Múltiplo	0,9513
R^2 Múltiplo	0,9049
R^2 Ajustado	0,9013
F(2,52)	247,6230
p-level	0,0000
Erro Padrão da Estimativa	0,0280

A Tabela 5.10 mostra um conjunto de informações sobre a qualidade do modelo obtido pela regressão múltipla realizada e está apresentado a seguir.

Tabela 5.10 – Coeficientes de regressão para o modelo de cantoneira obtido

	<i>Beta</i>	<i>Erro Padrão Beta</i>	<i>B*</i>	<i>Erro Padrão B</i>	<i>t (52)</i>	<i>p-level</i>
Intercepto			0,653405	0,017318	36,5748	0,000000
\bar{x}/L	-0,417067	0,044674	-0,437140	0,041575	-20,0628	0,000000
$t/(b_c + b_d)$	3,850593	0,044674	0,462602	0,568547	3,3863	0,000000

Pode-se observar que todas as variáveis adotadas apresentaram alta significância (p-level), com baixo erro-padrão para os coeficientes angulares de regressão padronizados (Beta) e originais (B*). Os coeficientes Beta permitem comparar a contribuição relativa de cada variável independente na estimativa da variável dependente (coeficiente C_t), os coeficientes angulares originais (B*) com asterisco e marcadas de vermelho que devem ser utilizados.

Após a avaliação destas informações e com base nos resultados apresentados na Tabela 5.10, pode-se finalmente escrever a equação que modela o coeficiente de redução da área líquida em função das grandezas apresentadas:

$$C_{t \text{ Cantoneira}} = 0,65 - 0,44 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) + 0,46 \left(\frac{t}{b_c + b_d} \right) \quad (5.10)$$

A viabilidade desta equação está estatisticamente verificada através dos valores apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10. Entretanto, devem ser feitas avaliações de sua aplicação a outros conjuntos de dados que atendam as premissas usadas em sua modelagem.

Em seguida, a equação (5.10) proposta neste trabalho será avaliada através de sua aplicação nos dados originais e em dados experimentais de outros pesquisadores.

5.4.3 Avaliação do modelo de regressão em cantoneiras

Para validar um modelo estatístico, uma importantíssima etapa é a comparação dos resultados obtidos em amostras distintas daquelas que o gerou, ou seja, dados de autores clássicos, que estudaram o fenômeno. Além, é claro, de avaliar a magnitude dos resíduos advindos de sua aplicação nos próprios dados originais. Apresenta-se, a seguir, a avaliação da aplicação da equação proposta (equação 5.10) nos resultados experimentais de cantoneiras

obtidos neste trabalho, chamados casos - UnB, e também aqueles apresentados por (Yip e Cheng, 2000; Holcomb et. al.,1995; Maiola, 2004; Teh e Gilbert, 2013).

5.4.3.1 Avaliação comparativa da equação proposta nos ensaios de cantoneiras (casos UnB)

Com o intuito de realizar uma avaliação comparativa, foi avaliada a aplicação da equação 5.10 no conjunto de 60 ensaios de cantoneiras realizados neste trabalho (incluindo os 4 que apresentaram resíduos superiores a $\pm 2\sigma$ e não foram considerados na regressão), as quais possuíam as seguintes características: abas iguais ou desiguais, conectadas pela menor ou maior aba, com 2 ou mais linha de parafusos e com 1 ou 2 parafusos por seção.

Os resultados da equação 5.10 na determinação do coeficiente C_t e, também, os resultados da aplicação da equação 2.6 prescrita pela norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) e a equação 2.8 prescrita pela norma americana AISI S100 (2016) para os mesmos tipos de cantoneiras são apresentados a seguir, através da avaliação das diferenças ($C_{t,exp} - C_t$) entre os coeficientes obtidos nos ensaios, e aqueles calculados pelas respectivas equações. A Tabela 5.11 apresenta a avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos próprios perfis ensaiados.

Tabela 5.11 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada aos próprios perfis ensaiados

Estatística	Equação	Equação	Equação
	NBR 14762 (2010)	AISI (2016)	Proposta
Média das diferenças	-0,083 (19,4%)	0,050 (10,2%)	0,046 (10,1%)
Desvio Padrão das diferenças	0,098 (11,1%)	0,056 (8,2%)	0,056 (6,7%)
Diferença Mínima	-0,310	-0,106	-0,079
Diferença Máximo	0,151	0,182	0,159
Coeficiente C_t Mínima	0,400	0,310	0,270
Coeficiente C_t Máximo	0,900	0,702	0,631

Podem-se observar os valores percentuais ao lado dos valores médios das diferenças, em que, indicam a média das diferenças percentuais absolutas. Ou seja, empregando a equação proposta, a diferença média entre o valor obtido pela equação e o valor experimental foi de 10,1%, com desvio padrão de 6,7%. Aplicando-se a equação prescrita pela (NBR 14.762 ABNT, 2010), estas diferenças chegaram a 19,4% dos valores experimentais, valor este que apresentou um desvio padrão de 11,1%, e também, na equação prescrita pela AISI S100 (2016) as diferenças chegaram a 10,2% dos valores experimentais, com um desvio padrão de 8,2%, mostrando-se maiores que os valores da equação proposta.

Observa-se que os valores máximos e mínimos das diferenças obtidas com a aplicação da equação 5.10 são inferiores àqueles dados pelas equações das normas. Note-se, também, que valores altos para as diferenças negativas indicam que a equação estará levando a um valor da força de ruptura superior àquela encontrada nos ensaios.

Com a aplicação da equação 5.10, estas diferenças negativas chegaram a um máximo de -0,079, enquanto que com o uso da equação da (NBR 14.762 ABNT, 2010) estes valores chegaram a -0,310 e com o uso da AISI S100 (2016) estes valores chegaram a -0,106 , praticamente 4 vezes mais para a norma (NBR 14.762 ABNT, 2010). Isso pode ser visualizado nas Figuras 5.9 e 5.10.

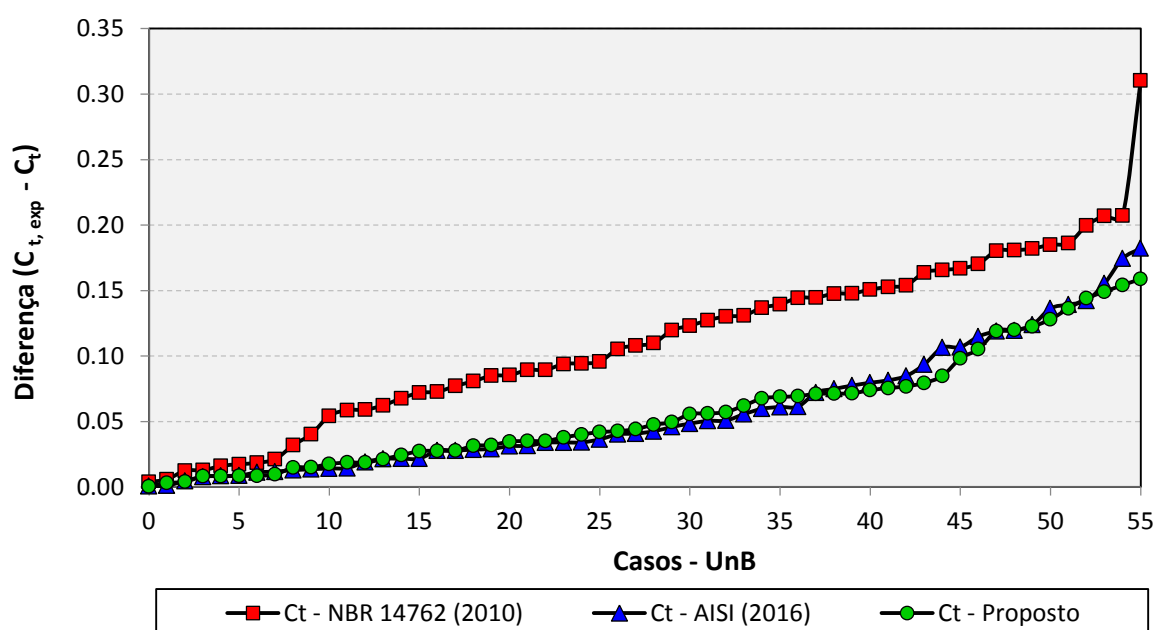


Figura 5.9 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho

Os gráficos das Figuras 5.9 e 5.10 apresentam valores das diferenças produzidas pela aplicação da equação de cálculo do coeficiente C_t prescrita pelas normas NBR 14.762 (2010), AISI S100 (2016) e aquela proposta neste trabalho (equação 5.10), tendo valores absolutos no gráfico da Figura 5.9 e com os respectivos sinais no gráfico da Figura 5.10.

O grande volume de resultados negativos obtidos com a aplicação da equação proposta pela norma NBR 14.762 ABNT (2010) pode ser observado, no gráfico da Figura 5.10. Por outro lado, a equação proposta (equação 5.10) levou realmente a menores valores das diferenças e de forma melhor distribuída.

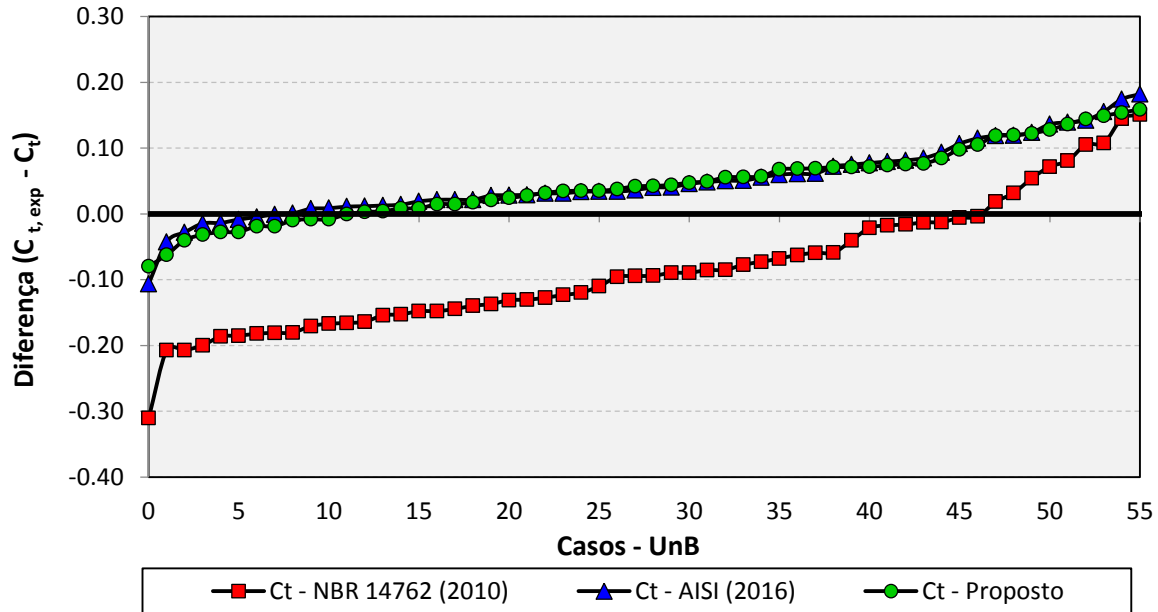


Figura 5.10 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho

5.4.3.2 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

Igualmente, realiza-se a seguir a avaliação da equação proposta neste trabalho (equação 5.10) juntamente com as equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) nos dados de ensaios experimentais realizados por Yip e Cheng (2000) e por Holcomb et. al. (1995), cujos dados deram a base para a proposição da equação vigente na norma brasileira NBR 14.762 ABNT (2001).

A Tabela 5.12 apresenta as estatísticas das diferenças obtidas com a aplicação das três equações, a proposta neste trabalho e as prescritas pelas normas.

Tabela 5.12 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. Al. (1995)

Estatística	Equação NBR 14762 (2010)	Equação AISI (2016)	Equação Proposta
Média das diferenças	0,098 (13,3%)	0,111 (17,5%)	0,098 (15,0%)
Desvio Padrão das diferenças	0,071 (10,9%)	0,091 (12,3%)	0,071 (9,9%)
Diferença Mínima	-0,028	-0,054	-0,028
Diferença Máximo	0,281	0,379	0,281
Coeficiente C_t Mínima	0,400	0,338	0,335
Coeficiente C_t Máximo	0,884	0,685	0,624

Pode-se observar na Tabela 5.12, que a aplicação da equação proposta neste trabalho levou a menores diferenças negativas com desvio padrão de 9,9% quando comparadas com aquelas geradas pela aplicação das equações das normas NBR 14.762 ABNT (2001) e AISI S100 (2016). Deve-se notar que, mesmo os dados de Holcomb et. al. (1995) tendo sido os que deram origem à equação prescrita pela NBR 14.762 ABNT (2001), o comportamento da equação proposta neste trabalho, naquele conjunto de dados, foi ligeiramente superior ao das normas, com valores menores de desvio. Como pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12.

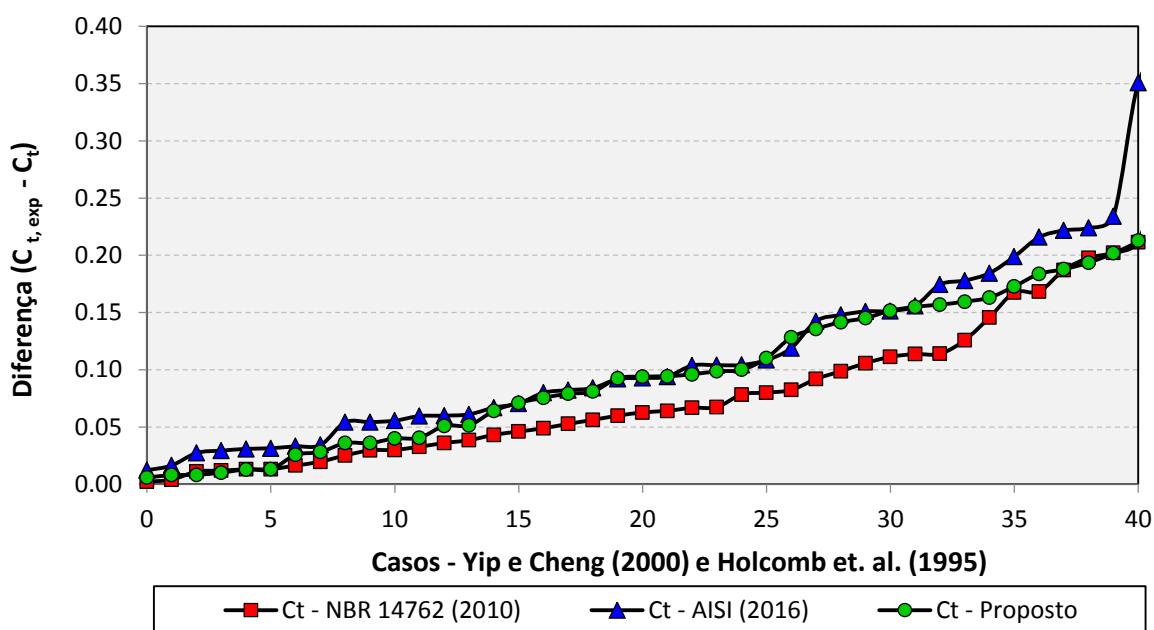


Figura 5.11 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

No gráfico da Figura 5.12, observa-se que, novamente a equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010) levou a um grande número de resultados negativos para as diferenças.

A equação proposta neste trabalho (equação 5.10) mostrou-se adequada à descrição dos dados dos ensaios de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al (1995), mesmo considerando que estes pesquisadores tenham usado um grande número de perfis com reduzida espessura (1,067 mm), inferiores àquelas utilizadas nos ensaios deste trabalho.

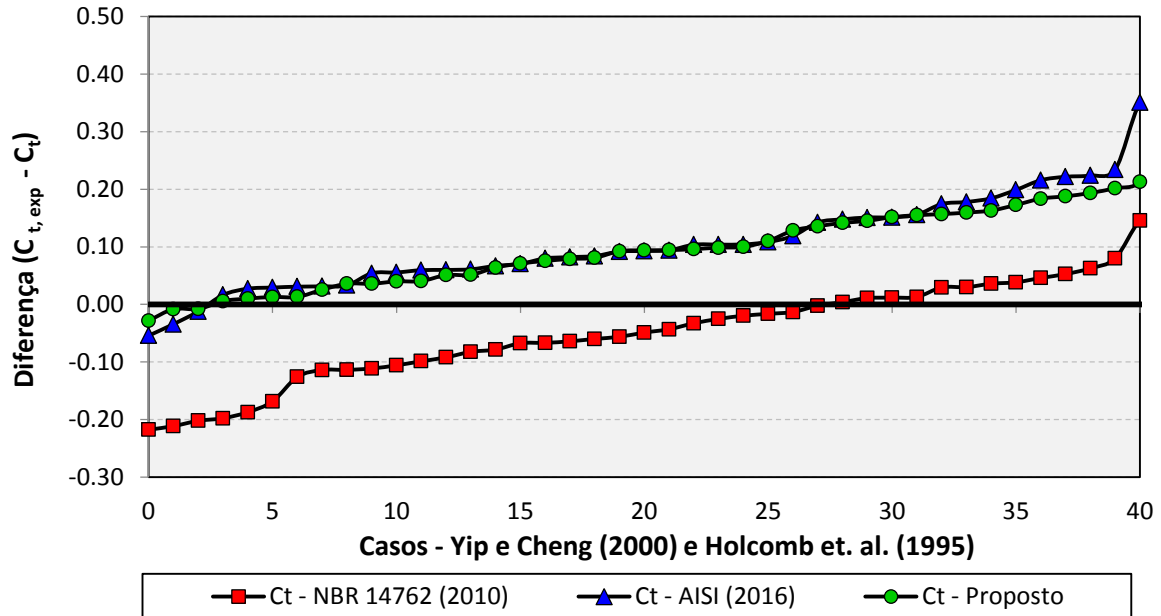


Figura 5.12 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

5.4.3.3 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Maiola (2004)

Outra avaliação da aplicação da equação 5.10, proposta para a previsão da força de ruptura da seção líquida em cantoneiras formadas a frio, pode ser realizada sobre os dados experimentais obtidos no Brasil por Maiola (2004). A Tabela 5.13 apresenta os resultados estatísticos nos casos de Maiola (2004).

Tabela 5.13 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada nos casos Maiola (2004)

Estatística	Equação	Equação	Equação
	NBR 14762 (2010)	AISI (2016)	Proposta
Média das diferenças	-0,169 (33,5%)	0,007 (13,7%)	0,015 (10,7%)
Desvio Padrão das diferenças	0,146 (22,2%)	0,101 (7,9%)	0,086 (7,1%)
Diferença Mínima	-0,378	-0,170	-0,136
Diferença Máximo	0,088	0,132	0,149
Coefficiente C_t Mínima	0,400	0,416	0,446
Coefficiente C_t Máximo	0,900	0,721	0,648

A Tabela 5.13 mostra a aplicação da equação proposta neste trabalho, com baixos valores para a média (10,7%) e o desvio padrão (7,1%) das diferenças e uma diferença negativa (-0,136) inferior àquelas dadas pelas normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016). Nos gráficos, as Figura 5.13 e 5.14 apresentam-se as distribuições ordenadas das diferenças para os casos ensaiados por Maiola (2004).

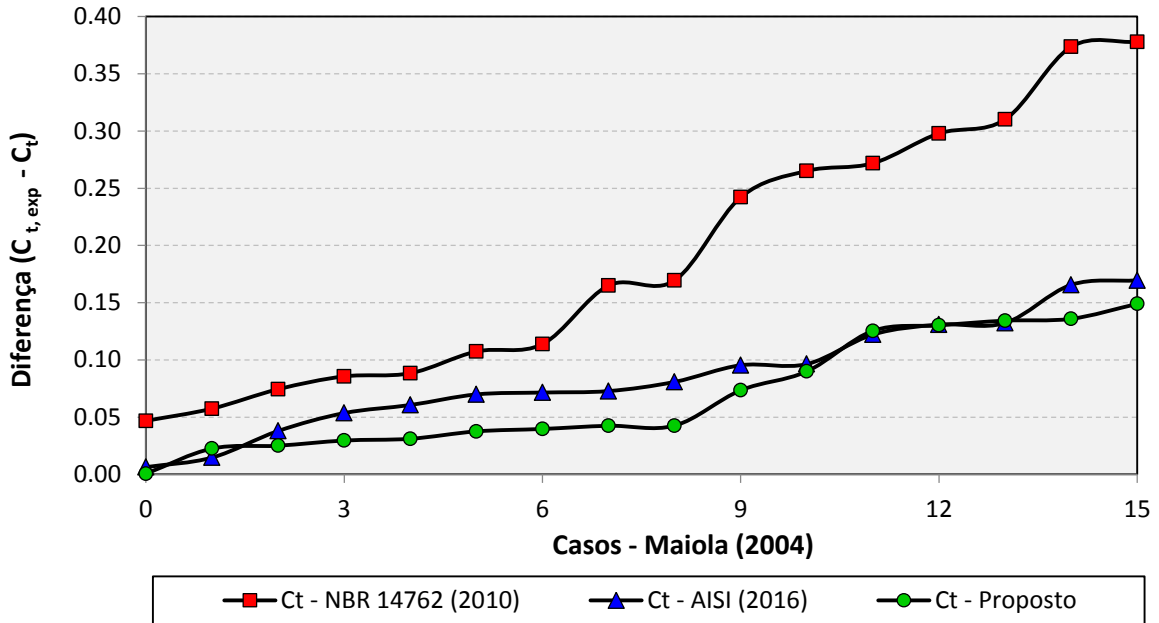


Figura 5.13 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004)

A Figura 5.13 apresenta um bom comportamento da equação proposta neste trabalho (equação 5.10), quando testada nos casos de Maiola (2004), sendo estes, dados de ensaios realizados no país, que englobam perfis com pequenas espessuras (1,55 mm) e também com espessuras relativamente altas (4,75 mm).

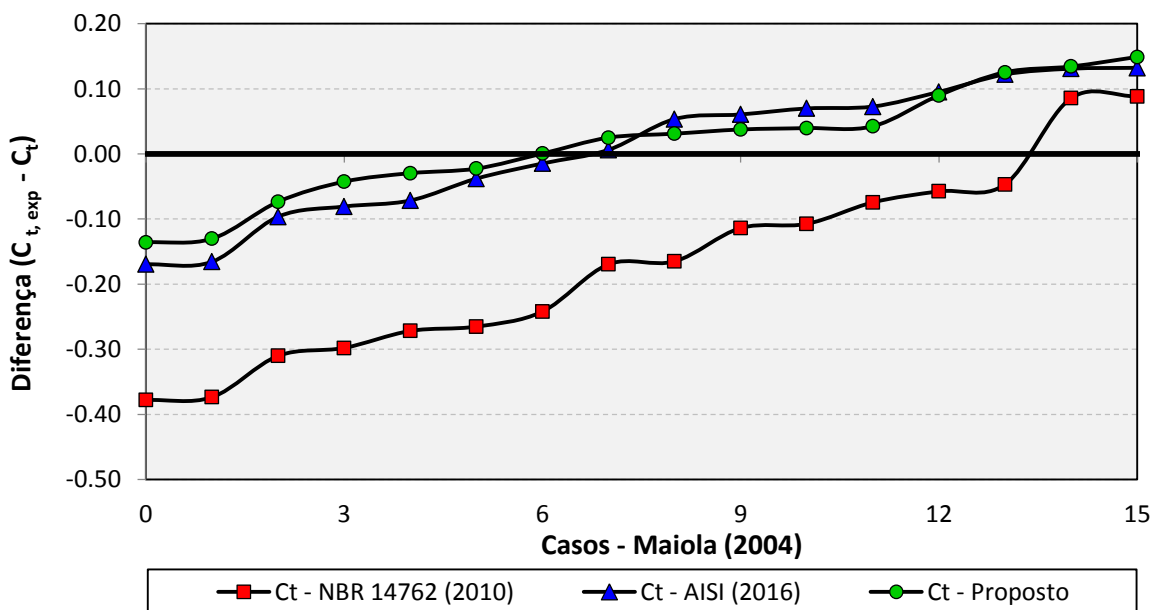


Figura 5.14 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004)

Compreende-se nesse gráfico da Figura 5.14, mais volumes de resultados negativos obtidos com a aplicação das equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) comparadas com a equação proposta neste trabalho, aplicadas nos casos de Maiola (2004).

5.4.3.4 - Avaliação da equação proposta em cantoneiras nos casos apresentados por Teh e Gilbert (2013a)

Também se pode avaliar a aplicação da equação 5.10, na determinação do coeficiente C_t , nos casos de Teh e Gilbert (2013a), que propuseram uma equação referente à ruptura da seção líquida em cantoneiras.

Os resultados da aplicação da equação 2.6 prescrita pela norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) e a equação 2.8 prescrita pela norma americana AISI S100 (2016) para cantoneiras são apresentados a seguir, por meio da avaliação das diferenças ($C_{t,exp} - C_t$) entre os coeficientes obtidos nos ensaios, e aqueles calculados pelas respectivas equações. A Tabela 5.14 apresenta a avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Teh e Gilbert (2013a).

Tabela 5.14 – Avaliação da equação proposta em cantoneiras neste trabalho aplicada aos casos Teh e Gilbert (2013a)

Estatística	Equação	Equação	Equação
	NBR 14762 (2010)	AISI (2016)	Proposta
Média das diferenças	-0,160 (29,4%)	-0,006 (4,4%)	-0,013 (4,9%)
Desvio Padrão das diferenças	0,073 (12,7%)	0,029 (3,4%)	0,029 (3,2%)
Diferença Mínima	-0,284	-0,076	-0,060
Diferença Máximo	0,010	0,050	0,041
Coeficiente C_t Mínima	0,400	0,315	0,285
Coeficiente C_t Máximo	0,900	0,717	0,643

A Tabela 5.14 mostra a aplicação da equação proposta neste trabalho, com baixos valores para a média (4,9%) e o desvio padrão (3,2%) das diferenças e uma diferença negativa (-0,060). Aplicando a equação prescrita pela norma NBR 14.762 ABNT (2010), estas diferenças chegaram a 29,4% dos valores experimentais, valor que apresentou um desvio padrão de 12,7%, já na equação prescrita pela AISI S100 (2016) as diferenças foram de 4,4% para a média das diferenças dos valores experimentais, com um desvio padrão de 3,4%. Conclui-se que a equação 5.10 proposta neste trabalho é melhor para prever o coeficiente C_t , chegando um menor valor das diferenças negativas de -0,060 e um menor desvio padrão de 3,2%. Isso pode ser visualizado nas Figuras 5.15 e 5.16 a seguir.

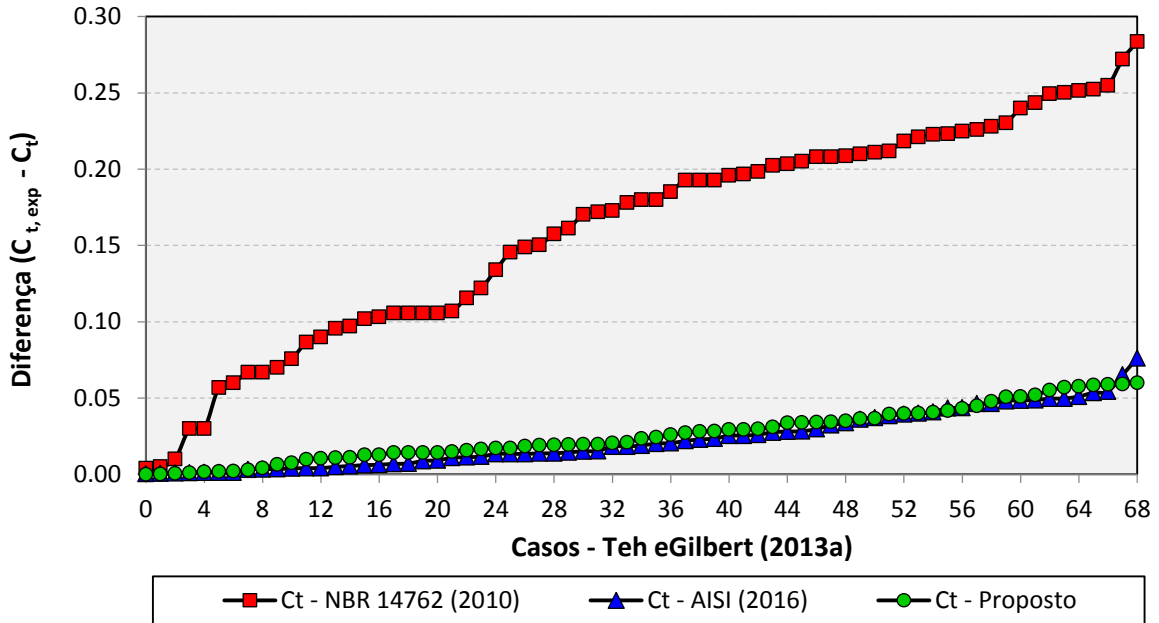


Figura 5.15 – Valores de ensaios de cantoneiras absolutos ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Teh e Gilbert (2013a)

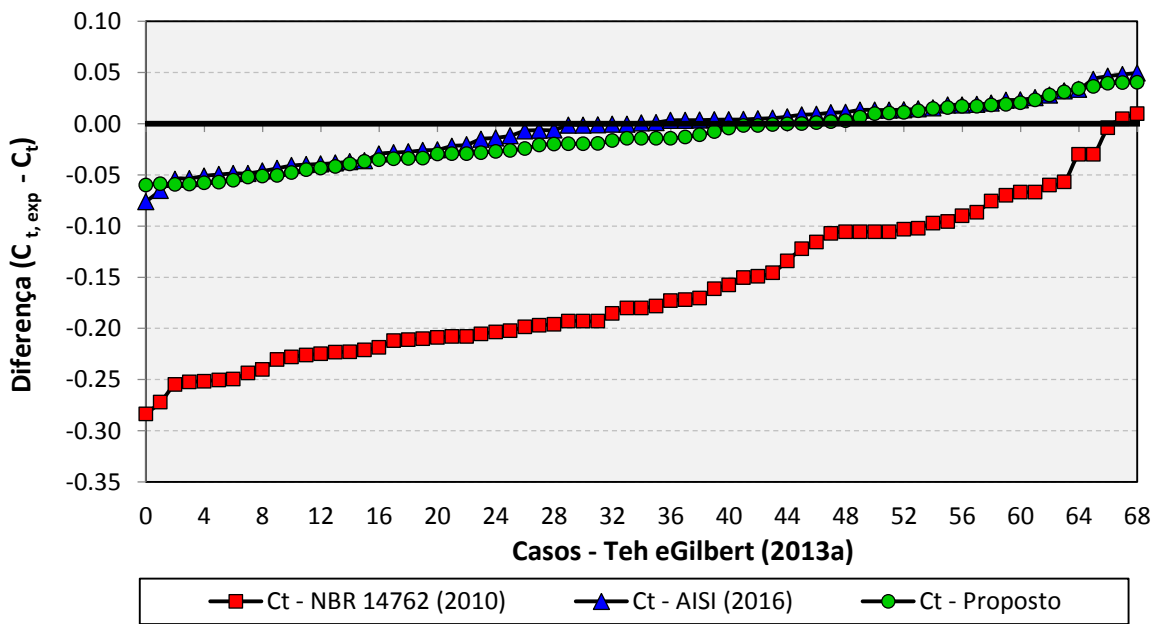


Figura 5.16 – Valores de ensaios de cantoneiras ordenados das diferenças produzidas pelas equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Teh e Gilbert (2013a)

Os gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 apresentam valores das diferenças produzidas pela aplicação da equação de cálculo do coeficiente C_t prescrita pelas normas NBR 14.762 (2010), AISI S100 (2016) e aquela proposta neste trabalho (equação 5.10). O grande volume de resultados negativos obtidos com a aplicação da equação proposta pela norma NBR 14.762

ABNT (2010) pode ser observado, no gráfico da Figura 5.15. Por outro lado, a equação proposta (equação 5.10) apresenta um bom comportamento, obtendo menores valores das diferenças e com melhor distribuição.

5.4.4 Seleção das amostras de perfis U formados a frio para regressão múltipla linear

Em um total de 100 ensaios em perfis U formados a frio no aço COR 420 e nos aços galvanizado ZAR 345 e ZAR 400, 75 apresentaram como modo de falha a ruptura da seção líquida. Contudo, conforme análise realizada no capítulo anterior, para algumas dessas conexões a força de ruptura para este tipo de falha está adequadamente quantificada pelas equações da norma (NBR 14.762 ABNT, 2010), como no caso dos perfis U conectados por todos os elementos, no flange e na alma do perfil.

Do total de perfis U ensaiados, apenas 6 com 2 parafusos por seção apresentaram como falha, a ruptura da seção líquida e, portanto, não são representativos deste tipo de configuração. Sendo assim, os resultados destes perfis não serão utilizados na modelagem estatística, por representar condições de projeto onde recomendações específicas podem ser feitas de modo a abranger estes casos.

Então, foram analisados estatisticamente, os resultados de 57 perfis U, com duas ou mais seções de parafusos, que apresentaram ruptura da seção líquida como modo de falha.

5.4.5 Obtenção do modelo de regressão múltipla linear em perfis U

Atendendo as seguintes situações, estabeleceu-se que o modelo obtido por regressão dos dados dos ensaios deveria descrever as ligações parafusadas em perfis U formados a frio:

- a. Perfis U conectados pela alma com uma linha de furo
- b. Perfis U conectados pela alma com duas linhas de furos
- c. Perfis U conectados pelos flanges

Fundamentado na análise dos resultados realizada no capítulo anterior, que mostrou as diversas tendências de acréscimo e redução do coeficiente C_t em função das propriedades das ligações ensaiadas, diversas grandezas relacionadas com as características das ligações foram escolhidas e avaliadas estatisticamente de maneira a obter-se um modelo que explicasse matematicamente os resultados obtidos.

Para a realização da regressão estatística, foi utilizado o programa STATISTICA, versão 10 (STATSOFT, 2011).

Somente as variáveis que se mostraram estatisticamente significativas foram incorporadas ao modelo. Assim, foram selecionadas as seguintes características geométricas dos perfis U que pudessem expressar as condições especificadas:

- a. Distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade (\bar{x});
- b. Comprimento total da ligação (L);
- c. Largura total da alma (b_w);
- d. Largura total do flange (b_f);
- e. Espessura da chapa do perfil (t).

A variável \bar{x} quantifica a redução da eficiência da ligação à medida que a linha de força afasta-se do centro de gravidade da seção transversal e o comprimento L expressa o fato de ocorrer um aumento naquela eficiência à medida que se aumenta o número de seções com parafusos.

Pretende-se modelar de maneira explícita os casos de perfis U conectado pela alma, utilizando a largura total do flange desconectada (b_f) e os casos de perfis U conectados pelos flanges utilizando a largura total da alma desconectada (b_w) que se expressa diretamente na equação.

A espessura da chapa dos perfis U (t) busca incorporar uma medida da esbeltez do elemento conectada, a qual é intensamente solicitada por tensões de tração e compressão devido as não-linearidades introduzidas pelos furos e tensões de contato dos parafusos.

Todas estas variáveis mostraram alta correlação com o coeficiente C_t e, de modo a permitir sua aplicação adimensional, elas foram empregadas através da relação tradicional \bar{x}/L e através da seguinte relação, espessura, a soma da largura total da aba conectada e a largura total da aba desconectada $t/(b_w + 2b_f)$.

Uma vez determinadas as variáveis estatisticamente significativas para o modelo, foram excluídos os valores extremos (*outliers*) cujos resíduos apresentaram valores superiores a 2 desvios-padrões ($\pm 2\sigma$) e, então, verificada a hipótese de distribuição normal dos resíduos, a qual mostrou que não foi violada. A Figura 5.17 apresenta a distribuição dos resíduos e a distribuição normal esperada e a Figura 5.18 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

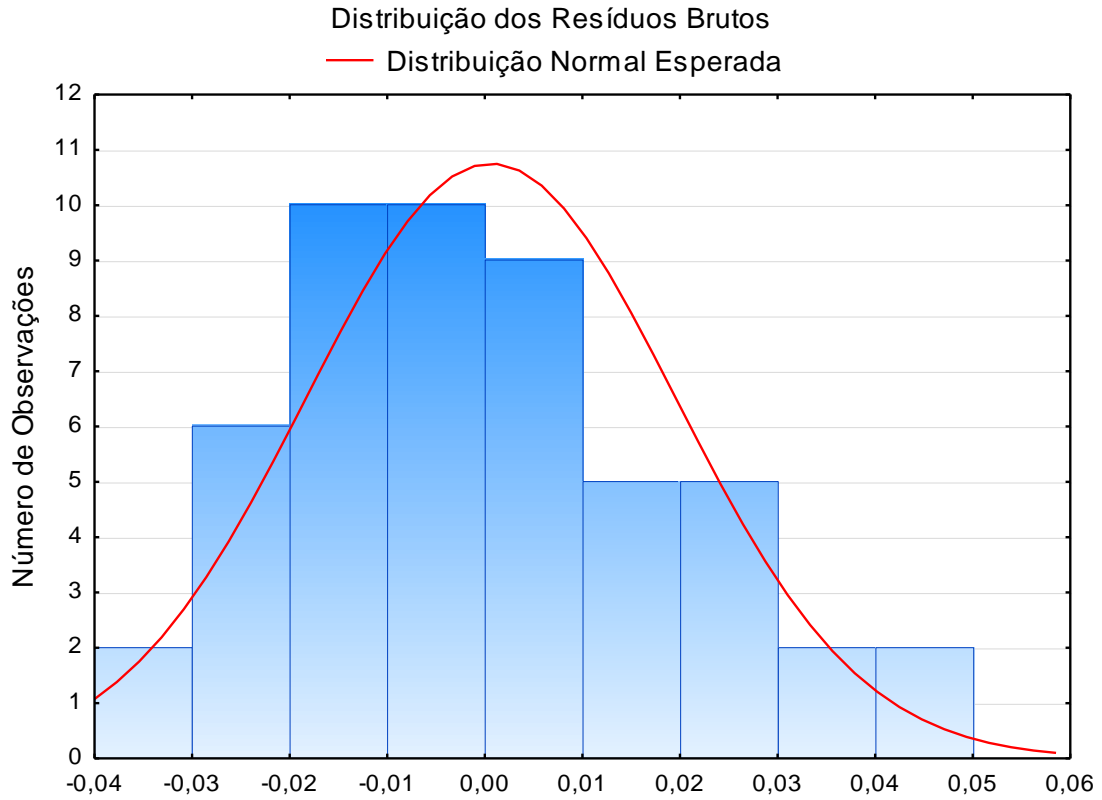


Figura 5.17 – Distribuição dos resíduos e distribuição normal esperada em perfis U

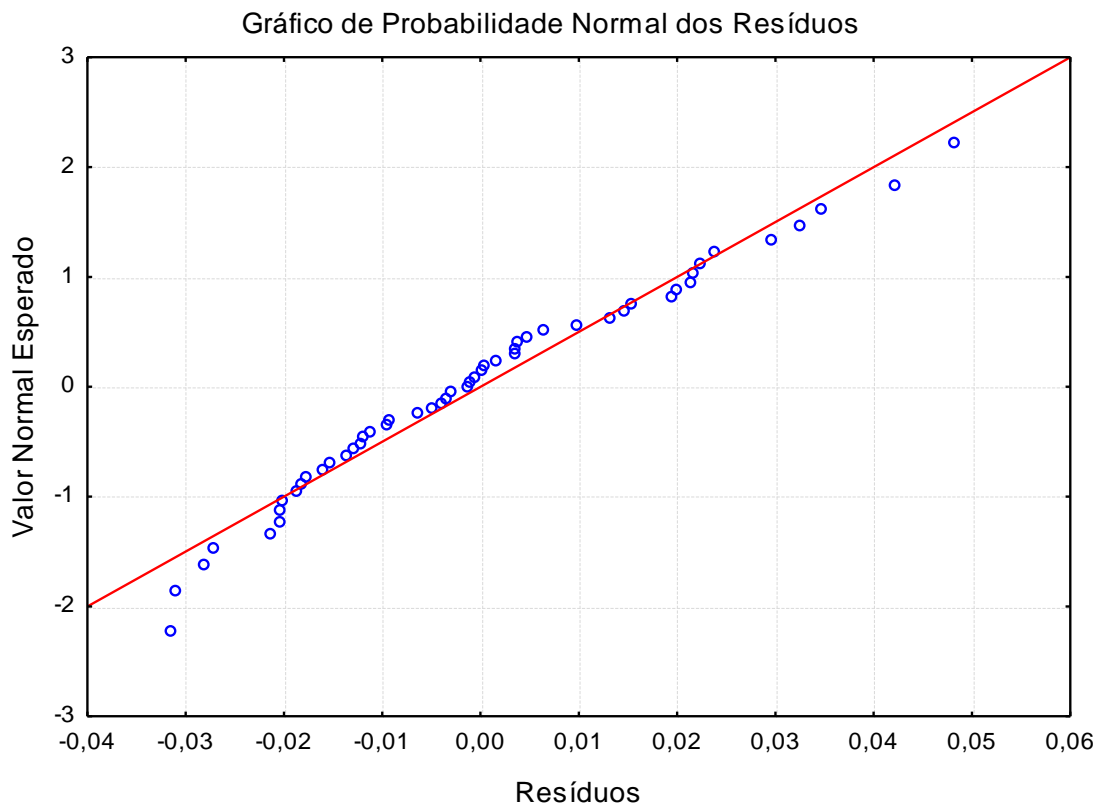


Figura 5.18 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos em perfis U

Ao final das etapas de remoção dos extremos e de avaliação dos resíduos, permaneceram 51 casos que produziram um modelo altamente significativo ($p < 0.001$), com coeficiente de determinação (R^2) de 95,6%, coeficiente de correlação múltiplo (R) igual a 97,7%, erro padrão da estimativa de C_t igual a 0,0278 e alta significância estatística para os parâmetros obtidos (estatística p). Estas estatísticas são apresentadas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Estatísticas da regressão linear múltipla em perfis U

Estatística	Valor
R Múltiplo	0,9779
R^2 Múltiplo	0,9563
R^2 Ajustado	0,9511
F(2,17)	185,91
p-level	0,0000
Erro Padrão da Estimativa	0,0278

A Tabela 5.16 mostra um conjunto de informações sobre a qualidade do modelo obtido pela regressão múltipla realizada e é apresentada a seguir.

