

Pedro Gonçalves de Rezende

***ANÁLISE DA RESPOSTA NUMÉRICA DE LIGAÇÕES  
PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS E PERFIS  
FORMADOS A FRIO***

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

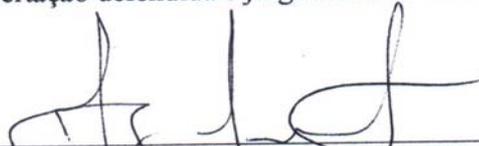
São Carlos  
2005



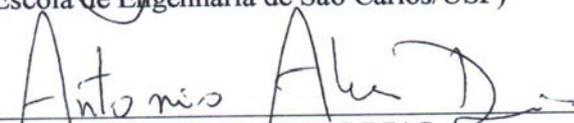
**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **PEDRO GONÇALVES DE REZENDE**

Dissertação defendida e julgada em 23-09-2005 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JORGE MUNAIAR NETO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

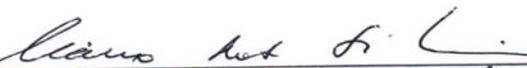
Aprovado

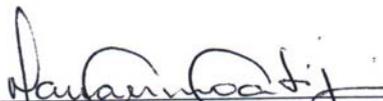
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **ANTONIO ALVES DIAS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Livre-Docente **LEANDRO PALERMO JUNIOR**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **MARCIO ROBERTO SILVA CORRÊA**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil (Engenharia de Estruturas)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação



*À memória de meu pai, João Gonçalves  
de Rezende e à minha mãe, Maria  
Aparecida de Rezende.*



## AGRADECIMENTOS

---

Ao professor Jorge Munaiar Neto pela orientação e pelo apoio dispensado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao *CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* pelo apoio concedido ao desenvolvimento da pesquisa em questão.

Ao Prof. Carlos Henrique Maiola, pelas fotos e por todo o material disponibilizado que foi utilizado neste trabalho

Aos colegas Cilmar, Yuri e Luciana pela colaboração no entendimento do programa ANSYS.

A todos os demais colegas e amigos do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário

Aos demais professores e funcionários da pós-graduação, pela contribuição direta ou indireta na elaboração desta pesquisa.

À minha família, em especial, pelo apoio direto e indireto na realização deste trabalho.

Finalmente, a Deus, por tudo que me tem proporcionado.



## RESUMO

---

REZENDE, P.G (2005) *Análise da resposta numérica de ligações parafusadas em chapas finas e perfis formados a frio*. São Carlos, 2005 xxxp. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A utilização de perfis formados a frio na construção metálica no Brasil vem crescendo de forma significativa. Dentro deste mesmo contexto, atenções especiais estão sendo direcionadas às ligações utilizadas neste tipo de perfil, pelo fato de as chapas que as constituem resultarem cada vez mais esbeltas em função da significativa redução na sua espessura (elevada relação largura/espessura). Por esta razão, as ligações em perfis formados a frio têm sido estudadas por pesquisadores, tanto no contexto mundial como no Brasil. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo realizar estudos relacionados às ligações parafusadas em perfis formados a frio, com vistas a avaliar a resistência e o comportamento destas ligações por meio de modelagem numérica, simulando o comportamento estrutural com a utilização do código de cálculo ANSYS v.6.0, elaborado com base nos Métodos dos Elementos Finitos (MEF). No sentido de avaliar a eficiência e a confiabilidade dos modelos elaborados, os resultados numéricos obtidos foram comparados com resultados experimentais obtidos em ensaios, bem como, comparados com resultados numéricos obtidos utilizando-se outros padrões de modelagem.

Palavras-chaves: perfis de aço formados a frio, ligações parafusadas, análise numérica



## ABSTRACT

---

REZENDE, P.G (2005) *Analyzes of the numerical answer of the bolted connections of cold-formed steel members*. São Carlos, 2005 xxxp. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The use of cold-formed steel members in the steel building in Brazil comes growing of significant form. Inside of the same context, special attentions are being directed to the connections used in the cold-formed steel members, or the fact of the sheets used to this kind of steel members result each time more thin. For this reason the connections in cold-formed steel members have been studied for researchers, as much in the worldwide context as in Brazil. The objective of this work is studies the bolted connections in cold-formed steel member to evaluate the resistance and the behavior of these connections by means of numerical modeling, simulating the structural behavior with the use of the code of calculation ANSYS v.6.0, elaborated based on Finite Element Methods. With the objective to evaluate the efficiency and the trustworthiness of the elaborated model, the numerical results where compare with experimental results gotten in assays, as well as, compared with numerical results gotten using other standards of modeling.

**Keywords:** cold-formed steel members, bolted connections, numerical analysis



## LISTA DE FIGURAS

---

<b>FIGURA 2.1</b>	Máquinas utilizadas para a obtenção dos perfis formados a frio (a) Prensa dobradeira. (b) Calandra (c) Perfiladeira.....	28
<b>FIGURA 2.2</b>	Seções transversais mais comuns dos perfis formados a frio.....	29
<b>FIGURA 2.3</b>	Perfis do tipo Z encaixados para armazenamento e transporte (a) Vista frontal (b) Vista em perspectiva.....	30
<b>FIGURA 2.4</b>	Alguns tipos de ligações (a) Ligação rígida (b) Ligação flexível.....	35
<b>FIGURA 2.5</b>	Modos de falha m ligações parafusadas em chapas finas.....	37
<b>FIGURA 2.6</b>	Ligações parafusadas: dimensões: “e” e “g”.....	38
<b>FIGURA 2.7</b>	Efeito da relação d/g na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, com arruelas e solicitadas a cisalhamento simples.....	40
<b>FIGURA 2.8</b>	Efeito da relação d/g na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, sem arruelas e solicitadas a cisalhamento simples.....	41
<b>FIGURA 2.9</b>	Dimensões de interesse para ligações parafusadas em chapas.....	45
<b>FIGURA 2.10</b>	Ilustração esquemática da ocorrência de concentração de tensões em cantoneiras ligadas por uma aba.....	47
<b>FIGURA 2.11</b>	Determinação de X e L para ligações parafusadas.....	48
<b>FIGURA 2.12</b>	Perfis tratados como chapas equivalentes.....	51
<b>FIGURA 3.1</b>	Elemento finito denominado SOLID 45.....	56
<b>FIGURA 3.2</b>	Elemento finito denominado SOLID 185.....	57
<b>FIGURA 3.3</b>	Elemento finito denominado SOLID 95.....	57
<b>FIGURA 3.4</b>	Elemento finito de contato denominado TARGET 170.....	58
<b>FIGURA 3.5</b>	Elemento finito de contato denominado CONTACT 174.....	58

<b>FIGURA 3.6</b>	Ligação parafusada em Chapa fina com três seções de parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio.....	60
<b>FIGURA 3.7</b>	Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.....	61
<b>FIGURA 3.8</b>	Ligação parafusada em Chapa fina com duas seções de parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio (c) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental	62
<b>FIGURA 3.9</b>	Ligação parafusada em Chapa fina com uma seção de parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm. (b) Ruptura da ligação no ensaio (c) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental	63
<b>FIGURA 3.10</b>	Ligação parafusada em perfil cantoneira com três parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio (c) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental	64
<b>FIGURA 3.11</b>	Ligação parafusada em perfil cantoneira com dois parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio.....	65
<b>FIGURA 3.12</b>	Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.....	66
<b>FIGURA 3.13</b>	Ligação parafusada em perfil cantoneira com um parafuso (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio (c) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental	67
<b>FIGURA 3.14</b>	Ligação parafusada em perfil U com quatro parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada, unidade mm (b) Ruptura da ligação no ensaio (c) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental	68
<b>FIGURA 3.15</b>	Ligação parafusada em perfil U com três parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada (b) Ruptura da ligação no ensaio.....	69
<b>FIGURA 3.16</b>	Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.....	70
<b>FIGURA 3.17</b>	Ligação parafusada em perfil U com dois parafusos (a) Esquema da chapa ensaiada (b) Ruptura da ligação no ensaio.....	71
<b>FIGURA 3.18</b>	Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.....	71
<b>FIGURA 3.19</b>	Ligação parafusada em chapa fina com um parafuso (a) Esquema da chapa ensaiada (b) Diagrama força x Deslocamento obtido no modelo experimental	72
<b>FIGURA 3.20</b>	Discretização dos parafusos e porcas em elementos finitos.....	74
<b>FIGURA 3.21</b>	Discretização das chapas dos modelos numéricos denominados C2C1 e C2C3, em elementos finitos.....	75
<b>FIGURA 3.22</b>	Discretização dos modelos numéricos denominados LI1C1 e LI1C3, em elementos finitos.....	76

<b>FIGURA 3.23</b>	Discretização dos modelos numéricos denominados U1D1 e U1D3, em elementos finitos.....	77
<b>FIGURA 3.24</b>	Discretização dos modelos numéricos denominados C2bA1 e C2bA3, em elementos finitos.....	77
<b>FIGURA 3.25</b>	Discretização dos elementos de contato utilizados nos modelos numéricos denominados C2C1 e C2C3.....	78
<b>FIGURA 3.26</b>	Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em chapa C2C1, C2C3, C2B1, C2B3, C2A1, C2A2 e C2A3.....	80
<b>FIGURA 3.27</b>	Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em cantoneira LI1A1, LI1A3, LI1B1, LI1B3, LI1C1 e LI1C3.....	81
<b>FIGURA 3.28</b>	Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em chapa C2C1, C2C3, C2B1, C2B3, C2A1, C2A2 e C2A3.....	82
<b>FIGURA 3.29</b>	Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos C2bA1 e C2bA3.....	83
<b>FIGURA 3.30</b>	Representação gráfica do diagrama Tensão x Deformação adotado...	84
<b>FIGURA 4.1</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em chapa fina com três seções de parafusos.....	88
<b>FIGURA 4.2</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2C1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	90
<b>FIGURA 4.3</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2C3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	90
<b>FIGURA 4.4</b>	Detalhes da ruptura da ligação para os modelos C2C1 e C2C3.....	90
<b>FIGURA 4.5</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em chapa fina com duas seções de parafusos.....	91
<b>FIGURA 4.6</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2B1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	92
<b>FIGURA 4.7</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2B3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	92
<b>FIGURA 4.8</b>	Detalhes da ligação após a ocorrência da ruptura para os modelos C2B1 e C2B3.....	93
<b>FIGURA 4.9</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em chapa fina com uma seção de parafusos.....	94
<b>FIGURA 4.10</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2A1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	95
<b>FIGURA 4.11</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2A2. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	95
<b>FIGURA 4.12</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2A3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	96
<b>FIGURA 4.13</b>	Detalhes da ruptura da ligação para os modelos C2A1, C2A2 e C2A3.....	96

<b>FIGURA 4.14</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em chapa fina com um parafuso.....	97
<b>FIGURA 4.15</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2bA1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	99
<b>FIGURA 4.16</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo C2bA3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	99
<b>FIGURA 4.17</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil cantoneira com três parafusos.....	100
<b>FIGURA 4.18</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1C1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	101
<b>FIGURA 4.19</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1C3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	101
<b>FIGURA 4.20</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com três parafusos.....	102
<b>FIGURA 4.21</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil cantoneira com dois parafusos.....	103
<b>FIGURA 4.22</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1B1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	104
<b>FIGURA 4.23</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1B3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	104
<b>FIGURA 4.24</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com dois parafusos.....	105
<b>FIGURA 4.25</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil cantoneira com um parafuso.....	106
<b>FIGURA 4.26</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1A1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	107
<b>FIGURA 4.27</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo LI1A3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	107
<b>FIGURA 4.28</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com um parafuso.....	108
<b>FIGURA 4.29</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil U com quatro parafusos.....	109
<b>FIGURA 4.30</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1D1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	110
<b>FIGURA 4.31</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1D3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	110
<b>FIGURA 4.32</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com quatro parafusos.....	111
<b>FIGURA 4.33</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil U com três parafusos.....	112
<b>FIGURA 4.34</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1C1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	113

<b>FIGURA 4.35</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1C1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	113
<b>FIGURA 4.36</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com três parafusos.....	114
<b>FIGURA 4.37</b>	Diagrama Força x Deslocamentos para a ligação parafusada em perfil U com dois parafusos.....	115
<b>FIGURA 4.38</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1B1. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	116
<b>FIGURA 4.39</b>	Curvas de isotensões (equivalentes de Mises), para o modelo U1B3. Unidades: $\text{kN/cm}^2$ .....	116
<b>FIGURA 4.40</b>	Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com dois parafusos.....	117



## SUMÁRIO

---

<b>RESUMO</b> .....		<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b> .....		<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....		<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....		<b>23</b>
1.1 <i>INTRODUÇÃO AO TRABALHO</i> .....		23
1.2 <i>OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO</i> .....		24
1.2.1 <i>OBJETIVOS DO TRABALHO</i> .....		24
1.2.2 <i>DESCRIÇÃO DO TRABALHO</i> .....		24
1.3 <i>JUSTIFICATIVA</i> .....		25
1.4 <i>APRESENTAÇÃO DO TRABALHO</i> .....		26
<b>2 LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS E EM PERFIS FORMADOS A FRIO</b> .....		<b>27</b>
2.1 <i>PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO - Aspectos gerais</i> .....		27
2.1.1 <i>BREVE HISTÓRICO NO CONTEXTO MUNDIAL</i> .....		31
2.1.2 <i>BREVE HISTÓRICO NO BRASIL</i> .....		32
2.2 <i>LIGAÇÕES PARAFUSADAS (Alguns Aspectos de Interesse)</i> .....		34
2.3 <i>LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS</i> .....		37
2.3.1 <i>RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS</i> .....		39
.....2.3.1.1 <i>PRESCRIÇÕES SEGUNDO A NORMA DO AISI DE 1996</i> .....		42
.....2.3.1.2 <i>PRESCRIÇÕES SEGUNDO A NORMA DO AISI DE 2001</i> .....		43
.....2.3.1.3 <i>PRESCRIÇÕES SEGUNDO O EUROCODE 3 PARTE 1.3/96</i> .....		44
.....2.3.1.4 <i>PRESCRIÇÕES SEGUNDO A NBR 14762:2001</i> .....		45
2.4 <i>LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO</i> .....		46
.....2.4.1 <i>CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES</i> .....		46
.....2.4.2 <i>RESISTÊNCIA À RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA – AISI</i> .....		48
.....2.4.3 <i>RESISTÊNCIA À RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA–NBR 14762:2001</i> .....		50
<b>3 ASPECTOS DA MODELAGEM NUMÉRICA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS E PERFIS FORMADOS A FRIO..</b> .....		<b>53</b>
3.1 <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</i> .....		53
3.2 <i>ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS</i> .....		55
.....3.2.1 <i>ELEMENTO FINITO SOLID 45, SOLID 95 E SOLID 185</i> .....		56

.....3.2.2	<i>ELEMENTO FINITO DE CONTATO TARGET 170 E CONTACT 174.</i>	58
3.3	<i>PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A IDENTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....</i>	59
3.3.1	<i>IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....</i>	59
.....3.3.2	<i>CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....</i>	59
3.3.2.1	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA FINA COM TRÊS SEÇÕES DE PARAFUSOS.....</i>	60
3.3.2.2	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA FINA COM DUAS SEÇÕES DE PARAFUSOS.....</i>	61
3.3.2.3	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA FINA COM UMA SEÇÃO DE PARAFUSOS.....</i>	62
3.3.2.4	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL CANTONEIRA COM TRÊS PARAFUSOS.....</i>	64
3.3.2.5	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL CANTONEIRA COM DOIS PARAFUSOS.....</i>	65
3.3.2.6	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL CANTONEIRA COM UM PARAFUSO.....</i>	66
3.3.2.7	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL U COM QUATRO PARAFUSOS.....</i>	68
3.3.2.8	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL U COM TRÊS PARAFUSOS.....</i>	69
3.3.2.9	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL U COM DOIS PARAFUSOS.....</i>	70
3.3.2.10	<i>MODELOS NUMÉRICOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA COM UM PARAFUSO APRESENTADO EM CHUNG &amp; IP (2000).....</i>	72
.....3.3.3	<i>DEFINIÇÃO DAS MALHAS DISCRETIZADAS EM ELEMENTOS FINITOS PARA OS MODELOS NUMÉRICOS.....</i>	73
3.3.4	<i>CONDIÇÕES DE CONTORNO E DE CARREGAMENTOS.....</i>	79
.....3.3.4.1	<i>MODELOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA.....</i>	79
.....3.3.4.2	<i>MODELOS DE LIGAÇÃO EM PERFIL CANTONEIRA.....</i>	80
.....3.3.4.3	<i>MODELOS DE LIGAÇÃO PERFIL U.....</i>	82
.....3.3.4.4	<i>MODELOS DE LIGAÇÃO EM CHAPA CONSTRUÍDOS COM BASE EM DADOS APRESENTADOS EM CHUNG &amp; IP (200).....</i>	83
3.4	<i>RELAÇÃO CONSTITUTIVA ADOTADA PARA O AÇO.....</i>	84
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>87</b>
4.1	<i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</i>	87
4.2	<i>COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Chapas finas.....</i>	88
4.2.1	<i>LIGAÇÃO PARAFUSADA EM CHAPA FINA COM TRÊS SEÇÕES DE PARAFUSOS.....</i>	88
4.2.2	<i>LIGAÇÃO PARAFUSADA EM CHAPA FINA COM DUAS SEÇÕES DE PARAFUSOS.....</i>	91

4.2.3 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM CHAPA FINA COM UMA SEÇÃO DE PARAFUSOS.....	93
4.2.4 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM CHAPA FINA COM UM PARAFUSO-CHUNG & IP (2000).....	97
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Perfis cantoneiras.....	99
4.3.1 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL CANTONEIRA COM TRÊS PARAFUSOS.....	99
4.3.2 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL CANTONEIRA COM DOIS PARAFUSOS.....	102
4.3.3 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL CANTONEIRA COM UM PARAFUSO.....	105
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Perfis U.....	108
4.4.1 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL U COM QUATRO PARAFUSOS.....	108
4.4.2 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL U COM TRÊS PARAFUSOS.....	111
4.4.3 LIGAÇÃO PARAFUSADA EM PERFIL U COM DOIS PARAFUSOS.....	114
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	123
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO A RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DEVIDO AO RASGAMENTO OU ESMAGAMENTO DAS PAREDES DOS FUROS NAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS DE AÇO.....</b>	<b>129</b>



# INTRODUÇÃO

---

## *1.1 INTRODUÇÃO AO TRABALHO*

O estudo das ligações parafusadas em perfis formados a frio, tem sido alvo de constantes pesquisas, as quais objetivam esclarecer o comportamento estrutural destas ligações e com isto estabelecer equações de cálculo que reproduzam de maneira satisfatória os esforços resistentes de cálculo destas ligações.

O comportamento estrutural destas ligações tem sido estudado por meio de ensaios experimentais os quais são realizados em laboratórios e requerem equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada para operar estes equipamentos, com isto onerando os custos dos ensaios e consequentemente das pesquisas.

Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento da informática, códigos de cálculos para microcomputadores têm sido desenvolvidos com base no Método dos Elementos Finitos os quais permitem simular numericamente o ensaio experimental destas ligações e com isto reduzir os custos dos ensaios.

Para isto é necessário que se estabeleça um padrão de modelagem numérica o qual reproduza de maneira satisfatória os resultados do ensaio experimental. Para estabelecer este padrão de modelagem numérica, é necessário conhecer o comportamento estrutural de uma ou mais ligações, neste caso, realizando-se ensaios experimentais.

Conhecendo-se o comportamento estrutural de uma ligação, é possível modelar numericamente esta ligação e calibrar os resultados numéricos com os resultados experimentais e com isto aferir os resultados numéricos.

## ***1.2 OBJETIVOS E DESCRISÃO DO TRABALHO***

### ***1.2.1 OBJETIVOS DO TRABALHO***

O presente trabalho objetiva analisar numericamente o comportamento estrutural de ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio. Com vistas a se estabelecer uma abordagem numérica confiável e satisfatória destas ligações, serão realizadas simulações em microcomputadores, utilizando para tanto códigos de cálculo para microcomputadores (pacote comercial), geralmente elaborados com base no Método dos Elementos Finitos.

Vale ressaltar ainda que um outro aspecto também de interesse a ser obtido por meio dos modelos numéricos refere-se à possível identificação dos modos de falha (configuração deformada das partes que constituem as ligações), conforme verificados e devidamente registrados e apresentados em MAIOLA (2004), em função dos ensaios realizados pelo autor da última referência.

### ***1.2.2 DESCRISÃO DO TRABALHO***

Para a simulação numérica do comportamento das ligações em questão será utilizado o código de cálculo ANSYS v. 6.0, uma vez que esse mesmo código tem sido largamente utilizado em pesquisas realizadas para fins de análise de estruturas, apresentando, de um modo geral, resultados bastante satisfatórios.

Os resultados da análise numérica serão inicialmente comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004), cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP. Eventualmente, parte desses mesmos resultados será comparada com outros resultados, numéricos ou experimentais, encontrados na literatura de interesse.

### ***1.3 JUSTIFICATIVA***

O estudo dos perfis de aço formados a frio, bem como das ligações parafusadas em tais perfis, constitui uma linha de pesquisa bastante difundida na área de Estruturas Metálicas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, principalmente no que se refere aos ensaios experimentais em ligações parafusadas em chapas finas e perfis formados a frio.

No entanto, tendo em vistas os elevados custos e as dificuldades para se realizar ensaios experimentais, para os quais são necessários equipamentos sofisticados e mão de obra qualificada, além do longo tempo gasto para se realizar estes ensaios, entende-se como importante e de interesse imediato a realização de estudos numéricos destas mesmas ligações. Com o objetivo de explorar melhor a modelagem numérica de ligações parafusadas em chapas finas e perfis formados a frio, foi estabelecida esta proposta de trabalho.

Para modelar numericamente uma ligação parafusada em chapa fina ou em perfil formado a frio, é conveniente, que se tenha em mãos resultados experimentais que permitam calibrar satisfatoriamente os modelos numéricos. Em razão da existência de resultados de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, apresentados em MAIOLA (2004), achou-se por bem aproveitá-los para calibrar os modelos numéricos.

Para tanto, foi estabelecida a presente proposta de trabalho, a qual objetiva inicialmente modelar e analisar numericamente o comportamento estrutural de ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio, e confrontar os resultados obtidos desta análise com os resultados obtidos experimentalmente.

A idéia é estabelecer um padrão de modelagem numérica confiável para estas ligações. Estabelecido este padrão de modelagem, futuras configurações de ligações parafusadas poderão ser modeladas numericamente, apresentando resultados que sejam confiáveis, sem a necessidade de se realizar, indefinidamente, ensaios experimentais adicionais aos já realizados.

Em resumo, é importante destacar que os modelos numéricos, desde que devidamente calibrados, constituem uma ferramenta de grande interesse em pesquisas, pois permitem obter resultados bastante satisfatórios em tempo bastante reduzido, sem

que exija a necessidade de gastos com materiais, bem como a mobilização de pessoal especializado (técnicos), entre outros aspectos.

## ***1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO***

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos. Em cada capítulo procurou-se abordar aspectos específicos do presente tema, de forma a propiciar ao leitor um entendimento adequado do texto.

Nesse *capítulo 1* fez-se uma breve introdução à modelagem numérica de ligações parafusadas em perfis formados a frio. Apresenta os principais objetivos, bem como uma justificativa para a realização do trabalho aqui apresentado.

No *capítulo 2* são apresentados os perfis formados a frio, descrevendo-os em seus aspectos de maiores interesses. Faz-se um breve histórico da utilização destes perfis na construção metálica, tanto no contexto mundial, como também no Brasil. São apresentadas as ligações parafusadas em perfis formados a frio, bem como as ligações parafusadas em chapas finas. São descritos ainda, os principais tipos de falhas destas ligações, bem como os métodos de cálculos apresentados pela norma nacional e algumas normas internacionais.

O *capítulo 3* apresenta os aspectos da modelagem numérica das ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio. São descritos os tipos de elementos finitos utilizados na modelagem, bem como as condições de contorno e carregamentos utilizados, com vistas a tornar o modelo numérico representativo e o mais próximo possível do ensaio experimental. É apresentado também o modelo constitutivo utilizado para representação do comportamento do aço.

No *capítulo 4* são analisados e discutidos os resultados obtidos da análise numérica, comparando-os com resultados experimentais obtidos em laboratórios, bem como com resultados numéricos obtidos por outro pesquisador.

Finalmente, no *capítulo 5*, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho. São também propostas sugestões para futuras pesquisas com base nos resultados obtidos com a modelagem aqui apresentada.

# LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS E EM PERFIS FORMADOS A FRIO

---

CAPÍTULO

2

## ***2.1 PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO – Aspectos Gerais***

Os perfis de aço formados a frio constituem um tema de grande importância no contexto da construção metálica brasileira. A crescente aplicação destes elementos nas estruturas de aço e demais componentes, bem como a necessidade e importância de pesquisas e publicações no país, compatíveis com o material e os perfis aqui empregados, fazem com que este tema seja objeto de pesquisa, tanto no contexto brasileiro como também no contexto mundial.

Estes perfis são obtidos pelo dobramento a frio de chapas de aço, cujas operações de conformação podem ser realizadas por três processos distintos, denominados *dobrimento ou prensagem, calandragem e perfilagem*, todos realizados por máquinas denominadas prensas dobradeiras, calandras e perfiladeiras, respectivamente. A figura 2.1 ilustra os três tipos de máquinas citadas.

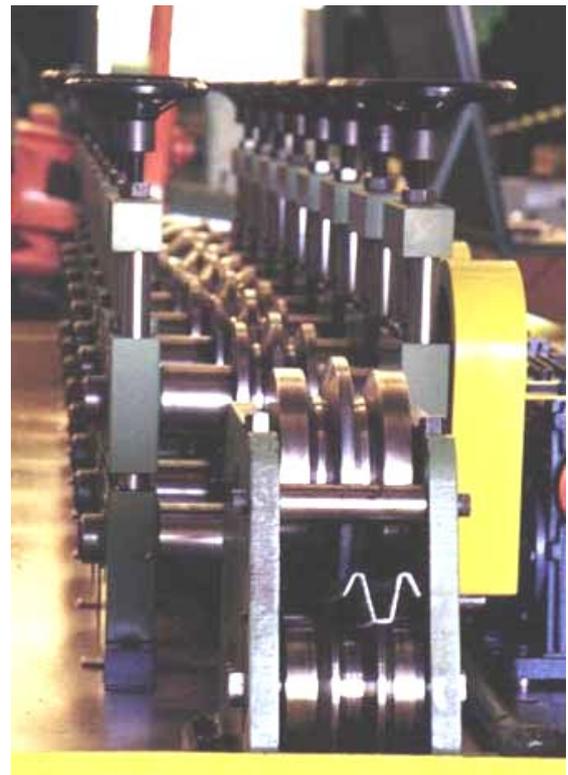
A simplicidade do processo de fabricação permite a obtenção de uma grande variedade de perfis formados a frio, os quais podem ter dimensões pré-estabelecidas, no caso de perfis padronizados, ou projetados com dimensões que atendam situações particulares previstas em projetos, sem acarretar grandes elevações no custo final da obra.



(a)



(b)

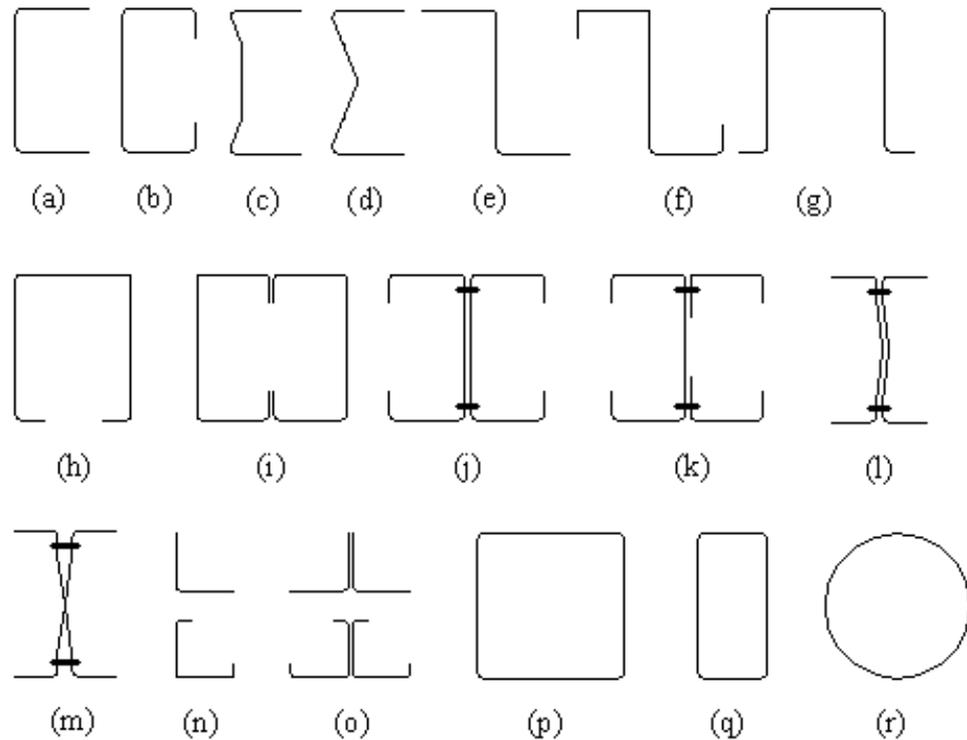


(c)

**Figura 2.1** – Máquinas utilizadas para a obtenção dos perfis formados a frio:  
(a) prensa dobradeira, (b) calandra e (c) perfiladeira.

A padronização dos perfis formados a frio segue as prescrições da norma brasileira ABNT-NBR 6355:2003 (*Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio*), cuja primeira edição foi publicada em 1980. Recentemente esta norma passou por um processo de revisão e, em 2003, foi publicada a sua mais recente versão.

A figura 2.2 apresentada a seguir, ilustra algumas das seções transversais mais comuns de perfis formados a frio.



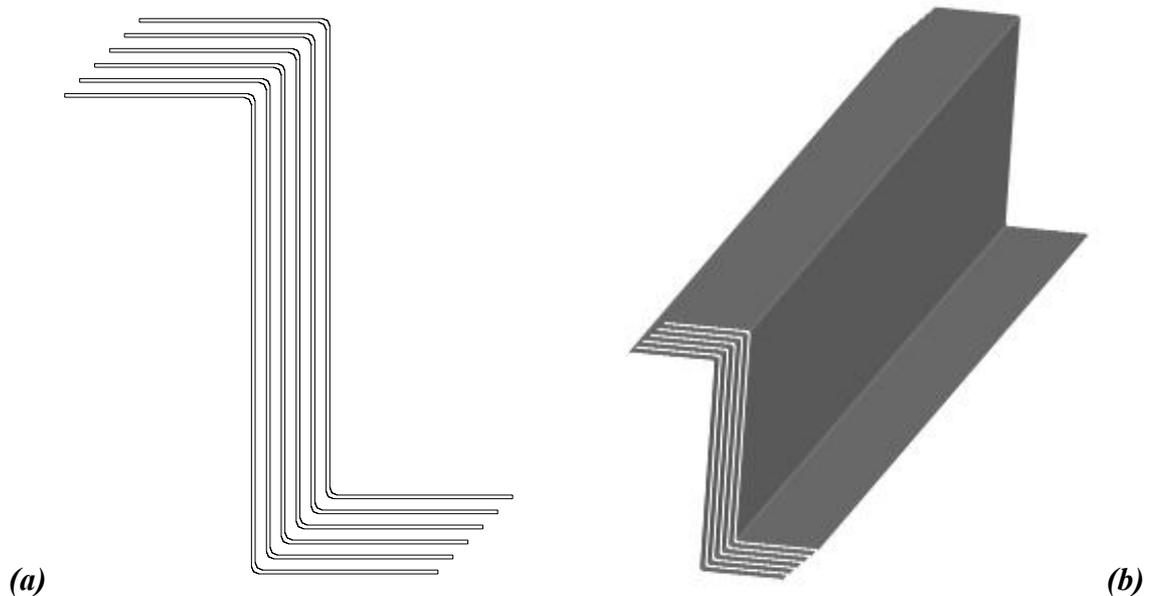
**Figura 2.2** – Seções transversais mais comuns dos perfis formados a frio

No Brasil, as seções transversais mais empregadas são as cantoneiras simples e dupla, perfis U e U enrijecido, perfis I (formado pela composição de dois perfis U), perfil cartola e as seções fechadas (circular ou retangular).

A seção tipo Z é bastante utilizada nos Estados Unidos na confecção de terças e longarinas. Este último perfil apresenta vantagens significativas em relação aos demais apresentados, no referente aos aspectos de armazenamento e transporte. A forma da seção transversal permite que os perfis se encaixem uns nos outros (figura 2.3), diminuindo o espaço ocupado e, conseqüentemente, permite transportar uma grande

quantidade de perfis em um volume reduzido. No Brasil, este tipo de perfil ainda é pouco utilizado nas construções. Os projetistas brasileiros preferem utilizar as seções do tipo U e U enrijecido nas terças e longarinas.

É importante destacar que os perfis de aço formados a frio apresentam, geralmente, baixa relação massa/inércia, sendo esta uma das principais características que os diferenciam dos tradicionais perfis laminados e soldados.



**Figura 2.3** – Perfis do tipo Z encaixados para armazenamento e transporte: **(a)** vista frontal e **(b)** vista em perspectiva.

A utilização de chapa com espessura reduzida, da ordem de 0,4 mm a 6,3 mm, resulta em elevada relação largura/espessura dos elementos planos que compõem a seção transversal, conforme já mencionado, tornando-os mais suscetíveis aos efeitos localizados.

Estes perfis, além de estarem sujeitos aos modos de falha causados por instabilidades globais e locais, como ocorre nos perfis laminados e soldados, estão também sujeitos a um tipo particular de instabilidade que só ocorre nos perfis formados a frio. Trata-se da **instabilidade por distorção** da seção transversal, tema que é abordado com maiores detalhes em CHODRAUI (2002).

Devido às espessuras reduzidas destes perfis, é necessária uma atenção especial às ligações, sejam parafusadas ou soldadas, uma vez que neste caso ocorrem concentrações de tensões no entorno destas ligações. Estas concentrações de tensões, quando não consideradas de maneira adequada, podem ocasionar uma falha prematura da ligação e, conseqüentemente, em alguns casos, o colapso da estrutura.

### **2.1.1 Breve histórico no contexto mundial**

A utilização dos perfis formados a frio na construção metálica teve início por volta de 1850, na Inglaterra e Estados Unidos, sendo utilizados de maneira restrita e sem informações técnicas adequadas sobre o comportamento estrutural destes elementos.

Com a crescente utilização destes perfis, fez-se necessário o conhecimento do seu comportamento estrutural. Em 1939, por iniciativa e financiamento do *American Iron and Steel Institute (AISI)*, teve início uma série de pesquisas coordenadas pelo Prof. George Winter, da *Cornell University*, as quais forneceram uma gama de informações técnicas sobre o comportamento estrutural dos perfis formados a frio.

Com os resultados da pesquisa, em 1946 foi publicada, pelo AISI, a primeira especificação técnica para projeto de elementos estruturais compostos por perfis formados a frio. A partir desta data, a utilização destes perfis na construção metálica teve um grande impulso, passando a ser empregados amplamente em todos os setores em que se utilizavam estruturas metálicas.

A norma do AISI, publicada em 1946, foi bastante divulgada e obteve o reconhecimento por parte dos projetistas americanos e de também de outros países. Esta norma foi e ainda é utilizada em muitos países, os quais não possuem uma especificação técnica equivalente a esta. Após sua primeira versão, várias outras edições já foram publicadas. A mais recente, publicada em de 2001, é atualmente utilizada pelos Estados Unidos, México e Canadá.

Além dos Estados Unidos, um dos pioneiros nas pesquisas e na utilização dos perfis formados a frio, alguns outros países também estão procurando desenvolver suas próprias especificações.

O Canadá vem desenvolvendo pesquisas sobre este assunto há algum tempo, o que culminou na publicação em 1984, pelo *Canadian Standards Association* (CSA), da norma CAN3-S136-1984 (*Cold formed Steel Structural Members*). Esta norma foi substituída recentemente, em 2001, pela *North American Cold-Formed Steel Specification* (2001) do AISI, a qual foi desenvolvida em parceria com os Estados Unidos e México, conforme mencionado anteriormente.

A Austrália e a Nova Zelândia também desenvolveram pesquisas sobre os perfis formados a frio e, em 1996, publicaram a AS/NZS4600:1996 (*Cold-formed Steel Structure*).

Na Europa, vários países desenvolvem pesquisas que viabilizam a utilização dos perfis formados a frio. A especificação técnica que orienta o dimensionamento das estruturas metálicas constituídas por estes perfis na Europa, é o EUROCODE 3 – *Design for steel structures: part 1.3 – general rules: supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting*, Brussels, publicado pelo EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION em 1996.

### **2.1.2 Breve histórico no Brasil**

No Brasil o emprego dos perfis formados a frio iniciou-se praticamente no final da década de 60, quando algumas empresas adquiriram equipamentos específicos para a realização de operações de dobramentos a frio (MALITE et al, 1986).

No entanto, percebia-se na ocasião, uma carência básica de informações técnicas mais consistentes por parte do corpo técnico das empresas, tanto na área de projetos como na área da construção. Esta carência de informação ocorria em razão, principalmente, do desconhecimento de normas técnicas específicas, inclusive da norma brasileira em vigência naquela época, a NB 143:1967 (*Cálculo de Estruturas de Aço, Constituídas por Perfis Leves*).

A norma NB 143:1967 foi pouco utilizada e não sofreu revisões ao longo do tempo, transformando-se num documento técnico obsoleto. Praticamente obrigava os projetistas a adotarem normas estrangeiras, como as do AISI (*American Iron and Steel Institute*), CSA (*Canadian Standards Institute*) entre outras.

A adoção de normas estrangeiras gerava incompatibilidades, principalmente quando utilizadas simultaneamente com a NBR 8800:1986 (*Projetos e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios*), específica para perfis laminados e soldados. Os coeficientes de ponderação das ações e os coeficientes de resistência não eram compatíveis entre normas, gerando incompatibilidades, aspectos que poderiam colocar em risco a confiabilidade das estruturas.

A escassez de laminados leves no mercado, naquela época, é também um aspecto a ser mencionado. Um fato que colaborou para com essa escassez, foi a desativação de laminadores de perfis por parte da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional).

Os perfis formados a frio traziam e ainda trazem vantagens, tais como maior disponibilidade no mercado para pequenas e elevadas quantidades e maior possibilidade de otimização em projetos. Esta otimização ocorre, principalmente, em razão de os perfis formados a frio, em geral, apresentam maior relação inércia/peso que os laminados, tendo conseqüência imediata um menor consumo de material.