Tabela 5.16 – Coeficientes de regressão para o modelo de perfis U obtido

	<i>Beta</i>	<i>Erro Padrão Beta</i>	<i>B*</i>	<i>Erro Padrão B</i>	<i>t (52)</i>	<i>p-level</i>
Intercepto			0,862352	0,010749	41,1447	0,000000
\bar{x}/L	-0,941734	0,032861	-1,020296	0,034756	-19,2710	0,000000
$t/(b_w + 2b_f)$	1,653132	0,044674	0,264888	0,725394	4,9010	0,000000

Todas as variáveis adotadas apresentaram alta significância (p -level), com baixo erro-padrão para os coeficientes angulares de regressão padronizados ($Beta$) e originais (B^*). Os coeficientes Beta permitiram comparar a contribuição relativa de cada variável independente na estimativa da variável dependente (coeficiente C_t), os coeficientes angulares originais (B^*) com asterisco e marcadas de vermelho que devem ser utilizados.

Após a avaliação destas informações e com base nos resultados apresentados na Tabela 5.16, pode-se finalmente escrever a equação para perfil U que modela o coeficiente de redução da área líquida em função das grandezas apresentadas:

$$C_{t \text{ Perfil } U} = 0,86 - 1,0 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) + 0,26 \left(\frac{t}{b_w + 2b_f} \right) \quad (5.11)$$

A viabilidade desta equação está estatisticamente verificada através dos valores apresentados nas Tabelas 5.15 e 5.16. Entretanto, devem ser feitas avaliações de sua aplicação a outros conjuntos de dados que atendam as premissas usadas em sua modelagem.

Em seguida, a equação (5.11) proposta neste trabalho foi avaliada através de sua aplicação nos dados originais e em dados experimentais de outros pesquisadores.

5.4.6 Avaliação do modelo de regressão em perfis U

Em termos de comparação, assim como o realizado na modelagem da regressão múltipla linear das cantoneiras, apresenta-se, a seguir, a avaliação da aplicação da equação proposta (equação 5.11) nos resultados experimentais de perfis U obtidos neste trabalho, com o nome de casos - UnB, e também aqueles apresentados por (YIP e CHENG, 2000; HOLCOMB et. al., 1995; MAIOLA, 2004; TEH e GILBERT, 2013).

5.4.6.1 Avaliação comparativa da equação proposta nos ensaios de perfis U (casos UnB)

Com o intuito de realizar uma avaliação comparativa, foi avaliada a aplicação da equação 5.11 no conjunto de 57 ensaios de perfis U realizados neste trabalho (incluindo os 6 que apresentaram resíduos superiores a $\pm 2\sigma$ e não foram considerados na regressão), as quais possuíam as seguintes características: perfis U conectados pela alma com uma linha de furos, perfis U conectados pela alma com duas linhas de furos e perfis U conectados pelos flanges.

Os resultados da equação 5.11 na determinação do coeficiente C_t e, também, os resultados da aplicação da equação 2.6 prescrita pela norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) e a equação 2.9 prescrita pela norma americana AISI S100 (2016) para os mesmos tipos de perfis U são apresentados a seguir, através da avaliação das diferenças ($C_{t, \text{exp}} - C_t$) entre os coeficientes obtidos nos ensaios, e aqueles calculados pelas respectivas equações. A Tabela 5.17 apresenta a avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos próprios perfis ensaiados.

Tabela 5.17 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos próprios perfis U ensaiados

Estatística	Equação	Equação	Equação
	NBR 14762 (2010)	AISI (2016)	Proposta
Média das diferenças	-0,148 (24,5%)	-0,026 (17,6%)	-0,075 (14,6%)
Desvio Padrão das diferenças	0,131 (19,2%)	0,142 (13,6%)	0,121 (13,0%)
Diferença Mínima	-0,400	-0,338	-0,290
Diferença Máximo	0,130	0,189	0,123
Coefficiente C_t Mínima	0,577	0,588	0,510
Coefficiente C_t Máximo	0,900	0,717	0,778

Podem-se observar os valores percentuais ao lado dos valores médios das diferenças, em que, indicam a média das diferenças percentuais absolutas. Ou seja, empregando a equação proposta, a diferença média entre o valor obtido pela equação e o valor experimental foi de 14,6%, com desvio padrão de 13,0%. Aplicando-se a equação prescrita pela (NBR 14.762 ABNT, 2010), estas diferenças chegaram a 24,5% dos valores experimentais, valor este que apresentou um desvio padrão de 19,2%, e também, na equação prescrita pela AISI S100 (2016) as diferenças chegaram a 17,6% dos valores experimentais, com um desvio padrão de 13,6%, mostrando-se maiores que os valores da equação proposta.

Observa-se que os valores máximos e mínimos das diferenças obtidas com a aplicação da equação 5.11 são inferiores àqueles dados pelas equações das normas. Note-se, também, que valores altos para as diferenças negativas indicam que a equação propicia um valor da força de ruptura superior àquela encontrada nos ensaios.

Com a aplicação da equação 5.11, estas diferenças negativas chegaram a um máximo de -0,290, enquanto que com o uso da equação da (NBR 14.762 ABNT, 2010) estes valores chegaram a -0,400 e com o uso da AISI S100 (2016) estes valores chegaram a -0,338. Em relação aos perfis U formados a frio e conectados por parafusos sob tração, conclui-se que através dos resultados da Tabela 5.17, a equação proposta neste trabalho prediz muito melhor o coeficiente C_t comparada com as equações das normas (NBR 14.762 ABNT, 2010) e AISI S100 (2016). Isso pode ser visualizado nas Figuras 5.19 e 5.20.

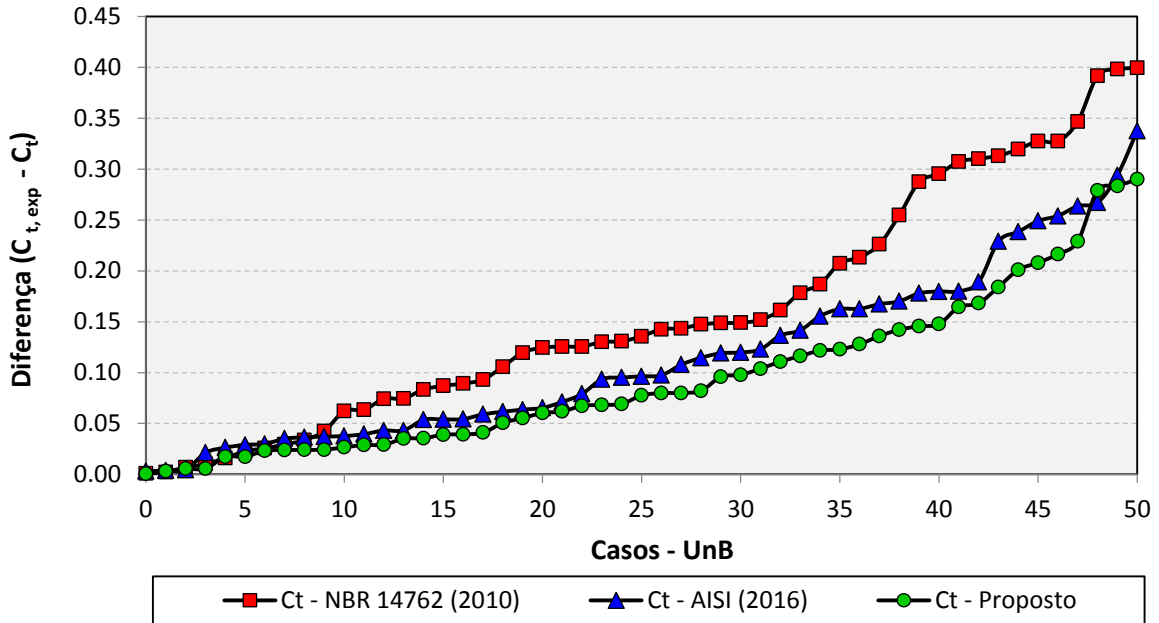


Figura 5.19– Valores de ensaios de perfis U absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010), AISI S100 (2016) e a proposta neste trabalho

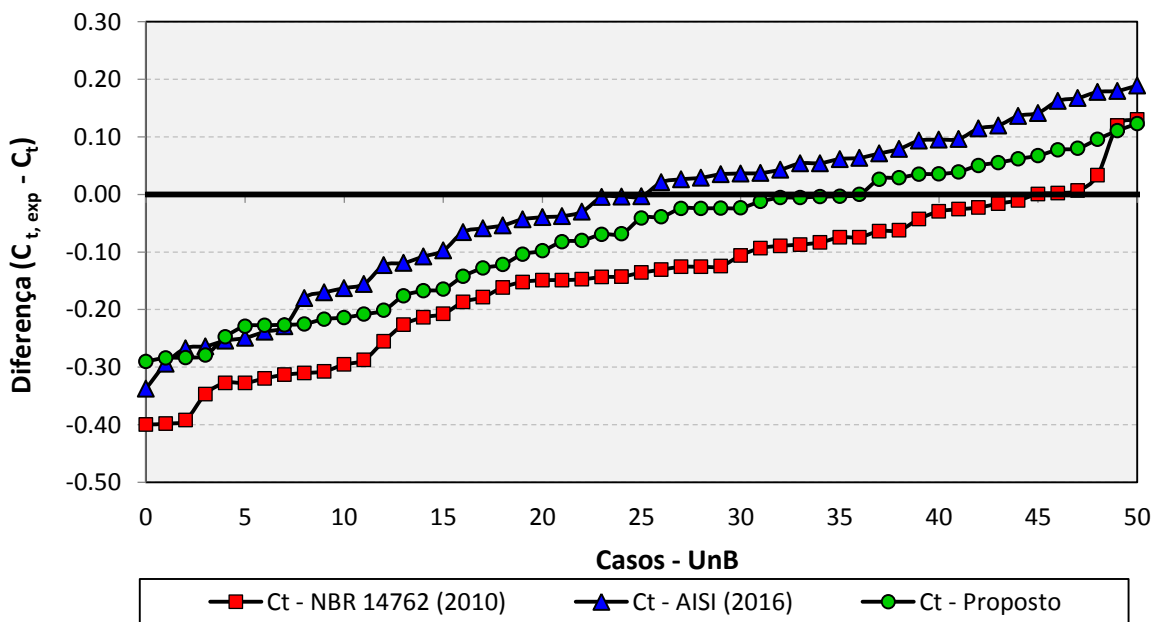


Figura 5.20 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam valores das diferenças produzidas pela aplicação da equação de cálculo do coeficiente C_t prescrita pelas normas NBR 14.762 (2010), AISI S100 (2016) e aquela proposta neste trabalho para perfis U (equação 5.11), tendo valores absolutos no gráfico da Figura 5.19 e com os respectivos sinais no gráfico da Figura 5.20.

O maior volume de resultados negativos obtidos com a aplicação da equação proposta pela norma NBR 14.762 ABNT (2010) pode ser observado, no gráfico da Figura 5.20. Por outro lado, a equação proposta (equação 5.11) levou realmente a menores valores das diferenças e de forma melhor distribuída.

5.4.6.2 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

Da mesma forma, realizou-se a avaliação da equação proposta neste trabalho (equação 5.11) juntamente com as equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) nos dados de ensaios experimentais realizados por Yip e Cheng (2000) e por Holcomb et. al. (1995), cujos dados deram a base para a proposição da equação vigente na norma brasileira NBR 14.762 ABNT (2001).

A Tabela 5.18 apresenta as estatísticas das diferenças obtidas com a aplicação das três equações, a proposta neste trabalho e as prescritas pelas normas.

Tabela 5.18 – Avaliação da equação proposta em perfis U neste trabalho aplicada aos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

Estatística	Equação NBR 14762 (2010)	Equação AISI (2016)	Equação Proposta
Média das diferenças	0,012 (24,2%)	0,147 (31,9%)	0,072 (22,6%)
Desvio Padrão das diferenças	0,200 (18,7%)	0,214 (30,2%)	0,159 (17,8%)
Diferença Mínima	-0,243	0,130	-0,134
Diferença Máximo	0,408	0,514	0,301
Coeficiente C_t Mínima	0,614	0,581	0,546
Coeficiente C_t Máximo	0,900	0,765	0,836

Observa-se na Tabela 5.18, que a aplicação da equação proposta neste trabalho levou a diferenças negativas de -0,134, com menor desvio padrão de 17,8% quando comparadas com aquelas geradas pela aplicação das equações das normas NBR 14.762 ABNT (2001) e AISI S100 (2016). Deve-se notar que, mesmo os dados de Holcomb et. al. (1995) tendo sido os que deram origem à equação prescrita pela NBR 14.762 ABNT (2001), o comportamento da equação proposta neste trabalho, naquele conjunto de dados, foi ligeiramente superior ao das normas, com valores menores de desvio. Como pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.21 e 5.22.

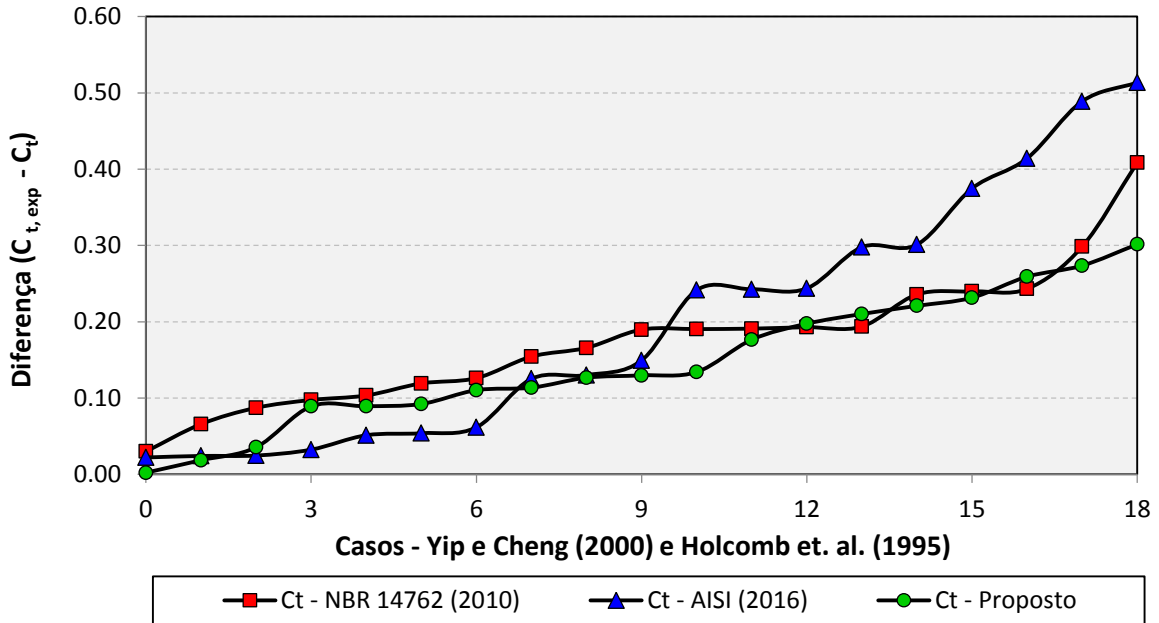


Figura 5.21 – Valores de ensaios de perfis U absolutos ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

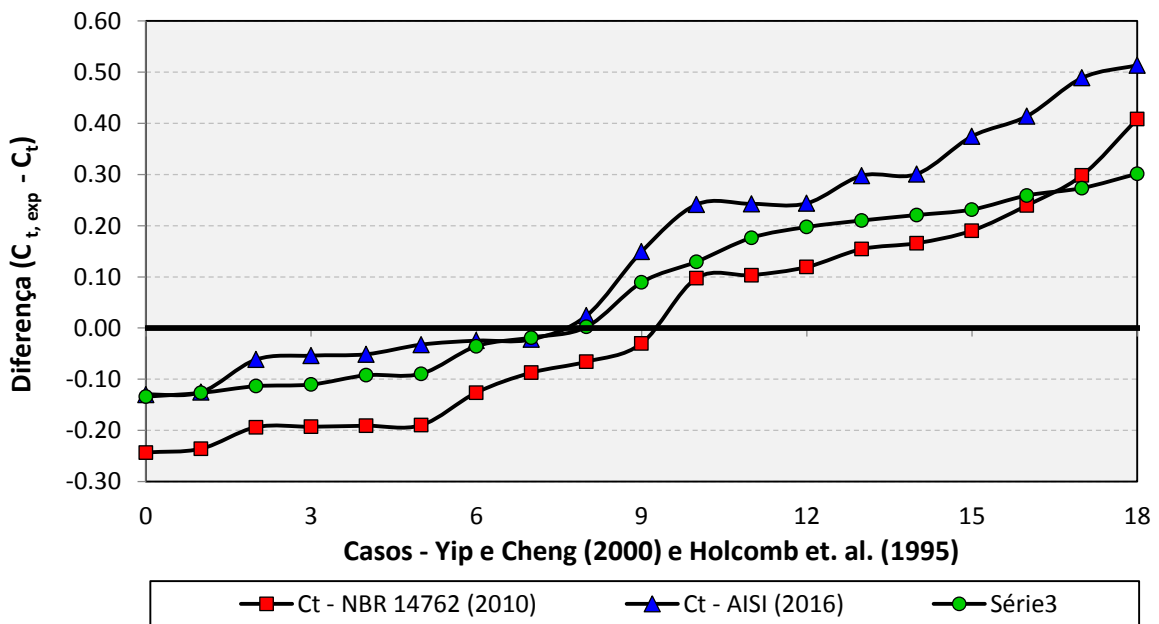


Figura 5.22 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al. (1995)

Observa-se no gráfico da Figura 5.22 que, novamente a equação da norma NBR 14.762 ABNT (2010) levou a um grande número de resultados negativos para as diferenças.

Através da equação proposta neste trabalho (equação 5.11) concluiu-se que a descrição dos dados dos ensaios de Yip e Cheng (2000) e Holcomb et. al (1995) estão adequados, mesmo considerando que estes pesquisadores tenham usado um grande número de perfis com reduzida espessura (1,067 mm), inferiores àsquelas utilizadas nos ensaios deste trabalho.

5.4.6.3 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Maiola (2004)

Ainda avaliando e comparando a equação 5.11 do coeficiente C_t , proposta para a previsão da força de ruptura da seção líquida em perfis U formados a frio com as equações de normas aplicando os dados experimentais obtidos no Brasil por Maiola (2004). A Tabela 5.19 apresenta os resultados estatísticos nos casos de Maiola (2004).

Tabela 5.19 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Maiola (2004)

Estatística	Equação NBR 14762 (2010)	Equação AISI (2016)	Equação Proposta
Média das diferenças	-0,272 (53,0%)	-0,123 (28,6%)	-0,128 (26,7%)
Desvio Padrão das diferenças	0,116 (33,7%)	0,121 (25,3%)	0,089 (20,0%)
Diferença Mínima	-0,515	-0,338	-0,258
Diferença Máximo	-0,095	0,074	0,041
Coeficiente C_t Mínima	0,611	0,580	0,538
Coeficiente C_t Máximo	0,900	0,742	0,816

A Tabela 5.19 apresenta a aplicação da equação proposta neste trabalho, com baixos valores para a média (26,7%) e o desvio padrão (20,0%) das diferenças e uma diferença negativa (-0,258) inferior àsquelas dadas pelas normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016). Nos gráficos das Figuras 5.23 e 5.24 apresentam-se as distribuições ordenadas das diferenças para os casos ensaiados por Maiola (2004).

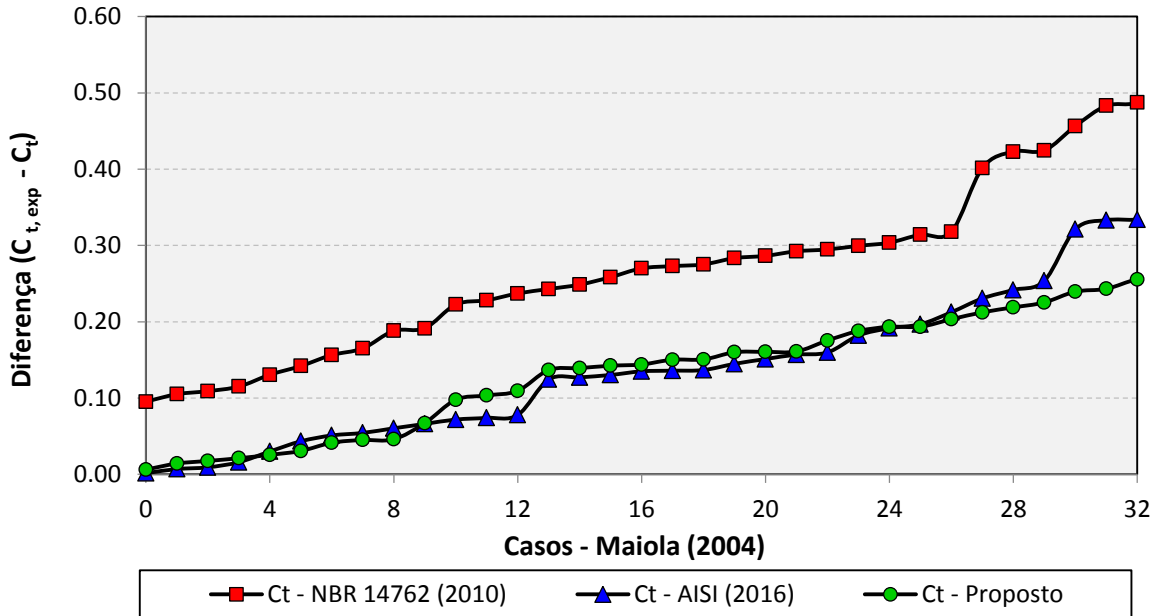


Figura 5.23 – Valores de ensaios de perfis U ordenados absolutos das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004)

A Figura 5.23 apresenta um bom comportamento da equação proposta neste trabalho (equação 5.11), quando testada nos casos de Maiola (2004), sendo estes, dados de ensaios realizados no país, que englobam perfis com pequenas espessuras (1,55 mm) e também com espessuras relativamente altas (4,75 mm).

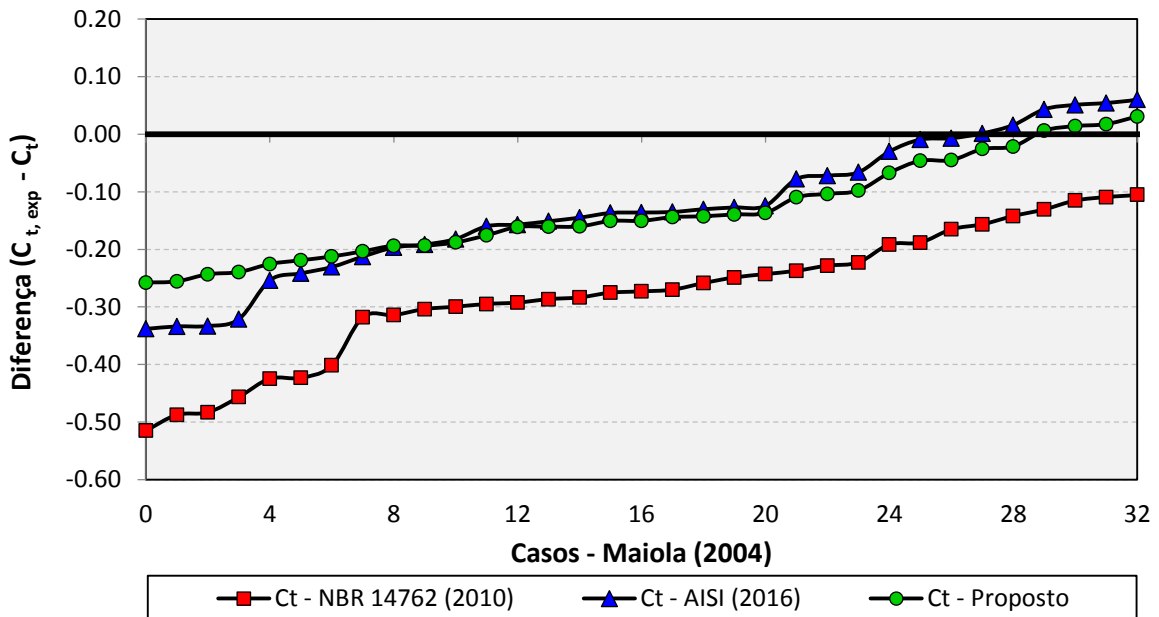


Figura 5.24 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho nos casos de Maiola (2004)

Observa-se nesse gráfico da Figura 5.24, certo volume de resultados negativos obtidos com a aplicação das equações das normas NBR 14.762 ABNT (2010) e AISI S100 (2016) comparadas com a equação proposta neste trabalho, aplicadas nos casos de Maiola (2004).

5.4.6.4 - Avaliação da equação proposta em perfis U nos casos apresentados por Teh e Gilbert (2013b)

Os autores Teh e Gilbert (2013b) propuseram uma equação referente à ruptura da seção líquida em perfis U, assim a norma americana AISI S100 (2016) aderiu esta equação proposta por estes autores.

Outra importante avaliação utilizando os casos de Teh e Gilbert (2013b), aplicando a equação 5.11, na determinação do coeficiente C_t , no sentido de comparar com a norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) e a norma AISI S100 (2016).

Os resultados da aplicação da equação 2.6 prescrita pela norma (NBR 14.762 ABNT, 2010) e a equação 2.9 prescrita pela norma americana AISI S100 (2016) para perfis U são apresentados a seguir, por meio da avaliação das diferenças ($C_{t,exp} - C_t$) entre os coeficientes obtidos nos ensaios, e aqueles calculados pelas respectivas equações. A Tabela 5.20 apresenta a avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Teh e Gilbert (2013b).

Tabela 5.20 – Avaliação da equação proposta neste trabalho aplicada aos casos de Teh e Gilbert (2013b)

Estatística	Equação NBR 14762 (2010)	Equação AISI (2016)	Equação Proposta
Média das diferenças	-0,026 (9,6%)	0,117 (14,0%)	0,078 (9,5%)
Desvio Padrão das diferenças	0,059 (5,7%)	0,063 (6,1%)	0,055 (5,2%)
Diferença Mínima	-0,133	0,018	-0,020
Diferença Máximo	0,120	0,295	0,209
Coeficiente C_t Mínima	0,658	0,612	0,580
Coeficiente C_t Máximo	0,900	0,755	0,813

A Tabela 5.20 mostra a aplicação da equação proposta neste trabalho, com baixos valores para a média (9,5%) e o desvio padrão (5,2%) das diferenças e uma diferença negativa (-0,020). Aplicando a equação prescrita pela norma NBR 14.762 ABNT (2010), estas diferenças chegaram a 9,6% dos valores experimentais, valor que apresentou um desvio padrão de 5,7%, já na equação prescrita pela AISI S100 (2016) as diferenças foram maiores com 14,0% para a média das diferenças dos valores experimentais, com um desvio padrão de 6,1%. Conclui-se que a equação 5.11 proposta neste trabalho é melhor para prever o

coeficiente C_t nos casos de Teh e Gilbert (2013b) cujos dados deram base para a proposição da equação atual na norma americana AISI S100 (2016), obtendo um valor menor de desvio padrão com 3,2%. Isso pode ser visualizado nas Figuras 5.25 e 5.26 a seguir.

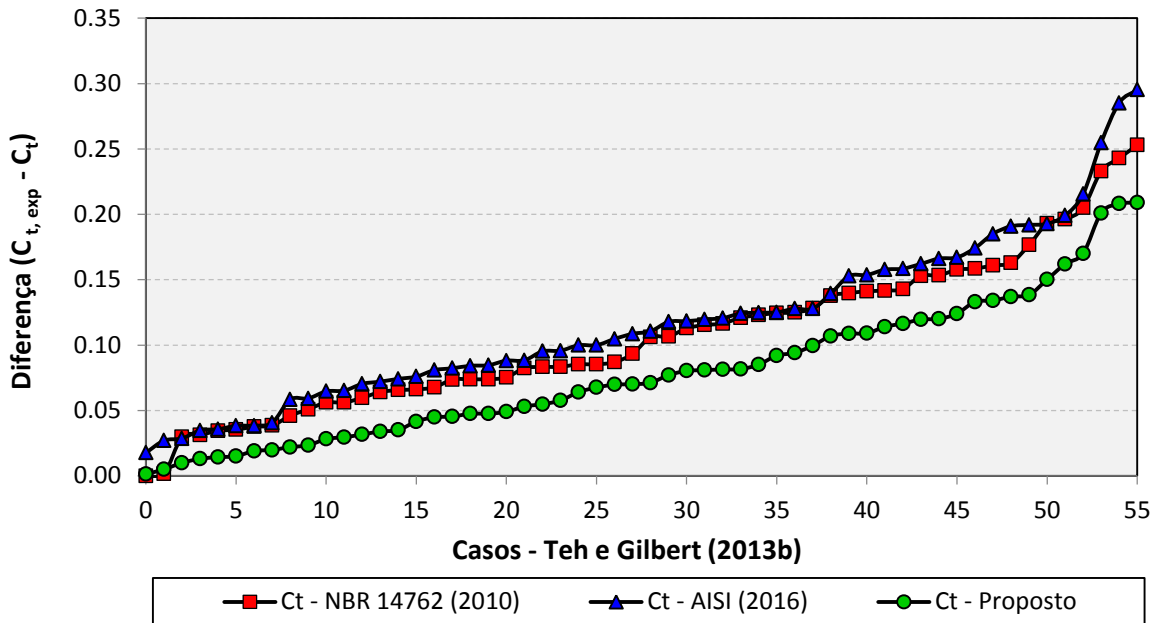


Figura 5.25 – Valores de ensaios de perfis U ordenados absolutos das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho aos casos de Teh e Gilbert (2013b)

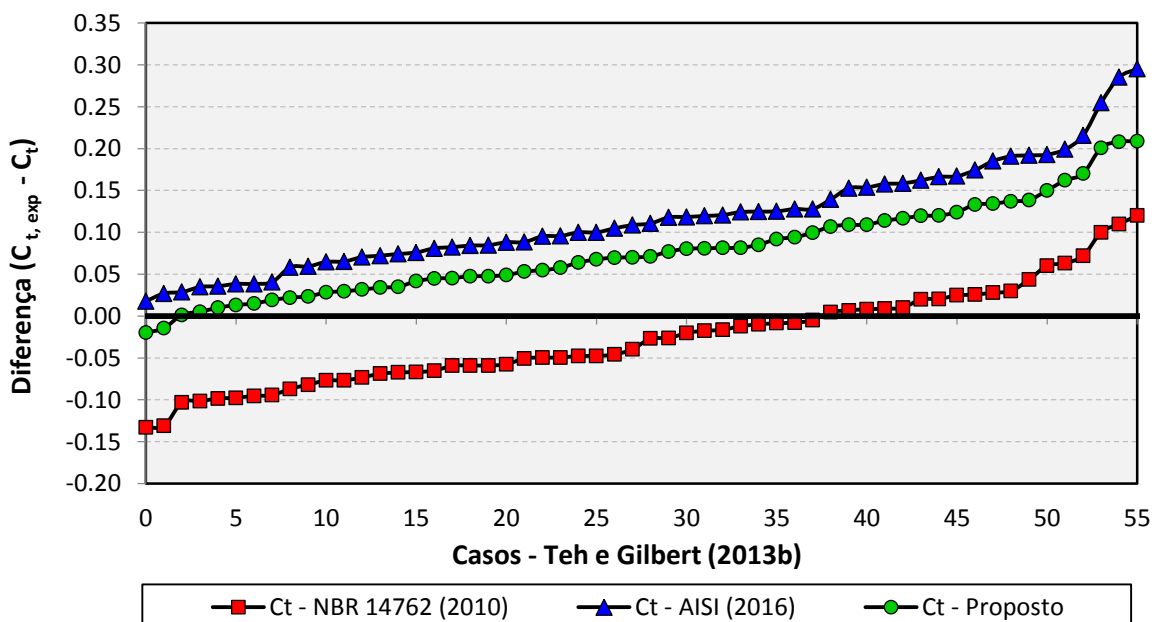


Figura 5.26 – Valores de ensaios de perfis U ordenados das diferenças produzidas pela equação da norma NBR 14.762 (2010), AISI (2016) e a proposta neste trabalho aos casos de Teh e Gilbert (2013b)

Os gráficos das Figuras 5.25 e 5.26 apresentam valores das diferenças produzidas pela aplicação da equação de cálculo do coeficiente C_t prescrita pelas normas NBR 14.762 (2010), AISI S100 (2016) e aquela proposta neste trabalho (equação 5.11). O grande volume de resultados negativos obtidos com a aplicação da equação proposta pela norma NBR 14.762 ABNT (2010) pode ser observado, no gráfico da Figura 5.26. Por outro lado, a equação proposta (equação 5.11) apresenta um bom comportamento, obtendo menores valores das diferenças de desvio padrão e com melhor distribuição.

5.5 COEFICIENTES PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO À RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA

De maneira geral, o processo de dimensionamento de uma ligação parafusada é um processo iterativo, pois uma determinada configuração de parafusos inicialmente planejada pode, após a aplicação da equação de determinação do coeficiente C_t , ser modificada dependendo do valor encontrado para a força de ruptura da seção líquida. No entanto, o uso de coeficiente pré-determinados pode ajudar o projetista de estruturas metálicas na escolha da ligação, com a garantia de estar utilizando um coeficiente conservativo.

5.5.1 Coeficientes de redução da área líquida (C_t) para pré-dimensionamento de ligações parafusadas em cantoneiras e perfis U formados a frio

Com base nos resultados obtidos nos 69 modelos que falharam por ruptura da seção líquida realizados neste trabalho, nos 86 resultados de De Paula (2006), nos 27 resultados de Holcomb et. al (1995), nos 15 resultados de Yip e Cheng (2000) e nos 69 resultados de Teh e Gilbert (2013a), foram retiradas as médias dos cálculos do dimensionamento de ruptura da seção líquida para cada tipo de ligação. Assim propõe-se na Tabela 5.21 os valores conservativos dos coeficientes de redução da área líquida em cantoneiras formadas a frio, com 1 ou 2 furos por seção, com 2 ou mais seções de parafusos, com abas iguais ou desiguais, para fins de pré-dimensionamento de ligações.

Tabela 5.21 – Valores de coeficientes de redução da área líquida para pré-dimensionamento de ligações parafusadas em cantoneira formadas a frio.

Tipo de Cantoneira	1 Parafuso por seção (1 linha de parafusos)			2 Parafusos por seção (2 linhas de parafusos)		
	2	3	4	2	3	4
	Seções	Seções	Seções	Seções	Seções	Seções
<i>abas iguais</i>	0,49	0,53	0,55	0,48	0,56	0,60
<i>abas desiguais ligação pela menor aba</i>	0,40	0,44	0,49	0,50	0,53	0,60
<i>abas desiguais ligação pela maior aba</i>	0,54	0,62	0,68	0,60	0,65	0,70

Para perfis U, utilizaram-se os resultados obtidos dos 74 modelos que falharam por ruptura da seção líquida realizados neste trabalho, os 19 resultados de Holcomb et. al (1995) e Yip e Cheng (2000) e os 56 resultados de Teh e Gilbert (2013b). Assim como foi feito para as cantoneiras formadas a frio, com esses resultados foram retiradas as médias dos cálculos do dimensionamento de ruptura da seção líquida para cada configuração de ligação, chegando-se aos valores conservativos dos coeficientes de redução da área líquida em perfis U formados a frio, com 1 ou 2 furos por seção, com 2 ou mais seções de parafusos, com ligação pela alma e com ligação pelos flanges, mostrados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Valores de coeficientes de redução da área líquida para pré-dimensionamento de ligações parafusadas em perfis U formados a frio.

Tipo de Perfil U	1 Parafuso por seção (1 linha de parafusos)			2 Parafusos por seção (2 linhas de parafusos)		
	2	3	4	2	3	4
	Seções	Seções	Seções	Seções	Seções	Seções
<i>ligação pela alma</i>	0,67	0,71	0,86	0,61	0,73	0,81
<i>ligação pelos flanges</i>				0,50	0,70	0,80

Em relação ao custo do material, evidentemente, as Tabelas 5.21 e 5.22 levarão a resultados conservativos. Portanto, o seu uso deve ser utilizado apenas em uma avaliação rápida da resistência da ligação que, na maioria das vezes, conduz o dimensionamento de todo o elemento estrutural.

Não se pode deixar de levar em consideração o uso das ligações em perfis formados a frio submetidos a força de tração, com configurações de parafusos em zig-zag. Conclui-se que, a equação proposta neste trabalho deve, a princípio, fornecer bons resultados também em ligações com parafusos em zig-zag. Entretanto, verificações específicas destas configurações de parafusos ainda devem ser realizadas.

CAPÍTULO 6

MODELAGEM NUMÉRICA

6. MODELAGEM NUMÉRICA

6.1 INTRODUÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA

Com o intuito de simular numericamente os ensaios experimentais dos perfis formados a frio estudados nesta pesquisa, um modelo não linear de elementos finitos foi desenvolvido. Para tal, foi utilizado o software ABAQUS. A não linearidade geométrica, o contato entre as partes (perfis formados a frio, chapa de fixação e parafuso) e as não linearidades dos materiais foram consideradas no modelo numérico.

6.1.1 Geometria do modelo

Inicialmente, para calibração e validação dos modelos numéricos foram aplicados à geometria, os resultados dos ensaio dos perfis formados a frio. Todos os modelos possuíam 600 mm de comprimento longitudinal, tanto cantoneiras como perfis U. As cantoneiras de abas iguais, conectadas com uma linha de parafusos continham 75 mm de largura. Também foram utilizadas cantoneiras de abas iguais de 100 mm de largura, conectadas com duas linhas de parafusos. Já os perfis U possuíam 100 mm de largura da alma e 40 mm de largura dos flanges dos perfis, obtendo a ligação na alma do perfil U com uma linha de parafusos e duas linhas de parafusos. A espessura nominal de 1,95 mm foi utilizada para todos os perfis formados a frio. Os parafusos utilizados na conexão foram ASTM A325 de 12,7 mm de diâmetro e um torque aplicado nos parafusos de 100 Nm. O material utilizado foi o aço galvanizado de alta resistência ZAR 345. A chapa de fixação consiste de um aço SAE 1045 com 12,7 mm de espessura, a disposição da ligação na cantoneira A2-B221 e as dimensões em milímetros das chapas de fixação estão apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2.

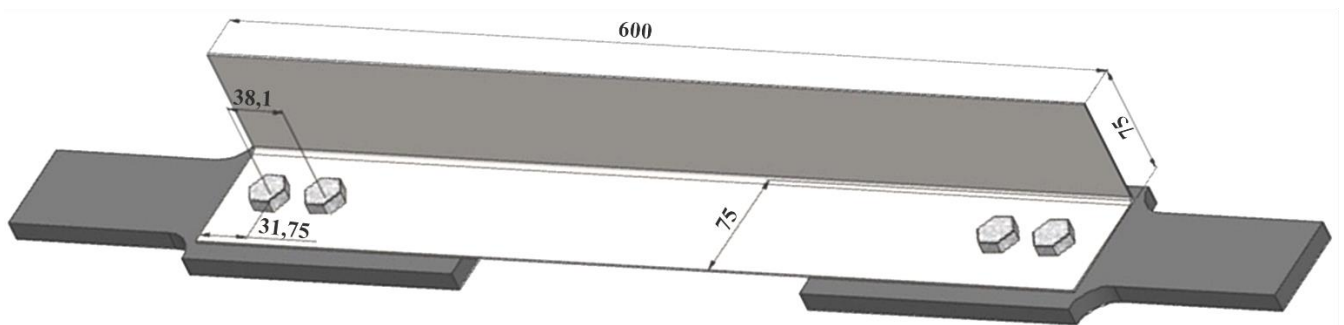


Figura 6.1 – Dimensões (mm) da ligação na cantoneira A2-B-221

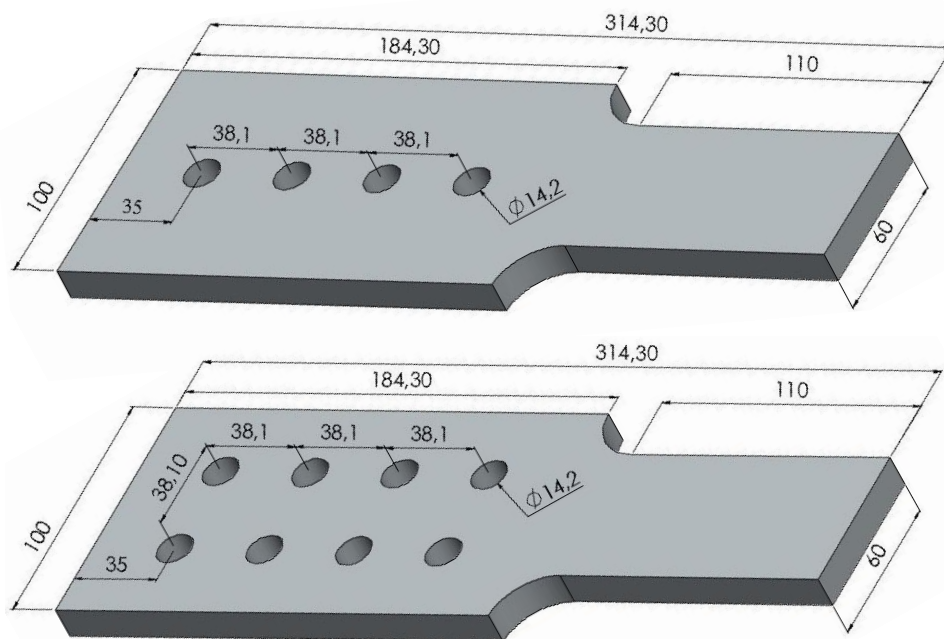


Figura 6.2 – Chapas de fixação com uma linha de furos e com duas linhas de furos e dimensões em milímetros (mm)

6.1.2 Modelo constitutivo para aço

Para modelagem do aço que constitui as partes do modelo numérico, um modelo constitutivo perfeitamente elástico-plástico foi utilizado. Este modelo constitutivo está presente na biblioteca de materiais do ABAQUS com a denominação PLASTIC. O PLASTIC adota o critério de escoamento de *von Mises*, com regra de fluxo associativa, ideal para a modelagem de materiais dúcteis como o aço (NGUYEN e KIM, 2009).