Pelas razões mencionadas anteriormente, ocorreu uma forte demanda induzida de empresas de pequeno e médio porte do interior do Estado de São Paulo, que passaram a consumir em larga escala os perfis formados a frio, em substituição aos clássicos perfis laminados, nas chamadas “*estruturas leves*”.

Uma vez identificado, naquela época, o aumento na demanda dos perfis formados a frio e a inexistência de material técnico adequado para o projeto, entendeu-se como necessário elaborar uma norma brasileira para projeto de estruturas de aço, em temperatura ambiente, constituída por perfis formados a frio. Nesta norma, os coeficientes de ponderação das ações e das resistências, além da nomenclatura e simbologia, estariam calibrados e ajustados com outras normas brasileiras.

O Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, reconhecendo a necessidade de pesquisas sobre esse tema, deu início em 1990 com um primeiro trabalho de pós-graduação em perfis formados a frio. Em 1993, o tema foi classificado como uma *Linha de Pesquisa* na Área de Estruturas Metálicas.

A partir dessa data, vários trabalhos teóricos e experimentais, em níveis de mestrado e doutorado, foram desenvolvidos, enquanto outros estão em desenvolvimento. Alguns destes trabalhos são desenvolvidos em parcerias com

empresas, visando melhor entender o comportamento, tendo como consequência o aprimoramento do emprego dos perfis formados a frio nas estruturas.

Em agosto de 1997 foi constituído pela ABCEM (Associação Brasileira da Construção Metálica) um grupo de trabalho com o objetivo de elaborar um texto-base para uma nova norma brasileira. O grupo foi composto por pesquisadores de várias universidades e empresários do setor.

O referido texto foi elaborado com base na norma norte-americana do AISI, em algumas das prescrições do EUROCODE 3 e na norma australiana AS/NZS 4600/1996: *Cold-formed Steel Structure*. Também foram tomadas como base, experiências brasileiras adquiridas em pesquisas e na prática da aplicação de perfis formados a frio nas estruturas. A aprovação do texto-base ocorreu em março de 2001 e, ao final do mesmo ano foi publicada a NBR 14762, intitulada ***”Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”***.

A NBR 14762:2001 consiste de um material de grande importância para projetos e pesquisas em perfis formados a frio. Esta norma traz em suas prescrições o tema *ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio*, objeto de interesse do presente trabalho, o qual não era abordado pela NB 143:1967. Por ser norma recente, existem algumas dúvidas sobre o comportamento destas ligações e quanto aos procedimentos de cálculo de tais ligações adotados pela NBR 14762:2001.

Nesse sentido, acredita-se que sejam necessárias pesquisas que abordem esse mesmo tema, com vistas inclusive a complementar os estudos realizados nos últimos anos no Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, tanto experimentalmente, por meio de ensaios em laboratório, quanto numericamente, utilizando códigos de cálculo (programas) para micro-computadores, voltados a simulações numéricas.

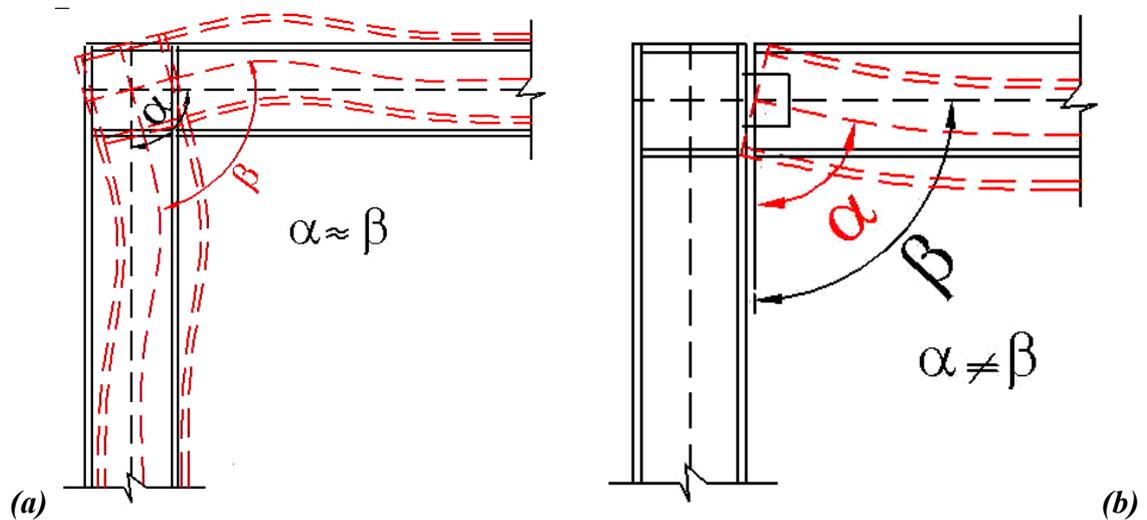
## ***2.2 LIGAÇÕES PARAFUSADAS, (Alguns Aspectos de Interesse)***

A palavra ligações se aplica a todos os detalhes construtivos que promovam a união de partes da estrutura entre si ou a sua união com elementos externos, como por exemplo, as fundações, que promovem a ligação da estrutura de interesse ao solo ou

maciço rochoso. Conforme descrito em SALMON & JOHNSON (1996), as ligações podem ser classificadas quanto à rigidez, em três diferentes tipos: *rígidas*, *flexíveis* e *semi-rígidas*.

A ligação é classificada como *rígida*, quando o ângulo entre os elementos estruturais que se interceptam permanece “praticamente inalterado” após o carregamento da estrutura, apresentando restrição à rotação relativa da ligação, da ordem de 90% (ou mais) daquela teórica necessária para garantir a inexistência de giro relativo entre as partes conectadas (figura 2.4 a). Este tipo de ligação deve ser capaz de resistir esforços provenientes de flexão ou de torção, quase que na sua totalidade, uma vez que tem a capacidade de promover a continuidade da estrutura.

Por outro lado, a ligação é considerada como *flexível* quando a rotação relativa entre as partes, após o carregamento, atingir 80% (ou mais) daquela teoricamente idealizada para conexão totalmente livre ao giro (figura 2.4 b). Este tipo de ligação não tem capacidade para resistir a momentos de flexão, ou seja, resiste apenas força normal e força cortante que aparecem em resposta ao carregamento aplicado.



**Figura 2.4** – Alguns tipos de ligações: (a) ligação rígida e (b) ligação flexível

Quando a rotação entre as partes fica entre 20% e 90% daquela teoricamente necessária para evitar qualquer giro relativo, a ligação é denominada *semi-rígida*. Neste caso, o momento de flexão transmitido pela conexão não resulta nulo, ou próximo de

zero, como ocorre na ligação flexível, e nem resulta igual ao momento máximo, ou próximo dele, como ocorre na ligação rígida.

São vários os dispositivos utilizados para a união dos elementos estruturais de aço. Os mais comuns, na atualidade, são os *parafusos* e a *solda elétrica*. Até a década de 50, um dispositivo bastante utilizado era o *rebite*.

Com o desenvolvimento da solda elétrica e dos parafusos (comuns ou de alta resistência), os rebites, apesar de apresentarem bom comportamento estrutural, foram sendo substituídos, aos poucos, pela solda elétrica e pelos parafusos. Estes apresentam um comportamento estrutural semelhante aos rebites, no entanto, com custos de execução bastante reduzidos.

Neste trabalho serão analisadas apenas ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio. É importante destacar que o tema ligações parafusadas sempre representou (e ainda representa) um assunto bastante difundido no Brasil quando da abordagem de estruturas constituídas por perfis laminados e soldados, porém, pouco abordado no caso de estruturas constituídas por perfis formados a frio.

Este aspecto deveu-se ao fato de a norma NB 143:1967, naquela época, omitir em suas prescrições o item ligações no texto normativo. Neste caso, as ligações eram calculadas com base em normas estrangeiras.

Com a publicação da norma brasileira ABNT NBR 14762:2001, o tema ligações em perfis formados a frio passou a ser abordado. Entretanto, como ocorre com a primeira edição de qualquer documento normativo, existem ainda aspectos que devem ser mais bem entendidos no referente ao comportamento destas ligações e, conseqüentemente, quanto aos procedimentos de cálculo adotados pela norma brasileira.

Por essa razão, acredita-se que sejam necessárias pesquisas complementares àquelas já realizadas, ou mesmo àquelas em desenvolvimento, abordando o tema ligações em perfis formados a frio, em especial, no que se refere à utilização de ferramentas computacionais para a análise numérica, uma vez que análises experimentais têm sido realizadas com maior freqüência.

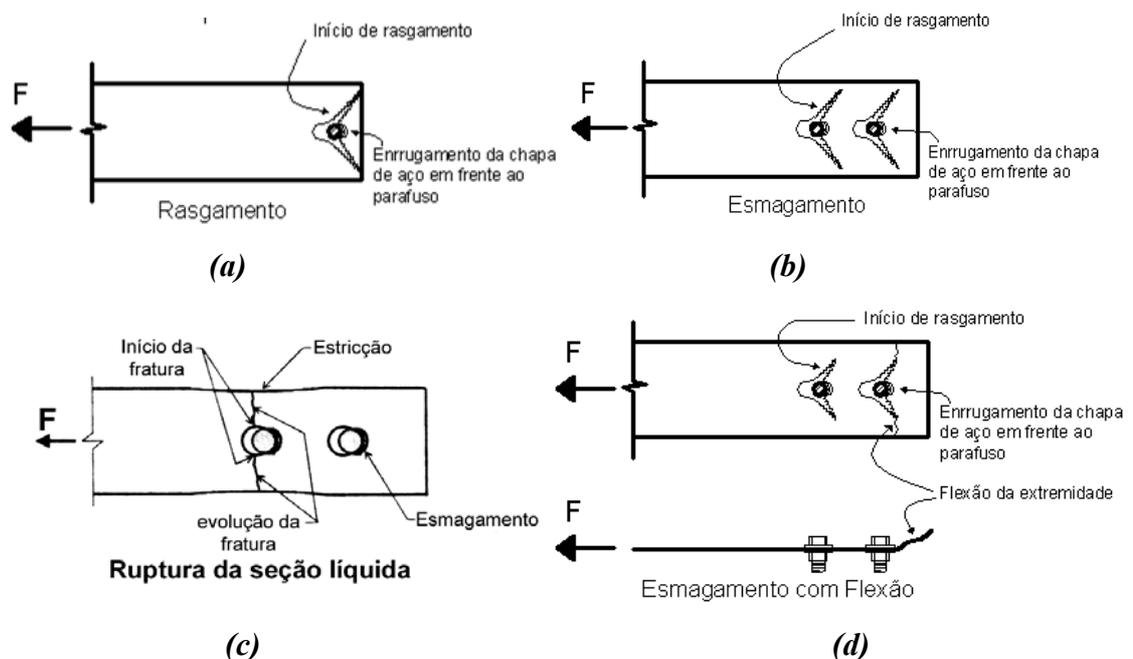
Como exemplo de estudos experimentais, podem ser citados os resultados obtidos e apresentados em MAIOLA (2004), em que foram largamente estudadas as ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio, com ênfase na ruptura por tração da seção líquida.

Na referência em questão, são apresentados e discutidos resultados de investigações experimentais de ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio, cantoneiras e perfis U, com espessuras de 1,5 mm e 3,75 mm, com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural destas ligações, bem como os correspondentes modos de falha.

Vale ainda salientar que o comportamento das ligações entre perfis formados a frio pode apresentar diferenças significativas quando comparados ao comportamento de ligações entre perfis laminados ou soldados. Esta diferença de comportamento se deve ao fato de as espessuras dos elementos envolvidos variarem de 0,4 mm a 6,3 mm para os perfis formados a frio, em comparação com espessuras de 6,3 mm a 50 mm para os perfis laminados e soldados. Os perfis formados a frio apresentam, em geral, espessuras bem menores quando comparados aos perfis laminados e soldados.

### 2.3 LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS

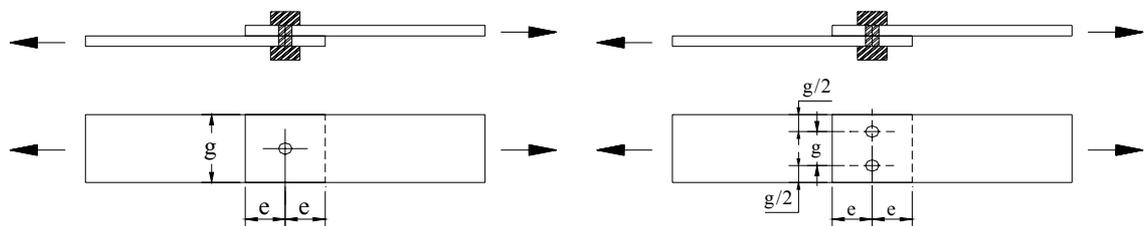
Segundo WINTER (1959) apud MAIOLA et al.(2002a), as ligações parafusadas em chapas finas de aço, com solicitação perpendicular ao eixo dos parafusos, estão sujeitas a quatro modos de falha:



**Figura 2.5** – Modos de falha em ligações parafusadas com chapas finas.

- *Cisalhamento longitudinal da chapa, caracterizado por típico rasgamento entre furo e borda (figura 2.5a);*
- *Esmagamento ou enrugamento da chapa junto ao parafuso (figura 2.5b);*
- *Ruptura da chapa na seção líquida (figura 2.5c)*
- *Esmagamento associado à flexão da borda da chapa (figura 2.5d).*

Quando a distância do centro do parafuso à extremidade da chapa ( $e$ ), figura 2.6, for relativamente pequena, ou seja, menor que  $1,5d$ , em que  $d$  é o diâmetro do parafuso, a falha da ligação geralmente acontece pelo cisalhamento longitudinal da chapa mais fina, (típico rasgamento entre furo e borda), conforme figura 2.5a.



**Figura 2.6** – Ligações Parafusadas: dimensões “ $e$ ” e “ $g$ ”.

Quando a distância do centro do furo à extremidade da chapa ( $e$ ) for relativamente grande, isto é, apresentar valores elevados para a relação  $e/d$ , a falha da ligação por cisalhamento longitudinal da chapa passa a ser pouco provável. Neste caso, ocorre um tipo de falha caracterizado por esmagamento ou enrugamento da chapa junto ao parafuso, conforme mostra a figura 2.5b.

O terceiro modo de falha da ligação (figura 2.5c), ocorre pela ruptura da seção líquida. Este tipo de falha está relacionada com a redução da área bruta na seção onde estão localizados os furos, e também pelo fato de a força aplicada se concentrar junto aos parafusos, quando essa mesma força é transmitida de uma chapa à outra.

Esta falha é caracterizada pela estricção (ou redução) da seção, seguida da ruptura (separação) do material, iniciada junto às bordas do furo central, ou dos furos centrais, propagando-se para as extremidades da chapa (figura 2.5c).

O quarto modo de falha apresentado na figura 2.5d é semelhante ao segundo modo de falha (figura 2.5b), diferindo apenas quanto à flexão da borda da chapa. A

flexão da borda da chapa se torna mais acentuada, à medida que a espessura da chapa se reduz, ou seja, quanto mais esbelta a chapa, maior a flexão da borda da chapa.

Neste trabalho será dada ênfase ao terceiro modo de falha da ligação, decorrente da ruptura da seção líquida (figura 2.5c). Os demais modos de falha serão brevemente comentados e apresentados em anexo.

### **2.3.1 Resistência de cálculo das ligações parafusadas em chapas finas**

A resistência de cálculo das ligações parafusadas em chapas finas pode ser determinada, basicamente, por dois procedimentos diferentes. Um dos procedimentos se aplica quando ocorre o esmagamento e o possível rasgamento da chapa pelo parafuso devido à concentração de tensões. As equações, bem como os procedimentos de cálculo para este tipo de falha estão apresentados no *Anexo A*, por não ser de interesse direto no presente trabalho.

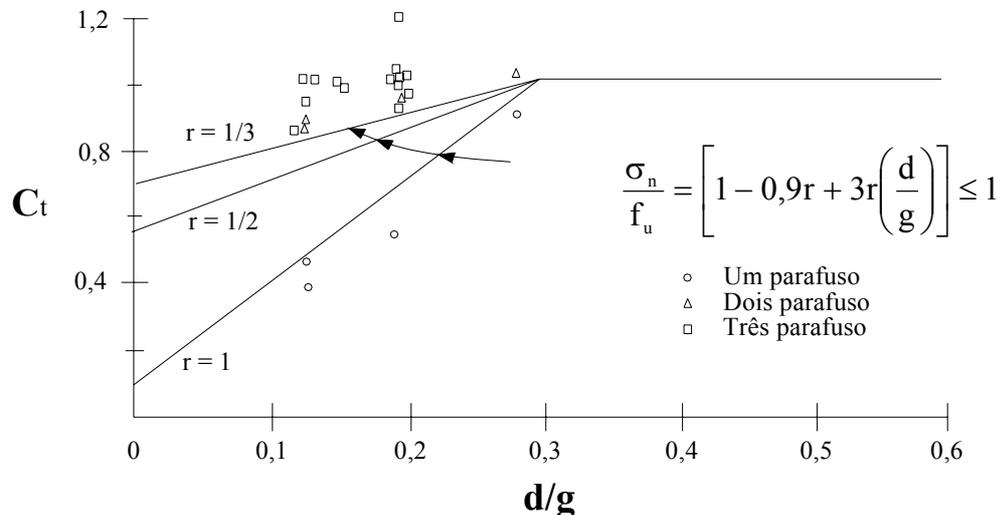
O outro procedimento é aplicado quando a falha da ligação acontece pela ruptura da seção líquida da chapa, sendo este assunto objeto de interesse do presente trabalho. Este modo de falha é provocado pela redução da área bruta da chapa por consequência da presença dos furos. As equações e os procedimentos de cálculo para este tipo de falha estão apresentados nos itens que se seguem.

Nas ligações parafusadas em chapas finas, a falha por ruptura da chapa na seção líquida está relacionada com a concentração de tensões devido à presença de furos, e também pelo fato de a força aplicada se concentrar junto aos parafusos, quando essa mesma força é transmitida de uma chapa à outra.

Ensaio realizados, cujos resultados estão apresentados em WINTER (1956), identificaram a necessidade de considerar uma redução da área líquida da seção, em virtude da presença dos furos na região da ligação. A redução proposta na última referência citada consiste em afetar a área líquida da seção de interesse por um coeficiente de redução, denominado  $C_t$ .

O valor do coeficiente  $C_t$  é estabelecido em função da relação  $d/g$ , em que  $d$  é o diâmetro do parafuso e  $g$  o espaçamento entre furos na direção perpendicular a força, conforme figura 2.6. O mesmo coeficiente depende também da geometria da ligação, representada por meio de um parâmetro  $r$ , definido como a relação entre a força

transmitida por um parafuso na seção analisada e a força total atuante nessa seção. Nesse caso, o coeficiente  $C_t$  deve resultar menor ou igual à unidade.



**Figura 2.7** – Efeito da relação  $d/g$  na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, com arruelas e solicitadas a cisalhamento simples (YU, 1982).

A equação proposta e apresentada em WINTER (1956) para se determinar a resistência de cálculo à ruptura da seção líquida de uma ligação parafusada em chapa fina, é escrita na seguinte forma:

$$N_{t,R} = C_t A_n f_u \quad (2.1)$$

Com relação à equação 2.1,  $N_{t,R}$  representa a força máxima de ruptura na seção líquida,  $C_t$  é o Coeficiente de redução da área líquida,  $A_n$  é a área líquida da seção e  $f_u$  é a resistência última à ruptura do aço. Segundo MAIOLA (2004) a equação 2.1 foi adotada pela norma americana AISI/46, sendo aplicável exclusivamente às ligações que utilizassem duas arruelas, junto à cabeça e junto à porca do parafuso.

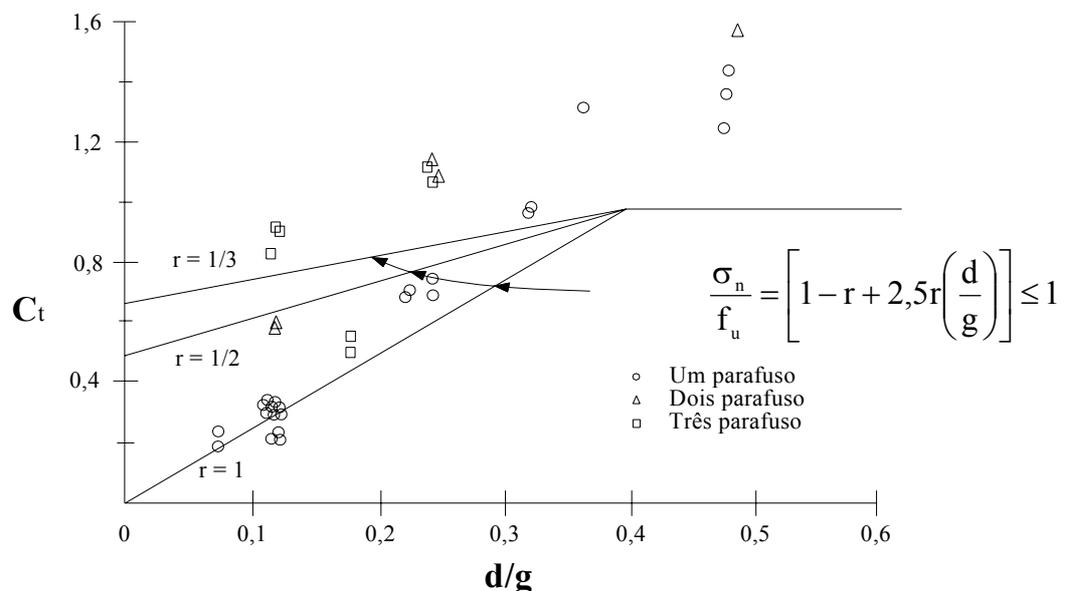
Posteriormente, com base em resultados de ensaios realizados e apresentados por outros pesquisadores, CHONG & MATLOCK (1975) e GILCHRIST & CHONG (1979), a norma americana AISI passou a adotar duas equações para o cálculo da ruptura da seção líquida. Uma equação para ligações com a utilização de arruelas junto à cabeça e à porca do parafuso, e outra quando da utilização de somente uma arruela ou nenhuma.

O efeito da relação entre o diâmetro do parafuso e o espaçamento entre furo ( $d/g$ ), na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, com e sem o uso de arruelas foi analisado e apresentado em YU (1982). Nesta última referência citada, foram estudadas configurações de ligações contendo uma, duas ou três linhas de parafusos, na direção perpendicular à solicitação.

As figuras 2.7 e 2.8 mostram o efeito da relação  $d/g$  na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, solicitadas à corte simples e vários parafusos, com e sem o uso de arruelas, respectivamente.

A análise experimental demonstrou que a concentração de tensões é menos acentuada quando mais de um parafuso por linha é utilizado. Conforme apresentado nas figuras 2.7 e 2.8, a falha devido à ruptura da seção líquida em ligações com três parafusos ( $r = 1/3$ ) ocorre para tensões maiores quando comparada o caso de ligações com dois parafusos ( $r = 1/2$ ).

Conseqüentemente, a falha devido à ruptura da seção líquida em ligações com dois parafusos ( $r = 1/2$ ) ocorre para tensões maiores quando comparada ao caso de ligações com apenas um parafuso ( $r = 1$ ). Observou-se ainda, que a situação mais crítica ocorre para pequenas relações  $d/g$ , devido a maior concentração de tensões que ocorre nestes casos.



**Figura 2.8** – Efeito da relação  $d/g$  na resistência à tração de ligações parafusadas em chapas, sem arruelas e solicitadas a cisalhamento simples (YU, 1982).

### 2.3.1.1 Prescrições segundo a norma do AISI de 1996

Na revisão da norma americana do AISI de 1996, as equações para o cálculo da força normal de tração resistente para o estado limite de ruptura da seção líquida, foram estabelecidas com base nos estudos realizados e apresentados em YU (1982).

Estas equações, em que o termo entre colchetes representa o coeficiente  $C_t$  determinado em função da relação  $d/g$  e do parâmetro  $r$ , estão apresentadas a seguir.

- *Quando for prevista a utilização de arruelas junto à porca e junto à cabeça do parafuso:*

$$N_{t,R} = \left[ 1 - 0,9r + 3r \frac{d}{g} \right] f_u A_n \leq f_u A_n \quad (2.2)$$

- *Quando não se especificar arruelas ou quando somente uma arruela for especificada, a tensão de ruptura na seção líquida pode ser avaliada por:*

$$N_{t,R} = \left[ 1 - r + 2,5r \frac{d}{g} \right] f_u A_n \leq f_u A_n \quad (2.3)$$

Para as equações 2.2 e 2.3, valem:

$N_{t,R}$  = Força máxima de ruptura na seção líquida (em kN).

$d$  = diâmetro nominal do parafuso (em cm).

$g$  = espaçamento entre parafusos, medidos na direção perpendicular à força aplicada (em cm). No caso de um único parafuso,  $g$  é igual a largura da chapa.

$r$  = relação entre a força transmitida por parafuso na seção e a força atuante na seção analisada.

$f_u$  = resistência última à tração do material base (em kN/cm<sup>2</sup>).

$A_n$  = área líquida da seção (em cm<sup>2</sup>).

### 2.3.1.2 Prescrições segundo a norma do AISI de 2001

Na revisão de 2001 da norma americana do AISI utilizada nos Estados Unidos, México e Canadá, o coeficiente redutor ( $C_t$ ) não mais se aplica à área líquida, mas à resistência à tração do aço. Desta maneira, a equação estabelecida para se avaliar o esforço resistente à ruptura da seção líquida de ligações parafusadas em chapas finas é dada forma:

$$N_{t,R} = A_n F_t \quad (2.4)$$

O valor de  $F_t$ , para ligações que utilizam arruelas junto à cabeça e junto à porca do parafuso, é avaliado da seguinte maneira:

*a) Ligações com um parafuso, ou uma linha de parafusos perpendicular à direção da força:*

$$F_t = \left( 0,1 + 3 \frac{d}{s} \right) f_u \leq f_u \quad (2.5)$$

*b) Ligações com mais de uma linha de parafusos perpendicular à direção da solicitação:*

$$F_t = f_u \quad (2.6)$$

Para a determinação da resistência de cálculo ( $\phi N_{t,R}$ ), o coeficiente  $\phi$  assume o valor de 0,65 para ligações submetidas ao cisalhamento duplo, e 0,55 para o cisalhamento simples. Na equação 2.5, o parâmetro “s” é tomado como a largura da chapa conectada dividida pelo número de furos, na seção transversal analisada.

O valor de  $F_t$ , para ligações que não utilizam arruelas, ou utiliza apenas uma arruela junto à cabeça ou junto à porca do parafuso, é avaliado da seguinte maneira:

a) *Ligações com um parafuso, ou uma linha de parafusos perpendicular à direção da força:*

$$F_t = \left(2,5 \frac{d}{s}\right) f_u \leq f_u \quad (2.7)$$

b) *Ligações com mais de uma linha de parafusos perpendicular a direção da solicitação:*

$$F_t = f_u \quad (2.8)$$

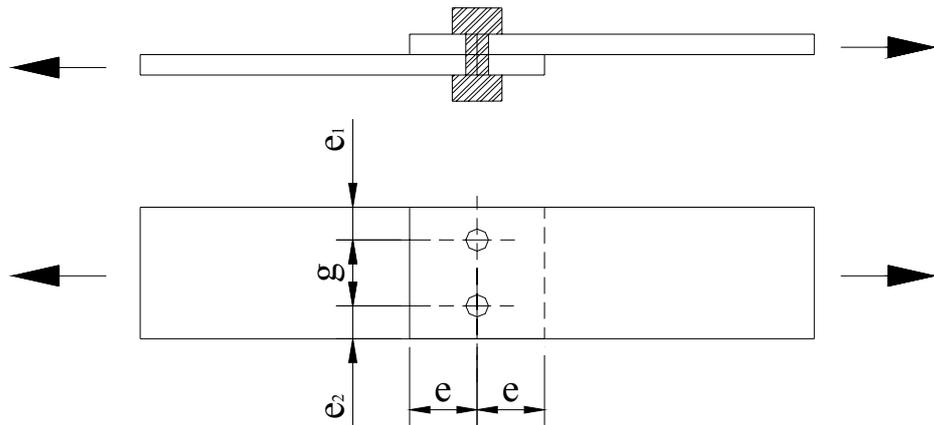
Para este caso, o coeficiente  $\phi$  assume valor igual a 0,65. Novamente, na equação 2.7 o parâmetro “s” é tomado como a largura da chapa conectada dividida pelo número de furos, na seção transversal analisada.

### 2.3.1.3 Prescrições segundo o EUROCODE 3 parte 1.3/96

O EUROCODE 3 parte 1.3/96, apresenta uma equação para o cálculo à ruptura da seção líquida, similar àquela apresentada no AISI/96, quando da utilização de arruela.

$$N_{t,R} = \left[1 + 3r \left(\frac{d_0}{u} - 0,3\right)\right] A_n f_u \leq A_n f_u \quad (2.9)$$

O procedimento verificado nessa especificação difere apenas no modo de avaliação da variável “ $d_0$ ”, definida como o diâmetro nominal do furo e não do parafuso, como apresentado pelo AISI. Na determinação do parâmetro “u”, toma-se o menor valor entre o espaçamento entre furos (g) e a soma das distâncias entre os centros dos furos de extremidade às respectivas bordas, na direção perpendicular à solicitação, no caso,  $e_1 + e_2$ , conforme figura 2.9. A Resistência de cálculo é dada por  $N_{t,R}/\gamma$ , com  $\gamma = 1,25$ .



**Figura 2.9** – Dimensões de interesse para ligações parafusadas em chapas.

#### 2.3.1.4 Prescrições segundo a NBR 14762:2001

A norma brasileira NBR 14762:2001 adota equações para o cálculo do coeficiente de redução da seção líquida ( $C_t$ ) semelhante àquelas adotadas pela norma americana AISI/96. A diferença reside apenas no modo de avaliação do parâmetro  $r$ .

Pelas prescrições da NBR 14762:2001, o parâmetro  $r$  é avaliado tomando-se como referência uma, duas, três e quatro linhas de parafusos, (valores 1, 1/2, 1/3 e 1/4, respectivamente), e não a quantidade de parafusos como acontece no AISI/96. Deste modo, são estabelecidas quatro equações, as quais estão apresentadas a seguir:

- Todos os parafusos da ligação contidos em uma única seção transversal:

$$C_t = 2,5 \left( \frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad (2.10)$$

- Dois parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zig-zag:

$$C_t = 0,5 + 1,25 \left( \frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad (2.11)$$

- Três parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zig-zag:

$$C_t = 0,67 + 0,83 \left( \frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad (2.12)$$

- Quatro ou mais parafusos na direção da solicitação, alinhados ou em zig-zag:

$$C_t = 0,75 + 0,625 \left( \frac{d}{g} \right) \leq 1,0 \quad (2.13)$$

Nas equações 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13,  $d$  é o diâmetro nominal do parafuso e  $g$  é o espaçamento dos furos na direção perpendicular à solicitação. Em casos de espaçamentos diferentes, tomar sempre o maior valor de “ $g$ ” para cálculo de  $C_t$ .

Nas equações anteriores, nota-se que o coeficiente  $C_t$  é função apenas da relação  $d/g$ . Nos casos em que o espaçamento entre furos ( $g$ ) for inferior à soma das distâncias entre os centros dos furos de extremidade às respectivas bordas, na direção perpendicular à solicitação ( $e_1+e_2$ ), o  $C_t$  deve ser calculado substituindo “ $g$ ” por ( $e_1+e_2$ ).

Havendo um único parafuso na seção analisada, o parâmetro  $C_t$  deve ser calculado tomando-se “ $g$ ” como a própria largura bruta da chapa ou o perímetro da seção transversal do perfil.

Nos casos de furos com disposição em ziguezigue, com “ $g$ ” inferior a  $3d$ , o coeficiente  $C_t$  deve ser calculado tomando-se “ $g$ ” igual ao maior valor entre  $3d$  e a soma de ( $e_1+e_2$ ). A Resistência de cálculo à ruptura da seção líquida ( $N_{t,Rd}$ ), é dada por:

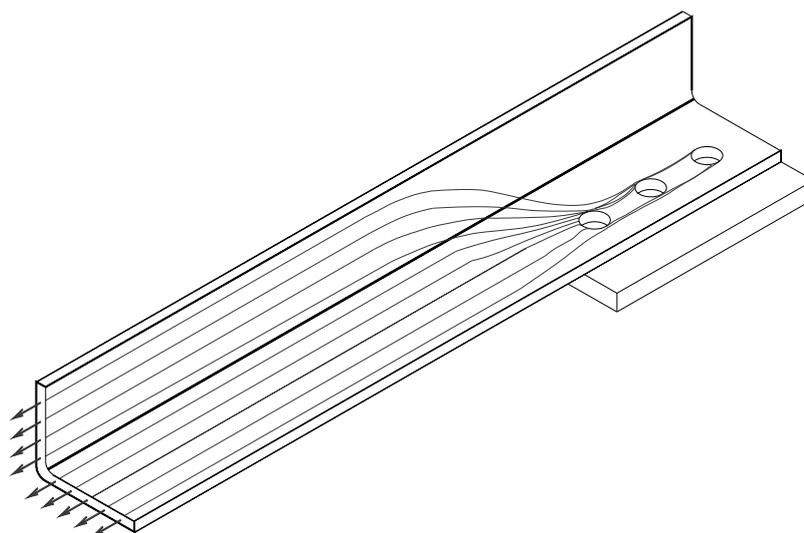
$$N_{t,Rd} = C_t A_n \frac{f_u}{\gamma}, \quad (\gamma = 1,35) \quad (2.14)$$

## ***2.4 LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO***

### **2.4.1 Considerações preliminares**

Uma ligação parafusada deve transmitir a força de um elemento para outro, por meio dos parafusos. Deste modo, a tensão admitida uniformemente distribuída na seção transversal da barra, afastada da região da ligação, passa a ser considerada concentrada, ou “estrangulada”, na região da ligação, no entorno do parafuso ou parafusos, conforme ilustra a figura 2.10.

Como consequência, a seção transversal de um perfil no entorno da ligação não é solicitada na sua totalidade quando não está conectada por todos os seus elementos, o que favorece, neste caso, a ruptura da seção líquida. Este fato proporciona uma redução da resistência das barras submetidas à tração, o que, por sua vez, implica na diminuição da resistência destas ligações.



**Figura 2.10** – Ilustração esquemática da ocorrência de concentração de tensões em cantoneira ligada por uma aba [(MAIOLA, 2004)]

Este fenômeno é levado em consideração pelas normas, no referente à capacidade de resistir aos esforços, de maneira análoga às ligações parafusadas em chapas finas, em que um coeficiente de redução é aplicado à área bruta da seção, obtendo-se uma área líquida reduzida (ou efetiva).

As ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio são, na maioria das vezes, ligações submetidas à forças excêntricas. No entanto, até a publicação do suplemento nº 1 do AISI/96, nenhuma especificação de cálculo apresentava um procedimento específico para a avaliação da resistência de barras tracionadas com base na ruptura da seção líquida efetiva de perfis formados a frio.

Com a publicação deste suplemento, foram estabelecidas as primeiras equações para a determinação da resistência nominal de cálculo para este tipo de falha. Estas equações aplicam-se às cantoneiras e perfis U formados a frio, conectados por duas ou mais seções de parafusos, na direção perpendicular à solicitação.

No Brasil, somente em 2001, com a publicação da norma brasileira NBR 14762:2001 foram incorporadas estas equações.

#### 2.4.2 Resistência à ruptura da seção líquida - AISI

Estudos realizados e apresentados em MUNSE & CHESSON (1963), indicam que o efeito da convergência não linear do fluxo das tensões na região da ligação é função do comprimento da ligação e da excentricidade da seção transversal da peça ligada em relação ao plano de corte dos parafusos.

Em 1993, a especificação do AISI:1993 passou a considerar este efeito adotando um coeficiente de redução da área líquida,  $U$ , dado pela seguinte equação:

$$U = 1 - \bar{X}/L \leq 0,9 \quad (2.15)$$

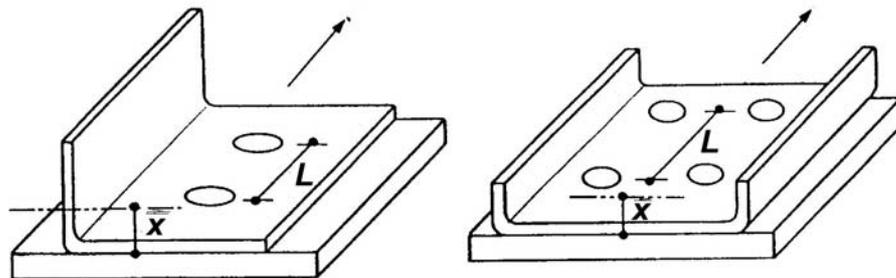
Na equação 2.15, valem:

$U$  = coeficiente de redução da área líquida (efeito “shear lag”);

$\bar{X}$  = excentricidade da ligação;

$L$  = comprimento da ligação.

Na equação 2.15,  $\bar{X}$  é a distância do plano de cisalhamento ao centróide da seção transversal e  $L$  o comprimento da ligação, conforme figura 2.11.



**Figura 2.11** – Determinação de  $\bar{X}$  e  $L$  para ligações parafusadas (YU, 2000)

Pesquisas desenvolvidas e apresentadas em HOLCOMB et al. (1995) demonstram que o comportamento estrutural das ligações parafusadas em perfis de aço formados a frio apresenta diferenças significativas em relação aos perfis laminados e soldados. As espessuras reduzidas daqueles perfis, quando conectados, implica em

maiores efeitos localizados e, conseqüentemente, favorece a ocorrência de estados limites últimos no metal base.

Não é conveniente, portanto, a equação do AISI:1993 ser diretamente aplicada aos perfis formados a frio. O trabalho apresentado em HOLCOMB et al (1995) consistiu na calibração do coeficiente redutor da área líquida (U), para a utilização nesses perfis.

A equação a seguir, sugerida e apresentada em HOLCOMB et al (1995), expressa a força resistente à ruptura da seção líquida. O termo indicado entre chaves, representa o fator de redução da área líquida U.

$$N_{t,R} = A_n f_u \left\{ \left[ 3,987 \left( \frac{t}{s} \right) + 0,514 \right] \left[ 0,5997 \left( \bar{X} / L \right)^{-0,3008} \right] \right\} \quad (2.16)$$

Para a equação 2.16, valem:

t = espessura da chapa de aço;

s' = largura do elemento conectado somada ao valor de  $\bar{X}$  ;

$\bar{X}$  e L: já definidos anteriormente.