Para as cantoneiras e para os perfis U, partes objetos da pesquisa, portanto, partes importantes nos modelos em Elementos Finitos, foi atribuído ao material aço um diagrama tensão x deformação tri-linear, como o mostrado na Figura 6.3b. Desta forma, se aproxima com maior precisão o comportamento do aço nestas partes da conexão. Para as chapas de fixação e para os parafusos, foi atribuído um material aço com diagrama tensão x deformação bi-linear, como o mostrado na Figura 6.3a. Isso torna o modelo um pouco mais rápido do ponto de vista computacional.

Para o módulo de elasticidade do aço foi adotado o valor de 210 GPa. A Tabela 6.1 apresenta as propriedades mecânicas dos aços adotados para os perfis formados a frio, para a chapa de ligação e para os parafusos, no modelo numérico.

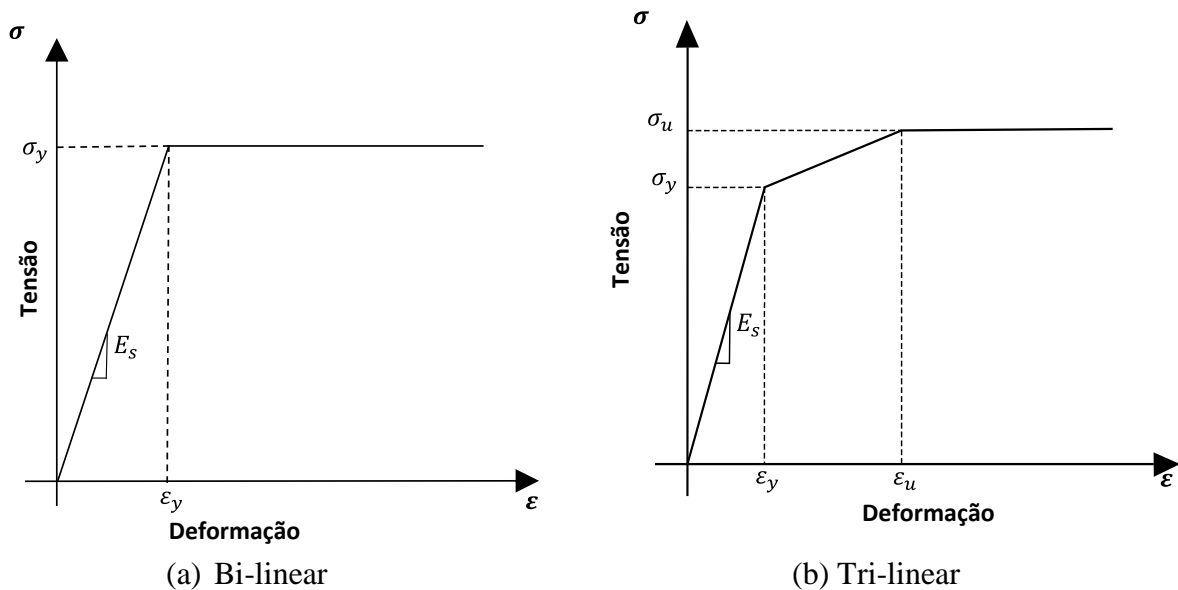


Figura 6.3 – Comportamento Uniaxial do aço (Modificado de NGUYEN e KIM, 2009)

A curva bi-linear é constituída por duas partes, a primeira é linear elástica, que se estende até ser atingida a tensão de escoamento do material. A segunda é uma região plástica, onde a tensão permanece constante com a variação da deformação. O modelo bi-linear estabelece o comportamento perfeitamente elástico-plástico.

Na curva tri-linear, o comportamento é inicialmente elástico, seguido por um endurecimento e logo após situa-se um escoamento perfeitamente plástico.

Tabela 6. 1 – Propriedades mecânicas do aço

espessura nominal, diâmetro	tipo de aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_u/f_y	alongamento (%)
#1,95 mm	ZAR 345	396,80	500,43	1,26	17,07
#12,7 mm	SAE 1045	450,00	585,00	1,30	16,00
#12,7 mm	ASTM A325	450,00	581,00	1,29	18,00

6.1.3 Tipos e malha de elementos finitos

Elementos finitos sólidos e de casca, presentes na biblioteca do ABAQUS, foram usados em todas as partes constituintes do modelo. Com isso, elementos de casca quadrilateral com oito nós e integração reduzida (SC8R) foram aplicados na modelagem das cantoneiras e dos perfis U. Na chapa de fixação e nos parafusos foram aplicados elementos sólidos de oito nós com integração reduzida (C3D8R). O tamanho do elemento adotado para as cantoneiras e para os perfis U foi de aproximadamente 10 mm. Devido à concentração de

tensões na região próxima aos furos, a malha das cantoneiras e dos perfis U foi refinada nesta região com elementos cuja dimensão variou entre 5,0 e 2,0 mm. O mesmo refinamento de malha foi aplicado nas chapas de ligação. Para a discretização dos parafusos, foram adotados elementos com menor dimensão que 1 mm. A distribuição dos elementos e o refinamento de malha podem ser visualizados na Figura 6.4.

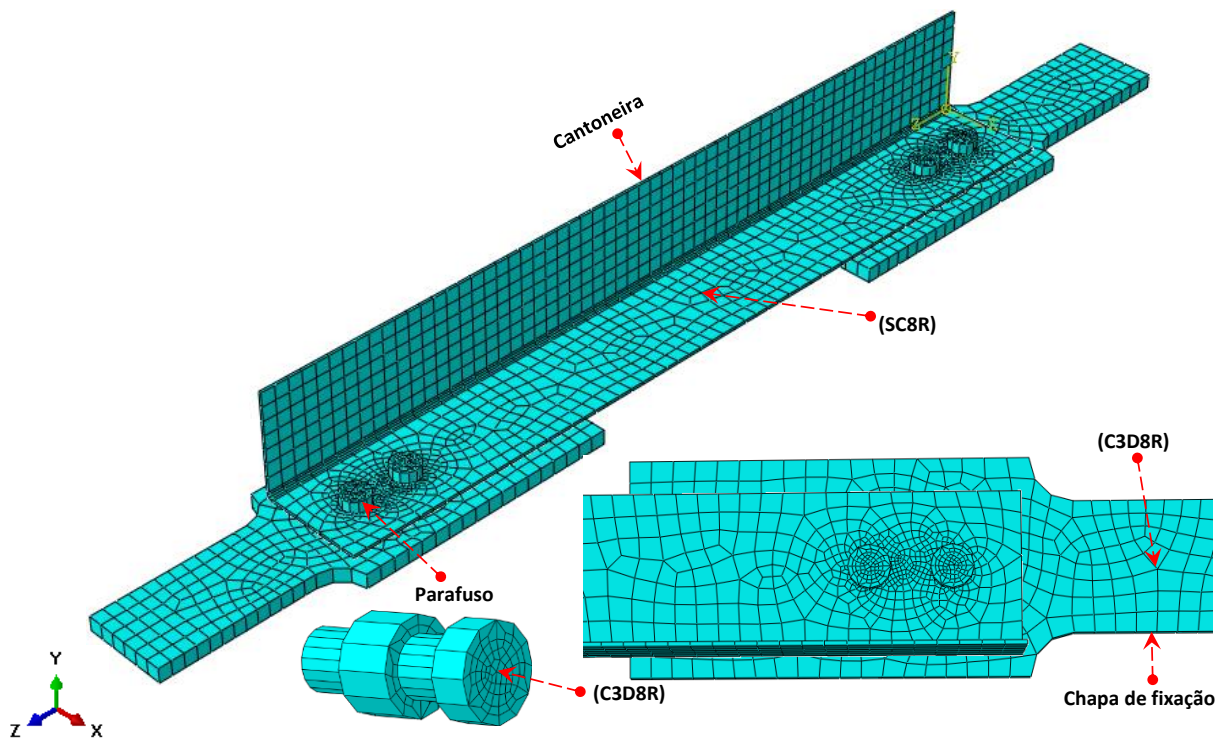


Figura 6.4 – Aspecto da malha adotada.

6.1.4 Carregamento e condições de contorno

O carregamento e as condições de contorno foram aplicados nos modelos numéricos de modo a obter a melhor correspondência com o ensaio de tração nas cantoneiras e perfis U, de aço formados a frio. Inicialmente, a força de aperto dos parafusos foi aplicada, utilizando a ferramenta *bolt load* do software ABAQUS. A magnitude da força de aperto foi estabelecida conforme o EUROCODE 1-8 (2010), onde a força de aperto deve provocar na seção transversal do parafuso uma tensão com valor de 70% de sua tensão de escoamento. Logo em seguida, na superfície 1 (Figura 6.5), foi aplicado na direção Z o carregamento de tração dos perfis.

Como observado, os carregamentos no modelo foram aplicados em duas etapas, na primeira etapa a força de aperto dos parafusos e na segunda etapa o carregamento de ensaio dos perfis. Para análise do modelo numérico quando aplicado a força de aperto dos parafusos, foi utilizado o método de análise estático de *Newton-Raphson* (MANUAL DO USUÁRIO ABAQUS, 2014). Logo após, iniciou-se o carregamento de ensaio dos perfis. Nesta etapa foi utilizado o método dinâmico explícito (MANUAL DO USUÁRIO ABAQUS, 2014). Apesar de ser um método dinâmico, pode ser aplicado em análises de modelos estáticos, desde que os efeitos de inércia sejam controlados com a lenta aplicação de força. O método dinâmico explícito é eficiente quando o modelo analisado apresenta grandes deformações e interações de contato entre componentes, condições presentes no modelo desenvolvido. Além do mais, diversos problemas de convergência ocorreram ao utilizar o método de *Newton Raphson* para aplicação do carregamento de ensaio dos perfis, motivando a aplicação do método dinâmico explícito.

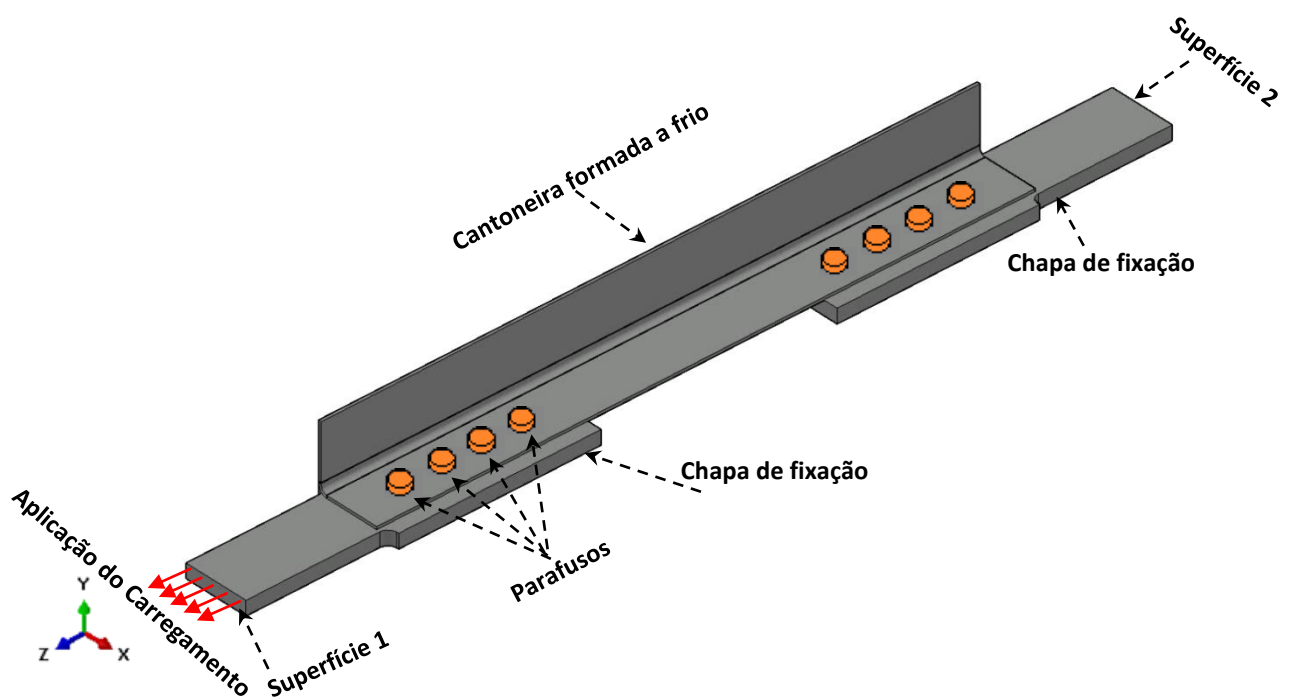


Figura 6.5 – Representação de aplicação do carregamento.

O carregamento na superfície 1 foi aplicado por meio de controle de velocidade, com o intuito de avaliar o comportamento dos perfis após ser atingida a força máxima do modelo. Foi utilizada uma velocidade constante de 50 mm/s. Na extremidade do modelo em que o

braço da máquina de ensaio permaneceu fixo (Superfície 2), foram restritos os deslocamentos de todos os nós nas direções X, Y e Z.

6.1.5 Superfícies de contato

As superfícies de contato entre as partes do modelo consistiram de: a) perfil e a chapa de fixação, b) perfil e parafuso, c) chapa de fixação e parafusos. Nos três casos, a interação entre as superfícies de contato foram definidas por meio de propriedades normais e tangenciais. O comportamento normal foi definido como *hard*. A propriedade *hard* não permite a penetração entre as superfícies. Para o comportamento tangencial foi utilizado a formulação *penalty frictional*, com o coeficiente de atrito de 0,2, de acordo com Eurocode 1-8 (2010), Fanget al.(2015) e Salih, Gardner e Nethercot (2013).

6.1.6 Validação dos modelos de elementos finitos

Conforme os critérios apresentados anteriormente, foram modelados numericamente 16 perfis de aço formados a frio. Em todos modelos, foram utilizadas as mesmas características dos materiais empregados nos perfis ensaiados.

Para validação do modelo de elementos finitos (EF) desenvolvido, os resultados obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais.

A seguir, são apresentados os perfis modelados e, ao final, os resultados dos ensaios experimentais são comparados com os correspondentes resultados dos modelos numéricos.

6.1.7 Cantoneiras de abas iguais conectadas em uma aba com uma linha de parafusos

Foram modeladas 4 cantoneiras de abas iguais, com uma linha de parafusos, com variação entre elas no número de seções de parafusos. Essas cantoneiras possuem abas de 75 mm de largura, espessura nominal de 1,95 mm e comprimento longitudinal de 600 mm. Os modelos foram processados com as espessuras médias reais dos perfis medidas com paquímetro. As características e os resultados individuais das 4 cantoneiras de abas iguais modeladas são apresentadas a seguir.

6.1.7.1 Cantoneira A2-B211

A Figura 6.6 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-B211. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

O valor da força máxima do modelo foi 33,22 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 35,86 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo EF cerca de 7,36% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo do modelo chegou a 26,90 mm, enquanto no ensaio este valor atingiu 22,25 mm.

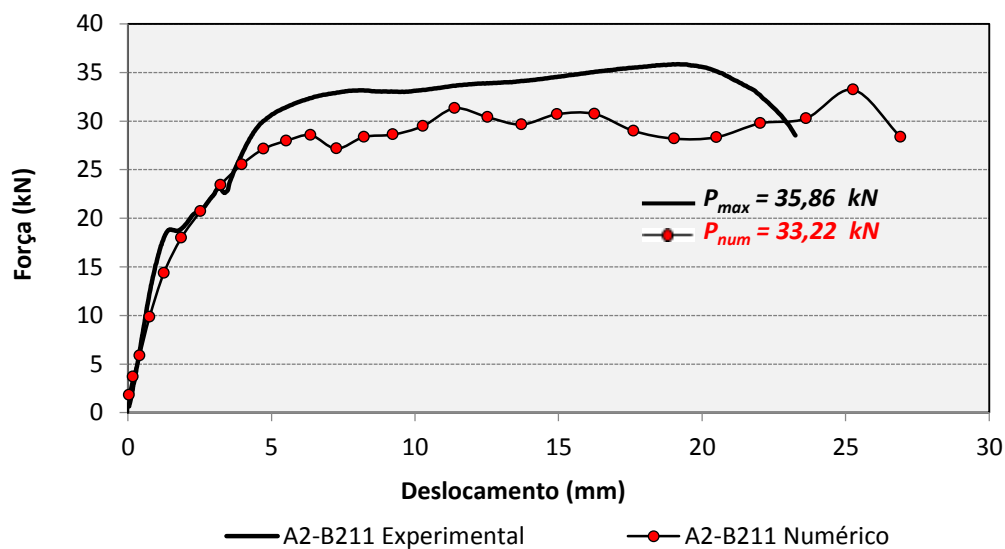


Figura 6.6 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B211)

Na Figura 6.7, observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.8 pode-se visualizar a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

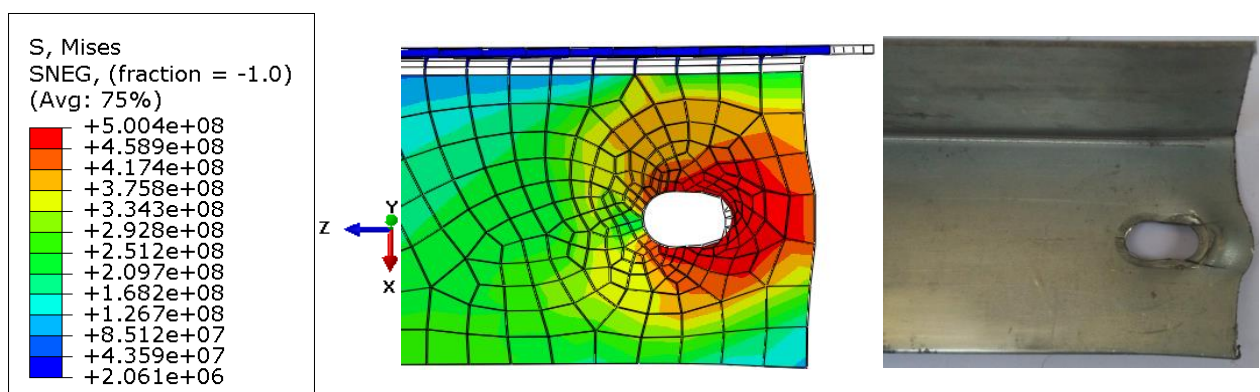


Figura 6.7 – Região dos furos da cantoneira A2-B211 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

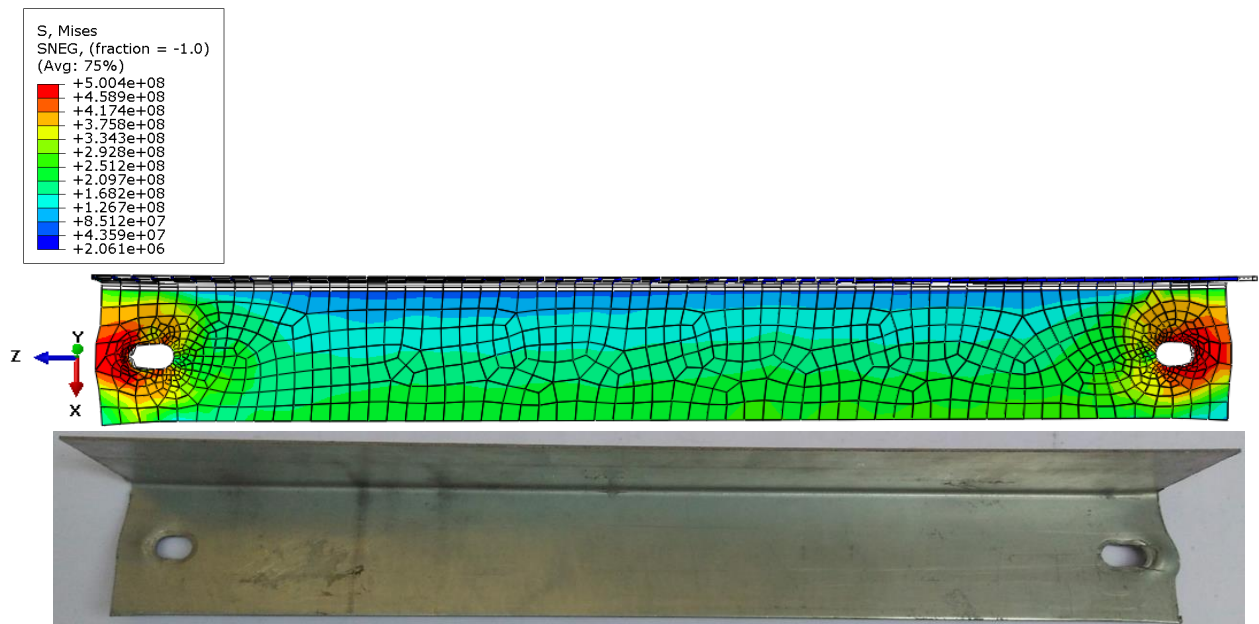


Figura 6.8 – Deformada global de toda cantoneira A2-B211 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

A Figura 6.7 apresenta o alongamento dos furos e os valores de tensões (Pa) que estão nesta região em vermelho como mostrado na régua de tensões. Neste local, pode-se notar o ponto mais crítico (ponto de maior tensão) em que o perfil se rompeu comparando com o ensaio experimental, assim apresentando como modo de ruptura o esmagamento.

Referente à deformada global, visualiza-se neste modelo, tensões de escoamento na aba desconectada (aba que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

A deformada global de toda a cantoneira apresentada na Figura 6.8 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

Com estas análises conclui-se que ambos os modelos numérico e experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.7.2 Cantoneira A2-B221

O deslocamento máximo atingido pelo modelo numérico da cantoneira A2-B221 foi 21,60 mm, enquanto no ensaio este valor chegou a 25,46 mm. A força máxima do modelo chegou a 58,18 kN, enquanto no ensaio este valor foi 57,30 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 1,54% acima da força máxima do ensaio. A Figura

6.9 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-B221. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

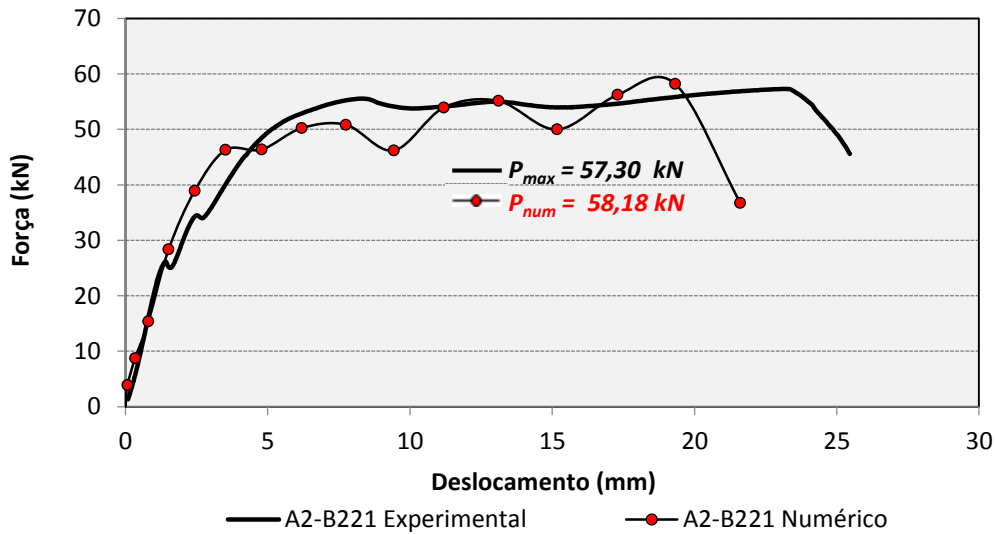


Figura 6.9 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B221)

Observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica, a Figura 6.10 mostra a imagem ampliada. A Figura 6.11 apresenta a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

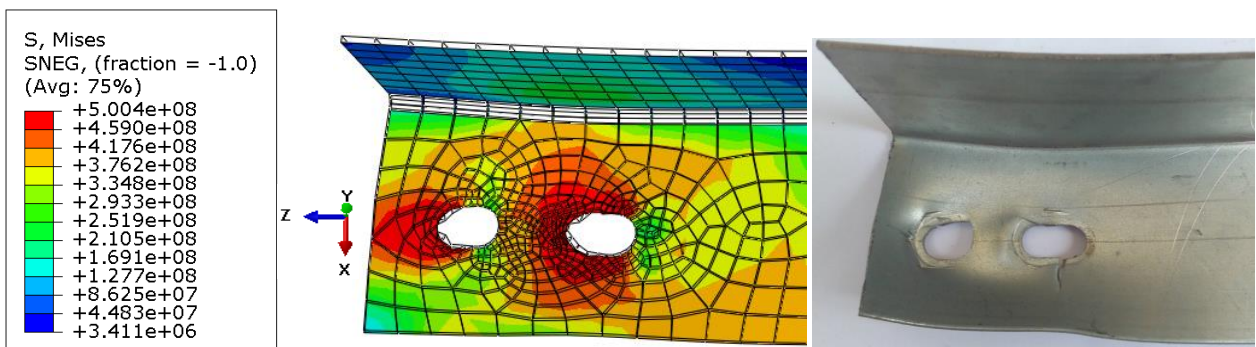


Figura 6.10 – Região dos furos da cantoneira A2-B221 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

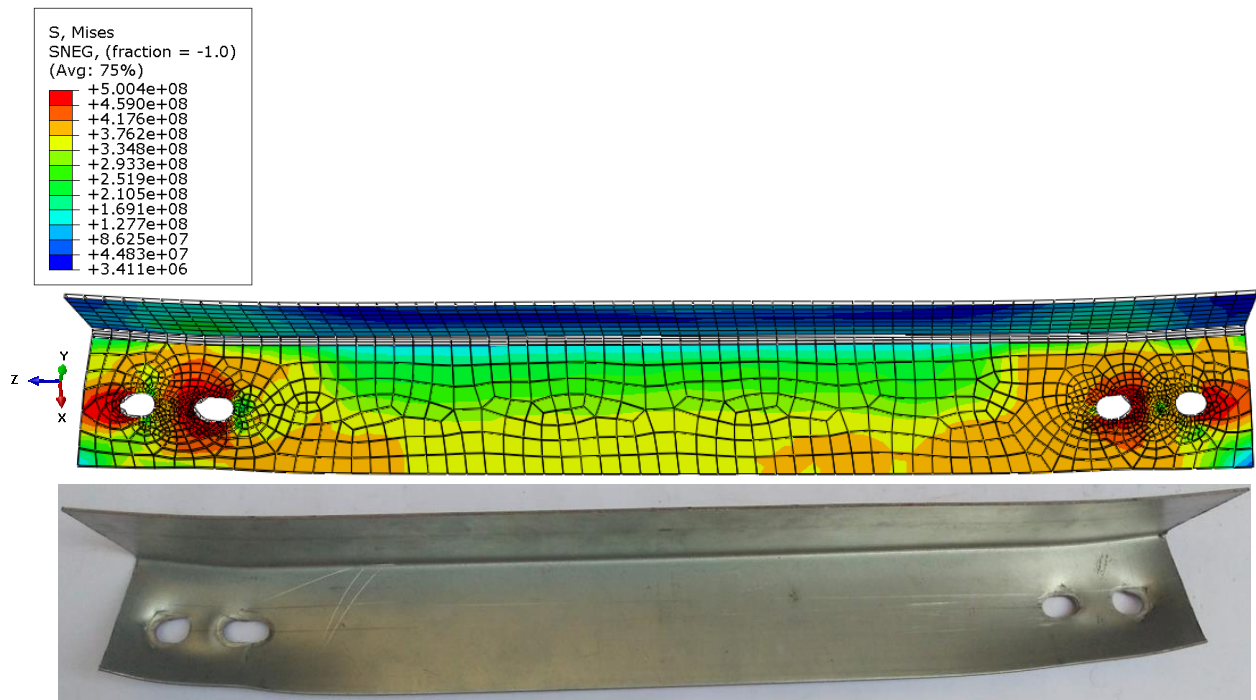


Figura 6.11– Deformada global de toda cantoneira A2-B221 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Neste modelo pode-se observar na Figura 6.10, a região dos furos que foram alongados com valores de tensões (Pa) que estão nesta região principalmente no furo interno, e na cor vermelha como mostra a régua de tensões é apresentado o modo de ruptura com uma ponta no sentido da extremidade em relação ao eixo da aba conectada . Neste lugar, pode-se notar o ponto mais crítico (ponto de maior tensão) em que o perfil se rompeu comparando com o ensaio experimental, assim apresentando como modo de ruptura a ruptura da seção líquida (R.S.L)

Também nota-se neste modelo, referente à deformada global, que não apresenta tensões de escoamento na aba desconectada (aba que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

A deformada global de toda a cantoneira apresentada na Figura 6.11 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

Conclui-se, com estas análises que o modelo numérico comparado ao ensaio experimental não obteve modos de ruptura diferentes.

6.1.7.3 Cantoneira A2-B231

A Figura 6.12 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-B231. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

A força máxima do modelo foi 73,55 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 74,15 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 0,81% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi 25,10 mm, enquanto no ensaio este valor consistiu em 21,73 mm.

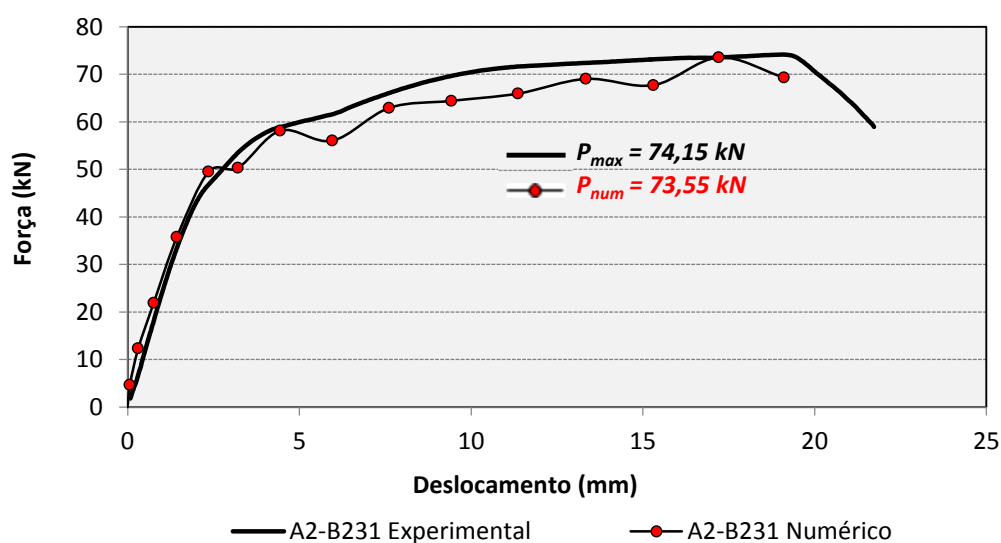


Figura 6.12 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B231)

A Figura 6.13 apresenta a imagem ampliada da região dos furos da cantoneira A2-B231 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa). Na Figura 6.14 pode-se visualizar a deformada global de toda cantoneira A2-B231 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).

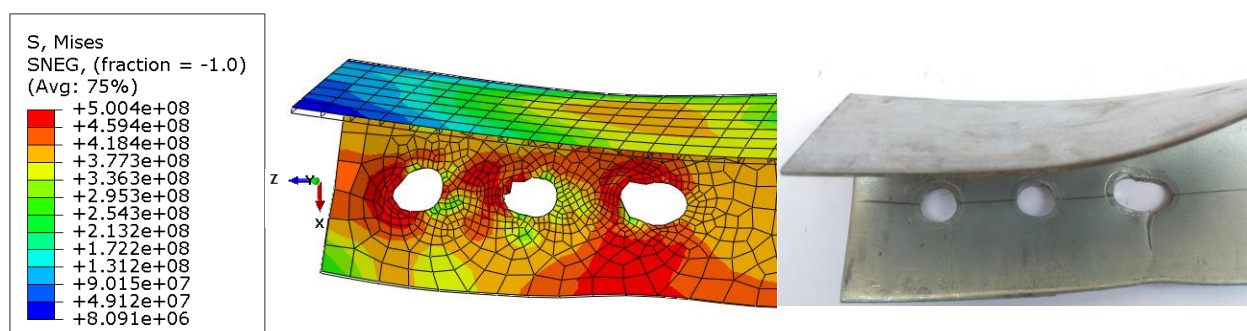


Figura 6.13 – Região dos furos da cantoneira A2-B231 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

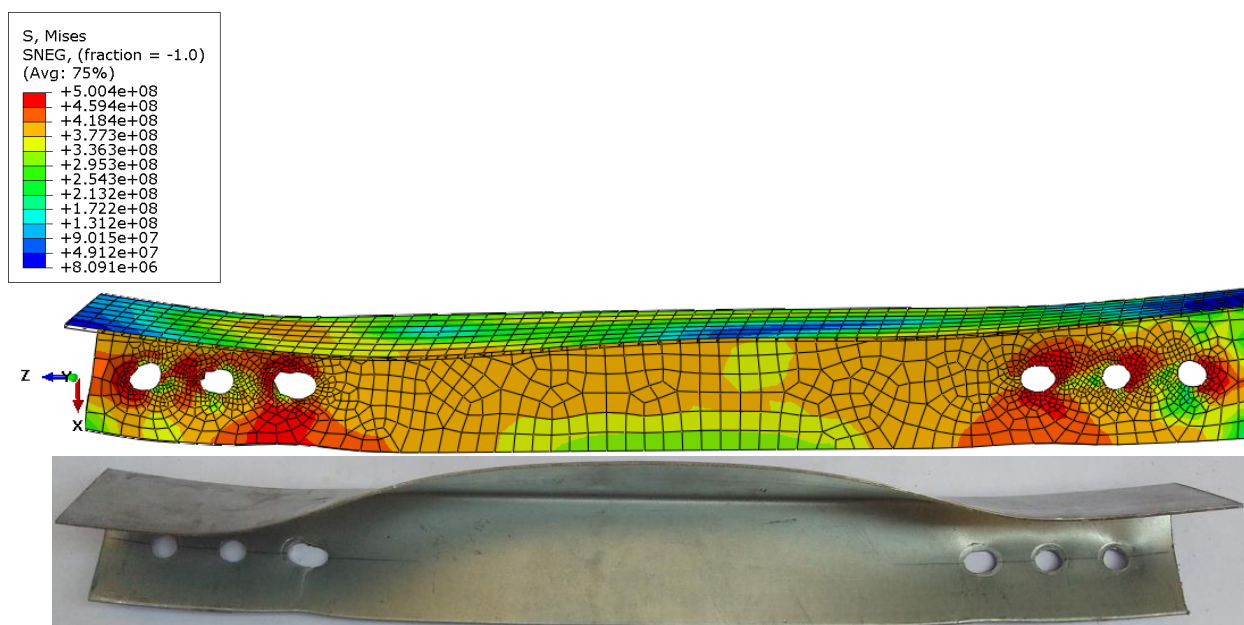


Figura 6.14 – Deformada global de toda cantoneira A2-B231 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Analisando a imagem ampliada da Figura 6.13 pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, está em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho (ponto de maior tensão) percorreu o caminho no sentido da extremidade em relação ao eixo da aba conectada, compreende-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental obtendo o mesmo modo de ruptura, ruptura da seção líquida (R.S.L).

Na parte do empenamento da aba desconectada do modelo (aba que não tem parafusos) foram visualizadas tensões de escoamento na cor amarela e laranja como apresenta a régua de tensões.

A deformada global de todo modelo numérico da cantoneira mostrou-se coerente com a cantoneira ensaiada como apresentada na Figura 6.14, sendo assim, novamente comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração. Assim o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.7.4 Cantoneira A2-B241

A força máxima do modelo foi de 86,00 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 84,01 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo ensaio cerca de 2,37% abaixo da força

máxima do modelo. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi 23,92 mm, enquanto no ensaio este valor alcançou 24,02 mm. A Figura 6.15 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-B241. Também pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

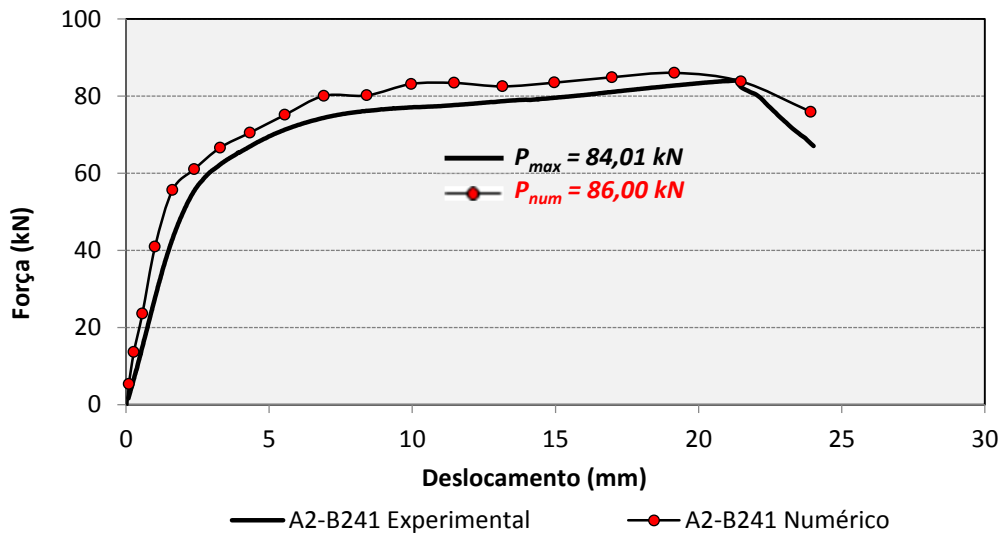


Figura 6.15 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-B241)

Na imagem ampliada da Figura 6.16, observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.17 pode-se visualizar a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

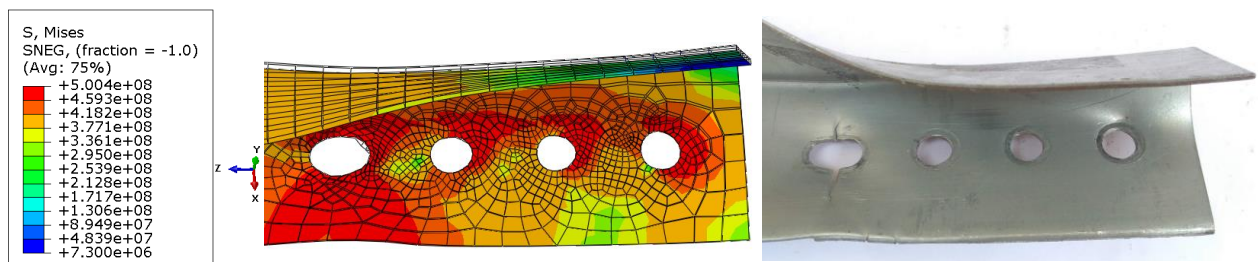


Figura 6.16 – Região dos furos da cantoneira A2-B241 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

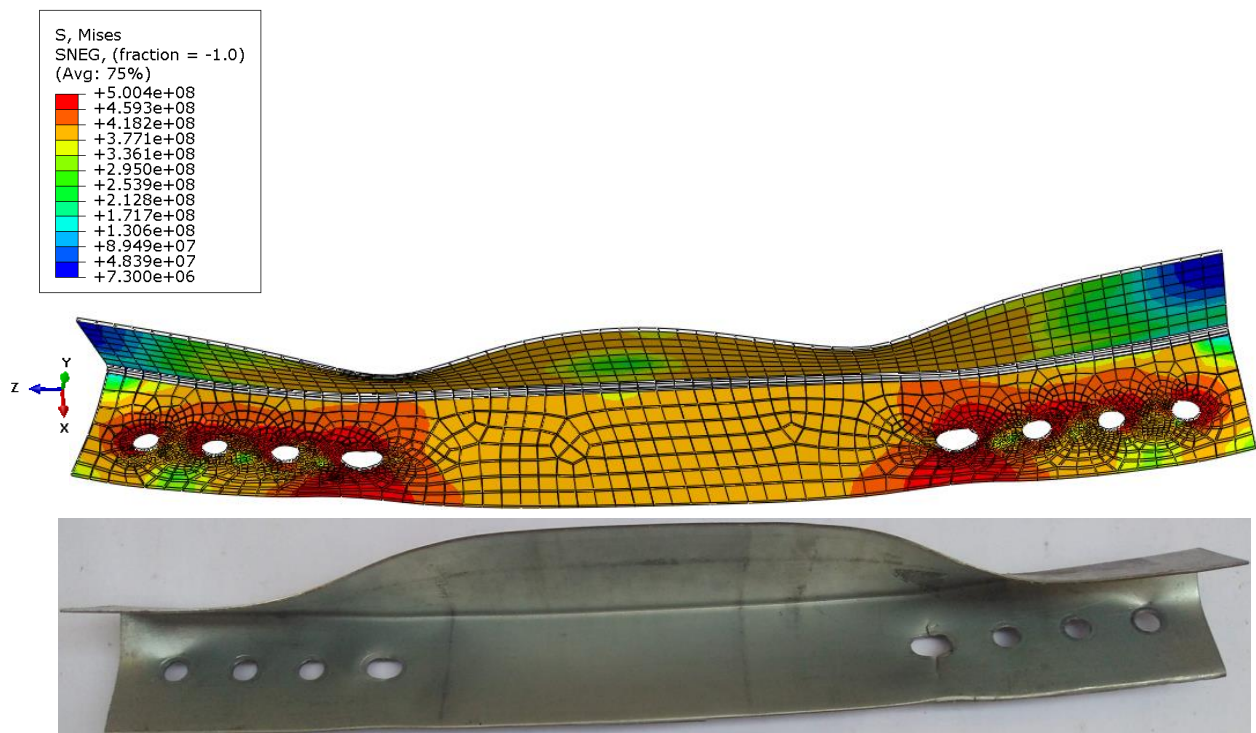


Figura 6.17 – Deformada global de toda cantoneira A2-B241 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Na imagem da Figura 6.16 apresenta o alongamento dos furos e os valores de tensões (Pa) que estão nesta região em vermelho como mostrado na régua de tensões. Neste local, pode-se notar o ponto crítico em vermelho (ponto de maior tensão) percorreu o caminho no sentido da extremidade em relação ao eixo da aba conectada, mostrando um triângulo. Fica evidente o modo de ruptura do modelo comparando com o ensaio experimental, assim apresentando a ruptura da seção líquida (R.S.L).