Com base nos estudos realizados na Universidade de Missouri-Rolla e apresentados em HOLCOMB et al (1995) e em LABOUBE & YU (1996), foram incluídas no Suplemento nº1 do AISI:1996, conforme mencionado anteriormente, equações para a determinação da resistência nominal à tração na seção líquida de perfis formados a frio.

Estas equações são aplicadas às cantoneiras e perfis U conectados por dois ou mais parafusos na direção da solicitação, as quais são apresentadas a seguir. Segundo esta especificação, a resistência nominal referente à ruptura da seção líquida é determinada por:

$$N_{t,R} = A_e f_u \quad (2.17)$$

Na equação 2.17,  $f_u$  é a resistência à tração da parte conectada e  $A_e$  é a área líquida efetiva, dada por:

$$A_e = A_n U \quad (2.18)$$

Os valores do coeficiente de redução da área líquida (U) foram definidos como:

- U = 1,0 para seções onde todos os elementos são conectados;
- Caso contrário, o coeficiente U deve ser determinado do seguinte modo:

a) *Ligações em cantoneiras com dois ou mais parafusos na direção da solicitação:*

$$U = 1,0 - 1,20 \cdot \bar{X} / L < 0,9 \quad (\text{porém não menor que } 0,4) \quad (2.19)$$

b) *Ligações em perfis U com dois ou mais parafusos na direção da solicitação:*

$$U = 1,0 - 0,36 \cdot \bar{X} / L < 0,9 \quad (\text{porém não menor que } 0,5) \quad (2.20)$$

### 2.4.3 Resistência à ruptura da seção líquida – NBR 14762:2001

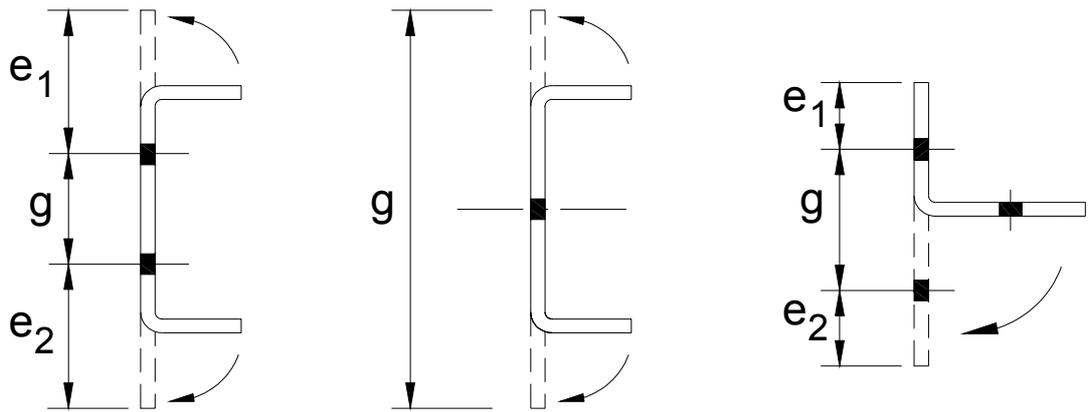
A norma brasileira NBR 14762:2001 considera para o cálculo da resistência à ruptura da seção líquida dos perfis a aplicação de um coeficiente de redução denominado  $C_t$ .

Embora tenha recebido a mesma denominação do coeficiente  $C_t$  aplicado às chapas finas, este coeficiente nada mais é que o próprio coeficiente U do suplemento do AISI, o qual leva em consideração o efeito da concentração de tensão nos elementos conectados do perfil.

Nos casos em que todos os parafusos estão contidos em uma única seção transversal, situação não prevista pela norma americana, o perfil deverá ser tratado como chapa equivalente e os valores de “g”, “e<sub>1</sub>” e “e<sub>2</sub>” tomados como ilustrado na figura 2.12.

Neste caso, a equação para o cálculo do coeficiente  $C_t$ , é a mesma adotada para as chapas finas, quando todos os parafusos estão contidos em uma única seção transversal, conforme equação 2.10.

Para o caso de duas ou mais seções transversais com parafusos, as equações para o cálculo do coeficiente  $C_t$ , para os perfis são as mesmas adotadas pelo suplemento do AISI (coeficiente U).



**Figura 2.12** - Perfis tratados como chapa equivalente.



# ASPECTOS DA MODELAGEM NUMÉRICA DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS FINAS E PERFIS FORMADOS A FRIO

---

CAPÍTULO

3

## 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A modelagem numérica de um sistema físico qualquer consiste em simular este sistema por meio de uma aproximação matemática, utilizando-se um conjunto de elementos finitos inter-relacionados, os quais representem de maneira satisfatória o sistema de interesse.

Antes do surgimento dos micro-computadores, a utilização do *Método dos Elementos Finitos* para simulação de problemas reais resultava extremamente complicada, uma vez que a solução dos sistemas de equações geradas se tornava muito complexa à medida que o número de elementos finitos utilizados aumentava.

Com a evolução dos micro-computadores e dos códigos de cálculo (programas) para análise estrutural, a utilização de elementos finitos na solução de problemas estruturais (planos ou tridimensionais), de um modo geral, deixou de ser um obstáculo e passou a ganhar a atenção de pesquisadores. Percebeu-se na modelagem numérica a possibilidade de se obter informações detalhadas sobre a distribuição de tensões e deformações nas estruturas, sem a necessidade de sempre realizar ensaios experimentais.

Alem disto, parte das informações obtidas em uma análise numérica, quando bem encaminhadas (escolha do tipo de elemento, condições de contorno e de carregamentos, critérios de resistências), dificilmente são obtidas por meio de ensaios

experimentais. Como exemplo, pode-se citar a distribuição de tensões no entorno de uma ligação. Neste caso, seria necessária uma quantidade muito grande de dispositivos eletrônicos (strain gages, por exemplo) para identificar as deformações e convertê-las em tensões. Na modelagem numérica, as tensões podem ser obtidas “ponto a ponto” na estrutura, em geral com facilidade e razoável precisão, e aferidas por meio de resultados experimentais obtidos em laboratório.

Quando se trata de modelagem numérica de estruturas metálicas e, principalmente de estruturas constituídas por perfis formados a frio, é comum realizar análises em campo bidimensional, por meio de elementos finitos do tipo casca (Shell) para representar os perfis. Trata-se de uma simplificação que, geralmente, conduz a bons resultados, além do fato de reduzir consideravelmente o número de elementos finitos utilizados na discretização dos modelos e, conseqüentemente, o tempo de processamento.

No entanto, em algumas situações, como por exemplo, no caso de ligações parafusadas, a adoção de algumas condições de contorno para simular os parafusos pode comprometer os resultados das análises.

Segundo CHUNG & IP (2000), a primeira modelagem numérica de ligação parafusada utilizando elementos finitos tridimensionais foi realizada e apresentada em KRISHNAMURTHY & GRADDY (1976). Nesta última referência, realizou-se uma análise linear elástica, simulando as condições de contato na ligação por meio da liberação ou restrição de determinados nós após cada passo de incremento de carregamento. Vale mencionar que o autor não especifica claramente como foi feita a simulação do contato.

Atualmente, com o desenvolvimento da informática e de programas que utilizam o método dos elementos finitos (MEF), cada vez mais sofisticados, já é possível simular o contato entre as partes da ligação, utilizando-se elementos de contato desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Estes elementos de contatos, utilizados de maneira adequada, fornecem resultados bastante satisfatórios quando comparados com resultados experimentais obtidos em laboratórios.

Em CHUNG & IP (2000) é apresentada a modelagem de uma ligação parafusada, em campo tridimensional, a qual consiste de uma chapa fina conectada a um perfil laminado, utilizando elementos finitos sólidos, bem como, de elementos de

contato simulando o contato entre as partes da ligação. Os resultados obtidos com esta modelagem foram comparados com resultados experimentais obtidos em ensaios, aferindo-se desta maneira o modelo numérico proposto naquela referência.

Tendo em vistas os bons resultados obtidos e apresentados em CHUNG & IP (2000), no presente trabalho serão realizadas simulações numéricas em campo tridimensional para modelar ligações parafusadas em chapa finas e em perfis formados a frio. Serão utilizados elementos finitos do tipo sólido, para simular as chapas, perfis e parafusos. Para simular o contato entre as partes das ligações, serão utilizados elementos finitos do tipo contato.

As simulações numéricas serão viabilizadas por meio da utilização do código de cálculo *ANSYS versão 6.0*, elaborado com base no *Método dos Elementos Finitos*, o qual disponibiliza ao pesquisador os recursos necessários para a obtenção dos resultados de interesse.

Conforme já comentado no capítulo primeiro, os resultados aqui obtidos por meio de análises numéricas, serão comparados com resultados experimentais obtidos e apresentados em MAIOLA (2004), cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP. Serão ainda confrontados com resultados numéricos obtidos e apresentados na mesma referência.

Vale salientar, que os resultados numéricos apresentados em MAIOLA (2004) foram obtidos por meio da modelagem de duas ligações parafusadas, uma em chapa fina e outra em perfil cantoneira. Em ambas as modelagens, foram utilizados elementos do tipo casca (Shell) para simular as chapas e perfis. Para simular os parafusos, foram aplicadas condições de contornos com vistas a restringir deslocamentos ou giros.

Por fim, com base no padrão de modelagem estabelecido para fins de calibração dos modelos numéricos, cujos resultados serão comparados com aqueles apresentados em MAIOLA (2004), modela-se uma ligação parafusada em chapa fina com um parafuso em concordância com os procedimentos apresentados em CHUNG & IP (2000), para que resultados sejam posteriormente comparados.

### **3.2 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS**

O código de cálculo *ANSYS v.6.0* disponibiliza ao usuário uma extensa variedade de elementos finitos, os quais devem ser convenientemente utilizados de

acordo com o tipo de problema a ser resolvido. A escolha dos tipos de elementos finitos a serem utilizados na simulação numérica deve ser feita levando-se em conta vários aspectos, tais como, a família a qual o elemento pertence, graus de liberdade, número de nós e, principalmente, o comportamento que ele apresenta perante a análise desejada.

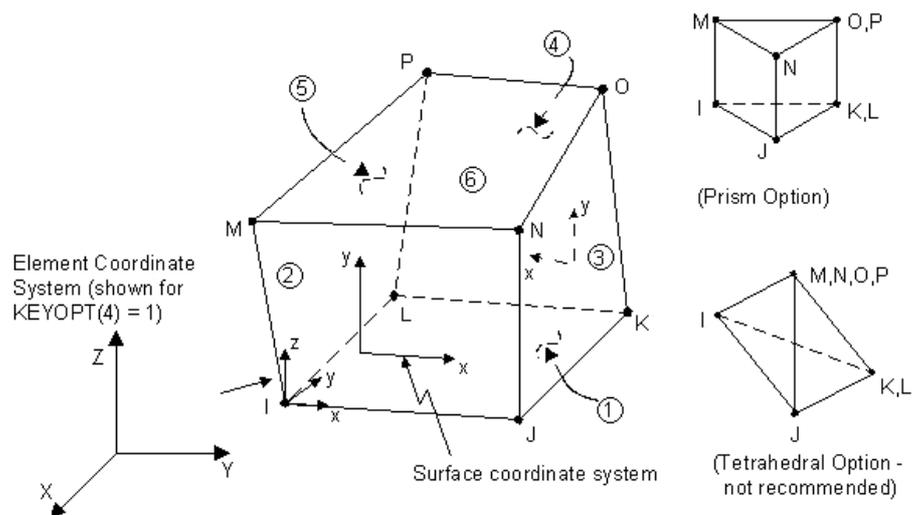
Na elaboração dos modelos numéricos foram utilizados cinco tipos de elementos finitos; três do tipo *sólido*, para modelar as chapas, perfis, parafusos e porcas, e dois do tipo *contato*, para modelar os contatos entre os diversos elementos da ligação.

A seguir faz-se uma breve descrição de cada elemento finito, com respectivas ilustrações, figuras 3.1 a 3.5, extraídas do manual de instruções do programa ANSYS, para os cinco tipos de elementos finitos utilizados na modelagem das ligações.

Para discretizar os perfis, as chapas, os parafusos e as porcas, foram utilizados três tipos de elementos finitos (SOLID 45, SOLID 95 e SOLID 185), com vistas a comparar os resultados obtidos entre esses e estabelecer qual elemento finito apresenta desempenho mais adequado para a estratégia de modelagem aqui adotada.

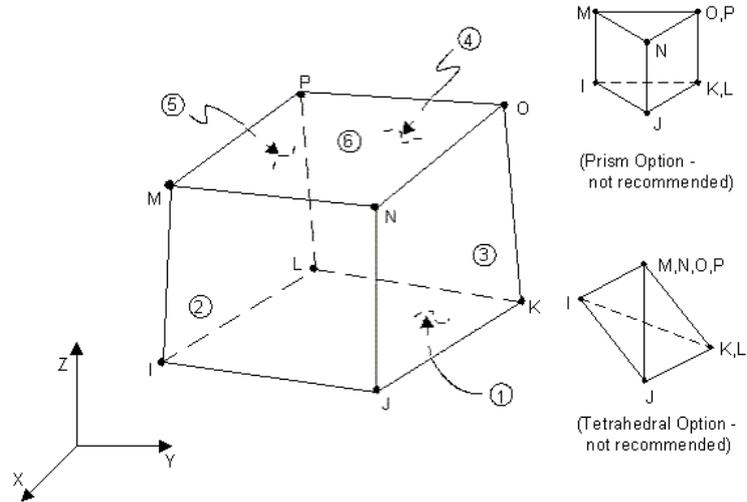
### 3.2.1 Elementos finitos SOLID 45, SOLID 185 e SOLID 95

O elemento finito denominado *SOLID 45*, ilustrado na figura 3.1, é um elemento finito tridimensional que possui oito nós, com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais).



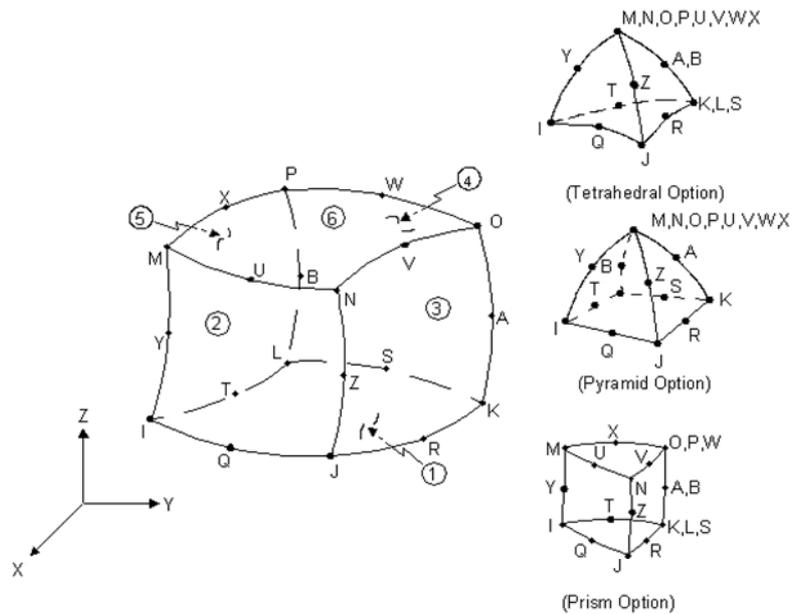
**Figura 3.1** - Elemento finito denominado *SOLID 45*.

O elemento finito denominado *SOLID 185*, ilustrado na figura 3.2, apresenta as mesmas características básicas descritas para o elemento *SOLID 45*, diferenciando-se deste, apenas por permitir simular materiais com características hipelásticas e hiperelásticas.



**Figura 3.2** - Elemento finito denominado *SOLID 185*.

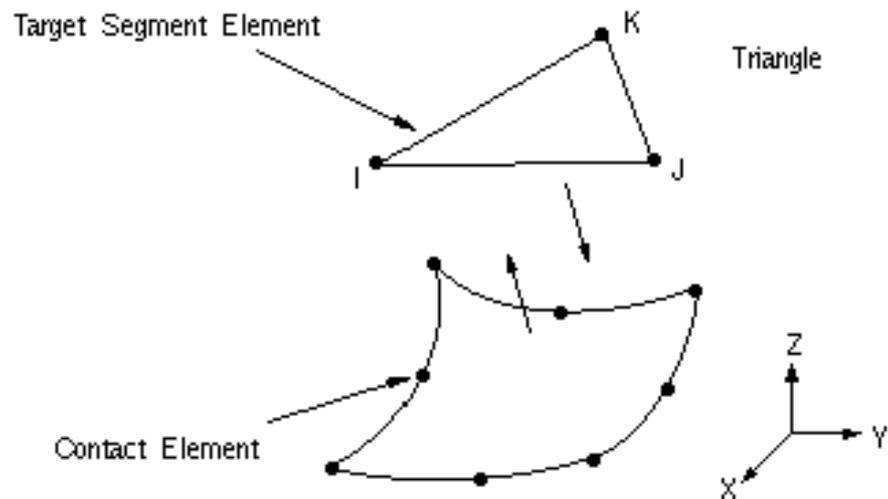
O elemento finito denominado *SOLID 95*, ilustrado na figura 3.3, apresenta as mesmas características do elemento finito *SÓLID 45*, diferenciando-se deste apenas quanto ao número de nós. O elemento finito *SOLID 95* apresenta 20 nós por elemento.



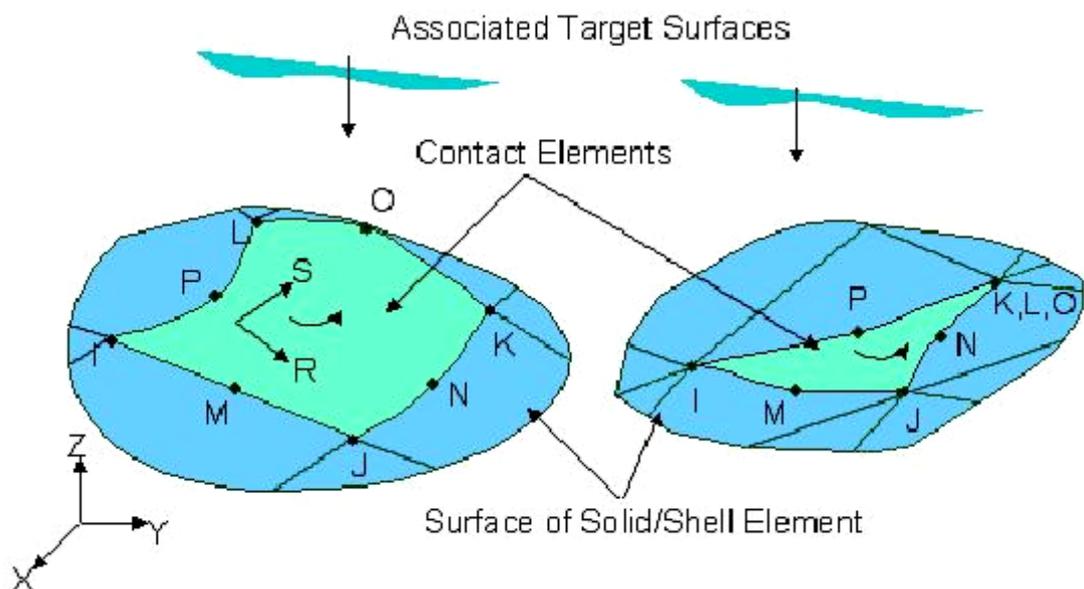
**Figura 3.3** - Elemento finito denominado *SOLID 95*.

### 3.2.2 Elementos finitos de contato TARGET 170 e CONTACT 174

O elemento finito de contato denominado *TARGET 170*, ilustrado na figura 3.4, é um elemento finito tridimensional utilizado, em conjunto com o elemento de contato *CONTACT 174*, ilustrado na figura 3.5, com vistas à discretizar o contato entre os componentes da ligação. Estes dois elementos apresentam as mesmas características, ou seja, possuem oito nós, com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais).



**Figura 3.4** - Elemento finito de contato, denominado *TARGET 170*.



**Figura 3.5** - Elemento finito de contato, denominado *CONTACT 174*.

### 3.3 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A IDENTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

#### 3.3.1 Identificação dos modelos numéricos

Os modelos numéricos foram inicialmente elaborados em concordância com os modelos experimentais apresentados em MAIOLA (2004), razão pela qual a nomenclatura aqui adotada estabelece como padrão de informações a seguinte forma:

**Material empregado:**

- 1 → ZAR 345 com 1,55mm
- 2 → CSN COR 420 com 2mm

**Tipo de elemento:**

- 1 → SOLID 45
- 2 → SOLID 95
- 3 → SOLID 185

**Seção transversal do perfil:**

- C → chapa fina
- LI → cantoneira de abas iguais
- U → Perfil U

**Série:**

- A → uma seção de parafusos
- B → duas seções de parafusos
- C → três seções de parafusos
- D → quatro seções de parafusos

C2 A1

#### 3.3.2 Construção dos modelos numéricos

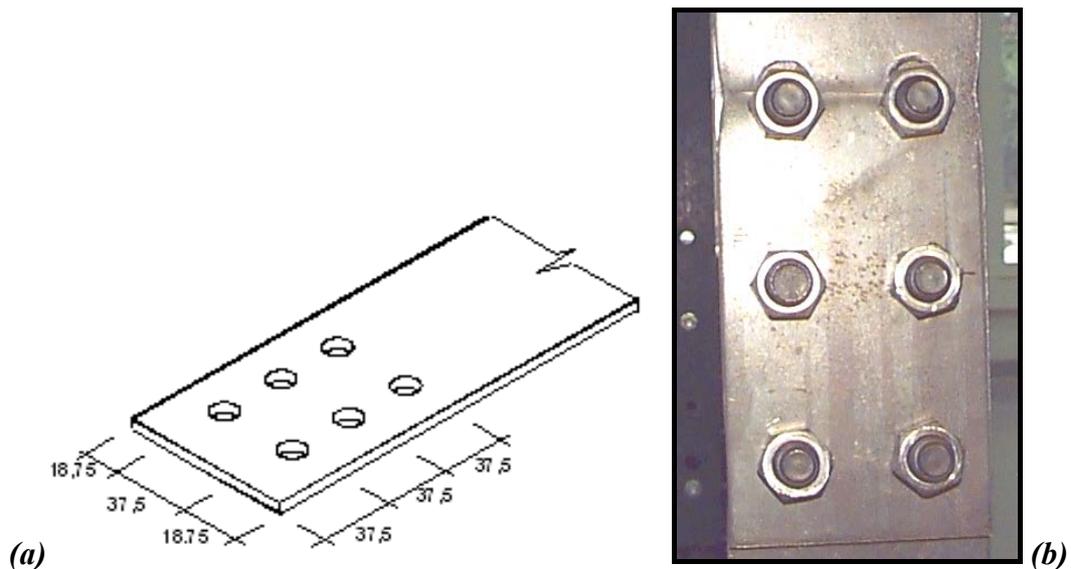
Foram construídos e analisados dez modelos numéricos de ligações parafusadas. Nove destes modelos foram elaborados em concordância com aqueles ensaiados e apresentados em MAIOLA (2004), enquanto que um décimo modelo foi elaborado em concordância com aquele apresentado em CHUNG E IP (2000). Dos modelos experimentais apresentados em MAIOLA (2004), dois foram modelados numericamente na mesma referência, com elementos finitos do tipo casca (Shell).

Durante os ensaios, uma vez vencido o atrito entre as chapas, ou entre o perfil e o dispositivo de fixação, foi verificada a acomodação do parafuso no furo padrão, conforme figuras que serão apresentadas neste item 3.2.2. Esse fenômeno não foi representado nos modelos numéricos em análise, uma vez que, para representar esse fenômeno, seria necessário elaborar modelos numéricos mais complexos, os quais não constituem objetivos desse trabalho.

Para comparação dos resultados experimentais o trecho de deslocamento correspondente à acomodação do parafuso foi suprimido das relações entre força e deslocamento.

### 3.3.2.1 Modelos numéricos de ligação em chapa fina com três seções de parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em chapa fina composta por aço CSN COR 420 com 2,0 mm de espessura. Apresenta dois furos de 14,5 mm de diâmetro na direção perpendicular à linha da força, com espaçamentos entre esses mesmos furos respeitando as distâncias mínimas estabelecidas pela NBR 14762:2001, ou seja,  $3d$  (37,5 mm) entre furos e  $1,5d$  (18,75 mm) entre furo e borda, estando dispostos em três seções distantes entre si 37,5 mm, conforme figura 3.6a.

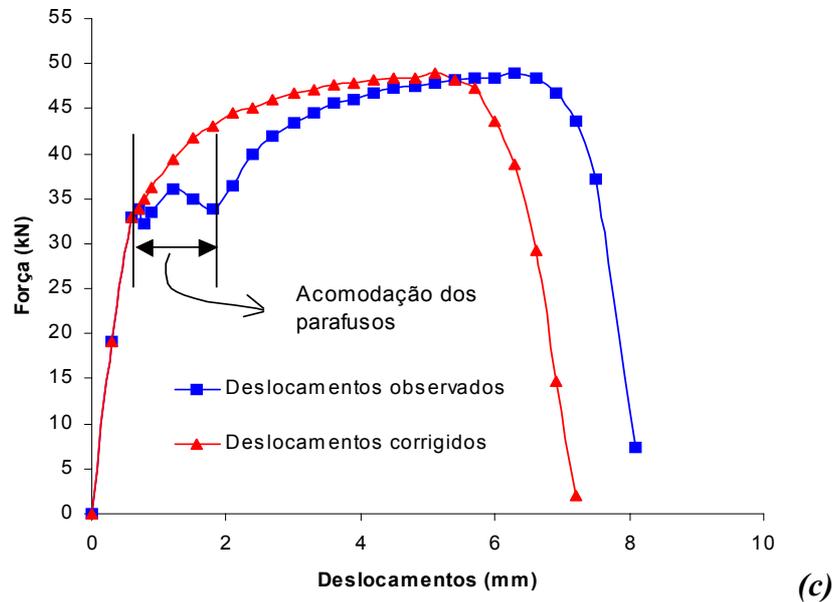


**Figura 3.6** – Ligação parafusada em chapa fina com três seções de parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.6b, com força última igual a 48,8 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 8,4 mm, conforme diagrama apresentado na figura 3.7.

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos numéricos C2C1 e C2C3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185,

respectivamente. As figuras 3.6 e 3.7 foram elaboradas com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).



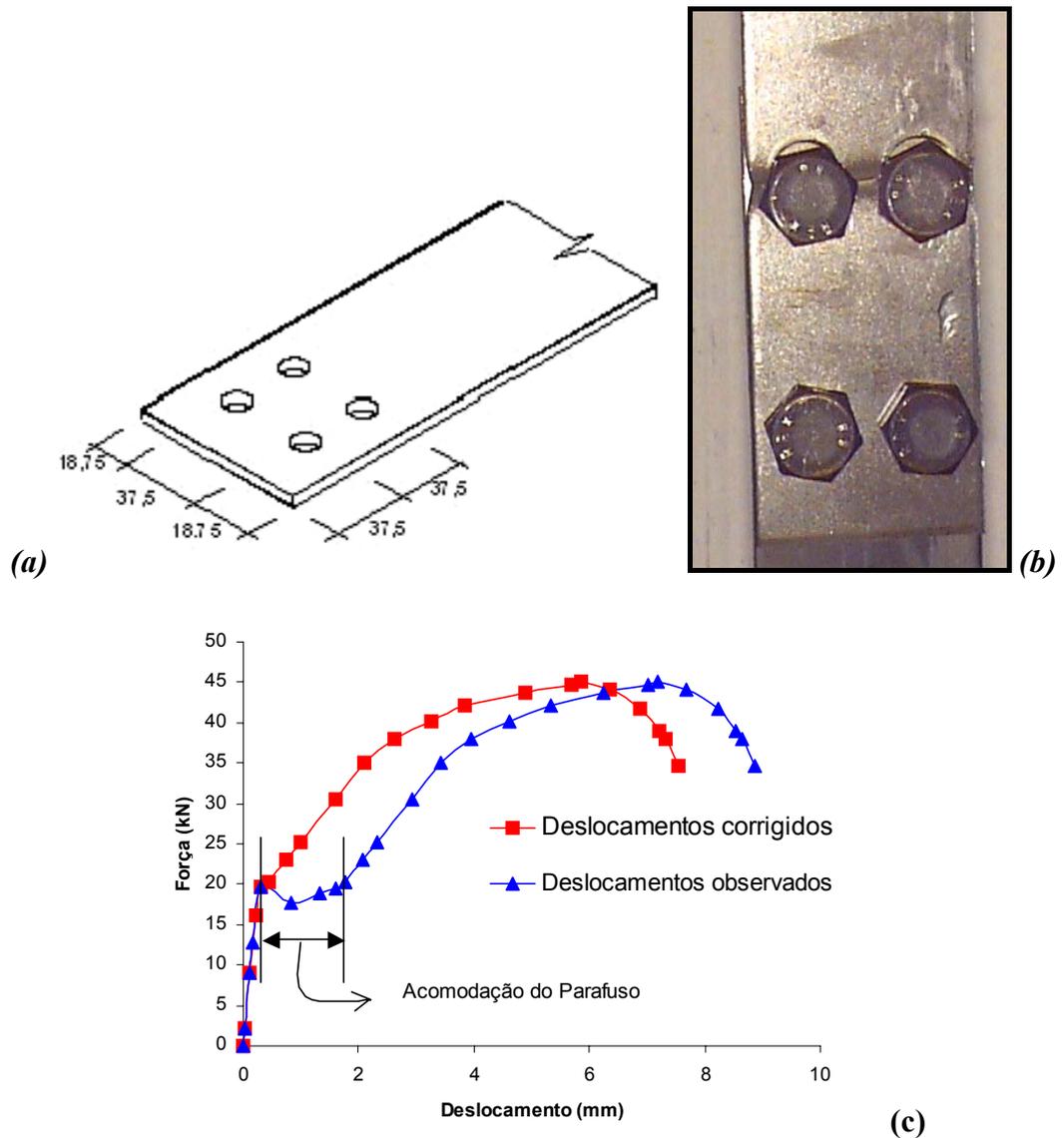
**Figura 3.7** Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.

### 3.3.2.2 Modelos numéricos de ligação em chapa fina com duas seções de parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em chapa fina, análoga à ligação apresentada no item 3.3.2.1, diferindo apenas quanto ao número de seções de parafusos perpendicular à força aplicada (duas seções), como mostra a figura 3.8a.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.8b, com força última igual a 45,1 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 8,86 mm, conforme apresentado na figura 3.8c.

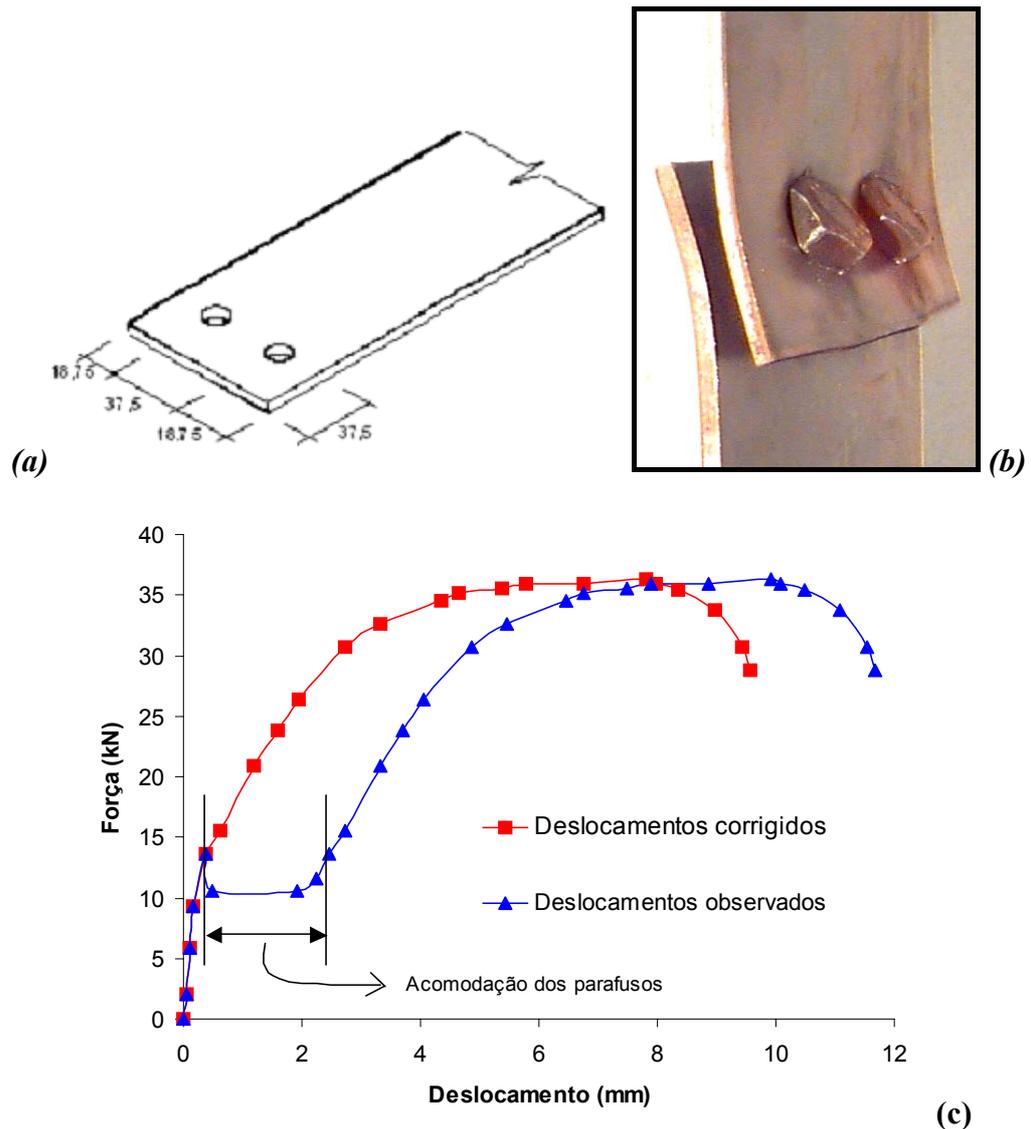
Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos C2B1 e C2B3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. A figura 3.8 foi elaborada com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).



**Figura 3.8** – Ligação parafusada em chapa fina com duas seções de parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio.  
**(c)** Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

### 3.3.2.3 Modelos numéricos de ligação em chapa fina com uma seção de parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em chapa fina análogas às ligações apresentadas nos itens 3.3.2.1 e 3.3.2.2, diferindo apenas quanto ao número de seções de parafusos perpendicular à força aplicada (uma apenas), como mostra a figura 3.9a.



**Figura 3.9** – Ligação parafusada em chapa fina com uma seção de parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio.  
**(c)** Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental

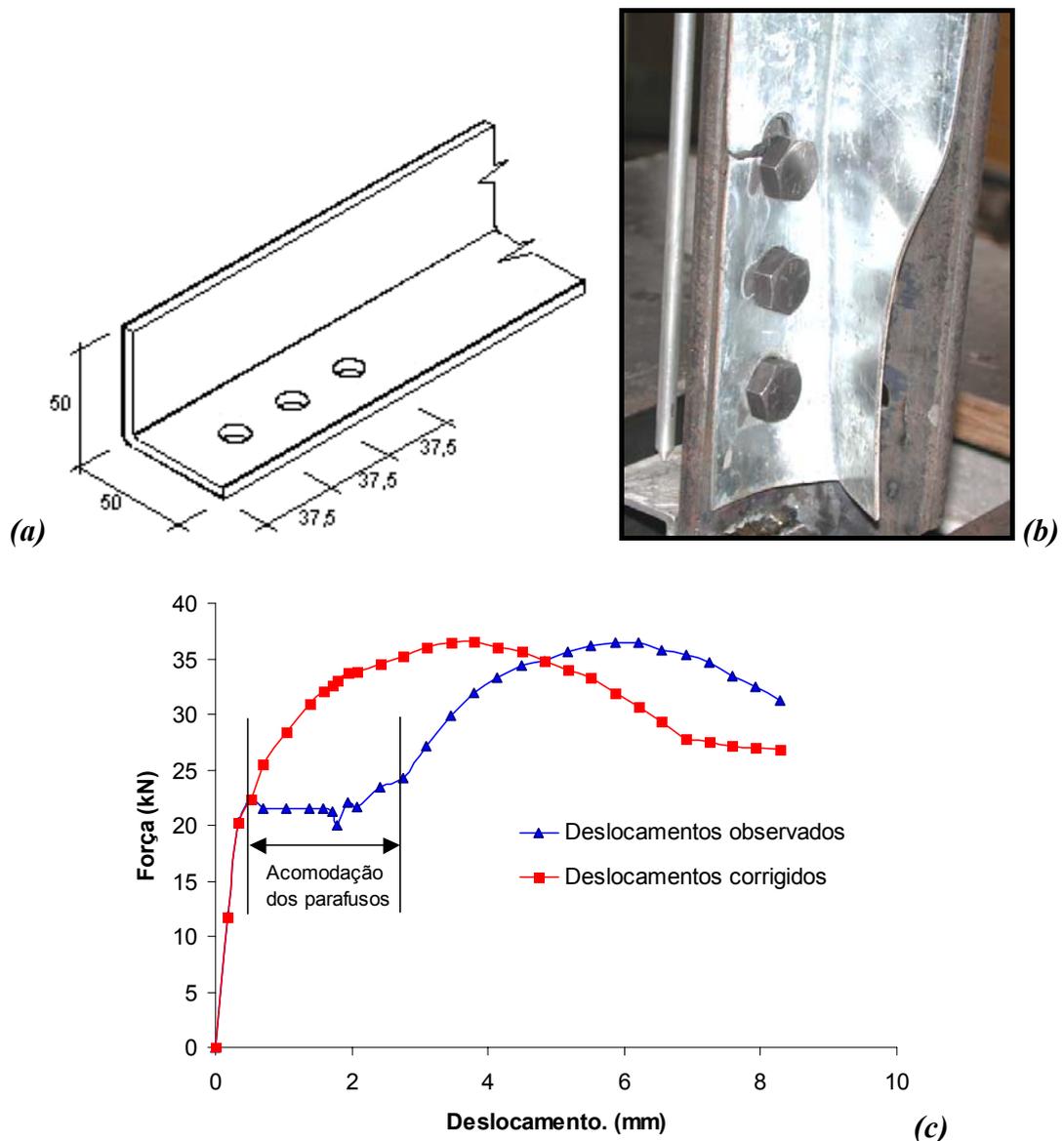
Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *esmagamento da parede do furo*, figura 3.9b, com força última igual a 36,32 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 11,69 mm, conforme apresentado na figura 3.9c.

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos C2A1, C2A2 e C2A3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45, SOLID 95 e SOLID 185, respectivamente. A figura 3.9 foi elaborada com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).

### 3.3.2.4 Modelos numéricos de ligação em perfil cantoneira com três parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo cantoneira de abas iguais (L 50x50x1,55 mm), conectada por uma das abas e composta por aço ZAR 345.

Apresenta três parafusos alinhados na direção da força aplicada, com furos de diâmetro 14,5 mm, localizados no centro da aba conectada, com espaçamentos entre centros de furos e, entre centro de furo e borda, igual a 37,5 mm, conforme figura 3.10a.

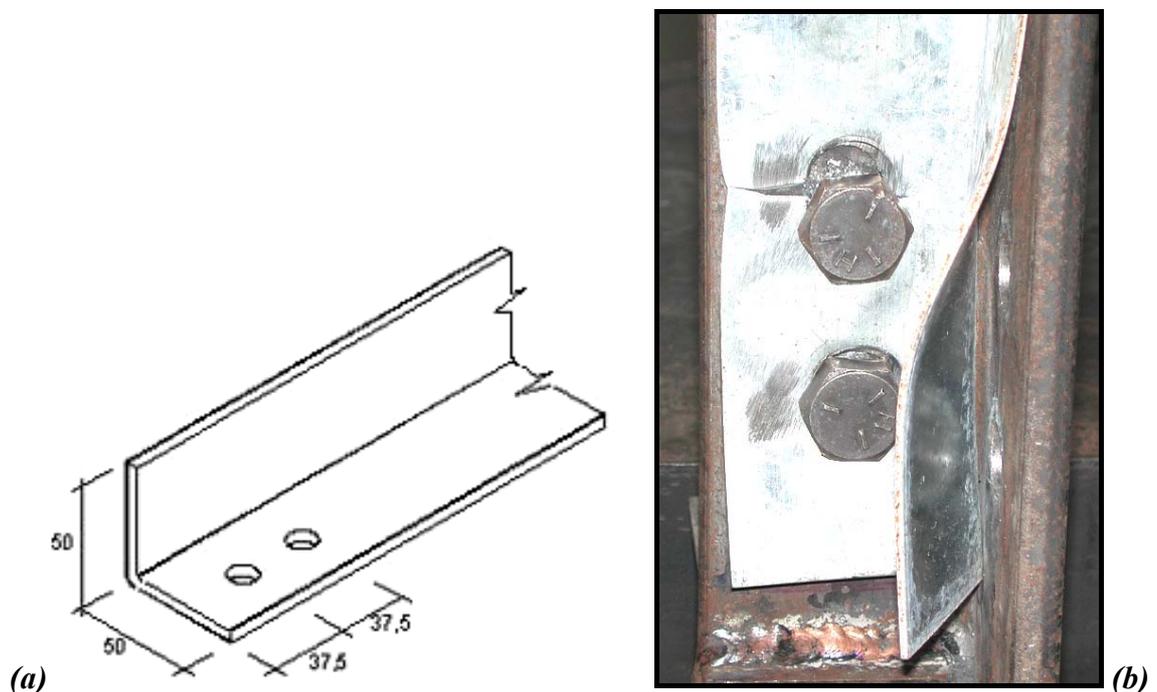


**Figura 3.10**– Ligação parafusada em perfil cantoneira com três parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio e  
**(c)** Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.10b, com força última igual a 36,5 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 10,7 mm, conforme figura 3.10c. Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos LI1C1 e LI1C3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. A figura 3.10 foi elaborada com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).

### 3.3.2.5 Modelos numéricos de ligação em perfil cantoneira com dois parafusos.

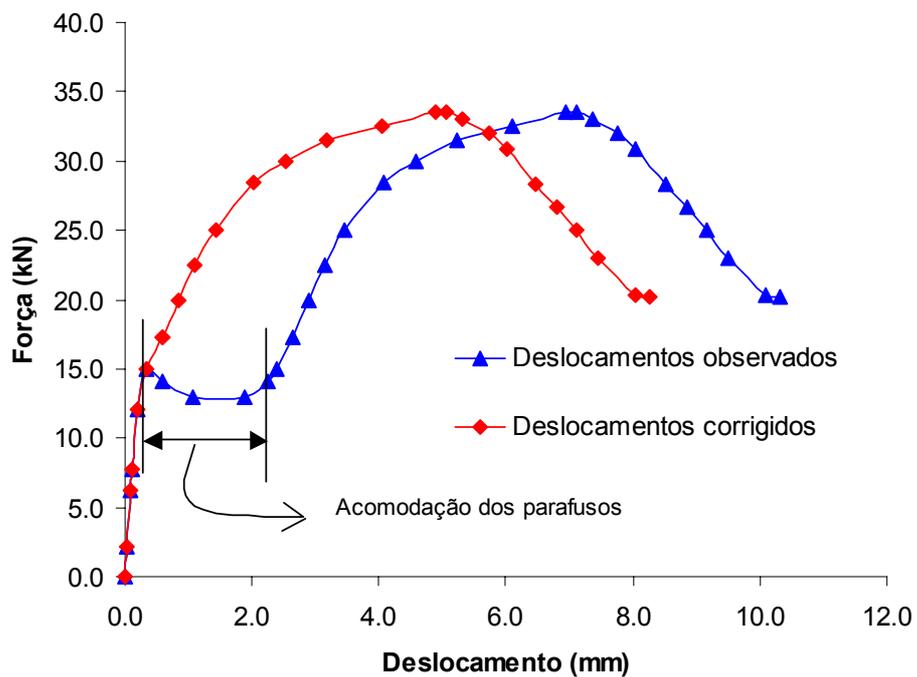
Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo cantoneira de abas iguais (L 50x50x1,55 mm), idêntica à ligação apresentada no item 3.3.2.4, diferindo apenas quanto ao número de parafuso. Esta ligação apresenta dois parafusos alinhados na direção da força aplicada, como mostra a figura 3.11a.



**Figura 3.11** – Ligação parafusada em perfil cantoneira com dois parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.11b, com força última igual a 33,5 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 10,3 mm, conforme figura 3.12.

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos LI1B1 e LI1B3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. As figuras 3.11 e 3.12 foram elaboradas com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).



**Figura 3.12** – Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

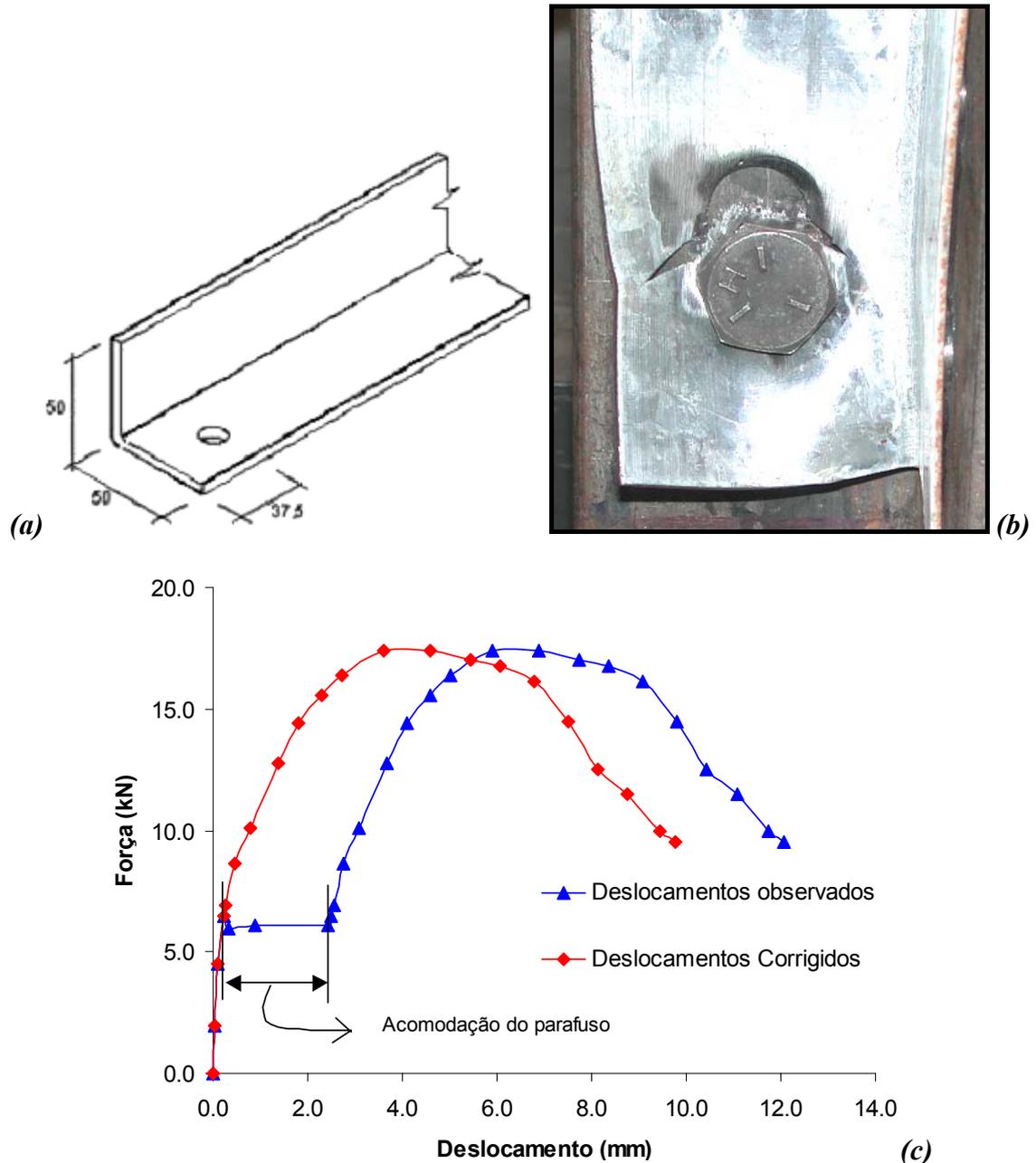
### 3.3.2.6 Modelos numéricos de ligação em perfil cantoneira com um parafuso.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo cantoneira de abas iguais (L 50x50x1,55 mm), idêntica às ligações apresentadas nos itens 3.3.2.4 e 3.3.2.5, diferindo apenas quanto ao número de parafuso. Esta ligação apresenta apenas um parafuso na direção da força aplicada, como mostra a figura 3.13a.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.13b, com força última igual a 17,4 kN e

deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 12,07 mm, conforme figura 3.13c.

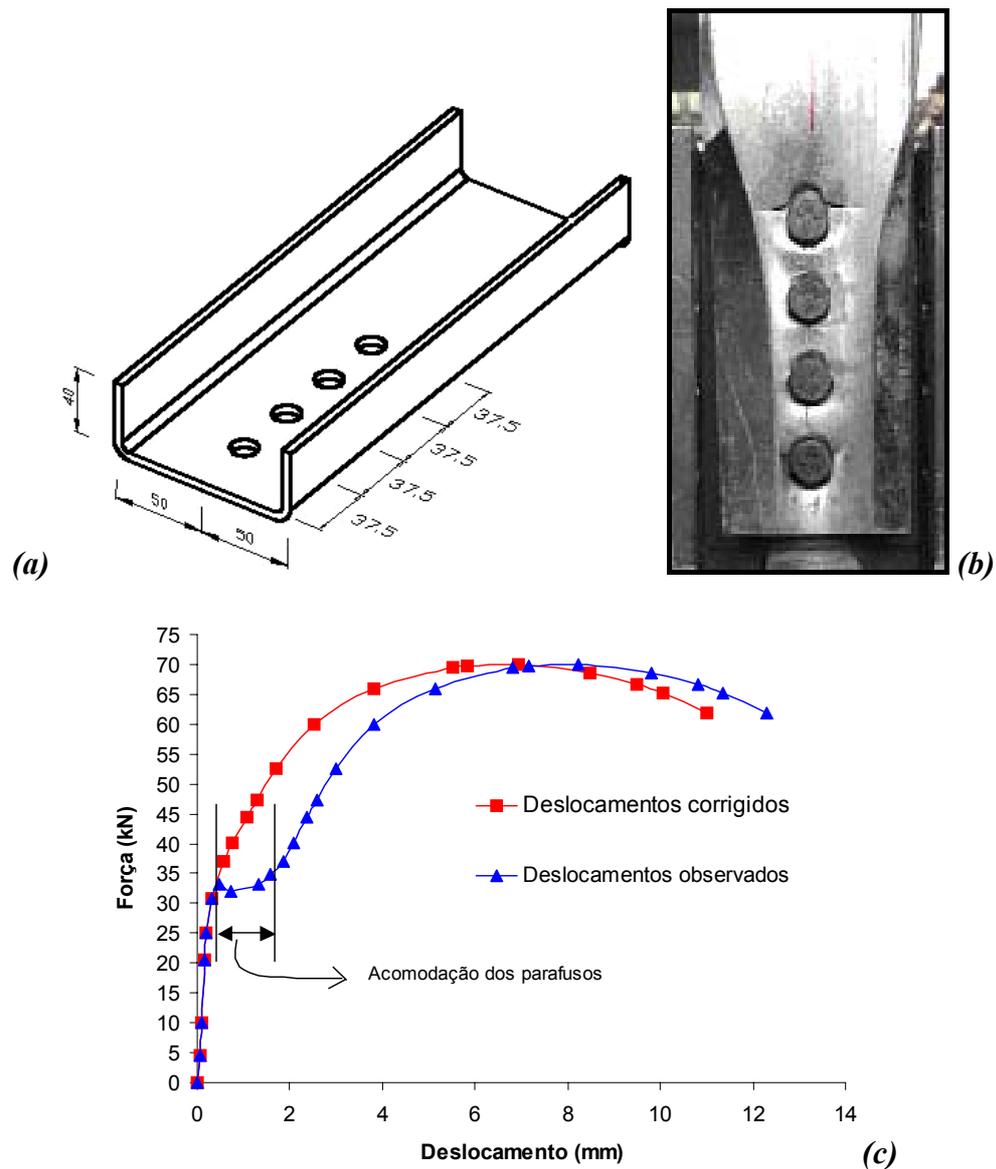
Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos LI1A1 e LI1A3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. A figura 3.13 foi elaborada com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).



**Figura 3.13** – Ligação parafusada em perfil cantoneira com um parafuso  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio e  
**(c)** Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

### 3.3.2.7 Modelos numéricos de ligação em perfil U com quatro parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo U (U 100x40x1,55 mm), conectada pela alma do perfil e composta por aço ZAR 345. Apresenta quatro parafusos alinhados na direção da força, com furos de diâmetro 14,5 mm, localizados no centro da alma, com espaçamentos entre centros de furos  $e$ , entre centro de furo e borda, igual a 37,5 mm, como mostra a figura 3.14a.



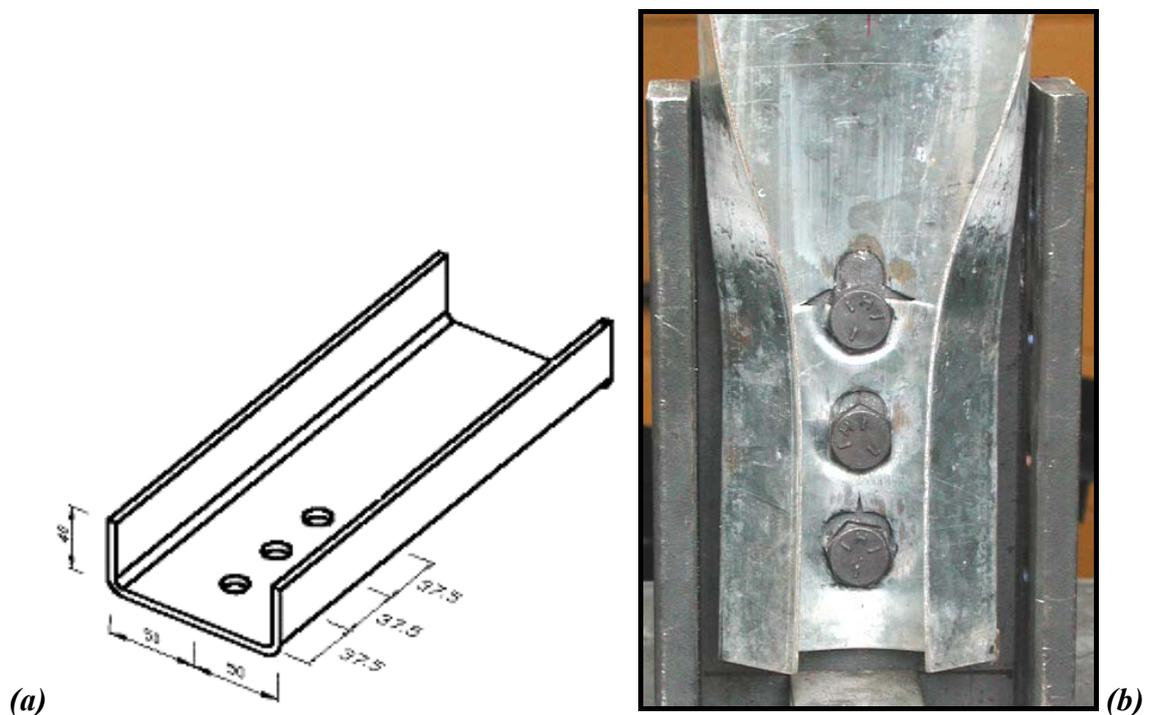
**Figura 3.14** – Ligação parafusada em perfil U com quatro parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio e  
**(c)** Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida*, figura 3.14b, com força última igual a 70,05 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 12,31 mm, conforme ilustra a figura 3.14c.

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos U1D1 e U1D3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. A figura 3.14 foi elaborada com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).

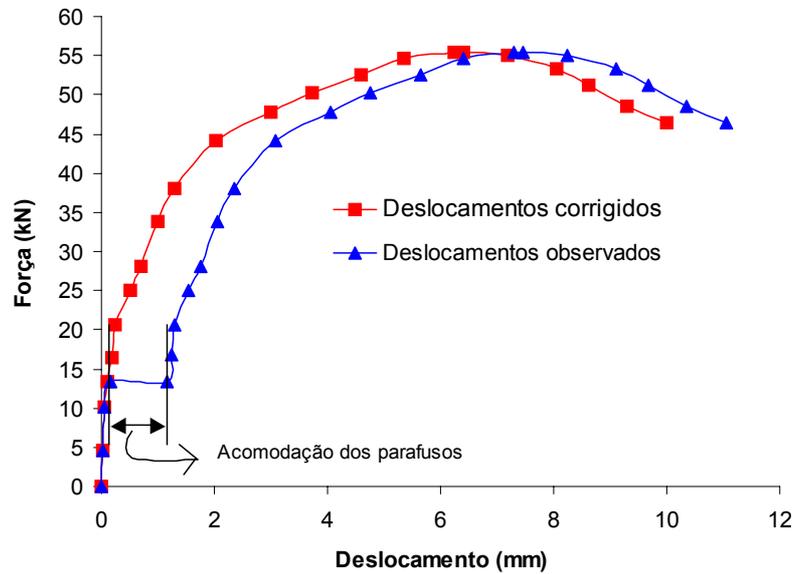
### 3.3.2.8 Modelos numéricos de ligação em perfil U com três parafusos.

Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo U (U 100x40x1,55 mm), idêntica à ligação apresentada no item 3.3.2.7, diferindo apenas quanto ao número de parafusos utilizados. Nesta ligação foram utilizados três parafusos alinhados na direção da força, figura 3.15a.



**Figura 3.15** – Ligação parafusada em perfil U com três parafusos  
(a) Esquema da chapa ensaiada, unidade(mm), (b) Ruptura da ligação no ensaio.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha por *ruptura da seção líquida com esmagamento da borda do furo*, figura 3.15b, com força última igual a 55,40 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 11,05 mm, conforme ilustra a figura 3.16.



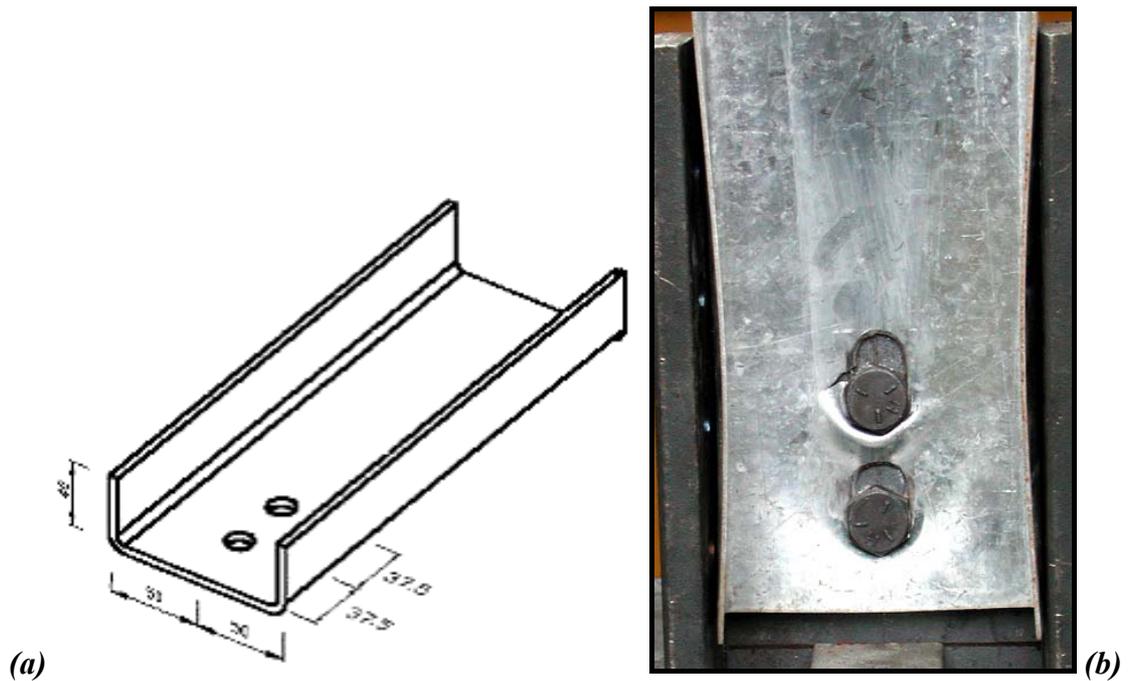
**Figura 3.16** – Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos U1C1 e U1C3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. As figuras 3.15 e 3.16 foram elaboradas com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).

### 3.3.2.9 Modelos numéricos de ligação em perfil U com dois parafusos.

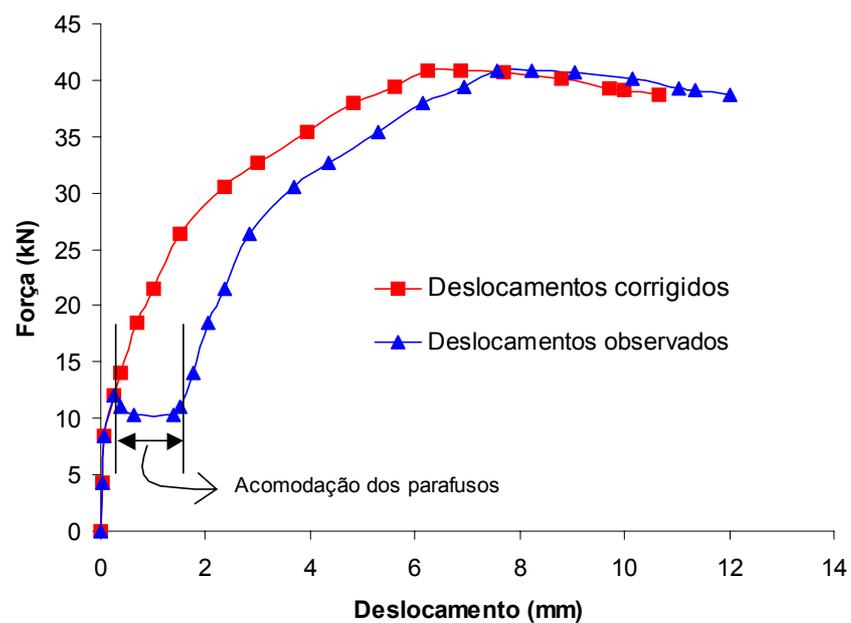
Os modelos aqui analisados consistem de uma ligação parafusada em perfil formado a frio do tipo U (U 100x40x1,55 mm), idêntica às ligações apresentadas nos itens 3.3.2.7 e 3.3.2.8, diferindo apenas quanto ao número de parafusos utilizados. Nesta ligação foram utilizados dois parafusos alinhados na direção da força, conforme mostra a figura 3.17a.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha *por esmagamento da borda do furo, com início de ruptura da seção líquida*, figura 3.17b, com força última igual a 40,82 kN e deslocamento total, incluindo acomodação dos parafusos no furo, igual a 12,02 mm, figura 3.18.



**Figura 3.17** – Ligação parafusada em perfil U com dois parafusos  
**(a)** Esquema da chapa ensaiada, unidade (mm), **(b)** Ruptura da ligação no ensaio e

Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos U1B1 e U1B3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente. As figuras 3.17 e 3.18 foram elaboradas com base em dados e informações apresentadas em MAIOLA (2004).

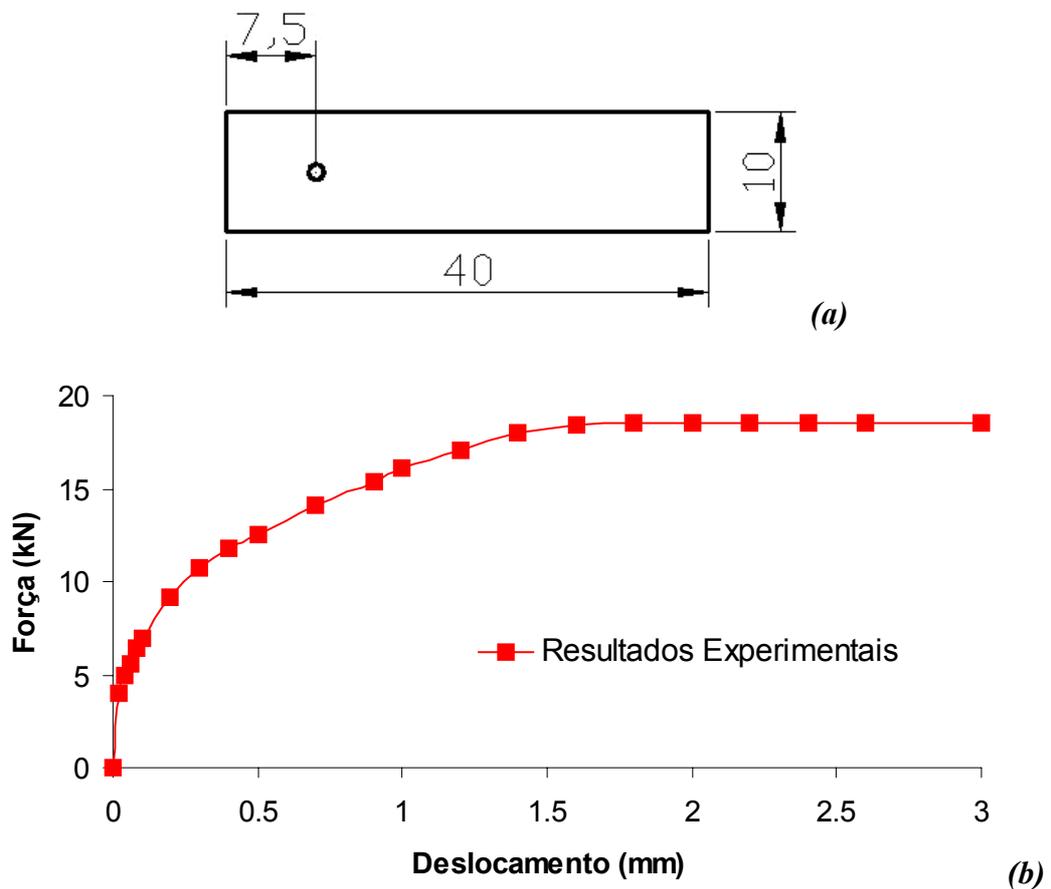


**Figura 3.18** – Diagrama *Força x Deslocamento* obtido no modelo experimental.

### 3.3.2.10 Modelo numérico de ligação em chapa com um parafuso apresentado em CHUNG & IP (2000)

O modelo aqui analisado consiste de uma ligação parafusada em chapa fina, com espessura de 1,5 mm, conectada à uma chapa rígida por meio de um parafuso de diâmetro igual a 12mm, figura 3.19a.

Na análise experimental, esta configuração apresentou modo de falha *por esmagamento da borda do furo*, com força última igual a 18,78 kN e deslocamento total, igual a 3,00 mm, figura 3.19b. Essa ligação foi simulada numericamente por meio dos modelos C2bA1 e C2bA3, utilizando-se elementos finitos dos tipos SOLID 45 e SOLID 185, respectivamente.



**Figura 3.19** – Ligação parafusada em chapa fina com um parafuso

(a) Esquema da chapa ensaiada e (b) Diagrama Força x Deslocamento obtido no modelo experimental.

O gráfico apresentado na figura 3.18b, foi construído com base em dados retirado de CHUNG & IP (2000). Diferentemente das ligações ensaiadas e apresentadas em MAIOLA (2004), esta não apresentou acomodação do parafuso. Na referência, o autor não faz nenhum comentário quanto a esta possível acomodação do parafuso no furo.

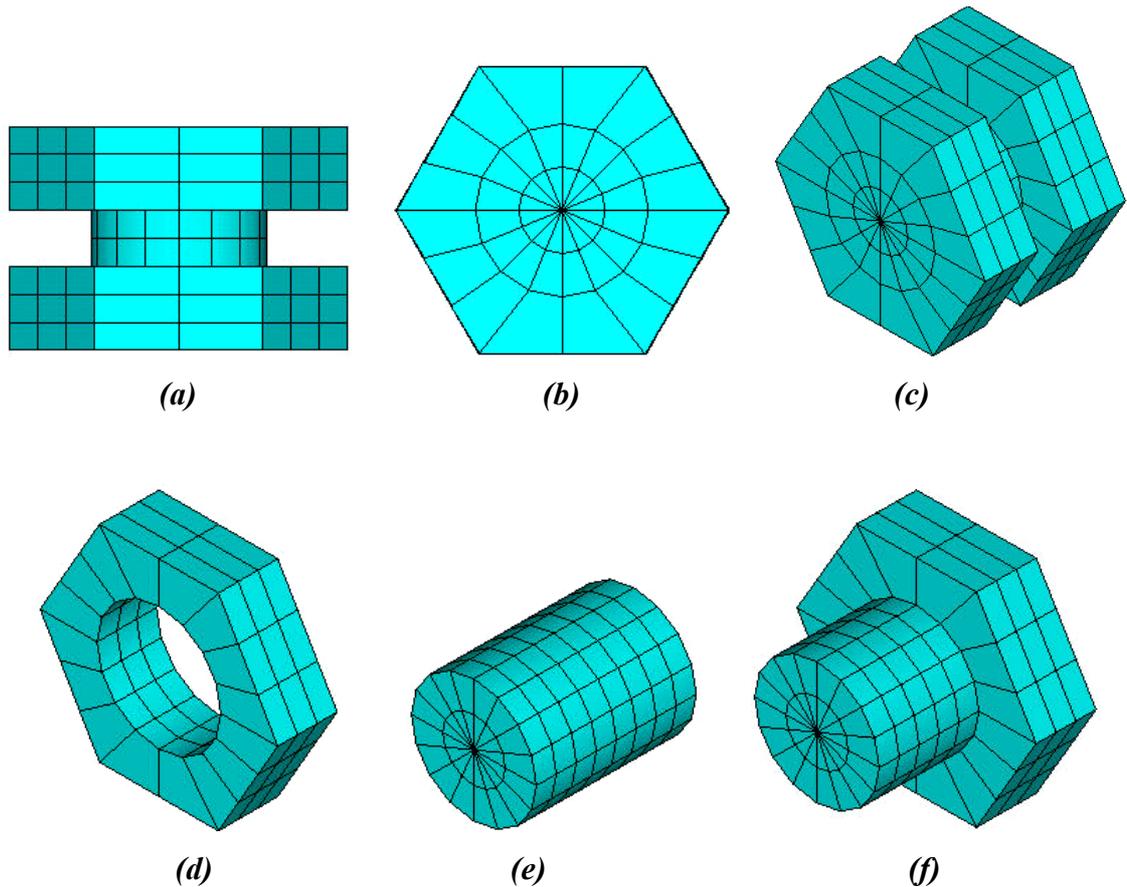
### **3.3.3 Definição das malhas discretizadas em elementos finitos para os modelos numéricos**

Os modelos construídos com vistas à análise numérica são constituídos por elementos que formam os perfis, as chapas, os parafusos e as porcas, bem como o contato entre os componentes das ligações. As figuras que se seguem apresentam a discretização, em elementos finitos, dos componentes citados anteriormente.

Com o objetivo de simplificar os modelos, o fuste e a cabeça do parafuso, bem como a porca, foram considerados todos como sendo um só corpo, ou seja, a porca foi considerada solidarizada ao fuste do parafuso, resultando em um parafuso com duas cabeças fixas. É importante salientar que os parafusos e as porcas, utilizados nas ligações, foram todos discretizados da mesma maneira.

A figura 3.20 apresentada a seguir, ilustra detalhadamente a discretização do parafuso em elementos finitos. Nessa mesma figura, são apresentadas uma vista lateral do parafuso com as respectivas cabeça e porca (figura 3.20a), uma vista frontal da cabeça do parafuso ilustrando a sua discretização em elementos finitos (figura 3.20b) e uma vista em perspectiva do parafuso com sua cabeça e porca acopladas (figura 3.20c).

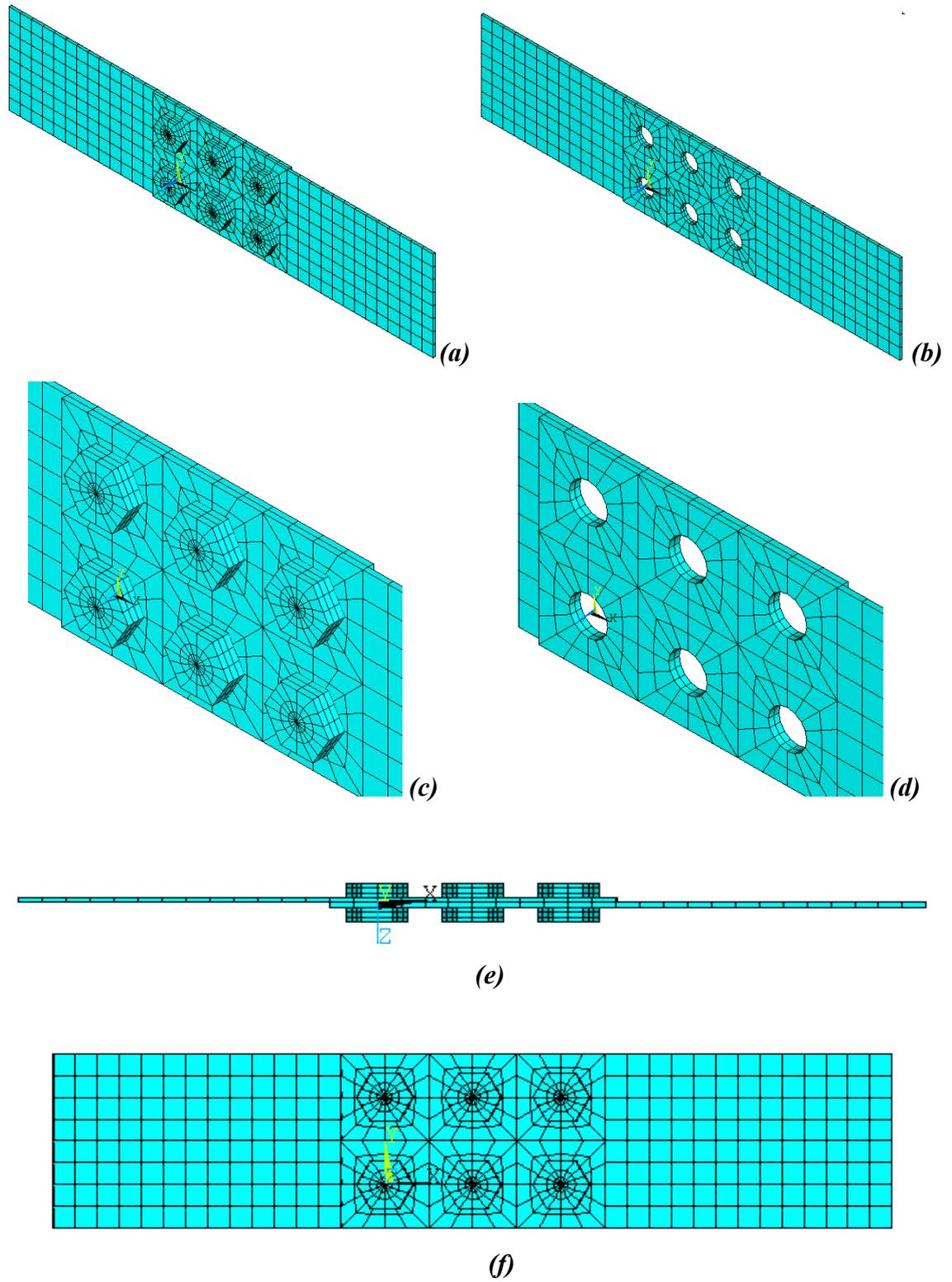
Ainda, nesta mesma figura, são apresentadas uma vista isométrica da porca isolada (figura 3.20d), uma vista ilustrando o fuste do parafuso (figura 3.20e) e uma vista em perspectiva do parafuso sem a porca (figura 3.20f), onde pode-se perceber claramente a coincidência dos nós do fuste com os nós da cabeça do parafuso.



**Figura 3.20** – Discretização dos parafusos e porcas em elementos finitos.

A figura 3.21 apresentada a seguir ilustra detalhadamente a discretização das chapas dos modelos C2C1 e C2C3, em elementos finitos. É importante destacar que, mesmo variando o tipo de elemento finito (SOLID 45, SOLID 95 ou SOLID 185), o padrão de discretização utilizado foi sempre o mesmo.

Nesta figura estão apresentadas duas vistas isométricas do modelo, uma com os parafusos e as chapas (figura 3.21) e outra sem os parafusos (figura 3.21b). Nesta mesma figura, estão apresentadas, em detalhe, duas vistas isométricas da região da ligação, com os parafusos (figura 3.21c) e sem os parafusos (figura 3.21d). Apresenta ainda, uma vista geral lateral (figura 3.21e) e outra vista geral em planta dos modelos em questão (figura 3.21f).