O modelo numérico desta cantoneira A2-B241 mostrada na Figura 6.17 referente a deformada global, apresentou tensões de escoamento em quase toda cantoneira e não apresentou escoamento somente nas extremidades da cantoneira na aba desconectada (aba que não tem parafusos) e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

A deformada global de todo modelo numérico da cantoneira mostrou-se coerente com a cantoneira ensaiada como apresenta a Figura 6.17, apresentando uma abertura no centro da aba desconectada da cantoneira (aba que não tem parafusos) e um fechamento na região da conexão parafusada. Novamente comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração, mostrando que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

De maneira geral, as características observadas nos resultados dos modelos numéricos das cantoneiras de abas iguais com uma linha de parafusos aplicam-se também àqueles resultados das demais cantoneiras com duas linhas de parafusos. Assim, são apresentadas a seguir breves considerações sobre cada modelo.

6.1.8 Cantoneiras de abas iguais conectadas em uma aba com duas linhas de parafusos

6.1.8.1 Cantoneira A2-C212

A Figura 6.18 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-C212. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

A força máxima do modelo foi 55,85 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 58,51 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 4,55% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi 14,69 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 13,36 mm.

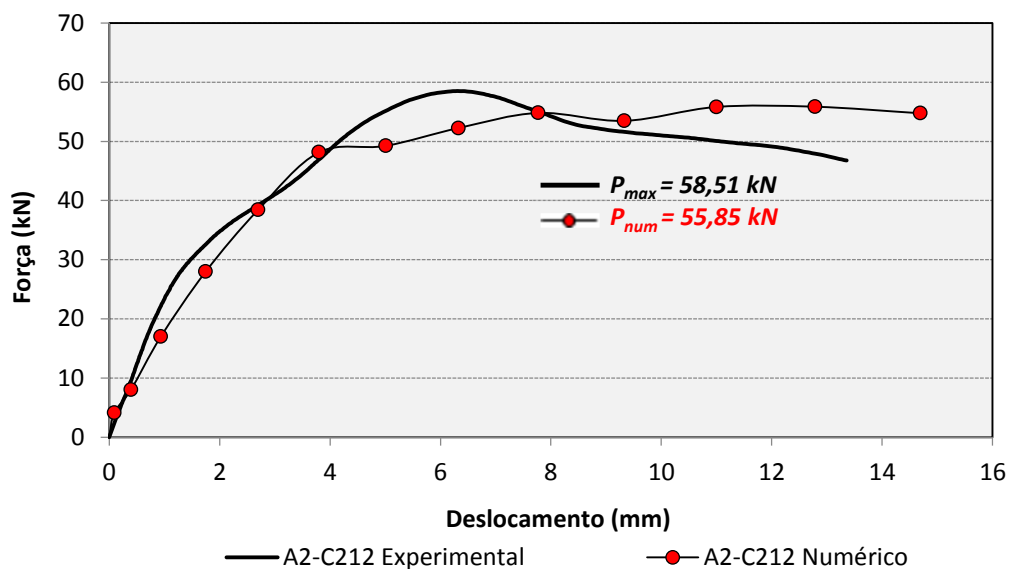


Figura 6.18 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C212)

Nas cantoneiras da Figura 6.19, observa-se a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.20 pode-se visualizar a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

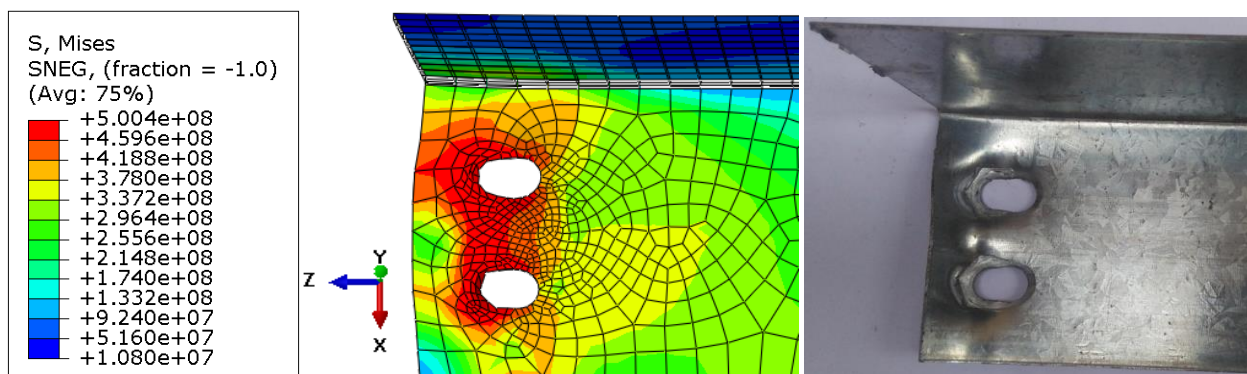


Figura 6.19 – Região dos furos da cantoneira A2-C212 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

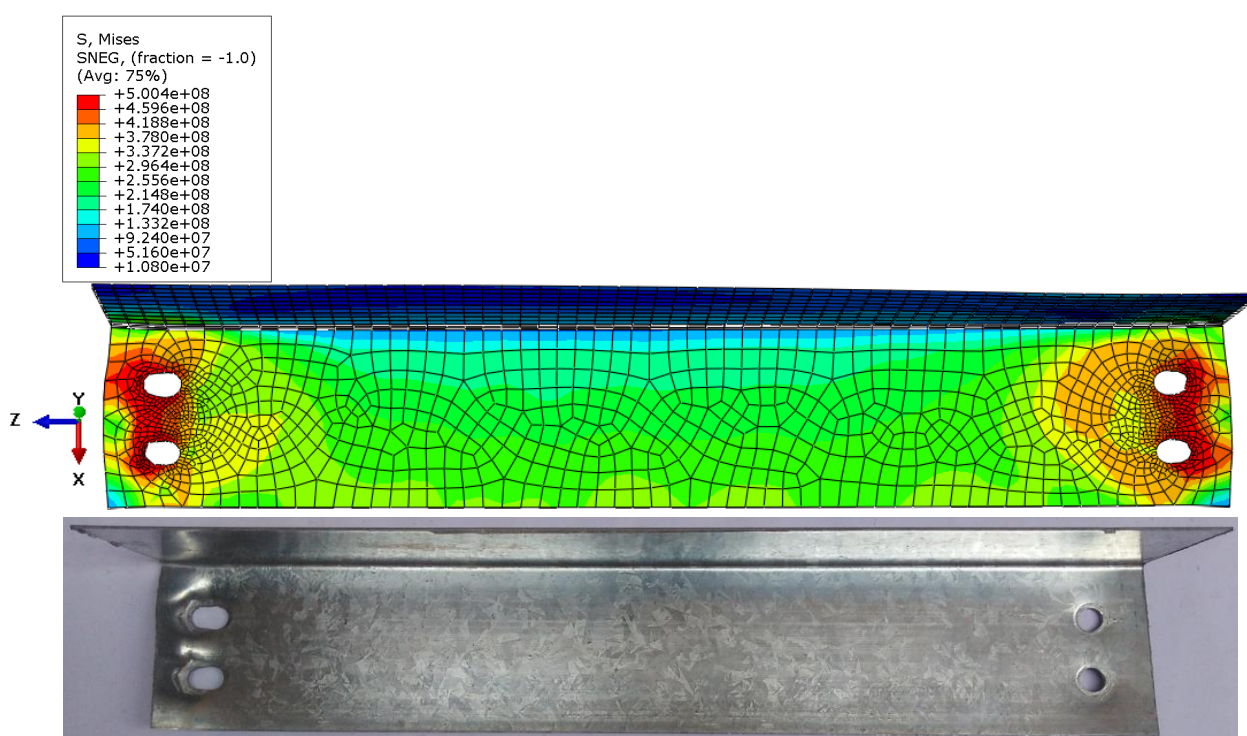


Figura 6.20 – Deformada global de toda cantoneira A2-C212 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Na região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região está em vermelho como mostra a régua de tensões e a imagem ampliada na Figura 6.19 , nota-se que é o ponto crítico (ponto de maior tensão) e que tende a romper de acordo com o ensaio experimental se rompeu, ruptura por esmagamento.

Quando se trata da deformada global, este modelo não apresentou tensões de escoamento nas abas desconectadas (abas que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul, como mostrado na régua de tensões.

A deformada global de toda a cantoneira apresentada na Figura 6.20 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

6.1.8.2 Cantoneira A2-C222

O deslocamento máximo atingido pelo modelo numérico da cantoneira A2-C222 foi 12,87 mm, enquanto no ensaio este valor foi 11,87 mm. A força máxima do modelo atingiu 81,93 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 84,30 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 2,81% abaixo da força máxima do ensaio. A Figura 6.21 compara as curvas força -deslocamento da cantoneira A2-C222. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

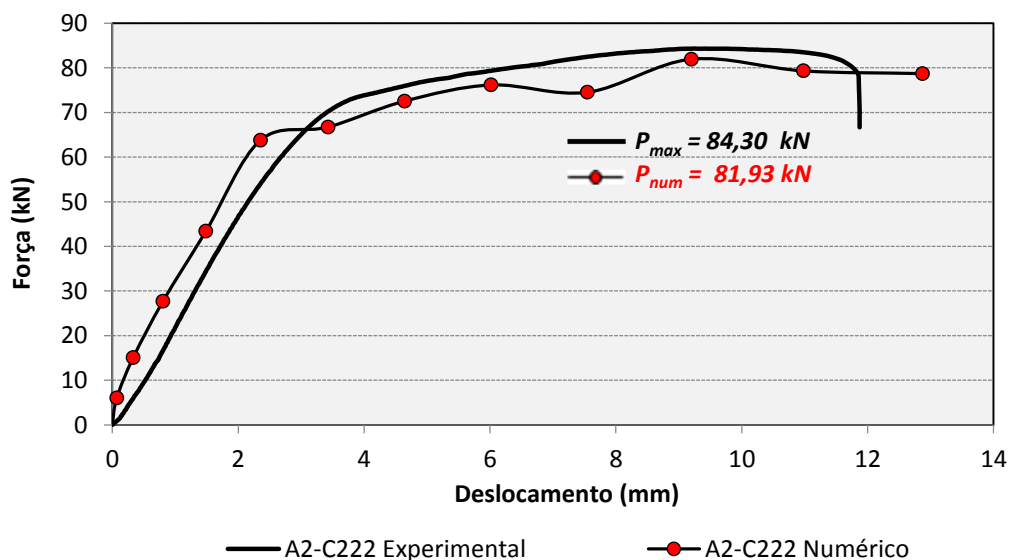


Figura 6.21 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C222)

Observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica principalmente na região dos furos internos, a Figura 6.22 mostra a imagem ampliada. A Figura 6.23 apresenta a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

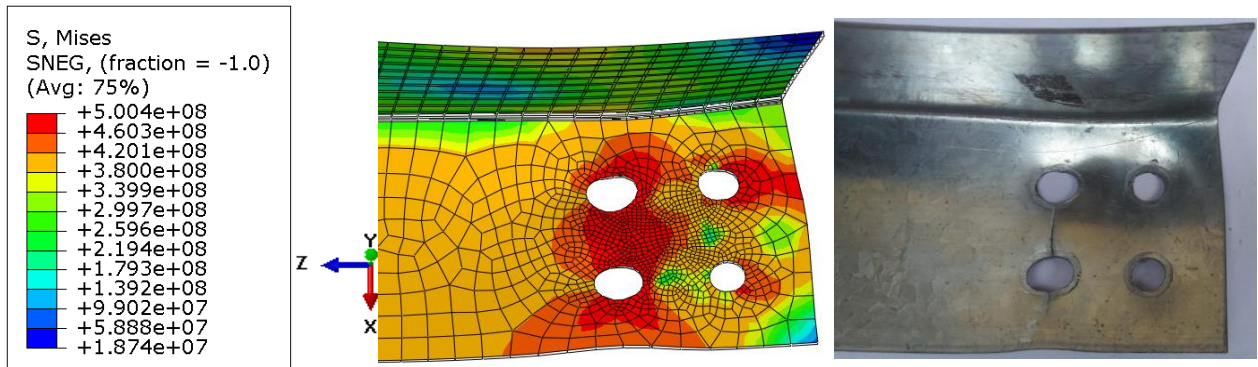


Figura 6.22 – Região dos furos da cantoneira A2-C222 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

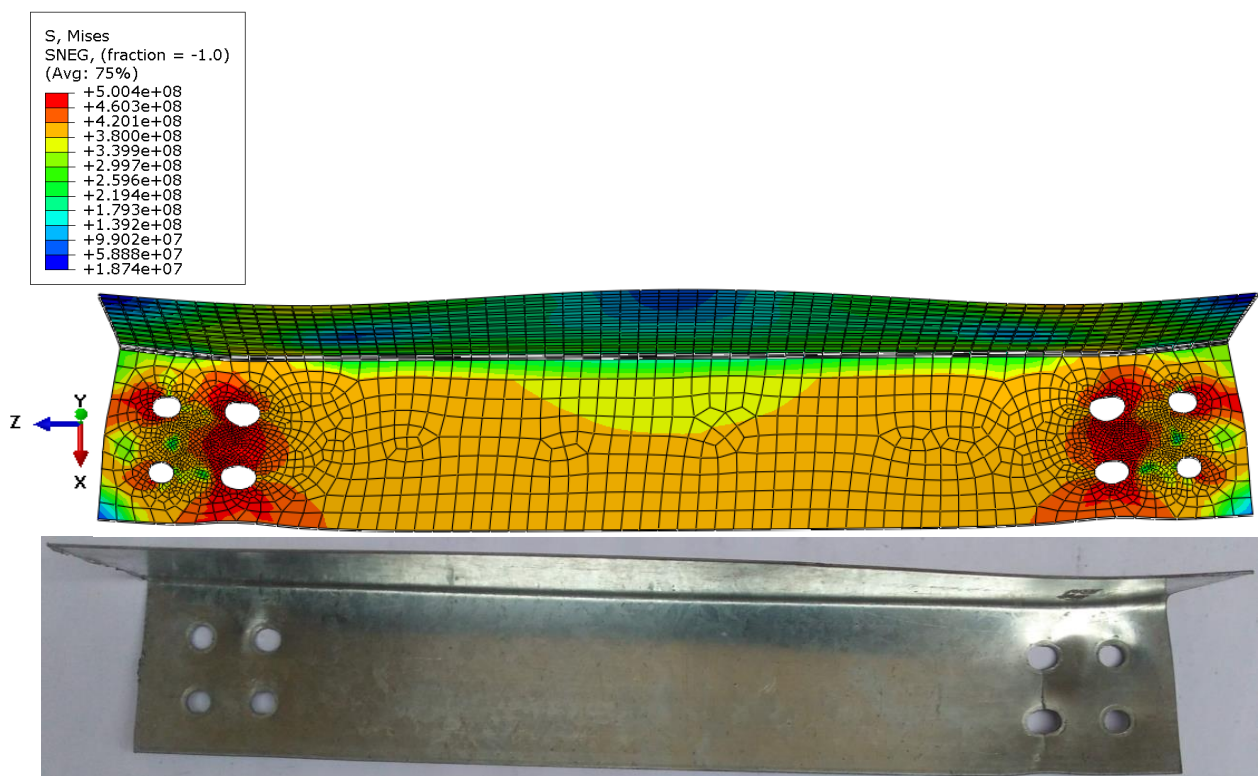


Figura 6.23 – Deformada global de toda cantoneira A2-C222 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Neste modelo apresentado na Figura 6.22, que tem a imagem ampliada, pode-se observar a região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa), e nesta região principalmente nos furos internos, estão em vermelho como mostra a régua de tensões, apresentando o ponto crítico. Compreende-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental se rompeu por ruptura da seção líquida (R.S.L).

O modelo numérico da cantoneira A2-C222 não apresentou tensões de escoamento nas abas desconectadas (abas que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul e verde na parte do empenamento, como mostrado na régua de tensões.

A deformada global de toda a cantoneira apresentada na Figura 6.23 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

Com estas análises pode-se concluir que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.8.3 Cantoneira A2-C232

No intuito de observar que existe um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental, a Figura 6.24 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-C232.

A força máxima no ensaio foi 97,30 kN, enquanto no modelo numérico este valor chegou a 94,40 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo ensaio cerca de 2,98% acima da força máxima do modelo. O deslocamento máximo do modelo chegou a 12,12 mm, enquanto no ensaio este valor foi 11,25 mm.

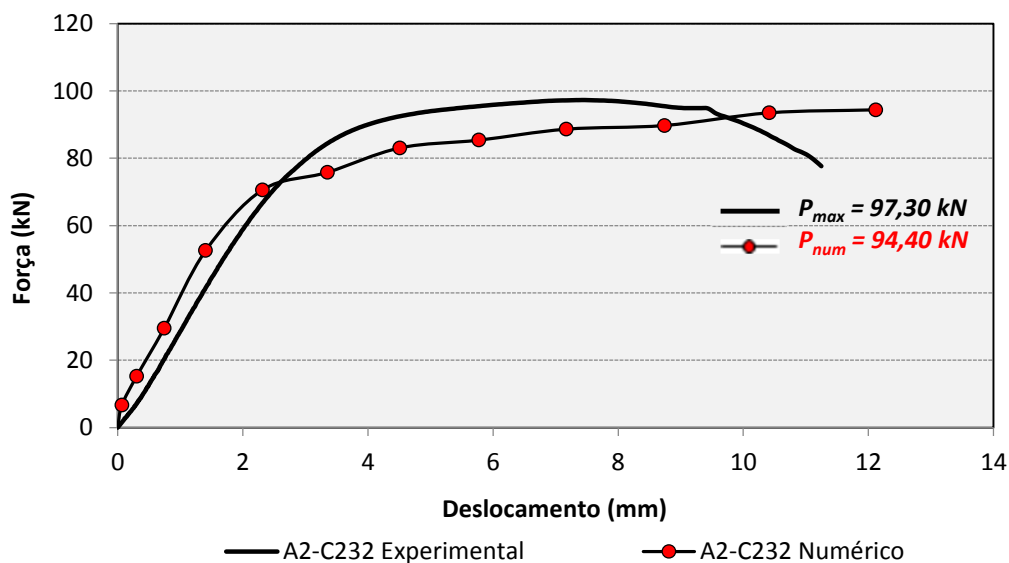


Figura 6.24 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C232)

A Figura 6.25 apresenta a imagem ampliada da região dos furos da cantoneira A2-C232 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa). Na Figura 6.26 pode-se visualizar a deformada global de toda cantoneira A2-C232 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).

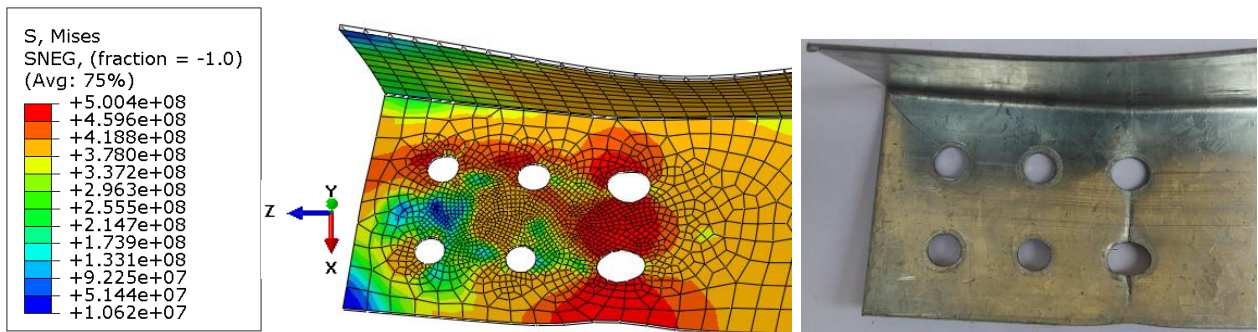


Figura 6.25 – Região dos furos da cantoneira A2-C232 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

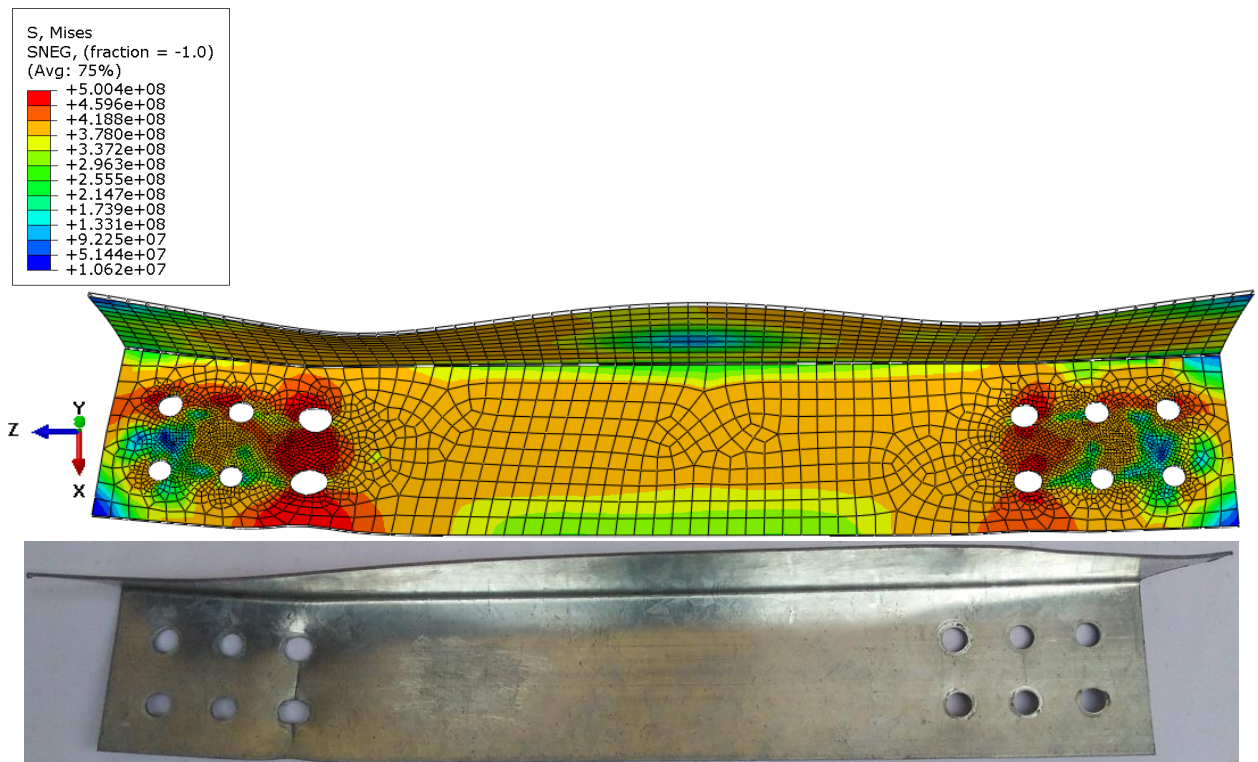


Figura 6.26 – Deformada global de toda cantoneira A2-C232 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Na imagem ampliada da Figura 6.25 pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, está em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho percorreu o caminho no sentido da extremidade em relação ao eixo da aba conectada, compreende-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, obtendo o mesmo modo de ruptura, ruptura da seção líquida (R.S.L) apresentando o ponto de maior tensão onde aconteceu a falha.

Neste modelo foram apresentadas tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento da aba desconectada da cantoneira (aba que não tem parafusos).

A deformada global de todo modelo numérico da cantoneira mostrou-se coerente com a cantoneira ensaiada como apresenta a Figura 6.26, dessa forma comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração. Assim o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.8.4 Cantoneira A2-C242

A força máxima do modelo foi 103,66 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 104,74 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 1,03% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo chegou a 11,36 mm, enquanto no ensaio este valor atingiu 9,67 mm. A Figura 6.27 compara as curvas força-deslocamento da cantoneira A2-C242. Também pode ser observado um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

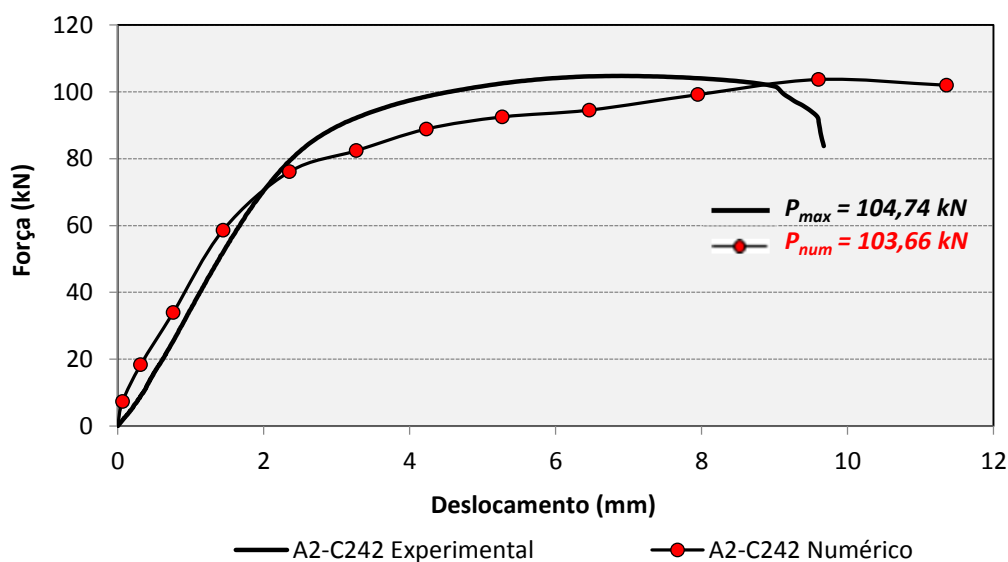


Figura 6.27 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (A2-C242)

Na imagem ampliada da Figura 6.28, observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.29 pode-se visualizar a deformada global das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica.

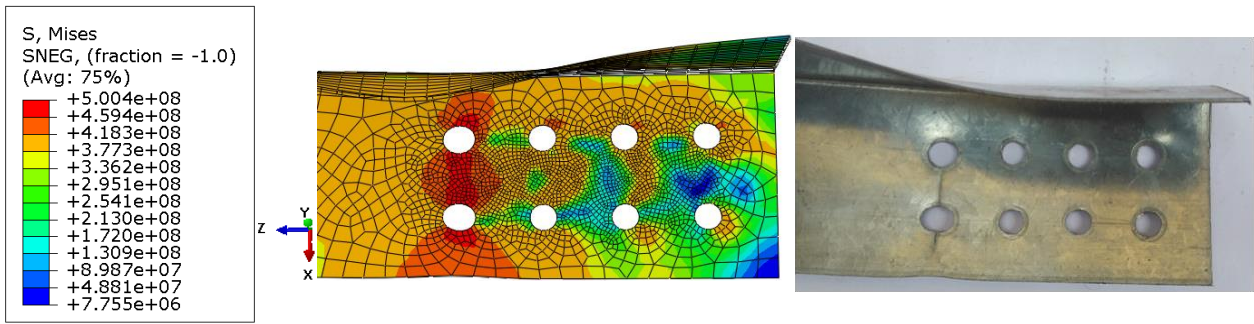


Figura 6.28 – Região dos furos da cantoneira A2-C232 ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

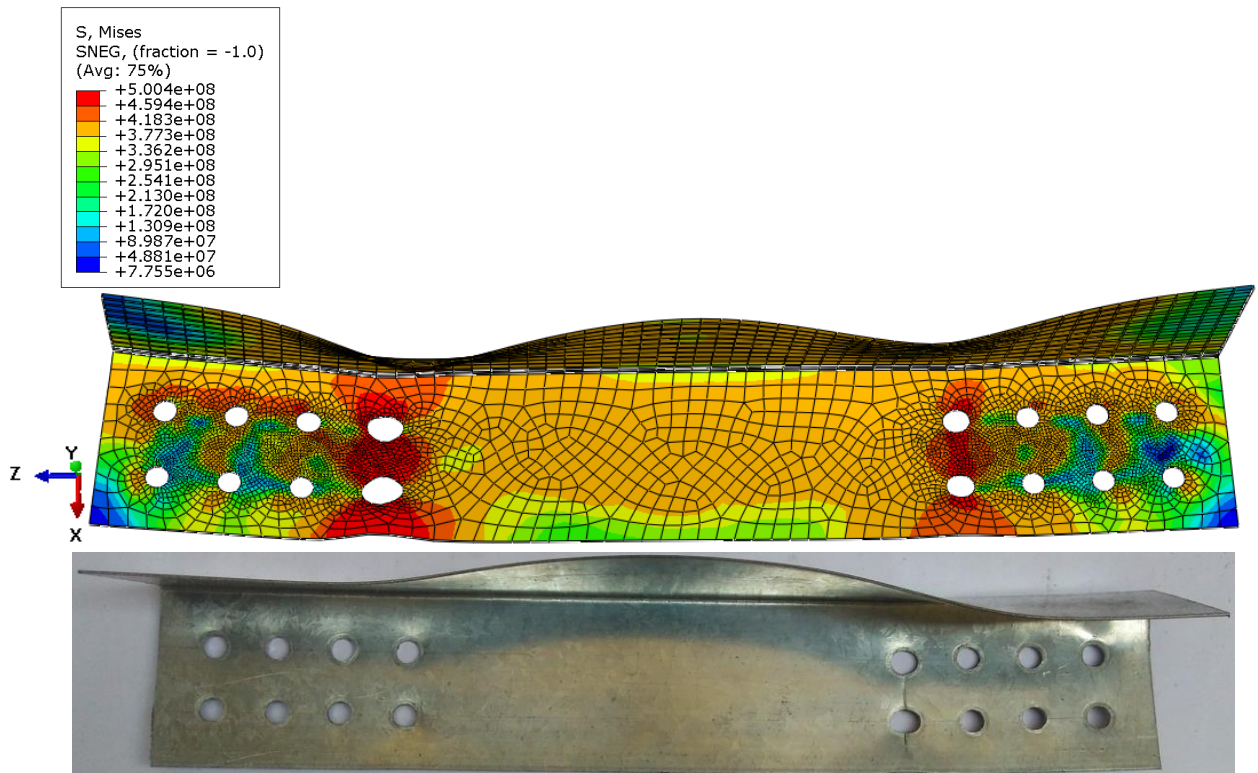


Figura 6.29 – Deformada global de toda cantoneira A2-C232 ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Na imagem ampliada da Figura 6.28 no modelo numérico pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, está em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho percorreu o caminho no sentido da extremidade em relação ao eixo da aba conectada, mostrando-se um triângulo. Pode-se observar que fica evidente a alta

concentração das tensões de tração, em que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental se rompeu, por ruptura da seção líquida (R.S.L).

A cantoneira A2-C242 mostrada na Figura 6.29 revela as deformadas do modelo numérico, e apresenta tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento da aba desconectada da cantoneira (aba que não tem parafusos).

A deformada global de todo modelo numérico da cantoneira mostrou-se coerente com a cantoneira ensaiada como apresenta a Figura 6.29, apresentando uma abertura no centro da aba desconectada da cantoneira (aba que não tem parafusos) e um fechamento na região da conexão parafusada bem próximo aos furos internos. Novamente comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração, mostrando que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.9 Avaliação da modelagem numérica das cantoneiras

Por meio da comparação entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais e aqueles obtidos da modelagem numérica das mesmas cantoneiras, podemos perceber que a obtenção de curvas força-deslocamento compatíveis com aquelas adquiridas durante a execução dos ensaios não é atividade trivial, uma vez que inúmeras distorções que afetam diretamente a medida dos deslocamentos podem ocorrer, tanto nos ensaios quanto nos modelos.

Por outro lado, a obtenção da força de colapso do perfil mostrou-se menos sujeita às dificuldades inerentes aos processos de modelagem numérica e montagem dos experimentos de ensaios. É necessário, porém que alguns cuidados na consideração da não-linearidade do material sejam tomados como, por exemplo, a inclusão de tensões e deformações reais no modelo do material empregado, cuja curva tensão-deformação tenha sido obtida por ensaio uniaxial de tração.

A Tabela 6.2 resume as diferenças encontradas nas força de colapso produzidas pelos ensaios e pelos modelos de elementos finitos. Essas diferenças podem ser, às dificuldades numéricas inerentes às análises não-lineares e às diversas restrições de criação de modelos numéricos completamente livres de simplificações.

Tabela 6. 2 – Diferenças entre as força de ruptura dos ensaios e dos modelos em cantoneiras

Perfil	Força de Ruptura (kN)		$\frac{P_{Exp.}}{P_{Num.}}$
	$P_{Exp.}$	$P_{Num.}$	
A2-B211	35,86	33,22	1,08
A2-B221	57,30	58,18	0,98
A2-B231	74,15	73,55	1,01
A2-B241	84,01	86,00	0,98
A2-C212	58,51	55,85	1,05
A2-C222	84,30	81,93	1,03
A2-C232	97,30	94,40	1,03
A2-C242	104,74	103,66	1,01
Média de erro residual			1,02
Desvio padrão de erro residual			0,03

A Figura 6.30 apresenta a distribuição dos valores de forças máximas atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais, com números de seções de parafusos.

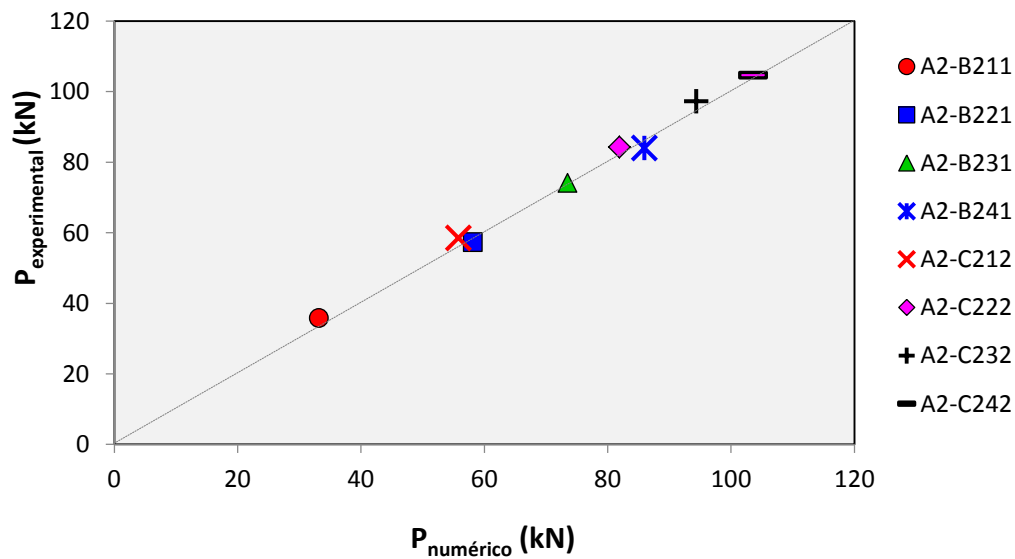


Figura 6.30 – Distribuição dos valores de força máxima atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais em cantoneiras formadas a frio

A média das diferenças absolutas da força experimental e da força obtida pelo modelo numérico (EF) presentes na Tabela 6.1 é de 1,02 e um desvio padrão de 0,03, com as maiores diferenças chegando a 7,36% e as menores a 0,81%. Percebe-se, então, que os modelos construídos permitem estimar com boa precisão o valor da força de ruptura e o modo de deformação de cantoneiras formadas a frio, como estão apresentados neste trabalho.

A partir dos resultados encontrados, demonstra-se viável o uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que indiquem a força máxima de colapso das ligações parafusadas em cantoneiras formadas a frio, permitindo assim o seu uso concomitante com ensaios experimentais, de maneira a reduzir custos e a duração destas atividades.

A simulação numérica permite a visualização da distribuição de tensão na cantoneira durante todo o processo de ensaio. Como foi visualizado nas figuras anteriores referente as deformadas dos modelos (EF), após o ensaio experimental e simulação numérica, observa-se nas cantoneiras a semelhança no alongamento dos furos, principalmente quando aumenta-se a quantidade de furos, isto acontece nos furos localizados na parte interna das cantoneiras. Pelos valores de tensões (Pa) nesta região, nota-se uma conformidade entre os modos de rupturas. Pode-se visualizar a deformada das cantoneiras após o ensaio experimental e simulação numérica, de modo que é possível comprovar a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

6.1.10 Perfis U conectados na alma com uma linha de parafusos

6.1.10.1 Perfil U C2-G211W

A Figura 6.31 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G211W. Pode-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

A força máxima do modelo foi de 31,59 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 32,07 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo EF cerca de 1,50% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 15,03 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 22,83 mm.

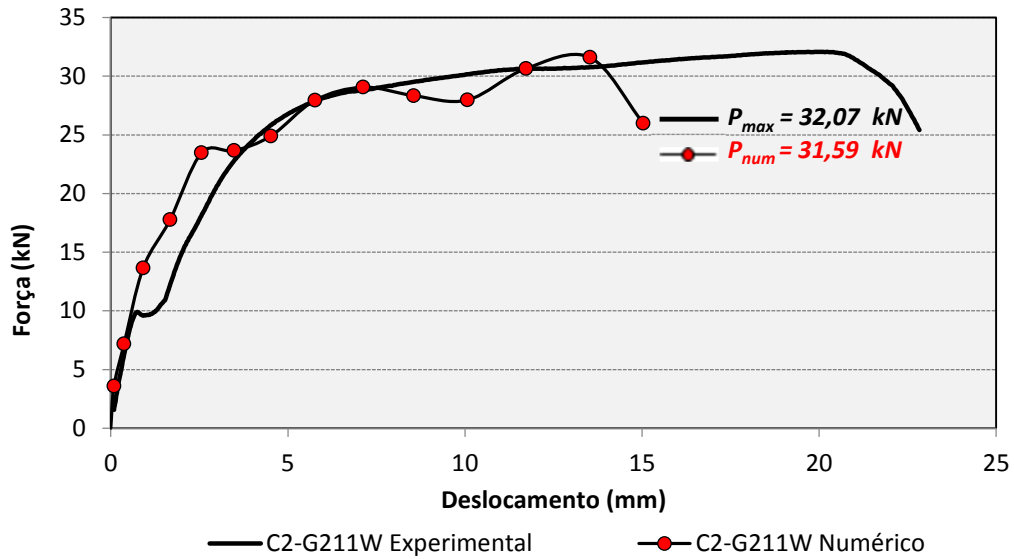


Figura 6.31 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G211W)

Na Figura 6.32, observa-se nos perfis U a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.33 pode-se visualizar a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

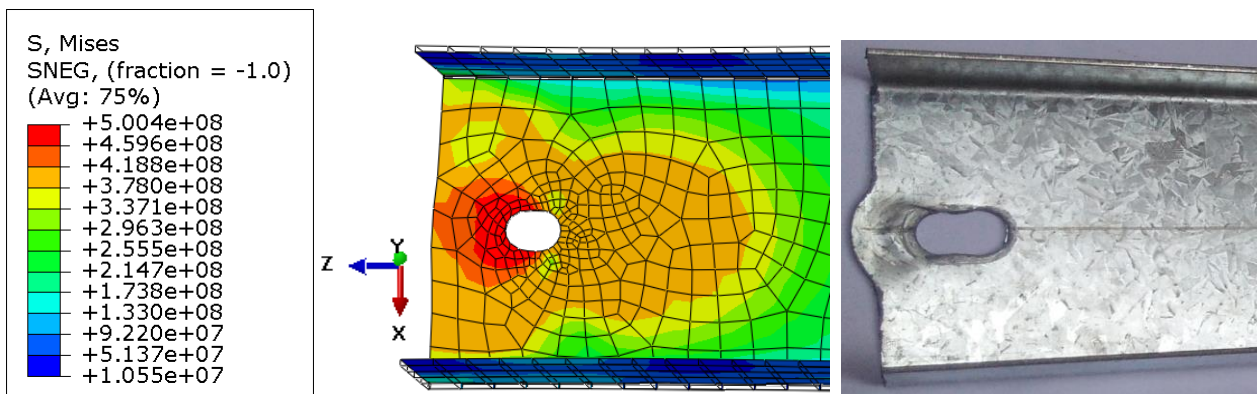


Figura 6.32 – Região dos furos do perfil U C2-G211W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

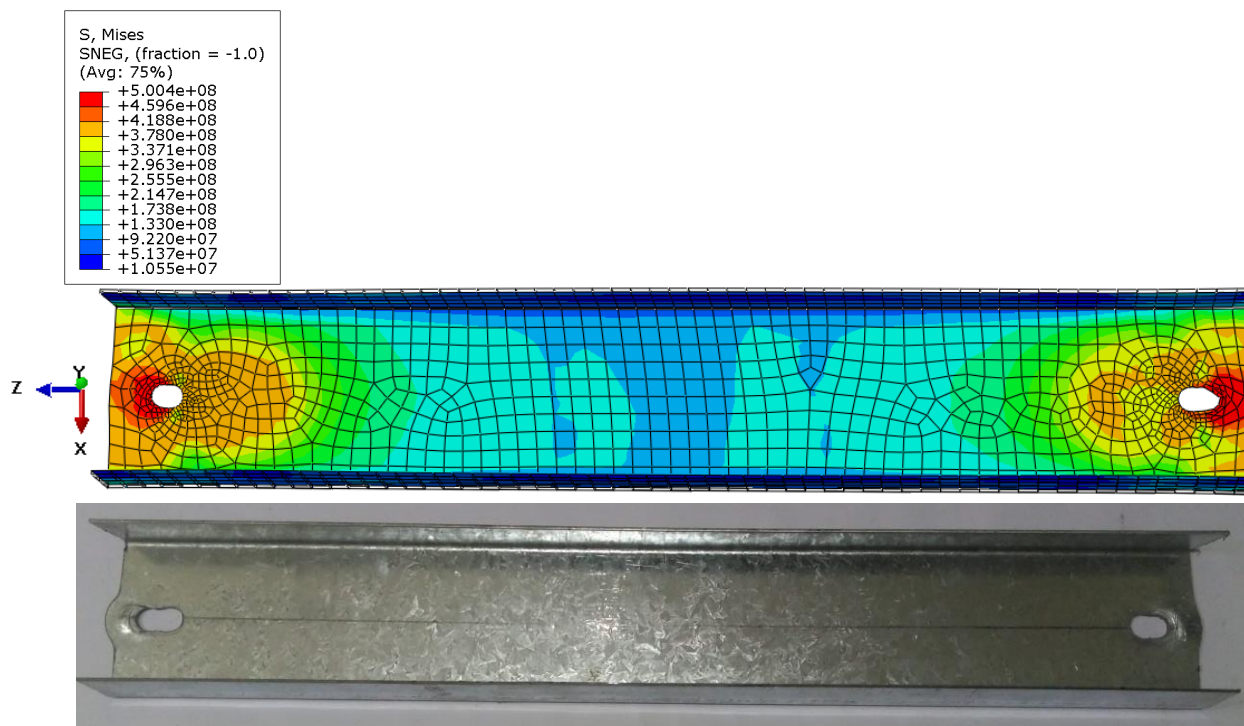


Figura 6.33 – Deformada global de todo perfil U C2-G211W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

O modelo numérico do perfil U C2-G211W mostrado na Figura 6.33 inerente a deformada não apresentou tensões de escoamento nos flanges do perfil na parte desconectada (parte que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

A Figura 6.32 mostra a imagem ampliada do perfil U C2-G211W no qual aconteceu um alongamento na região dos furos, e os valores de tensões (Pa) nesta região está em vermelho como mostra a régua de tensões, nota-se que nesta região é o ponto crítico (ponto de maior tensão) e que tende a romper de acordo com o ensaio experimental, ruptura por esmagamento.

A deformada global de todo perfil U apresentado na Figura 6.33 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração.

Com estas análises conclui-se que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.10.2 Perfil U C2-G221W

O deslocamento máximo atingido pelo modelo numérico do perfil U C2-G221W foi de 26,18 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 30,25 mm. A força máxima do modelo foi de 58,96 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 59,32 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 0,61% abaixo da força máxima do ensaio. A Figura 6.34 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G221W. Observa-se um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

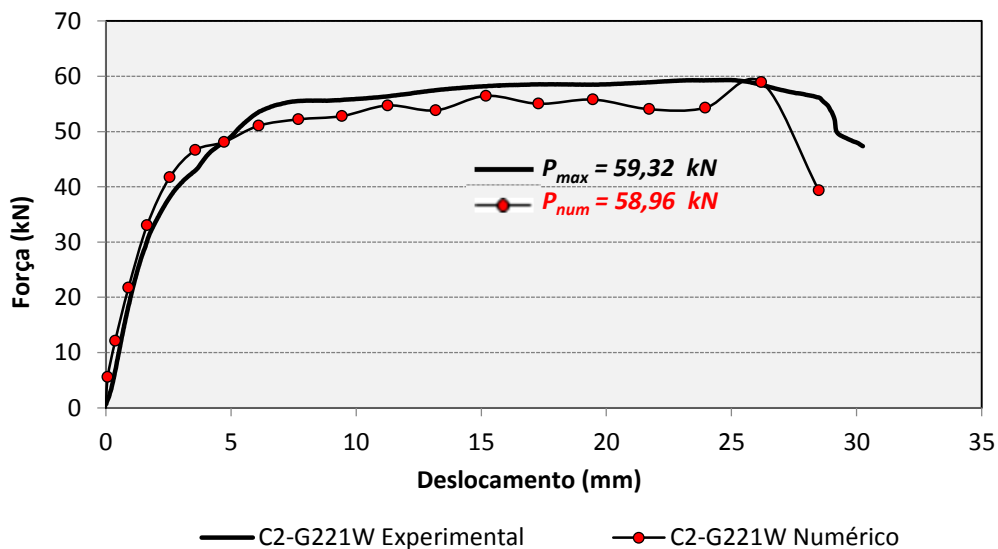


Figura 6.34 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G221W)

Observa-se nos perfis U a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica, a Figura 6.35 mostra a imagem ampliada. A Figura 6.36 apresenta a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

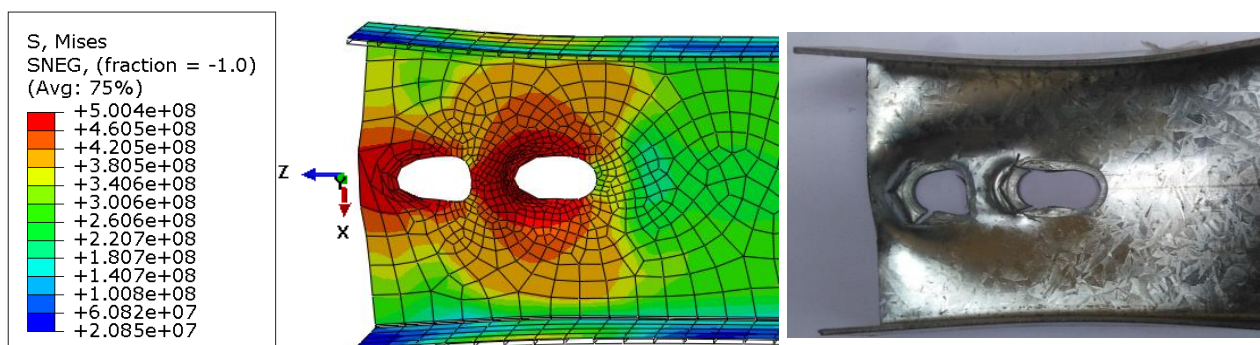


Figura 6.35 – Região dos furos do perfil U C2-G221W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

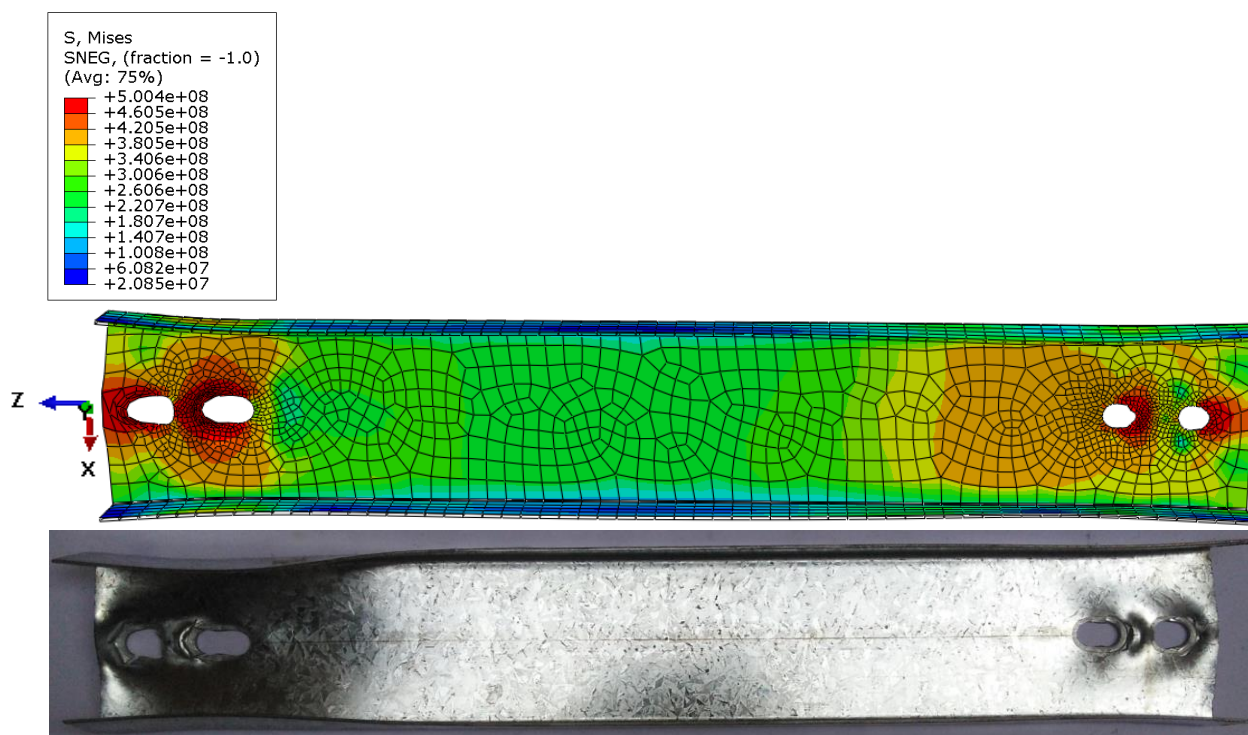


Figura 6.36 – Deformada global de toda cantoneira C2-G221W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

O modelo numérico do perfil U C2-G221W, mostrado na Figura 6.36 referente às deformadas do modelo numérico não apresentou tensões de escoamento nos flanges do perfil na parte desconectada (parte que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul e verde como mostrado na régua de tensões.

Pode-se observar neste modelo, que a região dos furos foram alongadas, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno onde acontece a acomodação dos parafusos estão em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho está no sentido da extremidade da alma do perfil U. A Figura 6.35 tem a imagem ampliada, nota-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, a ruptura por esmagamento combinada com rasgamento.

A deformada global de toda a cantoneira apresentada na Figura 6.36 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento das cantoneiras quando submetidos a ensaios de tração.

Com estas análises, pode-se concluir que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.10.3 Perfil U C2-G231W

A Figura 6.37 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G231W, podendo se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

A força máxima do modelo foi de 82,68 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 82,33 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 0,43% acima da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 24,92 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 35,45 mm.

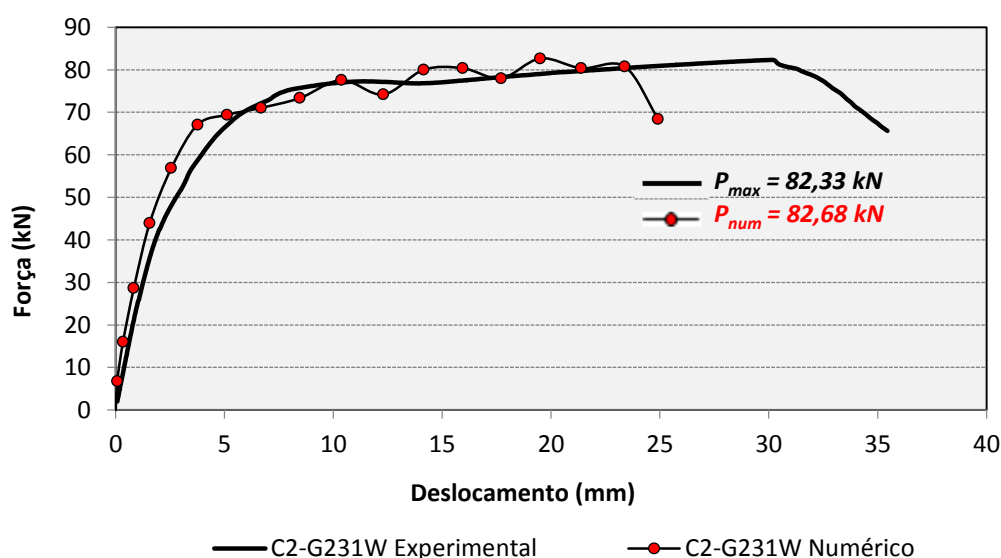


Figura 6.37 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G231W)

A Figura 6.38 apresenta a imagem ampliada da região dos furos do perfil U C2-G231W ensaiado e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa). Na Figura 6.39 pode-se visualizar a deformada global de todo perfil U C2-G231W ensaiado e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).

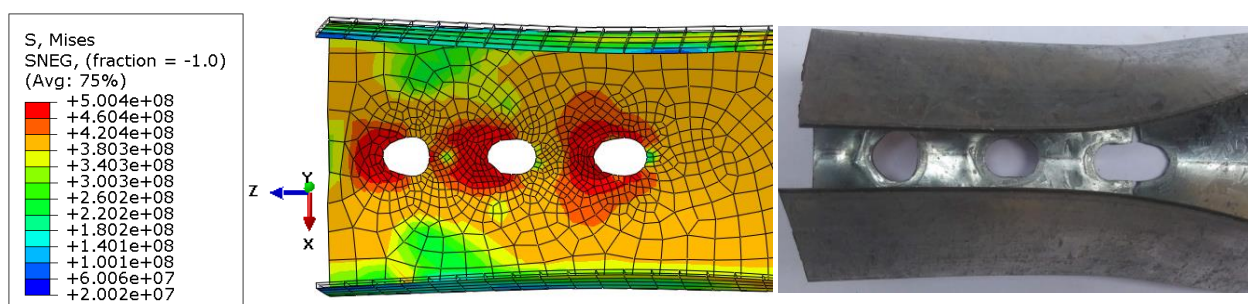


Figura 6.38 – Região dos furos do perfil U C2-G231W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

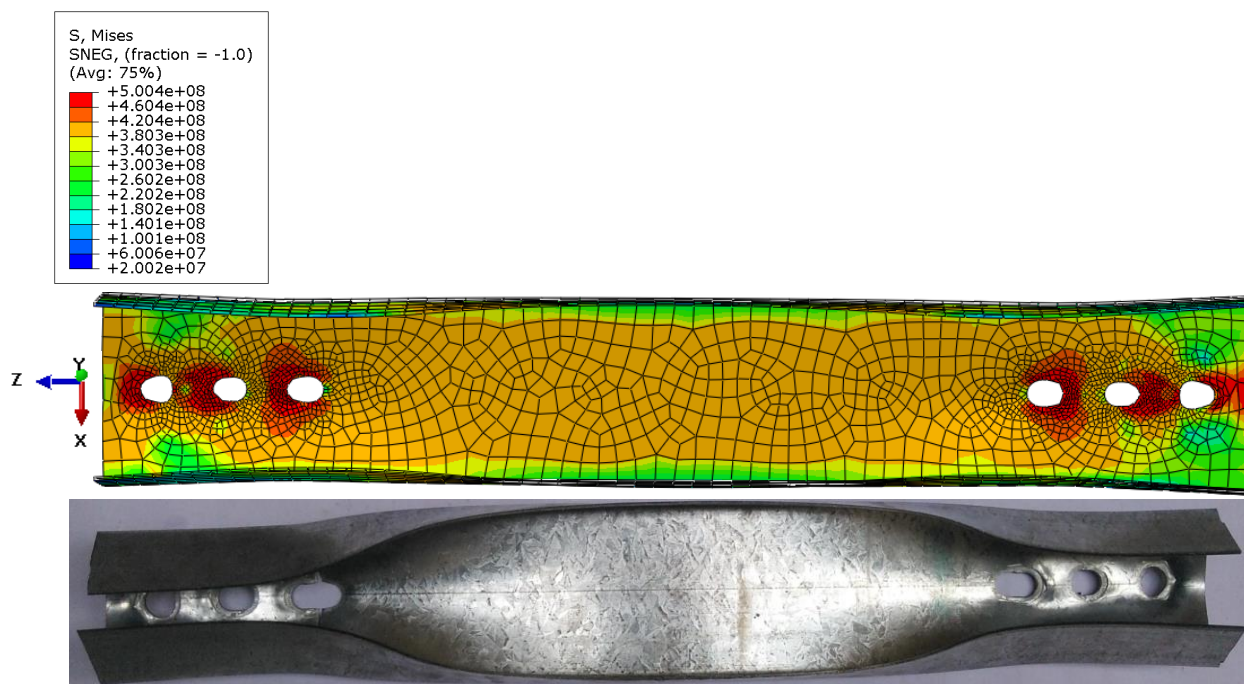


Figura 6.39 – Deformada global de toda cantoneira C2-G231W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Analisando a imagem ampliada da Figura 6.38 pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, com valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, e estão em vermelho como mostra a régua de tensões. Este ponto crítico em vermelho percorreu o caminho no sentido da extremidade em relação ao eixo da alma do perfil U C2-G231W. Sendo assim, compreende-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, obtendo ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo modelo numérico do perfil U C2-G231W mostrou-se coerente com o perfil U ensaiado como apresenta a Figura 6.39 e por isso comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração. Assim o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

O modelo numérico do perfil U C2-G231W, mostrado na Figura 6.39 inerente as deformadas do modelo numérico apresentou tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos).

6.1.10.4 Perfil U C2-G241W

A força máxima do modelo chegou a 102,67 kN, enquanto no ensaio este valor foi 95,35 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 7,68% acima da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 32,24 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 31,09 mm. A Figura 6.40 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G241W. Também se pode observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

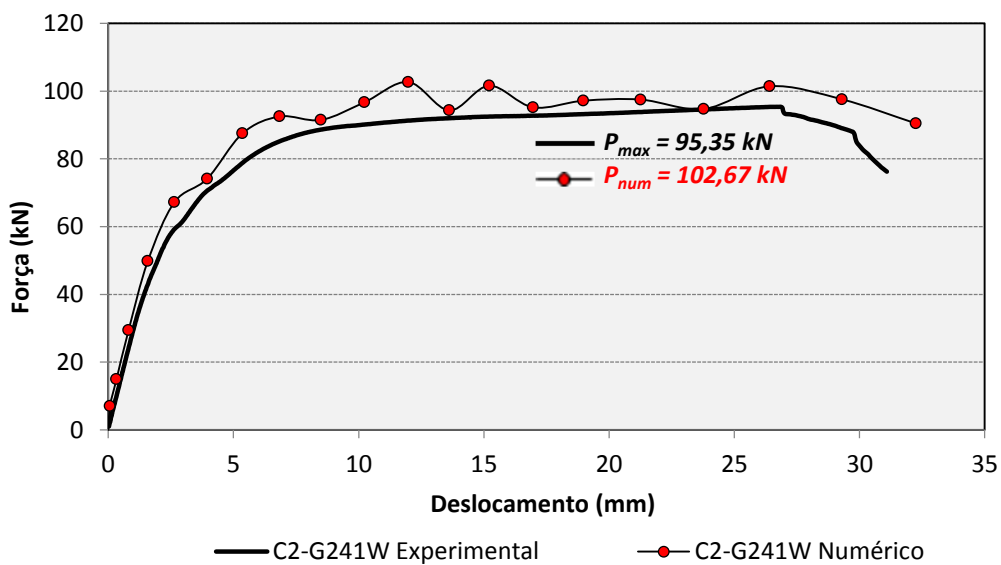


Figura 6.40 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G241W)

Na imagem ampliada da Figura 6.41, observa-se nos perfis U a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.42 pode-se visualizar a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

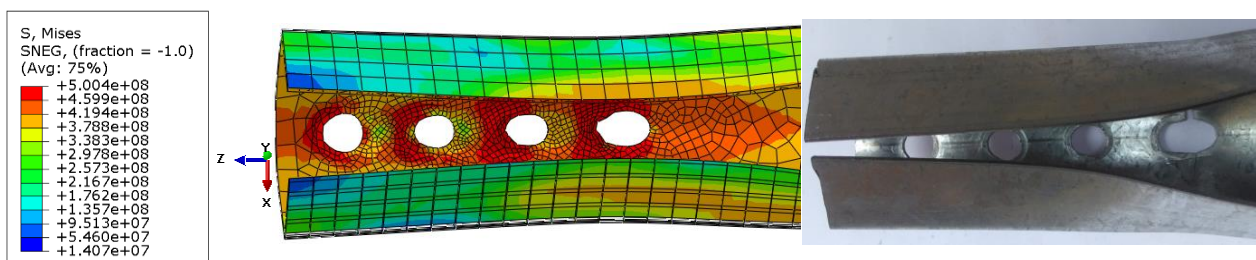


Figura 6.41 – Região dos furos do perfil U C2-G241W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

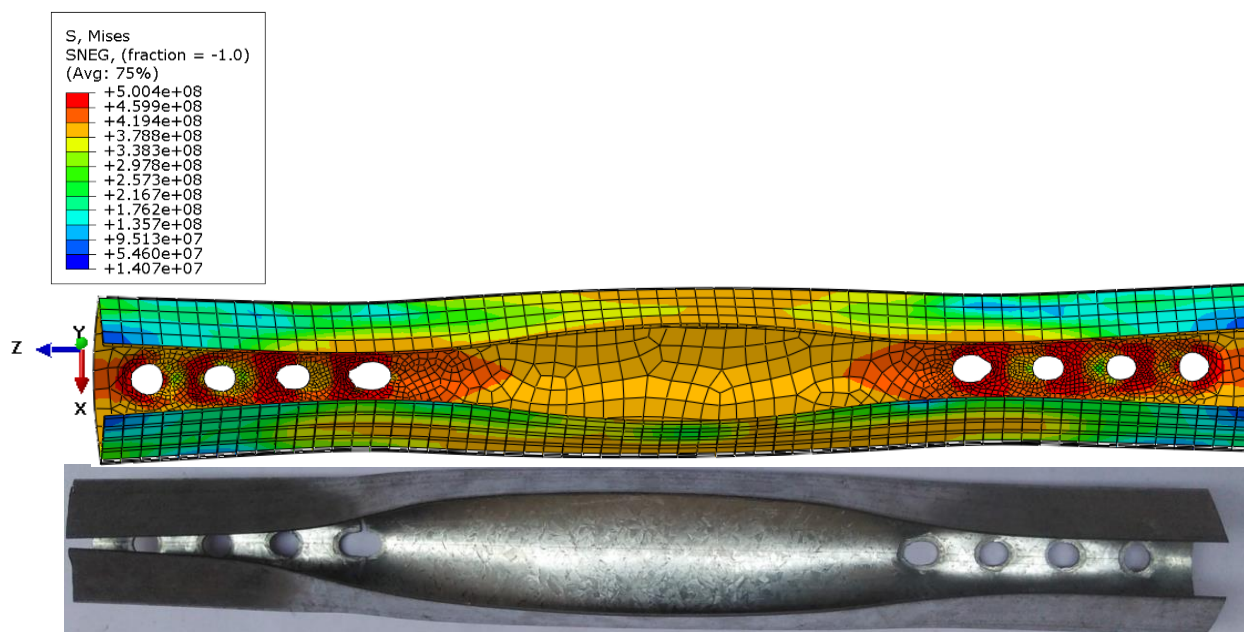


Figura 6.42 – Deformada global de toda cantoneira C2-G241W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

A Figura 6.41 apresenta a imagem ampliada do modelo numérico e experimental podendo se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, estão em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho percorreu o caminho no sentido da extremidade da alma do perfil U, mostrando-se que está localizado geralmente nos furos internos onde acontecem as acomodações dos parafusos (região de maior contato). Pode-se observar que fica evidente a alta concentração das tensões de tração, em que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, apresentando a ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo modelo numérico do perfil U mostrou-se coerente com o perfil U ensaiada como apresenta a Figura 6.42, apresentando um menor fechamento no centro dos flanges do perfil U (parte que não tem parafusos), e um maior fechamento nas extremidades dos flanges do perfil U (parte que não tem parafusos) próximo à região da conexão parafusada. Novamente comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração, mostrando que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

O modelo numérico do perfil U C2-G241W mostrado na Figura 6.42 referente às deformadas do modelo numérico apresentaram tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), próximo a região da conexão parafusada.

Pode ser observado também que todos os modelos numéricos de perfis U com uma linha de furos apresentaram tensões de escoamento na alma dos perfis principalmente na região dos furos.

De maneira geral, as características observadas nos resultados dos modelos numéricos dos perfis U com uma linha de parafusos aplicam-se também àqueles resultados dos demais perfis U com duas linhas de parafusos. Assim, são apresentadas a seguir breves considerações sobre cada modelo.

6.1.11 Perfis U conectados na alma com duas linhas de parafusos

6.1.11.1 Perfil U C2-G212W

Observa-se um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental. A Figura 6.43 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G212W.

A força máxima do modelo foi de 55,34 kN, enquanto no ensaio este valor chegou a 60,10 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 7,92% abaixo da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 16,44 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 13,28 mm.

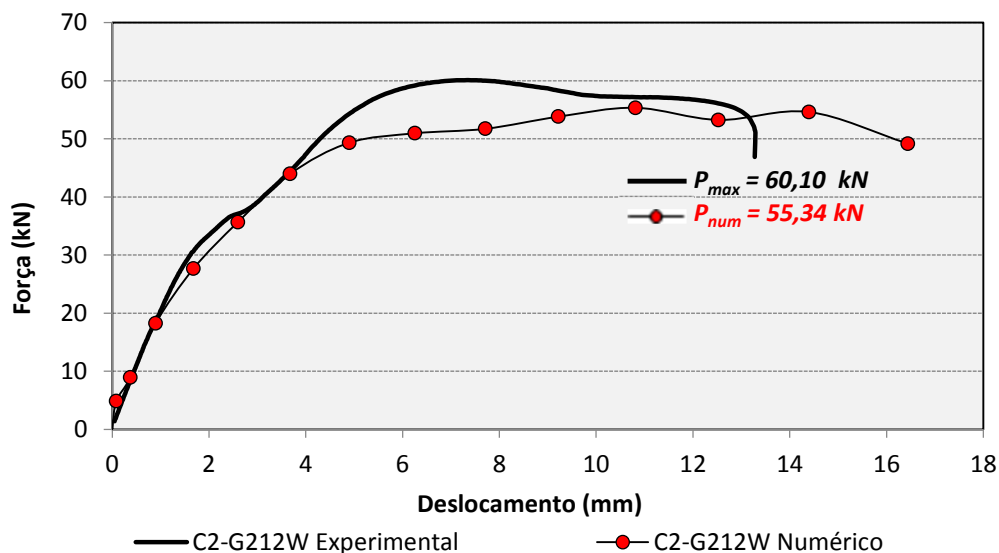


Figura 6.43 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G212W)

Nos perfis U na Figura 6.44, observa-se a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.45 pode-se visualizar a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

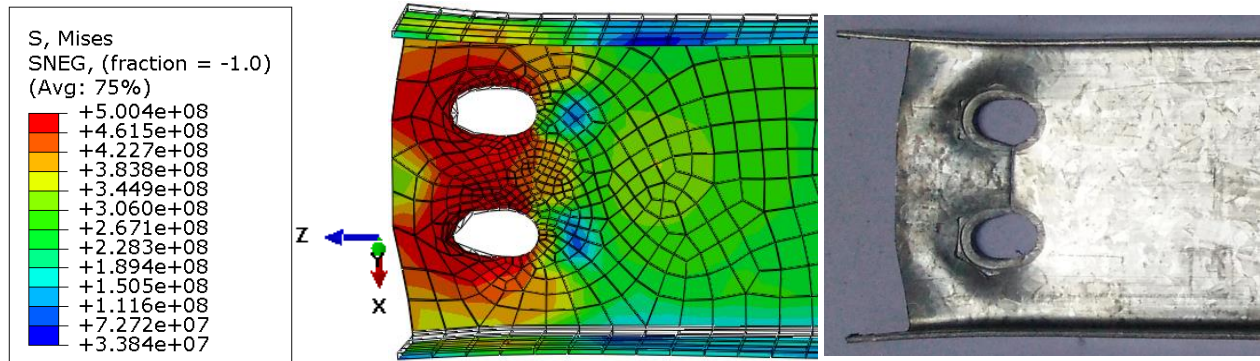


Figura 6.44 – Região dos furos do perfil U C2-G212W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

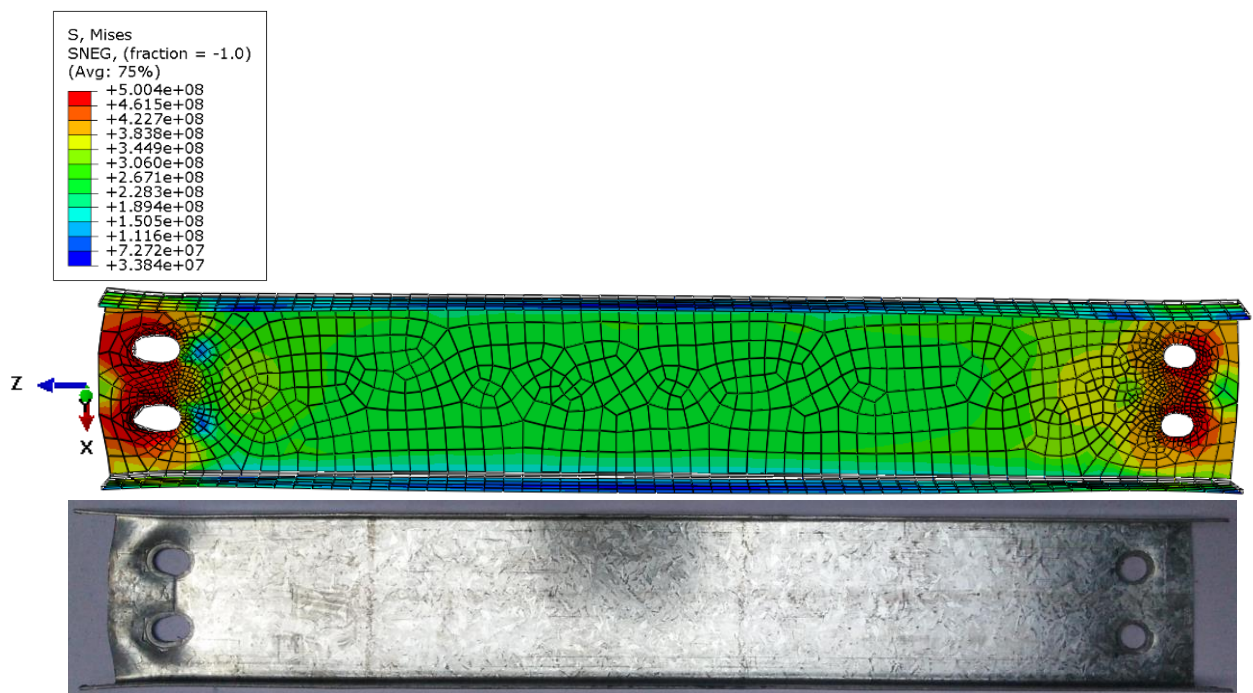


Figura 6.45 – Deformada global de toda cantoneira C2-G212W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

O modelo numérico do perfil U C2-G212W mostrado na Figura 6.45 inerente a deformada não apresentou tensões de escoamento nos flanges do perfil na parte desconectada (parte que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

A imagem ampliada da Figura 6.44 mostra que na região dos furos aconteceu um alongamento, na qual se apresenta os valores de tensões (Pa) nesta região, que estão em vermelho como mostra a régua de tensões, nota-se que é o ponto crítico e que tende a romper de acordo com o ensaio experimental, ocasionado a ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo perfil U apresentado na Figura 6.45 novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração.

Com estas análises pode-se concluir que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

6.1.11.2 Perfil U C2-G222W

O deslocamento máximo atingido pelo modelo numérico do perfil U C2-G222W chegou a 11,70 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 11,51 mm. A força máxima do modelo chegou a 86,34 kN, enquanto no ensaio este valor foi 84,71 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 1,92% acima da força máxima do ensaio. A Figura 6.46 compara as curvas força -deslocamento do perfil U C2-G222W, podendo-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

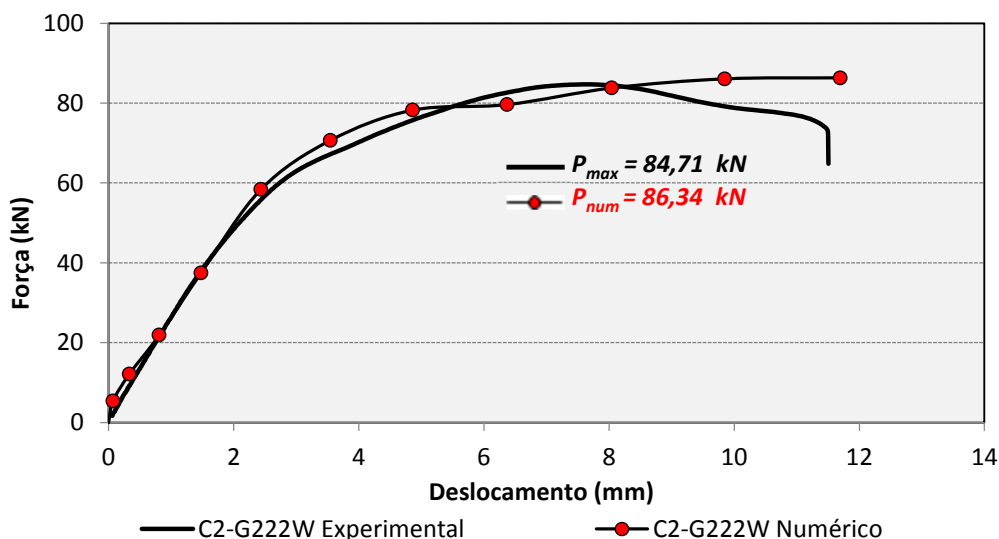


Figura 6.46 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G222W)

Ressalta-se nos perfis U a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica principalmente na região dos furos internos, a Figura 6.47

mostra a imagem ampliada. A Figura 6.48 apresenta a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

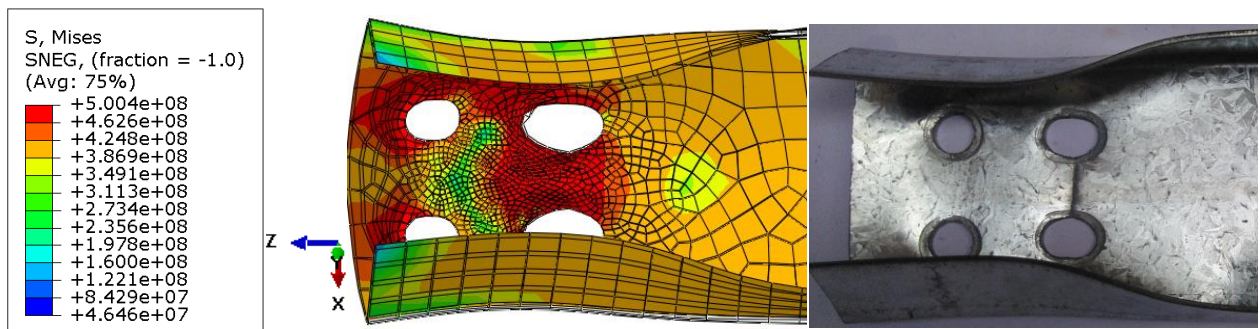


Figura 6.47 – Região dos furos do perfil U C2-G222W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

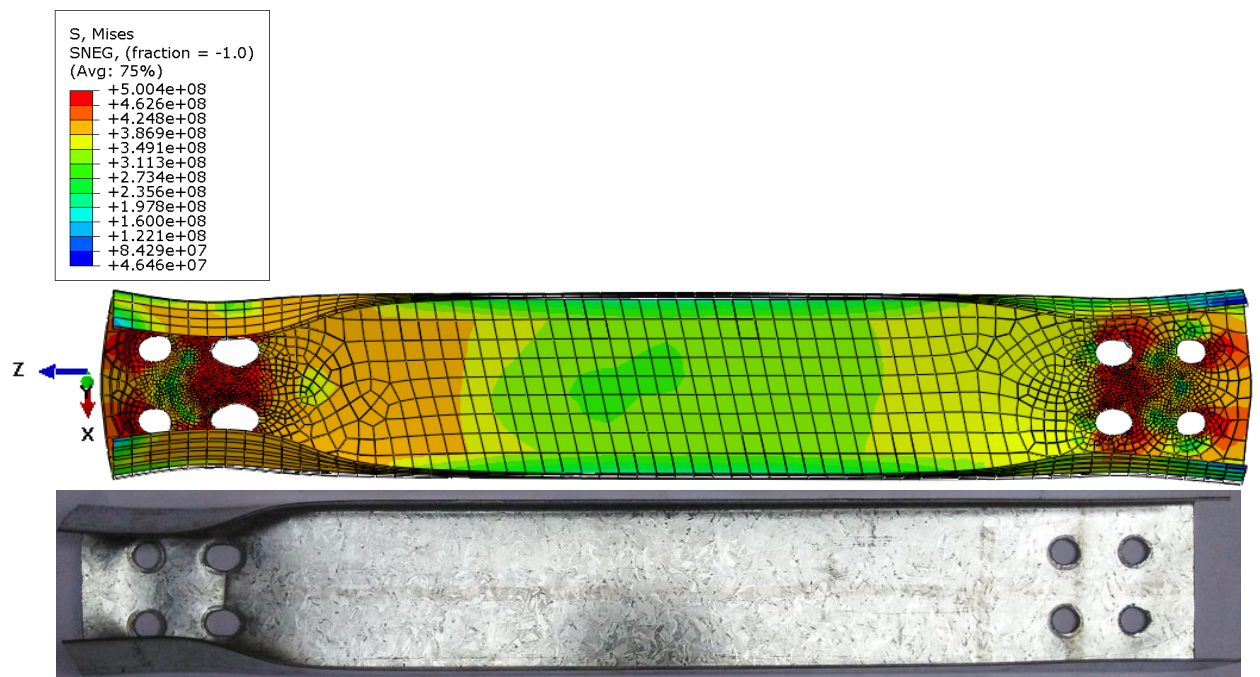


Figura 6.48 – Deformada global de toda cantoneira C2-G222W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

O modelo numérico do perfil U C2-G222W, mostrado na Figura 6.48 referente às deformadas do modelo numérico apresentou tensões de escoamento na cor amarelo e laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), próximo a região das conexões dos parafusos.

Na imagem ampliada da Figura 6.47 esta o modelo numérico do perfil U C2-G222W, no qual, pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de

tensões (Pa) nesta região principalmente no furo interno, estão em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho percorreu o caminho no sentido da extremidade da alma do perfil U, mostrando-se que está localizado geralmente nos furos internos onde acontecem as acomodações dos parafusos (região de maior contato). Pode-se observar que fica evidente a alta concentração das tensões de tração entre um furo e o outro, em que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, apresentando a ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo perfil U apresentado na Figura 6.48, obtiveram seus modos de ruptura iguais, e novamente comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração.

6.1.11.3 Perfil U C2-G232W

Para ser observado que existe um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental, a Figura 6.49 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G232W.

A força máxima no ensaio foi de 99,72 kN, enquanto no modelo numérico este valor chegou a 107,29 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo ensaio cerca de 7,59% abaixo da força máxima do modelo. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 12,10 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 11,51 mm.

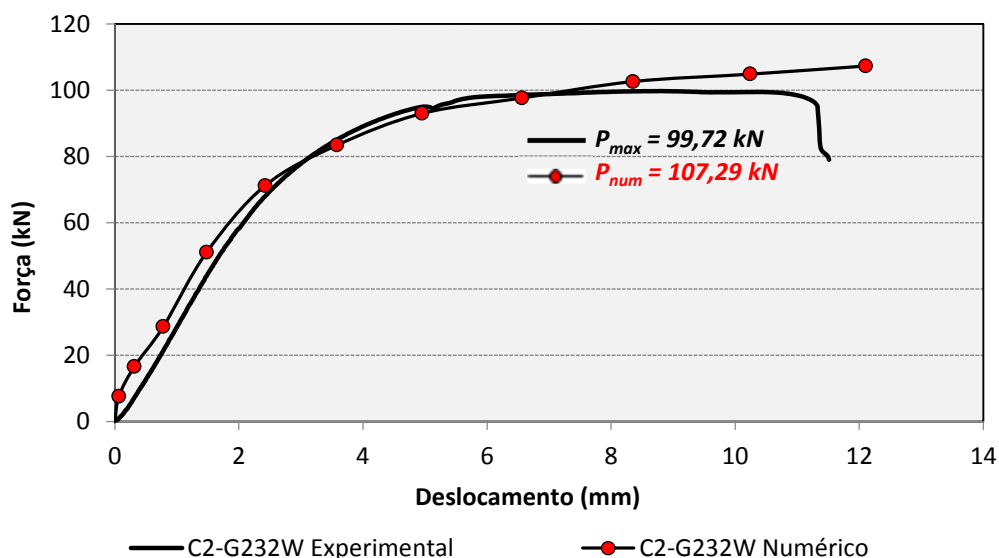


Figura 6.49 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G232W)

A Figura 6.50 apresenta a imagem ampliada da região dos furos do perfil U C2-G232W ensaiado e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa). Na Figura 6.51 pode-se visualizar a deformada global de todo perfil U C2-G232W ensaiado e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa).

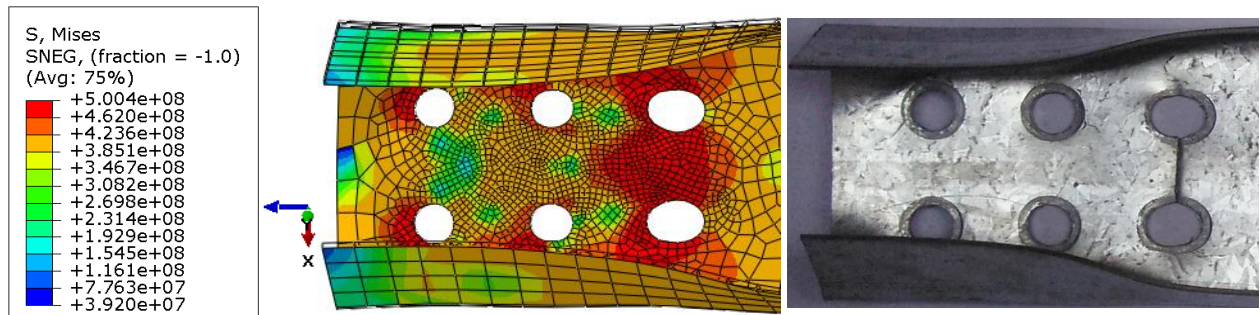


Figura 6.50 – Região dos furos do perfil U C2-G232W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

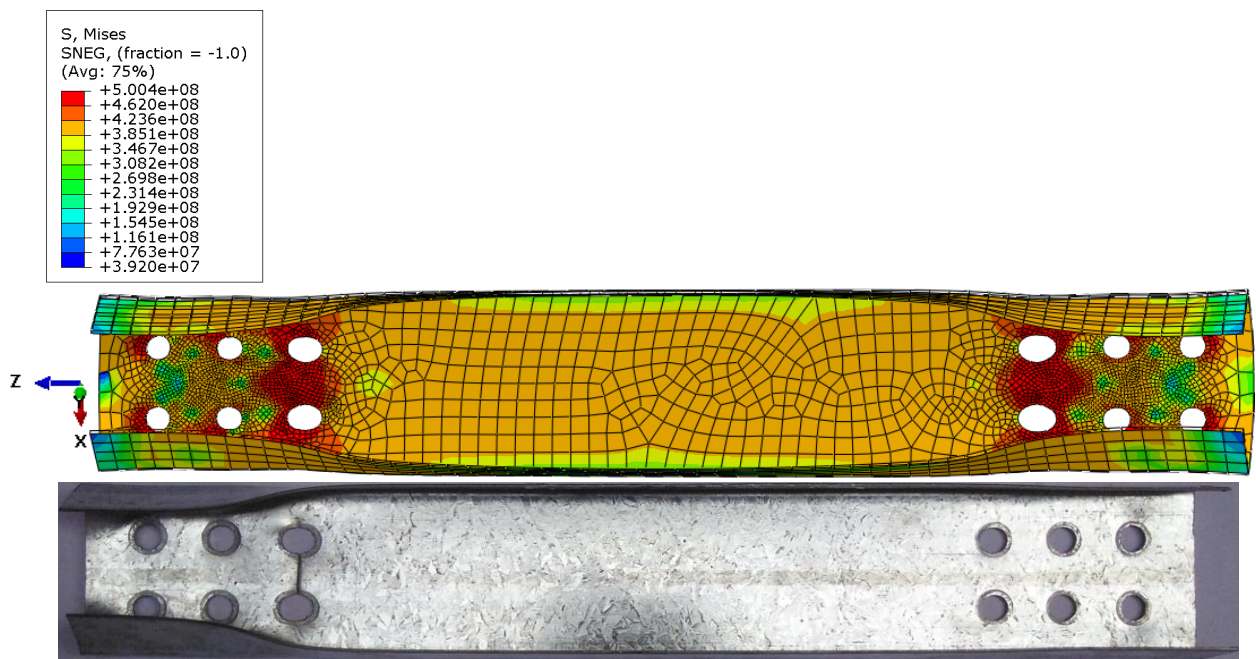


Figura 6.51 – Deformada global de toda cantoneira C2-G232W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

Analisando a imagem ampliada da Figura 6.50 pode-se observar o detalhe da região dos furos que foram alongados, os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente nos furos internos, está em vermelho como mostra a régua de tensões, este ponto crítico em vermelho está localizado nos dois furos internos da conexão parafusada, compreende-se que este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, obtendo a ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo modelo numérico do perfil U mostrou-se coerente com o perfil U ensaiado como apresenta a Figura 6.51, e portanto, novamente se comprova a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração. Assim o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

A Figura 6.51 expõe o modelo numérico do perfil U C2-G232W, em relação as deformadas do modelo numérico que apresentou tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, próximo à região da conexão parafusada obtendo um empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos).