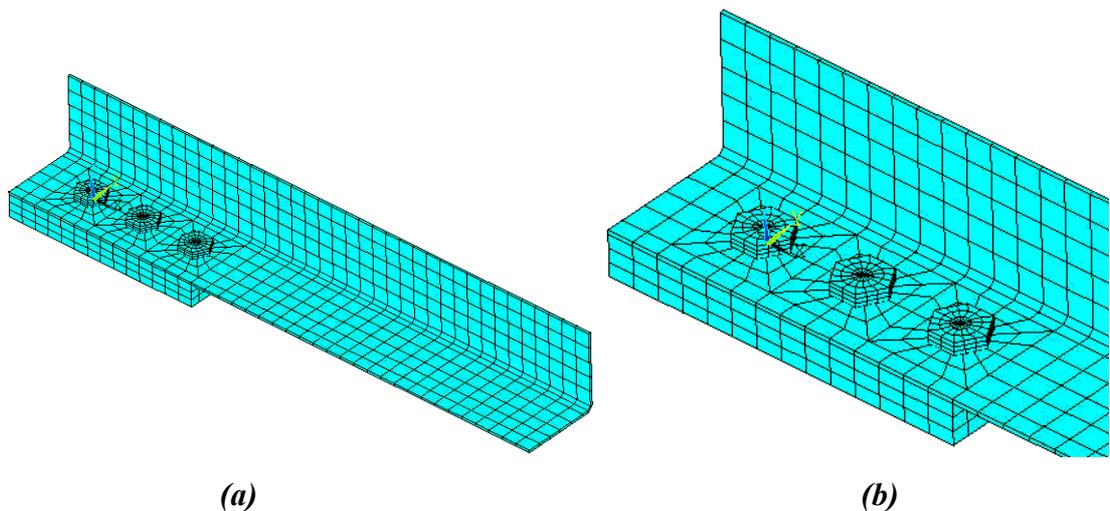


**Figura 3.21** – Discretização das chapas dos modelos numéricos denominados C2C1 e C2C3, em elementos finitos.

Vale ressaltar que, a discretização dos modelos de chapas C2B1, C2B3, C2A1, C2A2, e C2A3, é idêntica àquela adotada para os modelos C2C1 e C2C3, diferindo apenas na quantidade de parafusos utilizados nas ligações, como já mencionado anteriormente, razão pela qual não serão aqui apresentadas.

Os modelos de ligações parafusadas em perfis formados a frio do tipo cantoneira (LI1A1, LI1A3, LI1B1, LI1B3, LI1C1 e LI1C3), foram todos discretizados da mesma maneira. Por esta razão, será apresentada a seguir na figura 3.22, apenas a discretização geral dos modelos LI1C1 e LI1C3.

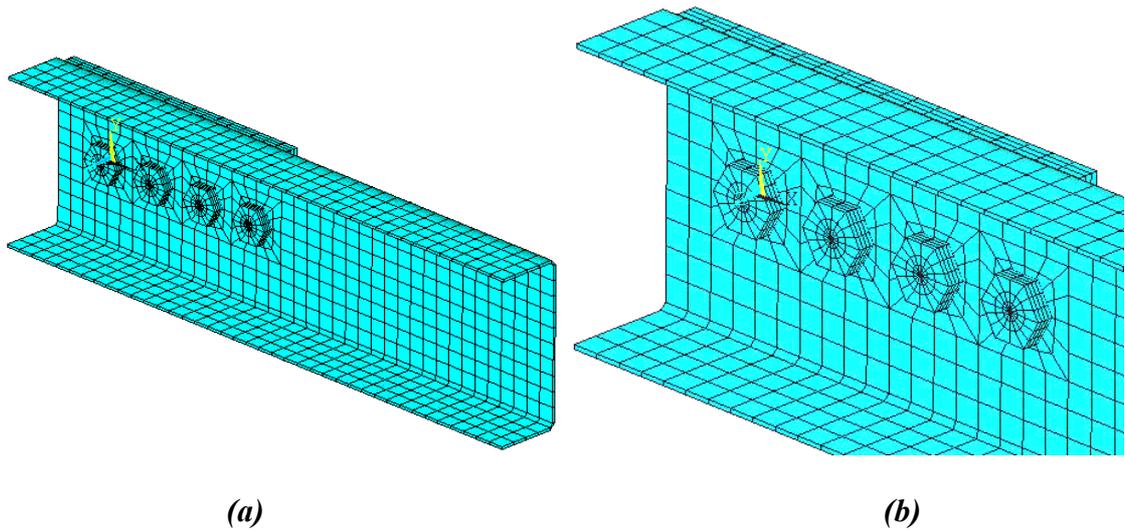
A figura 3.22a apresenta uma vista geral isométrica da discretização em elementos finitos destes modelos. Pode-se perceber que o perfil foi conectado a uma chapa rígida por meio de três parafusos alinhados na direção da força, conforme já descrito anteriormente no item 3.2.2. A figura 3.22b apresenta uma vista isométrica, em detalhe, apenas da região onde estão localizados os parafusos.



**Figura 3.22** – Discretização dos modelos numéricos denominados LI1C1 e LI1C3 em elementos finitos.

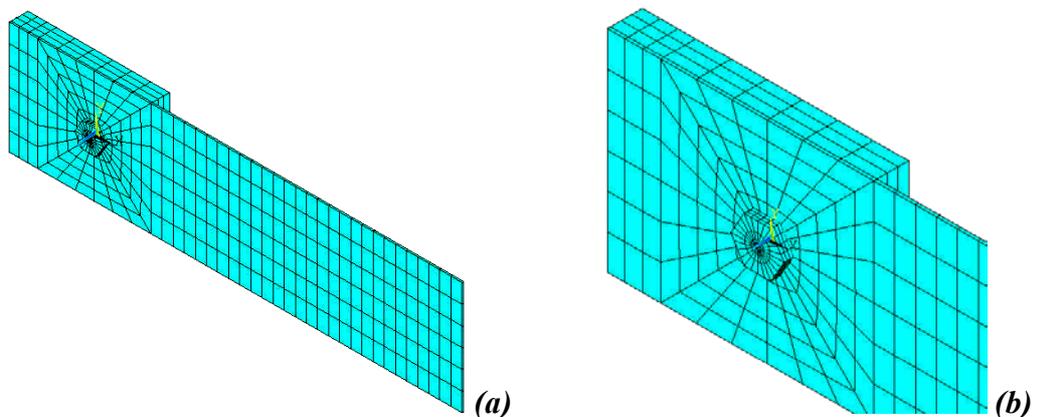
A discretização dos modelos de ligação em perfis U foi realizada de maneira análoga àquela adotada para os modelos em perfis cantoneira. Os modelos U1A1, U1A3, U1B1, U1B3, U1C1 e U1C3, foram todos discretizados seguindo o mesmo padrão de discretização. Dessa maneira, será apresentada a seguir, na figura 3.23, apenas a discretização dos modelos U1D1 e U1D3.

A figura 3.23a apresenta uma vista geral isométrica da discretização em elementos finitos destes modelos. Na mesma figura, pode-se perceber que o perfil foi conectado a uma chapa rígida por meio de quatro parafusos alinhados na direção da força, conforme já descrito anteriormente no item 3.2.2. A figura 3.23b apresenta uma vista isométrica, em detalhe, apenas da região onde estão localizados os parafusos.



**Figura 3.23** – Discretização dos modelos numéricos denominados U1D1 e U1D3 em elementos finitos.

Os modelos C2bA1 e C2bA3, construídos com base em dados obtidos em Chung & Ip (2000), foram discretizados como mostra a figura 3.24. Nesta figura está apresentada uma vista geral isométrica da discretização em elementos finitos dos modelos (figura 3.24a) e uma vista isométrica, em detalhe, apenas da região onde está localizado o parafuso (figura 3.24b).

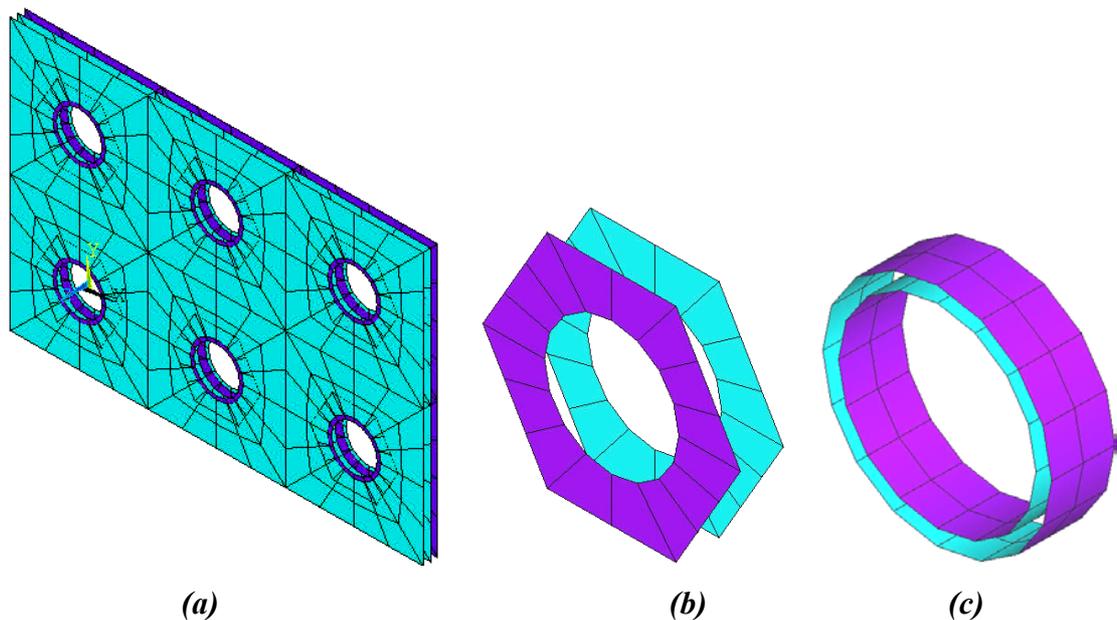


**Figura 3.24** – Discretização dos modelos C2bA1 e C2bA3 em elementos finitos.

O contato entre os elementos das ligações foi estabelecido utilizando-se os elementos CONTACT 174 e TARGET 170, adequados para esta finalidade. Estes dois tipos de elementos finitos de contato foram utilizados em todos os modelos analisados, sendo aplicados em todas as partes onde havia o contato direto entre as partes da ligação, ou seja, entre o fuste do parafuso e a borda do furo, entre a face do perfil ou chapa e a face da cabeça ou porca do parafuso, e também entre duas chapas adjacentes.

A figura 3.25 apresentada a seguir, ilustra a discretização dos elementos finitos de contato utilizados nos modelos C2C1 e C2C3. Nesta figura está apresentada uma vista geral isométrica dos elementos de contato localizados na interface entre as chapas, entre a chapa e a face da cabeça do parafuso, e entre a chapa e a face da porca do parafuso (figura 3.25a).

Nesta mesma figura, apresentam-se uma vista isométrica ilustrando, em detalhe, apenas os elementos de contato das faces da cabeça e porca do parafuso (figura 3.25b) e uma vista isométrica ilustrando, em detalhe, os elementos de contato da interface entre o fuste do parafuso e a parede do furo na chapa (figura 3.25c).



**Figura 3.25** – Discretização dos elementos de contato utilizados nos modelos numéricos denominados C2C1 e C2C3.

Nos demais modelos, o contato entre os elementos da ligação foi estabelecido de maneira análoga àquela adotada para os modelos numéricos C2C1 e C2C3. Por esta razão, não serão aqui apresentados.

### 3.3.4 Condições de contorno e de carregamento

Para os modelos numéricos apresentados nos itens anteriores, com exceção dos modelos C2bA1 e C2bA3, as condições de contorno e de carregamento foram adotadas em concordância com aquelas estabelecidas nos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, cujos resultados estão apresentados em MAIOLA (2004).

Nestes ensaios experimentais, os corpos-de-prova de ligações parafusadas foram ensaiados a corte simples e tiveram os deslocamentos relativos na região da ligação medidos por transdutores de deslocamentos, posicionados com base de medida inicial igual a 375 mm. Com vistas a facilitar a comparação dos resultados referentes aos deslocamentos, os modelos numéricos foram também construídos com 375 mm de comprimento.

Não foram utilizadas nos ensaios experimentais arruelas junto à porca e à cabeça dos parafusos. Por esta razão, nos modelos numéricos o uso de arruelas junto à cabeça e à porca dos parafusos foi também desconsiderado.

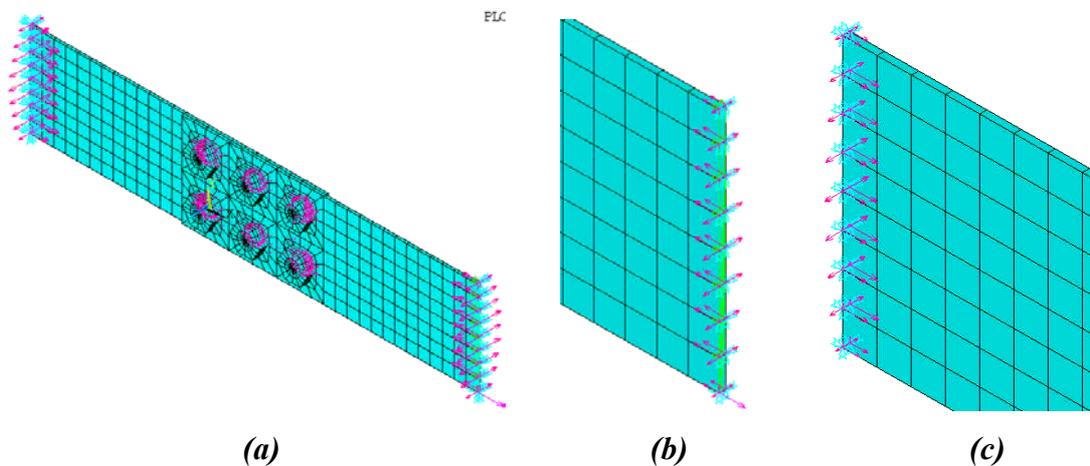
#### 3.3.4.1 Modelos de ligação em chapa

Neste trabalho, foram analisados três tipos de ligações parafusadas em chapa fina e, para cada tipo, foram construídos dois ou três modelos, conforme já descrito anteriormente no item 3.3.2. Em todos estes modelos (C2C1 e C2C3, C2B1 e C2B3, C2A1, C2A2 e C2A3), as condições de contorno e carregamento consideradas foram sempre as mesmas.

Nestes modelos, uma das extremidades da chapa foi fixada restringindo-se as translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais). Para a outra extremidade, foram restringidas apenas as translações nas direções Y e Z, deixando livre a translação em X.

Na extremidade da chapa onde a translação na direção X é livre, foi imposto um deslocamento igual a 10 mm, por meio de procedimento incremental-iterativo. Nesta mesma extremidade, os deslocamentos na direção X foram acoplados de forma que todos os pontos da seção apresentassem os mesmos deslocamentos.

A figura 3.26 ilustra as condições de contorno e de carregamento aplicadas para os modelos em chapas. Nesta mesma figura apresentam-se uma vista geral das condições de contorno e de carregamento (figura 3.26a), uma ampliação da extremidade mostrando a aplicação do carregamento e as restrições aos deslocamentos nas direções Y e Z e o acoplamento dos deslocamentos na direção X (figura 3.26 b), bem como uma ampliação da outra extremidade, mostrando as restrições aos deslocamentos nas direções X, Y e Z (figura 3.26c).



**Figura 3.26** – Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em chapa C2C1, C2C3, C2B1, C2B3, C2A1, C2A2 e C2A3.

### 3.3.4.2 Modelos de ligação em perfil cantoneira

Foram analisados três tipos de ligações parafusadas em perfis cantoneira e, para cada tipo, foram construídos dois modelos. Em todos estes modelos (LI1A1, LI1A3, LI1B1, LI1B3, LI1C1 e LI1C3), as condições de contorno e carregamento consideradas foram sempre as mesmas.

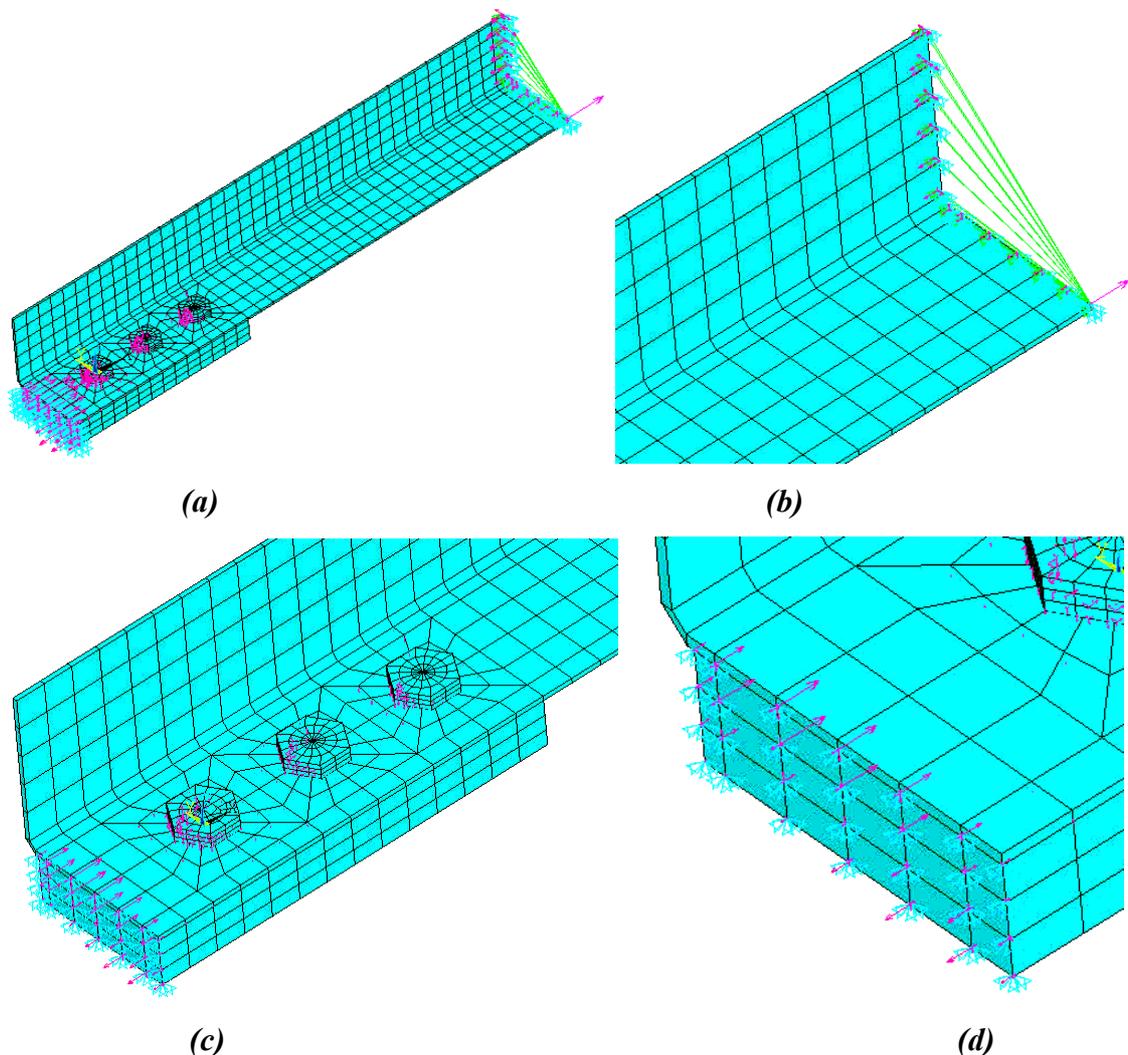
Nesses modelos, o perfil foi conectado por uma de suas extremidades a uma chapa rígida por meio de um, dois ou três parafusos. Nesta extremidade, foi imposta à chapa rígida restrições nas direções X, Y e Z (coordenadas globais).

Na outra extremidade do perfil, foram restringidas as translações nas direções Y e Z, deixando livre a translação na direção X. Nesta mesma extremidade, foram acoplados os deslocamentos na direção X, de forma que toda a seção apresentasse os

mesmos deslocamentos. Foi imposto, nesta direção X, um deslocamento igual a 10 mm, por meio de procedimento incremental-iterativo.

A figura 3.27 ilustra as condições de contorno e de carregamento aplicadas para estes modelos. Nesta mesma figura apresentam-se uma vista geral das condições de contorno e de carregamento (figura 3.27a) e uma ampliação da extremidade mostrando a aplicação do carregamento e as restrições aos deslocamentos nas direções Y e Z, bem como o acoplamento dos deslocamentos na direção X (figura 3.27b).

Apresenta ainda uma ampliação da outra extremidade, mostrando as restrições aos deslocamentos nas direções X, Y e Z (coordenadas globais), imposta à chapa rígida (figuras 3.27c e 3.27d).



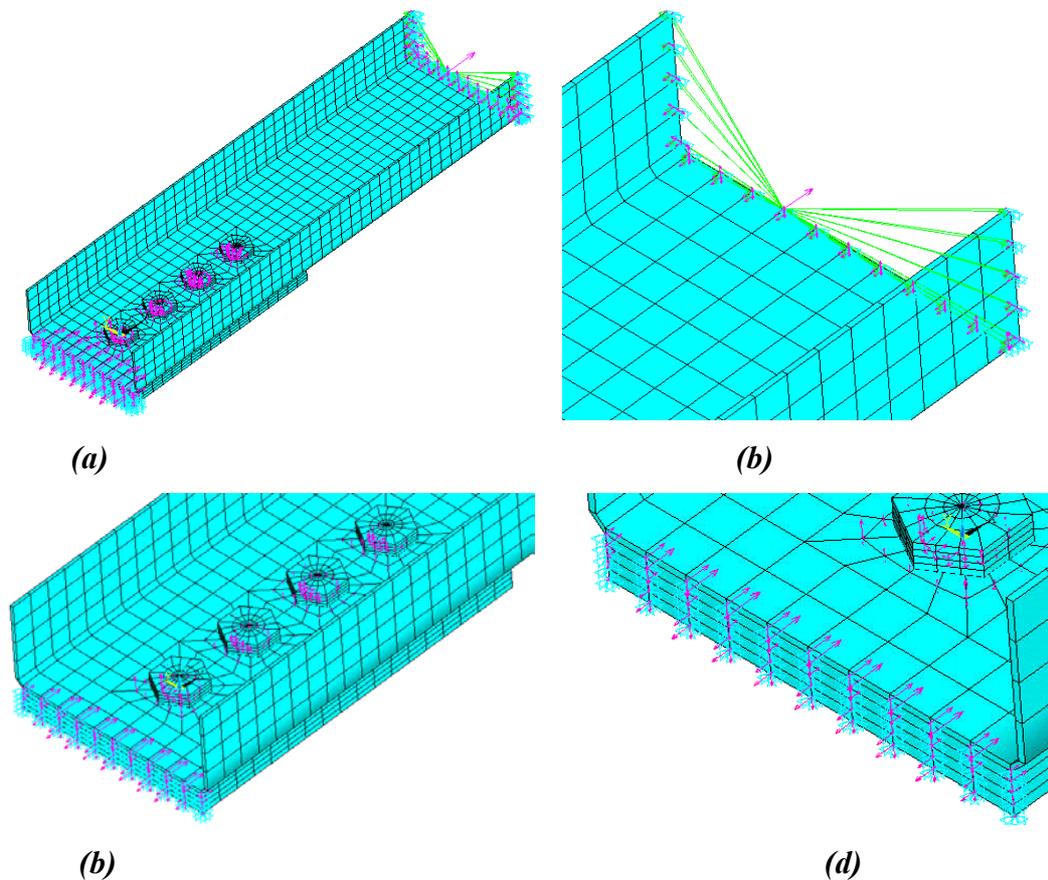
**Figura 3.27** – Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em cantoneira LI1A1, LI1A3, LI1B1, LI1B3, LI1C1 e LI1C3.

### 3.3.4.3 Modelos de ligação em perfil U

Foram analisados três tipos de ligações parafusadas em perfis U e, para cada tipo, foram construídos dois modelos. Em todos estes modelos (U1A1, U1A3, U1B1, U1B3, U1C1 e U1C3), as condições de contorno e carregamento consideradas foram sempre as mesmas.

A figura 3.28 ilustra as condições de contorno e de carregamento adotadas para estes modelos. Nesta mesma figura apresentam-se uma vista geral das condições de contorno e de carregamento (figura 3.28a) e uma ampliação da extremidade mostrando a aplicação do carregamento e as restrições aos deslocamentos nas direções Y e Z, bem como o acoplamento dos deslocamentos na direção X (figura 3.28b).

Apresenta ainda uma ampliação da outra extremidade, mostrando as restrições aos deslocamentos nas direções X, Y e Z (coordenadas globais), imposta à chapa rígida (figuras 3.28c e 3.28d).



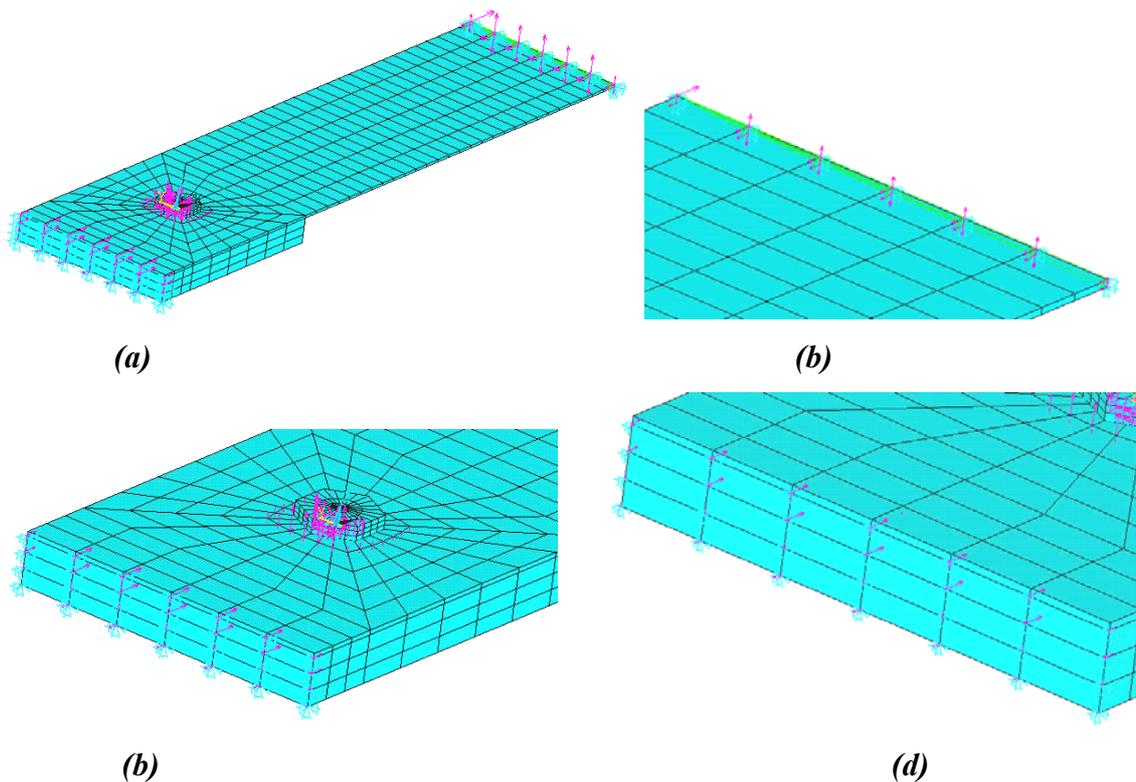
**Figura 3.28** – Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos em perfis U U1A1, U1A3, U1B1, U1B3, U1C1 e U1C3

### 3.3.4.4 Modelos de ligação em chapa construídos com base em dados apresentados em CHUNG & IP (2000)

Para os modelos C2bA1 e C2bA3, as condições de contorno foram as mesmas aplicadas para as ligações em cantoneira e perfis U, diferindo apenas no carregamento aplicado. Na extremidade em que a translação na direção X está livre, foi imposto um deslocamento igual a 0,3 cm por meio de procedimento incremental-iterativo.

A figura 3.29 ilustra as condições de contorno e de carregamento aplicadas para estes modelos. Nesta mesma figura apresentam-se uma vista geral das condições de contorno e de carregamento (figura 3.29a) e uma ampliação da extremidade mostrando a aplicação do carregamento e as restrições aos deslocamentos nas direções Y e Z, bem como o acoplamento dos deslocamentos na direção X (figura 3.29b).

Apresenta ainda uma ampliação da outra extremidade, mostrando as restrições aos deslocamentos nas direções X, Y e Z (coordenadas globais), imposta à chapa rígida (figuras 3.29c e 3.29d).



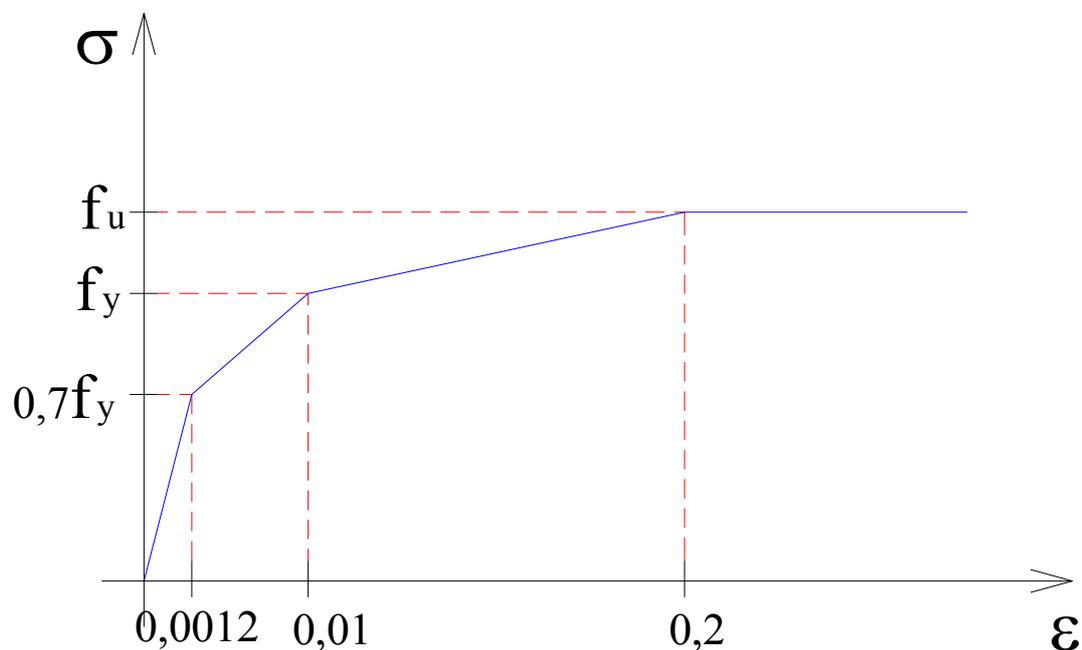
**Figura 3.29** – Condições de contorno e de carregamento para os modelos numéricos C2bA1 e C2bA3.

### 3.4 *RELAÇÃO CONSTITUTIVA ADOTADA PARA O AÇO*

Para o presente estudo, foi adotada uma relação constitutiva considerando a não linearidade do material. Admitiu-se para o aço, uma relação entre tensão e deformação (diagrama tensão x deformação) do tipo trilinear.

Com vistas a facilitar a análise, esta relação constitutiva foi aplicada a todos os componentes do modelo, ou seja, para as chapas, perfis, parafusos e porcas. Esta simplificação pode ser justificada, considerando o fato de que as deformações ocorridas nos parafusos e porcas, são insignificantes quando comparadas às deformações ocorridas nas chapas e perfis, sendo estas últimas deformações o objeto principal de estudo deste trabalho.

A figura 3.30 apresenta o diagrama tensão x deformação adotada nesta análise. Este diagrama é representado por um trecho inicial elástico-linear, com módulo de elasticidade  $E = 20500 \text{ kN/cm}^2$ , para níveis de tensões variando entre zero e a tensão de proporcionalidade do aço ( $f_p$ ), aqui adotada igual a 70% da resistência ao escoamento do aço, ou seja,  $f_p = 0,7f_y$ .



**Figura 3.30** – Representação gráfica do diagrama Tensão x Deformação adotado.

Após o material atingir a tensão de proporcionalidade ( $0,7f_y$ ), a relação tensão x deformação deixa de ter comportamento linear, e o material começa a sofrer deformações plásticas. Como os níveis de tensões verificada nos ensaios foram da ordem da tensão de ruptura do aço ( $f_u$ ), não seria conveniente realizar uma análise apenas linear destas ligações. Por esta razão, a análise em questão foi do tipo não linear.

Com o objetivo de representar a não linearidade do material, para níveis elevados de tensão, foi adotada esta relação constitutiva multilinear. O valor da tensão de proporcionalidade do aço ( $0,7f_y$ ), foi adotado por ser um valor bastante utilizado por pesquisadores e também sugerido em literatura especializada.

É importante salientar que a relação tensão x deformação aplicada ao material, pode ser uma curva composta por vários trechos. O programa ANSYS v6.0 permite a utilização de quantos trechos o usuário desejar. Nesta análise foram utilizados apenas quatro trechos, justificados em virtude dos resultados obtidos serem satisfatórios.

Adotou-se um trecho linear para as tensões variando entre a tensão de proporcionalidade do aço ( $0,7f_y$ ) e a tensão de escoamento do aço ( $f_y$ ), correspondendo a uma deformação  $\epsilon_y$  igual a 0,01. O valor da deformação  $\epsilon_y = 0,01$  foi adotado com o objetivo de calibrar os modelos numéricos. Alguns autores como, por exemplo, Yu (2000), sugerem este valor igual a 0,02.

No entanto, nesta mesma referência, o autor deixa em aberto este valor, no caso de ligações parafusadas. Nestas circunstâncias, sugere-se que para as ligações parafusadas a deformação  $\epsilon_y$  deve ser determinada experimentalmente, uma vez que o comportamento destas ligações ainda não é totalmente conhecido.

Apos o material atingir a tensão de escoamento ( $f_y$ ), admitiu-se outro segmento linear até a tensão de ruptura do material ( $f_u$ ), correspondendo a uma deformação  $\epsilon_u = 0,2$ . Para deformações acima de 0,2, admitiu-se que a tensão permanece constante e a deformação cresce indefinidamente até a ruptura do material.



# ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

CAPÍTULO

# 4

---

## 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Serão apresentados neste capítulo os resultados obtidos por meio de análises numéricas para os modelos de ligações parafusadas em chapa fina de aço e em perfis formados a frio. Como já mencionado anteriormente, para cada tipo de ligação foram construídos dois ou três modelos, variando-se o tipo de elemento finito utilizado. Os resultados numéricos obtidos em cada modelo, para o mesmo tipo de ligação, serão comparados entre si. Serão comparados ainda, com resultados experimentais, uma vez que todos os tipos de ligações modelados nesta análise foram ensaiadas experimentalmente em laboratório.

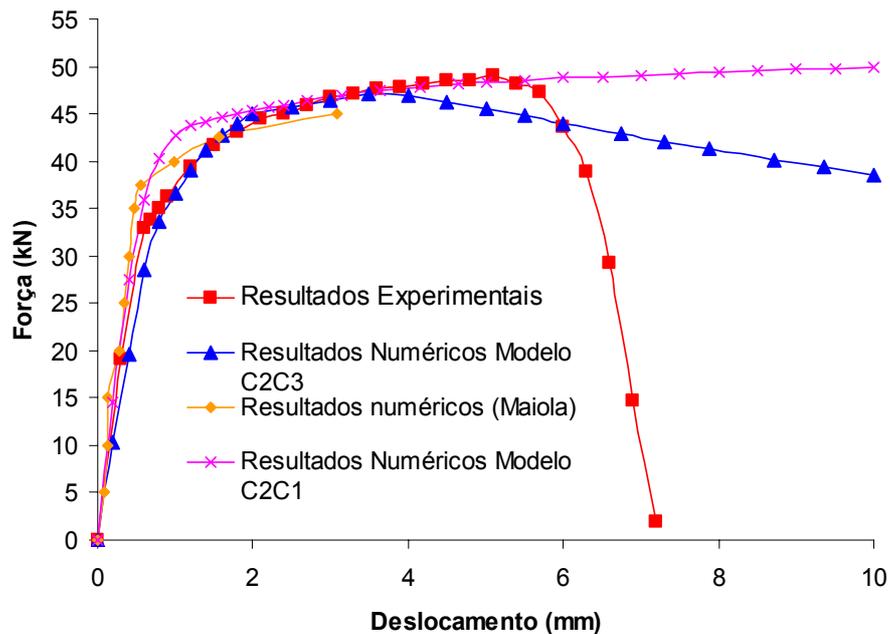
Em todos os modelos analisados, os carregamentos foram aplicados indiretamente na forma de incrementos de deslocamentos. Foram aplicados 4 (quatro) passos de carregamentos, e cada passo foi subdividido em outros 5 (cinco) ou mais subpassos na solução do modelo. Estes subpassos são estabelecidos automaticamente pelo programa ANSYS para que ocorra a convergência dos resultados. Utilizou-se como parâmetro de convergência uma tolerância igual a 0,01.

Em razão da forma adotada para a aplicação dos carregamentos, o procedimento utilizado para a solução do sistema de equações de equilíbrio foi do tipo “*incremental-iterativo*”, em correspondência com o *Método Full-Newton-Raphson* para a solução de problemas não-lineares.

## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Chapas finas

### 4.2.1 Ligação parafusada em chapa fina com três seções de parafusos

Para este tipo de ligação foram construídos dois modelos numéricos, denominados C2C1 e C2C3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais e numéricos apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, conforme apresentado na figura 4.1. Vale salientar que a diferença entre os modelos C2C1 (Elemento Finito SOLID 45) e C2C3 (elemento finito SOLID 185), está apenas no tipo de elemento finito utilizado.



**Figura 4.1** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em chapa fina com três seções de parafusos

É importante salientar que em todos os modelos de chapa analisados, para o trecho final da curva força x deslocamentos a comparação não foi estabelecida, uma vez que no ensaio experimental ocorreu a ruptura da ligação resultando em força nula. Nos modelos numéricos, esse aspecto não pode ser identificado tendo em vista que o

material, mesmo atingindo elevadas tensões que o levam a plastificação, continua respondendo com deslocamentos sempre crescentes. Portanto, nesse caso, a comparação deixa de ter sentido físico.