6.1.11.4 Perfil U C2-G242W

O valor da força máxima do modelo chegou a 117,27 kN, enquanto no ensaio este valor foi 108,84 kN, ou seja, ficando a força máxima obtida pelo modelo (EF) cerca de 7,75% acima do valor da força máxima do ensaio. O deslocamento máximo atingido pelo modelo foi de 13,03 mm, enquanto no ensaio este valor foi de 15,99 mm. A Figura 6.52 compara as curvas força-deslocamento do perfil U C2-G242W, podendo-se observar um bom ajuste entre as curvas numérica e experimental.

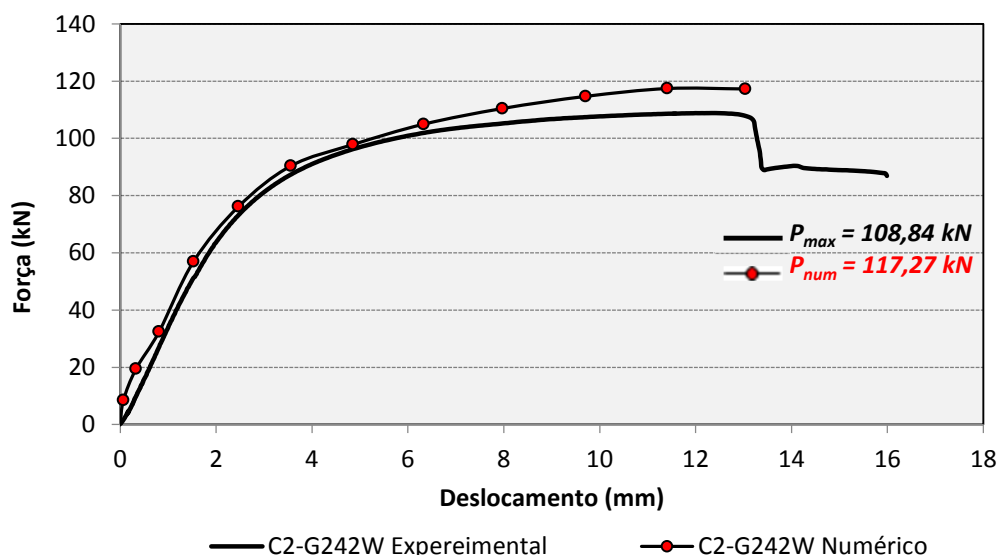


Figura 6.52 – Comparação das curvas experimental – modelo numérico (C2-G242W)

O perfil U observado na imagem ampliada da Figura 6.53, apresentam a semelhança no alongamento dos furos, após o ensaio experimental e simulação numérica. Na Figura 6.54 pode-se visualizar a deformada global dos perfis U após o ensaio experimental e simulação numérica.

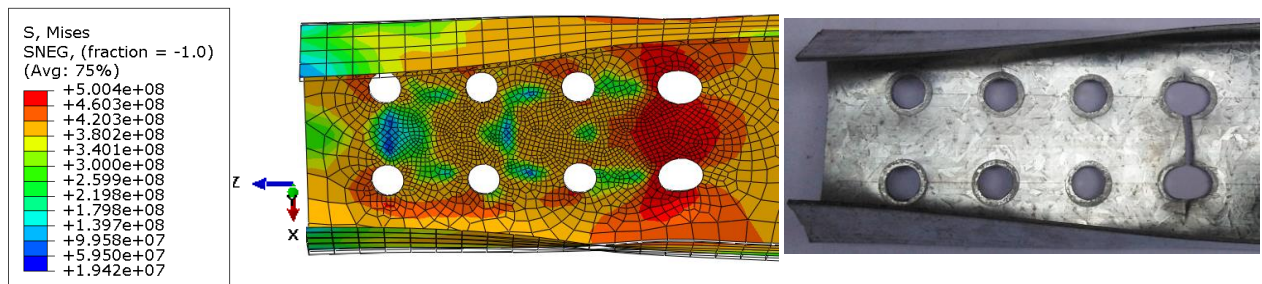


Figura 6.53 – Região dos furos do perfil U C2-G242W ensaiada e simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

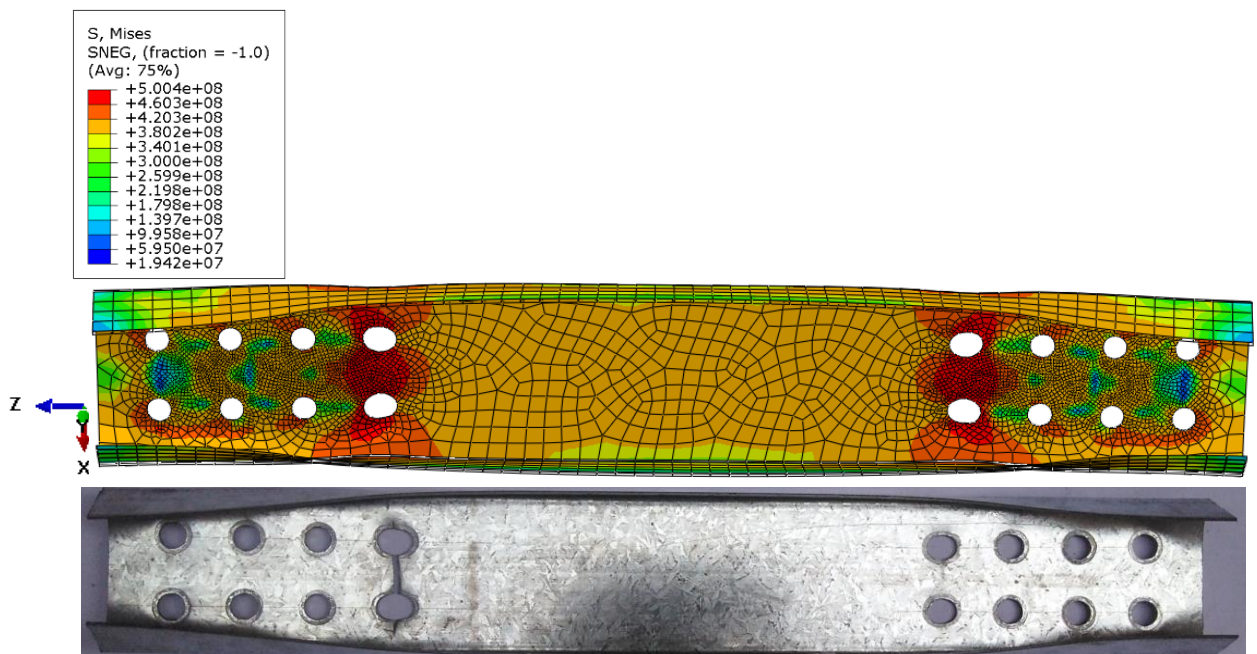


Figura 6.54 – Deformada global de toda cantoneira C2-G242W ensaiada e a simulação numérica com distribuição de tensões (em Pa)

A Figura 6.53 apresenta a imagem ampliada do modelo numérico (C2-G242W) com detalhes do alongamento na região dos furos internos, no qual, pode-se observar os valores de tensões (Pa) nesta região principalmente nos furos internos. O ponto crítico está em vermelho

como mostra a régua de tensões, em que percorreu o caminho no sentido da extremidade da alma do perfil U, mostrando-se que está localizado geralmente nos furos internos onde acontecem as acomodações dos parafusos (região de maior contato). Pode-se observar também que fica evidente a alta concentração das tensões de tração entre um furo e o outro, no qual este ponto crítico tende a romper de acordo com o ensaio experimental, apresentando a ruptura da seção líquida (R.S.L).

A deformada global de todo modelo numérico do perfil U mostrou-se coerente com o perfil U ensaiado como apresenta a Figura 6.54, outra vez comprova-se a eficiência do modelo (EF) de simular o comportamento dos perfis U quando submetidos a ensaios de tração, mostrando que o modelo numérico comparado com ensaio experimental obtiveram seus modos de ruptura iguais.

A Figura 6.54 apresenta o modelo numérico do perfil U C2-G242W, cujas deformadas do modelo numérico apresentaram tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos) principalmente na região próximo aos furos internos onde se acontece o modo de ruptura (R.S.L).

Também pode se observar que todos os modelos numéricos de perfis U com duas linhas de furos apresentaram tensões de escoamento na alma dos perfis principalmente na região dos furos.

6.1.12 Avaliação da modelagem numérica dos perfis U

A partir da comparação entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais e aqueles obtidos da modelagem numérica em perfis U formados a frio, podemos perceber que a obtenção de curvas força-deslocamento compatíveis com aquelas adquiridas durante a execução dos ensaios não é atividade corriqueira, uma vez que inúmeras distorções que afetam diretamente a medida dos deslocamentos podem ocorrer, tanto nos ensaios quanto nos modelos.

A Tabela 6.3 resume as diferenças encontradas nas forças máximas de colapso produzidas pelos ensaios e pelos modelos de elementos finitos.

Tabela 6. 3 – Diferenças entre as forças de ruptura dos ensaios e dos modelos em perfis U

Perfil	Força de Ruptura (kN)		$\frac{P_{Exp.}}{P_{Num.}}$
	$P_{Exp.}$	$P_{Num.}$	
C2-G211W	32,07	31,59	1,02
C2-G221W	59,32	58,96	1,01
C2-G231W	82,33	82,68	1,00
C2-G241W	95,35	102,67	0,93
C2-G212W	60,10	55,34	1,09
C2-G222W	84,71	86,34	0,98
C2-G232W	99,72	107,29	0,93
C2-G242W	108,84	117,29	0,93
Média de erro residual			0,98
Desvio padrão de erro residual			0,04

A Figura 6.55 apresenta a distribuição dos valores de força máxima atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais em perfis U, com números de seções de parafusos.

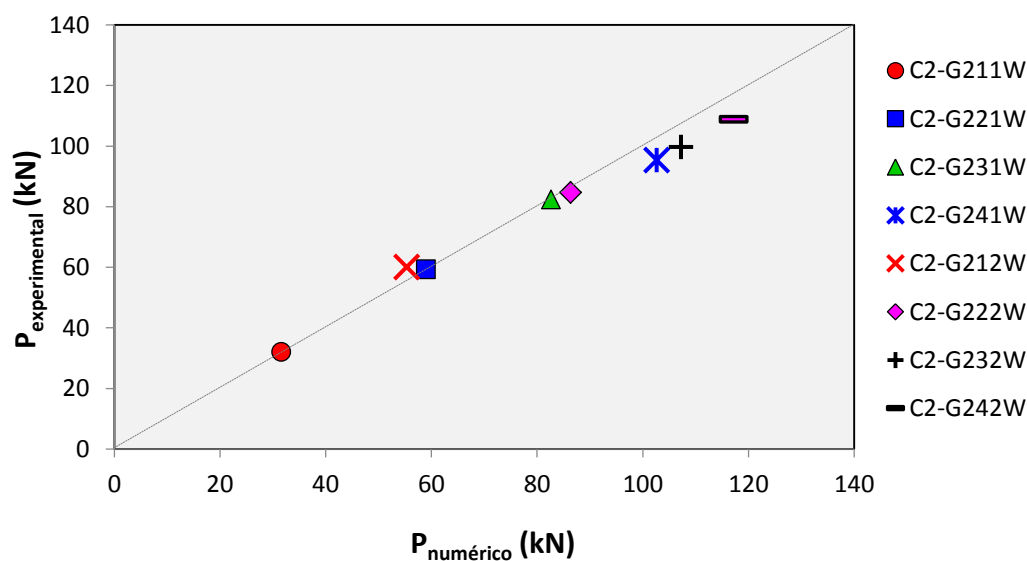


Figura 6.55 – Distribuição dos valores de força máxima atingidas nos modelos numéricos e ensaios experimentais em perfis U

A média das diferenças absolutas obtidas pelo modelo numérico (EF) presentes na Tabela 6.3 é de 0,98 e um desvio padrão de 0,04, com as maiores diferenças chegando a 7,92% e as menores a -0,43%. Percebe-se, então, que os modelos construídos permitem estimar com boa precisão o valor da força de ruptura e o modo de deformação de perfis U formados a frio, como estão apresentados neste trabalho.

A partir dos resultados encontrados, demonstra-se viável o uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que indiquem a força máxima de colapso das ligações parafusadas em perfis U formados a frio, permitindo assim o seu uso concomitante com ensaios experimentais, de maneira a reduzir custos e a duração destas atividades.

6.1.13 Considerações sobre a modelagem numérica

Após as análises realizadas com os modelos numéricos e comparando com os resultados experimentais dos perfis formados a frio, foi possível concluir que cada perfil apresenta um tipo de deformação diferente, sendo assim, algumas considerações sobre os modelos numéricos podem ser visualizadas a seguir.

Os modelos numéricos das cantoneiras A2-B211 e A2-B221 não apresentam tensões de escoamento nas abas desconectadas (abas que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões. Já o modelo numérico da cantoneira A2-B231 apresentou tensões de escoamento na cor laranja, na parte do empenamento da aba desconectada da cantoneira (aba que não tem parafusos). E o modelo numérico da cantoneira A2-B241 apresentou tensões de escoamento em quase toda cantoneira e não apresentou escoamento somente nas extremidades da cantoneira na aba desconectada (aba que não tem parafusos) e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

Os modelos numéricos das cantoneiras A2-C212 e A2-C222, não apresentaram tensões de escoamento na parte do empenamento das abas desconectadas (abas que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul e verde, como mostrado na régua de tensões.

Já os modelos numéricos das cantoneiras A2-C232 e A2-C242 apresentaram tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento da aba desconectada das cantoneiras (aba que não tem parafusos).

Os modelos numéricos dos perfis U C2-G211W e C2-G221W, inerente a deformada, não apresentaram tensões de escoamento nos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul para o perfil U C2-G211W e na cor azul e verde para o perfil U C2-G221W como mostrado na régua de tensões.

O modelo numérico do perfil U C2-G231W, apresentou tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos).

O modelo numérico do perfil U C2-G241W, apresentou tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), próximo a região da conexão parafusada. Pode ser observado também que todos os modelos numéricos de perfis U com uma linha de furos apresentaram tensões de escoamento na alma dos perfis principalmente na região dos furos.

Já o modelo numérico do perfil U C2-G212W com duas linhas de furos, não apresentou tensões de escoamento nos flanges do perfil na parte desconectada (parte que não tem parafusos), e estas tensões estão apresentadas em cor azul como mostrado na régua de tensões.

O modelo numérico do perfil U C2-G222W, apresentou tensões de escoamento na cor amarelo e laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, na parte do empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), próximo a região das conexões dos parafusos.

Também os modelos numéricos dos perfis U C2-G232W e C2-G242W, apresentaram tensões de escoamento na cor laranja como mostrado na régua de tensões, isto aconteceu, próximo à região da conexão parafusada obtendo um empenamento dos flanges dos perfis na parte desconectada (parte que não tem parafusos), principalmente na região próximo aos furos internos onde se acontece o modo de ruptura (R.S.L).

Pode se observar também, que todos os modelos numéricos de perfis U com duas linhas de furos apresentaram tensões de escoamento na alma dos perfis principalmente na região dos furos.

Como foi demonstrado anteriormente com os resultados numéricos dos modelos de cantoneiras e dos modelos de perfis U, constata-se que é viável o uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que identifiquem a força de colapso das ligações parafusadas em perfis formados a frio, estas realizadas no software ABAQUS, sendo estas calibradas com ensaios experimentais, e mostrando as vantagens da redução de custos e tempo de realização destas atividades.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7. CONCLUSÕES

Conforme foi descrito nos capítulos anteriores, após a realização da revisão bibliográfica, das análises dos resultados experimentais e numéricos obtidos dos ensaios, das propostas de modelagens estatística e por elementos finitos realizado com um modelo de cantoneira e das avaliações e validações realizadas neste trabalho, podem ser apresentadas as seguintes conclusões.

7.1 CONCLUSÕES DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A equação prescrita pela norma brasileira destinada ao dimensionamento de perfis formados a frio, a NBR 14.762 (ABNT, 2010), baseada na norma norte americana AISI S100 (2001), resulta, em um grande número de situações, em valores de forças de ruptura da seção líquida de cantoneiras e perfis U, superiores àqueles efetivamente encontrados nos ensaios realizados neste trabalho e em trabalhos de outros pesquisadores, portanto não é conservadora.

A equação prescrita pela NBR 14.762 (ABNT, 2010) para a estimativa da força de esmagamento forneceu valores adequados para este modo de falha, os quais foram comprovados por diversos resultados dos ensaios.

Como resultado a equação de resistência nominal da seção líquida para cantoneiras formadas a frio referente à norma americana AISI S100 (2016), se apresentou a que tem os melhores valores estatísticos para os casos com uma linha de parafusos, não deixando de expor que a norma americana indicou a mais conservadora com 76,5% e com duas linhas de parafusos 55,6%, e obtém a equação mais complexa para a execução dos cálculos do C_t . Já a equação de resistência nominal da seção líquida da norma AS/NZS 4600 (2005) indicou que não é conservadora (não está a favor da segurança) com um valor de 94,1% para uma linha de parafusos e para duas linhas de parafusos chegando a 100% destes casos.

Em perfis U formados a frio a equação de resistência nominal da seção líquida da norma brasileira NBR 14.762 (ABNT, 2010), se mostrou a que tem os melhores valores estatísticos para uma linha de parafusos, não deixando de expor que a norma brasileira é a mais conservadora com 72,2%, e a norma americana AISI S100 (2016) se apresentou a que tem os melhores valores estatísticos para duas linha de parafusos é a mais conservadora com 66,7%. Já a norma AS/NZS 4600 (2005) indicou que não é conservadora (não está a favor da

segurança) com um valor de 88,9% para uma linha de parafusos e para duas linhas de parafusos com um valor de 62,5%.

Os perfis U e cantoneiras com 1 parafuso por seção possuem menor resistência à ruptura da seção líquida do que seções com 2 parafusos, 3 parafusos e 4 parafusos. Esta diferença pode ser considerada no dimensionamento do perfil, de modo a otimizar a sua seção e permitir a indicação adequada do modo de falha da ligação.

A partir da análise em cantoneiras, conclui-se que à medida que a largura da aba desconectada aumenta em relação à largura da aba conectada, acontece uma redução da eficiência da seção líquida da cantoneira, de maneira não proporcional à distância \bar{x} , utilizada na equação de cálculo do coeficiente C_t . Portanto, a consideração direta da relação entre as abas desconectada e conectada, descreve melhor a performance da ligação nesta situação.

A variação da espessura do elemento conectado do perfil provoca certa alteração na eficiência da seção líquida e uma medida da esbeltez do elemento conectado pode contribuir para uma melhor quantificação da redução da área líquida dos perfis.

A distância entre a borda da cantoneira, na direção da solicitação, e o primeiro parafuso da ligação afeta, principalmente, o valor da força de esmagamento, já a ruptura da seção líquida parece ser menos afetada.

Pose-se concluir que a realização de ensaios empregando chapas de fixação com espessuras inferiores às utilizadas no trabalho de De Paula e Bezerra (2006), de modo a quantificar a possível influência deste parâmetro nos resultados, não alterou de maneira significativa os resultados (força x deslocamento) dos ensaios.

7.2 CONCLUSÕES DAS MODELAGENS ESTÁTISTICAS

A análise de função discriminante tem apresentado bons resultados, quando o objetivo consiste em discriminar quais variáveis melhor explicariam os modos de ruptura. As variáveis que melhor explicaram os modos de ruptura em cantoneiras foram $(d/b_d e f_u/f_y)$ e as variáveis que melhor explicaram os modos de ruptura em perfis U foram $(t/(b_w + 2b_f); d/b_f e f_u/f_y)$.

Por meio da regressão linear múltipla de resultados experimentais de 60 ensaios, foi proposta a seguinte equação para a determinação do coeficiente de redução da área líquida (C_t) de cantoneiras formadas a frio, com abas iguais ou desiguais, conectadas pela maior ou

menor aba, cujas cantoneiras possuíam 1 ou 2 linhas de parafusos, com duas ou mais seções de parafusos.

$$C_{t \text{ Cantoneira}} = 0,65 - 0,44 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) + 0,46 \left(\frac{t}{b_c + b_d} \right)$$

Através da regressão linear múltipla de resultados experimentais de 57 ensaios, foi proposta a seguinte equação para a determinação do coeficiente de redução da área líquida (C_t) de perfis U formadas a frio, com abas iguais ou desiguais, conectados na alma do perfil, com duas ou mais seções de parafusos, cujas seções possuam 1 ou 2 linhas de parafusos.

$$C_{t \text{ Perfil U}} = 0,86 - 1,0 \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) + 0,26 \left(\frac{t}{b_w + 2b_f} \right)$$

onde:

(\bar{x}) é a distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade;

(L) é o comprimento total da ligação;

(b_d) é a largura total da aba desconectada da cantoneira;

(b_c) é a largura total da aba conectada da cantoneira;

(b_w) é a largura total da alma do perfil U;

(b_f) é a largura total do flange do perfil U; e

(t) é a espessura da chapa do perfil.

O desempenho da equação proposta é superior àquele da equação prescrita pela norma NBR 14.762-2001, tanto nos resultados dos ensaios deste trabalho, quanto nos resultados de

outros pesquisadores. A equação proposta apresenta as menores diferenças (absolutas e percentuais) entre os valores calculados e os valores experimentais.

7.3 CONCLUSÕES DA MODELAGEM NUMÉRICA

Através dos dados das análises realizadas com os modelos numéricos e comparando com os resultados experimentais dos perfis formados a frio, foi possível concluir que cada perfil apresenta um tipo de deformação diferente, sendo assim, algumas considerações sobre os modelos numéricos podem ser indicadas a seguir.

Foi feita uma modelagem numérica utilizando para isso o *software* ABAQUS, para representar o comportamento de cantoneiras e perfis U formados a frio e conectados por parafusos, sob tração. Pode-se concluir que as deformadas do ensaio foram bem representadas pelo modelo numérico de elementos finitos que incorporaram análises de grandes deformações e grandes deslocamentos, simulando adequadamente as deformações e tensões surgidas na extensão dos perfis e nas regiões dos furos.

Conclui-se que os modelos numéricos das cantoneiras e dos perfis U com 1 e 2 seções de parafusos não apresentaram grandes deformações em toda extensão dos perfis, isto, comparando com 3 e 4 seções de parafusos que apresentaram grandes deformação em toda extensão dos perfis, sendo assim, comprova-se que a modelagem numérica condiz com os resultados experimentais.

A média das diferenças absolutas da força máxima obtida experimentalmente e da força obtida pelo modelo numérico em cantoneiras é de 1,02 e um desvio padrão de 0,03, com as maiores diferenças chegando a 7,36% e as menores a 0,81%. Já a média das diferenças absolutas obtidas pelo modelo numérico em perfis U é de 0,98 e um desvio padrão de 0,04, com as maiores diferenças chegando a 7,92% e as menores a -0,43%. Percebe-se, então, que os modelos construídos permitem estimar com boa precisão o valor da força de ruptura e o modo de deformação de cantoneiras e perfis U formados a frio, como estão apresentados neste trabalho.

A partir dos resultados numéricos dos modelos de cantoneiras e dos modelos de perfis U, conclui-se que as tensões localizadas aparecem com maior gradiente de tensão na região próxima aos furos, na parte interna dos perfis. Neste local é onde as rupturas ocorrem com maior frequência, conforme mostram os resultados dos ensaios experimentais. Os modelos numéricos foram calibrados com os resultados dos ensaios experimentais.

A partir dos resultados numéricos dos modelos de cantoneiras e dos modelos de perfis U, constata-se que é viável o uso da modelagem numérica por elementos finitos na obtenção de coeficientes que identifiquem a força de colapso das ligações parafusadas em perfis formados a frio, estas realizadas no *software* ABAQUS, sendo estas calibradas com ensaios experimentais, e mostrando as vantagens da redução de custos e tempo de realização destas atividades.

7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram realizados estudos experimentais, estatísticos e numéricos, analisando o comportamento de cantoneiras e perfis U formados a frio. Após esta sequencia desenvolvida, a seguir, foram listadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Investigar a influência da distância da borda do perfil até ao primeiro parafuso, na direção da solicitação, na capacidade resistente de perfis de aço formados a frio de alta resistência submetidos à tração, com 2 ou mais parafusos por seção, para o modo de falha por ruptura da seção líquida ;
- Realizar ensaios experimentais em perfis de aço formados a frio de alta resistência submetidos à tração com parafusos instalados em uma única linha próxima à borda livre da parte conectada, e que tenha como intuito a obtenção de uma equação ou coeficiente que quantifique a redução da resistência à ruptura da seção líquida ocorrida na ligação;
- Aplicar a metodologia apresentada neste trabalho para a obtenção de coeficientes de redução da área líquida utilizando aço de alta resistência em perfis U e cantoneiras de chapa grossa;
- Pesquisar uma relação que expresse com mais precisão o valor da força de esmagamento em perfis formados a frio com todos os elementos conectados e apenas uma seção de parafusos;
- Investigar o comportamento de perfis formados a frio com ligações parafusadas sob tração, com furos em zig-zag, especialmente com relação à ruptura da seção líquida;

- Realizar ensaios experimentais em chapas planas e em perfis formados a frio com a utilização de soldas longitudinais, de modo a avaliar a capacidade resistente dos modelos e especialmente seus modos de falhas;
- Analisar a fratura na região dos furos, quando os perfis se rompem por ruptura da seção líquida, por meio da análise numérica utilizando os resultados experimentais para calibração, que melhor representem curvas força-deslocamento de perfis formados a frio com ligações parafusadas;
- Realizar uma pesquisa para a calibração de modelos numéricos que melhor representem curvas força-deslocamento de perfis formados a frio com ligações parafusadas utilizando a chapa de fixação de diferentes espessuras como foram realizadas experimentalmente neste trabalho;
- Realizar uma análise paramétricos, utilizando o modelo numérico de cantoneiras e perfis U formados a frio, sob tração e conectados por parafusos, nos quais, já foram calibrados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

AAKER, D. A., KUMAR, V., & DAY, G. S. **Pesquisa de marketing (2. ed.)** São Paulo: Atlas, 2004.

ABAQUS, User's manual, Version 6.14-1, **Dassault Systemes Simulia Corp**, providence, RI, USA, 2014.

ABAQUS, Theory manual, Version 6.14-1, **Dassault Systemes Simulia Corp**, providence, RI, USA, 2014.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC. **Load and resistance factor design specification for structural steel buildings**. Chicago, IL, 1999.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION – AISC. **Load and resistance factor design specification for structural steel buildings**. Chicago, IL, 2005.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **Edition of the specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 1996.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **Supplement n. 1 to the specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 1999.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 2001.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 2007.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members and AISI S100-12-C. Commentary on the specification, electronic version**. Washington DC, 2012.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI S100 (2016). **North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM A370. **Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products**. Philadelphia, PA. 2014.

ANANTHI, G. B. G.; ROY, K.; LIM, J. B.P. Experimental and numerical investigations on axial strength of back-to-back built-up cold-formed steel angle columns: **Steel and Composite Structures**. v. 31, p. 601-615, 2019.

AS/NZS: 4600. **Cold-formed Steel Structures**. New Zealand Standard. Sydney, Australia, 1996.

AS/NZS: 4600. **Cold-formed Steel Structures**. New Zealand Standard. Sydney, Australia, 2005.

AS/NZS: 4600. **Cold-formed Steel Structures**. New Zealand Standard. Sydney, Australia, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6355. Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização. Rio de Janeiro. 2012.

BARAN, E.; AKIS, T.; SEN, G.; DRAISAWI, A. Experimental and numerical analysis of a bolted connection in steel transmission towers: **Journal of Constructional Steel Research**, n. 121, p. 253-260, 2016.

BS:5950-Part 5. **Structural use of steelwork in building-code of practice for design of cold-formed thin gauge sections**. British Standards Institution, 1998.

CARRIL, J. L.; LABOUBE, R. A.; YU, W. W. **Tensile and bearing capacities of bolted connections**. Disponível em: <<http://scholarsmine.mst.edu/cfss-library/46>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

CHUNG, K. F.; IP, K. H. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading. **Engineering Structures**, v. 22, p. 1271-1284, 2000.

CHUNG, K. F.; IP, K. H. Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections. **Engineering Structures**, v. 23, p. 1115-1125, 2001.

DE PAULA, V. F.; BEZERRA, L. B. **Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio, sob Tração e Conectadas por Parafusos**. 167 f. 2006. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

DE PAULA, V. F.; BEZERRA, L. B e MATIAS, W.T. Efficiency reduction due to shear lag on bolted cold-formed steel angles. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 64, p. 571-583, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 3: **Design of steel structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings – Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting** – ENV 1993-1-1, 1992.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 3: **Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints**. Berlin, Germany, 2010.

FANG, C.; YAM, M. C. H.; ZHOU, X.; ZHANG, Y. Post-buckling resistance of gusset plate connections: Behaviour, strength, and design considerations, **Engineering Structures**. n. 99, p. 9-27, 2015.

GARSON, G. D. **Discriminant Function Analysis, Statnotes: Topics in Multivariate Analysis**. 2008.

HOLCOMB, B.D.; YU, W. W.; LABOUBE, R.A. Tensile and bearing capacities of bolted connections. **Second Summary Report, Civil Engineering Study 95-1**. University of Missouri - Rolla, 1995.

IS:801, Indian Standard - Code of practice for use of cold-formed light gauge steel structural members in general building construction; 1975.

IS:800, Indian Standard - Code of practice for general construction in steel; 2007.

JAGHAN, S.; PADMAPRIYA, R. Behaviour of bolted cold formed steel channel tension members. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 1, p. 137–146, 2016.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**, 6^a edition, New Jersey : Pearson Prentice-Hall International, 2007.

KACHIGAN, S. K. **Multivariate Statistical Analysis: A Conceptual Introduction**, 2^a edition, New York: Radius Press, 1991.

KE, K.; XIONG, Y.H.; MICHAEL, C.H.; YAMB.; ANGUS, C.C.L.; CHUNG, K.F. Shear lag effect on ultimate tensile capacity of high strength steel angles: **Journal of Constructional Steel Research**, n. 145, p. 300-314, 2018.

KULAK, G. L.; WU, E. V. Shear lag in bolted angle tension members, **J. Struct. Eng.**, v. 123, n. 9, p. 1144–1152, 1997.

LABOUBE, R. A.; YU, W. W. “**Tensile and Bearing Capacities of Bolted Connections**,” Final Summary Report, Civil Engineering Study 95-6, Cold-Formed Steel Series, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 1995.

LEE, Y. H.; TAN, C. S.; MOHAMMAD, S.; TAHIR, M. M.; SHEK, P. N. “Review on Cold-Formed Steel Connections.” **The Scientific World Journal**, (Article ID 951216), 11, 2014.

MAI, B.; PHAM, C. H.; HANCOCK, G. J.; NGUYEN, G. D. Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 157, p. 151-160, 2019.

MAIOLA, C. H. **Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio**. 130 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MUNSE, W. H.; CHESSON, E. Jr. Riveted and bolted joints: net section design. **Journal of Structural Division**, ASCE, v. 89, p. 107-126, 1963.

NGUYEN, H. T.; KIM, S. E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, n. 65, p. 1909-1920, 2009.

ONWUKWE, C. E.; OGBONNA, E. N.; AYENI, A. Application of Wilks’ Lambda and Hotelling’s T^2 with MANOVA on Drug Addiction and Drug Abuse Data. **Advances in Life Science and Technology**, v. 24, p. 53-59, 2014.

- PADMAPRIYA, R. Experimental study on behaviour of bolted cold-formed steel angles under tension, **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 7, p. 967–975, 2015.
- PADMAPRIYA, R.; KANDASAMY, S. Study on the Behavior of Cold-formed Steel Angle Tension Members. In: International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 20, 2010. **Proceedings**. Missouri University of Science and Technology, p. 589-604, 2010.
- PAN, C. L.; CHIANG, P. C. Shear Lag Effect on Bolted C-Shaped Cold-Formed Steel Tension Members. In: International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 16, 2002. **Proceedings**. Missouri University of Science and Technology, p. 677–695, 2002.
- PAN, C. L. Prediction of the strength of bolted cold-formed channel sections in tension. **Thin-Walled Structures**, v. 42, n. 8, p. 1177–1198, 2004.
- PAN, C. L. Shear Lag Effect on Bolted L-Shaped Cold-Formed Steel Tension Members. In: International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 18, 2006. **Proceedings**. Missouri University of Science and Technology, p. 679–694, 2006.
- PAST, Theory manual, Version 3.2, **Natural History Museum University of Oslo**, Noruega, 2018.
- PEREIRA, R. S.; GOMES, O. F. Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 8, n. 2, p. 27-42, 2014.
- PRABHA, P.; JAYACHANDRAN, S. A.; SARAVANAN, M.; MARIMUTHU, V. Prediction of the tensile capacity of cold formed angles experiencing shear lag. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 11, p. 1348–1358, 2011.
- POLIT, D. F. Data Analysis and Statistics for Nursing Research. Humanaysis, (2^a ed. 320-321) **Inc. Saratoga springs**, New York, 2009.
- PONTES, A. C. F. **Análise de variância multivariada com a utilização de testes não-paramétricos e componentes principais baseados em matrizes de postos**. 117 f. 2005. Tese (Doutorado em Estatística e experimentação Agrônômica). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- POSO, A. T. (2015) A SIDERURGIA BRASILEIRA E MUNDIAL: o desenvolvimento desigual recente. Universidade de São Paulo.
- RENCHER A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. USA: J. Wiley & Sons; 2002.
- SALIH, E. L.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Numerical study of stainless steel gusset plate connections, **Engineering Structures**. n. 49, p. 448-464, 2013.
- SAMOHYL, R. W. Controle estatístico de qualidade. **Elsevier**, 275 páginas. Rio de Janeiro, 2009.
- STATSOFT, User's Manual, Version 10, Inc. **STATISTICA (data analysis software system)**,. 2011.

STATSOFT, Theory manual, Version 10, Inc. STATISTICA (**data analysis software system**),. 2011.

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. *Estatística*. 4º Edição, 597 páginas. **Bookman**, Porto Alegre, 2009.

TAYLOR, J. Colin. More Work is Required. In: **Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures**, Roanoke-VA, 2000.

TEH, L. H.; GILBERT, B. P. Net Section Tension Capacity of Cold-Reduced Sheet Steel Angle Braces Bolted at Lag. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. May, p. 328-337, 2013a.

TEH, L. H.; GILBERT, B. P. Net Section Tension Capacity of Cold-Reduced Sheet Steel Channel Braces Bolted at the Web. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. May, p. 740-747, 2013b.

TEH, L. H.; GILBERT, B. P. Net Section Tension Capacity of equal angle braces bolted at different legs. **Journal of Structural Engineering**., v. 140, n. 6, p. 1-11, 2014a.

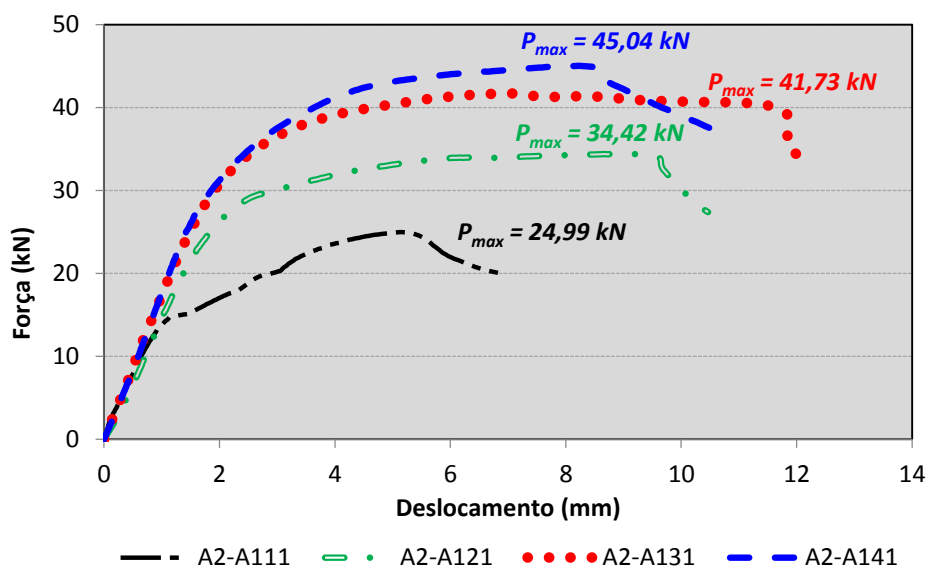
Teh, L. H., and Gilbert, B. P. “Design Equations for Tensile Rupture Resistance of Bolted Connections in Cold-Formed Steel Members,” **The Twenty-Second International Conference for Cold-Formed Steel Structures**, St. Louis, MO, pp. 713-727, November 2014b.

YIP, A. S-M.; CHENG, J. J. R. Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension. **Structural Engineering Report n. 233**, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 2000.

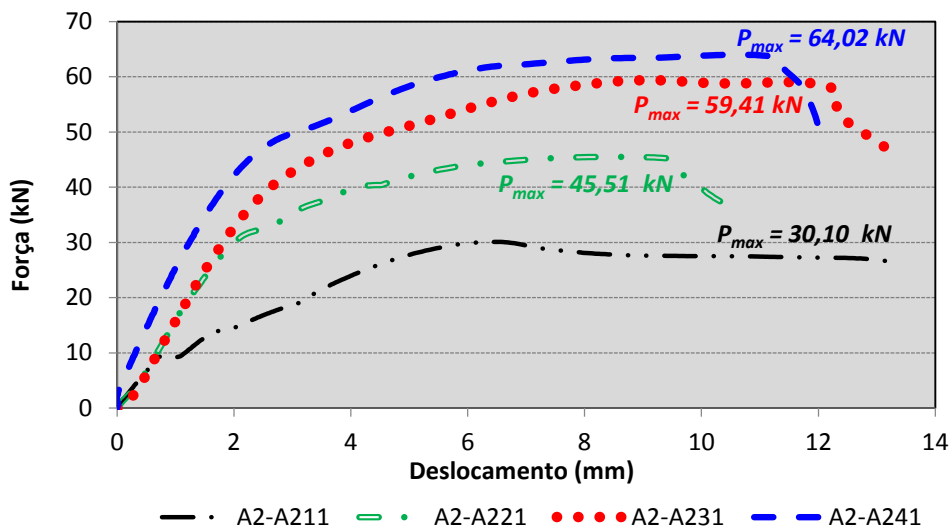
YU, W. W. **Cold-formed Steel Design**. 3^a edition. New York: John Wiley & Sons, 2000.

ZAMAN, T.; ALAKUS, K. Comparison of resampling methods in multiple linear regression. **Journal of Science and Arts**. n. 1 (46), Cankiri, Turkey, pp. 91-104, 2019.