Ao analisar o gráfico apresentado na figura 4.1, nota-se que no trecho inicial da curva, para valores de deslocamentos menores que 2 mm, o modelo C2C3, apresentou rigidez ao deslocamento um pouco inferior àquela obtida no ensaio experimental, enquanto o modelo C2C1 apresentou rigidez ao deslocamento pouco superior àquela obtida no mesmo ensaio, e muito próxima da rigidez obtida no modelo numérico apresentado em MAIOLA (2004).

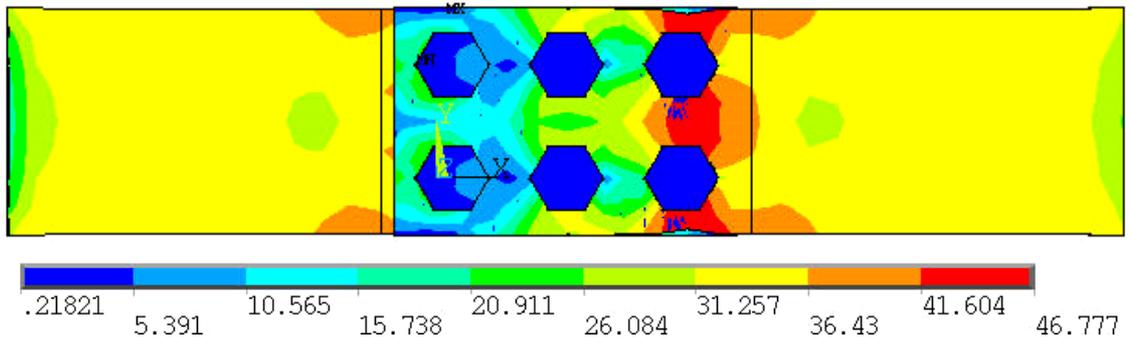
No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 2 mm e 4 mm, observaram-se concordância satisfatória entre os resultados numéricos dos modelos, C2C1 e C2C3, com o resultado experimental. O resultado numérico apresentado em MAIOLA (2004) mostra que o processo de solução do modelo foi interrompido para deslocamentos da ordem de 3 mm por não apresentar convergência.

Para deslocamentos entre 4 mm e 6 mm, os resultados do modelo C2C1 apresentaram boa concordância com o resultado experimental, enquanto que para o modelo C2C3 esta mesma concordância não foi verificada.

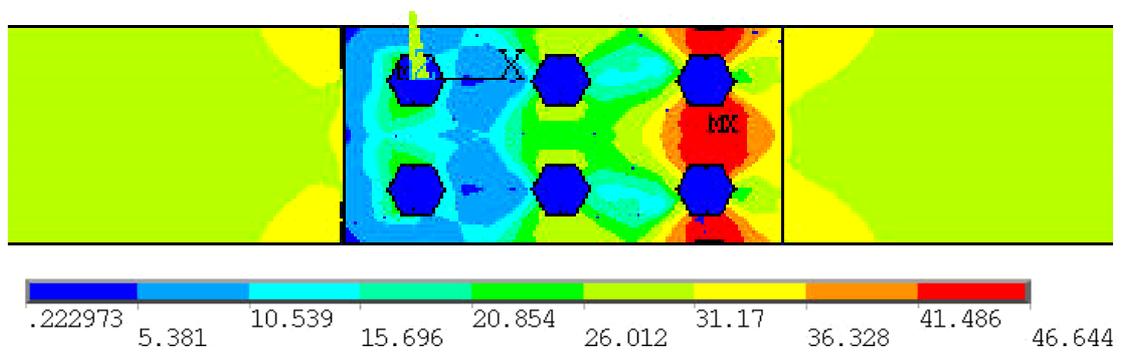
Comparando-se a força última obtida para os quatro casos, nota-se que no modelo numérico C2C1, a força última obtida resultou igual a 49,91 kN, enquanto que no ensaio, esta mesma força resultou igual a 49,01 kN, proporcionando uma diferença da ordem de 2 %. No modelo numérico C2C3, a força última obtida resultou igual a 47,04 kN, proporcionando uma diferença da ordem de 4 % com relação aos resultados experimentais.

No modelo numérico apresentado em MAIOLA (2004), a força última obtida resultou igual a 45,40 kN, com diferença da ordem de 7,4 % entre os resultados obtidos neste modelo e os resultados obtidos experimentalmente.

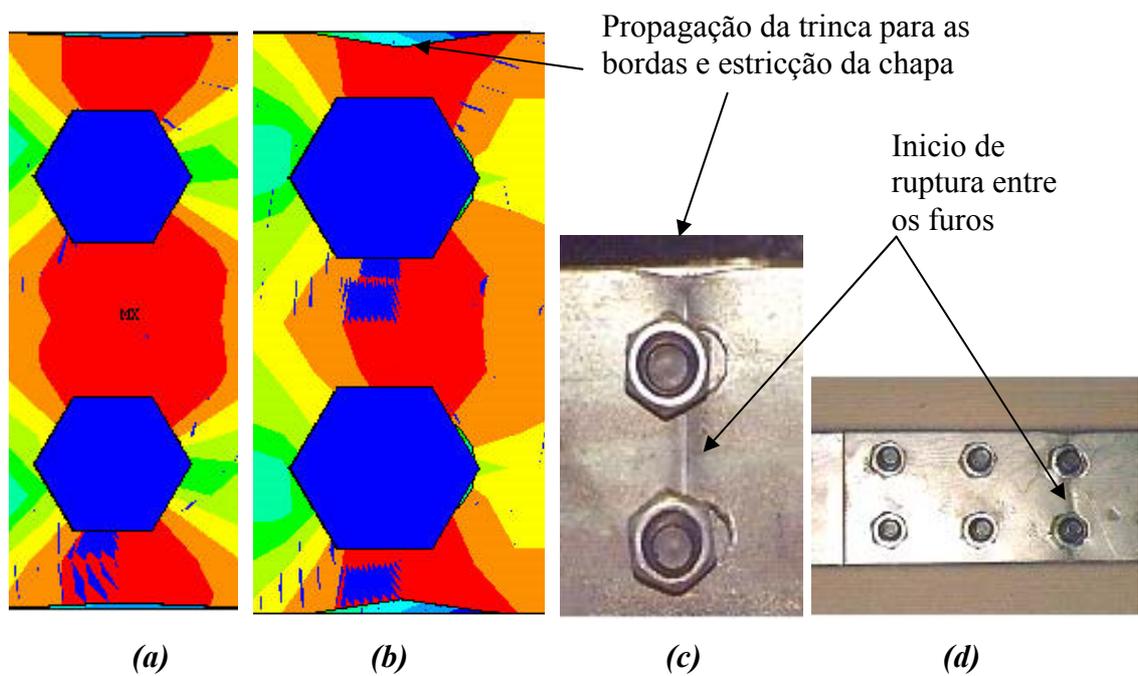
As figuras 4.2 e 4.3 apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos C2C1 e C2C3, respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que entre os furos aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser escolhida como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.2** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2C1.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>



**Figura 4.3** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2C3.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>



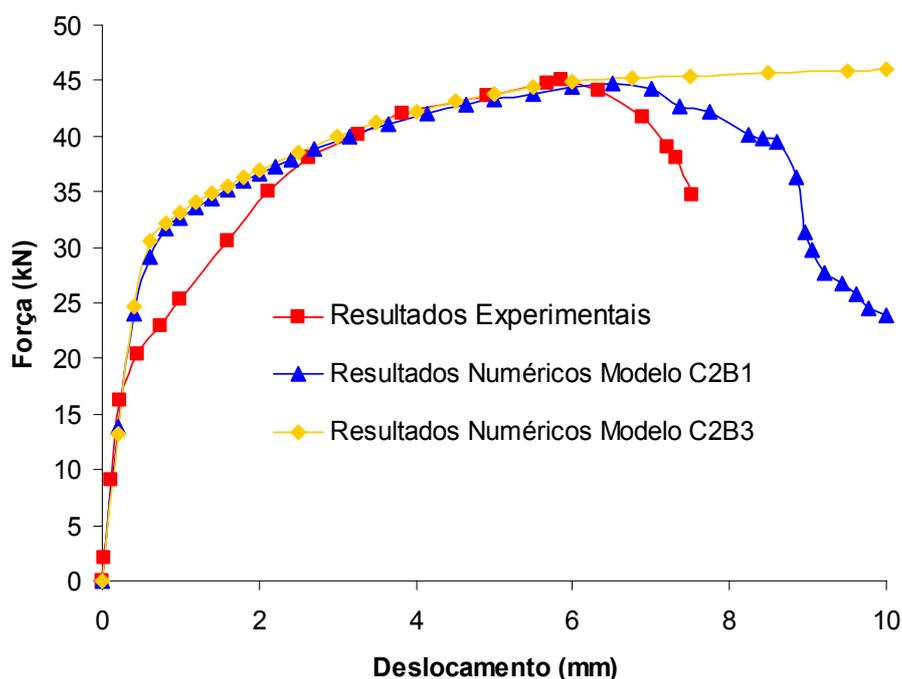
**Figura 4.4** – Detalhes da ruptura da ligação para os modelos C2C1 e C2C3

Outro aspecto importante da modelagem numérica e que merece destaque, refere-se ao fato de que a configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos.

Este fato está representado na figura 4.4, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura da ligação no ensaio experimental (figuras 4.4c e 4.4d). É mostrada ainda uma ampliação da região mais solicitada dos modelos numéricos C2C3 (figura 4.4a) e C2C1 (figura 4.4b), em que pode ser observada a estricção da chapa de aço no local onde ocorre a ruptura, em concordância com o ensaio experimental.

#### 4.2.2 Ligação parafusada em chapa fina com duas seções de parafusos

Para este tipo de ligação foram construídos dois modelos numéricos denominados C2B1 e C2B3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.5.



**Figura 4.5** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em chapa fina com duas seções de parafusos

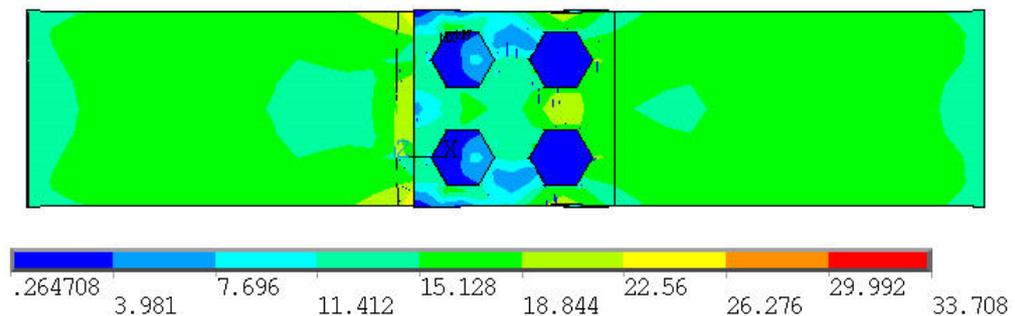
Ao analisar o gráfico apresentado na figura 4.5, nota-se que no trecho inicial da curva, para valores de deslocamentos menores que 0,5 mm, os modelos numérico e

experimental apresentaram praticamente a mesma rigidez ao deslocamento. Para deslocamentos entre 0,5 mm e 3 mm, todos os modelos numéricos apresentaram rigidez ao deslocamento superior àquela obtida no ensaio experimental.

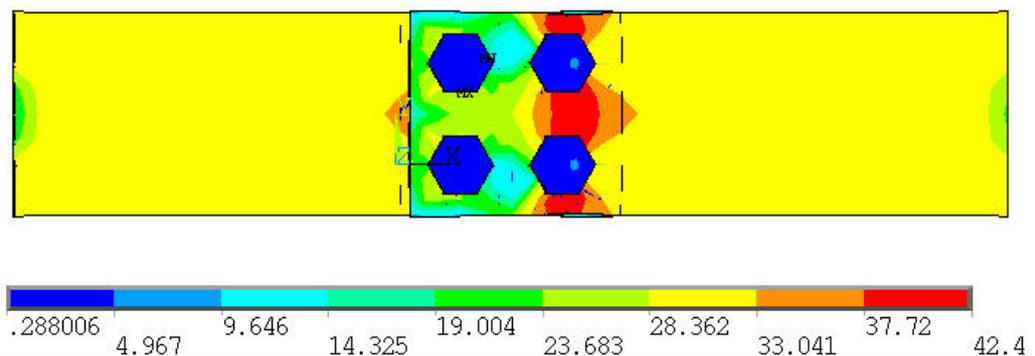
No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 3 mm e 6 mm, observou-se uma concordância satisfatória entre os resultados numéricos dos modelos C2B1 e C2B3, com o resultado experimental.

Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que no modelo numérico C2B1, a força última obtida resultou igual a 44,76 kN, enquanto que no ensaio, esta mesma força resultou igual a 45,10 kN, proporcionando uma diferença da ordem de 0,75 %. No modelo numérico C2B3, a força última obtida resultou igual a 46,03 kN, proporcionando uma diferença da ordem de 2,27 %.

As figuras 4.6 e 4.7, apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos C2B1 e C2B3 respectivamente.



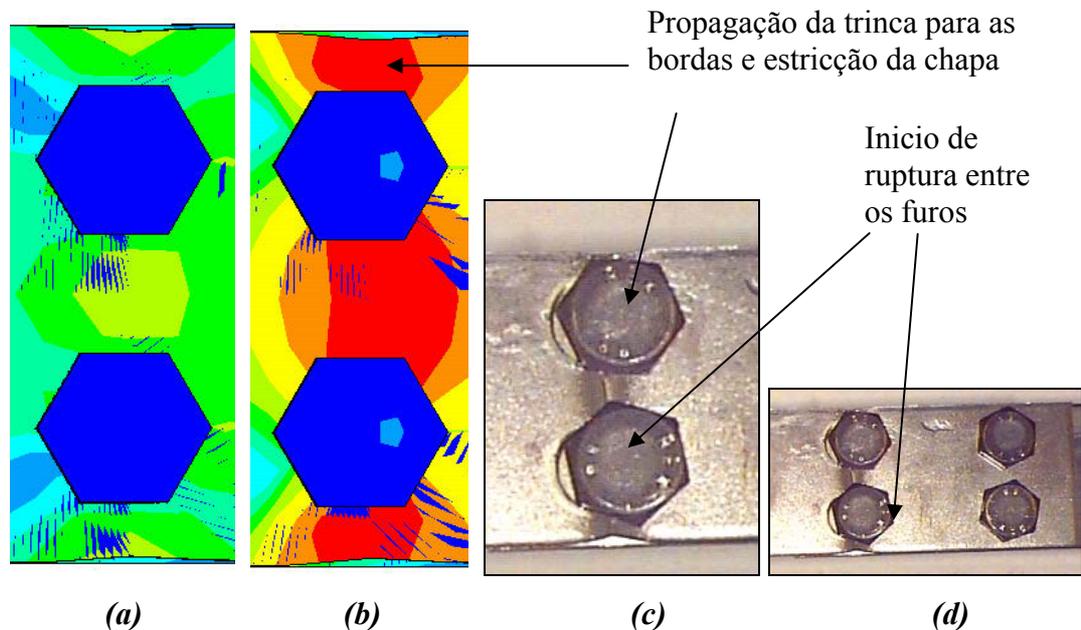
**Figura 4.6** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2B1.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>



**Figura 4.7** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2B3.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>

Nestas figuras, pode-se observar que entre os furos aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser escolhida como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.

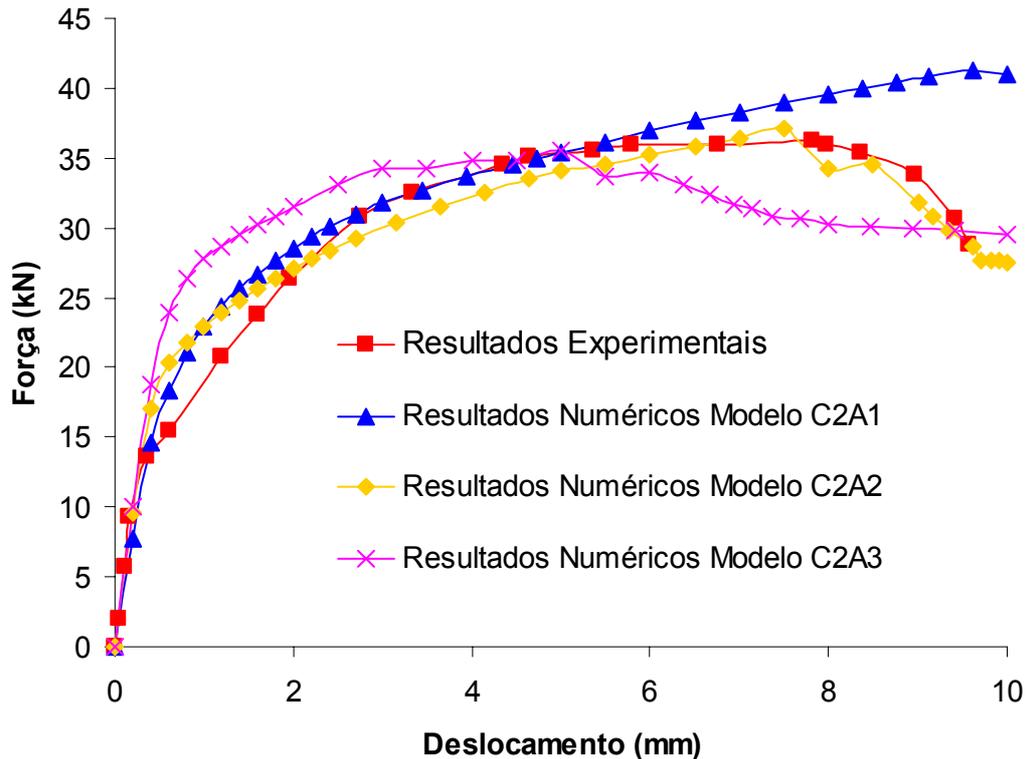
Analogamente ao observado nos modelos C2C1 e C2C3, a configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na figura 4.8, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura da ligação no ensaio experimental (figuras 4.8 c e 4.8 d). É mostrada ainda uma ampliação da região mais solicitada dos modelos numéricos C2B3 (figura 4.8a) e C2B1 (figura 4.8b), em que pode ser observada a estrição da chapa de aço no local onde ocorre a ruptura, em concordância com o ensaio experimental.



**Figura 4.8** – Detalhes da ligação após a ocorrência da ruptura, para os modelos C2B1 e C2B3

#### 4.2.3 Ligação parafusada em chapa fina com uma seção de parafusos

Para este tipo de ligação foram construídos três modelos numéricos denominados C2A1, C2A2 e C2A3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.9.



**Figura 4.9** – Diagrama *Força x Deslocamento* para a ligação parafusada em chapa fina com uma seção de parafusos

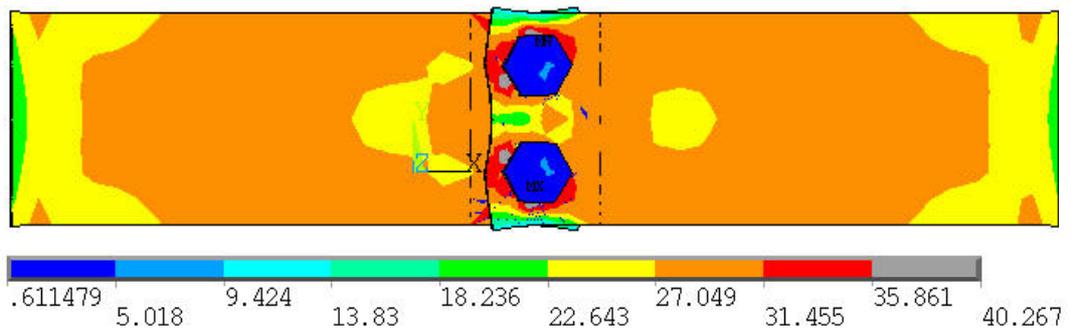
Ao analisar o gráfico apresentado na figura 4.9, nota-se que no trecho inicial da curva, para valores de deslocamentos menores que 0,5 mm, os modelos numéricos e o experimental apresentaram praticamente as mesmas rigidezes ao deslocamento. Para deslocamentos entre 0,5 mm e 3 mm, os modelos numéricos C2A1 e C2A2, apresentaram rigidez ao deslocamento equivalente e um pouco superior àquela rigidez observada no ensaio experimental. Para este mesmo trecho, a rigidez ao deslocamento do modelo C2A3 resultou superior a todos os demais modelos.

O trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 3 mm e 6 mm, observou-se uma concordância satisfatória entre os resultados numéricos do modelo C2A1 com o resultado experimental. O modelo C2A2, apresentou rigidez ao deslocamento um pouco inferior para este trecho, enquanto que no modelo C2A3 a rigidez ao deslocamento inicialmente superior e, em seguida, uma redução da mesma.

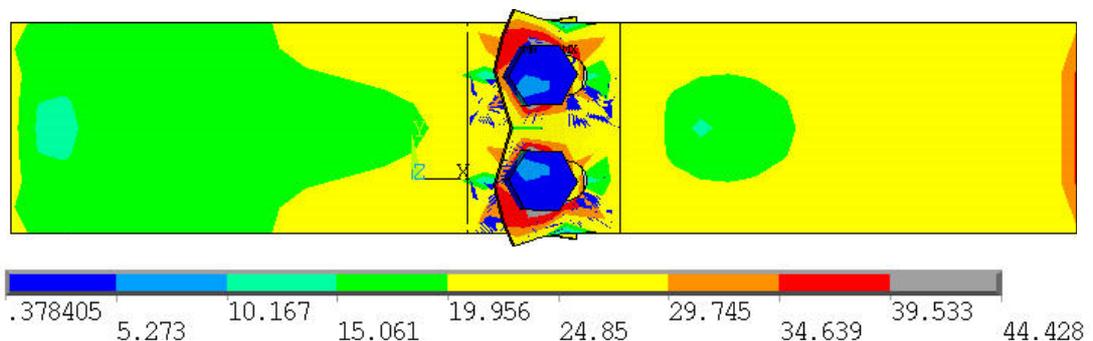
No trecho final da curva, correspondente a deslocamentos maiores que 6 mm, apenas o modelo C2A2 apresentou rigidez semelhante ao experimental, enquanto os demais modelos apresentaram resultados divergentes.

Comparando-se a força última obtida para os quatro casos, nota-se que no modelo numérico C2A1, a força última obtida resultou igual a 40,97 kN, enquanto que no ensaio esta mesma força resultou igual 36,32 kN, resultando em diferença da ordem de 12,8 %. No modelo numérico C2A2, a força última obtida resultou igual a 37,10 kN, com diferença da ordem de 2,14 %. No modelo C2A3, a força ultima alcançada resultou igual a 34,88 kN, com diferença da ordem de 3,96 %.

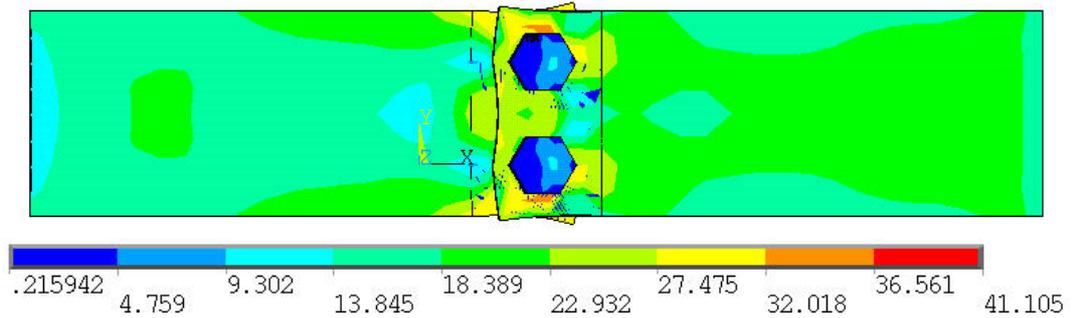
As figuras 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam as curvas de isotensões tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos C2A1, C2A2 e C2A3 respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que entre os furos aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser escolhida como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.10** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2A1.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>

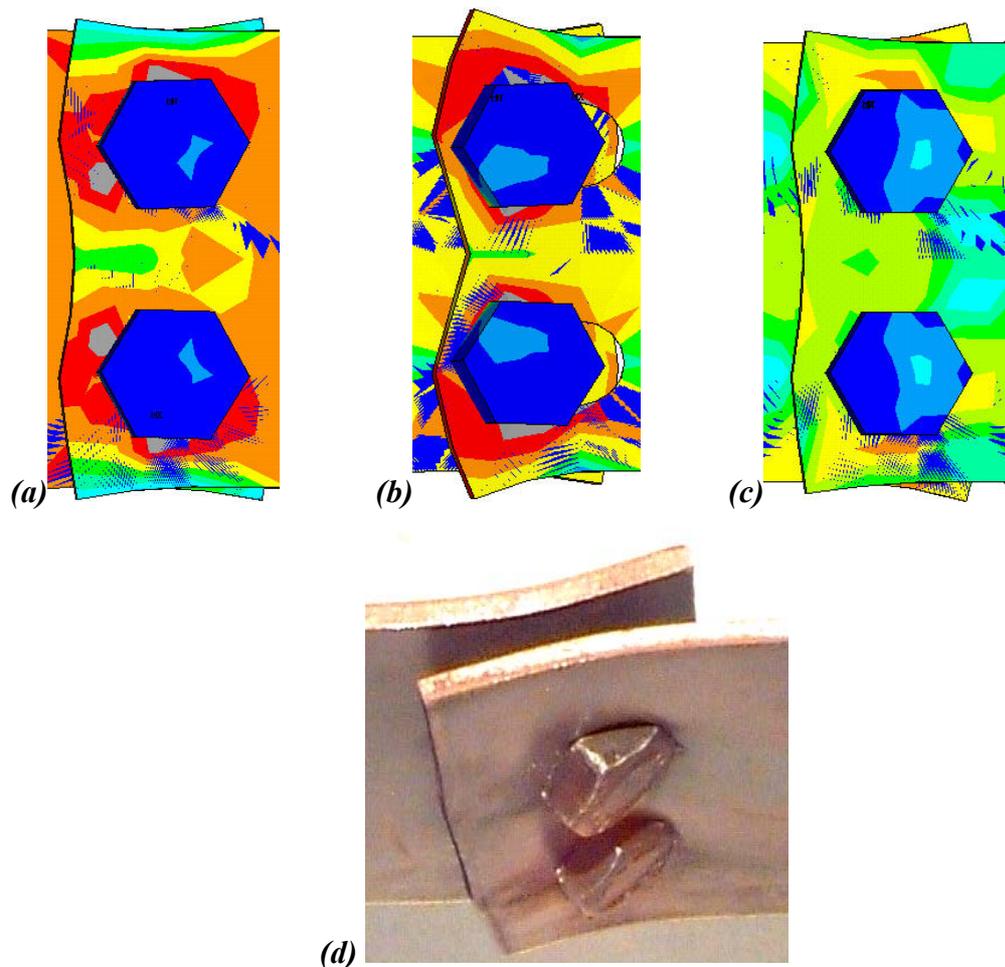


**Figura 4.11** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2A2.  
Unidade: kN/cm<sup>2</sup>



**Figura 4.12** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2A3.  
Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

De modo análogo aos aspectos observados nos modelos C2C1, C2C3, C2B1 e C2B3, a configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos C2A1, C2A2 e C2A3. Este fato está representado na figura 4.13, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura da ligação no ensaio experimental (figura 4.13 d).

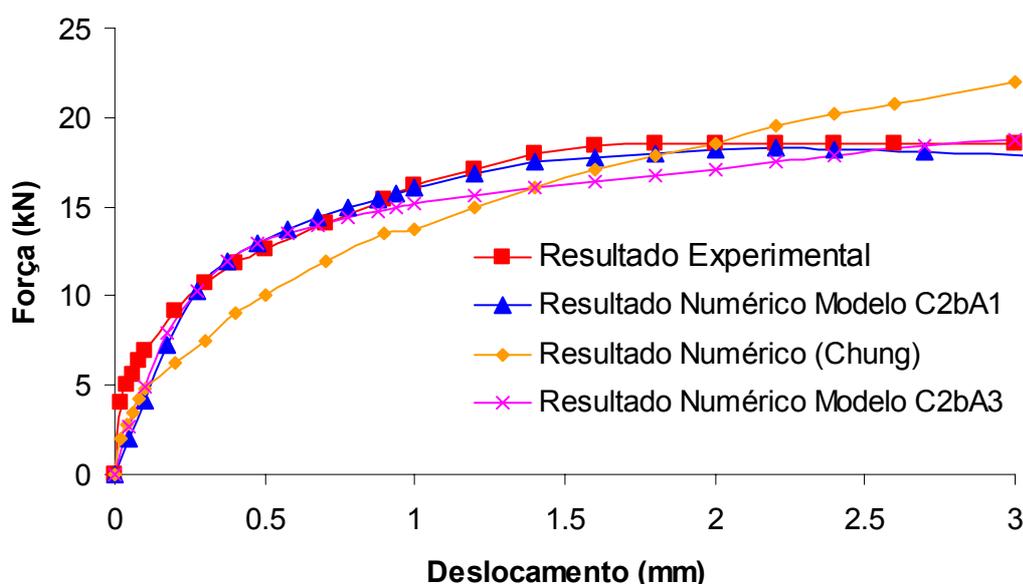


**Figura 4.13** – Detalhes da ruptura da ligação para os modelos C2A1, C2A2 e C2A3

Na última figura, é apresentada ainda uma ampliação da região mais solicitada dos modelos numéricos C2A3 (figura 4.13a), C2A2 (figura 4.13b) e C2A1 (figura 4.13c), em que pode ser observada a estricção da chapa de aço no local onde ocorre a ruptura, em concordância com o ensaio experimental.

#### 4.2.4 Ligação parafusada em chapa fina com um parafuso - CHUNG & IP (2000)

Para esta ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados C2bA1 e C2bA3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimental e numérico apresentados em CHUNG & IP (2000). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.14.



**Figura 4.14** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em chapa fina com um parafuso

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.14, nota-se que os modelos numéricos C2bA1 e C2bA3 apresentaram resultados satisfatórios quando comparados ao resultado experimental. O resultado numérico da modelagem apresentada em CHUNG & IP (2000) apresentou rigidez ao deslocamento inferior àquela obtida no ensaio experimental, para deslocamentos menores que 4 mm. Para deslocamentos maiores que 4 mm, esta mesma rigidez ao deslocamento resultou superior.

No trecho inicial da curva, para deslocamentos menores que 1,0 mm, os modelos numéricos, tanto o C2bA1, quanto o C2bA3 apresentaram concordância satisfatória com o resultado experimental e rigidez equivalente àquela apresentada no ensaio experimental. No modelo numérico apresentado em CHUNG & IP (2000), a rigidez ao deslocamento para este trecho da curva, resultou inferior, quando comparada aos demais modelos.

No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 1,0 mm e 2,0 mm, o modelo C2bA1 apresentou resultados bastante satisfatórios. Para este mesmo trecho, o modelo C2bA3 apresentou resultados razoáveis quando comparados ao experimental, porém a rigidez ao deslocamento para este trecho da curva resultou inferior àquela observada no ensaio experimental.

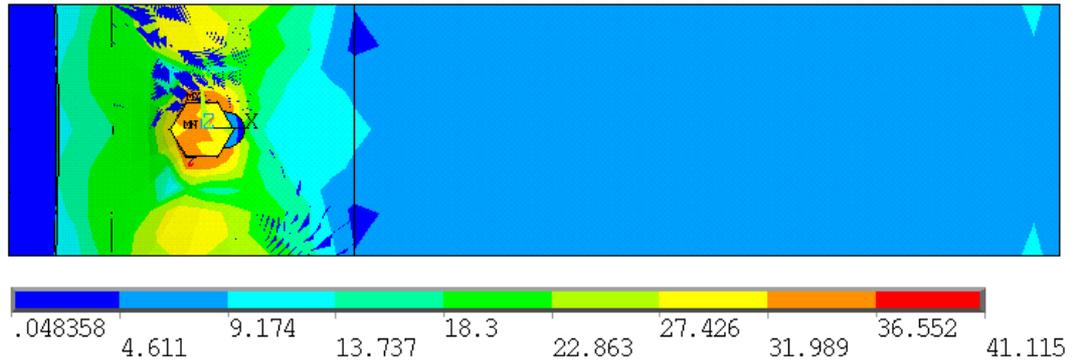
O modelo numérico proposto em CHUNG & IP (2000) apresentou resultados próximos do experimental, porém a rigidez ao deslocamento que era inferior no início deste trecho, resultou superior no final deste mesmo trecho.

O segmento final da curva, para deslocamentos maiores que 2 mm, a concordância entre os modelos numéricos C2bA1 e C2bA3 e o experimental, resultou bastante satisfatória. Para este mesmo trecho, os resultados do modelo proposto em CHUNG & IP (2000) divergiram do resultado experimental.

Comparando-se a força última obtida para os quatro casos, nota-se que nos modelos numéricos, a força última obtida resultou igual a 18,25 kN para o modelo C2bA1, igual a 18,77 kN para o modelo C2bA3 e igual a 22,00 kN para o modelo de proposto em CHUNG & IP (2000), enquanto que no ensaio experimental, esta mesma força resultou igual a 18,56 kN, com diferença entre os resultados numéricos e experimental da ordem de 1,67 %, 1,13 % e 18,53 %, respectivamente.

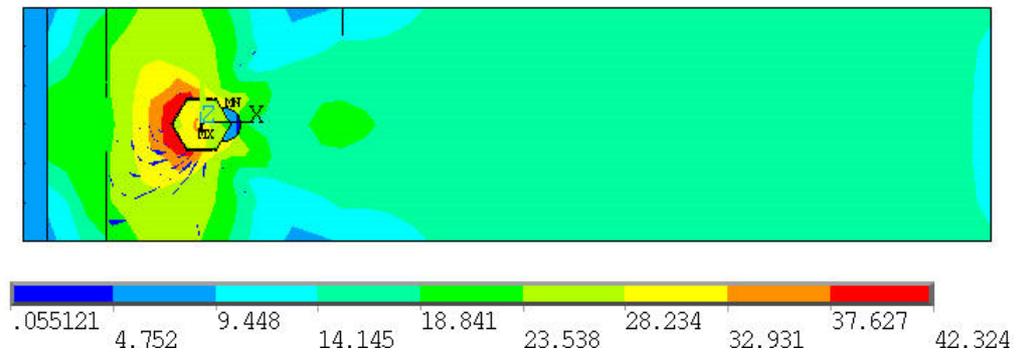
As figuras 4.15 e 4.16 apresentam as curvas de isotensões tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises para os modelos C2bA1 e C2bA3, respectivamente.

Observa-se que nas bordas comprimidas do furo, aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Isto é indicativo que a região em questão está sofrendo esmagamento, o que de fato é esperado para uma ligação em chapa fina com apenas um parafuso, e que provavelmente ocorreu no ensaio experimental.



**Figura 4.15** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2bA1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$



**Figura 4.16** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo C2bA3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

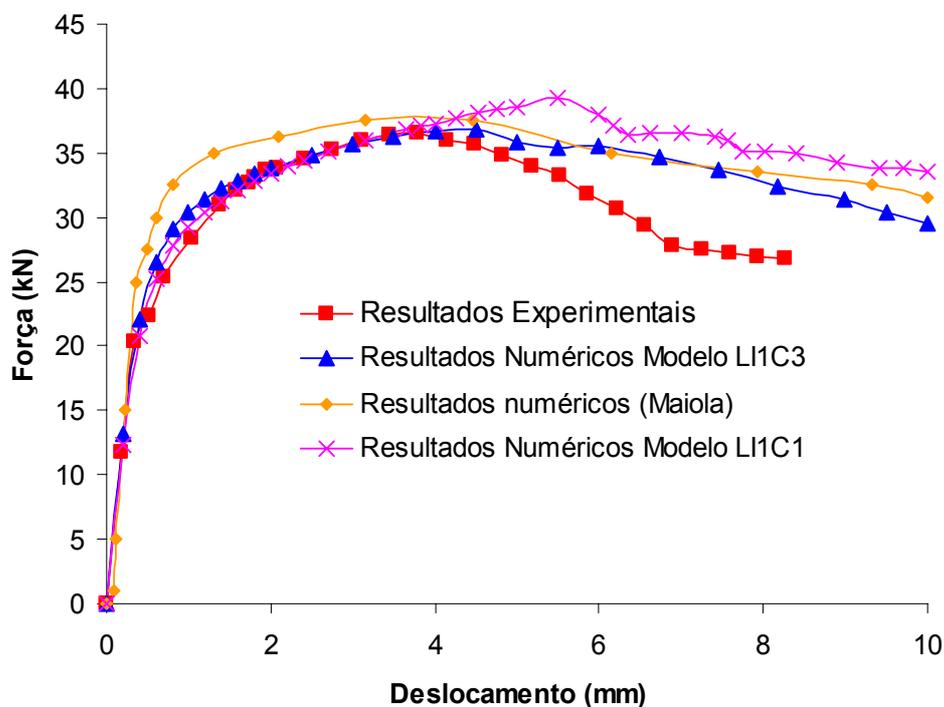
### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Perfis cantoneira

#### 4.3.1 Ligação parafusada em perfil cantoneira com três parafusos

Para este tipo de ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados LI1C1 e LI1C3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais e numéricos apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.17.

Analogamente ao que foi comentado no item 4.2.1, para todos os modelos de ligações em perfil cantoneira analisados neste trabalho, a comparação dos trechos finais

das curvas Força x Deslocamentos entre resultados numérico e experimental não foi estabelecida.



**Figura 4.17** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil cantoneira com três parafusos

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.17, nota-se que as quatro curvas apresentam comportamentos semelhantes. Nesse caso, em particular, modelos numéricos apresentaram bons resultados quando comparados ao resultado experimental.

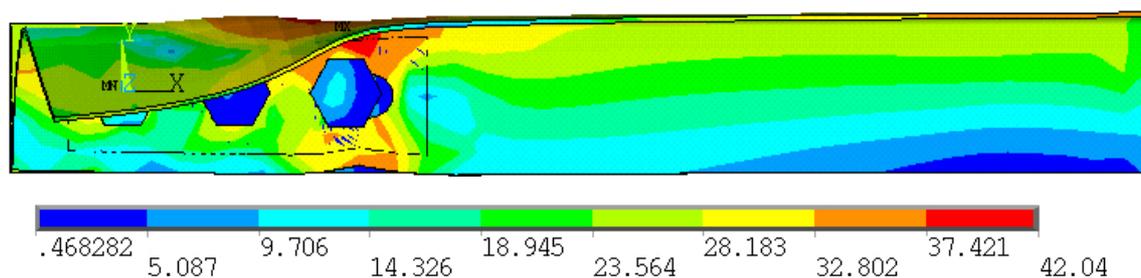
No trecho inicial da curva, para valores de deslocamentos menores que 2 mm, o modelo numérico proposto e apresentado em MAIOLA (2004) apresentou rigidez ao deslocamento um pouco superior àquela verificada no ensaio experimental, enquanto que para os modelos LI1C1 e LI1C3, esta mesma rigidez resultou praticamente igual à rigidez observada no ensaio experimental.