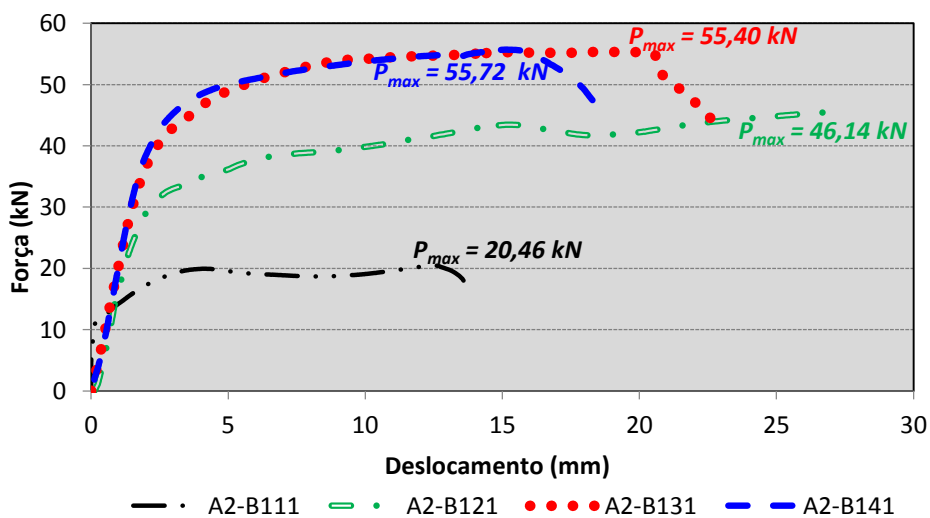
APÊNDICE A - GRÁFICOS FORÇA X DESLOCAMENTO DOS PERFIS ENSAIADOS



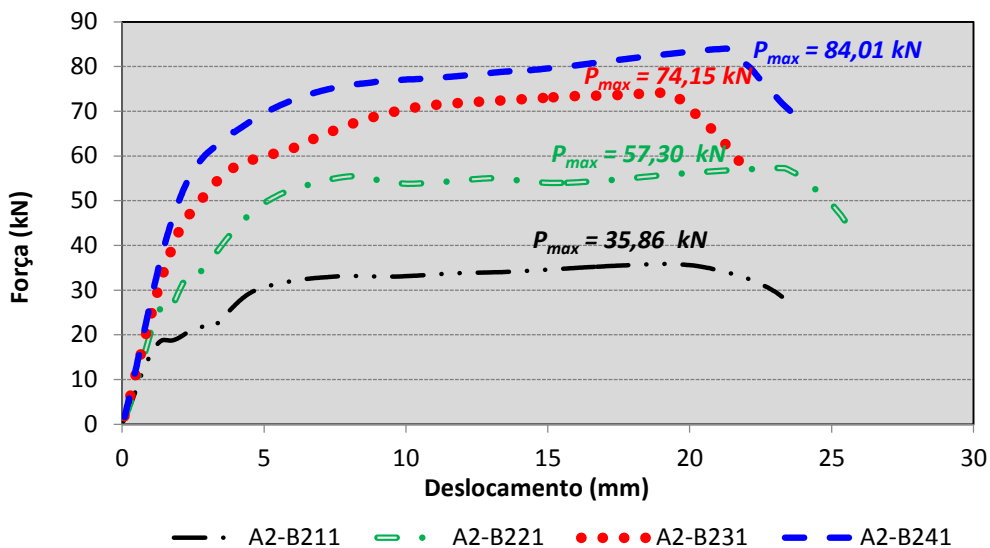
Cantoneiras ZAR 345 - 50x50#1,55 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



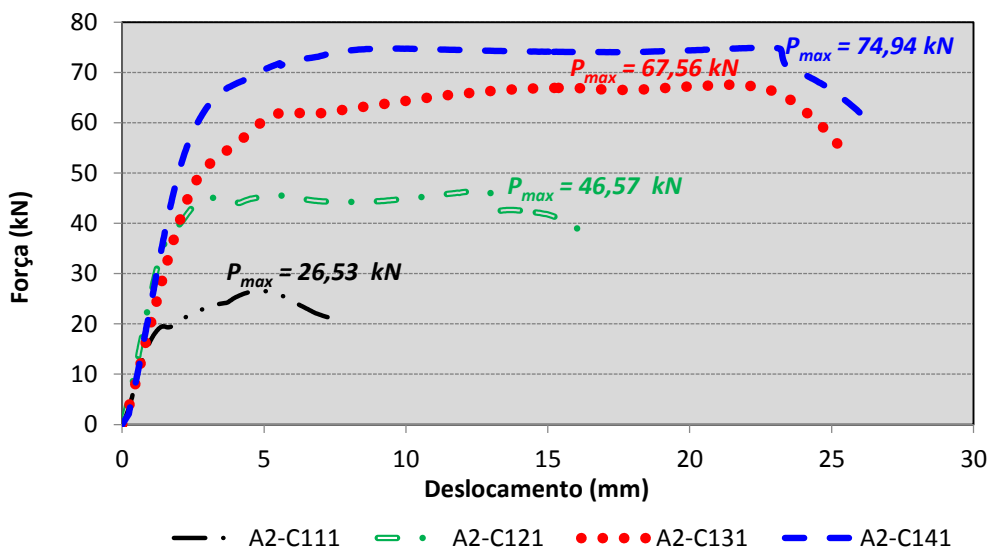
Cantoneiras ZAR 345 - 50x50#1,95 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



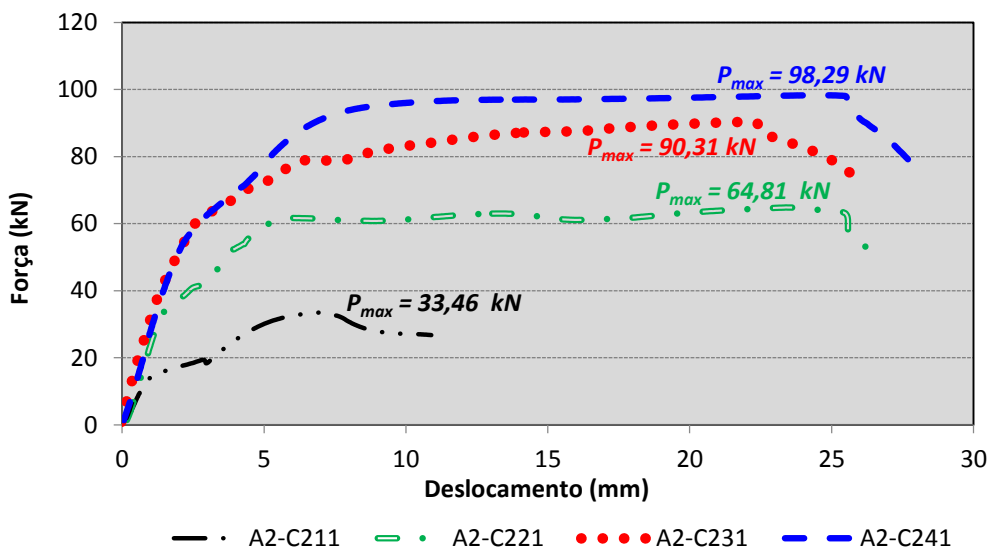
Cantoneiras ZAR 345 - 75x75#1,55 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



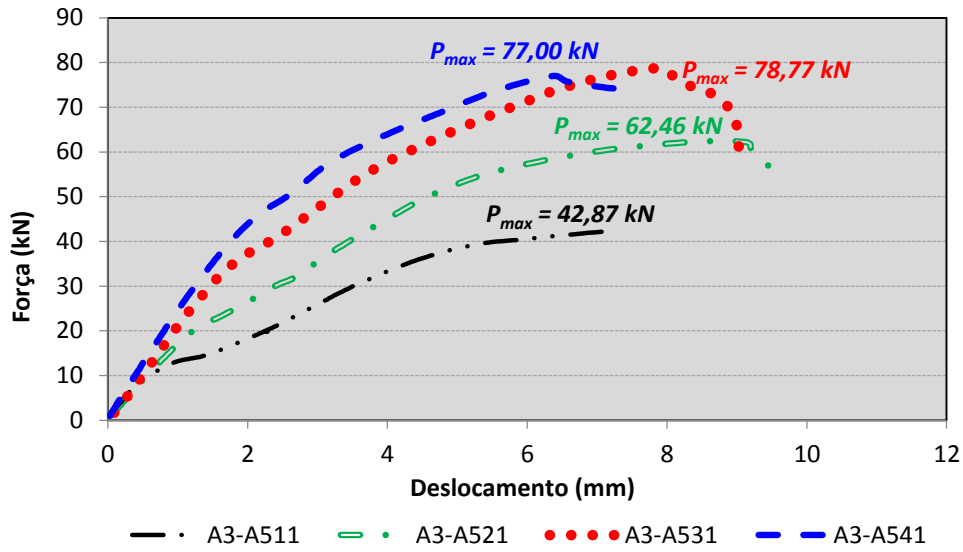
Cantoneiras ZAR 345 - 75x75#1,95 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



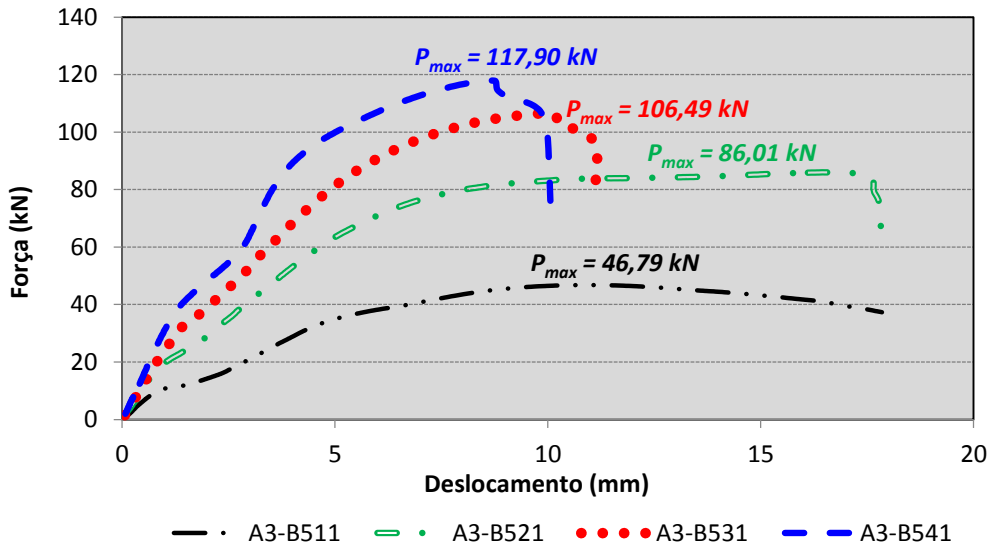
Cantoneiras ZAR 345 - 100x100#1,55 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



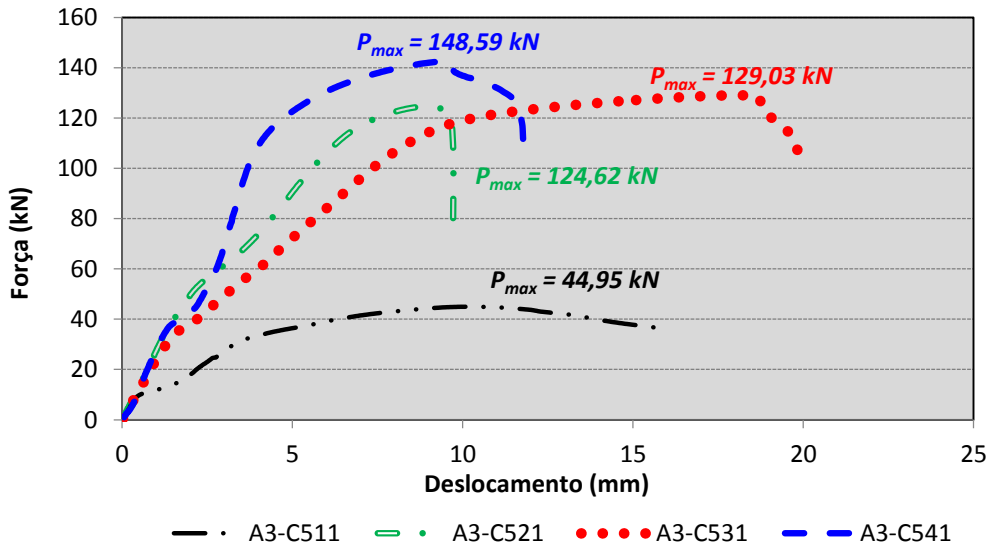
Cantoneiras ZAR 345 - 100x100#1,95 conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos



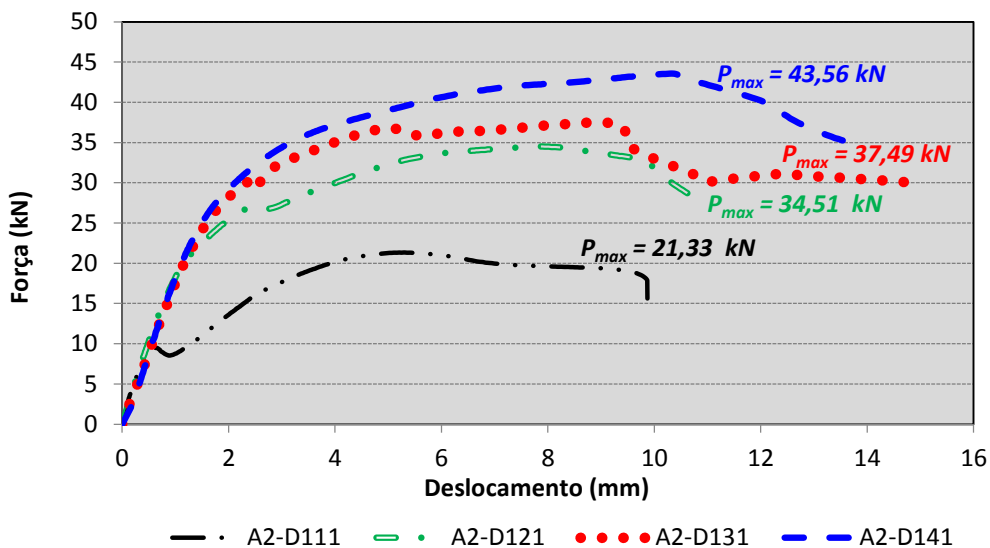
Cantoneiras ZAR 400 - 50x50#2,30 conectadas por uma, com uma linha de parafusos



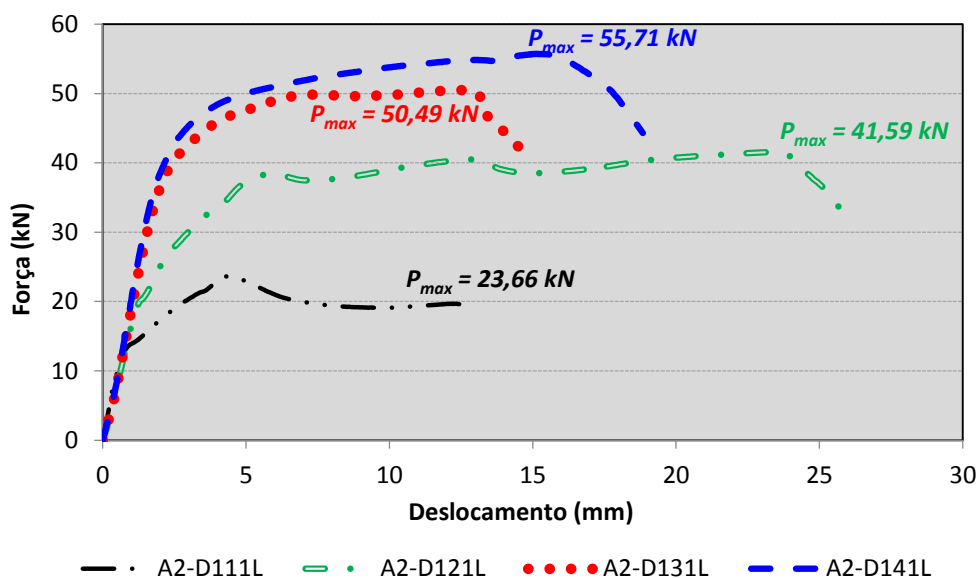
Cantoneiras ZAR 400 - 75x75#2,30 conectadas por uma, com uma linha de parafusos



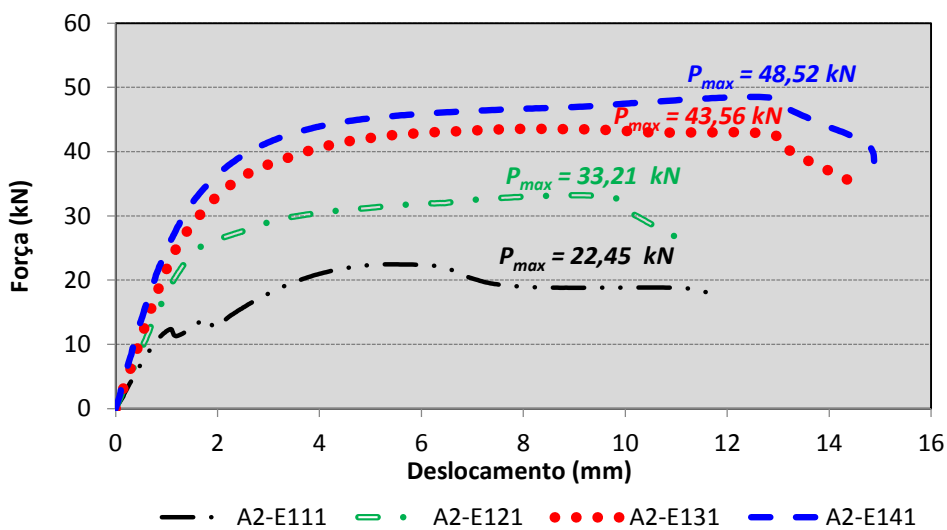
Cantoneiras ZAR 400 - 100x100#2,30 conectadas por uma, com uma linha de parafusos



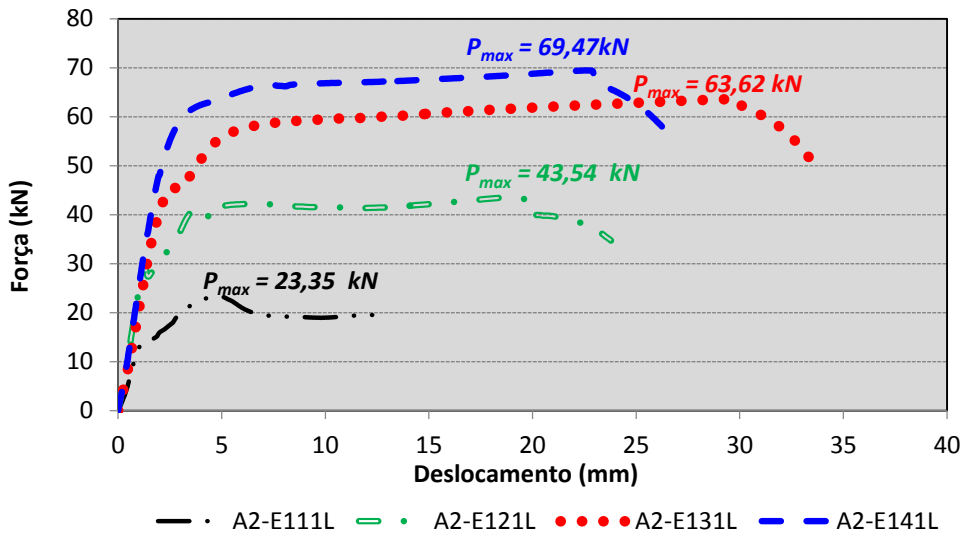
Cantoneiras ZAR 345 - 50x75#1,55 conectadas pela aba menor, com uma linha de parafusos



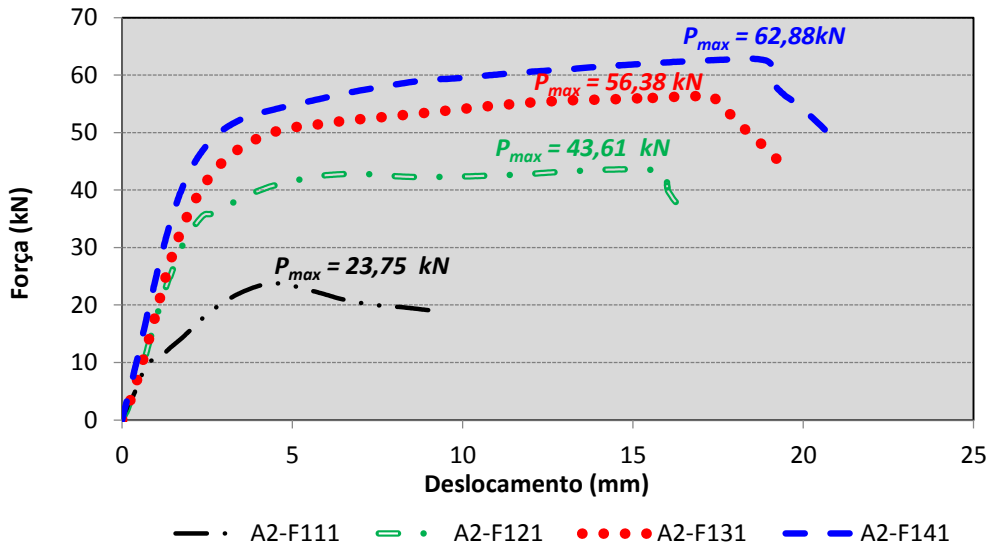
Cantoneiras ZAR 345 - 75x50#1,55 conectadas pela aba maior, com uma linha de parafusos



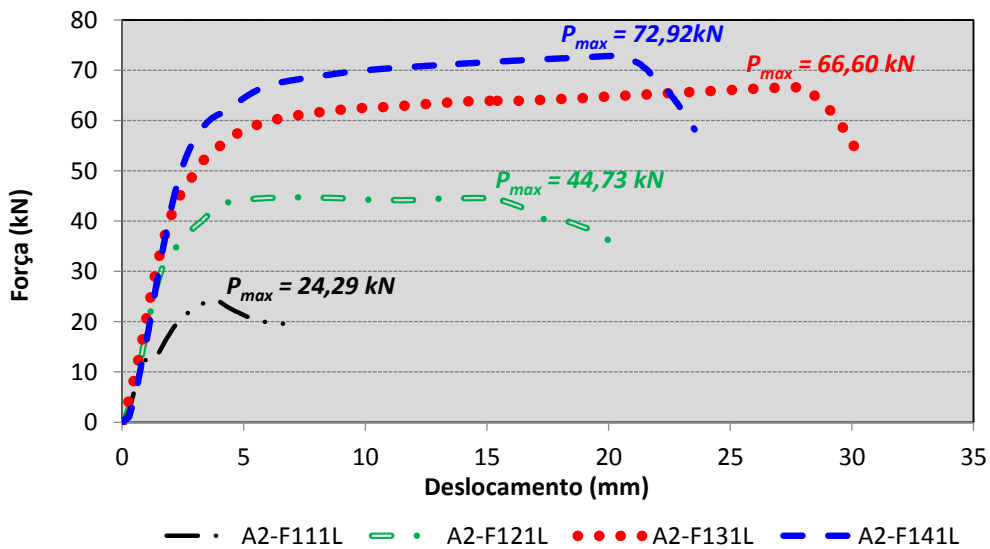
Cantoneiras ZAR 345 - 50x100#1,55 conectadas pela aba menor, com uma linha de parafusos



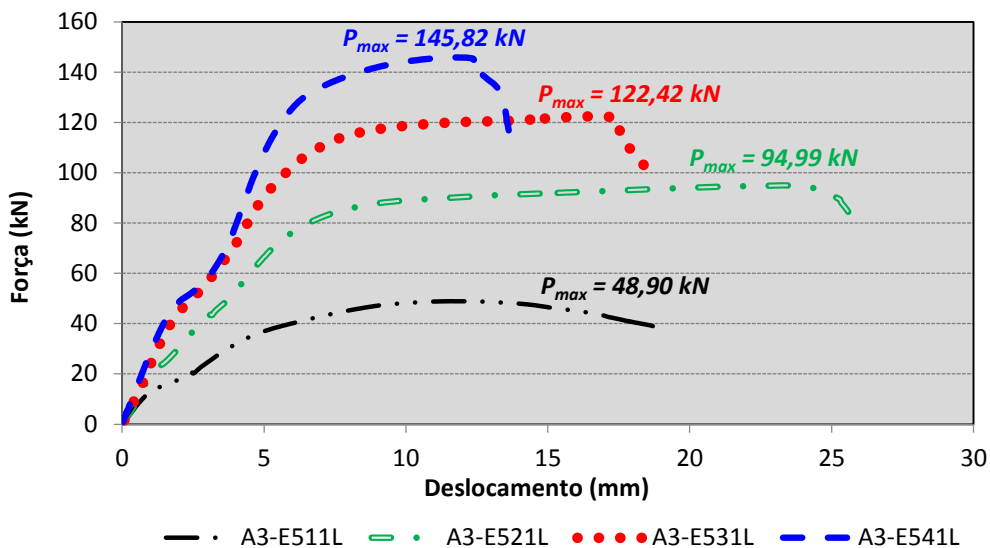
Cantoneiras ZAR 345 - 100x50#1,55 conectadas pela aba maior, com uma linha de parafusos



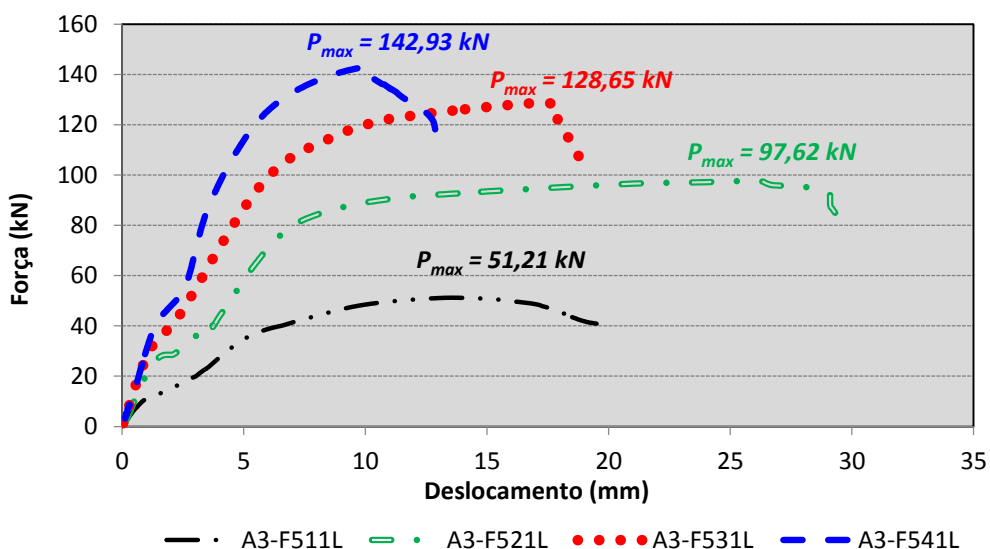
Cantoneiras ZAR 345 - 75x100#1,55 conectadas pela aba menor, com uma linha de parafusos



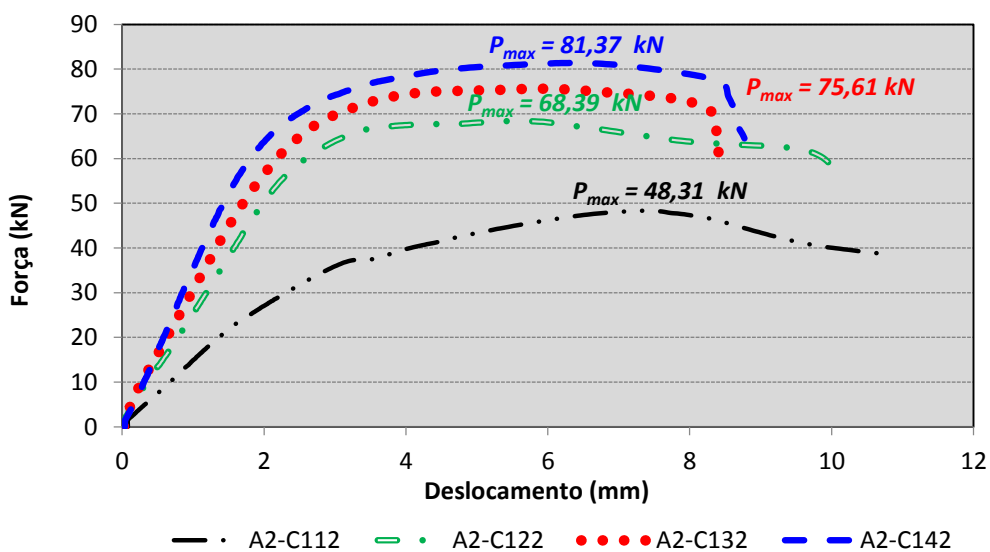
Cantoneiras ZAR 345 - 100x75#1,55 conectadas pela aba maior, com uma linha de parafusos



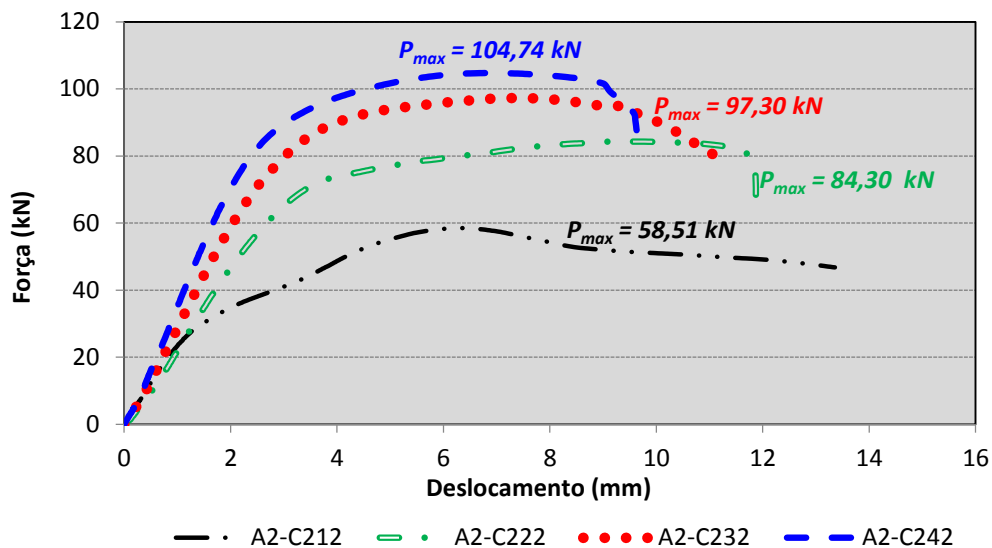
Cantoneiras ZAR 400 - 100x50#2,30 conectadas pela aba maior, com uma linha de parafusos



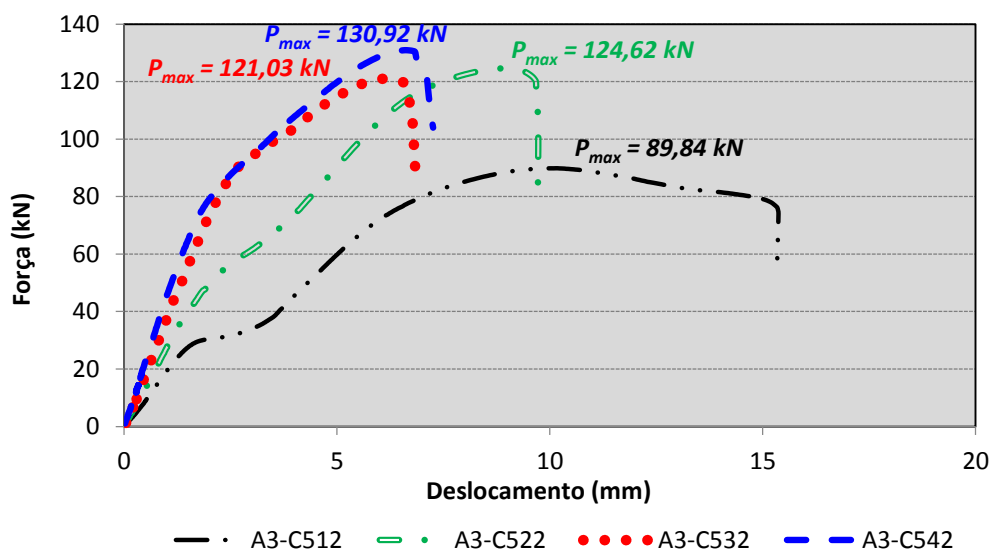
Cantoneiras ZAR 400 - 100x75#2,30 conectadas pela aba maior, com uma linha de parafusos



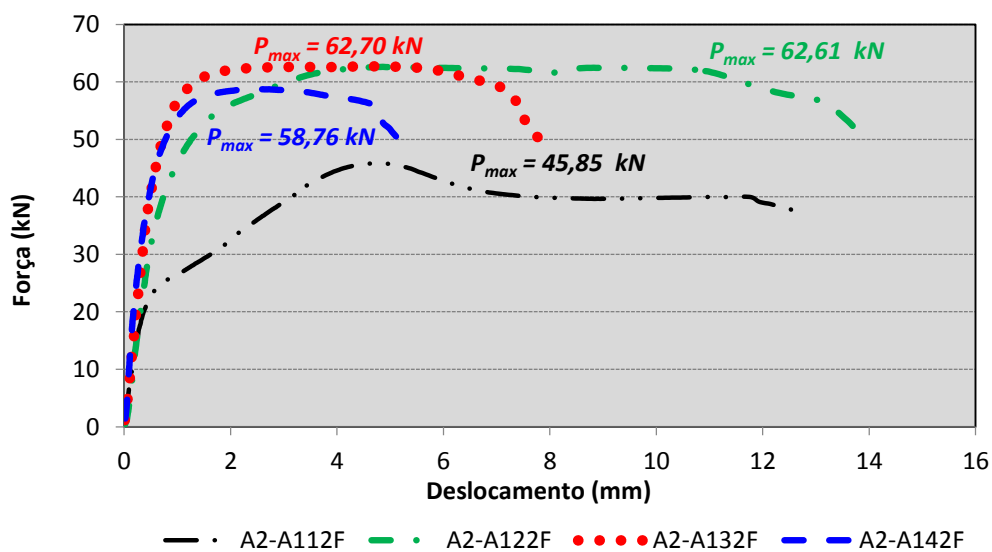
Cantoneiras ZAR 345 - 100x100#1,55 conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos



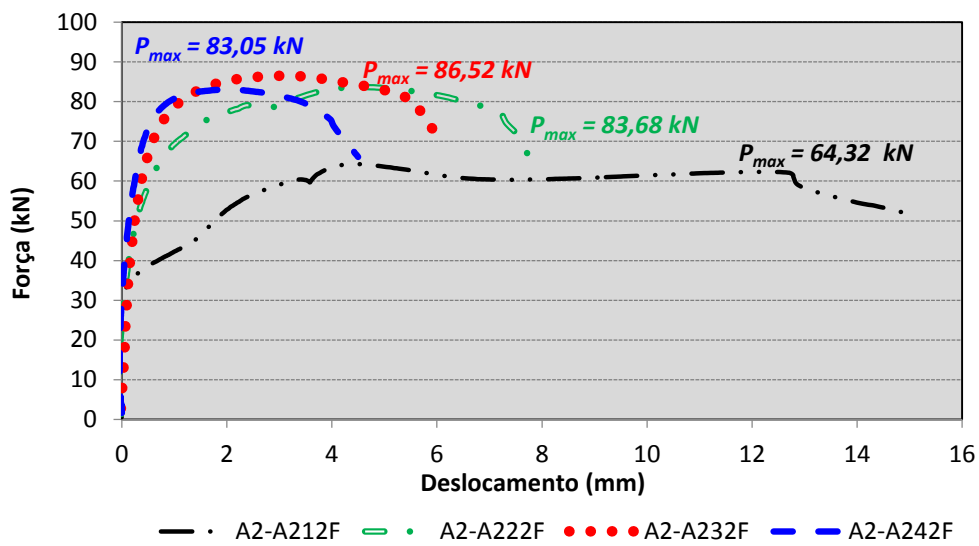
Cantoneiras ZAR 345 - 100x100#1,95 conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos



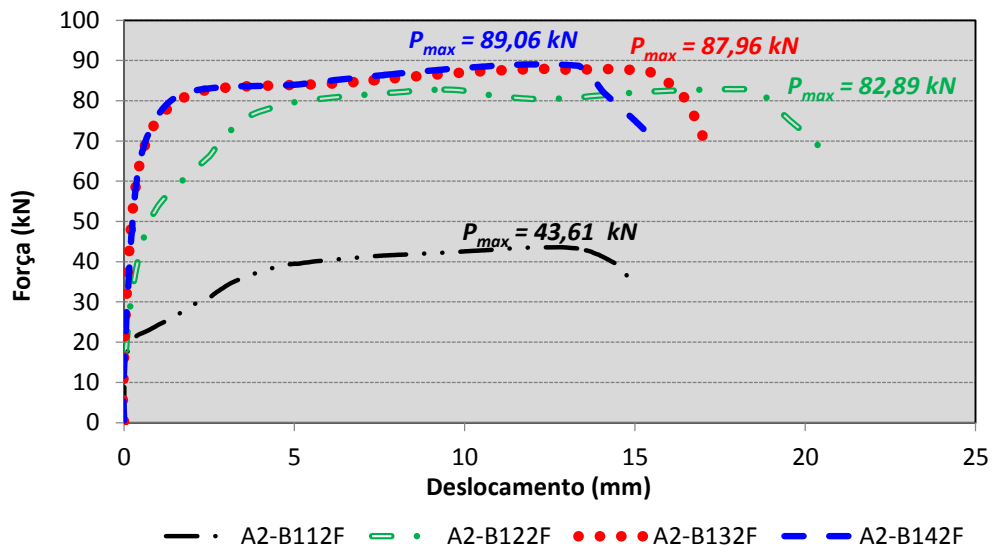
Cantoneiras ZAR 400 - 100x100#2,30 conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos



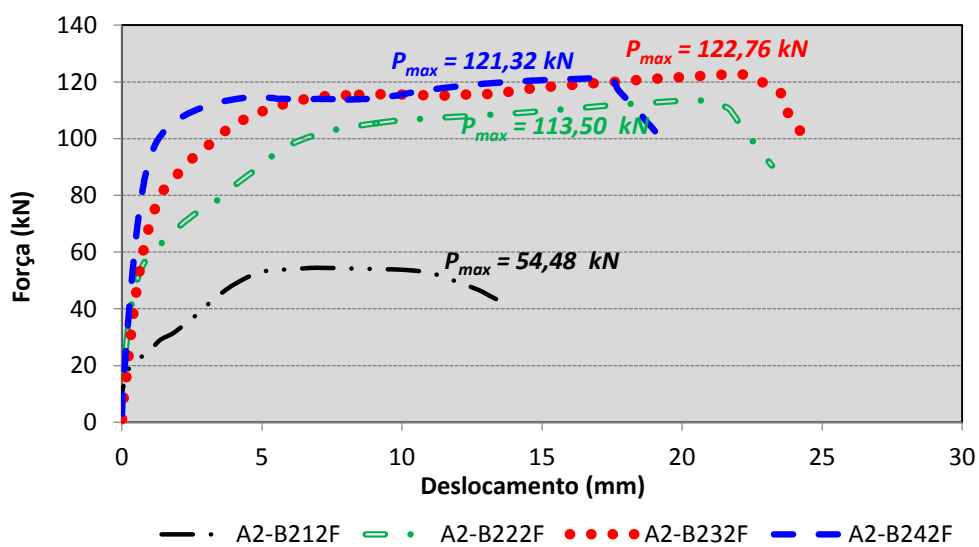
Cantoneiras ZAR 345 - 50x50#1,55 conectadas por todas abas, com um linhas de parafusos



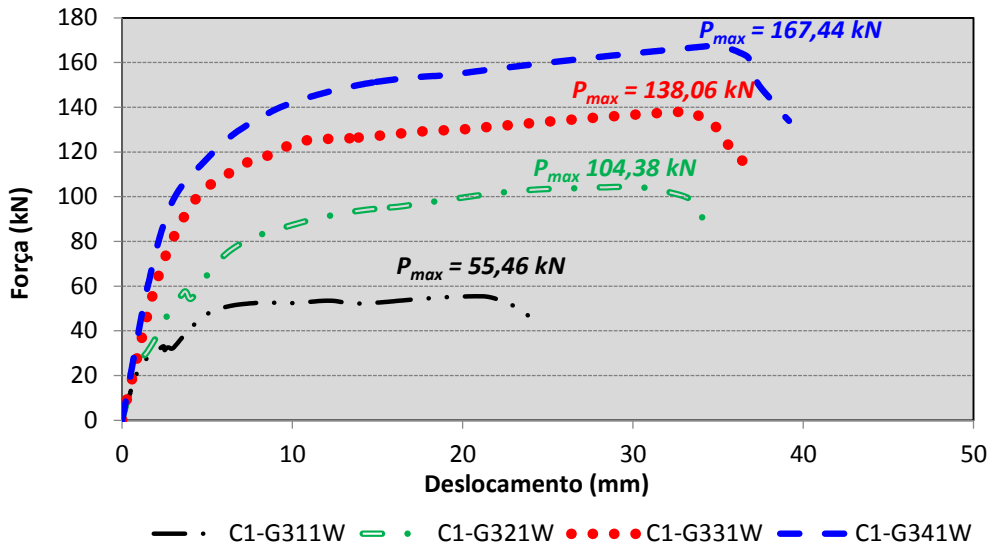
Cantoneiras ZAR 345 - 50x50#1,95 conectadas por todas abas, com um linhas de parafusos



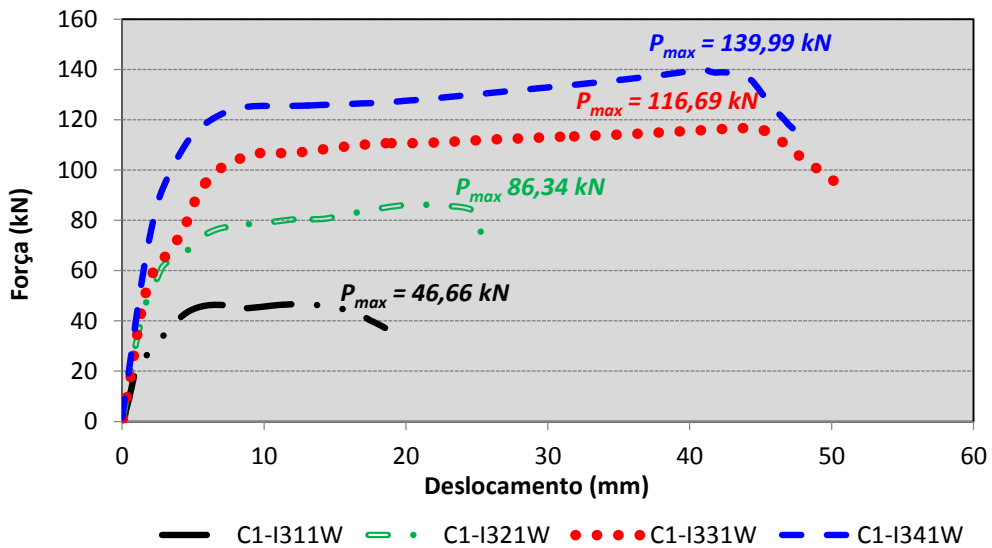
Cantoneiras ZAR 345 - 75x75#1,55 conectadas por todas abas, com um linhas de parafusos