No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 2 mm e 4 mm, se observou uma concordância satisfatória entre os resultados numéricos dos modelos LI1C1, LI1C3 e o resultado experimental. Para este mesmo trecho, o modelo numérico apresentado em MAIOLA (2004), apresentou rigidez ao deslocamento um pouco superior àquela rigidez observada no ensaio experimental.

Comparando-se a força última obtida para os quatro casos, nota-se que no modelo numérico LI1C1, a força última obtida resultou igual a 39,20 kN, enquanto que no ensaio, esta mesma força resultou igual a 36,58 kN, cuja diferença é da ordem de 7,16 %. No modelo numérico LI1C3, a força última obtida resultou igual a 36,88 kN, cuja diferença é da ordem de 0,82%.

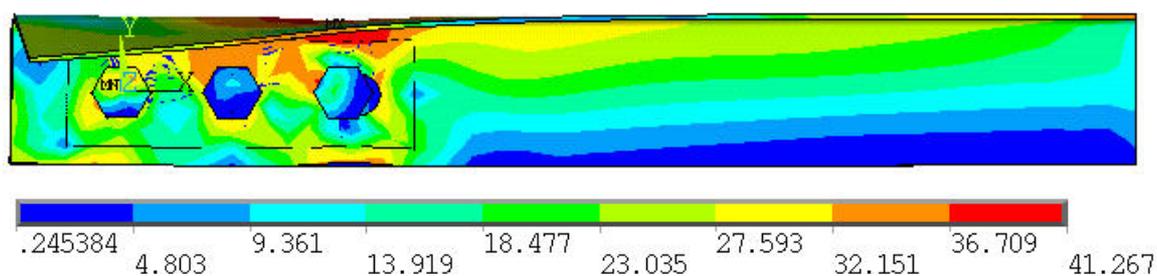
No modelo numérico proposto e apresentado em MAIOLA (2004), a força última obtida resultou igual a 39,50 kN, cuja diferença é da ordem de 2,4 % entre os resultados obtidos neste modelo e os resultados obtidos experimentalmente.

As figuras 4.18 e 4.19, apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos LI1C1 e LI1C3 respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que entre o furo e a borda da cantoneira, na seção em que está localizado o primeiro parafuso, aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser indicada como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.18** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1C1.

Unidade: kN/cm<sup>2</sup>

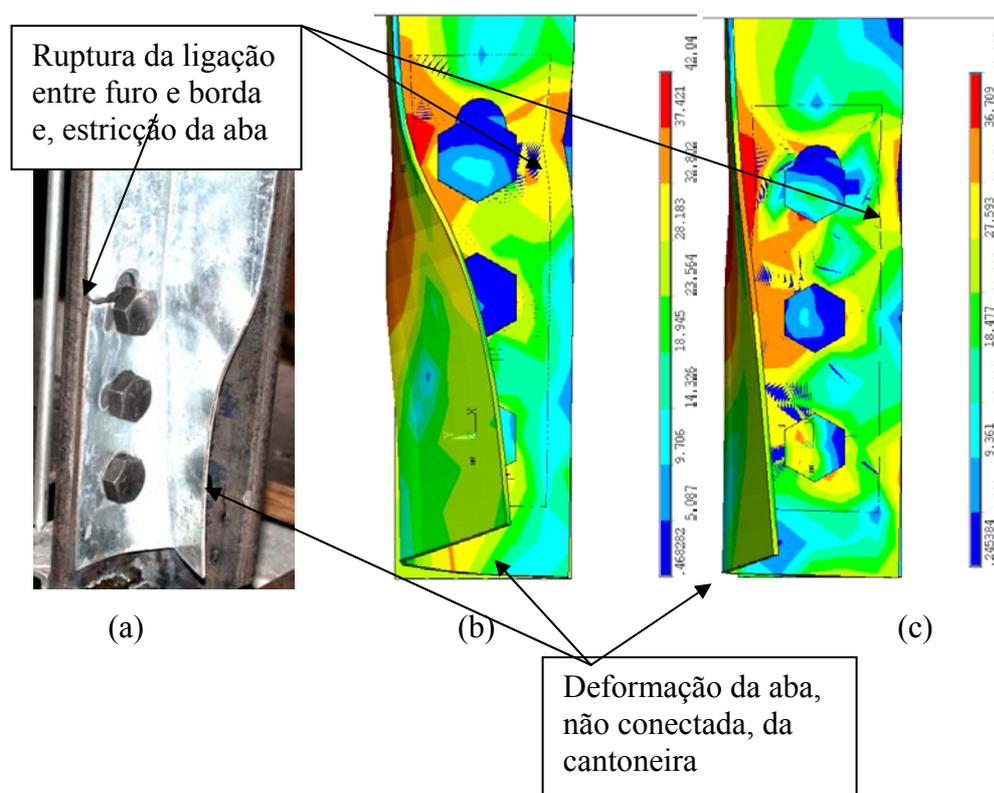


**Figura 4.19** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1C3.

Unidade: kN/cm<sup>2</sup>

Semelhantemente ao observado para os modelos de ligações parafusadas em chapas finas, a configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos LI1C1 e LI1C3, conforme representado na figura 4.20, em que é mostrada em detalhe a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.20a).

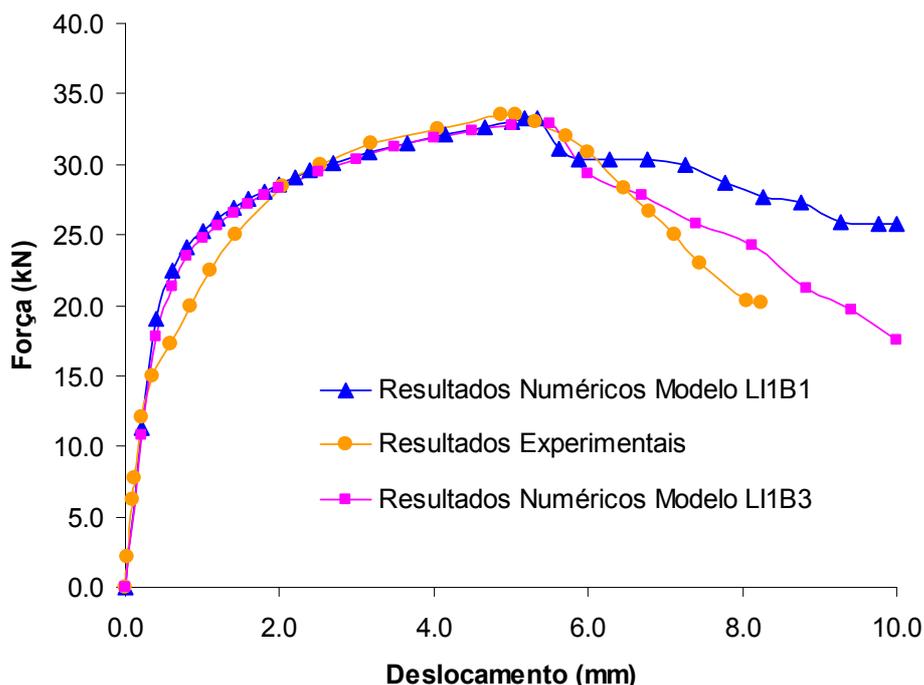
É mostrada ainda uma ampliação da região dos parafusos dos modelos numéricos LI1C1 (figura 4.20b) e LI1C3 (figura 4.20c), em que se pode observar a deformação ocorrida na aba não conectada da cantoneira, em concordância com o ensaio.



**Figura 4.20** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com três parafusos

### 4.3.2 Ligação parafusada em perfil cantoneira com dois parafusos

Para este tipo de ligação, foram construídos os modelos numéricos LI1B1 e LI1B3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação força x deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.21.



**Figura 4.21** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil cantoneira com dois parafusos

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.21, nota-se que as três curvas apresentam comportamentos semelhantes, ou seja, os modelos numéricos apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com resultado obtidos experimentalmente.

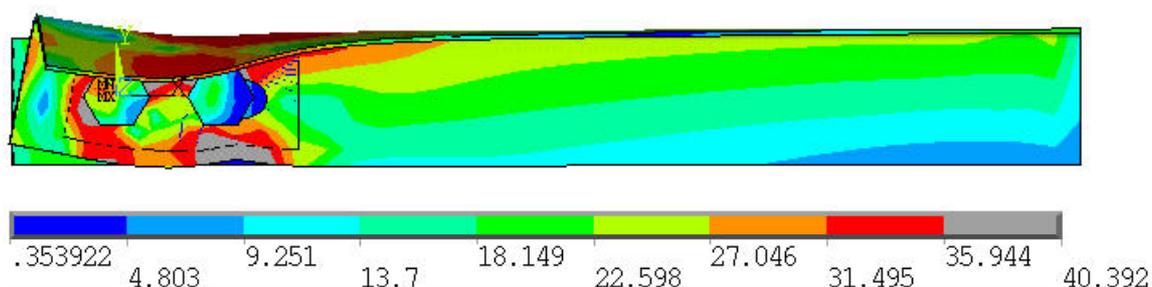
No trecho inicial da curva, para deslocamentos até 2 mm, os modelos numéricos, tanto o LI1B1 quanto o LI1B3, apresentou rigidez pouco superior àquela apresentada no ensaio experimental.

No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 2 mm e 5 mm, a concordância dos resultados obtidos nos modelos numéricos (LI1B1 e LI1CB3) e os resultados experimentais foi bastante satisfatória.

Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que no modelo numérico LI1B1, a força última obtida resultou igual a 33,30 kN, enquanto que no experimental, esta mesma força resultou igual a 33,50 kN, cuja diferença é da ordem de 0,6 %. No modelo numérico LI1B3, a força última obtida resultou igual a 32,85 kN, cuja diferença é da ordem de 1,94 %.

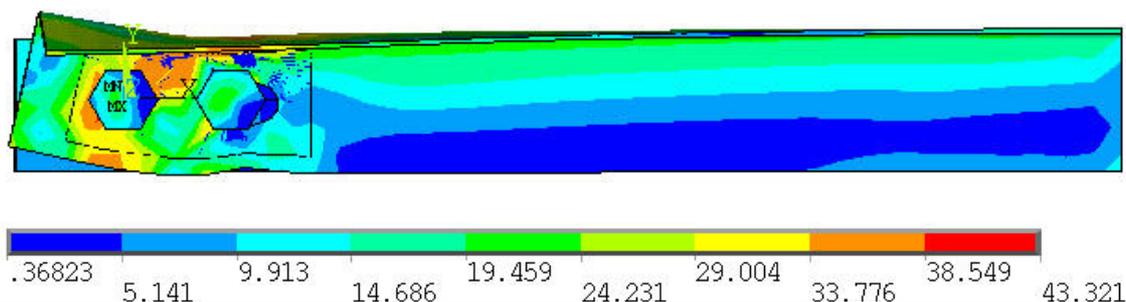
As figuras 4.22 e 4.23, apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos LI1B1 e LI1B3 respectivamente.

Nestas figuras, pode-se observar que entre o furo e a borda da cantoneira, na seção em que está localizado o primeiro parafuso, aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser escolhida como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.22** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1B1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

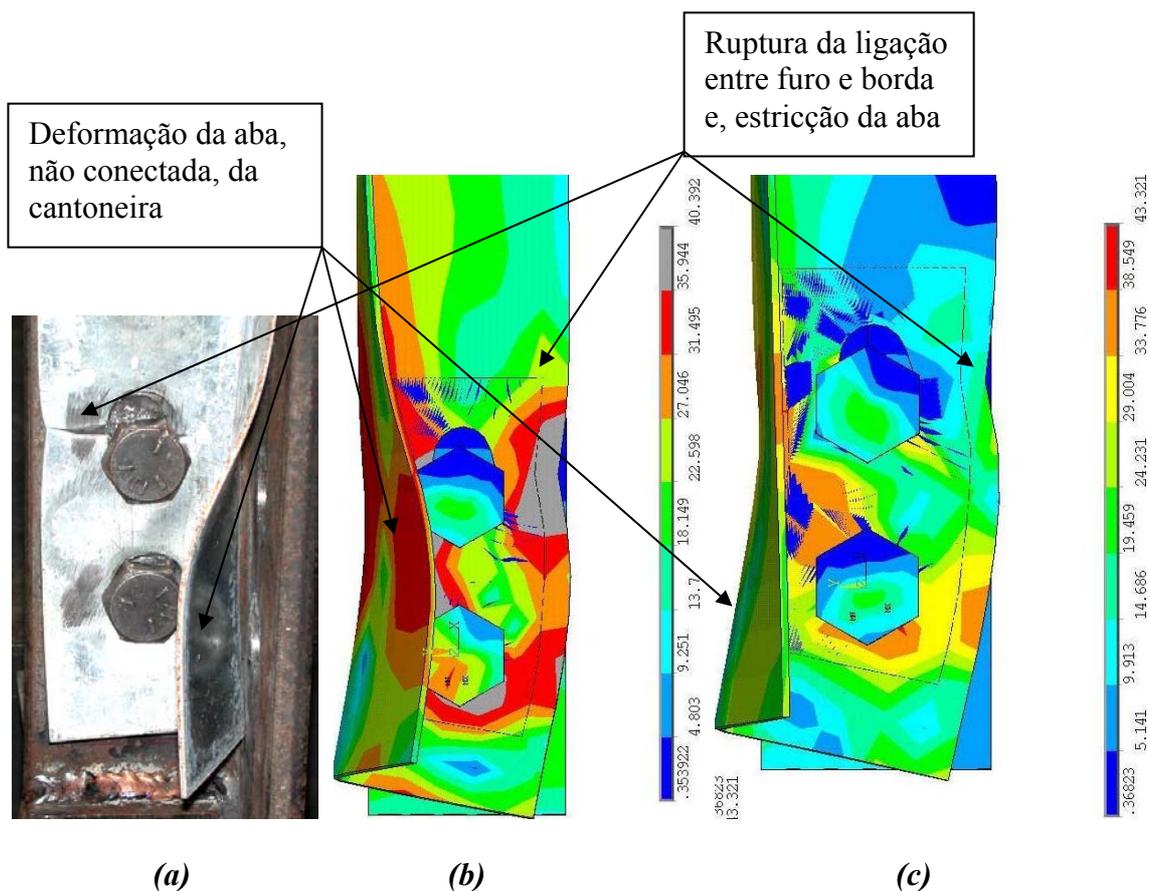


**Figura 4.23** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1B3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

Analogamente ao observado nos modelos LI1C1 e LI1C3, a configuração deformada, verificada no ensaio experimental, foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na figura 4.24, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.24a).

É mostrada ainda uma ampliação da região dos parafusos dos modelos numéricos LI1B1 (figura 4.24b) e LI1B3 (figura 4.24c), em que se pode observar a deformação ocorrida na aba não conectada da cantoneira, em concordância com o ensaio experimental.



**Figura 4.24** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com dois parafusos

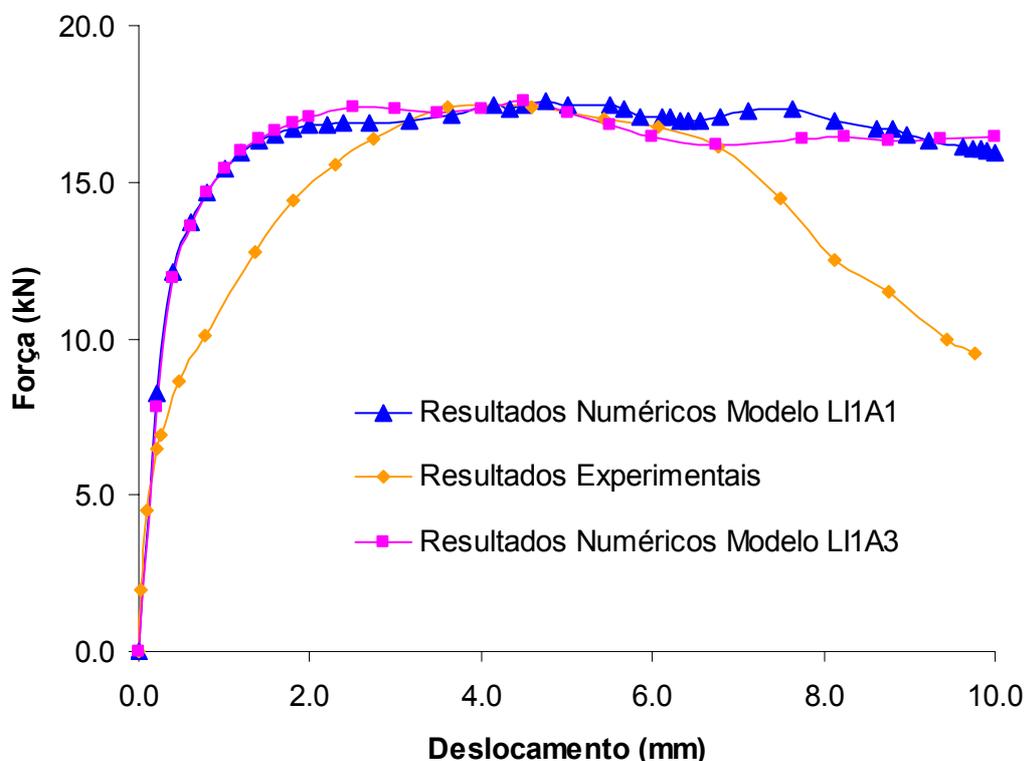
### 4.3.3 Ligação parafusada em perfil cantoneira com um parafuso

Para este tipo de ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados LI1A1 e LI1A3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.25.

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.25 nota-se que os dois modelos numéricos apresentaram comportamentos semelhantes, porém, apresentaram rigidez ao deslocamento superior àquela rigidez observada no ensaio experimental.

No trecho inicial da curva, para deslocamentos menores que 3 mm, os modelos numéricos, tanto o LI1A1 quanto o LI1A3, apresentaram rigidez ao deslocamento

equivalente àquela rigidez observada no ensaio experimental, para o início do trecho analisado. Entretanto, para o final deste mesmo trecho, a rigidez observada nos modelos numéricos resultou superior àquela obtida no ensaio experimental.



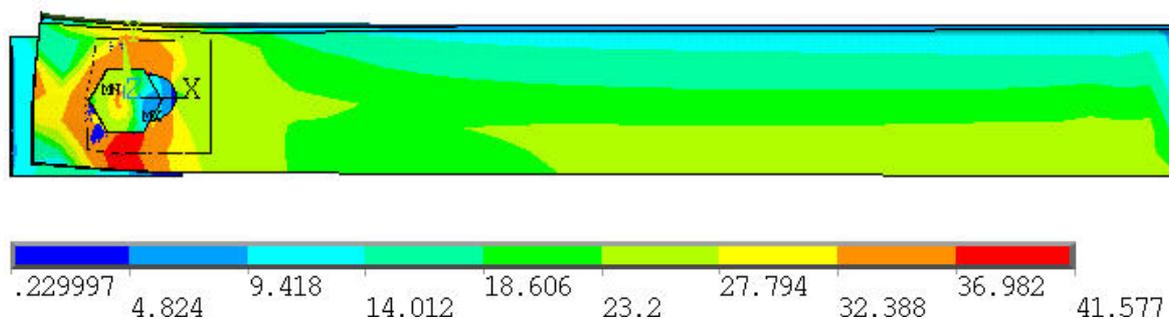
**Figura 4.25** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil cantoneira com um parafuso.

No segmento intermediário da curva, para deslocamentos entre 3 mm e 6 mm, a concordância dos resultados dos modelos numéricos (LI1A1 e LI1A3) com os resultados obtidos no ensaio experimental foi bastante satisfatória.

Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que tanto no modelo numérico LI1A1, quanto no modelo LI1A3, a força última obtida resultou igual a 17,6 kN, enquanto que no experimental, esta mesma força resultou igual a 17,40 kN, cuja diferença é da ordem de 1,15 %.

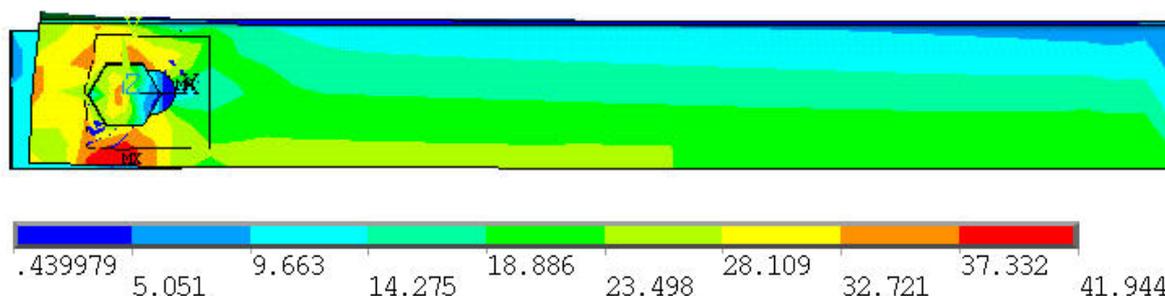
As figuras 4.26 e 4.27, apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos LI1A1 e LI1A3, respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que entre o furo e a borda da cantoneira, na seção em que está localizado o parafuso, aparecem tensões elevadas, da

ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser indicada como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.26** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1A1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

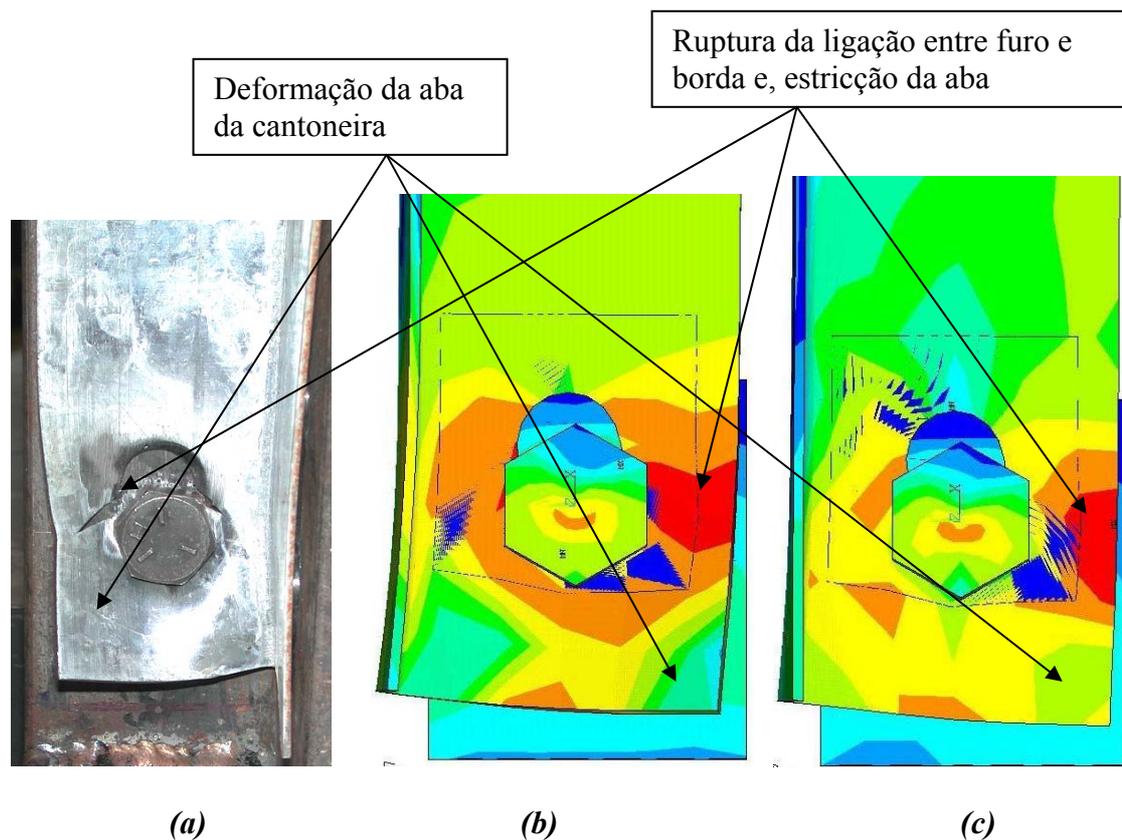


**Figura 4.27** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo LI1A3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

A configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na figura 4.28, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.28a).

Na mesma figura, é apresentada uma ampliação da região em que está localizado o parafuso nos modelos numéricos LI1A1 (figura 4.28b) e LI1A3 (figura 4.28c), em que se pode observar a deformação ocorrida na aba não conectada da cantoneira, em concordância com o ensaio experimental.



**Figura 4.28** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil cantoneira com um parafuso

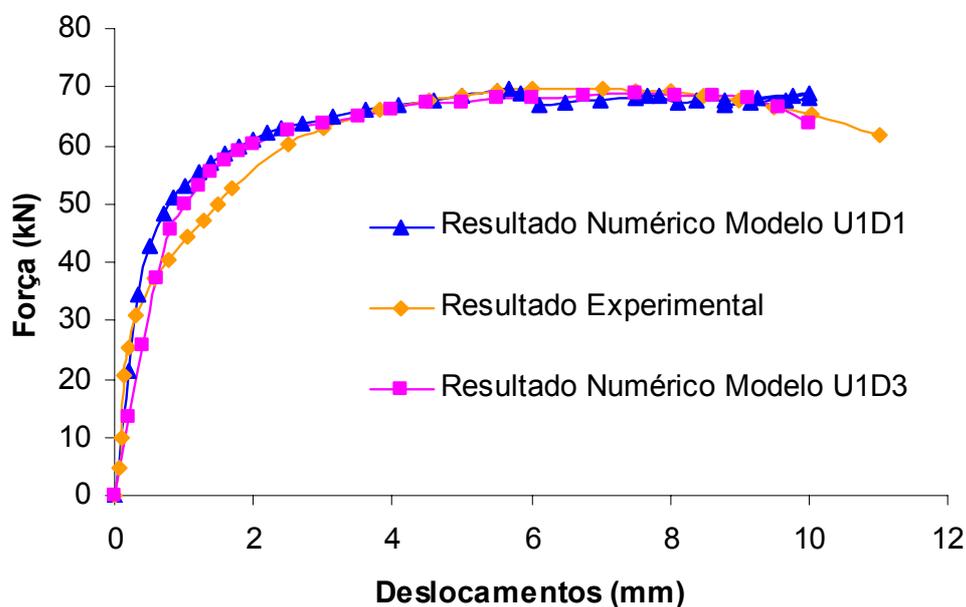
## 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E OS EXPERIMENTAIS – Perfis U

### 4.4.1 Ligação parafusada em perfil U com quatro parafusos

Para este tipo de ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados U1D1 e U1D3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais e numéricos apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.29.

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.29, nota-se que as três curvas apresentam comportamentos semelhantes, ou seja, os modelos numéricos U1D1 e U1D3 apresentaram resultados satisfatórios quando comparados aos resultados experimentais. No trecho inicial da curva, para deslocamentos até 0,5 mm, os modelos numéricos

apresentaram rigidez ao deslocamento equivalente àquela rigidez observada experimentalmente.



**Figura 4.29** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil U com quatro parafusos.

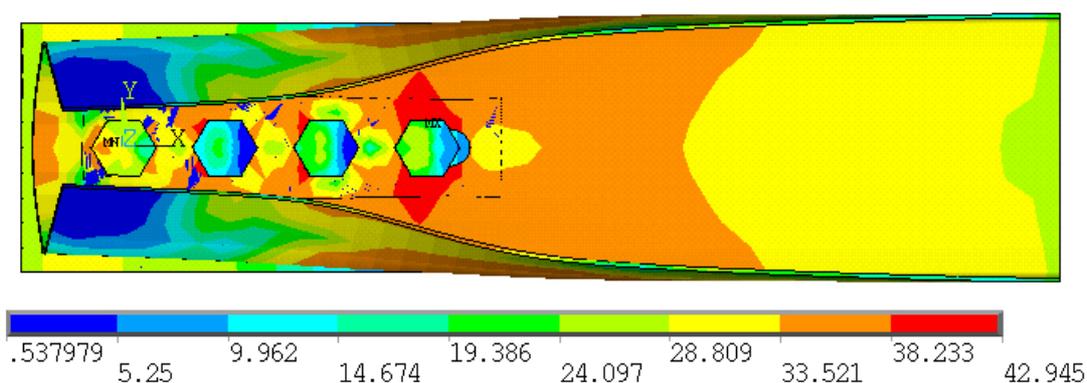
O trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 0,5 mm e 4 mm, os modelos numéricos apresentaram rigidez ao deslocamento pouco superior àquela rigidez observada no ensaio experimental.

Nota-se que as deformações no referido trecho da curva, obtidas no ensaio experimental, resultaram maiores que as deformações observadas nos modelos numéricos. Este aspecto pode ser explicado pelo fato de ocorrer acomodações dos parafusos e, conseqüentemente, maiores deformações. No modelo numérico, as acomodações dos parafusos não foram consideradas, razão pela qual o modelo numérico apresente uma maior rigidez às deformações para este trecho da curva.

O trecho final da curva, para deslocamentos maiores que 4 mm, a concordância resultou bastante satisfatória, ou seja, os modelos numéricos apresentaram resultados muito próximos dos resultados experimentais.

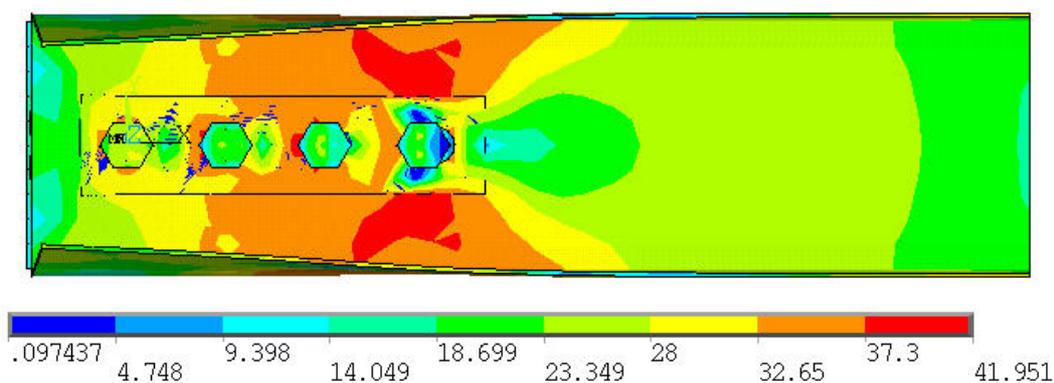
Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que nos modelos numéricos, a força última obtida resultou igual a 69,54 kN para o modelo U1D1 e 68,90kN para o modelo U1D3, enquanto que no ensaio experimental, esta mesma força resultou igual a 69,89kN, com diferenças da ordem de 0,5 % e 1,41%, respectivamente.

As figuras 4.30 e 4.31 apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos U1D1 e U1D3, respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que nas bordas do furo, na seção em que está localizado o primeiro parafuso, aparece tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço, razão pela qual a região em questão pode ser indicada como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.30** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1D1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$



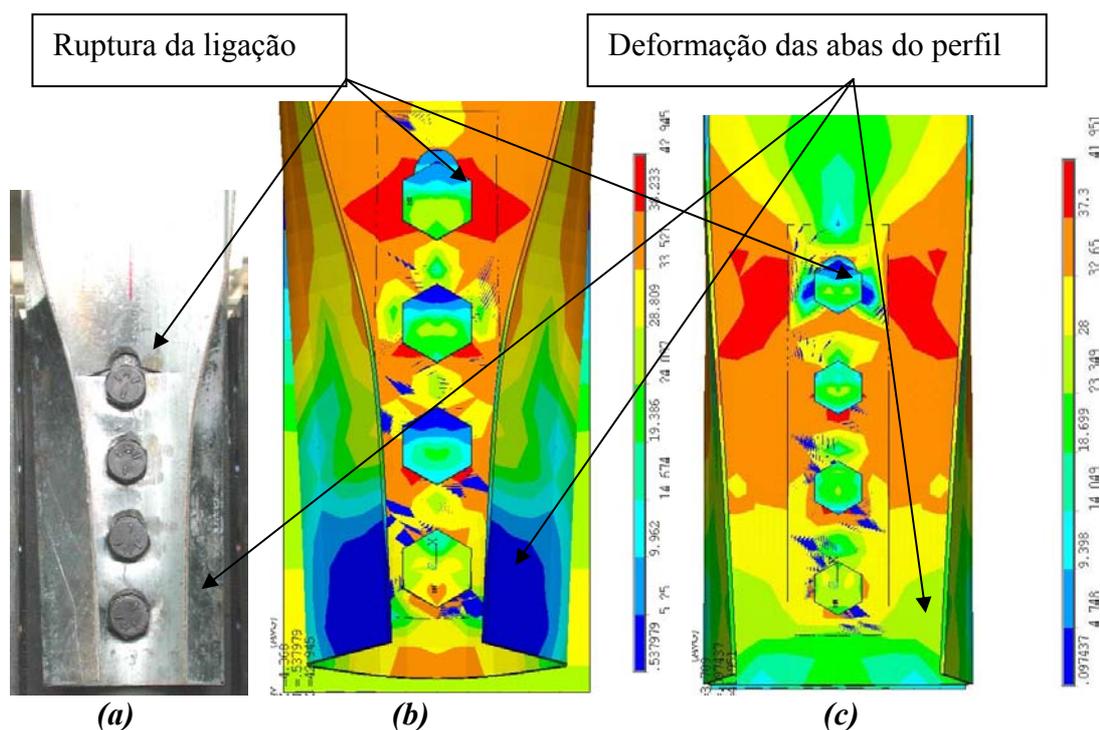
**Figura 4.31** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1D3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

Analogamente ao observado nos modelos de ligações parafusadas em chapas e em perfis cantoneira, a configuração deformada verificada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada no modelo numérico. Este fato está representado na figura

4.32, em que é mostrada, em detalhe, a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.32a).

Na mesma figura, é apresentada uma ampliação da região em que estão localizados os parafusos dos modelos numéricos U1D1 (figura 4.32b) e U1D3 (figura 4.32c), em que podem ser observadas as deformações ocorridas nas mesas do perfil, em concordância com as deformações observadas no ensaio experimental.



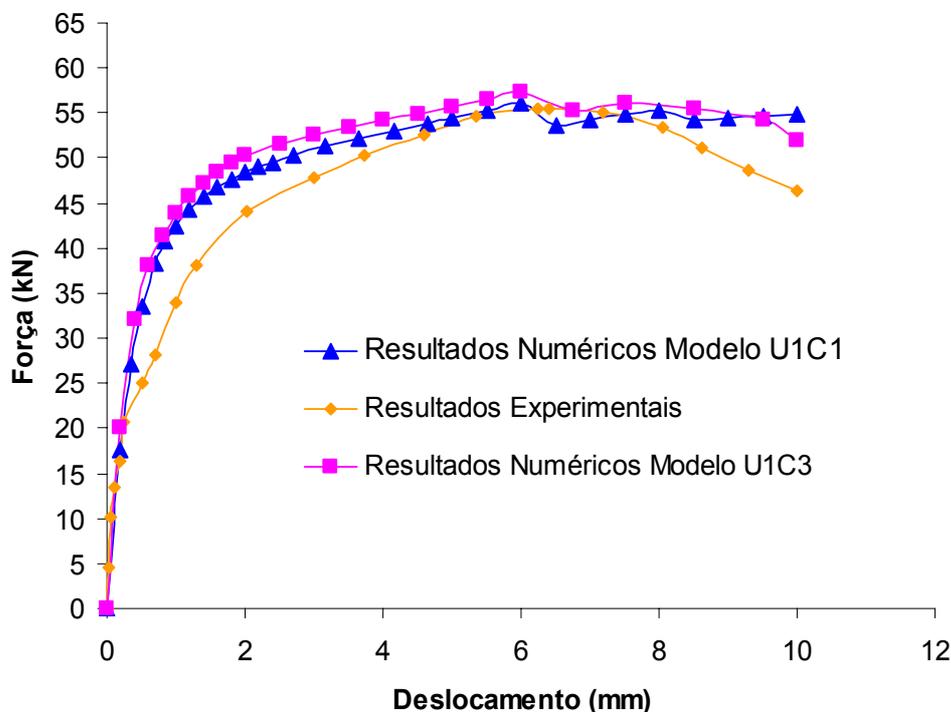
**Figura 4.32** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com quatro parafusos

#### 4.4.2 Ligação parafusada em perfil U com três parafusos

Para este tipo de ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados U1C1 e U1C3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.33.

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.33, nota-se que ambos os modelos numéricos, U1C1 e U1C3, apresentaram comportamentos semelhantes, porém

as rigidezes ao deslocamento observadas nos modelos resultaram superiores àquela rigidez obtida no ensaio experimental.



**Figura 4.33** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil U com três parafusos.

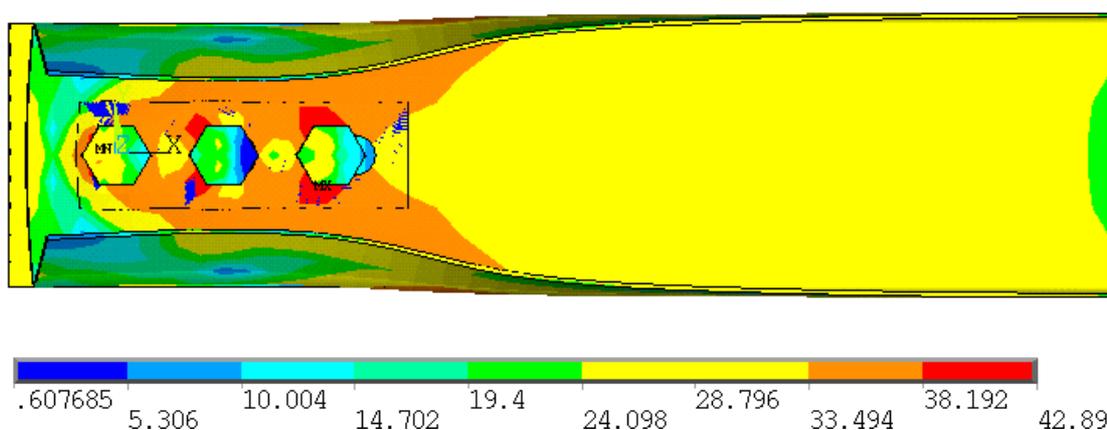
No trecho inicial da curva, para deslocamentos até 0,5 mm, os modelos numéricos apresentaram rigidez ao deslocamento equivalente àquela rigidez observada no ensaio experimental.

No trecho intermediário da curva, para deslocamentos entre 0,5 mm e 5 mm, os modelos numéricos apresentaram rigidez ao deslocamento superior àquela rigidez observada no ensaio experimental. Para deslocamentos entre 5 mm e 8 mm, houve uma razoável concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais. No trecho final da curva, para deslocamentos maiores que 8 mm, os resultados numéricos divergiram dos resultados experimentais.

Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que nos modelos numéricos a força última obtida resultou igual a 56,09 kN para o modelo U1C1 e 57,33 kN para o modelo U1C3, enquanto que no ensaio experimental esta mesma força resultou igual a 55,40kN, com diferenças iguais a 1,25 % e 3,48%, respectivamente.

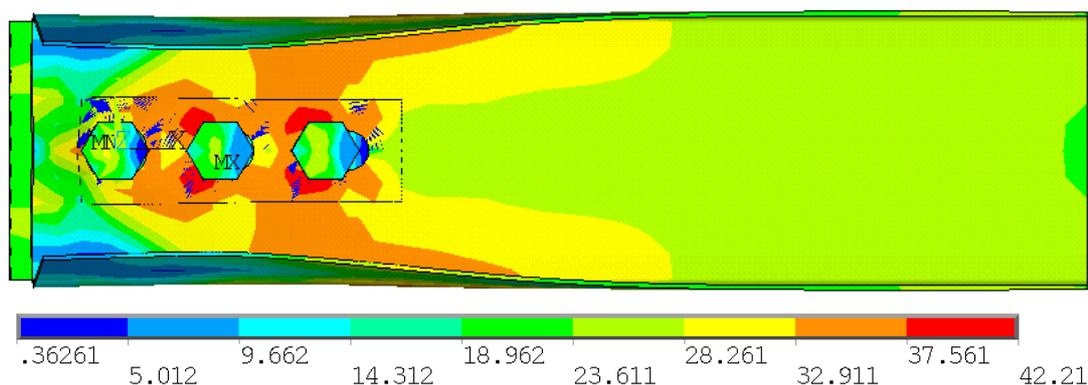
As figuras 4.34 e 4.35 apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos U1C1 e U1C3, respectivamente.

Nestas mesmas figuras pode-se observar que nas bordas do furo, na seção em que está localizado o primeiro parafuso, aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço. Por esta razão, a região em questão pode ser indicada como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar visualmente no ensaio experimental.



**Figura 4.34** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1C1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

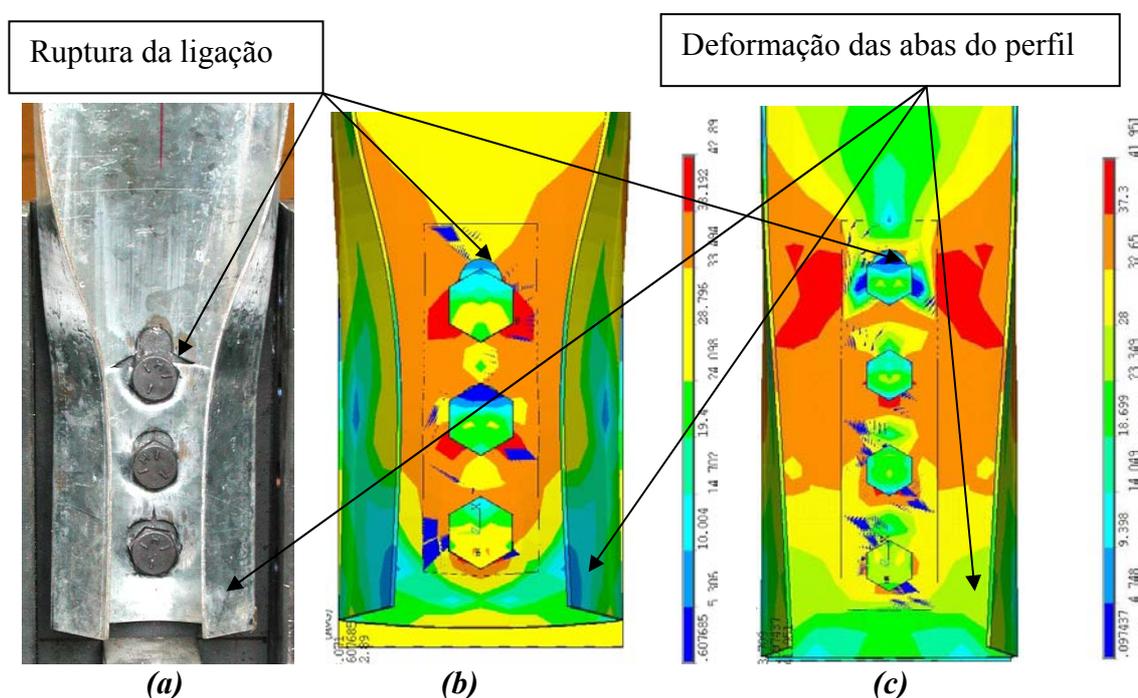


**Figura 4.35** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1C3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

A configuração deformada observada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na figura 4.36, em que mostrada, em detalhe, a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.36a).

Na mesma figura 4.36 é mostrada ainda uma ampliação da região em que estão localizados os dos parafusos dos modelos numéricos U1C1 (figura 4.36b) e U1C3 (figura 4.36c), em que podem ser observadas as deformações ocorridas nas mesas do perfil, em concordância com as deformações verificadas no ensaio experimental.

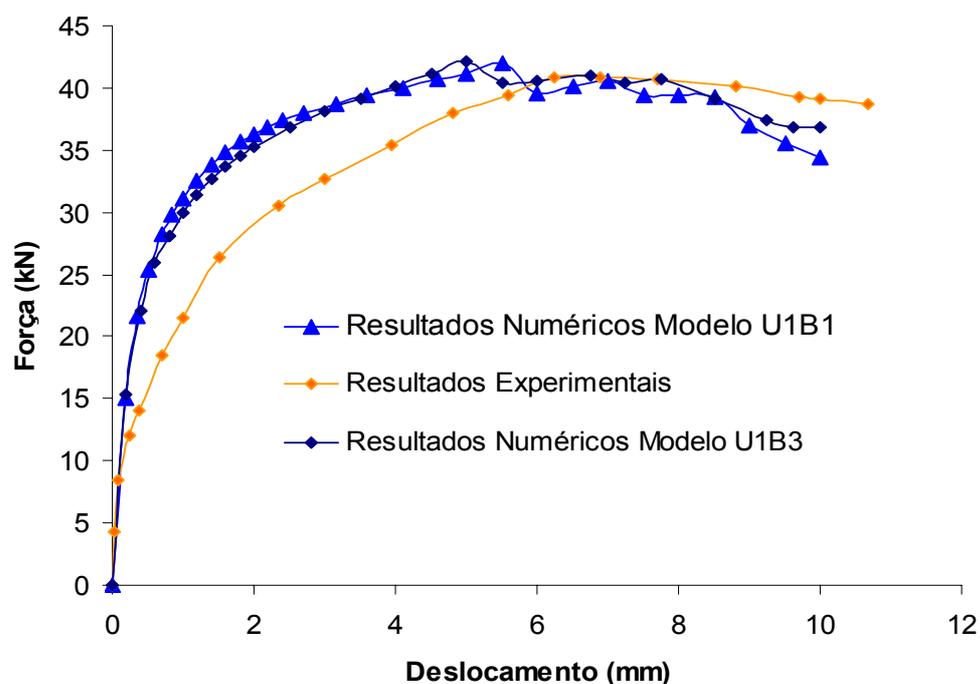


**Figura 4.36** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com três parafusos.

#### 4.4.3 Ligação parafusada em perfil U com dois parafusos

Para este tipo de ligação, foram construídos dois modelos numéricos denominados U1B1 e U1B3, cujos resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais apresentados em MAIOLA (2004). Esta comparação foi estabelecida por meio da relação Força x Deslocamento, cujos resultados estão apresentados na figura 4.37.

Analisando-se o gráfico apresentado na figura 4.37, nota-se que os modelos numéricos apresentaram rigidez ao deslocamento superior àquela rigidez observada no ensaio experimental. Este fato fica mais evidente para deslocamentos menores que 6 mm. Para deslocamentos acima de 6 mm, os resultados numéricos apresentaram razoável concordância com os resultados experimentais.

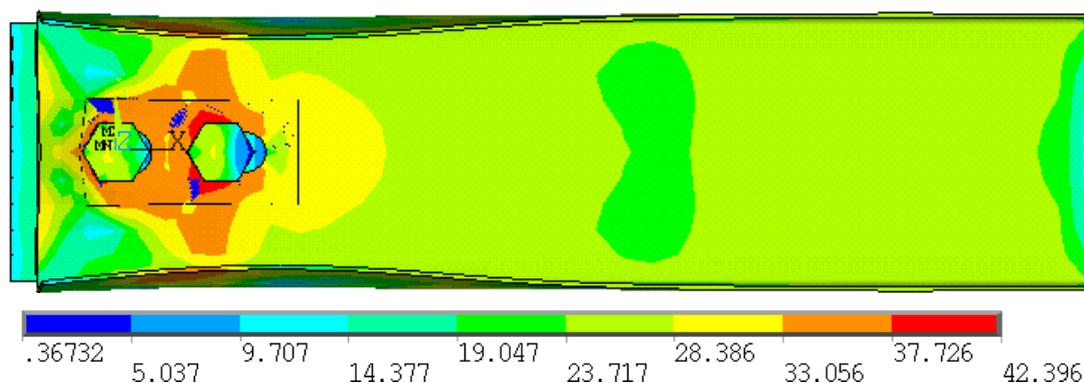


**Figura 4.37** – Diagrama Força x Deslocamento para a ligação parafusada em perfil U com dois parafusos.

Comparando-se a força última obtida para os três casos, nota-se que nos modelos numéricos, a força última obtida resultou igual a 41,98 kN para o modelo U1B1 e 42,11 kN para o modelo U1B3, enquanto que no ensaio experimental, esta mesma força resultou igual a 40,82 kN, com diferenças da ordem de 2,84 % e 3,16%, respectivamente.

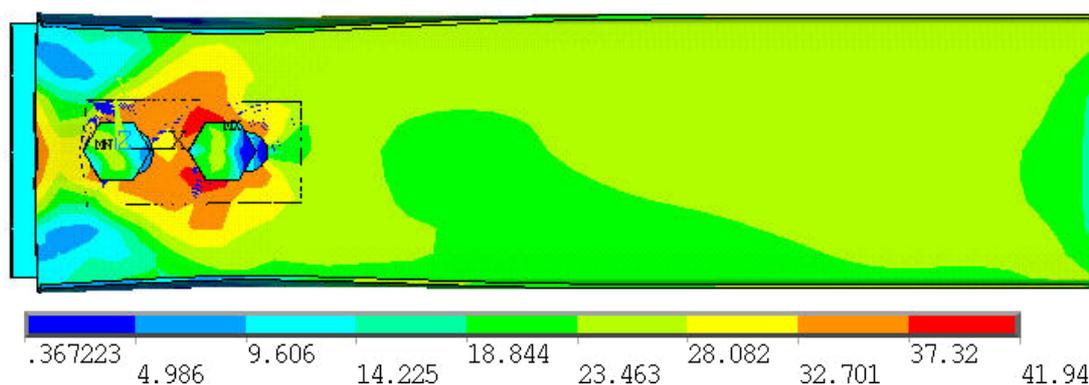
As figuras 4.38 e 4,38 apresentam as curvas de isotensões, tomadas com referência às tensões equivalentes de von Mises, para os modelos numéricos U1B1 e U1B3 respectivamente. Nestas figuras, pode-se observar que nas bordas do furo, na seção em que está localizado o primeiro parafuso, aparecem tensões elevadas, da ordem das tensões de plastificação do aço, razão pela qual a região em questão pode ser

indicada como forte candidata para a ocorrência da ruptura do material, como de fato foi possível constatar no ensaio experimental.



**Figura 4.38** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1B1.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

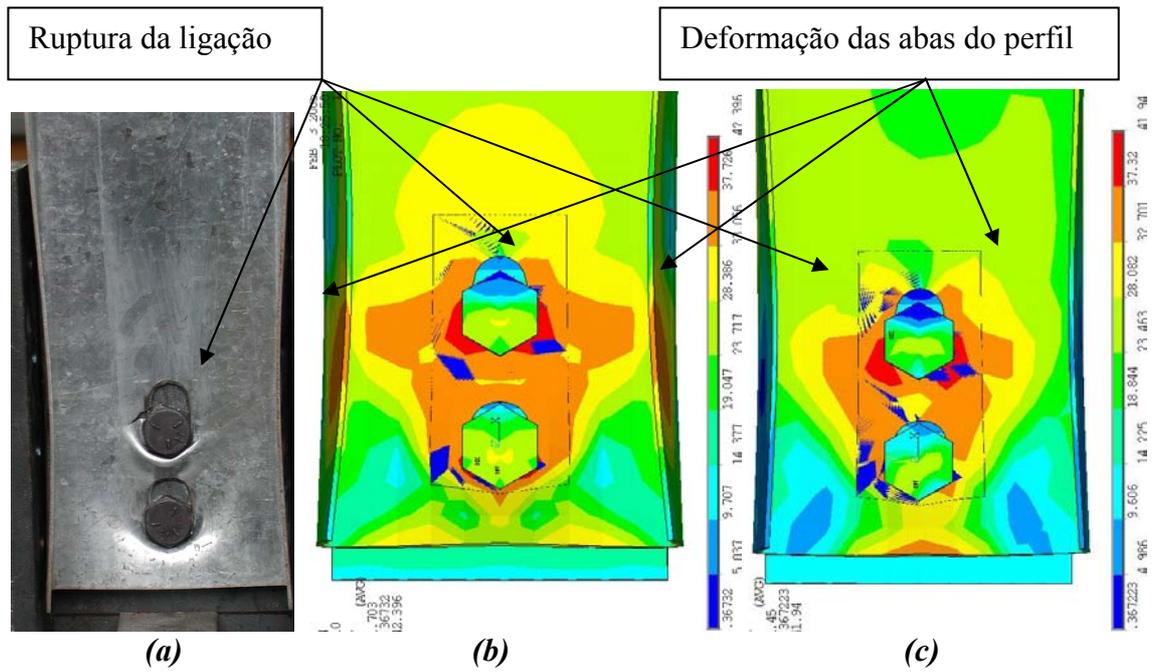


**Figura 4.39** – Curvas de isotensões (equivalente de Mises), para o modelo U1B3.

Unidade:  $\text{kN/cm}^2$

A configuração deformada observada no ensaio experimental foi satisfatoriamente recuperada nos modelos numéricos. Este fato está representado na figura 4.40, em que mostrada, em detalhe, a ruptura e a configuração deformada da ligação no ensaio experimental (figura 4.40a).

Nesta mesma figura, é mostrada ainda uma ampliação da região em que estão localizados os dois parafusos dos modelos numéricos U1B1 (figura 4,40b) e U1B3 (figura 4,40c), em que podem ser observadas as deformações ocorridas nas mesas do perfil, em concordância com as deformações obtidas no ensaio experimental.



**Figura 4.40** – Detalhes da ruptura da ligação em perfil U com dois parafusos



## CONCLUSÕES

## 5

---

A proposta do presente trabalho objetivou analisar numericamente o comportamento estrutural de ligações parafusadas, em chapas finas e em perfis formados a frio, submetidas à tração axial. Para tanto, foram construídos modelos numéricos com vistas a representar, com o maior rigor possível, os elementos das ligações estudadas, a fim de se estabelecer um padrão de modelagem numérica cujos resultados resultassem confiáveis e satisfatórios.

Para tanto, optou-se por uma análise tridimensional para os modelos de ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio em razão de possíveis dificuldades em estabelecer condições de contorno em campo bidimensional e, conseqüentemente, uma representação pouco satisfatória dos vínculos reais destas ligações.

Os modelos numéricos foram construídos variando-se ainda, além das propriedades inerentes a cada modelo experimental, o tipo de elemento finito utilizado. Foram testados os elementos finitos denominados pelo ANSYS como **SOLID 45**, **SOLID 95** e **SOLID 185**.

Inicialmente, os modelos numéricos foram construídos utilizando-se o elemento finito **SOLID 185**. Para a maioria dos modelos numéricos estudados, este elemento finito apresentou resultados relativamente satisfatórios quando comparados aos resultados experimentais, ou seja, a curva *força x deslocamento* apresentada nos ensaios experimentais foi recuperada de maneira satisfatória. Observou-se que a configuração

deformada das ligações apresentadas nos ensaios foi recuperada com bastante concordância, conforme apresentado nos capítulos anteriores.

Porém, para poucos modelos, como por exemplo, para o modelo numérico denominado C2A3 (apresenta apenas uma seção de parafusos na direção perpendicular à força aplicada) os resultados não foram satisfatórios, ou seja, a curva *força x deslocamento* apresentada nos ensaios experimentais não foi recuperada de maneira satisfatória. Tendo em vista a pouca eficiência do elemento utilizado nos modelos para alguns tipos de ligação, buscou-se, como alternativa para melhorar a modelagem, a utilização de outros elementos finitos.

Em uma segunda etapa, foi utilizado o elemento finito **SOLID 45**, o qual apresenta recursos numéricos que permitem representar as propriedades físicas, (plasticidade, grande capacidade de deformação) semelhantes àquelas referentes ao elemento **SOLID 185**. Em princípio, este elemento finito seria utilizado apenas naqueles modelos numéricos cujos resultados obtidos com o elemento finito **SOLID 185** não foram bastante satisfatórios.

No entanto, como os resultados apresentados na modelagem numérica utilizando-se o elemento **SOLID 45** resultaram bastantes satisfatórios quando comparados aos resultados experimentais, achou-se por bem utilizar este elemento finito em todos os modelos de ligações analisadas neste trabalho, mesmo naqueles em que o elemento finito **SOLID 45** havia apresentado resultados satisfatórios.

Vale salientar que para todos os modelos numéricos analisados, o elemento finito **SOLID 45** apresentou resultados mais satisfatórios ou equivalentes aos resultados obtidos com a utilização do elemento finito **SOLID 185**.

A razão pela qual o elemento finito **SOLID 185** apresentou resultados menos satisfatório quando comparados ao elemento finito **SOLID 45**, pode estar associado às características do mesmo. Uma destas características está relacionada aos recursos que permitem simular materiais com comportamento *hipoelástico e hiperelástico*, aspectos que não estão necessariamente relacionados ao aço, objeto de estudo enquanto material de interesse.

Além da utilização do elemento finito **SOLID 45**, foi também utilizado o elemento finito **SOLID 95**. No entanto, notou-se um aumento significativo no esforço computacional, ou seja, o tempo de processamento, neste caso, triplicou. Por esta razão,

mesmo apresentando resultados equivalentes aos resultados obtidos com o elemento finito **SOLID 45**, a sua utilização em outros modelos foi desconsiderada.

A razão pela qual o elemento finito **SOLID 95** apresentou resultados equivalente aos resultados apresentados com a utilização do elemento finito **SOLID 45** pode ser explicada em função de suas características físicas, semelhantes entre ambos os elementos. O elemento finito **SOLID 95** representa uma versão superior se comparado ao **SOLID 45**, o que justifica o aumento no tempo de processamento (esforço computacional), uma vez que o elemento **SOLID 95** apresenta 20 nós enquanto o elemento finito **SOLID 45** apresenta apenas 4 nós.

Desta maneira, pode-se concluir que para a modelagem numérica aqui realizada o elemento finito que apresenta melhores resultados é o **SOLID 45**, razão pela qual esse fica como sugestão para aplicação em modelagens futuras, cujas características sejam análogas àquelas identificadas nos modelos aqui analisados.

A estratégia de modelagem numérica adotada no presente trabalho mostrou-se bastante eficiente, quando os resultados obtidos por meio dos modelos numéricos foram comparados com resultados experimentais obtidos em laboratório. Observou-se que para todos os modelos numéricos analisados, a força última obtida é praticamente coincidente àquela identificada nos ensaios experimentais.

Vale destacar ainda que a configuração deformada e os modos de falha obtidos nos modelos numéricos resultaram bastante próximos àqueles observados nos ensaios experimentais, aspecto que permite admitir a confiabilidade da estratégia aqui adotada para a construção dos modelos.

É importante salientar que nos ensaios experimentais ocorreram, como esperado, acomodações dos parafusos devido ao fato de o diâmetro dos furos resultar maior quando comparado ao diâmetro dos parafusos. Estas acomodações ocorreram quando a força aplicada, superava a resistência ao atrito das ligações.

Para simular as acomodações em questão, da ordem de 1 mm a 2 mm, seria necessária a construção de modelos numéricos mais complexos, tendo como consequência um aumento significativo no esforço computacional (tempo de processamento). Por esta razão, na estratégia numérica proposta nesse trabalho, optou-se pela construção de modelos numéricos mais simples, com vistas à determinação da

força última e dos níveis de tensões nas regiões próximas aos parafusos, bem como na recuperação da configuração deformada das chapas e dos perfis.

Em razão da simplificação adotada, foram suprimidos nos diagramas *Força x Deslocamentos*, os trechos que representavam as acomodações dos parafusos nos ensaios experimentais, com o objetivo de possibilitar comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais.

Um aspecto a se destacar refere-se ao fato de que nos ensaios experimentais, a rigidez ao deslocamento após a acomodação dos parafusos resultou reduzida. O diagrama *Força x Deslocamentos* apresenta mudança de inclinação após a ocorrência das acomodações dos parafusos, ou seja, esta mesma curva se apresenta mais abatida, resultando em uma menor rigidez ao deslocamento.

Acredita-se que este aspecto pode ser atribuído ao fato de ocorrer deformações plásticas quando o fuste do parafuso “choca-se” com a borda do furo no processo de acomodação, uma vez que não se pode estabelecer com precisão suficiente os fenômenos inerentes à acomodação dos parafusos. No entanto, a hipótese de ocorrências de plastificação, inclusive com acomodação dos parafusos é razoável, uma vez que no ensaio experimental a ligação perde rigidez ao deslocamento quando os parafusos acomodam-se nas bordas dos furos.

Este aspecto pode ser observado nas figuras que mostram a curva *força x deslocamentos*, em que são comparados os resultados numéricos com os resultados experimentais. Nestas curvas, nota-se que no início, antes de ocorrer a acomodação dos parafusos, a rigidez apresentada nos ensaios experimentais, foram praticamente as mesmas obtidas nos modelos numéricos. Após as acomodações, os modelos numéricos apresentaram rigidez maior, quando comparada àquelas obtidas nos ensaios experimentais.

Nos modelos numéricos, as acomodações dos parafusos não foram consideradas como já mencionado anteriormente. Por esta razão, os modelos numéricos, em geral apresentaram maior rigidez aos deslocamentos nos trechos subsequentes às acomodações dos parafusos ocorridas nos ensaios experimentais. Este aspecto está representado nos diagramas *Força x Deslocamentos* apresentadas no capítulo 4.

Tendo em vistas os fatos anteriormente citados, pode-se concluir que é possível construir modelos numéricos para ligações parafusadas em chapas finas e em perfis

formados a frio bastante simples, e que representem satisfatoriamente os ensaios experimentais. Nesse aspecto, a modelagem numérica permite facilitar o estudo destas ligações, uma vez que esta apresenta custos e tempo bastante reduzidos em comparação aos ensaios experimentais.

Finalmente, acredita-se que determinação com razoável precisão do coeficiente  $C_t$  para as ligações parafusadas utilizando este padrão de modelagem possa ser obtida satisfatoriamente. No entanto, é importante ressaltar que estudos adicionais devem ser realizados com o objetivo de melhorar cada vez mais os resultados obtidos com a análise numérica, para que os resultados obtidos numericamente possam ser utilizados com segurança e confiabilidade para se determinar o coeficiente  $C_t$  em ligações parafusadas, com vistas a futuras revisões do texto normativo brasileiro.

## **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente trabalho analisou ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio apenas em temperatura ambiente. Dentre os resultados satisfatoriamente obtidos, destacam-se as configurações deformadas identificadas nos modelos numéricos as quais foram idênticas àquelas obtidas nos ensaios experimentais.

Dessa forma, fica como sugestão a utilização do padrão de modelagem numérica aqui adotado, para ligações parafusadas em chapas finas e em perfis formados a frio em situação de incêndio, situação em que a deformação total (ou configuração deformada), que aparece em resposta às reduções da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade, é de fundamental importância para a determinação da temperatura crítica dos elementos e, conseqüentemente, os esforços resistentes de cálculo.

Fica ainda como sugestão para estudos futuros, a construção de modelos numéricos mais sofisticados que possam prever a acomodação dos parafusos e eventuais deformações permanentes na região da ligação, bem como a modelagem de elementos formados a frio comprimidos e fletidos, em temperatura ambiente.



## BIBLIOGRAFIA

---

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS (1995). Structural nonlinearities: user's guide for revision 6.0.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (1994). *AISC-LRFD - Load and resistance factor design*. Chicago.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1996). *LRFD - Load and resistance factor design specification for cold-formed steel structural members*. Washington, DC.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (2001). *North American Specification for the design of cold-formed steel structural members*. Washington: AISI.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1967) *Cálculo de estruturas de aço, constituídas por perfis leves; NB-143*. ABNT, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1967) – NBR 6355. *Perfis estruturais, de aço, formados a frio*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR 6355 - Perfis estruturais, de aço, formados a frio*. Rio de Janeiro, ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). *NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio; NBR 14762*, Rio de Janeiro.

CHARIS, J. G; MINAS, E. L. (2003). *Influence of equivalent bolt length in finite element modeling of T-stub steel connections*. *Computers and Structures*. 81 (2003) 595–604.

CHODRAUI, G. M. B. (2003). *Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão*. São Carlos. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

CHONG, K. P.; MATLOCK, R. B. (1975). Light-gage steel bolted connections without washers. *Journal of the Structural Division*. v.101, n.ST7, p.1381-1391, July 1975

CHUNG, K. F.; IP, K. H. (2001). *Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections*. *Engineering Structures* 23 (2001) 1115-1125.

CHUNG, K. F.; IP, K. H. (2000). *Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loadin*. *Engineering Structures* 22 (2000) 1271-1284.

CHUNG, K. F.; Lau, L. (1999). *Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members*. *Engineering Structures* 21 (1999) 898-911.

COLD-FORMED STEEL IN TALL BUILDINGS. (1993). *Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Committee S37 ; [Colab] Rolf Baehre, Ton Toma*. New York : Mcgraw-Hill, 1993.

DAVIES, R; PEDRESCHI, U; SINHA, B. P. (1996). The shear behaviours of press-joining in cold-formed steel structure. *Thin-Walled Structures* Vol. 25, No. 3, pp. 153 170, 1996.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (1996). *Eurocode 3 – Design for steel structures: part 1.3 – general rules: supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting*, Brussels.

GESCHWINDNER, L.F; DISQUE, O.R; BJORHOVDE, R. (1994). *Load and Resistance Factor design of Steel structures*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

HANCOCK, G. J; MURRAY, T. M; ELLIFRITT, D. S. (2001). *Cold-formed steel structures to the AISI specification*. New York, Marcel dekker, Inc.

JAVARONI, C. E. (1999). *Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

KIRCHHOF, L.D. (2004) *Uma contribuição ao estudo de vigas mista aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio*. São Carlos. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

LIM, J. B. P; NETHERCOT, D. A. (2003). *Ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel members. Thin-Walled Structures. 41 (2003) 1019–1039.*

MAIOLA, C.H.; MALITE, M.; MUNAIAR NETO, J. (2002a). *Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio.* In: XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural, Anais, Universidade de Brasília – UNB, Brasília – DF.

MAIOLA, C.H.; MALITE, M.; MUNAIAR NETO, J. (2002c). *Ligações parafusadas em perfis formados a frio: ênfase por ruptura na tração na seção líquida.* In: II CICOM – Congresso Internacional da Construção Metálica, Anais, Shopping Frei Caneca, São Paulo, SP, SME – Sociedade Mineira de Engenheiros.

MAIOLA, C.H. (2004) *Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio.* São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

MALITE, M. (1993a) *Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada.* São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

MALITE, M. (1993b). *Estruturas de aço constituídas por perfis de chapa dobrada: dimensionamento de ligações.* São Carlos, EESC-USP, 1993. 49p. (publ. 022/93).

RHODES, J. (1991). *Design of Cold Formed Steel Members.* London and New York, Elsevier Applied Science.

ROGERS, C. A; HANCOCK, G. J. (1999) *Bolted connectoin design for steels less than 1.0 mm thick. Journal of Construction Steel Research.*

SALMON, C.G.; JOHNSON, J.E. (1996). *Steel Structures, Design and Behavior, Fourth Edition.* New York, Harper Collins College Publishers.

SELEIM, S; LABOUBE, R. (1996). *Behavior of Low Ductility Steel in Cold-Formed Steel Connections. Thin-Walled Structures. Vol. 25, N° 2, p. 135–151, 1996.*

STANDARDS AUSTRALIA/STANDARDS NEW ZEALAND (1996), *AS/NZS 4600: Cold formed steel structures.* 1996

VALENCIANI, V.C. (1997) *Ligações em Estruturas de Aço.* São Carlos. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

WINTER, G. (1959). *Cold-formed, light-gage steel construction. Journal Structural Division. v.85, n.ST9, November 1959.*

YU, W. W. (1982). *AISI design criteria for bolted connections*. In: *International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, 6., St. Louis, Missouri, U.S.A., October 15-16, 1998. *Proceedings*. Rolls, University of Missouri.

YU, W. W.; LaBOUBE, R. A. (1997). *University of Missouri-Rolla research on cold-formed steel structures*. *Thin-Walled Structures*. v.28, n.3/4, p. 213-223, 1997

YU, W.W. (2000). *Cold-formed steel design*. New York, John Wiley & Sons.

## RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DEVIDO AO RASGAMENTO OU ESMAGAMENTO DAS PAREDES DOS FUROS NAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM CHAPAS DE AÇO.

---

Na ruptura da ligação por esmagamento ocorre o enrugamento da chapa de aço em frente ao parafuso, ocasionando a deformação excessiva da chapa na região do furo (fig.2.5b). As ligações em que a ruptura acontece pelo rasgamento entre furos ou entre furo e borda, ocorre inicialmente o enrugamento da chapa de aço em frente ao parafuso seguido pelo rasgamento da chapa.

O rasgamento acontece por duas linhas de fratura que se iniciam nas bordas dos furos e caminham aproximadamente à 45° com o eixo longitudinal da ligação, estendendo-se da região do enrugamento do material até a extremidade da chapa (ruptura entre furo e borda, figura 2.5a), ou até o furo adjacente (esmagamento da parede do furo, figura 2.5b).

A resistência de cálculo da ligação para este tipo de falha é determinada, basicamente em função de três variáveis: o diâmetro do parafuso ( $d$ ), a espessura da chapa ( $t$ ) e a resistência última do material da chapa ( $f_u$ ). Além destas três variáveis, que são comuns em todas as equações apresentadas pelas normas vigentes, nacional e estrangeiras, existem outras que são particulares de cada norma, as quais levam em consideração o tipo de ligação, ou seja, cisalhamento simples ou duplo, a utilização ou não de arruelas junto à cabeça e à porca do parafuso, e também a relação  $d/t$ .

- **Prescrições da Norma do AISI (2001)**

A North American Cold-formed Steel Specification (2001), adotada pelos Estados Unidos, México e Canadá, considera na verificação da ligação, para este tipo de falha, a utilização ou não de arruelas junto à porca e à cabeça do parafuso. É considerada ainda a distinção quanto ao tipo de ligação, ou seja, ligação submetida ao cisalhamento simples ou duplo. Esta norma traz em suas prescrições duas equações para o cálculo da resistência ao esmagamento da parede do furo em ligações parafusadas em chapas finas, uma que considera a deformação da borda do furo do parafuso e outra que não leva em consideração esta deformação.

Quando a deformação da borda do furo é considerada, a resistência nominal de cálculo ( $P_n$ ) é dada pela seguinte equação:

$$P_n = (4,64\alpha t + 1,53)dtf_u \quad (\text{A.1})$$

Utilizando as unidades no Sistema Internacional (SI), com  $t$  em mm, vale para a equação A.1,  $\alpha = 0,0394$ . Para a resistência de cálculo ( $\phi P_n$ ), os Estados Unidos e México adotam o coeficiente  $\phi = 0,65$ , enquanto o Canadá adota  $\phi = 0,55$ .

Na verificação do rasgamento entre furo e borda, a resistência nominal de cálculo ( $P_n$ ) é dada pela seguinte equação:

$$P_n = tef_u \quad (\text{A.2})$$

Para a equação A.2 vale:

$e$  = distancia medida, na direção da força, entre o centro de um furo à borda do furo adjacente, ou entre o centro do furo à extremidade da chapa (figura 2.6). As demais variáveis já foram definidas anteriormente.

Para esta verificação, os Estados Unidos e México adotam os mesmos valores para o coeficiente  $\phi$ , ou seja:

Quando  $f_u/f_y \geq 1,08$ ,  $\phi = 0,70$ ;

Quando  $f_u/f_y \leq 1,08$ ,  $\phi = 0,60$ ;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço.

Além das verificações apresentadas anteriormente, devem ser observadas as distâncias mínimas entre furos e entre furo e borda da chapa, estabelecida em norma. Os Estados Unidos, o México e o Canadá adotam estas distâncias de acordo com a tabela A.1 apresentada a seguir.

Tabela A.1 – Distancias mínimas entre furos, e entre furo e borda.

	Distância mínima entre centro de um furo e borda do furo adjacente.	Distância mínima entre centro do furo e borda da chapa
Estados Unidos e México	3d	1,5d
Canadá	2,5d	1,5d

Quando a deformação da borda do furo não é considerada, a resistência nominal de cálculo ( $P_n$ ) é determinada pela seguinte equação:

$$P_n = m_f C d t f_u \quad (\text{A.3})$$

Para a equação A.3 valem:

$P_n$  = Resistência nominal de cálculo;

$C$  = Fator de esmagamento que considera a relação  $d/t$  conforme tabela A.2;

$m_f$  = fator que considera o tipo de ligação como mostra a tabela A.3;

$d$  = diâmetro do parafuso;

$t$  = espessura da chapa;

$f_u$  = resistência última do aço.

Tabela A.2 – Fator de esmagamento, (C)

Espessura da chapa (mm)	Relação $d/t$	C
$0,61 \leq t < 4,76$	$d/t < 10$	3.0
	$10 \leq d/t \leq 22$	$4 - 0.1*(d/t)$
	$d/t > 22$	1.8

Para a resistência de cálculo ( $\phi P_n$ ), os Estados Unidos e México adotam o coeficiente  $\phi = 0,60$ , enquanto o Canadá adota  $\phi = 0,50$ .

Tabela A.3 – Fator  $m_f$  para o tipo de ligação

Tipo de ligação	$m_f$
Cisalhamento simples ou face externa das chapas submetidas ao cisalhamento duplo com a utilização de arruelas junto à cabeça e junto à porca do parafuso.	1,00
Cisalhamento simples ou face externa das chapas submetidas ao cisalhamento duplo sem a utilização de arruelas ou com o uso de apenas uma arruela.	0,75
Face interna das chapas submetidas ao cisalhamento duplo com ou sem a utilização de arruelas	1,33

- **Prescrições do EUROCODE 3 parte 1.3:1996 e da NBR 14762:2001**

O EUROCODE 3 parte 1.3:1996 e a norma brasileira NBR14762:2001, não fazem distinção quanto ao uso ou não de arruelas e nem quanto ao tipo de ligação, ou seja, cisalhamento simples ou duplo. Para estas duas normas, a verificação da resistência de cálculo ao rasgamento ou esmagamento da borda do furo ( $F_{Rd}$ ), é feita pelas seguintes equações:

- EUROCODE 3 parte 1.3:1996:

$$F_{Rd} = 2,5f_u dt / \gamma, (\gamma = 1,25) \quad (A.4)$$

– NBR 14762:2001:

$$F_{Rd} = 2,4f_u dt / \gamma, (\gamma = 1,35) \quad (A.5)$$

A verificação da resistência de cálculo à ruptura entre furo e borda,  $F_{Rd}$  é dada pelas seguintes equações:

- EUROCODE 3 parte 1.3:1996:

$$F_{Rd} = f_u e t / 1,2 / \gamma, (\gamma = 1,25) \quad (A.6)$$

– NBR 14762:2001:

$$F_{Rd} = f_u e t / \gamma, (\gamma = 1,35) \quad (A.7)$$

A distância mínima entre o centro de um furo e a borda do furo adjacente adotadas pelo EUROCODE 3 parte 1.3:1996 e pela NBR 14762:2001 são  $3d$  e  $2,5d$ , respectivamente, e para a distância mínima entre o centro do furo e a borda da chapa, as duas normas adotam o valor  $1,5d$ .

- **Comparação da norma NBR 14762:2001 com o EUROCODE e com a especificação do AISI (2001)**

Com o objetivo de comparar a norma brasileira, NBR 14762:2001, com outras normas estrangeiras, será apresentada a seguir a tabela A.4, em que são comparadas as forças resistentes de cálculo ( $F_{Rd}$ ), para o estado limite último por esmagamento da parede do furo. Para facilitar a comparação, foi tomada a relação  $d/t < 10$ .

Nesta tabela, pode-se observar o caráter conservador da norma brasileira NBR14762:2001, a qual apresenta valores de cálculo superiores somente no caso referente ao cisalhamento simples sem a utilização de arruelas.

Tabela A.4 - Forças resistentes de cálculo para a falha por esmagamento.

Caso*	AISI/2001 (EUA e México) (1)	EUROCODE (2)	NBR (3)	(3)/(1)	(3)/(2)
a	$F_{Rd} = 3,00f_u d t / \gamma$ $\gamma = 1/\phi = 1/0,60 = 1,67$	$F_{Rd} = 2,50f_u d t / \gamma$ $\gamma = 1,25$	$F_{Rd} = 2,40f_u d t / \gamma$ $\gamma = 1,35$	0,99	0,89
b	$F_{Rd} = 3,99f_u d t / \gamma$ $\gamma = 1/\phi = 1/0,60 = 1,67$			0,744	
c	$F_{Rd} = 2,25f_u d t / \gamma$ $\gamma = 1/\phi = 1/0,60 = 1,67$			1,32	

\*Casos, adotados somente pela North American Cold-Formed Steel Specification- (AISI/2001):

Para ligações que utilizam arruelas junto à cabeça do parafuso e a porca:

a) cisalhamento simples ou face externa das chapas submetidas ao cisalhamento duplo.

Para ligações que utilizam somente uma arruela ou nenhuma:

b) face interna das chapas submetidas ao cisalhamento duplo;

c) cisalhamento simples ou face externa das chapas submetidas ao cisalhamento duplo.