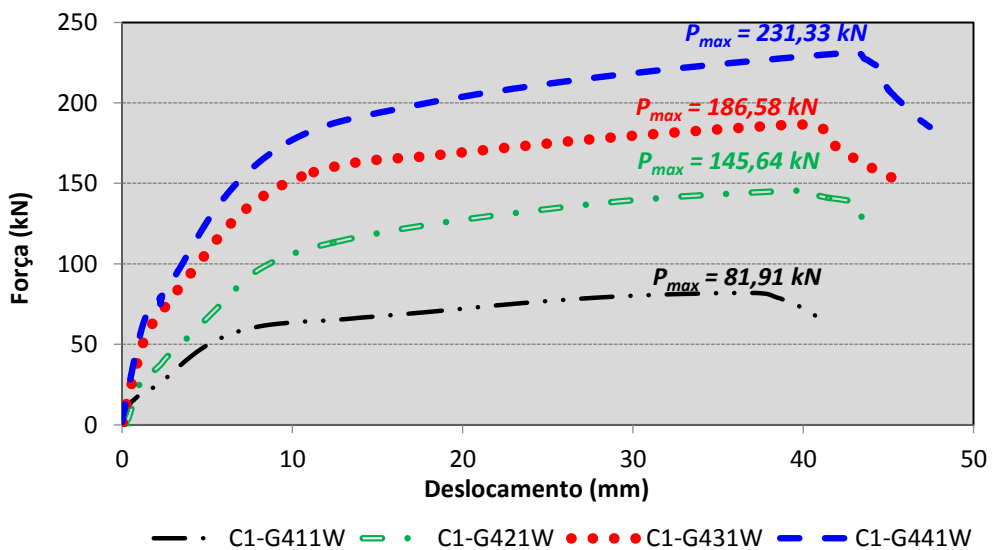
Cantoneiras ZAR 345 - 75x75#1,95 conectadas por todas abas, com um linhas de parafusos



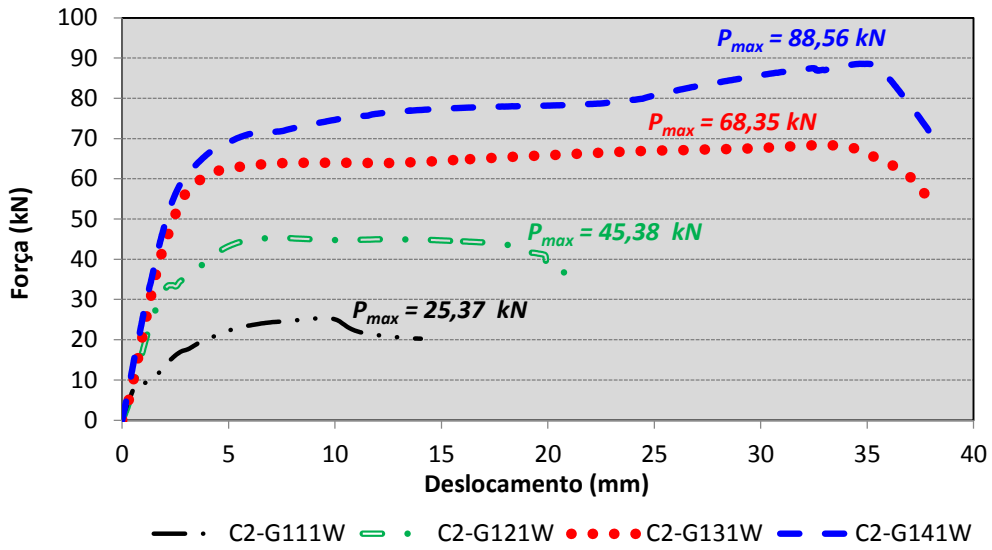
Perfis U COR 420 - 100x40#2,65 conectados na alma, com uma linha de parafusos



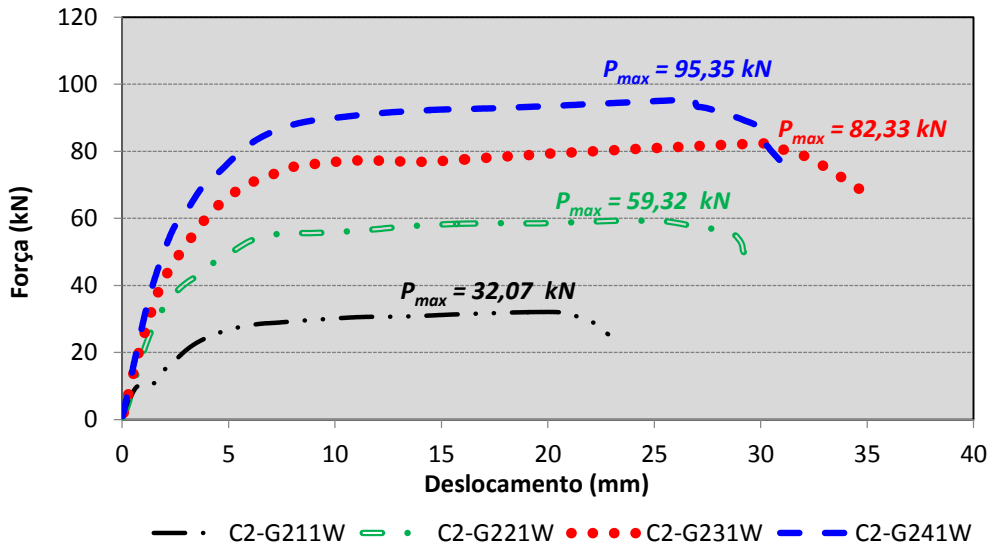
Perfis U COR 420 - 120x45#2,65 conectados na alma, com uma linha de parafusos



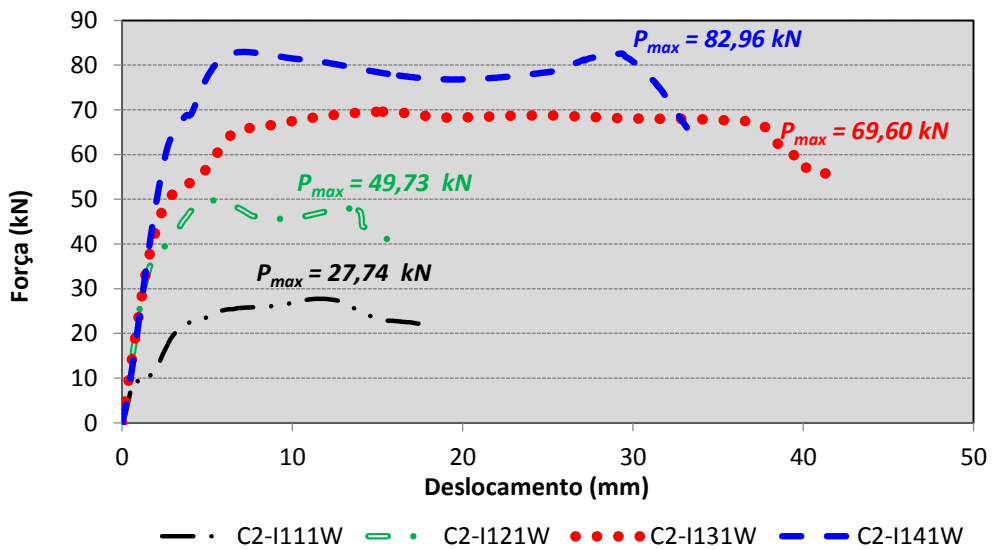
Perfis U COR 420 - 100x40#3,70 conectados na alma, com uma linha de parafusos



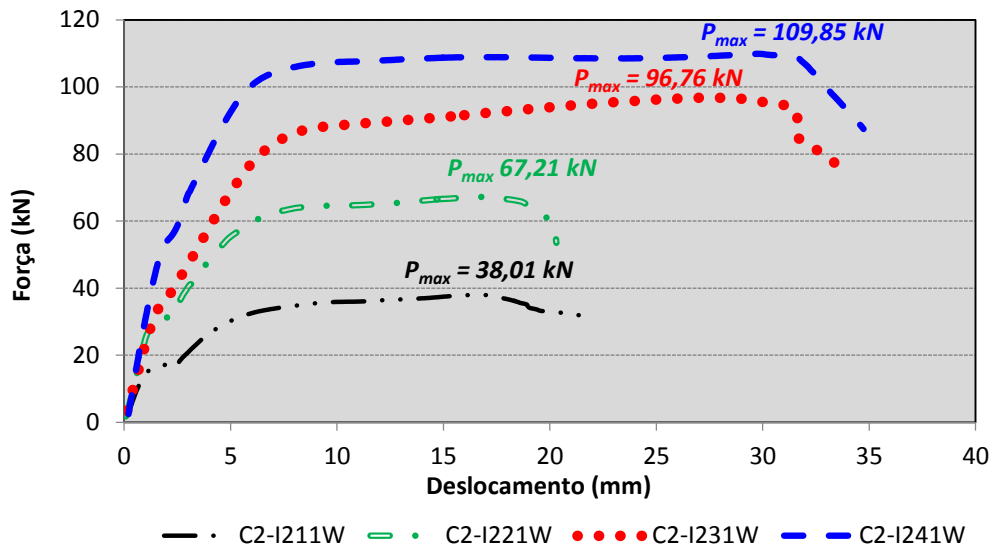
Perfis U ZAR 345 - 100x40#1,55 conectados na alma, com uma linha de parafusos



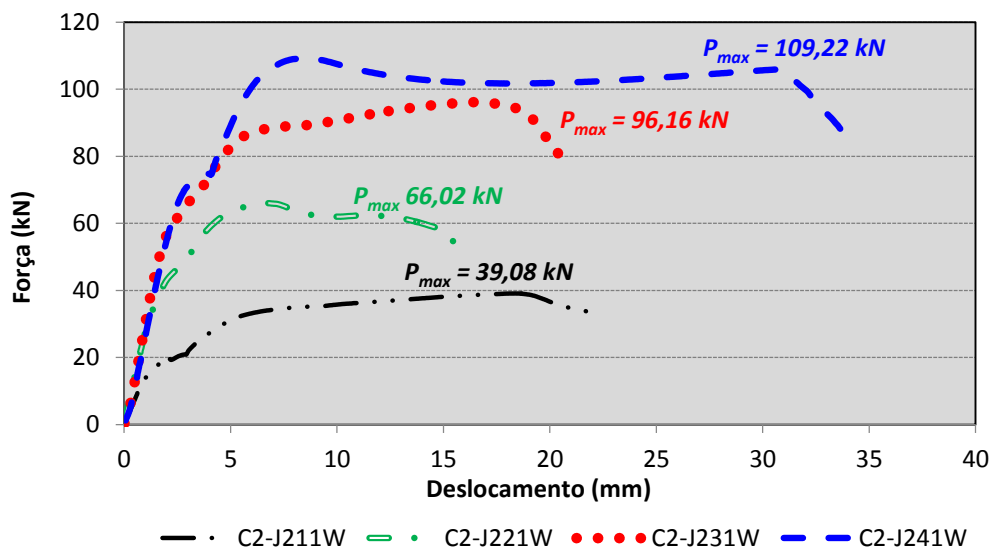
Perfis U ZAR 345 - 100x40#1,95 conectados na alma, com uma linha de parafusos



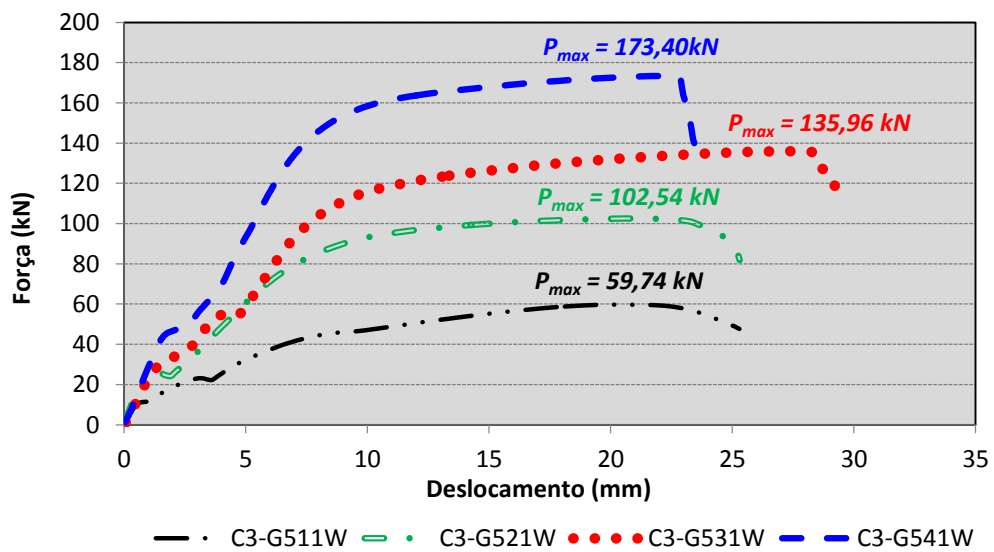
Perfis U ZAR 345 - 120x45#1,55 conectados na alma, com uma linha de parafusos



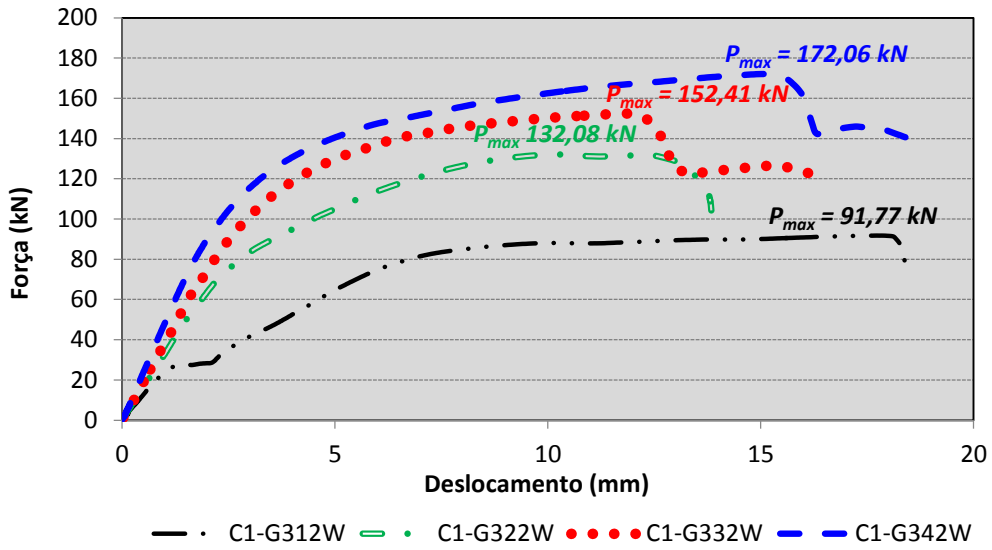
Perfis U ZAR 345 - 120x45#1,95 conectados na alma, com uma linha de parafusos



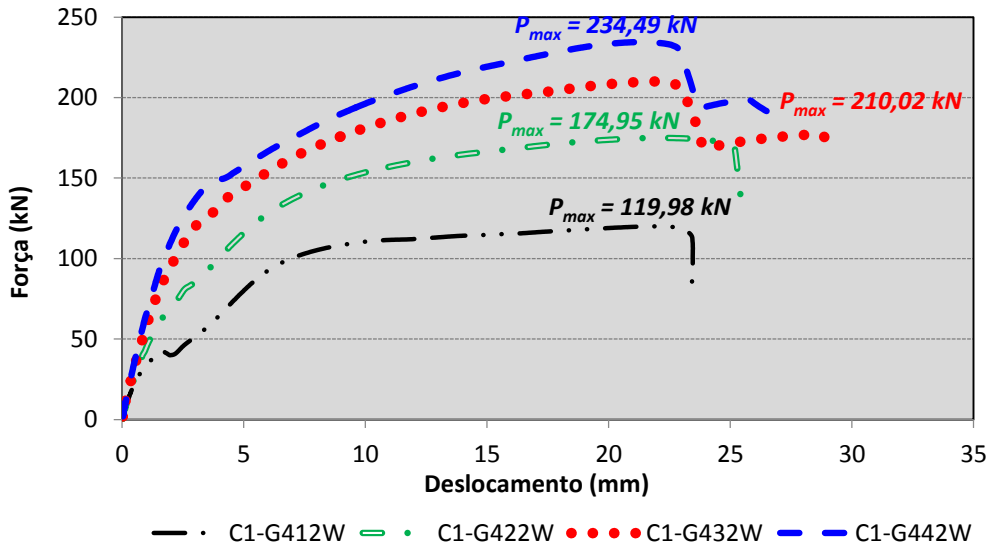
Perfis U ZAR 345 - 150x50#1,95 conectados na alma, com uma linha de parafusos



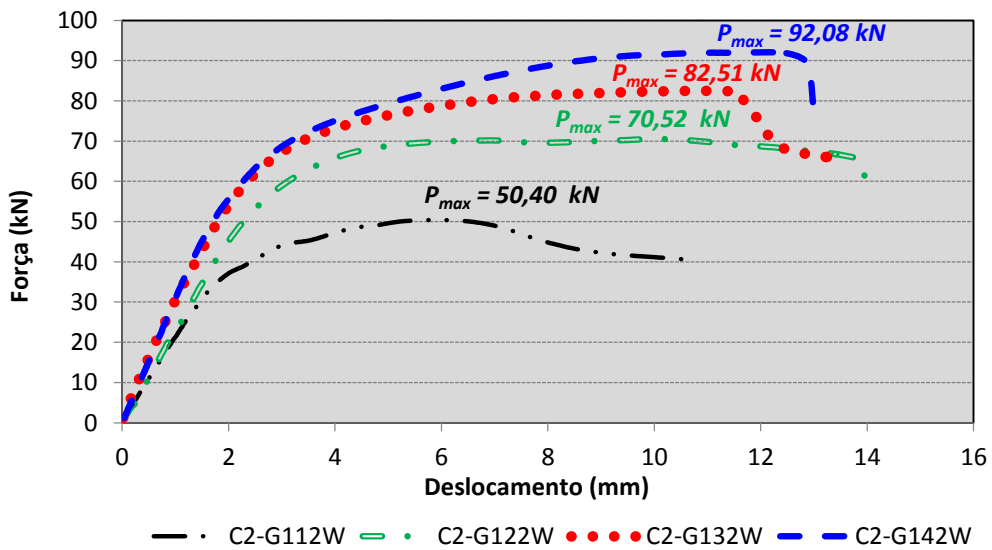
Perfis U ZAR 400 - 100x40#2,30 conectados na alma, com uma linha de parafusos



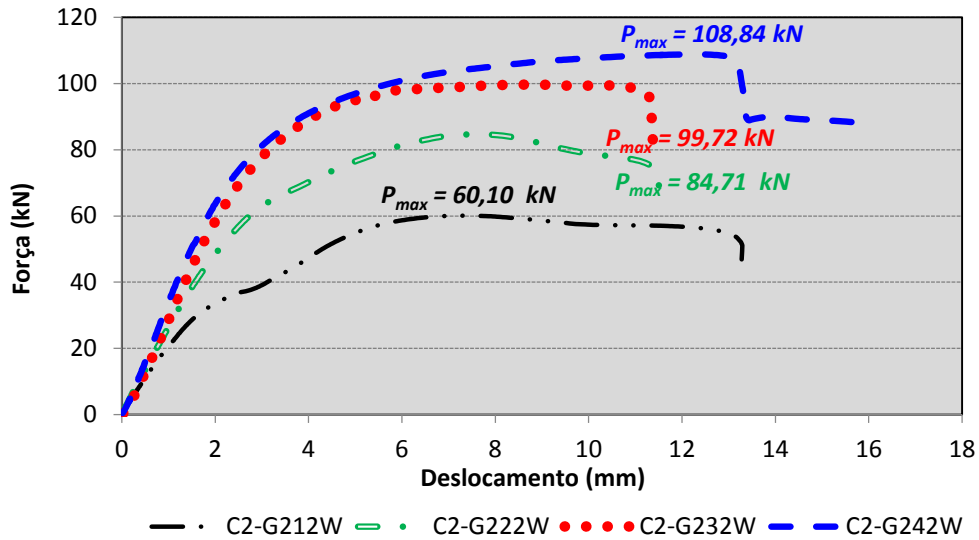
Perfis U COR 420 - 100x40#2,65 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



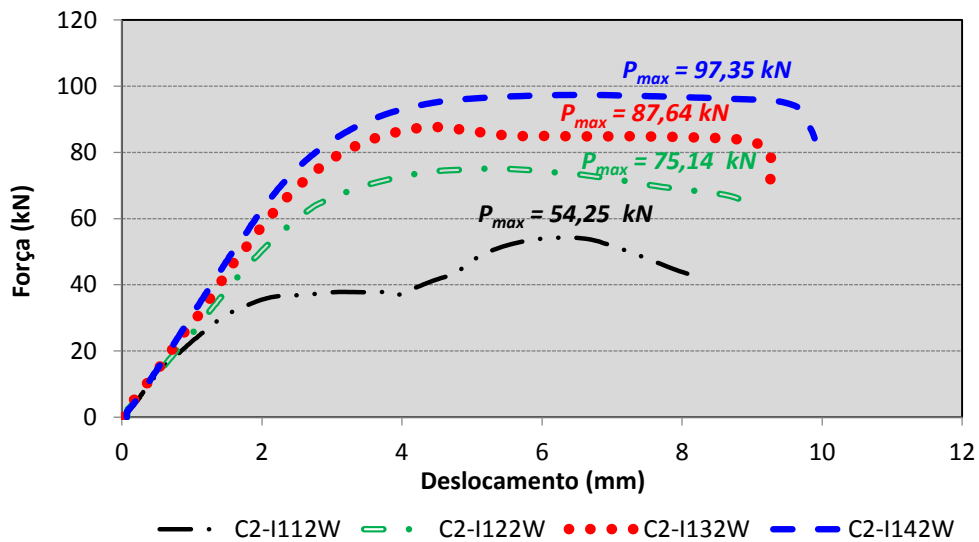
Perfis U COR 420 - 100x40#2,65 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



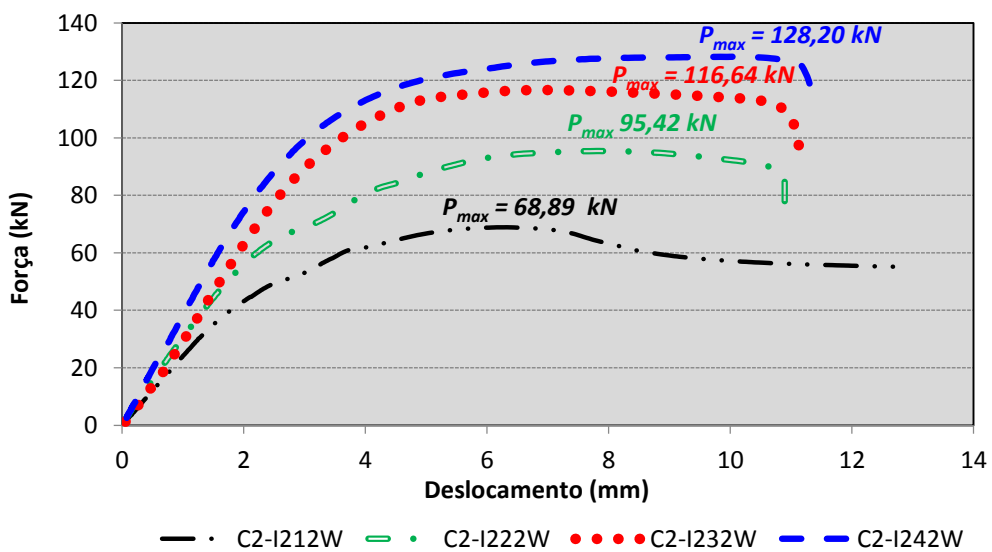
Perfis U ZAR 345 - 100x40#1,55 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



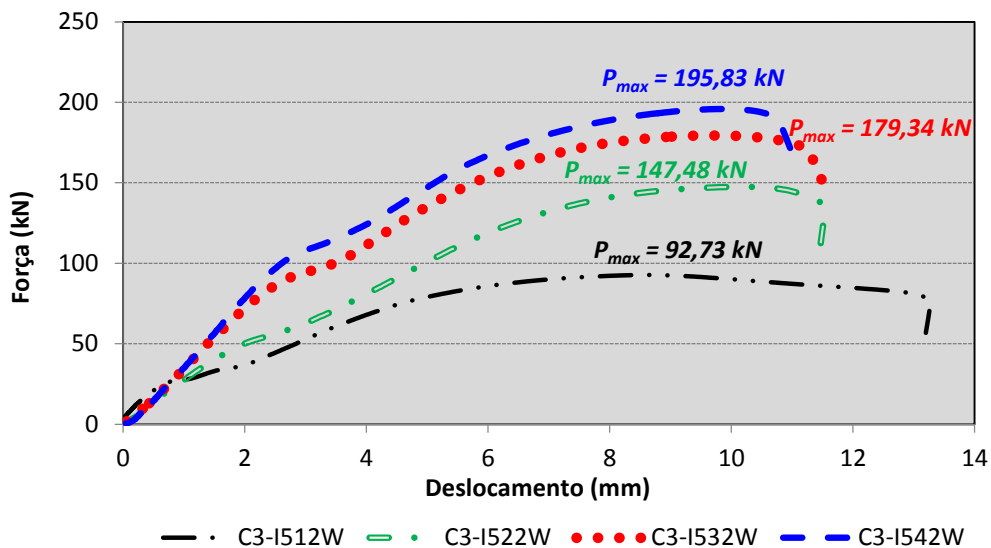
Perfis U ZAR 345 - 100x40#1,95 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



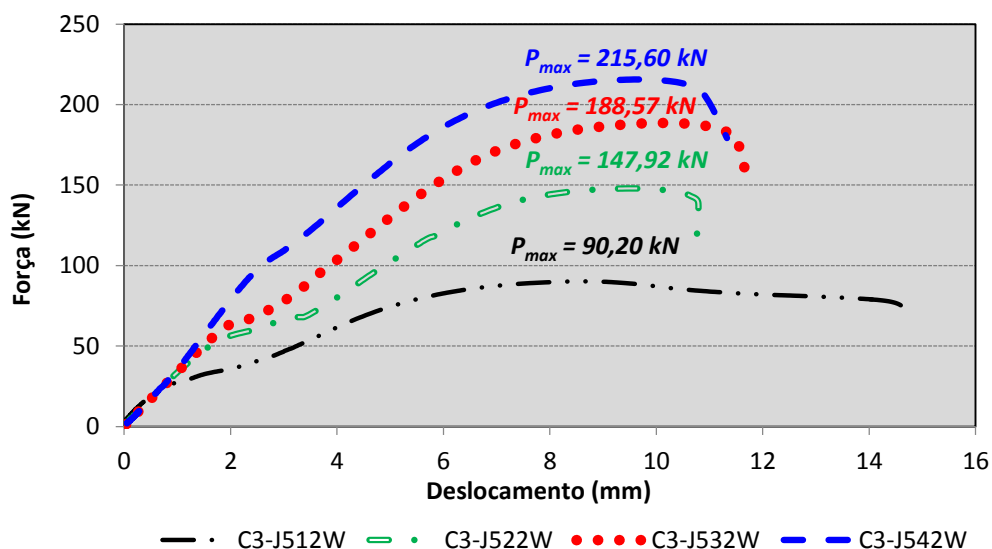
Perfis U ZAR 345 - 120x45#1,55 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



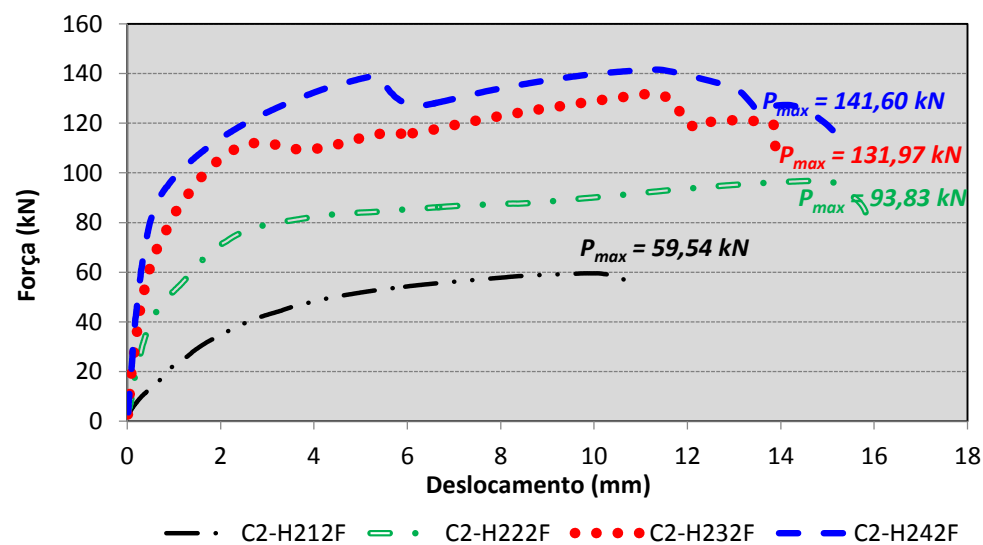
Perfis U ZAR 345 - 120x45#1,95 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



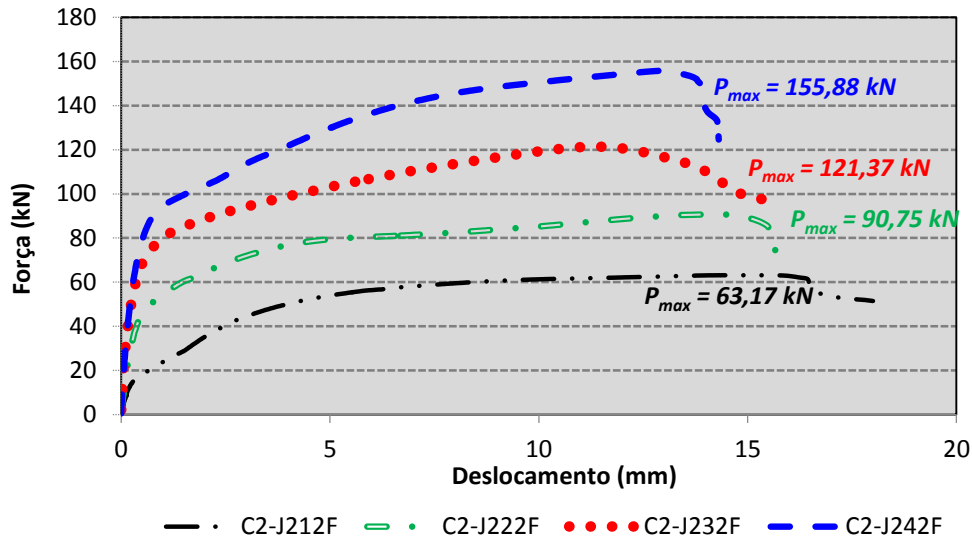
Perfis U ZAR 400 - 120x45#2,30 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



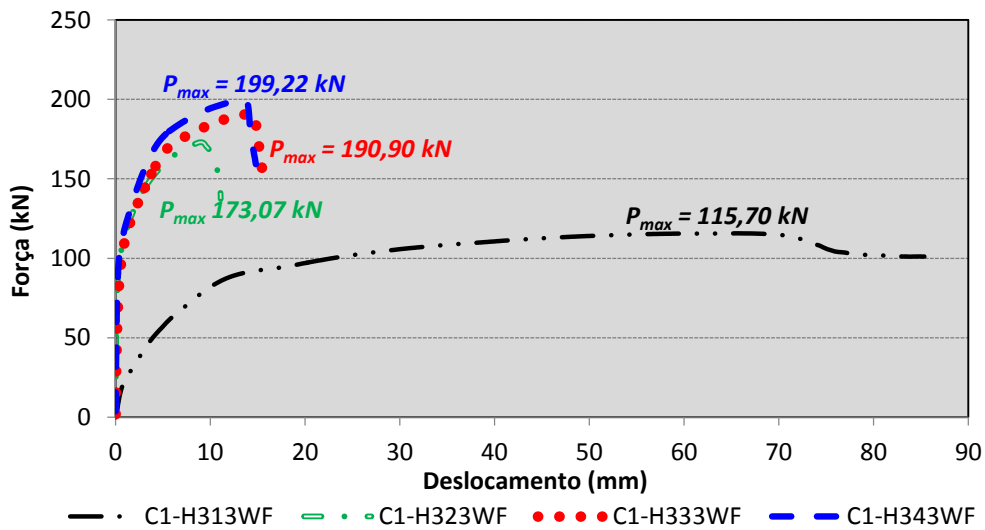
Perfis U ZAR 400 - 150x50#2,30 conectados na alma, com duas linhas de parafusos



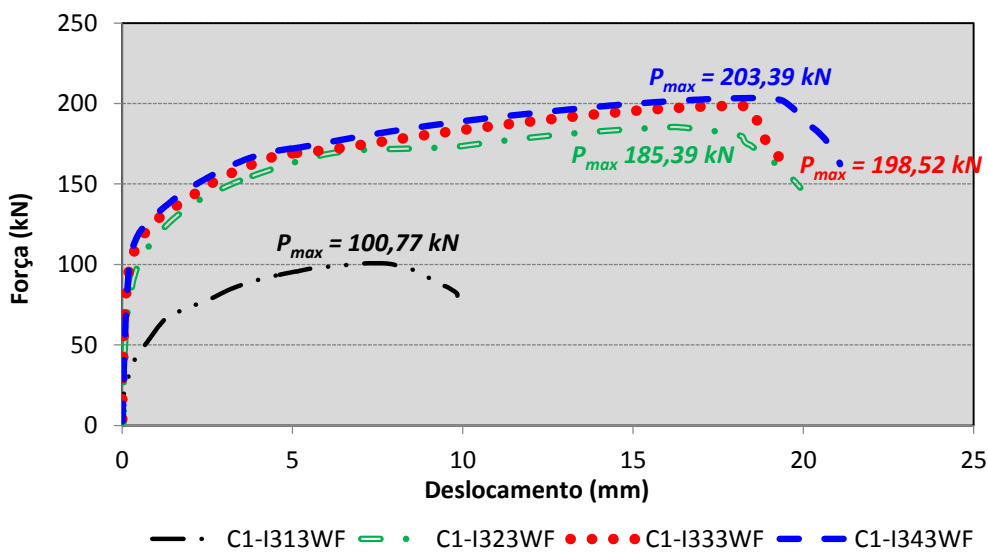
Perfis U ZAR 345 - 100x50#1,95 conectados nos flanges com uma linha de parafusos



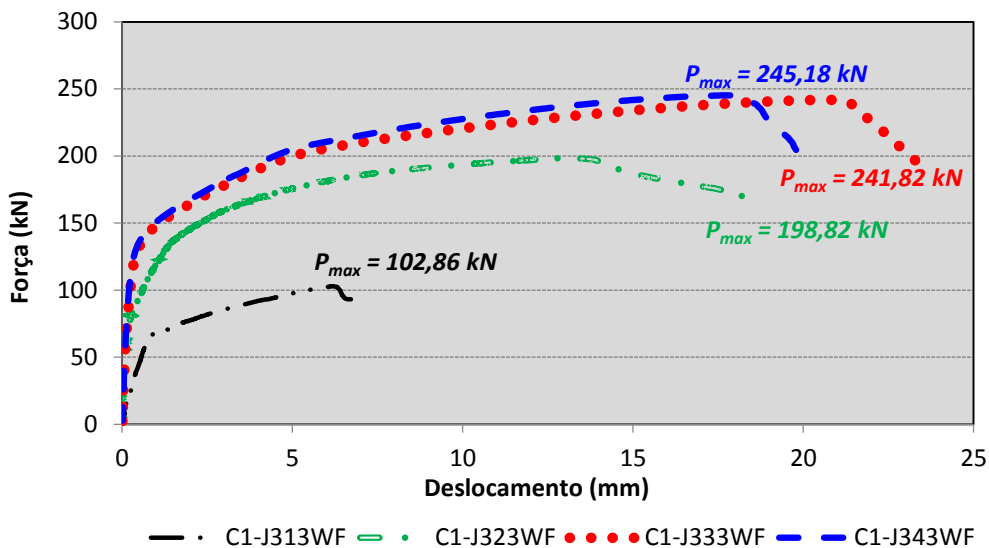
Perfis U ZAR 345 - 150x50#1,95 conectados nos flanges com uma linha de parafusos



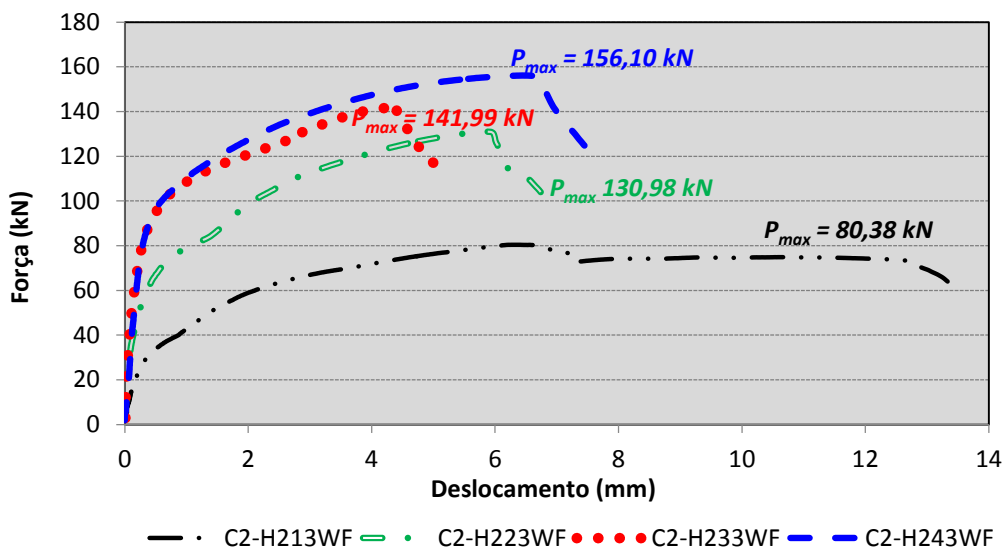
Perfis U COR 420 - 100x50#2,65 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos



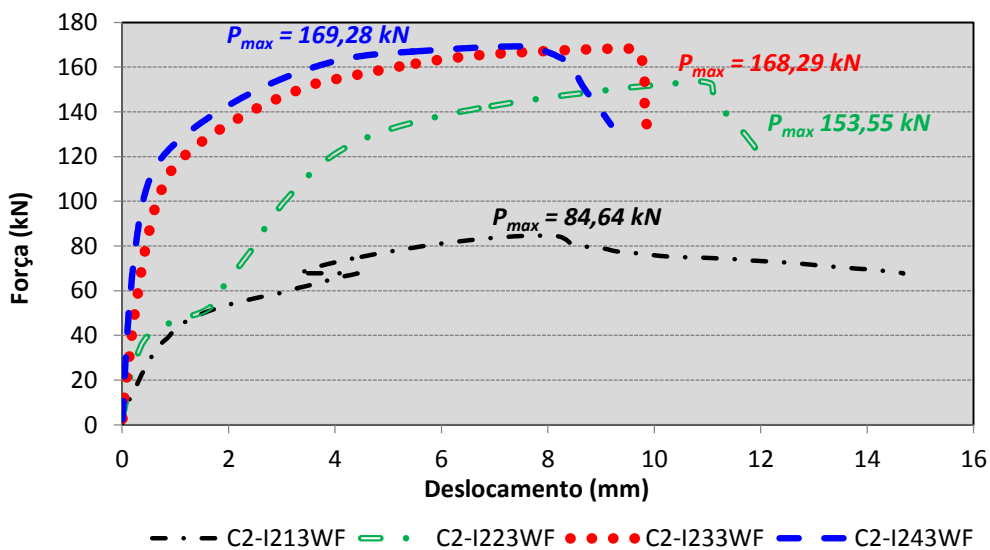
Perfis U COR 420 - 120x45#2,65 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos



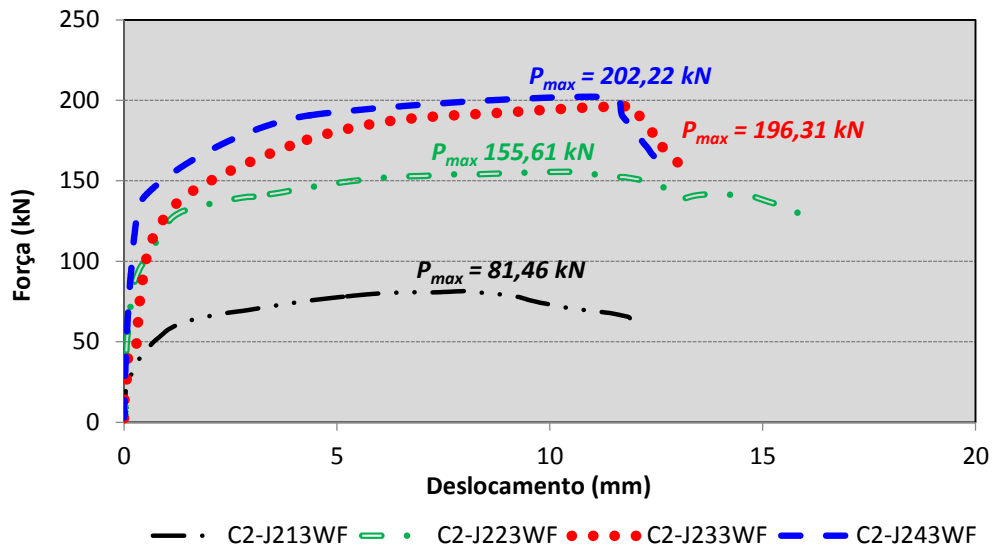
Perfis U COR 420 - 150x50#2,65 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos



Perfis U ZAR 345 - 100x50#1,95 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos



Perfis U ZAR 345 - 120x45#1,95 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos



Perfis U ZAR 345 - 150x50#1,95 conectados na alma e nos flanges com uma linha de parafusos

**APÊNDICE B - DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA DOS PERFIS ENSAIADOS
COM CHAPAS DE FIXAÇÃO COMPOSTAS DE DIFERENTES ESPESSURAS**



Cantoneiras 75x75#1,55 mm, (A2-B131) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm



Cantoneiras 75x75#1,55 mm, (A2-B231) conectadas por uma aba, com uma linha de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm



Cantoneiras 100x100#1,55 mm, (A2-C132) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm



Cantoneiras 100x100#1,95 mm, (A2-C232) conectadas por uma aba, com duas linhas de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm



Perfil U COR 420 #2,65 mm (C1-I331W) conectados na alma, com uma linha de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm



Perfil U ZAR 345 #1,95 mm, C2-I231W conectadas pela alma, com uma linha de parafusos nas chapas de fixação com espessuras de 6,35 mm, 10,0 mm e 12,7 mm